

**Erprobung von
Elektrofahrzeugen der neuesten Generation
auf der Insel Rügen**

und

Energieversorgung für Elektrofahrzeuge durch Solarenergie und

Stromtankstellen



Abschlußbericht

DAUG - Deutsche Automobilgesellschaft mbH, Braunschweig (Zirkow)

**Erprobung von
Elektrofahrzeugen der neuesten Generation
auf der Insel Rügen
und
Energieversorgung für Elektrofahrzeuge durch Solarenergie und
Stromtankstellen**

Abschlußbericht

gefördert vom

Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft,

Forschung und Technologie (BMBF), Bonn

und vom

Wirtschaftsministerium Mecklenburg-Vorpommern,

Schwerin

Förderkennzeichen:

TV 9225 und

0329376A

Dezember 1996

Projektleitung:

Prof.-Dr.-Ing. C. Voy

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Der vorliegende Abschlußbericht stellt den Projektinhalt und die Ergebnisse der Arbeiten für ein vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) sowie dem Wirtschaftsministerium Mecklenburg Vorpommern gefördertes Vorhaben dar.

Verantwortlich für den Inhalt dieses Berichtes sind die Autoren.

Der Bundesminister für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie in Bonn übernimmt keine Gewähr, insbesondere für die Richtigkeit, die Gesamtheit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Bearbeitung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, dem BMBF vorbehalten.

An dieser Stelle möchten wir uns nochmals bei allen Projektbeteiligten bedanken, die mit Ihrem großartigen Engagement einen stets reibungslosen Projektablauf gewährleistet haben.

Besonders hervorzuheben sind dabei die Fahrzeugbetreiber auf der Insel Rügen, die trotz teilweise schwieriger Bedingungen den Versuch zu einem echten Alltags-test werden ließen.

Der Abschlußbericht kann zusammen mit einer deutschen und englischen Kurzfassung bei der Deutschen Automobilgesellschaft in Braunschweig auf CD-Rom bezogen werden.

Autoren:

Name	Firma / Institut	Anschrift	Telefon
Prof. Voy Dr. Obojski Roux Heber Braitling	Deutsche Automobilgesellschaft mbH (DAUG)	38114 Braunschweig Julius-Konegen-Str. 24	0531 / 59093-0
Prof. Bach Dr. Treetz Dr. Ermisch	Hochschule für Technik und Wirtschaft Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik (HTW)	01069 Dresden Friedrich-List-Platz 1	0351 / 462-2781
Dr. Eden Dr. Höpfner Dr. Patyk Dr. Reinhardt Prof. Zenger	ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu)	69120 Heidelberg, Wilckensstr. 3	06221 / 4767-0
Jakowski Herrmann	Adam Opel AG TEZ VE-Elektronik 80-17 (OPEL)	65423 Rüsselsheim	06142 / 66-5725

Name	Firma / Institut	Anschrift	Telefon
Heidenreich	BMW AG Abt. EE7 (BMW)	80788 München Postfach 40 02 40	089 / 382-46087
Helber	Mercedes-Benz AG EP/VV, HPC T724 (Mercedes-Benz)	70322 Stuttgart,	0711 / 17-41995
Werner	Mercedes-Benz AG EG/GK,HPC B206 (Mercedes-Benz)	70322 Stuttgart	0711 / 17-22737
Eggers	Gottlob Auwärter GmbH+Co (NEOPLAN)	70567 Stuttgart Vaihinger Str. 118-122	0711 / 7835-316
Beyer	Volkswagen AG (VW)	38436 Wolfsburg K-EFFE Kst. 1894	05361 / 920302
Dr. Dustmann	AEG Anglo Batteries (AABG)	89077 Ulm Söflinger Straße 100	0731 / 933-1652
Dr. Birnbreier, Dr. Mennicke	ABB Hochenergiebatterie (ABB-BAT)	69123 Heidelberg Eppelheimer Str. 82	06221/701-760
Dr. Warthmann	DAUG-HOPPECKE (DAHO)	73733 Esslingen Emil-Kessler-Str.	0711 / 17-66016
Kück Weiß	Hanseatische Elektrotankstellen HEVAG-PreussenElektra-Sydkraft Gbr (HET)	30457 Hannover Tresckowstraße 5	04141 / 799538

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungen und Tabellen	IX
Abkürzungsverzeichnis	XVI

1. DAUG-Projektleitung	
1.1 Projektablauf	1
1.2 Standort Zirkow	2
1.3 Fahrzeugeinsatz	2
1.3.1 Betreiberauswahl	2
1.3.2 Einsatzbedingungen	5
1.4 Fahrleistungen	7
1.5 Service und Baugruppenzuverlässigkeit	10
1.5.1 Standzeiten	10
1.5.2 Baugruppenzuverlässigkeit	12
1.6 Einsatzerfahrungen und Akzeptanz	18
1.7 Öffentlichkeitsarbeit	20
1.7.1 Messen	21
1.7.2 Besuche	21
1.7.3 Pressearbeit	24
2. BMW	
2.1 Fahrzeugaufbau	25
2.2 Auslieferung der Fahrzeuge	25
2.3 Einsatzbereiche und Nutzerverhalten	26
2.4 Technische Daten, technische Einzelheiten	27
2.5 Beschreibung der Antriebssysteme	30
2.6 Betriebserfahrungen, technische Modifikationen	30
2.6.1 Wechsel der Batteriesysteme	30
2.6.2 Vakuumdefekte bei Na/NiCl ₂ -Batterien	30
2.6.3 Bremskraftunterstützung	31
2.6.4 Antrieb	31
2.6.5 Fahrwerk	31
2.6.6 12V-Bordnetz	31
2.6.7 Heizsystem	32
2.6.8 Allgemeines	32
2.7 Service	32
2.8 Zuverlässigkeit der Komponenten	33
2.8.1 Traktionsbatterien:	33
2.8.1.1 Na/NiCl ₂	33
2.8.1.2 NiCd	33
2.8.2 Ladegeräte, DC/DC-Wandler:	34
2.8.3 Antrieb	34
2.8.4 Heizung	34
2.9 Ergebnisse, Verbesserung und Weiterentwicklung von Bauteilen	34
2.9.1 Antrieb	35
2.9.2 Heizung	35
2.9.3 Ladevorgang	35
2.10 Meßtechnik und Datenerfassung	35
2.11 Versuchsbewertung (Was brachte Rügen?)	36

3.	Mercedes Benz	
3.1	Mercedes-Benz Elektro-Pkw W 201-E / MB 190	37
3.1.1	Fahrzeugaufbau	37
3.1.2	Technische Daten Mercedes-Benz PKW-W 201-E	41
3.1.3	Nutzung der Fahrzeuge	42
3.1.4	Betriebserfahrungen	44
3.1.4.1	Allgemeine Betriebserfahrungen	44
3.1.4.2	Zuverlässigkeit von Komponenten	45
3.1.4.3	Meßergebnisse	50
3.1.5	Versuchsbewertung und Ausblick	50
3.2	Mercedes-Benz Transporter MB 100 E	52
3.2.1	Fahrzeugaufbau	52
3.2.1.1	Fahrzeugausführung	52
3.2.1.2	Unterbringung der Traktionsbatterie	53
3.2.1.3	Einbau des Antriebssystems	54
3.2.1.4	Hilfsaggregate	54
3.2.2	Beschreibung der Antriebssysteme	56
3.2.2.1	Gleichstrom Nebenschlußantrieb	56
3.2.2.2	Asynchron-Antriebssystem	57
3.2.2.3	Synchron-Antriebssystem	58
3.2.3	Übersicht Technische Daten	61
3.2.4	Auslieferung der Fahrzeuge	62
3.2.5	Einsatzbereiche, Nutzerverhalten	64
3.2.6	Serviceaufgaben	65
3.2.7	Betriebserfahrungen, technische Modifikationen, Nachrüstarbeiten	65
3.2.8	Zuverlässigkeit der Komponenten	66
3.2.9	Ergebnisse - Verbesserung und Weiterentwicklung	69
3.2.10	Meßtechnik, Datenerfassung	71
3.2.11	Versuchsbewertung, Was brachte Rügen	72
4.	NEOPLAN	
4.1	Fahrzeugaufbau des NEOPLAN N 8008 E	74
4.1.1	Ausgangspunkt	74
4.1.2	Sicherheitsmerkmale	75
4.1.3	Auswahl des Batteriesystems	76
4.1.4	Elektrofahrzeugspezifische Komponenten	77
4.2	Auslieferung und Einsatz der Fahrzeuge	79
4.3	Einsatzbereiche und Nutzerverhalten	80
4.3.1	Einsatzbereiche der NEOPLAN Elektrobusse	80
4.3.2	Nutzerverhalten	81
4.4	Technische Daten des NEOPLAN N 8008 E	81
4.5	Antriebssystem des NEOPLAN N 8008 E	83
4.6	Betriebserfahrungen und technische Weiterentwicklungen	83
4.6.1	Betriebserfahrungen:	83
4.6.2	Technische Weiterentwicklungen	83
4.6.3	Antriebsmotor und Controller	84
4.6.4	Getriebe	84
4.6.5	ABB Hochtemperatur Batterien Na/S und Management	84
4.6.6	Ladeeinrichtungen für Bordnetz und Antriebsbatterien	84
4.6.7	DC/DC Wandler	85
4.6.8	Antriebsanordnung	85

4.6.9	Fahrzeugfahrwerk und -aufbau	86
4.6.10	EMV-Messungen	86
4.7	Service	86
4.8	Weiterentwicklung von Bauteilen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit und des Wirkungsgrades	87
4.8.1	Antriebsmotor und Controller	87
4.8.2	Getriebe	87
4.8.3	Batteriesysteme	87
4.8.4	Ladeeinrichtungen für Batteriesysteme	87
4.8.5	Antriebsanordnung	88
4.8.6	Fahrzeugfahrwerk- und Aufbau	88
4.9	Meßtechnik und Datenerfassung	89
4.10	Zusammenfassung	89
5.	Adam Opel AG	
5.1	Fahrzeugaufbau	91
5.1.1	Package und Konstruktion	91
5.1.2	Elektrofahrzeugspezifische Komponentenentwicklung	93
5.2	Auslieferung der Fahrzeuge	93
5.3	Einsatzbereiche und Nutzerverhalten	94
5.3.1	Nutzerauswahlverfahren	94
5.3.2	Fahrzeugnutzung	94
5.3.3	Nutzerwechsel	95
5.3.4	Nutzerakzeptanz	96
5.3.5	Übersicht Nutzerstatus am offiziellen Versuchsende	96
5.3.6	Schnellladung	97
5.3.7	Besondere Ereignisse, Unfälle	98
5.3.8	Sonstiges	98
5.4	Technische Daten, technische Einzelheiten	99
5.4.1	Motor	99
5.4.2	Frequenzumrichter	99
5.4.3	Antriebstrang	100
5.4.4	Bordnetzversorgung	100
5.4.5	Standheizung	101
5.4.6	Unterdrucksystem	101
5.5	Batteriesysteme	101
5.5.1	NiCd-Batterien	102
5.5.2	Zebra-Batterien	104
5.6	Antriebssystem	105
5.7	Komponenten	105
5.7.1	Ladegeräte	105
5.7.2	DC/DC - Wandler	105
5.7.3	Standheizungen	105
5.7.4	Sonstige Komponentendefekte	106
5.8	Service	106
5.9	Ergebnisse, Betriebserfahrungen und technische Modifikationen	107
5.9.1	Fahrzeug	107
5.9.2	NiCd	107
5.9.3	Zebra	107
5.10	Ergebnisse	108
5.10.1	Fahrzeugnutzung	108
5.10.2	Ni/Cd - Batterien	108

5.10.3	Zebra - Batterien.....	108
5.11	Meßtechnik und Datenerfassung	108
5.12	Zusammenfassung, Bewertung	109
5.13	Status zum 30.06.96	109
6.	Volkswagen	
6.1	CityStromer	110
6.1.1	Fahrzeugaufbau	110
6.1.2	Auslieferung der Fahrzeuge	111
6.1.3	Fahrzeug - Einsatz	111
6.1.4	Technische Daten des Golf-Citystromers	112
6.1.5	Beschreibung des Antriebssystems	113
6.1.6	Betriebserfahrungen	113
6.1.7	Service	115
6.1.8	Zuverlässigkeit der Komponenten	115
6.1.9	Ergebnisse	116
6.1.10	Meßtechnik und Datenerfassung	116
6.2	Elektro - Van	117
6.2.1	Fahrzeugaufbau	117
6.2.2	Auslieferung der Fahrzeuge	118
6.2.3	Fahrzeugeinsatz	118
6.2.4	Technische Daten des Elektro-Van	120
6.2.5	Beschreibung des Antriebssystems	120
6.2.6	Betriebserfahrungen	121
6.2.7	Service	121
6.2.8	Zuverlässigkeit der Komponenten	122
6.2.9	Ergebnisse	123
6.2.10	Meßtechnik und Datenerfassung	123
6.2.11	Versuchsbewertung	123
7.	ABB Hochenergiebatterie	
7.1	Zusammenfassung	124
7.2	Einleitung	125
7.3	Aufbau und Betrieb der Neoplan-Busse	126
7.3.1	Lieferumfang	126
7.3.2	Aufbau des Antriebssystems	126
7.3.3	Charakteristika der Fahrstrecke und des Fahrstils	128
7.3.4	Energetische Bilanzierung des Fahrbetriebes	129
7.3.5	Schnellladung	132
7.3.6	Vergleich der globalen Emissionen für Busse mit elektro- und dieselmotor. Antrieb	133
7.3.7	Betriebserfahrungen	135
7.3.8	Verbesserungspotentiale für den Energieverbrauch	136
7.4	Schnellladung mit ABB Hochenergiebatterien	138
7.5	Entwicklung von Sonderbatterien	139
7.6	Entwicklung eines Bordladegerätes	142
7.7	Literatur	143

8.	AEG Anglo Batteries	
8.1	Einleitung und Zusammenfassung	144
8.2	Das ZEBRA Batteriesystem.....	146
8.3	Lieferungen	147
8.4	Betreuung der Rügenfahrzeuge	148
8.5	Probleme im Rahmen des Flottenversuchs	148
8.6	Weiterentwicklung des Batteriemanagementsystems	149
8.7	Ausfallursachen für die ZEBRA Batterien und daraus abgeleitete Entwicklungsmaßnahmen zur Beseitigung der Fehlerquellen	150
8.8	Ergebnisse	152
8.9	ZEBRA Batterien heute	153
9.	DAUG-HOPPECKE	
9.1	Technische Systembeschreibung	154
9.1.1	Nickel Cadmium Zellen und Batterien in Fasertechnologie	154
9.1.2	Batterie-Peripherie.....	156
9.2	Batterieherstellung und Einbau	157
9.3	Betreuung der Batterien - Inspektionen	158
9.4	Besonderheiten im Versuchsablauf - technische Änderungen	158
9.5	Schnellladung.....	159
9.6	Batteriestatistik, Lebensdauer / km-Leistung	164
9.7	Batterieausfälle	165
9.8	Ergebnisse, Verbesserung und Weiterentwicklung von Bauteilen	165
9.9	Versuchsbewertung	166
10.	HET Energieversorgung	
10.1.	Übersicht über Ladeverfahren für Traktionsbatterien	167
10.1.1	Übersicht	167
10.1.2	Laden mit Wechsel-/Drehstrom (AC)	167
10.1.3	Laden mit Gleichstrom (DC)	170
10.1.4	Laden mit Wechselstrom im Mittelfrequenzbereich (MF-AC)	170
10.2	Planung und Vorbereitung der projektspezifischen Infrastruktur	173
10.3	Normalladung mit Wechsel-/Drehstrom	173
10.3.1	Aufgabenstellung	173
10.3.2	Ausgeführte Geräte und Infrastrukturmaßnahmen	178
10.3.3	Betriebsergebnisse	182
10.3.4	Störungen/Mängel/Änderungen	183
10.4.	Schnellladung mit Gleichstrom	184
10.4.1	Aufgabenstellung	184
10.4.2	Ausgeführte Geräte und Infrastrukturmaßnahmen	189
10.4.3	Betriebsergebnisse	204
10.4.4	Störungen/Mängel/Veränderungen	210
10.4.5	Bewertung der Schnellladung	216
10.5	Generelle Einschätzung und Beurteilung der Projektergebnisse	216
10.6	Empfehlungen für Weiterentwicklungen und für künftige ESF- Infrastrukturen	217
11.	ASE Solaranlage	
11.1	Systembeschreibung	218
11.2	Betriebsergebnisse	220

12.	HTW Datenerfassung und -auswertung	
12.1	Einführung	223
12.2	Konzeption zur Meßdatenerfassung	226
12.3	Meßdatenerfassung	230
12.3.1	Messung zeitabhängiger Signale	230
12.3.2	Erfassung integrierter und klassierter Meßdaten	234
12.3.3	Meßunsicherheit	238
12.3.3.1	Abschätzung der zu erwartenden Meßfehler	238
12.3.3.2	Vergleichsmessungen	241
12.4	Meßdatenauswertung	242
12.4.1	Vorbehandlung der Meßdaten	242
12.4.2	Plausibilitätsprüfung der Meßdaten	243
12.4.3	Energiebilanzen	244
12.4.3.1	Netzenergieverbrauch der Fahrzeuge	245
12.4.3.2	Antriebsenergie und Rekuperation	248
12.4.3.3	Energieverbrauch der Traktionsbatterien	254
12.4.3.4	Energieverbrauch der Ladewandler	272
12.4.3.5	Energieverbrauch des allgemeinen Bordnetzes	276
12.4.3.6	Heizung des Fahrgastrumes	278
12.4.4	Nutzungscharakteristiken	284
12.4.4.1	Fahrleistungen	284
12.4.4.2	Ladeverhalten	295
12.5	Akzeptanzuntersuchungen	298
12.5.1	Ausgangssituation	298
12.5.2	Fahrzeugeinsatz	300
12.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	303
13.	ifeu Ökobilanz	
13.1	Bilanzierung	304
13.1.1	Ziele der „Vergleichenden Ökobilanz“	304
13.1.2	Methodik und Bilanzierungsmerkmale	305
13.1.3	Fahrzeuge	307
13.1.3.1	Elektrofahrzeuge	307
13.1.3.1.1	Batterietyp und Batterienennenergie	308
13.1.3.1.2	Kraftstoffzusattheizung	308
13.1.3.2	Verbrennungskraft-Fahrzeuge	309
13.1.3.2.1	Pkw mit Ottomotor	312
13.1.3.2.2	Pkw mit Dieselmotor	315
13.1.3.2.3	Leichte Nutzfahrzeuge	317
13.1.4	Endenergiebereitstellung	319
13.1.4.1	Strom	319
13.1.4.1.1	Energieeinsatz der Stromproduktion	320
13.1.4.1.2	Emissionen der Stromproduktion	320
13.1.4.1.3	Strombereitstellung einschließlich Brennstoffbereitstellung	322
13.1.4.2	Otto- und Dieselkraftstoff	323
13.1.5	Energie- und Emissionsbilanzen von Energiespeicher und Antriebsstrang	325
13.1.5.1	Methodische Probleme, Datenqualität und -verfügbarkeit	325
13.1.5.2	Annahmen und Festlegungen	328
13.1.5.3	Zusammenfassung und Ergebnisse	329
13.1.6	Betrieb der Elektrofahrzeuge	333
13.1.6.1	Antriebsenergie	333
13.1.6.2	Nebenverbraucher	337

13.1.6.3	Batterie	338
13.1.6.4	Ladewandler	341
13.1.7	Nutzungsmuster	342
13.1.7.1	Fahrtlänge	345
13.1.7.2	Fahrtenzahl	345
13.1.7.3	Standtage	345
13.1.7.4	Jahreszeit	345
13.1.7.5	Ladeverhalten	345
13.1.8	Modell zur Ermittlung des Gesamtenergieverbrauches	365
13.1.9	Lärm	348
13.1.9.1	Ergebnisse	348
13.1.9.2	Abschätzung der Lärmreduktion durch Elektrofahrzeuge	349
13.2	Ergebnisteil I - Analyse und Vergleich	350
13.2.1	Methodik	350
13.2.2	Beiträge zur Primärenergie- und NOx-Bilanz	353
13.2.3	Analyse und Vergleich von Pkw	355
13.2.3.1	Lokale Wirkungen	360
13.2.3.2	Regionale Wirkungen	360
13.2.3.3	Globale Wirkungen	360
13.2.4	Analyse und Vergleich von leichten Nutzfahrzeugen	361
13.2.4.1	Lokale Wirkungen	366
13.2.4.2	Regionale Wirkungen	366
13.2.4.3	Globale Wirkungen	366
13.3	Ergebnisteil II - Sensitivitätsanalyse	367
13.3.1	Fahrzeuggewicht, Batterie-Nennenergie	367
13.3.2	Wegabhängiger Verbrauch (Bezug: Primärenergie)	368
13.3.3	Wegabhängiger Verbrauch (Bezug: Endenergie)	369
13.3.4	Fahrtenzahl	370
13.3.5	Jahreszeit - Primärenergie	371
13.3.6	Material und Produktion/Batterielebensdauer	371
13.3.7	Stromerzeugung	373
13.3.8	Ausblick zum Jahr 2000	374
13.4	Rügen-Ergebnisse im Vergleich mit anderen Arbeiten	375
13.5	Zusammenfassung	377
13.5.1	Ergebnisse des Vergleichs zwischen Elektro- und Verbrennungs-Kfz	378
13.5.1.1	Die Situation innerorts	378
13.5.1.2	Die Situation außerorts	379
13.5.1.3	Die globale Situation	379
13.5.2	Stromerzeugung und nationaler Bezugsraum	381
13.5.3	Abschließende Betrachtung	383
13.6	Literatur	384

14. Anhang

Anhang I:

Anhang zu Kapitel 1: Projektleitung	A2
A 1.1: Beispiel für Fahrtenbuch (Auszug)	A2
A 1.2: Beispiel für Ni/Cd-Batterie-Controller- Datenblatt (Auszug)	A2
A 1.3: Beispiel für Monatsblatt Betriebsbereitschaft	A3
A 1.4: Beispiel für „Fahrzeugtagebuch“ mit Auszügen Werkstattnotizen	A4
A 1.5: Fragebogen zu den Erfahrungen im Projekt E-Fahrzeuge auf Rügen	A5
Anhang zu Kapitel 5: Adam Opel AG.....	A11
A 5.1: Tab. 1: Opel-Fahrzeughalter im Rügen Feldtest	A11
A 5.2: Tab. 2: Opel-Fahrzeughaltung im Rügen Feldtest	A12
A 5.3: Tab. 3 Ereignisse im Zusammenhang mit FNC-Batterien	A13
A 5.4: Tab. 4 Ereignisse im Zusammenhang mit ZEBRA-Batterien	A14
A 5.5: Nutzerbefragung Opel-Fahrzeuge	A15
Anhang zu Kapitel 7: ABB Hochenergiebatterie GmbH.....	A21
A 7: Langfassung ABB Hochenergiebatterie GmbH siehe Anhang II	A21
Anhang zu Kapitel 8: AEG Anglo Batteries.....	A22
A 8.1: Technische Ausführung der ZEBRA Batterien	A22
A 8.2: Zuordnung Rügenfahrzeuge und ZEBRA-Batterien :	A22
Anhang zu Kapitel 9: DAUG-HOPPECKE	A27
A 9.1: Fertigungsablauf für gasdichte Zellen	A27
A 9.2: Datenblatt FNC-recom KFC 100 Nickel-Cadmium-Batterie	A28
A 9.3: Inspektionstermine der FNC-Batterien.....	A29
A 9.4: Ausfallereignisse, -tage und -ursachen bis Dezember 1995	A30

Anhang II:

Anhang zu Kapitel 10: HET

(liegt bei der Projektleitung in gedruckter Fassung vor)

A10.1: Schnelladeberichte, Ladestation FC 310 Zirkow	15 Seiten
Zeitraum 01.07.1995 bis 30.04.1996	
A10.2: Schnelladeberichte, Ladestation FC 320 Bergen,	20 Seiten
Zeitraum 01.07.1995 bis 30.04.1996	
A10.3: Auszug aus dem Bericht: Netzrückwirkungen Schnelladestation 30 kVA Zirkow KEMA IEV Ingenieurunternehmen für Energieversorgung GmbH Dresden November 1994 (Auszug)	21 Seiten
A10.4: Auszug aus dem Bericht: Untersuchungen an der Schnelladestation in Bergen Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Forschungs institut Fahrzeugtechnik, FIF-AB-75573-96-1 / 05.05.1996	22 Seiten
A10.5: Konzept: Schnellladung im Rügenprojekt, PreussenElektra, Hauptverwaltung, Hannover, 22.08.1994	5 Seiten

Anhang zu Kapitel 7: ABB Hochenergiebatterie GmbH

Abschlußbericht der ABB Hochenergiebatterie GmbH, Gesamtfassung

128 Seiten

Abbildungen und Tabellen:

Kap. 1 Abbildungen und Tabellen DAUG

Bild 1	Übersicht Projektablauf	1
Tab. 1	Fahrzeuge, Betreiber und Fahrzeugeinsatz	3
Bild 2	Verteilung der Fahrzeugnutzung auf Rügen	5
Bild 3	Elektrofahrzeugeinsatz auf typischer Nebenstraße auf Rügen.	6
Bild 4	Elektrofahrzeugeinsatz abseits der Straße (Wasserproben)	6
Bild 5	Elektrofahrzeugeinsatz bei winterlichen Witterungsverhältnissen	6
Bild 6	Elektrofahrzeug einer Kurverwaltung im Einsatz beim Strandkorbaufbau	6
Bild 7	Summenhäufigkeiten der durchschnittlich en tägl. Fahrstrecken (Pkw und Nfz) ..	7
Bild 8	Halbjährliche Fahrleistung der einzelnen Elektrofahrzeuge	8
Tab. 2	Liefertermine und km-Leistungen der Fahrzeugflotte	9
Bild 9	Durchschnittliche monatliche Fahrleistung der Elektrofahrzeugflotte auf Rügen	10
Bild 10	Versuchs- und Standtage sowie Kilometerleistungen der einzelnen Fahrzeuge	11
Bild 11	Anteile der Ausfallereignisse nach Ursachen	12
Bild 12	Werkstattstatistik aller Ereignisse an den Fahrzeugen bis Dezember 1995	13
Bild 13	Ausfallereignisse bzw. Inspektionen bezogen auf 10.000 km	15
Bild 14	Anzahl der Einzelereignisse bei den jeweiligen Fahrzeugherstellern	16
Tab. 2	Anzahl der Fahrzeuge mit Batterietausch	17
Bild 15	Zyklen der Traktionsbatterien bis Ende 1995	17
Bild 16	Einsatzspektren der Fahrzeuge	19
Tab. 3	Wichtige Besuche auf Rügen	22

Kap. 2 Abbildungen BMW

Tab. 1	Technische Daten	27
Bild 1	3D-Schnittbild 3er BMW-Coupe	29

Kap. 3.1 Abbildungen Mercedes Benz Pkw

Bild 1	Schnittbild Mercedes-Benz Elektro-Pkw W 201 E	38
Bild 2	ZEBRA-Batterie, Ni/Cd-Batterie.....	39
Bild 3	Mercedes-Benz Crashversuch.....	40
Bild 4	Fahrzeugauslieferung	42
Bild 5	Studie A und SMART-Prototyp	51

Kap. 3.2 Abbildungen Mercedes Benz Transporter

Bild 1	Elektrotransporter MB 100 E, Pritschenwagen	53
Bild 2	Elektrotransporter MB 100 E, Kastenwagen	54
Bild 3	Synchron-Einzelradantrieb	59
Bild 4	Auslieferung der Elektrotransporter	62
Bild 5	MB 100 E Pritschenwagen	63
Bild 6	MB 100 E Kastenwagen	63
Bild 7	Aufteilung der Störungen	67
Bild 8	Einsatzzeit und Gesamtfahrstrecke	69
Bild 9	Elektrotransporter 308 E Sprinter	72
Bild 10	Elektrotransporter 108 E Vito	73

Kap. 4 Abbildungen Neoplan

Bild 1	NEOPLAN N 8008 E-Bus mit ABB Hochenergiebatterien auf der Insel Rügen ..	74
Bild 2	Überschlagtest des MiC nach europäischen Normen	75
Bild 3	Tests zum Schutz der Insassen	75
Bild 4	Crashtests mit NEOPLAN Metroliner	76

Bild 5	Anordnung wichtiger Elektrobus-Komponenten	77
Bild 6	Elektrokomponentenanordnung	78
Bild 7	NEOPLAN „Cradle“-Konstruktion beim Bus Nr. 29 und bei Nr. 30 und Nr. 31 ...	78
Bild 8	Instrumententafel NEOPLAN N 8008 E-Bus	79
Bild 9	Maßskizze N 8008 E „Rügen“	80
Bild 10	Hauptaggregate und Fahrwerk N 8008E	88
Bild 11	Elektroantrieb mit 144 V Blei (280 V), Hochenergie Batterien mit Ladestecker .	90
Bild 12	Elektroantrieb mit 144 V Bleibatterie, Wechseltechnik für 24 Stunden-Einsatz .	90
Bild 13	Elektroantrieb mit 280 V, Bleibatterie als Serien-Hybrid	90
Kap. 5 Abbildungen Opel		
Bild 1	Komponentenanordnung Impuls mit NiCd-Batterien	92
Bild 2	Komponentenanordnung Impuls mit NaNiCl ₂ -Batterien	92
Tab. 1	Fahrzeugauslieferung und km-Stand	94
Kap. 6 Abbildungen Volkswagen		
Bild 1	Golf CityStromer	110
Bild 2	VW-Caravelle	117
Kap. 7 Abbildungen und Tabellen ABB		
Bild 1	Schema der Anordnung von Batterie und Ladeeinrichtungen	127
Bild 2	Höhenprofil der Fahrstrecke	128
Bild 3	Energiebilanz einer Fahrt	129
Bild 4	Kumulierte Energieentnahme über kumulierter Fahrstrecke bzw. Jahreszeit ..	130
Bild 5	Tägl. Netzenergiebedarf für das Warmhalten der Batterie	131
Bild 6	Spezif. Netzenergieverbrauch	131
Tab. 1	Mögl. Tagesfahrstrecken und Energieverbr. mit schnellem Zwischenladen	132
Bild 7	Globale Emissionen aus dem 13-Stufen-Test für verschiedene Schadstoffe ..	134
Bild 8	CO ₂ - und äquivalente CO ₂ -Emissionen für Diesel- und Elektroantrieb	134
Bild 9	Vergleich der globalen CO ₂ -Emissionen von Diesel- und elektro-motorischem Antrieb mit unterschiedlicher Stromnutzung während des Tages	135
Tab. 2	Fehler, Ursachen und ihre Behebung	137
Bild 10	Ragone-Diagramm für das Laden einer B17-Hochenergiebatterie	139
Tab. 3	Zusammenstellung der wichtigsten Batteriedaten.	140
Bild 11	Normierte Batteriespannung während eines Entlade-/Ladevorganges mit Strömen.von C/5h bzw. C/10h.	141
Bild 12	Ragone-Diagramm der Batterien.	141
Tab. 4	Technische Daten des Bordladegerätes	142
Kap. 8 Abbildungen und Tabellen AEG Anglo Batteries		
Tab. 1	Elektrofahrzeuge auf Rügen mit ZEBRA Batterien	144
Tab. 2	Einsatzprofil der Fahrzeuge mit ZEBRA Batterien	145
Bild 1	ZEBRA Batterie Z5	146
Bild 2	Die ZEBRA Zelle	146
Bild 3	ZEBRA Zellreaktion	147
Tab. 3	Unterstützung durch die AEG Anglo Batteries GmbH vor Ort auf Rügen	148
Tab. 4	Entwicklungsschritte Batteriesteuengerät	149
Tab. 5	Außer Betrieb genommene ZEBRA Batterien im BMBF-Projekt (Stand 6/96) .	150

Kap. 9	Abbildungen und Tabellen DAHO	
Bild 1	Faser-Struktur.....	154
Bild 2	Recom-Prinzip	155
Bild 3	Thermisches und elektrisches Batteriemanagementsystem (schematisch)	156
Tab. 1	Batterievarianten im Rügen-Feldversuch	157
Bild 4	Durchschnittliche Ausnutzung der installierten Reichweite	158
Tab. 2	Während der Laufzeit aufsummierte Batteriedaten	160
Bild 5	60 kW-Schnellladung (Fahrzeug 58 VW Caravelle)	161
Bild 6	24-Stunden-Schnellade-Dauertest (Fahrezug 58)	162
Bild 7	Energieaufnahme, Ladewirkungsgrad und Reichweite bei Schnell- und Normal ladung (Fahrzeug 45 VW Golf)	163
Tab. 3	Während der Laufzeit aufsummierte Batteriedaten	164
Kap. 10	Abbildungen und Tabellen HET	
Bild 1	Übersicht über Ladeverfahren für Traktionsbatterien	168
Bild 2	Normalladung - Sicherheit durch Fehlerstromschutzschalter	169
Bild 3	Baugruppen eines für AC/DC-Ladung geeigneten Fahrzeuges	171
Bild 4	Prinzipschaltbild für die MF-AC-Ladung	172
Bild 5	Standorte öffentlicher Ladestationen für die Normalladung	175
Bild 6	Ansicht der Normalladestation TYP EML	179
Bild 7	Schaltbild für die Ladestation TYP EML	180
Bild 8	Schnellladung, Prinzipschaltbild für die Ladestation mit Verkaufsabrechnung ..	188
Bild 9	Schnellladestation FC 310 Zirkow - Ansicht	191
Bild 10	Schnellladestation FC 310 Zirkow - Prinzipschaltbild	192
Bild 11	Schnellladestation FC 310 Zirkow - Übersichtsschaltbild der Bedieneinheiten	194
Bild 12	Schnellladestation FC 310 Zirkow - Blockschaltbild Leistungseinheit (Thyristor)	195
Bild 13	Schnellladestation Bergen - Ansicht	198
Bild 14	Schnellladestation FC 320 Bergen - Geräteplan	199
Bild 15	Schnellladestation FC 320 Bergen - Prinzipschaltbild	201
Bild 16	FC 320 Bergen - Blockschaltbild der Leistungs- und Steuereinheit	202
Bild 17	FC 320 Bergen - Blockschaltbild Stromrichter	203
Bild 18	FC 310, Ladeparameter während der Schnellladung, $I_{soll}=70$ A, Ni/Cd-Batt...	205
Bild 19	FC 310, Ladeparameter während der Schnellladung, $I_{soll} = 100$ A, Ni/Cd-Batt.	206
Bild 20	FC 320 Ladeparameter während der Schnellladung, $I_{soll} = 100$ A, Ni/Cd-Batt.	207
Bild 21	Ladeparameter während der Schnellladung, $I_{soll} = 200$ A, NiCd-Batt.	208
Bild 22	Ladeparameter während der Schnellladung einer ZEBRA-Batterie	209
Tab. 1	Schnellladung - Störungsarten	213
Tab. 2	Schnellladestation FC 310 Zirkow, Ladungen und Fehlladungen	214
Tab. 3	Schnellladestation FC 320 Bergen, Ladungen und Fehlladungen	215
Kap. 11	Abbildungen und Tabellen ASE	
Bild 1	Wechselrichter der PV-Anlage und Gruppenkasten	218
Bild 2	Außenanzeige der Photovoltaikanlage mit schematischer Darstellung	218
Bild 3	Bau der Solaranlage als Dachintegration des DAUG-Werkstattgebäudes	219
Bild 4	Schema der Photovoltaikanlage	220
Tab. 1	Halbjahres-Auswertung der PV-Anlage (01.07.95 - 31.12.95)	221
Bild 5	Elektrofahrzeuge vor dem Werkstattgebäude mit fertiggestellter Solaranlage	221
Bild 6	Eingespeiste Energiemengen der PV-Anlage in Zirkow 1995	222

Kap. 12 Abbildungen und Tabellen HTW

Bild 1.1	Struktur der Datenerfassung und -auswertung	224
Bild 1.2	Zeitlicher Ablauf für die Erfassung klassierter Daten	225
Bild 2.1	Struktur des Elektroautos	227
Bild 3.1	Ausgewählte Meßsignale eines Beispieldfahrzeugs	231
Tab. 3.1	Blatt 1: Meßkanäle von BMW, MB 190 und MB 100	232
Tab. 3.1	Blatt 2: Meßkanäle von NEOPLAN-Bussen, Opel, VW	233
Tab. 3.2.1	Integrierte Größen	236
Tab. 3.2.2	Häufigkeitsverteilungen	237
Tab. 3.3.1	Fehlergrenzen der verwendeten Meßgeräte und -wandler	238
Tab. 3.3.2	Grenzwerte für Traktionsstrom und -leistung	240
Tab. 3.3.3	Grenzwerte für Bordstrom und -leistung	240
Tab. 4.1	Anzahl der auswertbaren Tagesprotokolle bezogen auf Nutzertage	243
Tab. 4.3.1	Netzenergieerfassung aller Rügenfahrzeuge 1995	246
Tab. 4.3.2	Fahrzeuge mit dem niedrigsten mittleren Verbrauchswerten	247
Tab. 4.3.3	Netzenergieerfassung bezogen auf Fahrzeugtypen	247
Bild 4.3.1	Antriebsenergie ohne Rekuperation (Tageswerte) O32	248
Bild 4.3.2	Antriebsenergie ohne Rekuperation (Ladeendewerte) O3 2	248
Bild 4.3.3	Spezifische Antriebsenergie ohne Rekuperation (Tageswerte) O32	249
Bild 4.3.4	Rekuperierte Bremsenergie (Tageswerte) O32	249
Bild 4.3.5	Rekuperationsrate (Tageswerte) O32	250
Tab. 4.3.4	Mittlerer Antriebsverbrauch aller Rügenfahrzeuge	251
Tab. 4.3.5	Bereich der spezifischen Antriebsenergien ohne Rekuperation	252
Bild 4.3.6	Weganteile bei BMW und Opel (B01 und O32)	253
Bild 4.3.7	Rekuperierte Bremsenergie des MB 190 (M14)	254
Bild 4.3.8	Batterieverluste der Nickel-Cadmium-Batterie des VW T4 (C55)	255
Bild 4.3.9	Zeiten zwischen Zuständen "Batterie voll" beim C55	255
Bild 4.3.10	Batterieverlust der NiCd-Batterie des C55 nach Sept. 1995	256
Bild 4.3.11	Errechneter Batteriewirkungsgrad des C55	256
Bild 4.3.12	Spezifischer Batterieverlust der Nickel-Cadmium-Batterie des C55	257
Bild 4.3.13	Amperestundenverhältnis der Nickel-Cadmium-Batterie des C55	257
Bild 4.3.14	Batterieverlust der Natrium-Nickelchlorid-Batterie des BMW (B01)	258
Bild 4.3.15	Heizenergie aus dem Netz der Natrium-Nickelchlorid-Batterie des BMW (B01)	258
Bild 4.3.16	Zeiten zwischen Ladeende beim BMW (B01)	259
Bild 4.3.17	Wirkungsgrad der Natrium-Nickelchlorid-Batterie des BMW (B01)	259
Bild 4.3.18	Spezifischer Verlust der Natrium-Nickelchlorid-Batterie des BMW (B01)	260
Bild 4.3.19	Batterieverlust der Natrium-Schwefel-Batterie des NEOPLAN-Busses (N31)	261
Bild 4.3.20	Heizenergie aus dem Netz der Na/S-Batterie des NEOPLAN-Busses (N31)	261
Bild 4.3.21	Wirkungsgrad der Natrium-Schwefel-Batterie des NEOPLAN-Busses (N31)	261
Bild 4.3.22	Verlust der Blei-Gel-Batterie des VW Golf (V42) ohne Heizung	262
Bild 4.3.23	Wirkungsgrad der Blei-Gel-Batterie des VW Golf (V42) ohne Heizung	262
Bild 4.3.24	Scheinbarer Wirkungsgrad des Ladewandlers beim VW Golf (V42)	263
Bild 4.3.25	Errechnete Heizenergie beim VW Golf (V42)	263
Bild 4.3.26	Ermittelte mittlere Außentemperatur beim VW Golf (V42)	264
Tab. 4.3.6	Standverluste der NaNiCl ₂ -Batterien	265
Tab. 4.3.7	Standverluste der NiCd-Batterien	265
Tab. 4.3.8	Prozentuale Standverluste der Batterien	266
Tab. 4.3.9	Ladeenergien aus der Schnellladung für die einzelnen Fahrzeuge	266
Bild 4.3.27	Ladeenergie der Schnellladung des C 51	267
Bild 4.3.28	Ladeenergie der Schnellladung des O 41	267
Bild 4.3.29	Ladedauer der Schnellladung des C51	268
Bild 4.3.30	Ladedauer der Schnellladung des O 41	268

Tab. 4.3.10	Mittlere Batterieverluste aller Fahrzeuge	269
Tab. 4.3.11	Abschätzung des Energiedurchsatzes für die Batterien	271
Bild 4.3.31	Ladewandlerverlust in Abhängigkeit von der Eingangsenergie beim M15	273
Bild 4.3.32	Wirkungsgrad des Ladewandlers in Abh. vom gefahrenen Weg beim M15 ..	273
Bild 4.3.33	Spez. Verlust des Ladewandlers in Abh. vom gefahrenen Weg beim M15 ...	274
Tab. 4.3.12	Ladewandlerverluste aller Fahrzeuge	275
Bild 4.3.34	Täglicher Bordenergieverbr. des VW Golf (V48) in Abh. vom gef. Weg	276
Bild 4.3.35	Täglicher Bordenergieverbr. des BMW (B01) in Abh. vom gef. Weg	276
Bild 4.3.36	Täglicher Bordenergieverbrauchs des Mercedes Benz MB 190 (M15) in Abhängigkeit vom gefahrenen Weg	277
Bild 4.3.37	Täglicher Bordenergieverbrauch des NEOPLAN-Busses (N31) in Abhängigkeit vom gefahrenen Weg	277
Bild 4.4.1	Wöchentliche Verteilung der Fahrkilometer beim MB 190 (M16)	285
Bild 4.4.2	Wöchentliche Verteilung der Fahrkilometer beim BMW (B05)	285
Bild 4.4.3	Tägliche Fahrweg des MB 190 (M16).....	286
Bild 4.4.4	Täglicher Fahrweg des BMW (B05)	286
Tab. 4.4.1	Fahrstrecken aller Fahrzeuge	288
Bild 4.4.5	Beginn einer Fahrt beim BMW (B05)	288
Bild 4.4.6	Beginn einer Fahrt beim MB 190 (M16).....	289
Bild 4.4.7	Weg einer Fahrt beim BMW (B05)	289
Bild 4.4.8	Weg einer Fahrt beim MB 190 (M16)	289
Bild 4.4.9	Weg bis zur nächsten Ladung beim BMW (B05)	290
Bild 4.4.10	Weg bis zur nächsten Ladung beim MB 190 (M16)	290
Bild 4.4.11	Fahrtzeit beim BMW (B05)	290
Bild 4.4.12	Fahrtzeit beim MB 190 (M16)	291
Bild 4.4.13	Energie einer Fahrt beim BMW (B05)	291
Bild 4.4.14	Energie einer Fahrt beim MB 190 (M16)	291
Bild 4.4.15	Mittlere Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeit beim MB 190 (M16)	292
Bild 4.4.16	Mittlere Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeit beim BMW (B05)	293
Bild 4.4.17	Mittlere Häufigkeitsverteilung der Traktionsleistung beim MB 190 (M16)	293
Bild 4.4.18	Mittlere Häufigkeitsverteilung der Traktionsleistung beim BMW (B05)	293
Bild 4.4.19	Mittlere Häufigkeitsverteilung der Beschleunigung beim MB 190 (M16)	294
Bild 4.4.20	Mittlere Häufigkeitsverteilung der Beschleunigung beim BMW (B05)	294
Bild 4.4.21	Zeiten für Laden, Fahren und Stehen beim Opel Astra (O41)	295
Bild 4.4.22	Zeiten für Laden, Fahren und Stehen beim MB 190 (M16)	296
Bild 4.4.23	Zeiten für Laden, Fahren und Stehen beim MB 100E (T23)	296
Bild 4.4.24	Zeiten für Laden, Fahren und Stehen beim VW T4 (C53)	296
Bild 5.1	Altersstruktur der Nutzer	298
Bild 5.2	Durchschnittliche Jahreskilometerleistung	298
Bild 5.3	Selbst einschätzung des Fahrstils	299
Tab. 5.1	Nutzungsspektrum, getrennt nach Transporter/Kleinbus und PKW	299
Bild 5.4	Einschätzung des Beschleunigungsverhalten	300
Bild 5.5	Einschätzung des Steigverhaltens	300

Kap. 13 Abbildungen und Tabellen IFEU

Tab. 13.1	Kriterien für bewertete Umweltwirkungen und deren Indikatoren	305
Tab. 13.2	Heizleistungsbedarf und Emissionsfaktoren für die Kraftstoffzusatzheizung ..	309
Tab. 13.3	Wichtige Kenndaten von Pkw-Testzyklen	311
Tab. 13.4	Abschätzung der EURO II-Emissionsfaktoren für Otto-Pkw	313
Tab. 13.5	Abschätzung der EURO II-Emissionsfaktoren für Pkw mit Dieselmotor	315
Tab. 13.6	Übersicht über Rügen-Elefktrofahrzeuge und Vergleichsfahrzeuge	316
Tab. 13.7	Abschätzung der Fahrzykluswerte für leichte Nutzfahrzeuge mit Ottomotor ...	318

Tab. 13.8	Abschätzung der Fahrzykluswerte für leichte Nutzfahrzeuge mit Dieselmotor	318
Tab. 13.9	Energieeinsatz und Emissionen der Strombereitstellung ohne Brennstoffbereitstellung	321
Tab. 13.10	Energieeinsatz und Emissionen der Strombereitstellung einschließlich Brennstoffbereitstellung	322
Tab. 13.12	Analoge Baugruppen von Elektrofahrzeugen und Verbrennungskraft- fahrzeugen	325
Tab. 13.13	Primärenergieeinsatz der Endfertigung von Antriebssträngen und Energiespeichern	326
Tab. 13.14	Relative Preise von Schrott und Halbzeugen verschiedener Materialien	327
Tab. 13.15	Speicherdichte und Materialzusammensetzung von Batteriesystemen	328
Tab. 13.16	Massen und Zusammensetzung von Antriebsstrangkomponenten	329
Tab. 13.17	Primärenergieeinsatz und Emissionen der Bereitstellung von Batterien (Bezug: 1 kWh Speicherenergie) und Kraftstofftanks (Bezug: Baugruppe)	330
Tab. 13.18	Primärenergieeinsatz und Emissionen der Bereitstellung von Batterien (Bezug: 1 kWh Speicherenergie) und Kraftstofftanks (Bezug: Baugruppe)	331
Tab. 13.19	Primärenergieeinsatz und Emissionen der Bereitstellung der Komponenten des Antriebsstrangs (Bezug: Baugruppe)	332
Abb. 13.1	Bandbreite der Rügen-Werte der Antriebsenergie und Prüfstandswerte im NEFZ	334
Abb. 13.2	Anteil der Rückspeisung an der Antriebsenergie	335
Tab. 13.20	Bremsenergie-Rückspeisung im Praxisversuch und auf dem Rollenprüfstand	335
Tab. 13.21	Rechenwerte für den Antriebsenergieverbrauch (einschl. Bremsenergie)	336
Abb. 13.3	Nebenenergieverbrauch (Bordnetz) in Abhängigkeit vom Weg	337
Tab. 13.22	Nebenenergieverbrauch der Rügen-Versuchsfahrzeuge	338
Tab. 13.23	Zuordnung von Batterien zu den Nennenergieklassen 15, 25 und 35 kWh ...	340
Abb. 13.4	Ladewandler-Wirkungsgrade für Mercedes Pkw	341
Tab. 13.24	Im Rechenprogramm verwendete Ladewandler-Wirkungsgrade	341
Tab. 13.25	Nutzungsmuster-Parameter des Verbrennungsfahrzeugs	344
Tab. 13.26	Nutzungsmuster-Parameter des Elektrofahrzeugs	344
Abb. 13.5	Gemessene bzw. gerechnete kilometer-spezifische Verbrauchswerte am Beispiel des Opel Astra mit 26 kWh NaNiCl ₂ -Batterie	347
Abb. 13.6	Schallpegel mit unterschiedlicher Bereifung bei versch. Geschwindigkeiten ...	349
Abb. 13.7	Pegeldifferenz E-Pkw und konventioneller Pkw	349
Tab. 13.27	Standardisierung einiger Nutzungsmuster für den Emissionvergleich	351
Tab. 13.28	Emissionen als Indikatoren für bestimmte Umweltwirkungen	352
Tab. 13.29	Aufbau der vergleichenden Bilanzen und Anordnung der Indikatoren	353
Abb. 13.8	Primärenergieverbrauch leichter Pkw nach Lebensweg-Bereichen	354
Abb. 13.9	NOx -Gesamtemission leichter Pkw nach Lebensweg-Bereichen	354
Abb. 13.10	Lokal, regional und global wirksame Emissionen bei Nutzungsmuster A	356
Abb. 13.11	Lokal, regional und global wirksame Emissionen bei Nutzungsmuster B	357
Abb. 13.12	Lokal, regional und global wirksame Emissionen bei geringer Nutzung	358
Abb. 13.13	Lokal, regional und global wirksame Emissionen bei häufiger Nutzung	359
Abb. 13.14	Lokal, regional und global wirksame Emissionen bei Nutzungsmuster A	362
Abb. 13.15	Lokal, regional und global wirksame Emissionen bei Nutzungsmuster B	363
Abb. 13.16	Lokal, regional und global wirksame Emissionen bei geringer Nutzung	364
Abb. 13.17	Lokal, regional und global wirksame Emissionen bei häufiger Nutzung	365
Abb. 13.18	Primärenergieverbrauch für leichte bzw. schwere Pkw mit kleiner bzw. großer Batterie beim Nutzungsmuster A	367
Abb. 13.19	Primärenergieverbrauch über den gesamten Lebensweg in Abhängigkeit von der Fahrstrecke für leichte Pkw mit 15 kWh-NaNiCl ₂ -, NiCd- und Pb-Batterie	368
Abb. 13.20	Spezifische Verbräuche des leichten Pkw	369

Abb. 13.21 Primärenergieverbrauch in Abhängigkeit von der Zahl der Fahrten bei einem leichten Pkw mit 15 kWh-Batterie	370
Abb. 13.22 Einfluß der jahreszeitlichen Temperatur auf den Primärenergieverbrauch des leichten Pkw beim Nutzungsmuster A	371
Abb. 13.23 Beiträge zum Primärenergieverbrauch aus den Bereichen Material, Betrieb und Fahrzeugheizung für einen leichten Pkw mit 15 kWh-Batterie beim Nutzungsmuster A.	372
Abb. 13.24 Einfluß der Batterielebensdauer auf den Energiebedarf des leichten Pkw mit 15 kWh-Batterie beim Nutzungsmuster A	372
Abb. 13.25 Einfluß der Stromerzeugung auf die CO ₂ -Emission des leichten Pkws und 15 kWh Energiespeicher bei Nutzung A	373
Tab. 13.30 Annahmen zu Fortschritten der E-Fahrzeugtechnologie bis zum Jahr 2000 ...	374
Abb. 13.26 Spezifischer Primärenergieverbrauch der Rügen-Elektro- und der Vergleichs-Pkw in Relation zu dem Diesel-Pkw unter Variation der Tagesfahrleistung	376
Abb. 13.27 Schematische Zusammenfassung der Umweltwirkungen kleiner Elektro-Pkw mit 15KWh-Batterie im Vergleich mit entsprechenden konventionellen Pkw in Deutschland 1996	380
Abb. 13.28 Schematische Zusammenfassung der Umweltwirkungen kleiner Elektro-Pkw mit 15 kWh-Batterie im Vergleich mit entsprechenden konventionellen Pkw in Frankreich (F), England (UK) und Europa 1996	381

Abkürzungsverzeichnis

AO	Außerorts
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
dB (A)	Dezibel (nach Kurve A)
E-Kfz	Elektrofahrzeug
E _B	Innenwiderstandsverbrauch
ECE	Stadt Fahrzyklus (Economic Commission for Europe)
E _H	Heizenergiebedarf
E _I	Batterieheizung
E _N	Nachladeenergie
EOK	Emmissionsortsklassen
EPROM	Erasable programmable read-only memory
E _S	Selbstentladung
ESF	Elektrostraßenfahrzeug
ETK	Europatest Kalt
ETW	Europatest Warm
EUDC	Extra Urban Driving Cycle,
EVU	Energieversorgungsunternehmen
GFAVO	Großfeuerungsanlagenverordnung
HC	Kohlenwasserstoff
IO	Innerorts
LF	Ladefaktor oder Lade-Wirkungsgrad
INfz	leichte Nutzfahrzeuge
NaNiCl ₂	Natrium-Nickelchlorid
NaS	Natrium-Schwefel
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NiCd	Nickel-Cadmium
NMHC	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (PAH)
NO _x	Stickoxide
PV	Photovoltaik
SO ₂	Schwefeldioxid
TA Luft	Technische Anleitung Luft
V-Kfz	Verbrennungsfahrzeug

Fahrzeugliste Seite 3, weitere Größen aus dem Bereich der Meßtechnik Seiten 236 und 237.

1 DAUG-Projektleitung

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse des Rügenprojektes aus den Aufgabenbereichen der DAUG ausgeführt, die zur Übersicht des Gesamtprojektes dienen. Im Besonderen werden hierbei die Betriebsergebnisse, wie z.B. Fahrleistungen, Einsatzbereitschaft und Zuverlässigkeit der Komponenten für alle Elektrofahrzeuge ausgewertet.

1.1 Projektablauf

Der von der Projektleitung zu koordinierende Ablauf ist im folgenden Bild zusammenfassend dargestellt. Der Vorgang Energieversorgung reicht über das Projektende hinaus, da die Solaranlage auf Rügen verbleibt und einige Ladestationen (und Fahrzeuge) noch in Betrieb sind.

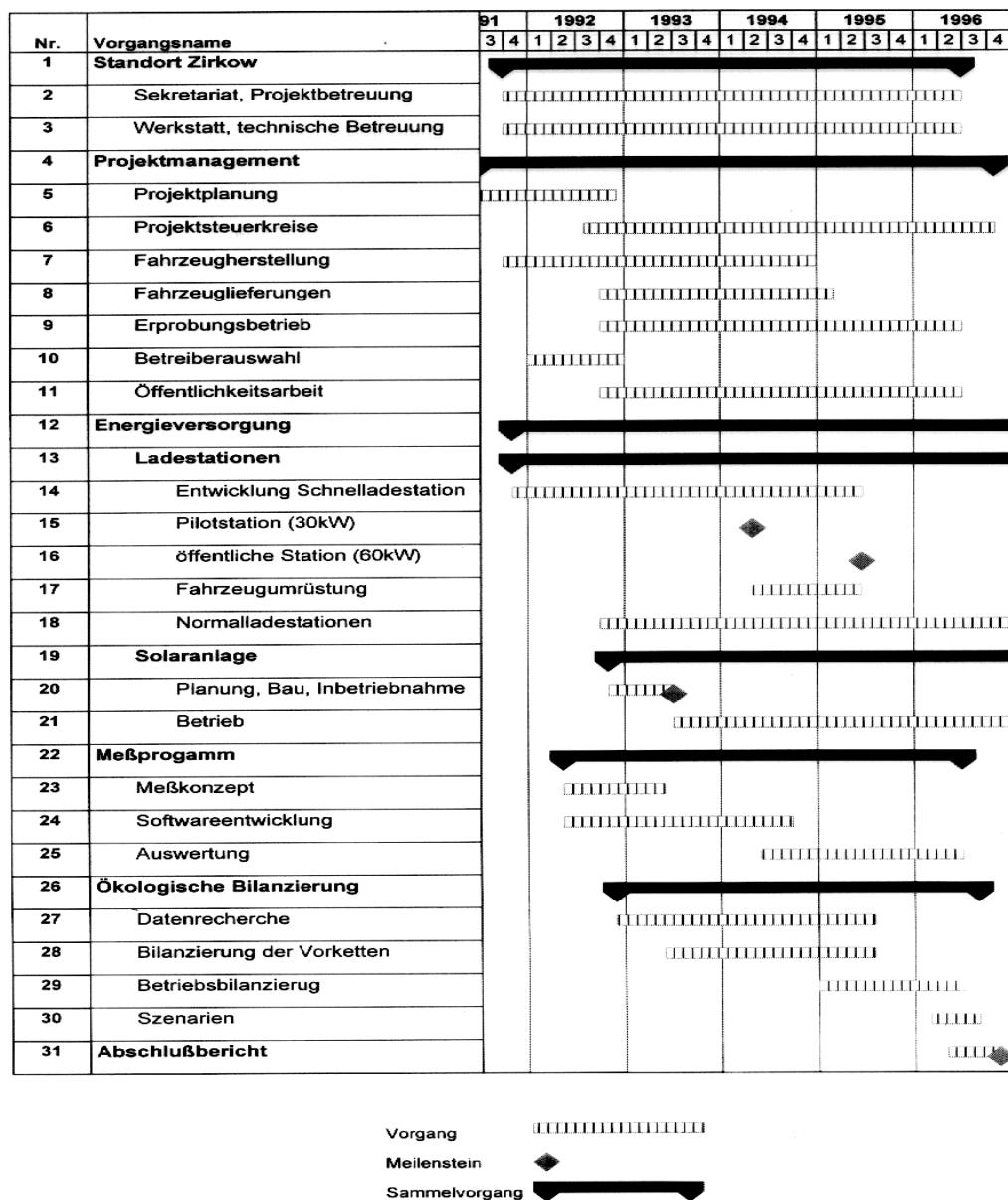


Bild 1: Übersicht Projektablauf

1.2 Standort Zirkow

Die Niederlassung der Deutschen Automobilgesellschaft (DAUG) mit Büro und Werkstattbereich lagen zentral an der Bundesstraße 196 in Zirkow zwischen der Kreisstadt Bergen und Ostseebad Binz. In der Vorbereitungsphase 1991 und 1992 wurde der Werkstattbereich auf die Anforderungen des Projektes umgestaltet sowie die Elektroinstallation mit der Zielsetzung erneuert, die Wartung der Elektrofahrzeuge inklusive Ladung über Haushaltsanschluß, Drehstromanschluß und Pilotschnellladestation zu ermöglichen. Die Solaranlage wurde im Sommer 1993 in die nach Süden gerichtete Dachhälfte integriert.

Für den Erprobungsbetrieb von 1992 bis 1995 wurde zur Betreuung vor Ort eine Sekretärin sowie ein Mitarbeiter für die technische und organisatorische Betreuung der Elektrofahrzeuge eingestellt. In Vorbereitung auf den Praxistest fanden Schulungen in sämtlichen am Projekt beteiligten Fahrzeug- und Batteriefirmen statt. Mit wachsender Fahrzeuganzahl wurde ein zweiter Werkstattbereich angemietet und ein weiterer Techniker eingestellt.

Wegen der verzögerten Auslieferung der Fahrzeuge wurde der Versuchsbetrieb auf Wunsch der beteiligten Firmen bis Juni 1996 verlängert. Parallel dazu wurden die bis Ende 1995 erhaltenen Meßdaten ausgewertet.

1.3 Fahrzeugeinsatz

1.3.1 Betreiberauswahl

Die Auswahl der Fahrzeugbetreiber hatte in erster Linie eine möglichst häufige Ausnutzung der Fahrzeugreichweiten zum Ziel, um während des Projektes möglichst viele Meßdaten zu erhalten und möglichst viele Ladezyklen zu erreichen.

Ab November 1991 wurden bereits intensive Gespräche mit Behörden, Institutionen und anderen potentiellen Elektrofahrzeugnutzern geführt. Insbesondere in den verschiedenen Dezernaten des Landratsamtes Bergen (Wirtschaft/Straßenwesen, Tourismus, Umwelt) wurde über mögliche und sinnvolle Einsatzschwerpunkte von Elektrofahrzeugen auf der Insel Rügen diskutiert. Die örtliche Industrie- und Handelskammer sowie die Handwerkskammer Bergen erhielten ausführliche Informationen über das geplante Vorhaben und wurden auf geeignete Einsatzmöglichkeiten von Elektrofahrzeugen innerhalb ihres Verantwortungsbereiches angesprochen.

Weiterhin gab es Einzelgespräche mit Kurverwaltungen, Gemeindeämtern, Unternehmern, karitativen Einrichtungen, dem DLRG, den jeweiligen örtlichen Niederlassungen der Fahrzeugherrsteller und der Post. Besonders erwähnenswert sind hierbei die engen Kontakte mit den lokalen Naturschutzbehörden wie Nationalparkamt Mecklenburg-Vorpommern, Biosphärenreservat Südost-Rügen, Naturpark Rügen und Nationalpark Jasmund. Hier sollten die Elektrofahrzeuge in den umweltsensiblen Schutzbereichen eingesetzt werden.

Die Insel Hiddensee ist traditionell frei von verbrennungsmotorisiertem Verkehr, bis auf wenige Ausnahmen besonders im Gütertransport. Seitens der Gemeindeverwaltung lagen daher Anfragen vor, einige Erprobungsfahrzeuge für Hiddensee mit einzuplanen, um damit verbrennungsmotorisierte Fahrzeuge ersetzen zu können.

Das aus den Gesprächen resultierende Einsatzspektrum ist nachfolgend zusammengefaßt:

- kommunale und öffentliche Ämter
- Kurverwaltungen
- karitative Einrichtungen
- Handwerksunternehmen
- Naturschutzbehörden
- örtliche Niederlassungen der Fahrzeughersteller
- Deutsche Post AG
- City-Ringlinie

Aufgrund dieser zahlreichen Gespräche und Kontakte wurde eine vorläufige Liste erstellt, in der die voraussichtliche Nutzung des jeweiligen Fahrzeugs (km/Tag, eventuell saisonaler Einsatz, Nutzung am Wochenende, Lademöglichkeiten, Anzahl der Fahrer usw.) verzeichnet war und jedem Fahrzeug ein potentieller Erprober zugeordnet wurde.

Nach Überprüfung der Aufstellung durch die jeweiligen Fahrzeughersteller wurden die vorläufig ausgewählten Nutzer im Juni 1992 zusammen mit den zuständigen Mitarbeitern der entsprechenden Fahrzeughäuser zu einer gemeinsamen Informationsveranstaltung über den Fahrzeugeinsatz nach Zirkow eingeladen.

In der Tabelle 1 sind beispielhaft die 1994/95 am Projekt beteiligten Fahrzeugbetreiber und der jeweilige Einsatzzweck der Elektrofahrzeuge dargestellt.

Fzg. Nr.	Hersteller	Fahrzeug - Typ	Batterie-Typ	Fahrzeugbetreiber, Institution	Ansprechpartner
1	BMW	3er/(5-er)	Na/NiCl ₂	Nationalpark Jasmund - Kontrolle Naturschutzgebiet	Hr. Klötzer
2	BMW	3er	Na/NiCl ₂	Gemeinde Binz, Ordnungsamt	Hr. Preuß
3	BMW	3er	Na/NiCl ₂	Landratsamt Bergen - Fuhrpark	Hr. Puttbreese
4	BMW	3er	Na/NiCl ₂	Gemeinde Binz, Ordnungsamt	Hr. Preuß
5	BMW	3er	Na/NiCl ₂	DAUG-Mitarbeiter Zirkow-Stralsund-Zirkow	Hr. Wiening
6	BMW	3er	Na/NiCl ₂	Polizeistation Binz - Politessendienst	Hr. Warrlich
7	BMW	3er	Na/NiCl ₂	Evangelische Kirchengemeinde Lanken Granitz	Hr. Stemmler
8	BMW	3er	Ni/Cd	Pfarramt Bergen - Hausbesuche	Hr. Schwer
9	Mercedes	190	Ni/Cd	Touristik Sander, Lanken-Granitz, Transferdienste	Hr. Sander
10	Mercedes	190	Ni/Cd	Bürgermeister Gem. Buschvitz	Hr. Preuhs Malte
11	Mercedes	190	Ni/Cd	Gemeinde Binz, Ordnungsamt	Hr. Preuß
12	Mercedes	190	Na/NiCl ₂	Rügen-Trans Bergen, Transportfirma	Hr. Bartel
13	Mercedes	190	Na/NiCl ₂	Mercedes-Benz Vertragswerkstatt	Hr. Klemaschewski
14	Mercedes	190	Na/NiCl ₂	Landratsamt Bergen, Fuhrpark	Dr. Schnitzer
15	Mercedes	190	Na/NiCl ₂	Landratsamt Bergen, Verkehrsamt	Fr. Kunze
16	Mercedes	190	Na/NiCl ₂	Gemeinde Dranske, Bauhof	Hr. Roßig
17	Mercedes	190	Na/NiCl ₂	Planungsbüro Garz, Sekretariat	Hr. Onnen
18	Mercedes	190	Na/NiCl ₂	Insula Rugia, (Naturschutzverein), Geschäftsfahrzeug	Dr. Rost
19	Mercedes	MB 180E Pritsche	Na/NiCl ₂	Gemeinde Hiddensee, u.a. Müllentsorgung	Hr. Blase
20	Mercedes	MB 180E Pritsche	Na/NiCl ₂	Inseltrans, Hiddensee, Transportdienste	Hr. Mehl
21	Mercedes	MB 180E Pritsche	Na/NiCl ₂	Gemeinde Dranske, Service-Fahrzeug Campingplatz	Hr. Roßig
22	Mercedes	MB 180E Pritsche	Na/NiCl ₂	Nehlsen-Entsorgung, Bergen, Müllentsorgung	Hr. Wilke

Fzg. Nr.	Hersteller	Fahrzeug - Typ	Batterie-Typ	Fahrzeugbetreiber, Institution	Ansprechpartner
23	Mercedes	MB 180E Kasten	Na/NiCl ₂	Deutsche Post AG, Post Hiddensee, Paketdienst	Hr. Oeberst
24	Mercedes	MB 180E Kasten	Na/NiCl ₂	Deutsche Post AG, Post Hiddensee, Paketdienst	Hr. Oeberst
25	Mercedes	MB 180E Kasten	Na/NiCl ₂	Deutsche Post AG, Post Bergen, Packetdienst	Hr. Oeberst
26	Mercedes	MB 180E Kasten	Na/NiCl ₂	Getränkemarkt in Prora, Warenauslieferung	Hr. Mahnke
27	Mercedes	MB 180E Pritsche	Ni/Cd	Nordwasser GmbH, Hiddensee, Transportunternehmen	Hr. Albrecht
28	Mercedes	MB 180E Pritsche	Ni/Cd	Klee-Blatt Getränkemarkt in Prora, Warenauslieferung	Hr. Mahnke
29	NEOPLAN	Metroliner	Na/S	Rügener Personennahverkehrsgesellschaft (RPNV), Linienverkehr in Bergen	Hr. Körber
30	NEOPLAN	Metroliner	Na/S	Rügener Personennahverkehrsgesellschaft (RPNV), Linienverkehr in Bergen	Hr. Körber
31	NEOPLAN	Metroliner	Na/S	Rügener Personennahverkehrsgesellschaft (RPNV), Linienverkehr in Bergen .	Hr. Körber
32	OPEL	Astra Caravan	Na/NiCl ₂	Ingenieurbüro für Arbeits- und Brandschutz	Hr. Schwanck
33	OPEL	Astra Caravan	Na/NiCl ₂	Landratsamt Bergen, Umweltamt, Wasserproben	Hr. Puttbresse
34	OPEL	Astra Caravan	Na/NiCl ₂	Antennenbau Sehlen, Kundendienst	Hr. Rosenow
35	OPEL	Astra Caravan	Na/NiCl ₂	Rügener Personennahverkehrsgesellschaft, Sekretariat	Fr. Förster
36	OPEL	Astra Caravan	Na/NiCl ₂	Textilpflege, Schnellreinigung, Auslieferungsfahrzeug	Hr. Sagert
37	OPEL	Astra Caravan	Ni/Cd	Kurverwaltung Binz, Dienstfahrzeug	Hr. Diener
38	OPEL	Astra Caravan	Ni/Cd	Kurverwaltung Middelhagen, Dienstfahrzeug	Fr. Pisch
39	OPEL	Astra Caravan	Ni/Cd	Autohaus Opel, Niederlassung Sagard	Hr. Schröter
40	OPEL	Astra Caravan	Ni/Cd	HEVAG, Hiddensee, Kundendienst EVU	Hr. Müller
41	OPEL	Astra Caravan	Ni/Cd	DAUG-Mitarbeiter Testfahrzeug, Dienstfahrzeug	Fr. Tobias
42	VW	Golf A3	Pb-Gel	HEVAG Sagard, Dienstfahrzeug	Hr. Müller
43	VW	Golf A3	Na/NiCl ₂	Landratsamt Bergen, Fuhrpark	Hr. Puttbresse
44	VW	Golf A3	Pb-Gel	Sozialmedizinischer Dienst	Hr. Dr. Kallius
45	VW	Golf A3	Ni/Cd	Fa. Insider Werbung, Binz	Hr. Münch
46	VW	Golf A2	Pb-Gel	Testfahrzeug für Meßtechnik, HTW Dresden	Hr. Dr. Treetz
47	VW	Golf A3	Na/NiCl ₂	Deutsche Post AG, Postdienst Binz	Hr. Oeberst
48	VW	Golf A3	Ni/Cd	Biosphärenreservat Süd-Ost-Rügen	Hr. Adam
49	VW	Golf A3	Na/NiCl ₂	Landwarenhaus Zirkow, Lieferfahrzeug	Hr. Hanau
50	VW	Golf A3	Na/NiCl ₂	Deutsche Post AG, Postdienst Binz	Hr. Oeberst
51	VW	Caravelle	Ni/Cd	DLRG Binz, Personaltransport	Hr. Klutke
52	VW	Caravelle	Ni/Cd	DRK-Bergen, Behindertenheim Ralswiek	Fr. Schmidt
53	VW	Caravelle	Ni/Cd	IFA-Ferienpark, Binz, Personentransport	Hr. Zwerchina
54	VW	Caravelle	Ni/Cd	Hotel Seepark Rügen, Vaschvitz, Personentransport	Fr. Gartner
55	VW	Caravelle	Ni/Cd	Volkssolidarität Bergen, Personentransport	Fr. Häcker
56	VW	Caravelle	Ni/Cd	Ostseeklinik Königshörn, Glowe, Personentransport	Hr. Jäcker
57	VW	Caravelle	Ni/Cd	Strandhotel Rügen, Personentransport	Hr. Rohde
58	VW	Caravelle	Ni/Cd	Gemeinde Putgarten, Transporte	Hr. Heinemann
59	VW	Caravelle	Ni/Cd	Nationalpark Jasmund, Kontrolle Naturschutzgebiet	Hr. Klötzer
60	VW	Caravelle	Ni/Cd	DAUG-Fahrzeug für Schnellladungstests	DAUG

Tabelle 1: Fahrzeuge, Betreiber und Fahrzeugeinsatz

Bild 2 zeigt die Art der Fahrzeugnutzung, die sich auf Rügen ergeben hat. Die Fahrzeugbetreiber lassen sich in drei Gruppen einteilen: die kommunalen Einrichtungen (26% der Fahrzeuge) haben das Elektrofahrzeug meist in einen kleinen Fuhrpark mit 1 bis 10 Fahrzeugen integriert, bei den gemeinnützigen Einrichtungen (19%) wurden meist dienstlich eingesetzte Privatfahrzeuge ersetzt und bei Privatunternehmen (41%) wurde das Fahrzeug meist neben einem weiteren Fahrzeug eingesetzt (mit Ausnahme von Post, HEVAG und RPNV, zusammen 14 %).

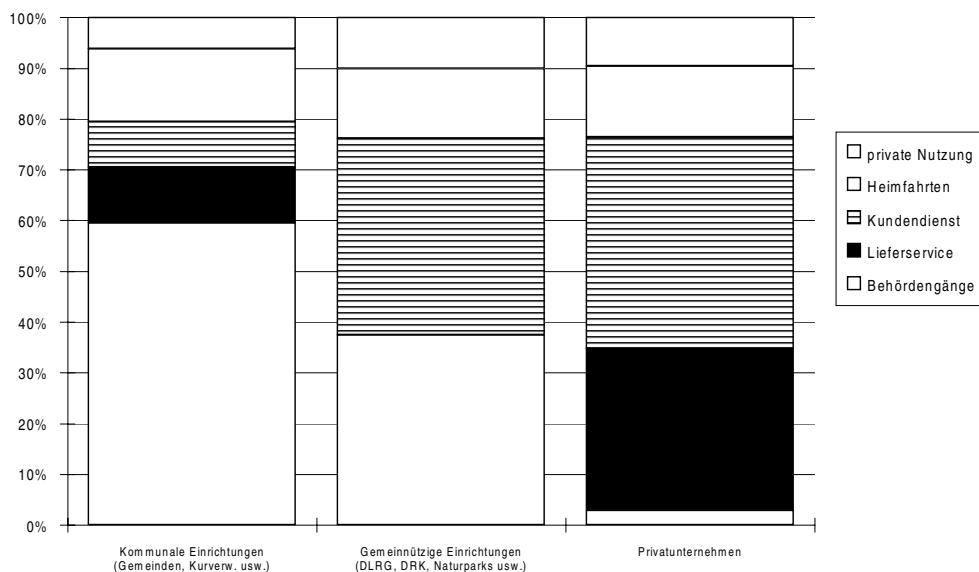


Bild 2: Verteilung der Fahrzeugnutzung auf Rügen

Die Elektrofahrzeuge wurden den Betreibern aufgrund ihres Prototypencharakters kostenlos zur Verfügung gestellt. Wie die Auswertung der Betriebsbereitschaft der Fahrzeuge in Kapitel 1.5 zeigt, hatten die E-Fahrzeuge einen erhöhten Wartungsaufwand. Es wurden Leihverträge über 6 Monate mit den Betreibern abgeschlossen, die bei beidseitiger Zufriedenheit jeweils um weitere 6 Monate verlängert wurden.

Aus verschiedenen Gründen wechselten bei rund 40 % der Fahrzeuge im Laufe des Feldversuchs die Betreiber. Zu den Ursachen gehörten unter anderem Unternehmensschließungen, Verluste von ABM- bzw. Fahrerstellen, Fuhrparkveränderungen, mangelhafte Fahrzeugnutzung und -pflege und zu geringe Reichweite. Näheres dazu siehe auch in Kapitel 1.6.

1.3.2 Einsatzbedingungen

Auf Grund der Lage der Insel Rügen in der Ostsee und der teilweise schlechten Straßenverhältnisse war der Betrieb der Fahrzeuge auf Rügen gekennzeichnet durch zum Teil erschwerte Einsatzbedingungen:

- Einsatz häufig auf Kopfsteinpflaster, unbefestigten Wegen oder im Gelände (Hiddensee)
- salzhaltige Luft
- hohe Windgeschwindigkeiten
- durch Wind mitgeführter feiner Sand
- Frost bis -20°C

Diese Einsatzbedingungen hatten zusammen mit der gegebenen Infrastruktur eine hohe Beanspruchung der Bauteile sowohl in mechanischer als auch in elektrotechnischer Hinsicht zur Folge (Bild 3 bis 6).

Das geografische Profil von Rügen ist vorwiegend flach beziehungsweise hügelig. Im Nordosten sind Steigungen bis 10% und Höhenunterschiede bis über 100 m vorhanden.

Bis Ende 1994 traten auf Grund des veralteten Energieversorgungsnetzes relativ häufig Netzschwankungen bzw. Netzausfälle auf. Dies führte unter anderem zu oft unbemerkt Abbrüchen von Ladevorgängen, so daß die Fahrzeuge morgens nicht einsatzbereit waren.



Bild 3: Elektrofahrzeugeinsatz auf typischer Nebenstraße auf Rügen



Bild 4: Elektrofahrzeugeinsatz abseits der Straße (Wasserproben)



Bild 5: Elektrofahrzeugeinsatz bei winterlichen Witterungsverhältnissen



Bild 6: Elektrofahrzeug einer Kurverwaltung im Einsatz beim Strandkorbaufbau

1.4 Fahrleistungen

Der Betrieb der Elektrofahrzeuge und die damit verbundenen Kilometerleistungen der Fahrzeuge war stark abhängig vom Einsatzzweck bei den Betreibern. Bei der Fahrzeugvergabe wurden die Vielfahrer bevorzugt, um während des Versuches möglichst viele Meßdaten zu erhalten. Bei Lieferunternehmen, wie zum Beispiel einem Wäschereiservice für Hotels, gab es wiederkehrende Touren und damit eine gleichmäßig hohe Nutzung der Elektrofahrzeuge. Bei Fahrzeugen in den Verwaltungsbehörden gab es, je nach Auslastung des Fuhrparks, stark schwankende Fahrleistungen. Die durchschnittlichen Tagesfahrleistungen der Elektrofahrzeuge lagen bei 30 - 40 km/Tag, die Spitzenwerte lagen mit bis zu 200 km/Tag jedoch deutlich darüber. Die Jahresfahrleistungen aller Elektrofahrzeuge betrug im Mittel rund 10.000 km/Jahr.

Die auf Rügen täglich gefahrenen Kilometer der Elektrofahrzeuge sind in Bild 7 als Summenhäufigkeiten dargestellt. Hierbei wurden nur die Tage berücksichtigt, an denen die Fahrzeuge im Einsatz waren. Es wurde zwischen dem Einsatz der Pkw und der leichten Nutzfahrzeuge differenziert, da es aufgrund der Einsatzart zwischen diesen beiden Gruppen Unterschiede in den täglichen Fahrweiten gab. Als Nutzfahrzeuge wurden der MB 100 E von Mercedes und die Caravelle von Volkswagen betrachtet.

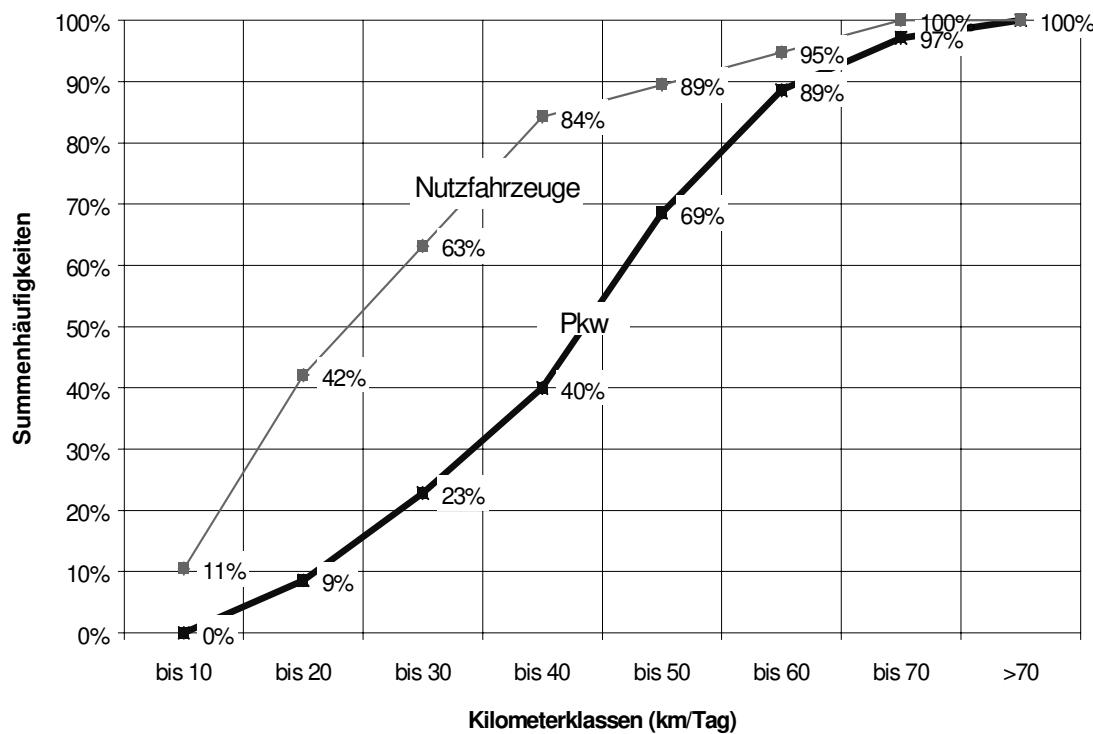


Bild 7: Summenhäufigkeiten der durchschnittlichen täglichen Fahrstrecken auf Rügen

Insgesamt hat die Versuchsflotte auf Rügen im Projektzeitraum vom 2. Oktober 1992 bis zum 31. Dezember 1995 **1.114.412 km** zurückgelegt. Im ersten Halbjahr 1996, das als Verlängerung von der deutschen Fahrzeug- und Batterieindustrie initiiert wurde, wurden noch

einmal über **215.000 km** erfahren. Damit ergibt sich eine Gesamtfahrleistung von insgesamt **1.330.000** elektrisch gefahrenen Kilometern.

In Bild 8 ist die halbjährliche Fahrleistung der einzelnen Elektrofahrzeuge dargestellt. Die zu den Fahrzeugnummern gehörenden Fahrzeuge sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Deutlich zu erkennen sind die großen Unterschiede in den Kilometerleistungen, die stark vom Einsatz abhängig waren.

Die sukzessive Fahrzeugauslieferung sowie der teilweise längere Ausfall von Fahrzeugen wird ebenfalls deutlich.

Die Kilometerleistungen von Fahrzeug 16 und Fahrzeug 51 (im Zeitraum Juni 94 bis Juli 95) sind zwei Extrembeispiele von Nutzern, die sich vollständig auf das Elektrofahrzeug eingestellt haben und somit flexibel auf den jeweiligen Ladezustand des Fahrzeugs reagieren konnten, daß teilweise ein Mehrfaches der möglichen Reichweite an einem Tag erreicht wurde. Bei Fahrzeug 41 ergab sich durch einen regelmäßigen Einsatz auf einer längeren Strecke jeweils morgens und abends eine komplette Batterieentladung. Die besonders niedrigen Kilometerleistungen lassen sich zum Teil durch den Einsatz hauptsächlich innerorts erklären (Bergen, Binz). Zum Teil waren die Fahrzeuge innerhalb von Fuhrparks ungünstig eingesetzt (interne Abstimmungsprobleme) oder häufiger bzw. länger defekt als der Durchschnitt.

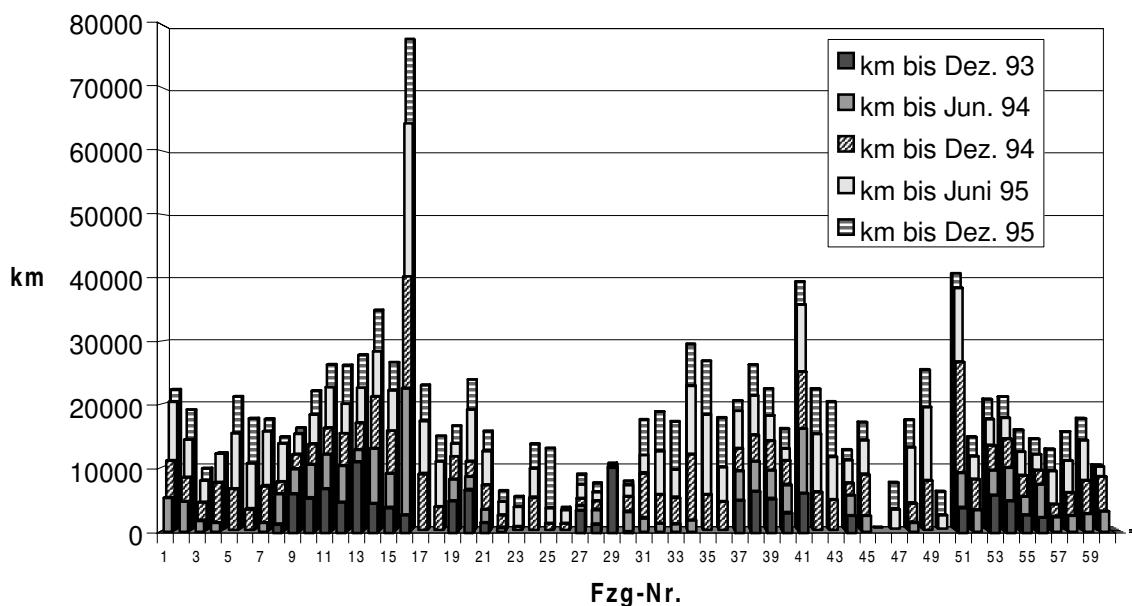


Bild 8: Halbjährliche Fahrleistung der einzelnen Elektrofahrzeuge

In Tabelle 2 sind alle 60 Elektrofahrzeuge mit Batterietyp, Auslieferungsdatum, Standzeiten und Gesamtfahrleistung der einzelnen Fahrzeuge aufgelistet. Die Tabelle nennt auch die Fahrzeugnummern, die der eindeutigen Fahrzeugidentifikation dienen und im vorliegenden Bericht häufig benutzt werden.

Die in Tabelle 2 genannten Standzeiten beinhalten zum Teil erhebliche Wartezeiten auf Ersatzteile. Näheres dazu folgt im nächsten Kapitel.

Fahrzeugnummer	Fahrzeugtyp	Batterietyp	Übergabe an den Betreiber	Versuchsmonate auf Rügen	davon Standzeit in %	km bis 31.12.95
1	BMW 3-er	Na/NiCl ₂	22.02.94	22	32%	22 091
2	BMW 3-er	Na/NiCl ₂	14.03.94	22	41%	18 856
3	BMW 3-er	Na/NiCl ₂	17.03.94	21	66%	9 484
4	BMW 3-er	Na/NiCl ₂	01.06.94	19	30%	11 957
5	BMW 3-er	Na/NiCl ₂	18.08.94	16	10%	20 921
6	BMW 3-er	Na/NiCl ₂	18.08.94	16	21%	17 485
7	BMW 3-er	Na/NiCl ₂	01.06.94	19	49%	17 332
8	BMW 3-er	Ni/Cd	27.10.93	26	52%	14 494
9	Merc. 190	Ni/Cd	15.12.92	36	15%	15 885
10	Merc. 190	Ni/Cd	16.12.92	36	24%	21 902
11	Merc. 190	Ni/Cd	10.05.93	32	7%	26 093
12	Merc. 190	Na/NiCl ₂	17.08.93	28	25%	25 984
13	Merc. 190	Na/NiCl ₂	01.09.93	28	21%	27 632
14	Merc. 190	Na/NiCl ₂	02.09.93	28	15%	34 791
15	Merc. 190	Na/NiCl ₂	02.09.93	28	15%	26 454
16	Merc. 190	Na/NiCl ₂	29.09.93	27	20%	78 249
17	Merc. 190	Na/NiCl ₂	30.06.94	18	10%	22 779
18	Merc. 190	Na/NiCl ₂	01.07.94	18	36%	14 644
19	MB 100 E	Na/NiCl ₂	18.03.93	33	37%	16 283
20	MB 100 E	Na/NiCl ₂	07.04.93	33	39%	23 663
21	MB 100 E	Na/NiCl ₂	06.08.93	29	44%	15 436
22	MB 100 E	Na/NiCl ₂	25.01.94	23	32%	6 157
23	MB 100 E	Na/NiCl ₂	23.08.94	16	25%	4 975
24	MB 100 E	Na/NiCl ₂	29.06.94	18	13%	13 370
25	MB 100 E	Na/NiCl ₂	23.08.94	16	1%	12 688
26	MB 100 E	Na/NiCl ₂	28.11.94	13	31%	3 153
27	MB 100 E	Ni/Cd	24.06.93	30	32%	8 486
28	MB 100 E	Ni/Cd	15.10.93	26	35%	7 112
29	Neoplan-Bus	Na/S	01.12.92	37	80%	10 236
30	Neoplan-Bus	Na/S	18.10.93	26	58%	7 380
31	Neoplan-Bus	Na/S	18.05.94	19	29%	17 252
32	Opel Astra Caravan	Pb-Gel	01.07.94	18	18%	18 546
33	Opel Astra Caravan	Na/NiCl ₂	17.06.94	18	25%	16 962
34	Opel Astra Caravan	Na/NiCl ₂	17.06.94	18	16%	29 366
35	Opel Astra Caravan	Na/NiCl ₂	19.08.94	16	2%	26 663
36	Opel Astra Caravan	Na/NiCl ₂	19.08.94	16	28%	17 584
37	Opel Astra Caravan	Ni/Cd	26.05.93	31	11%	20 274
38	Opel Astra Caravan	Ni/Cd	25.05.93	31	20%	26 005
39	Opel Astra Caravan	Ni/Cd	28.07.93	29	23%	22 278
40	Opel Astra Caravan	Ni/Cd	29.07.93	29	18%	15 848
41	Opel Astra Caravan	Ni/Cd	25.06.93	30	21%	39 338
42	VW Golf A3	Pb-Gel	23.08.94	16	11%	22 154
43	VW Golf A3	Na/NiCl ₂	23.08.94	16	27%	20 144
44	VW Golf A3	Pb-Gel	25.06.93	30	15%	12 437
45	VW Golf A3	Ni/Cd	10.05.94	20	3%	16 865
46	VW Golf A3	Pb-Gel	Dresden			
47	VW Golf A3	Na/NiCl ₂	30.03.95	9	7%	7 210
48	VW Golf A3	Ni/Cd	10.05.94	20	10%	17 214
49	VW Golf A3	Na/NiCl ₂	23.08.94	16	4%	25 279
50	VW Golf A3	Na/NiCl ₂	30.03.95	9	18%	5 744
51	VW T 4	Ni/Cd	19.05.93	31	42%	40 731
52	VW T 4	Ni/Cd	14.01.94	23	9%	14 468
53	VW T 4	Ni/Cd	20.06.93	30	11%	20 554
54	VW T 4	Ni/Cd	30.06.93	30	10%	20 895
55	VW T 4	Ni/Cd	16.07.93	29	12%	15 615
56	VW T 4	Ni/Cd	03.09.93	28	18%	14 150
57	VW T 4	Ni/Cd	21.01.94	23	6%	12 518
58	VW T 4	Ni/Cd	11.02.94	23	21%	15 355
59	VW T 4	Ni/Cd	11.02.94	23	24%	17 466
60	VW T 4	Ni/Cd	11.03.94	22	6%	10 772

Tabelle 2: Liefertermine und Kilometerleistungen der Fahrzeugflotte

In Bild 9 ist die durchschnittliche monatliche Fahrleistung der Elektrofahrzeuge dargestellt. Besonders deutlich ist der saisonale Unterschied der gefahrenen Kilometer zwischen den Sommer und Wintermonaten zu erkennen. Während die Fahrzeuge in der Zeit von Mai bis September durchschnittlich 900 km pro Monat zurücklegten, waren es in den Wintermonaten November bis Februar nur ca. 700 km.

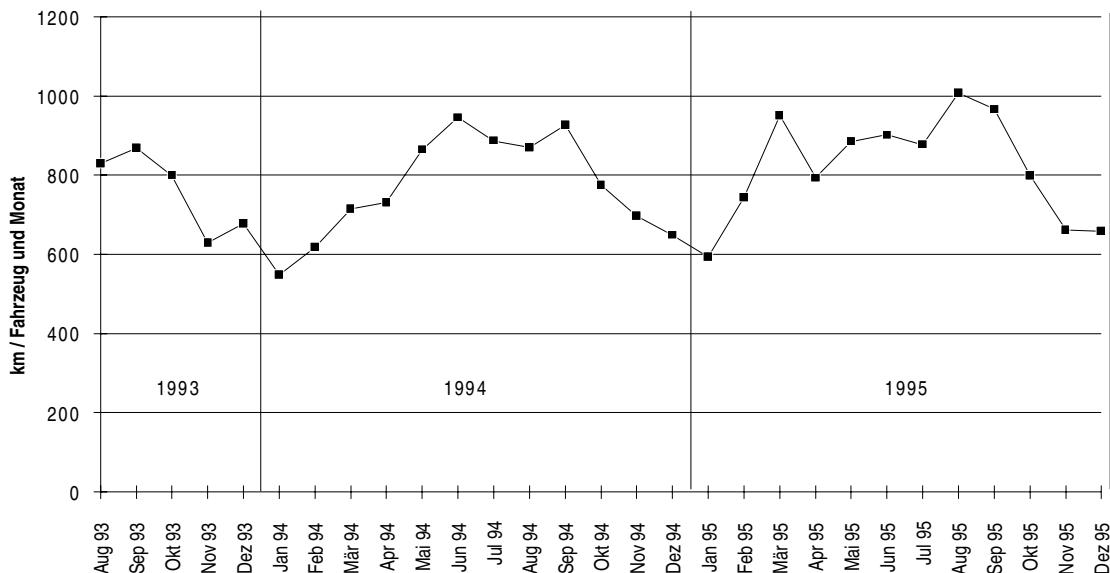


Bild 9: Durchschnittliche monatliche Fahrleistung der Elektrofahrzeugflotte auf Rügen

1.5 Service und Baugruppenzuverlässigkeit

In diesem Kapitel wird auf die Standzeiten der Elektrofahrzeuge näher eingegangen. Die Ausfallursachen werden hier verschiedenen Gruppen zugeordnet, die sich aus den jeweiligen Einzelereignissen zusammensetzen.

Im Anhang zu Kapitel 1 (Anhang A 1.1 - A 1.4) zeigen einige Tabellen, wie die Fahrtenbücher, Controllerblätter, Werkstattprotokolle bzw. die Statistik der Betriebsbereitschaft geführt wurden.

1.5.1 Standzeiten

Die dezentrale Lage Rügens mit den damit verbundenen langen Ersatzteilbeschaffungszeiten sowie die Kapazitätsengpässe im Werkstattbereich hatten einen relativ hohen Anteil an Standzeiten zur Folge.

Die Wartungs- und Servicearbeiten wurden von der DAUG in Zirkow in direkter Rücksprache mit den entsprechenden Projektpartnern koordiniert. Diagnosen, das Beheben von Schäden vor Ort sowie das Abschleppen der Fahrzeuge führte das Werkstattpersonal der DAUG durch. Weitergehende - speziell herstellerabhängige - Defekte wurden dann in Zusammenarbeit mit den jeweiligen Firmen behoben.

Trotz eines gut bestückten Ersatzteillagers traten in der Ersatzteilbeschaffung immer wieder erhebliche Verzögerungen auf, da spezielle Prototyp-Teile aufgrund der hohen Kosten nicht vorrätig gehalten werden konnten, sondern entweder repariert oder erst neu angefertigt werden mußten.

Der Anteil der Standzeit (Ausfalltage) betrug einschließlich der Batterie- und Fahrzeugwartung 25% der Versuchstage, die Fahrzeuge standen also 75% der Zeit dem Betreiber zur Verfügung. Die Standzeit enthält neben den zum Teil langen Wartezeiten auf Komponenten auch die für die Diagnose benötigte Zeit. Diese konnte in Ausnahmefällen bis zu einer Woche und mehr dauern. Wenn zum Beispiel ein Fehler nur in einem bestimmten Betriebszustand auftrat und dies nur bei besonderen Randbedingungen, war ein erheblicher Aufwand an Testfahrten mit Laptop und Meßequipment erforderlich, um die Störung zu lokalisieren. Die eigentliche Reparaturzeit betrug dann meistens nur einige Prozent der gesamten Ausfallzeit.

In Bild 10 sind für die einzelnen Fahrzeuge die Versuchstage und die Standtage sowie die im Versuchszeitraum erreichten Kilometerleistungen aufgetragen. Neben den sehr unterschiedlichen Versuchs- und Standzeiten der einzelnen Fahrzeuge wird ersichtlich, daß die Anzahl der gefahrenen Kilometer wenig von der Einsatzbereitschaft abhing (Versuchstage), hier ist eher die Art des Einsatzes maßgeblich gewesen.

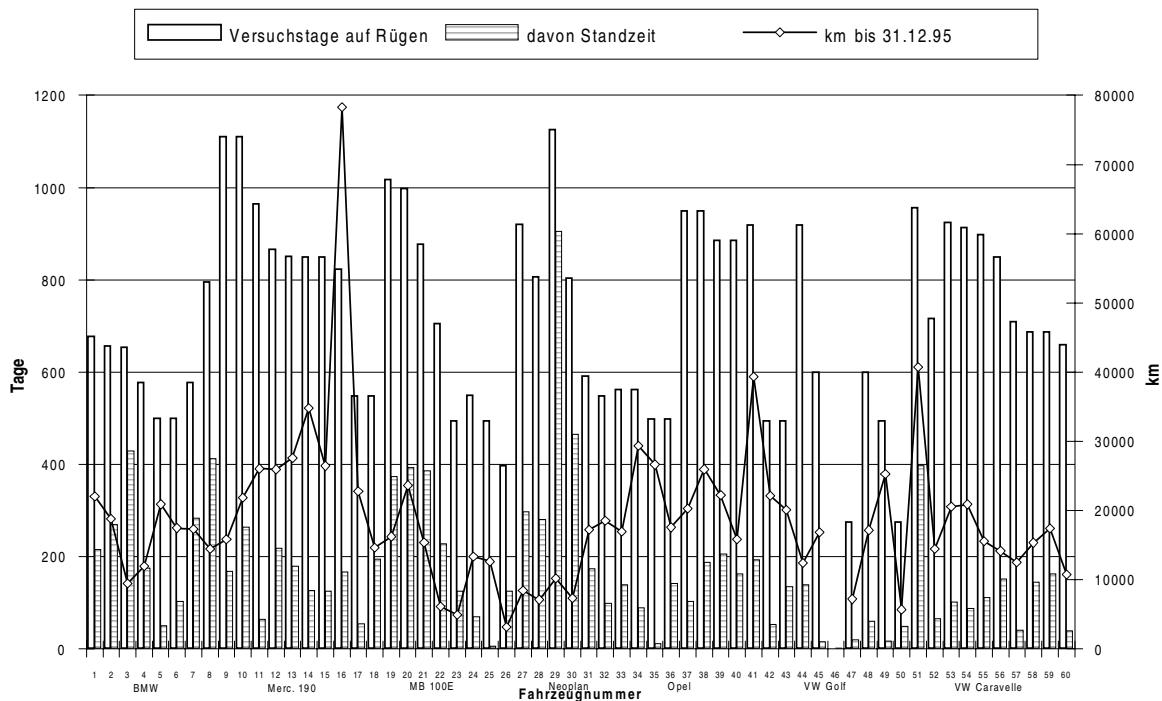


Bild 10: Versuchs- und Standtage sowie Kilometerleistungen der einzelnen Fahrzeuge

1.5.2 Baugruppenzuverlässigkeit

Allgemein:

Die Aufgabe der Fahrzeugbetreuung umfaßte neben der Wartung, Diagnose und Reparatur der Elektrofahrzeuge auch die Ausarbeitung einer ausführlichen Statistik zu den Ursachen der Ausfälle. Für die Zeiten, in denen ein Fahrzeug dem Betreiber nicht zur Verfügung stand, wurde ein Werkstattprotokoll geführt, das neben dem jeweiligen Ereignis die ausgeführten Tätigkeiten, eventuelle Meß- bzw. Einstellwerte, Datum sowie km-Stand enthielt (Anhang A 1.4). Die Ereignisse wurden sechs verschiedenen Gruppen zugeordnet:

- Antrieb
- Traktionsbatterie
- Ladung
- Bordnetz
- E-Fahrzeug-Komponenten
- Fahrzeug allgemein

Zusätzlich zu diesen sechs Gruppen gab es noch zwei Ereignisgruppen, die zwar in der Ausfallstatistik aufgeführt werden, aber keinen Ausfall durch defekte Bauteile darstellen: Die beiden Kategorien Fahrzeug- und Batterieinspektion stellen versuchsbedingte Inspektionen der Fahrzeug- und Batteriehersteller an den Demonstrationsfahrzeugen dar. Hier wurden teilweise Optimierungs- oder Kontrollarbeiten an Komponenten vorgenommen.

Die prozentualen Anteile der einzelnen Ausfallursachen sind in Bild 11 dargestellt. Die Darstellung zeigt deutlich, daß bei den Elektrofahrzeugen nicht nur Störungen an den Traktionsbatterien (incl. Batteriesteuerung) zu Ausfällen führten, sondern auch die speziellen Elektrofahrzeugkomponenten wie Servolenkung und Unterdruckunterstützung der Bremse sowie die Ladung und das Bordnetz. Auch hier besteht noch weiterer Entwicklungsbedarf.

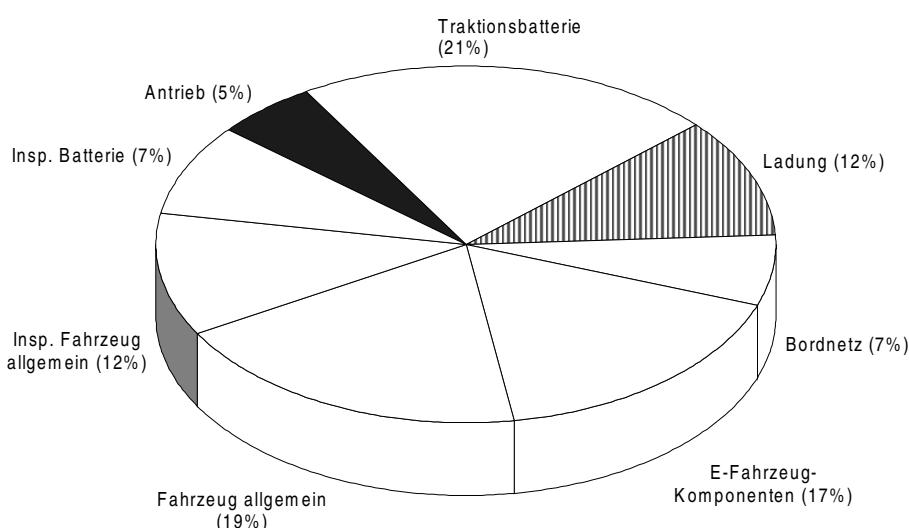
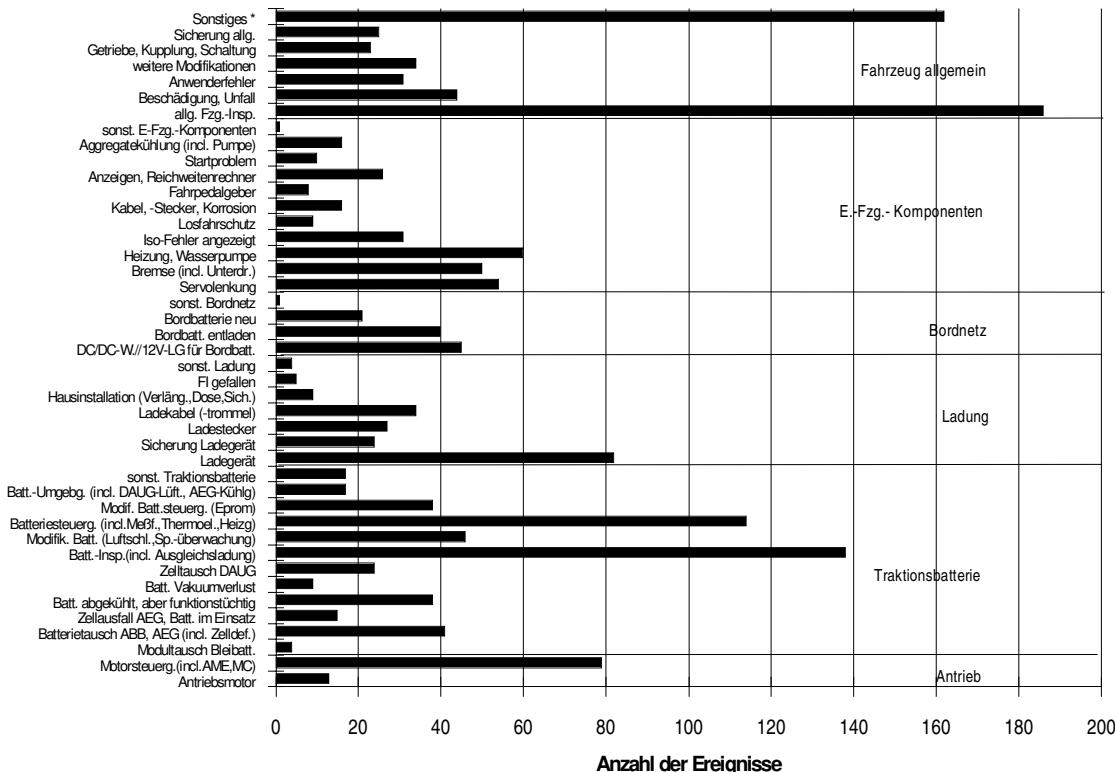


Bild 11: Anteile der Ereignisse nach Ursachen

Die sechs Ursachengruppen enthalten insgesamt 42 Einzelursachen, vom Antriebsmotor bis zum Zelldefekt bei den Batterien, die der entsprechenden Störungen zugeordnet wurden. In Bild 12 sind die Einzelsummen sämtlicher Ereignisse bis Dezember 1995 dargestellt.



* Erläuterungen: **Sonstiges:** Reifenpanne, Inspektion der Meßtechnik, unbekannte Fehlerursache usw., **Sicherungen allg.:** konventionelle Fahrzeugsicherungen, **weitere Modifikationen:** Einbau Schnelladedose, Variation des Lufteinlasses usw., **Anwenderfehler:** Ladung vergessen usw., **Sonstige E-Fzg.-Komponenten:** ungeklärte Nässeprobleme usw., **Aggregatekühlung:** Kühlung von Antriebssteuerung und Motor usw., **Batt.-Umgebung:** DAUG-Batt.-Luftkühlung, AEG-Batt.-Luft- bzw. Ölökühlung, **Modif. Batt.-steuerung:** Verbesserung der Batteriesteuering durch Einbau veränderter EPROM's usw., **Batteriesteuering (incl....):** inclusive Meßfehler, Thermoelementausfall, Batterieheizung, **Modifikation Batterie:** Einbau veränderter Lufschläuche, Einbau Spannungsüberwachung, Umbau auf Parallelschaltung

Bild 12: Werkstattstatistik aller Ereignisse an den Fahrzeugen bis Dezember 1995

Neben den Vorgängen der Sammelrubrik „Sonstiges“, in der die nicht zuzuordnenden Ereignisse aufgetragen wurden, und den versuchsbedingten Batterie- und Fahrzeuginspektionen traten besonders häufig Probleme bei den speziell an das Elektrofahrzeug angepaßten Komponenten wie Servolenkung, Bremse (Unterdruck) und Heizung (incl. Pumpe) auf, meist wegen Lagerschäden durch Feuchtigkeitseinwirkung an Motoren oder dem Versagen von Unterdruckschaltern.

Die elektrische Bremse (Rekuperation) hat sich in allen Fahrzeugen bewährt.

Beim Bordnetz gab es in größerer Zahl Ausfälle der DC/DC-Wandler bzw. der 12V-Ladegeräte, welche je nach Ladekonzeption die Bordbatterie versorgten, zusätzlich wurde das Bordnetz versuchstechnisch bedingt bei mehrtägiger Standzeit durch das Meßgerät außerordentlich belastet.

Im Bereich der Ladetechnik erwiesen sich neben einigen Ladegerätskonstruktionen die Ladekabel- bzw. Ladetrommelkonstruktionen sowie die gängigen Schutzkontaktstecker (Schuko) in vielen Fällen als nicht zuverlässig. Neben den mechanischen Schwächen (defekte Zugentlastung) führte bei den Steckverbindungen und bei Sicherungen in den Ladegeräten die unzureichende Dimensionierung für die dauerhafte Ladestrombelastung zum Versagen.

Allgemein kam es durch Korrosionserscheinungen im Bereich von Steckverbindungen relativ häufig zu Kontaktproblemen.

Im Bereich der Traktionsbatterien gab es erwartungsgemäß häufig Batterieinspektionen sowie in Folge von Versuchserkenntnissen teilweise Modifikationen am Batteriesteuengerät und an der Batterie. Diese bezogen sich auf Veränderungen an der Batterieverschaltung, Batteriekühlung bzw. -heizung sowie Modifikationen von Ladekennlinien und Überwachungsfunktionen. An einigen Batteriesteuерungen gab es des öfteren Ausfälle der Temperaturmessung oder Kommunikationsprobleme. Nicht mehr funktionstüchtige Einzelzellen (Ni/Cd) oder Batterien (Na/NiCl₂ und Na/S) wurden ausgetauscht und beim Hersteller untersucht.

Im Antriebsbereich gab es neben sehr zuverlässigen Motoren einige mit Kompletausfällen (Wicklungsschluß) sowie teilweise Probleme mit der Motorsteuerung.

Seitens der Fahrzeughalter gab es einige wiederholt auftretende Anwenderfehler. Mehrfach wurde das Laden des Fahrzeugs vergessen, in einigen Fällen wurde der Ladebeginn nicht kontrolliert, so daß ein defekter Hausanschluß nicht bemerkt wurde. Startprobleme gab es nach unbeabsichtigtem Betätigen des Notaus-Schalters im Innenraum sowie beim Auslösen der Wegfahrsperrre durch nicht vollständiges Schließen der Ladeklappe.

Im gesamten Projektzeitraum wurden insgesamt 1700 Einzelereignisse registriert, viele dieser Ereignisse traten auch in Kombination auf. So konnte beispielsweise durch einen Defekt an der Hausanschlußdose ein Ladestecker verschmoren, der einen Kurzschluß verursachte und dadurch den Fehlerstromschutzschalter (FI) auslöste.

Die relativ große Anzahl an Einzelereignissen zeigt aber auch deutlich, wie notwendig die Praxiserprobung von neuen Technologien ist. Denn einen Großteil der in diesem Demonstrationsvorhaben gesammelten Erfahrungen wurden gerade nur durch den täglichen Einsatz im Alltagsbetrieb möglich.

Schon während des Feldversuches auf Rügen wurden Konsequenzen aus den Einsatz erfahrungen gezogen und sowohl konstruktive Änderungen durchgeführt als auch Softwaremodifikationen vorgenommen. Weitere Verbesserungen werden sich durch eine entsprechende Qualitätssicherung bei Serienfertigungen ergeben.

Während des Feldversuches gab es rund 20 Fahrzeugbeschädigungen durch Fahrfehler usw. sowie rund 10 Unfälle bzw. Beschädigungen durch Fremdverschulden. Unter letzteren waren drei mittelschwere Auffahrunfälle auf Landstraßen, bei denen das Heck des jeweiligen Elektrofahrzeuges stark beschädigt wurde. Dabei wurden die Batterien nicht oder nur leicht beschädigt. Die konstruktiven Sicherheitsmaßnahmen sowohl an den Batterien als auch an den Fahrzeugen erwiesen sich als wirkungsvoll, es traten weder Reaktanden aus den Batterien aus, noch gab es unfallbedingte Kurzschlüsse.

Baugruppenzuverlässigkeit bezogen auf Kilometerleistungen:

Im folgenden Abschnitt wird der Bezug zwischen den Ausfallursachen, die im vorangegangenen Abschnitt behandelt wurden, und den einzelnen Fahrzeugtypen bzw. Fahrzeug- und Batteriekombinationen in Abhängigkeit von den Kilometerleistungen hergestellt.

In Bild 13 sind die Einzelereignisse, bezogen auf 10.000 km, in den sechs verschiedenen Ereignisgruppen und den beiden Inspektionsgruppen für die unterschiedlichen Fahrzeug- und Batteriekombinationen zusammengefaßt.

Die Verhältnisse verschieben sich im Vergleich zu Bild 11 geringfügig. Nach wie vor bestehen die Hauptanteile aus den Gruppen Fahrzeug allgemein, Traktionsbatterie und Elektrofahrzeug-Komponenten. Die Gruppen Ladung, Bordnetz und Antrieb weisen ebenfalls einen nicht zu vernachlässigenden Anteil auf. In allen Bauteilgruppen ist bei einer Serienfertigung mit einer deutlichen Verbesserung der Betriebssicherheit zu rechnen. Die Aufteilung nach Fahrzeug-Batterie-Kombinationen sollte in Bild 13 in einigen Fällen nicht überbewertet werden, bei VW Golf Ni/Cd und Pb-Gel, MB 100 Ni/Cd und BMW Ni/Cd handelt es sich nur um ein bis zwei Fahrzeuge.

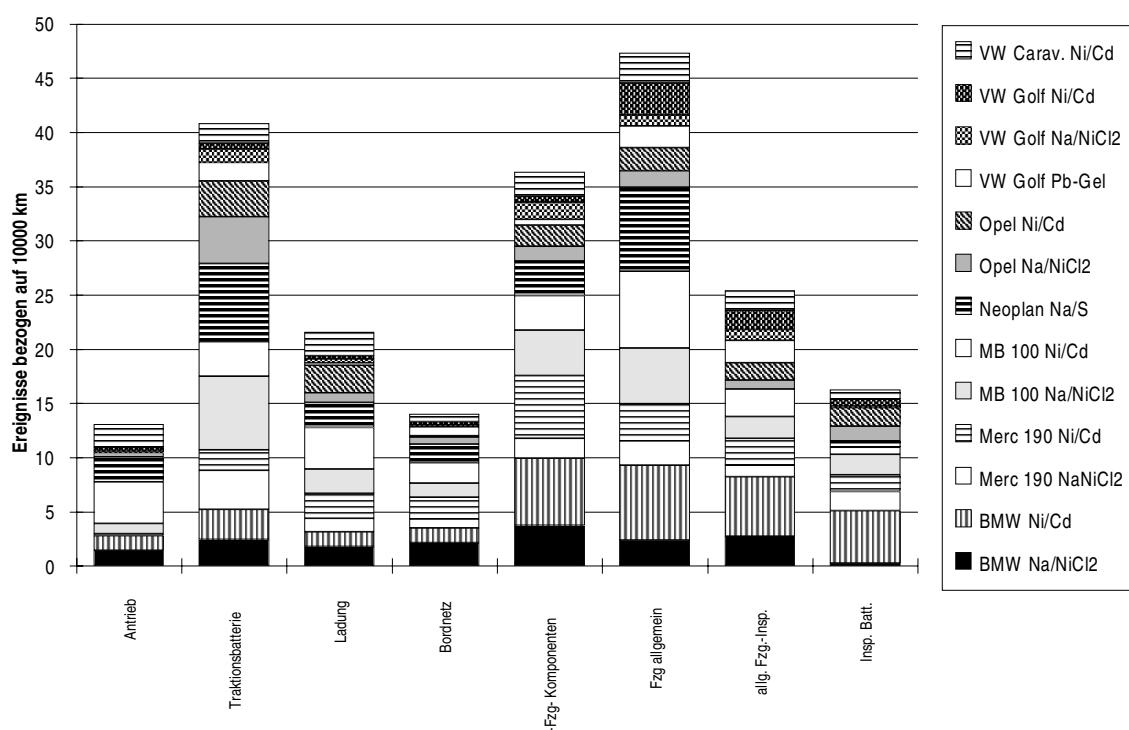
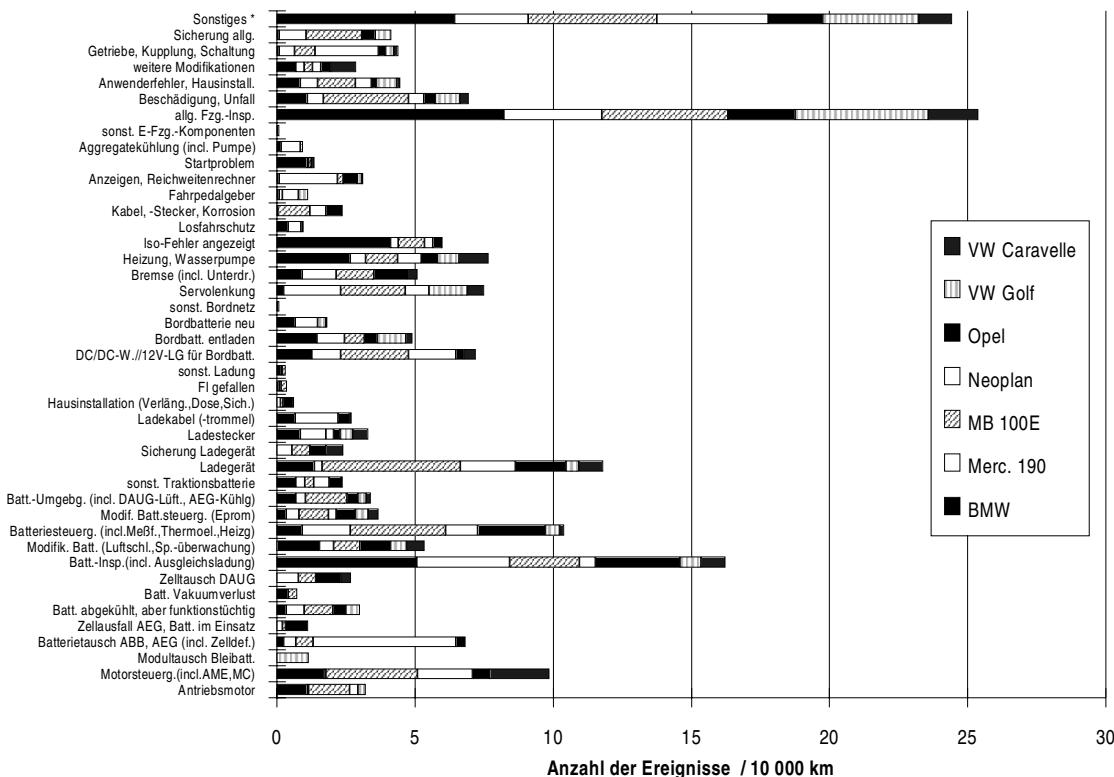


Bild 13: Ausfallereignisse bzw. Inspektionen bezogen auf 10.000 km

Die nachfolgende Darstellung (Bild 14) zeigt, ebenfalls auf 10.000 km bezogen, noch einmal die Einzelursachen, aufgeteilt auf die jeweiligen Fahrzeughersteller. Auch hier verschieben sich die Verhältnisse zwischen den einzelnen Ereignissen nur teilweise (vgl. Bild 12).

Erwartungsgemäß ergeben sich für jeden Hersteller andere Schwerpunkte bei den einzelnen Ausfallursachen; es soll an dieser Stelle nicht im Einzelnen darauf eingegangen werden, da die Erläuterungen der jeweiligen Gründe den Rahmen dieses Berichtes sprengen würde.

Neben konstruktionsbedingten Schwächen an Bauteilen, die seitens der Zuliefererindustrie nicht für die Anwendung im Elektrofahrzeug zur Verfügung standen (z.B. Kabeltrommel, Steckverbindungen allgemein) und trotzdem zur Versuchsdurchführung eingesetzt werden mußten, gab es Mängel an speziell für das Elektrofahrzeug konstruierten Bauteilen, die erst im Alltagsbetrieb auftraten. Für einige Zulieferer-Bauteile gab es im Reparaturfall Probleme mit dem Hersteller, da bei den teils handgefertigten Produkten für eine Reparatur sowie bei einem Neuaufbau ein hoher Zeit- und Kostenaufwand zu realisieren war (z.B. Motorsteuerung, Ladegeräte).



* Erläuterungen: **Sonstiges:** Reifenpanne, Inspektion der Meßtechnik, unbekannte Fehlerursache usw., **Sicherungen allg.:** konventionelle Fahrzeugsicherungen, **weitere Modifikationen:** Einbau Schnelladedose, Variation des Lufteinlasses usw., **Anwenderfehler:** Ladung vergessen usw., **Sonstige E-Fzg.-Komponenten:** ungeklärte Nässeprobleme usw., **Aggregatekühlung:** Kühlung von Antriebssteuerung und Motor usw., **Batt.-Umgebung:** DAUG-Batt.-Luftkühlung, AEG-Batt.-Luft- bzw. Ölkühlung, **Modif. Batt.-steuerung:** Verbesserung der Batteriesteuerung durch Einbau veränderter EPROM's usw., **Batteriesteuerung (incl....):** inclusive Meßfehler, Thermoelementausfall, Batterieheizung, **Modifikation Batterie:** Einbau veränderter Lufschläuche, Einbau Spannungsüberwachung, Umbau auf Parallelschaltung

Bild 14: Anzahl der Einzelereignisse bei den jeweiligen Fahrzeugherrstellern

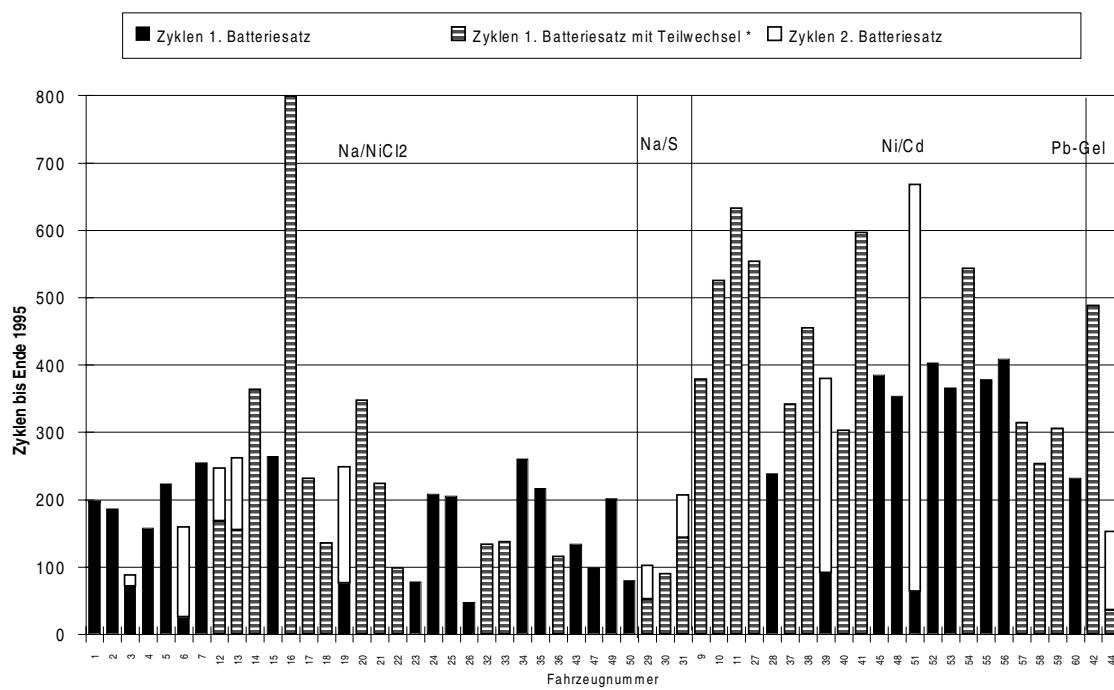
Ein wesentliches Ziel des Demonstrationsvorhabens auf Rügen war der Vergleich und die Bewertung neuer Batteriesysteme. Eine Auswertung der Batteriestatistik zeigt die folgende Tabelle 2. Neben der Gesamtzahl der Fahrzeuge mit dem jeweiligen Batteriesystem ist die Anzahl der Fahrzeuge aufgeführt, bei denen komplett Batterien bzw. Teilbatterien oder einzelne Zellen getauscht wurden.

Batteriesystem	Fahrzeuge ges.	Batterietausch	Tausch Teilbatt.	Zellentausch
Na/NiCl ₂	31	6	13	
Ni/Cd	23	3		14
Na/S	3	2	3	
Pb-Gel	2	1	2	

Tabelle 2: Anzahl der Fahrzeuge mit Batterietausch

Die in den Neoplanbussen installierten Na/S-Batterien wurden im Projektzeitraum aufgrund von technischen Änderungen an den Batterien mehrfach getauscht.

Bild 15 zeigt für jedes Elektrofahrzeug die im Versuchszeitraum erreichten Zyklen der Traktionsbatterien. Diese sind mit Hilfe der gemessenen Energieaufnahmen der einzelnen Batterien pro km Fahrstrecke, der Nennenergien der Batteriesysteme und den gefahrenen Gesamtkilometern errechnet worden (vgl. auch Kapitel 12.4.3.3). Diese Zyklenzahl entspricht nicht der Anzahl der tatsächlichen Ladevorgänge, da im Alltagsbetrieb viele Zwischenladungen, also unvollständige Ladungen, durchgeführt wurden.



* bei zweiteiligen Na/NiCl₂-Batterien Tausch einer Teilbatterie, bei Na/S-Batterie analog, bei Ni/Cd-Batterie Tausch einiger Zellen, bei Pb-Gel-Batterie Tausch von Modulen

Bild 15: Zyklen der Traktionsbatterien bis Ende 1995

Je nach Batteriesystem und Fahrzeugtyp gab es unterschiedliche Konfigurationen. Bei der ZEBRA Na/NiCl₂-Batterie wurden pro Fahrzeug eine oder zwei Batterien installiert. Die Neoplanbusse besaßen je drei Na/S-Batterien und bei Fahrzeugen mit Ni/Cd-Batteriesystemen kamen 120 bis 204 Einzelzellen in einem, zwei oder drei Trögen zum Einsatz. Bei

den Zyklen „1. Batteriesatz mit Teilwechsel“ wurden also im Laufe des Versuchsbetriebs je nach Batteriesystem eine Batterie, einzelne Zellen oder einige Module ausgetauscht.

Die geringere Zyklenzahl bei Na/NiCl₂ bzw. höhere Zyklenzahl bei Ni/Cd ist auf den höheren Energieinhalt der Na/NiCl₂-Batterien und die insgesamt etwas spätere Auslieferung der Fahrzeuge mit diesem Batteriesystem zurückzuführen.

Das Bild 15 lässt jedoch keine generelle Aussage über die Lebensdauer der Batterien zu, da die Fahrzeuge über das Ende des Jahres 1995 im Einsatz waren. Auch nach dem Ende der Versuchsverlängerung im Juni 1996 waren die Batteriesysteme noch einsatzfähig.

1.6 Einsatzerfahrungen und Akzeptanz

Ziel des Feldversuches auf Rügen war es, möglichst umfangreiches Datenmaterial über die verschiedenen Komponenten der Elektrofahrzeuge zu erhalten sowie eine fundierte Ausgangsbasis an Verbrauchsdaten für die ökologische Bilanzierung zu gewinnen. Die nicht durch meßtechnische Verfahren quantifizierbaren Daten wurden durch mehrere Fragebögen bei den einzelnen Nutzern erhoben.

Vor Beginn der Fahrzeuglieferungen nach Rügen wurde bei möglichen Fahrzeugbetreibern die allgemeine Situation sowie das Interesse und der mögliche Einsatzzweck abgefragt, um die Fahrzeuge entsprechend der geplanten Nutzungsprofile möglichst optimal zuteilen zu können.

Im Vorfeld der Fahrzeugauslieferung wurden die bisherigen Erfahrungen mit Verbrennungskraftfahrzeugen sowie die Erwartungshaltung gegenüber den Elektrofahrzeugen aufgenommen. Nach drei bis zwölf Monaten wurden dann in einem Fragebogen die Erfahrungen mit dem Elektrofahrzeug ermittelt (vgl. auch Fragebogen im Anhang A 1.5 und Fragebogenauswertung Kapitel 12.5).

Trotz des umfangreichen Betreiber-Auswahlverfahrens ergaben sich Situationen, die bei einzelnen wenigen Fahrzeugnutzern die projektgerichteten Zielsetzungen in Frage gestellt haben und in denen deshalb eine Rückgabe des Elektrofahrzeugs erforderlich wurde. Als Beispiele seien hier nur einige genannt: unzureichende Kilometerleistungen pro Monat, sehr mangelhafte Pflege des Fahrzeugs sowie wiederholte, selbstverschuldete Unfallschäden. Weitere Gründe für einen Fahrzeugtausch waren häufig Wechsel der persönlichen oder geschäftspolitischen Strukturen. Insgesamt kam es aus den oben genannten Gründen zu rund 30 Betreiberwechseln, 20 % davon wurden wegen der nicht zufriedenstellenden Fahrzeugnutzung von der Projektleitung initiiert. Zusammenfassend ist zu betonen, daß mit den durch die Fragebögen ermittelten Fahrzeugbetreibern eine gute Wahl getroffen wurde.

Entsprechend ihrem unterschiedlichen Aufbau wurden die Fahrzeuge verschieden eingesetzt. Die Fahrzeuge wurden in erster Linie nicht an Privatleute vergeben, sondern an Behörden oder Unternehmen, bei denen mit einer möglichst regelmäßigen Fahrzeugnutzung zu rechnen war. Die Pkw wurden mehr als die Hälfte der Fahrten für dienstliche Zwecke eingesetzt, der restliche Einsatz war eher privater Natur (Bild 16). Bei den VW-Bussen überwog der Kundendienst in Form von Personentransporten, beim MB 100E der Transport von z.B. Baumaterialien, Paketen oder Getränken.

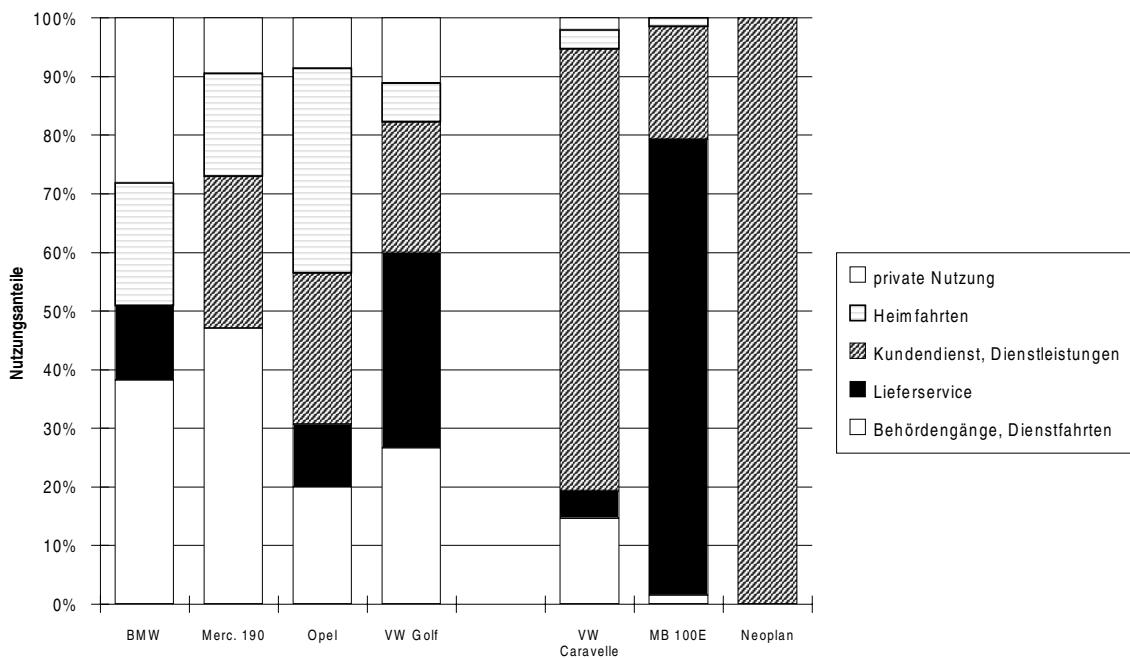


Abbildung 16: Einsatzspektren der Fahrzeuge

Die Fahrzeuge wurden hauptsächlich zu Hause sowie zu einem geringeren Teil während der Arbeitszeit geladen. Die Elektrotankstellen, die auf der Insel die Infrastruktur verbesserten, wurden von Versuchsteilnehmern benutzt, denen keine andere Lademöglichkeit zur Verfügung stand. Insgesamt wurden die Ladestationen auf Rügen weniger als erwartet benutzt. Die eher großstädtische Anwendung von Ladestationen zum Beispiel in Parkhäusern war auf Rügen nicht gegeben.

Eine ausführliche Auswertung der Fragebögen zur Beurteilung der Elektrofahrzeuge ist in Kapitel 12.5 dargestellt. Insgesamt wurden hierfür über 100 Fragebögen ausgewertet.

Außerhalb der Fragebögen äußerten sich die Betreiber zu folgenden Punkten:

- der Fahrkomfort und die geringe Geräuschentwicklung des Fahrzeugs wurde gelobt
- verstärkte Überlegungen zum Energieverbrauch wurden angestellt
- rund die Hälfte der Fahrer und Fahrerinnen gaben an, daß sie ihren Fahrstil mit der Nutzung des Elektrofahrzeuges geändert hätten, der Fahrstil wurde als ruhiger, weniger aggressiv und vorausschauender beschrieben.
- die Fahrstiländerung übertrug sich bei einigen Elektrofahrzeugbetreibern auch auf das Fahren mit dem konventionellen Pkw
- die Elektrofahrzeuge stießen bei Touristen auf großes Interesse, die Fahrer/innen wurden häufig zu den technischen Daten und zum Fahren allgemein befragt

Die Abfragen bezüglich der Akzeptanz sind für die potentielle Einführungsphase von Elektrofahrzeugen von besonderer Relevanz. Wenngleich die Ergebnisse aufgrund der

besonderen Bedingungen (z.B. kostenfreie Überlassung der Fahrzeuge) nicht zu 100% auf andere Gebiete zu übertragen ist, so sind die Erfahrungen aus dem alltäglichen Gebrauch wichtig und für die weitere Forschung und Entwicklung von großer Bedeutung.

1.7 Öffentlichkeitsarbeit

Der offizielle Projektstart „Erprobung von Elektrofahrzeugen der neuesten Generation auf der Insel Rügen“ erfolgte am 2.10.1992 in Anwesenheit von Herrn Minister Riesenhuber in Binz. An der Veranstaltung nahmen neben Gästen aus Politik, Industrie und Wissenschaft auch etwa 80 Journalisten teil. In einem Zelt auf dem Kurplatz präsentierten sich die beteiligten Firmen in einer begleitenden Ausstellung der Öffentlichkeit. Insgesamt 14 Elektrofahrzeuge konnten besichtigt und zum Teil probegefahren werden. Außerdem wurde die erste Elektrotankstelle in Binz auf Rügen in Betrieb genommen.

Im ersten Halbjahr 1993 stiegen bereits die Nachfragen nach Interviews und Reportagen im Zusammenhang mit dem E-Fahrzeugprojekt an. Die meisten Informationswünsche konnten telefonisch beantwortet werden, nur in Einzelfällen wurden Termine (vgl. Kapitel 1.7.2) für eine "Vor-Ort"-Reportage vereinbart. Darüber hinaus fanden weitere Aktivitäten im Bereich Öffentlichkeitsarbeit statt, z.B. die Beteiligung an der Segelwoche in Stralsund (1993) oder durch die Ausstellung eines Elektrofahrzeuges auf dem Stand des lokalen Energieversorgungsunternehmens HEVAG.

Auf der Eröffnungsveranstaltung zum französischen Elektrofahrzeugprojekt in La Rochelle im November 1993 wurde am Rande der dort stattfindenden europäischen Elektrofahrzeugkonferenz der Sachstand des Rügen-Projektes dargestellt.

Am 20.04.94 fand eine Pressekonferenz mit Bundesforschungsminister Dr. Krüger in Bonn statt, auf der der Projektstand auf Rügen sowie die bis dahin erreichten Ergebnisse dargestellt wurden. Prof. Seiffert, Vorstandsmitglied der Volkswagen AG, stellte das gemeinsam vom Verband der Automobilindustrie, Batterieherstellern sowie der Vereinigung Deutsche Elektrizitätswerke erarbeitete "Strategiepapier zur Einführung von Elektrostraßenfahrzeugen" der Öffentlichkeit vor. Dabei handelte es sich im wesentlichen um die Forderung nach politischen Rahmenbedingungen für die weitere Verbreitung von Elektrofahrzeugen in speziellen Einsatzgebieten.

Herr Minister Dr. Krüger und der Geschäftsführer der A.S.E., Herr Dr. Hoffmann, nahmen am 26.08.94 in Zirkow die Photovoltaikanlage offiziell in Betrieb. Nach Besichtigung der PV-Anlage sowie der Demonstration der Schnelladestation wurden weitere neun Fahrzeuge an die ausgewählten Betreiber übergeben.

Im Anschluß an die Einweihung der Photovoltaikanlage und der Schnelladestation wurde eine Ausstellung zum Projekt begonnen. In den Räumen des Vitariums in Binz wurde eine Ausstellungsfläche in der Passage angemietet. Es wurden 9 Charts gezeigt, die sowohl einen Überblick über das Gesamtprojekt als auch aktuelle Daten sowie Details zu den einzelnen Projektpartnern vermittelten. Zusätzlich war Informationsmaterial für die Besucher ausgelegt.

Am 7.08.1995 erfolgte die offizielle Inbetriebnahme der zweiten Schnelladestation auf dem Gelände der ARAL-Tankstelle in Bergen. Die Durchführung wurde von der HET in Kooperation mit der PreussenElektra übernommen. Den Besuchern wurde die Funktionsweise der öffentlich zugänglichen Schnelladestation demonstriert sowie das Gesamtkonzept erklärt.

1.7.1 Messen

Im Rahmen des BMFT-Standes auf der Hannover-Messe Industrie vom 21.4.93 bis 28.4.93 wurde das Rügen-Projekt dargestellt. Dabei konnten die Messebesucher ein BMW-Elektrofahrzeug besichtigen und sich über das gesamte Projekt und die eingesetzten Batteriesysteme informieren.

Ein Schwerpunktthema der Internationalen Automobilausstellung in Frankfurt vom 7.09.93 bis 19.09.93 war das Elektrofahrzeug, denn die meisten Fahrzeughersteller hatten die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bezüglich des emissionsfreien Elektrofahrzeugs erheblich forcierter. Aus diesem Grund wurde das inzwischen weltweit bekannte Elektrofahrzeug-Forschungsprojekt auf der Insel Rügen einem breiten Publikum präsentiert.

Ein Videofilm wurde mit allen beteiligten E-Fahrzeugen erstellt und während der Messe auf einer Monitorwand gezeigt. Die drei eingesetzten Batteriesysteme wurden im Modell gezeigt und auf einer dazugehörigen Schautafel erläutert. Ebenfalls gezeigt wurden zwei Elektromotoren sowie eine komplette Antriebsachse mit entsprechenden Erklärungen. An der aufgestellten Elektro-Ladestation konnte die Funktionsweise einer "Elektro-SB-Tanksäule" demonstriert werden. Das Interesse der Besucher richtete sich im wesentlichen auf die Fahrzeugreichweiten, die Ladezeiten der Batterien und die Kosten der Batterien und Fahrzeuge.

Der Beschuß des Steuerkreises, vom 12.09.95 bis 24.09.95 auf der 56. Internationalen Automobilausstellung in Frankfurt die Elektrofahrzeugtechnologie zu zeigen, wurde kurzfristig von der DAUG realisiert. Ziel dieser Präsentation war es, die Presse, die Fachbesucher sowie die fahrzeuginteressierte Öffentlichkeit über den aktuellen Stand des Forschungsversuches zu informieren. Weiterhin wurde das Verfahren der "Ökobilanz" dargestellt sowie die Möglichkeiten einer zukünftigen Nutzung von Elektrofahrzeugen auf der Insel Rügen aufgezeigt.

Da im Vergleich zur IAA '93 die E-Auto-Präsentationen der Fahrzeughersteller deutlich zurückgegangen waren, war das Standpersonal bezüglich Informationen rund um das Elektrofahrzeug und speziell zum Feldversuch auf Rügen sehr gefragt. Darüber hinaus bestand Interesse an den Unterschieden zwischen den Batteriesystemen sowie am zukünftigen Verhalten der Bundesregierung bei der möglichen Markteinführung von Elektrofahrzeugen. Besonders zu vermerken ist in diesem Zusammenhang der Besuch von Umweltministerin Frau Dr. Merkel.

Während der Umweltmesse am 15.9.95 in Waren (Mecklenburg-Vorpommern) war das Rügenprojekt mit zwei Fahrzeugen aus der Fahrzeugflotte präsent. An dieser Veranstaltung nahm unter anderem Umweltminister Seidel (Mecklenburg-Vorpommern) teil.

1.7.2 Besuche

Im September 1993 wurde ein Informationsbesuch des General Accounting Office (U.S.A.) auf Rügen betreut, da neben vielen Ansprechpartnern in amerikanischen Ministerien, Unternehmen und Instituten der Wunsch bestand, direkt über die aktuellen Aktivitäten im Projekt "Rügen" informiert zu werden.

Im selben Jahr informierte sich Frau Sothmann, Mitglied des Bundestages und des Ausschusses für Technikfolgenabschätzung, über den Stand des Projektes direkt vor Ort.

In mehreren Gesprächen mit den Fahrzeugerprobern konnte sie einen Eindruck vom Einsatzspektrum der Elektrofahrzeuge auf Rügen gewinnen.

Parallel zur IAA in Frankfurt 1993 wurde ein Informationsbesuch für eine vierköpfige chinesische Delegation aus der Region Guangdong organisiert und erörtert, wie ein Projekt ähnlich dem auf Rügen auf chinesische Verhältnisse umzugestalten wäre.

Ende März 1994 betreute die DAUG eine 5-Personen Besuchergruppe aus Japan. Unter Führung von Prof. Ishitani (Universität Tokio) wurde der aktuelle Stand des Elektrofahrzeugs in Japan und Deutschland diskutiert.

Nachfolgend sind die wichtigsten Termine im Zusammenhang mit der Öffentlichkeitsarbeit im Rahmen des Rügen-Projektes aufgeführt:

13.01.93	Herr Melfi, auto motor und sport
13.01.93	Herr Hewel, Deutsche Fernsehnachrichtenagentur
14.01.93	Frau Holtmann, Rügen TV
23.01.93	Herr Tittel, Ing.-Digest
09.02.93	Frau Halte, ZDF Landesstudio Mecklenburg Vorpommern
11.02.93	Mr. Gribble, Batteries International
02.03.93	Herr Nihlén, Swede Press AB
04.05.93	Herr Ruhkieck, Schweriner Volkszeitung
05.05.93	Frau Waldrop, Newsweek
06.05.93	Herr Schadewald, Schadewald Redaktionscenter
23.05.93	Herr Blumenthal, Deutschlandsender "Kultur" - Sonntagsgespräch
27.05.93	Herr Krummheuer, Handelsblatt, VDI-Nachrichten Magazin,
28.05.93	Herr Schwandt, Redaktion "Junge Welt"
02.06.93	Herr Gütte, Mitteldeutscher Rundfunk, Redaktion Wissenschaft
12.06.93	Herr Huhn, Hessische Allgemeine Zeitung
15.06.93	Mr. Emptas, l' auto-journal
16.06.93	Herr Rother, Auto-Zeitung
09.-10.08.93	Mr. Lewin, The European (GB)
11.-12.08.93	Herr Hillebrandt, WDR - Magazinbeitrag
12.08.93	Herr Neuendorf, Rügen Aktuell
29.09.93	Herr Knoblauch, Berliner Zeitung
14.-15.10.93	Herr Behrendt, Auto Bild
24.-26.11.93	Herren Roggero und Milano, Auto Capital (Italien)
14.12.93	Herr Messerschmidt, Radio Mecklenburg-Vorpommern
15.02.94	Hr. Hoogma - Universität Twente Enschede
24.02.94	Delegation von Aufsichtsräten von ABB-Dänemark in Zirkow
01.03.94	VDEW in Zirkow
02.03.94	Projektvorstellung im Rahmen des HET-Lenkungsausschusses
24.03.94	Schwedische Journalisten, Rügen (Sydkraft Euroenergy Seminar)
20.04.94	Minister-Pressekonferenz mit Fahrzeugpräsentation, Bonn
22.04.94	Swedish Electric Vehicle Association, Zirkow
27.04.94	Interview: aktueller Projektstand, Herr Vonberg für NDR, Zirkow

04.-05.05.94	Fotoaufnahmen für Bild der Wissenschaft, Herr Nimtsch, Zirkow
24.05.94	Informationsaustausch mit Interlink Corporation, Yokohama
13.-17.06.94	Opel Workshop auf Rügen
22.06.94	Interview Norddeutscher Rundfunk - Programm N3 in Zirkow
29.07.94	Hr. Kundke, SFB-Radio, allgemeine Projektinformationen
05.08.94	Fr. Haferburg, NDR-Studio Greifswald, Interview
15.08.94	Hr. Prof. Morré , FH Hamburg, Photovoltaikanlage, Aufladetechnik
17.08.94	Hr. Brandenburg, Stern, Projektüberblick, aktueller Stand
18.08.94	Hr. Mosdorf (MdB), Hr. Janzen (MdL), Hr. Maurer, Fr. Peters, Deutscher Bundestag, Projektpräsentation, aktueller Stand, Probefahrt, Photovoltaikanlage, Ladestation in Binz
26.08.94	u.a. Hr. Wichmann, Hr. Riedel, Fr. Wiese, Hr. Spizza, Wirtschaftswoche, PS-report, NDR - TV und Hörfunk, Ostseezeitung Bergen, Einweihung PV-Anlage und Schnelladestation durch Bundesforschungsminister Dr. Krüger
26.09.94	Hr. Ubukata, Car Graphic, Japan, Projektinformationen
25.10.94	Hr. Kim, Hr. Lim, KATECH, Korea, Informationen Projektablauf, Projektaufbau, Batteriesysteme
09.-10.02.95	Hr. Stenzel (ZDF), Film für Umweltklimakonferenz in Berlin
04.-05.03.95	Wall Street Journal
04.04.95	NDR1 Radiointerview, Herr Vonberg
10.05.95	Herr Schnee, Schwäbische Zeitung - Redaktionsbüro Berlin
17.-18.05.95	Abgeordnete der Stadt Lund/Schweden, Projektpräsentation
09.06.95	Herr Naoi, Japan Transport Economics Research Center
09.06.95	Interview BBC (mit Dr. Eden - ifeu)
14.06.95	Deutsche Welle, Herr Beinlich
21.-22.06.95	NDR - Frau Neumann (Markt im Dritten)
10.07.95	Herr Busse, Handelsblatt
02.08.95	Herr Penne, Ostseezeitung
25.09.95	Delegation Göteborg Energy Utility mit Betreuung der HET
25.09.95	Delegation von 12 Personen aus Mendrisio
12.10.95	Frankfurter Presseclub in Zusammenarbeit mit PreussenElektra
17.-18.10.95	Besuch von Mitsubishi Motors Corporation auf Rügen
19.10.95	Interview TV2 (F) auf Rügen (Christan Leroux, Pascal Auger)
24.10.95	Interview mit Herrn Ralph Sommer, freier Journalist, Greifswald
20.11.95	Besuch jap. Delegation auf Rügen (Kyushu, Mitsubishi, JEVA)
30.11.95	VDEW-Arbeitskreis Elektrostraßenfahrzeuge, Zirkow
05.12.95	Besuch des amerik. Botschafters, Herrn Redman in Zirkow

Tabelle 3: Wichtige Besuche auf Rügen

Pressearbeit

Die Presseartikel zum "Rügen"-Projekt befaßten sich anfangs zum größten Teil recht kritisch mit den neuen Technologien sowie dem Ablauf des Versuches auf der Insel Rügen. Im Verlauf war jedoch eine positive Entwicklung zu verzeichnen, da Mitte 1994 die Mehrzahl der geplanten Fahrzeuge auf Rügen im Einsatz waren.

Die mit dem Steuerkreis abgestimmten, projektbegleitenden Vorträge und Präsentationen ergänzten die Öffentlichkeitsarbeit sinnvoll. Durch die Mitarbeiter der DAUG in Zirkow wurde zudem ein Großteil der während des Projektverlaufes konstant hohen Anzahl von telefonischen und schriftlichen Anfragen beantwortet.

Der Umfang der gesamten Öffentlichkeitsarbeit wurde nach einem Beschuß des Steuerkreises 1994 erheblich reduziert bzw. rationalisiert. Die DAUG hatte daraufhin in regelmäßigen Abständen sog. Informationswochen vorgegeben, (alle 2 Monate eine Woche). Diese Termine wurden rechtzeitig dem Steuerkreis sowie den Fahrzeugbetreibern auf Rügen mitgeteilt, so daß die verschiedenen Anfragen nach Interviews sowie Informationsveranstaltungen möglichst komprimiert innerhalb dieser Zeitrahmen eingeteilt wurden.

2. BMW

2.1 Fahrzeugaufbau

Basis der aufgebauten Elektro-Versuchsträger waren Großserienfahrzeuge der aktuellen BMW 3er-Serie. Es wurden eine 4-türige Limousine (Fahrzeug Nr. 7) und sieben Coupé's (Fahrzeug Nr. 1-6 + Nr. 8) auf Elektroantrieb umgerüstet.

Im Herbst 1992 wurde planmäßig Fahrzeug Nr. 7 mit einer zweiteiligen ABB-Batterieanordnung fertiggestellt. Auch der Rohbau, die Lackierung und die Teilkomplettierung der restlichen Fahrzeuge mit Na/S-Batterien der Fa. ABB konnte bis Ende 1993 durchgeführt werden.

Erhebliche Sicherheitsprobleme bei den Na/S-Batterien machten 1993 eine konzeptionelle Änderung beim Aufbau der Fahrzeuge notwendig. Es wurde entschieden, alle mit Na/S-Batterien geplanten Fahrzeuge nun mit Na/NiCl₂-Batterien der Fa. AABG auszurüsten. Es waren größere Aufwendungen für das Umrüsten der Batteriesysteme an den bereits vorbereiteten Fahrzeugen notwendig. So z. B.: Änderungen an den Karosserien im Heckbereich, Einbau neuer Kabelbäume, Änderungen an Hard- und Software vom Antriebsstrang etc. .

Die umfangreichen Umrüstarbeiten und die mangelnde Verfügbarkeit von genügend Na/NiCl₂-Batterien nach der Entscheidung zum Wechsel der Batteriesysteme führten zu größeren Terminverschiebungen bei der geplanten Auslieferung der Fahrzeuge.

2.2 Auslieferung der Fahrzeuge

Das erste Fahrzeug, ein BMW 3er-Touring der vorangegangenen Baureihe, wurde zur Startveranstaltung am 02.10.92 an den Nationalpark Jasmund übergeben. Das Fahrzeug wurde bis zum Ausfall der Na/S-Batterie am 04.05.93 für Dienstfahrten eingesetzt. Der anschließend kurzzeitig als Ersatzfahrzeug eingesetzte BMW 5er-Touring mit Bleibatterien erwies sich mit der begrenzte Reichweite von knapp 35 Kilometer als nicht praxistauglich.

Im Sommer 1993 wurde das Fahrzeug Nr. 7, mit inzwischen durchgeföhrtem Batteriesystemwechsel (jetzt: Na/NiCl₂; Typ Z5L), nach Rügen ausgeliefert. Das Fahrzeug mußte jedoch nach einigen Tagen wegen eines Verschaltungsfehlers innerhalb der Batterie nach München zurücktransportiert werden.

Fahrzeug Nr. 8, das einzige BMW Fahrzeug mit einer NiCd-Batterie, wurde am 28.10.93 dem Nutzer übergeben; mußte jedoch im Dezember 1993 wegen eines Isolationsfehlers nach München zur Überprüfung gebracht werden.

Die weitere (Wieder-) Auslieferung der Fahrzeuge zeigt folgende Tabelle:

Fzg.-Nr.	Batterietyp	Auslieferung	Nutzer	Institution
1	Na/NiCl ₂ Z8	22.02.1994	Hr. Klötzer	Nationalpark Jasmund
2	Na/NiCl ₂ Z8	16.03.1994	1. Hr. Lemke 2. Hr. Preuß (ab 01.09.95)	Pension/Eisshop Ordnungsamt Binz
3	Na/NiCl ₂ Z8	18.03.1994	1. Hr. Pahl 2. Hr. Puttbreese(ab 10.11.94)	LRA Bergen LRA Bergen
4	Na/NiCl ₂ Z8	30.05.1994	Hr. Preuß(Fzg. im Okt. 1995 wg. Batteriedefekt stillgelegt)	Ordnungsamt Binz
5	Na/NiCl ₂ Z8	19.08.1994	Hr. Wiening	DAUG Zirkow
6	Na/NiCl ₂ Z8	19.08.1994	1. Hr. Warrlich 2. Fr. Warrlich	Polizeistation Binz privat
7	Na/NiCl ₂ Z5	30.05.1994	Hr. Stemmler	Pfarramt Zirkow
8	NiCd H70	22.02.1994	1. Hr. Schwarz 2. Hr. Schwer (ab 01.11.94)	Speisewirtschaft Binz Pfarramt Bergen

2.3 Einsatzbereiche und Nutzerverhalten

Die Fahrzeuge wurden überwiegend für dienstliche Fahrten im inner- und außerörtlichen Verkehr eingesetzt. Die Reichweite von von ca. 80-120 Kilometer erlaubte auch den regelmäßigen Einsatz über das urbane Umfeld hinaus.

Die teilweise sehr schlechten Straßenzustände (Schlaglöcher, Schotterwege etc.) beanspruchten die Fahrzeuge über ein normales Einsatzspektrum hinaus. So setzten z. B. einige Fahrzeuge beim Durchfahren von extremen Schlaglöchern mit der Antriebseinheit auf dem Boden auf. Beim Fahrzeug Nr. 5 wurde im Mai 1995 dabei das Getriebegehäuse so stark beschädigt, daß es gewechselt werden mußte.

Auch das in den Wintermonaten recht kalte Klima mit hoher Luftfeuchtigkeit auf der Insel Rügen stellte hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Heizsystems der Fahrzeuge.

Das Verhalten der Nutzer im Feldversuch war größtenteils sehr kooperativ und aufgeschlossen.

Da der erste Nutzer von Fahrzeug Nr. 8 aus betrieblichen Gründen keine ausreichende Betreuung des Fahrzeugs sicherstellen konnte, wurde in Absprache mit der DAUG im November 1994 ein Nutzerwechsel durchgeführt.

Kleinere Probleme wurden von den Nutzern in Zusammenarbeit mit dem DAUG-Service in Zirkow oder der örtlichen BMW Werkstatt direkt behoben. Es bestand bei den Nutzern Verständnis bei den manchmal unvermeidbaren Standzeiten. Gründe waren in der Regel längere Lieferzeiten von elektrofahrzeugspezifischen Prototyp-Komponenten, die bei Ausfällen nicht immer sofort verfügbar waren.

2.4 Technische Daten, technische Einzelheiten

Die BMW Elektro-Versuchsfahrzeuge auf Basis 3er-Coupe/Limousine haben die Funktionalität, Komfort und Sicherheit wie Serienfahrzeuge. Speziell für das Elektrofahrzeug entwickelte Crashelemente schützen die Antriebsbatterie und die Fahrgastzelle.

Der Energieverbrauch wird durch rollwiderstandsoptimierte Reifen vermindert.

Tabelle 1: technische Daten BMW 3er/4 und 3er/2

	2-türiges Coupe, rot Fzg.Nr. 1,2,3,4,5,6	4-türige Limousine, grün Fzg. Nr. 7	2-türiges Coupe, rot Fzg. Nr. 8
Antrieb			
Motortyp	Gleichstrom-Drehfeldmotor	Gleichstrom-Nebenschlußmotor	Gleichstrom-Drehfeldmotor
Hersteller	UNIQ Mobility	ABB	UNIQ Mobility
Dauerleistung	32 kW	18 kW	32 kW
Nenndrehmoment	150 Nm	110 Nm	150 Nm
max. Drehmoment	150 Nm	150 Nm	150 Nm
Getriebe			
Anzahl der Gänge	1	2	1
Übersetzung	6,9	6,5/12	6,9
Energiespeicher			
Batterietyp	Na/NiCl ₂ Z8	Na/NiCl ₂ Z8	NiCd H70
Hersteller	AABG	AABG	DAUG-HOPPECKE
Spannung	180,6 V	188 V	180 V
Nennenergie	21,7 kWh	17 kWh	12,6 kWh

	2-türiges Coupe, rot Fzg.Nr. 1,2,3,4,5,6	4-türige Limousine, grün Fzg. Nr. 7	2-türiges Coupe, rot Fzg. Nr. 8
Nennkapazität	120 Ah	90 Ah	70 Ah
Zellenzahl	280	219	133
Anordnung im Fahrzeug	hinten	vorn	hinten
Fahrzeugdaten			
Leergewicht	1325 kg	1485 kg	1310 kg
Sitzplätze	2+2	5	2+2
Fahrleistungen			
Höchstgeschwindigkeit	128 km/h	110 km/h	128 km/h
Beschleunigung 0-50 km/h	ca. 8 sec	11,5 sec	ca. 8 sec
Beschleunigung 0-80 km/h	ca. 18 sec	35 sec	ca. 18 sec
Beschleunigung 0-100 km/h	ca. 30 sec		ca. 30 sec
Reichweite FTP 75-Zyklus: Nebenverbraucher = 0,5 kW	ca. 120 km	ca. 65 km	ca. 45 km
Reichweite FTP 75-Zyklus: Nebenverbraucher = 3,0 kW	ca. 80 km		

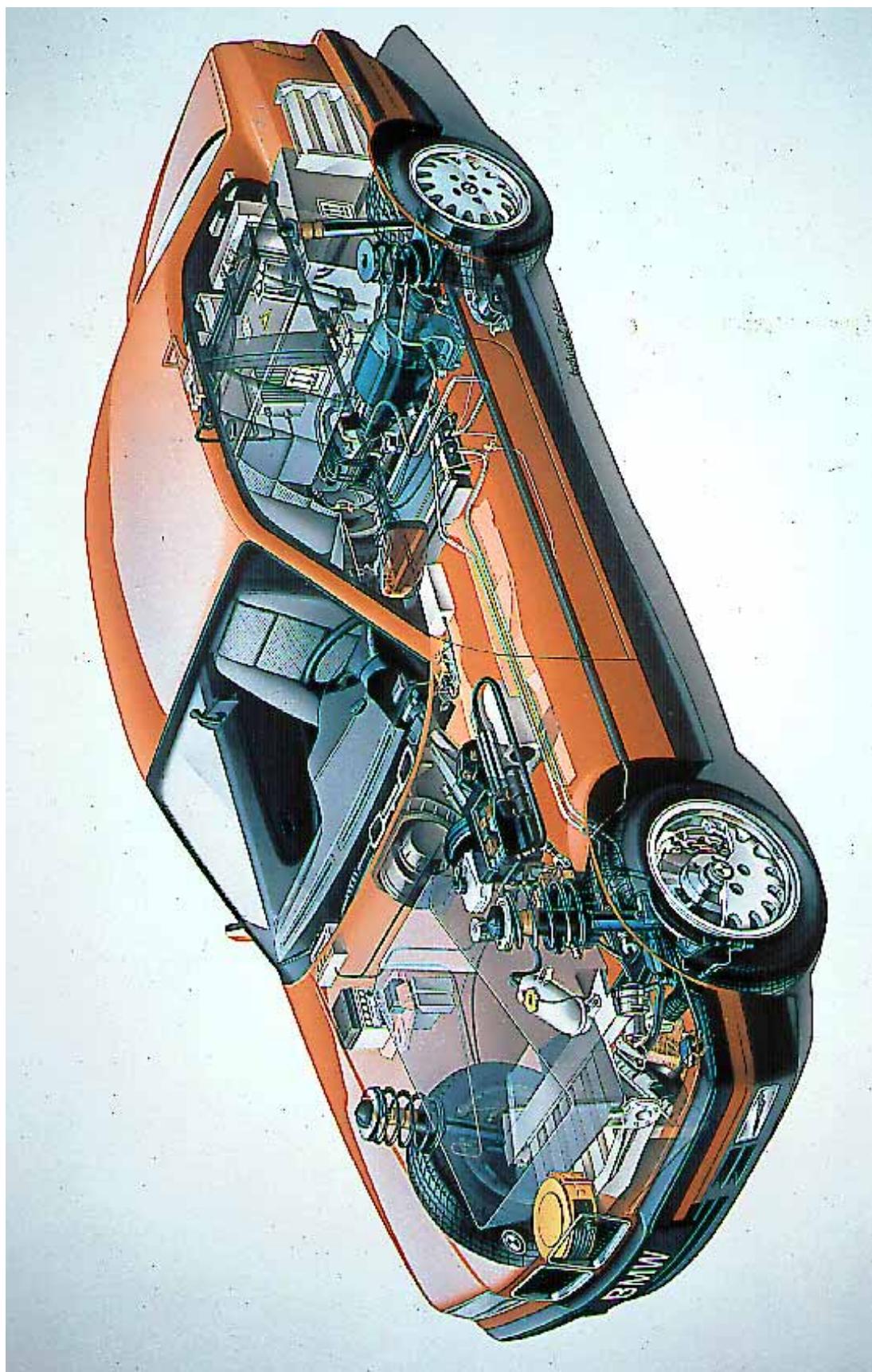


Bild 1: Schnittbild BMW Elektro-3er (2-türiges Coupè)

2.5 Beschreibung der Antriebssysteme

Das Herzstück des BMW Elektroantriebes (Fahrzeug Nr. 1-6 + Nr. 8) ist ein bürstenloser Gleichstrom-Drehfeldmotor mit einer Nennleistung von 32 kW und einem Anfahrdrehmoment von 150 Nm, der von BMW zusammen mit dem Partner Unique Mobility Inc. entwickelt wurde.

Das Kühlungssystem des Motors inklusive der Steuerelektronik ist für Wasser ausgelegt. Dies führt einerseits zu einer Verringerung der Baugröße des Motors gegenüber luftgekühlten Systemen, andererseits wird die Anzahl anderer parasitärer Energieverbraucher im Fahrzeug, wie z.B. Lüfter, minimiert und die Reichweite des Fahrzeuges dadurch erhöht. Der Motor weist eine hohle Rotorwelle auf, durch die eine der Antriebswellen des seitlich angeflanschten, einstufigen Planetengetriebes mit integriertem Differential hindurchgeführt ist. Es werden die Hinterräder angetrieben. Aufgrund des hohen Anfahrdrehmomentes des Motors ist nur eine Getriebestufe notwendig.

Diese Bauart stellt ein kompaktes, leichtes und leises Antriebssystem dar, mit dem im Fahrzeug ein völlig schaltrunkfreier Betrieb realisiert wurde.

Ein intelligentes Antriebsmanagement sorgt dafür, daß bei jedem Bremsvorgang bis zu 20% der Energie in die Batterie zurückgespeist wird. Somit wird eine nicht zu vernachlässigende Vergrößerung des Aktionsradius erreicht.

Alternativ wurde im Fahrzeug Nr. 7 ein Antrieb von der Fa. ABB/Sigma erprobt. Es handelt sich um einen luftgekühlten, fremderregten Gleichstrommotor Typ Thrige Titan TTL-250. Die Kraftübertragung zu den hinteren Antriebsrädern erfolgt über ein 2-Gang-Schaltgetriebe mit Parksperrre und Trockenkupplung. Auch in diesem Fahrzeug ist eine Bremsenergierrückgewinnung integriert.

2.6 Betriebserfahrungen, technische Modifikationen

2.6.1 Wechsel der Batteriesysteme

Wie schon im Punkt 2.1 erklärt, mußten 7 Fahrzeuge nach Sicherheitsproblemen bei Na/S-Batterien auf den Einbau von Na/NiCl₂-Batterien umgerüstet werden.

2.6.2 Vakuumdefekte bei Na/NiCl₂-Batterien

Bei den verbauten Na/NiCl₂-Batterien traten in 6 Fällen Vakuumverluste auf. Es wurden nach Gesprächen mit AABG verschiedene Abhilfemaßnahmen beschlossen, um eine Beschädigung der empfindlichen Schweißkanten im Erprobungsbetrieb und beim Ein- und Ausbau der Batterien zu verhindern. Die Fahrzeuge Nr. 1 und Nr. 3 wurden im 2. Halbjahr in München entsprechend um- bzw. nachgerüstet. Bei den übrigen Fahrzeugen traten bis zum Versuchsende keine weiteren Vakuumverluste auf.

2.6.3 Bremskraftunterstützung

Einige Nutzer bemängelten, daß bei kurzzeitiger, mehrmaliger Betätigung des Bremspedals die Bremskraftunterstützung unzureichend sei. Daraufhin wurden in München Messungen an einem Vergleichsfahrzeug durchgeführt. Es wurde festgestellt, daß bei normaler Stadtfahrt ein ausreichendes Unterdruckniveau zur Bremskraftunterstützung gehalten wird. Wird jedoch durch schnelles, kurzzeitiges Bremsen (Stotterbremsung) ein starker Abfall des Unterdrucks verursacht, so steht kurzzeitig eine nur sehr geringe Bremskraftunterstützung zur Verfügung. Durch Änderungen der Steuerzeiten in der Ansteuerelektronik der Unterdruckpumpen wurde dieser Zustand beseitigt.

2.6.4 Antrieb

Nachdem beim Fahrzeug Nr.8 ein Isolationsfehler aufgetreten war, wurden an allen Fahrzeugen am Motorcontroller Änderungen vorgenommen. Die Einbaulage wurde verändert, die Abdichtung des Controllers verbessert, und es wurde zusätzlich eine Abdeckung als Spritzwasserschutz angebracht. Isolationsprobleme am Controller traten nach diesen Maßnahmen nicht mehr auf.

Isolationsfehler wurden jedoch auch danach mehrfach, besonders bei sehr feuchten Witterungsverhältnissen, angezeigt. Als Problemstelle wurden die Hochspannungsanschlüsse am Antriebsmotor lokalisiert. Bauartbedingt war hier jedoch nur die nachträgliche Versiegelung mit Isolationsslack möglich. Die Erfahrung mit dieser Schwachstelle ist in die laufende Antriebsentwicklung eingeflossen.

Am Motorcontroller und in der Antriebsmanagement-Elektronik (AME) wurden Hardwareänderungen durchgeführt und zweimal eine jeweils neue Software installiert. Durch diese Maßnahmen wurde das Systemverhalten der Antriebseinheit nochmals verbessert.

2.6.5 Fahrwerk

Parallel zum Erprobungsbetrieb wurde der Aufbau der Hinterachse und der Motoraufhängung weiterentwickelt und verbessert. Ab Januar 1995 wurden die Fahrzeuge mit neuen Hinterachsträgern mit höherer Laufzeit und höherer Anzahl von Lastwechseln umgerüstet.

2.6.6 12V-Bordnetz

Bei Fehlbedienung des Ladesteckers bestand aufgrund des hohen Ruhestromverbrauchs des Meßrechners die Gefahr einer Entladung der Bordbatterie. Um dieses Risiko abzufangen, wurde in den Fahrzeugen eine Sicherheitsschaltung installiert, die in diesem Fall nach 10 Stunden die Stromversorgung zum Meßrechner unterbricht.

Nachdem es des öfteren, besonders in den Wintermonaten, Probleme mit dem 12V-Bordnetz gab, wurde in allen Fahrzeugen eine stärkere Bordbatterie (44 Ah) verbaut.

2.6.7 Heizsystem

Durch eine verbesserte Einbaulage der Heizwasserpumpe und durch diverse Änderungen am Durchlauferhitzer wurde die Leistung und das Ansprechverhalten des Heizsystems verbessert. Als zusätzliche Sicherheitseinrichtung wurde 1996 unter dem Armaturenbrett ein Warnsummer installiert, der bei Übertemperatur des Heizrohrs des Durchlauferhitzers anspricht.

Die in den Versuchsträgern auf Rügen eingesetzten Komponenten des elektrischen Heizsystems erwiesen sich für die teilweise sehr rauen Umgebungstemperaturen als teilweise unterdimensioniert.

2.6.8 Allgemeines

Einige Ursachen der von Nutzern gemeldeten Störungen konnten nicht oder nur sehr schwer reproduziert werden. So war z. B. die Ursache einer Ladestörung eine vom Nutzer eingesetzte fehlerhafte Netzteileitungsverlängerung und in einem anderen Fall eine nicht korrekte Bedienung des Ladesteckers. Es zeigte sich, daß eine intensive Berücksichtigung des Nutzerverhaltens und der entsprechenden örtlichen Infrastruktur wichtig ist.

2.7 Service

Die direkte Betreuung der Fahrzeuge auf Rügen erfolgte soweit wie möglich (und notwendig) durch Hr. Heissler und Hr. Wiening von der DAUG in Zirkow. Mit zunehmender Gesamtfahrzeuganzahl am Versuch stand selbstverständlich bei Hr. Heissler und Hr. Wiening auch entsprechend weniger Kapazität zur Betreuung der einzelnen Fahrzeuge zur Verfügung. Trotzdem war in der Regel ein umgehender Service für die Nutzer gewährleistet.

Die Zusammenarbeit mit der DAUG in Zirkow (mit Unterstützung durch Fr. Tobias) funktionierte reibungslos und sehr zufriedenstellend.

Bei spezifischen Aufgabenstellungen und für die allgemeinen Fahrzeugüberprüfungen reisten BMW Techniker aus München an. Kleinere Störungen an Standard-Serienteilen behoben die BMW Vertragswerkstätten in Bergen bzw. Stralsund.

Zusammenfassend betrachtet war ein erheblich größerer Serviceaufwand nötig, als er zu Beginn des Projektes geschätzt und geplant wurde.

So waren allein 1994/95 an insgesamt 109 Mann-Tagen BMW Techniker in Zirkow vor Ort. Hinzu kamen, wegen des sehr langen Anreiseweges aus München, 79 An- und Abreisetage! Hierzu addierte sich der notwendige Aufwand im Entwicklungszentrum in München. Mehrfach mußten Fahrzeuge bei größeren Defekten (z.B. Wechsel der Antriebsbatterie, Karosserieschaden nach Unfall, etc.) nach München zurücktransportiert und hier instandgesetzt werden.

2.8 Zuverlässigkeit der Komponenten

Die relativ hohe Standzeit der Elektroversuchsträger begründet sich nicht ausschließlich auf den Ausfall von Elektrofahrzeug-spezifischen Komponenten. So wurden ca. 40 % der Stillstandszeiten durch allgemeine Fahrzeuginspektionen oder durch Probleme mit dem Fahrzeug allgemein oder dem 12V-Bordnetz verursacht. Bei den installierten E-Fzg.-Komponenten handelte es sich größtenteils um handgefertigte Prototypen. Dadurch war die Ersatzteilbeschaffung oft sehr schwierig bzw. längere Stillstandszeit unvermeidlich.

Aus der Vielzahl der während der Erprobungsphase aufgetretenen Störungen erscheint es sinnvoll, sich bei der Beschreibung auf die Hauptkomponenten zu konzentrieren:

2.8.1 Traktionsbatterien:

2.8.1.1 Na/NiCl₂

Ein Grund mehrfacher und längerer Stillstandszeiten war der notwendige Ausbau und die Reparatur von Na/NiCl₂-Batterien mit Vakuumverlusten. Die Ursache lag in der konzeptbedingten sehr schwierigen Verbaubarkeit der Batterien in der BMW 3er-Serienkarosserie. Hierbei wurden sehr wahrscheinlich die Schweißkanten des Batteriegehäuses vorgeschädigt, die dann später während der Fahrzeugerprobung zu diesen Vakuumverlusten führten. Bei einem späteren Purpose-Design-Fahrzeug würde der Ein- und Ausbau der Batterie selbstverständlich einfacher und besser gelöst und somit diese spezifischen Probleme vermieden werden.

Des weiteren gab es häufiger Probleme und Störungen mit der Hardware der Batteriesteuergeräte, die dann getauscht werden mußten.

Die Öl Kühlung wurde vereinzelt durch den sogenannten „Siphoneffekt“ auffällig, der die Batterie ungewollt knapp unter die Betriebstemperatur abkühlen ließ. Dieser Effekt wurde durch eine erhöhte Heizleistung kompensiert.

Nach einem Heckauftaunfall bei Fahrzeug Nr. 4 fiel die Antriebsbatterie mit ca. 7 defekten Zellen aus. Die Batterie erfuhr dabei keine von außen sichtbare Beschädigung.

Nachdem bei Fahrzeug Nr. 2 mehrere Zellen ausgefallen waren und somit die Nennspannung zu gering geworden war, wurde das Fahrzeug im April 1996 stillgelegt.

Am 13.05.96 trat bei Fahrzeug Nr. 1 im Ladebetrieb eine Batterieüberhitzung auf, die eine starke Rauchentwicklung zur Folge hatte. Nach dem Herausziehen vom Ladestecker kühlte die Batterie anschließend ab. Der Grund für diesen Batteriedefekt lag zur Zeit der Erstellung von diesem Abschlußbericht noch nicht vor.

2.8.1.2 NiCd

Die NiCd-Batterie war während des Einsatzes auf Rügen zweimal beim Batterieservice bei der Fa. DAUG; der erste Service führte zu einer längeren Stillstandszeit des Fahrzeuges.

Die Batterientemperatur nach der Fahrt stellte das Hauptproblem dieser Batterie dar, das bis heute nicht gelöst werden konnte. Selbst an kalten Tagen war die Temperatur zu hoch, um

die Batterie von Anfang an mit voller Leistung zu laden. Vermutlich hätte die Belüftung mit Frischluft fahrzeugseitig großzügiger dimensioniert werden sollen.

Beim ersten Batterieservice wurde die Möglichkeit der Schnellladung realisiert, die auch trotz des erwähnten Handicaps genutzt wurde.

Es wurden nur vereinzelt Zellen ausgetauscht. Die relativ hohe Kilometerleistung des Fahrzeugs zeigt, daß die Batterie zuverlässig ist.

Die eingeschränkte Lademöglichkeit, besonders bei höheren Außentemperaturen, reduzierte die Nutzbarkeit im Alltagsbetrieb.

2.8.2 Ladegeräte, DC/DC-Wandler

Die eingesetzten Ladegeräte (Fa. ABB) und die DC/DC-Wandler (BMW Teil) arbeiteten relativ zuverlässig. Nachdem es jedoch seit Ende 1994 seitens ABB/Norwegen keine Serviceunterstützung mehr gab, wechselte BMW den Lieferanten für die Bordladegeräte. Mit den neu eingesetzten Ladegeräten von der Fa. EAW und geänderter Abschaltung stand ab Mitte 1995 dann auch die volle Batteriekapazität von 120 Ah bei der Na/NiCl₂-Batterien zur Verfügung. Die Zuverlässigkeit der neuen Generation der EAW-Ladegeräte war anfangs nicht zufriedenstellend. Nach Hard- und Softwaremodifikationen wurde aber ein stabiler Betriebszustand erreicht.

Diverse Störungen im Ladebetrieb hatten ihre Ursache in Problemen mit dem FI-Ladestecker, der Kontaktierung im 220V-Netz und der Kabeltrommel.

2.8.3 Antrieb

Der ABB-Antrieb von Fahrzeug Nr. 7 mußte mehrfach instandgesetzt werden. Die eingeschränkte Serviceunterstützung seitens ABB war hier mehrfach der Grund für längere Stillstandszeiten.

Die restlichen sieben Fahrzeuge waren mit BMW/Unique-Motoren ausgerüstet. Dieser Antrieb erwies sich als sehr zuverlässig und leistungsfähig. Kleinere Störungen gab es im Leistungsteil (Controller) und der Ansteuerelektronik (AME). Nachdem hier einige Änderungen durchgeführt wurden, arbeitete der Antriebsstrang ohne größere Probleme.

2.8.4 Heizung

Die Zuverlässigkeit, Funktionssicherheit und Leistungsfähigkeit der einzelnen Komponenten wie Bedienteil, Leistungsstufe und Durchlauferhitzer waren aus Sicht von BMW nicht immer zufriedenstellend. Auch hier war die Unterstützung seitens des Zulieferers (Fa. Siemens) eingeschränkt.

2.9 Ergebnisse, Verbesserung und Weiterentwicklung von Bauteilen

2.9.1 Antrieb

Der von BMW mit der Fa. Unique entwickelte permanent erregte Drehfeldmotor erwies sich als das richtungsweisende Konzept. Die vorausberechneten sehr guten Werte bezüglich Wirkungsgrad und Leistungsgewicht wurden im Alltagseinsatz bestätigt. Überraschend positiv waren die hohen Werte der rückgespeisten Energie beim Bremsen. Bis zu 20% der Energie wurde bei Bremsvorgängen in die Antriebsbatterie zurückgespeist und eine somit nicht zu vernachlässigende Reichweitenerhöhung erzielt. Die Energierückspeisung scheint für die laufende und zukünftige Entwicklung interessanter als anfänglich angenommen.

Die Ergebnisse aus dem Rügenversuch fließen in die weitere Entwicklung ein.

2.9.2 Heizung

BMW setzte in sieben Versuchsträgern ein Heizsystem ein, bei dem die Abwärme von Batterie und Antriebsstrang genutzt wird. Bei Bedarf wird über einen elektrischen Durchlauferhitzer zusätzlich geheizt. Es wurde hiermit das Konzept eines völlig emissionsfreien Heizsystems dargestellt.

Die Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit der einzelnen Prototyp-Komponenten, wie z.B. Leistungsendstufe und Durchlauferhitzer, und die Unterstützung seitens der Zulieferer waren nicht immer zufriedenstellend.

Wichtige Erfahrungen aus dem Erprobungsbetrieb fließen auch hier in die Entwicklung von Serien-Komponenten ein.

2.9.3 Ladevorgang

Die Abschaltkriterien wurden mehrfach geändert. Grund war das unterschiedliche Verhalten der Batterien zum Ladeende hin („Ladeschwanz“). Je nach Batterie und vorherigem Fahrprofil gab es teilweise große Differenzen bei den Werten des Innenwiderstandes der Batterie. Ein Kriterium für die redundante Sicherheitsabschaltung des Ladegeräts war damit nur bedingt gegeben.

Es scheint interessant und notwendig, diesem Gesichtspunkt in der weiteren Entwicklung besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

2.10 Meßtechnik und Datenerfassung

Bis zur Abnahme der in den Fahrzeugen verbauten Meßtechnik durch die HTW Dresden waren zahlreiche Aufwendungen und Modifikationen notwendig. Es traten trotz Überprüfung der Fahrzeuge mehrfach nach anschließendem 14-tägigen Meßzyklus Probleme auf, die dann in Zusammenarbeit mit der HTW lokalisiert und beseitigt wurden.

Der benötigte Aufwand erscheint jedoch rückblickend als lohnend. Mit Abschluß des Projektes steht nun eine große und detailliert aufbereitete Datenmenge zur Verfügung, die wichtige Aufschlüsse für die weitere Elektrofahrzeug-Entwicklung liefern kann.

2.11 Versuchsbewertung (Was brachte Rügen?)

Der Großversuch lieferte eine Vielzahl von Ergebnissen und Erfahrungen, die einen wichtigen weiteren Schritt auf dem Weg zu einer Serieneinführung von Elektrofahrzeugen darstellen. Der praxisnahe Einsatz unter relativ rauhen, aber durchaus realen Umgebungsbedingungen (Straßenverhältnisse/Klima) von potentiellen Elektrofahrzeug-Kunden brachte ein Feed-Back für die derzeitige Serienentwicklung. Ein wichtiger Punkt sind die Ergebnisse und Aussagen zu der Zuverlässigkeit und der Standdauer von Elektrofahrzeug-spezifischen Komponenten. Bei der Auswertung der Daten muß selbstverständlich berücksichtigt werden, daß es sich bei den spezifischen Komponenten fast ausschließlich um Teile im Prototypen- bzw. Vorserienstadium handelte.

Vielleicht noch wichtiger als die direkten Ergebnisse aus der Erprobungsphase, die auch teilweise in einem werkseitigen Flottenversuch hätten durchgeführt werden können, waren die Erfahrungen aus den Kontakten zu den Nutzern und mit den anderen Projektpartnern.

Das Projekt bildete ein Forum für eine konstruktive Zusammenarbeit zwischen nationalen Fahrzeugherstellern, Batterielieferanten, Stromerzeugern und Vertretern der Politik. Gerade von der Form und Intensität der weiteren Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Partnern und Institutionen und den politischen und finanziellen Rahmenbedingungen wird es abhängen, wie und in welcher Zeit es der Elektroantrieb als neue Technologie schafft, sich zu etablieren.

Der Elektroantrieb könnte vor allem in Ballungsgebieten dazu beitragen, die Schadstoffbelastung vor Ort zu verringern.

Daß der Elektroantrieb damit eine durchaus sinnvolle und alltagstaugliche Ergänzung zu den konventionellen Antriebskonzepten darstellen kann, hat die Erprobung auf der Insel Rügen unter vielfältigen realen Betriebsbedingungen bewiesen.

3. Mercedes-Benz AG

3.1 Mercedes-Benz Elektro-Pkw W 201-E / MB 190

3.1.1 Fahrzeugaufbau

Mercedes-Benz hat für die Felderprobung von Elektrofahrzeugen im Kundeneinsatz auf Rügen 10 Elektro-Pkw auf Basis der Baureihe W 201 aufgebaut. Dabei wurden folgende Gesichtspunkte berücksichtigt:

- vertretbarer Aufwand für den Umbau der Serien-Fahrzeuge W 201
- hoher Sicherheitsstandard analog der Serienfahrzeuge
- ausgewogene Gewichtsverteilung und gute Fahreigenschaften
- ausreichende Leistung des Antriebs und genügend Reichweite
- Fahrgastraum für 5 Personen
- ausreichend Kofferraum

Im Rahmen der Konzeptphase wurden verschiedene Anordnungen der elektronischen Antriebskomponenten untersucht.

Unter Beibehaltung der Grundanordnung des Antriebs mit Frontmotor und Heckantrieb wurde folgende Anordnung der Komponenten des Elektrofahrzeugs gewählt:

- Heckantrieb wie Serienfahrzeug
- Elektromotor, Motorsteuerung (Umrichter) und Getriebe im Motorraum
- Verteilte Traktionsbatterien mit einem größerem Batterieblock im Motorraum und maximal zwei weiteren Batterieblöcken im Heck (anstelle des Kraftstoffbehälters und Reserverades)
- Bordlader, DC/DC-Wandler und Lenkhelferpumpe im Motorraum
- Netzanschluß zum Nachladen der Traktionsbatterie im Bereich des linken, vorderen Kotflügels

Mit dieser Anordnung der Aggregate konnte eine gleichmäßige Gewichtsverteilung und ein gutes Fahrverhalten erzielt werden. Eine Nutzung des Fahrzeugs als 5-sitzige Limousine war uneingeschränkt möglich. Lediglich das Volumen des Kofferraums wurde etwas eingeschränkt.

Beheizt wurden die Fahrzeuge mit einer fossilen Zusatzheizung. Weiterhin gehörte eine modifizierte Servolenkung zur Ausstattung.

Das Gesamtfahrzeug-Design (Exterieur und Interieur) wurde speziell für den Einsatz auf der Insel Rügen abgestimmt.

Schließlich wurden alle Fahrzeuge mit einer Meßdaten-Erfassungsanlage der Fa. RD-Elektronik ausgestattet.

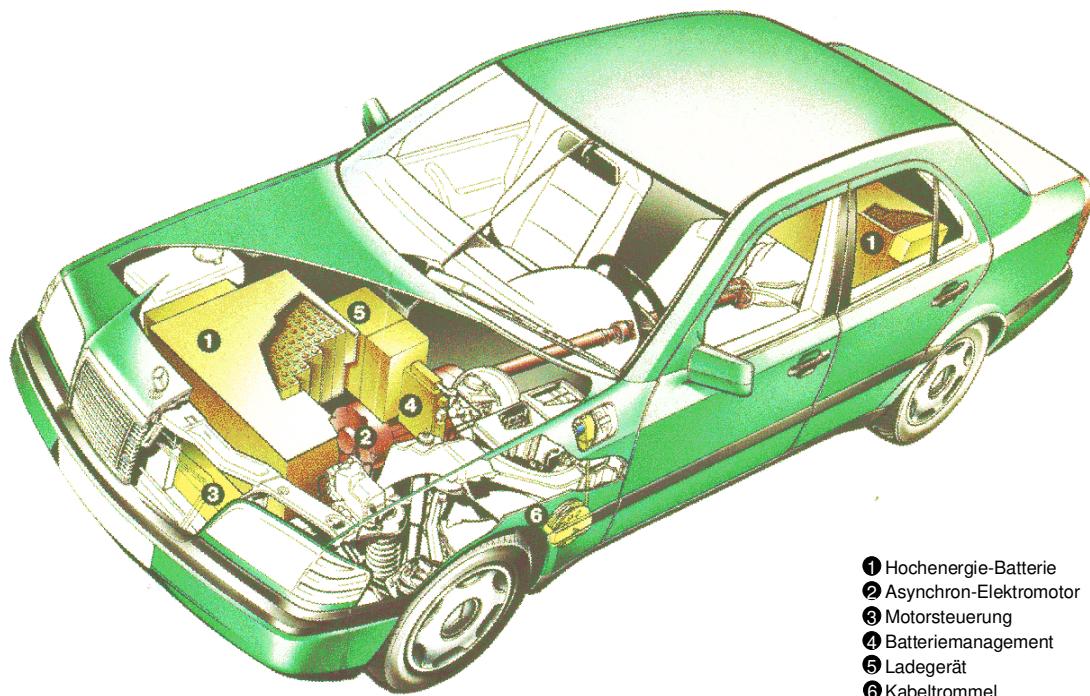


Bild 1: Schnittbild Mercedes-Benz Elektro-Pkw W 201 E

Aufgebaut wurden 3 Varianten mit unterschiedlichen E-Antrieben und Batterien:

Variante	Fahrzeug-Nr.	Batterie	Antrieb
1	9,10,11	Ni/Cd	permanent erregter Synchron-Motor mit Schaltgetriebe
2	12,13,14, 15,16,18	NaNiCl ₂	Asynchron-Motor mit Festuntersetzung
3	17	NaNiCl ₂	Asynchron-Motor ohne Festuntersetzung

Zum Einsatz kamen 3 permanent erregte Synchron-Motoren der Firma Siemens in Verbindung mit dem serienmäßigen 5-Gang-Schaltgetriebe, 6 Asynchron-Motoren der Firma AEG in Verbindung mit einem einstufigen Getriebe (Festuntersetzung) entwickelt in Zusammenarbeit mit der Firma Getrag sowie 1 Asynchron-Motor der Fa. Bosch mit einem

maximalen Drehmoment von 300 Nm. Mit dem Asynchron-Motor der Firma Bosch war ein nachgeschaltetes Untersetzungsgetriebe nicht erforderlich.

Mit der Natrium/Nickelchlorid- oder ZEBRA-Batterie (NaNiCl_2) der Fa. AABG und der Nickel/Cadmium-Batterie (Ni/Cd) der Fa. DAUG/Hoppecke kamen zwei unterschiedliche Traktionsbatterien zum Einsatz.

Ein drittes Traktions-Batteriesystem der Fa. ABB war für den Einbau konzipiert. Durch parallel zum Rügen-Projekt laufende Grundlagenversuche konnte dieses Batterie-System noch nicht für den Fahrzeug-Einsatz freigegeben werden. Es wurde auf AABG-Batterie-System umgestellt.

In 7 Fahrzeugen wurden luftgekühlte AABG-ZEBRA-Batterien und in 3 Fahrzeugen luftgekühlte Ni/Cd-Batterien der Fa. DAUG-Hoppecke vom Typ KCF H 70 eingebaut. In den Fahrzeugen mit ZEBRA-Batterien wurden jeweils 2 Batterieblöcke verbaut: Eine Z5 im Front- und eine Z6 im Heckbereich. In den Fahrzeugen mit Ni/Cd-Batterien wurden 3 Batterieblöcke untergebracht: Ein Batterieblock im Front- und zwei Batterieblöcke im Heckbereich, wobei der 3. Batterieblock in der Reserveradmulde eingebaut wurde.

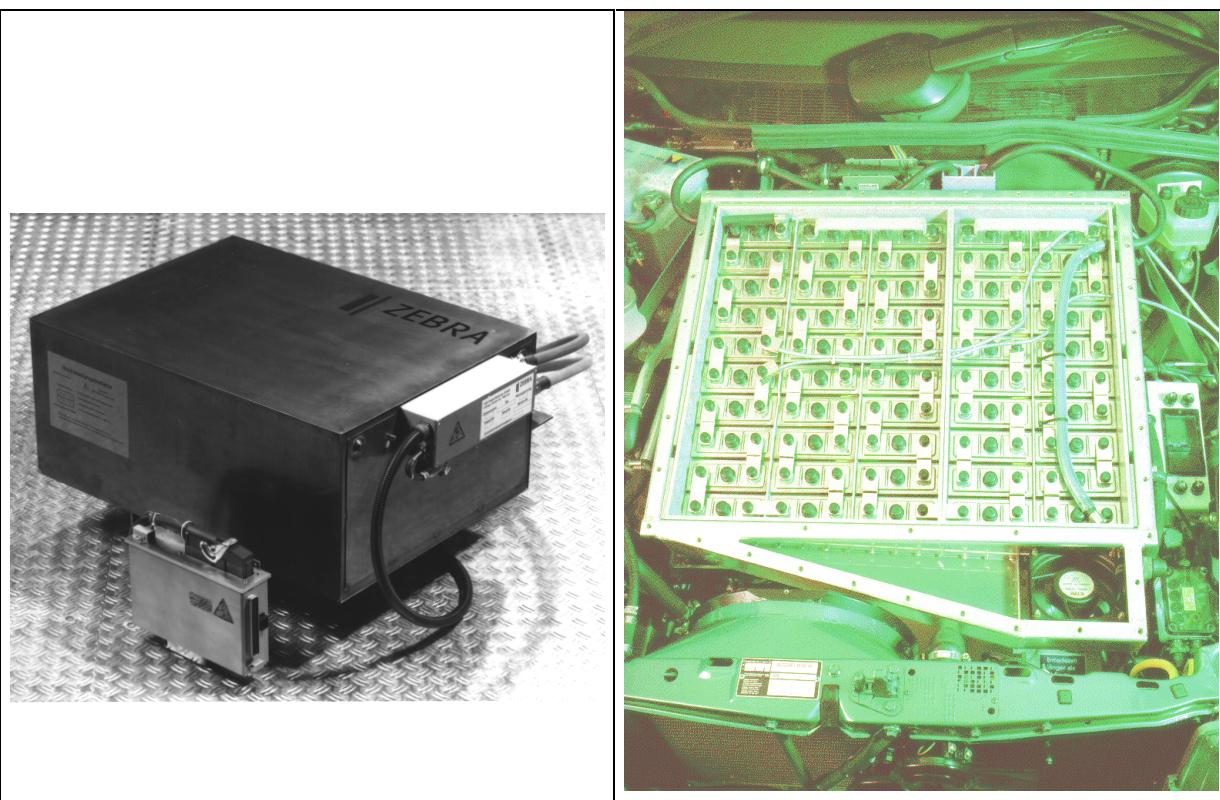


Bild 2: ZEBRA-Batterie, Ni/Cd-Batterie

Besonderer Wert wurde auf die Sicherheit der aufgebauten Fahrzeuge gelegt. Neben umfangreichen Versuchen zur Batteriesicherheit (Fallversuche) wurden sowohl ein Fahrzeug mit Ni/Cd-Batterien als auch ein Fahrzeug mit ZEBRA-Batterien im Frontalaufprall und im Heckcrash im Mercedes-Benz Crash-Zentrum untersucht.

Ein Fahrzeug mit ZEBRA-Batterie wurde im 0° - Frontalaufprall mit 50 km/h überprüft. Dabei zeigte die Fahrzeugstruktur ein zufriedenstellendes Deformationsbild. Die Insassenbe-

lastungswerte waren unkritisch, d.h. die Anforderungen nach FMVSS 208 wurden sicher erfüllt. Die Batterie im Frontbereich blieb weitgehend in ihrer Einbauposition. Der äußere Batteriemantel wurde nicht aufgerissen und es traten keine Reaktanden aus. Nach dem Crashtest wurde über einen Zeitraum von etwa 1 1/2 - Stunden ein Temperaturanstieg der Batterie-Außentemperatur von anfangs 35°C auf ca. 90°C festgestellt. Bei der Batterie im Heckbereich waren äußerlich keine Deformationen erkennbar.

Ein Fahrzeug mit 2 Ni/Cd-Batterien im Fahrzeugheck wurde im Heckaufprall mit 50% Überdeckung überprüft. Auch hier zeigte sich insgesamt ein gutes Deformationsbild, mit einer gering deformierten Seitenwand, einem vollständig erhaltenen Insassen-Überlebensraum im Fond und unkritischen Insassenbelastungswerten.

Insgesamt bieten die aufgebauten E-Fahrzeuge einen hohen Sicherheitsstandard, der vergleichbar mit Mercedes-Benz Serienfahrzeugen ist.

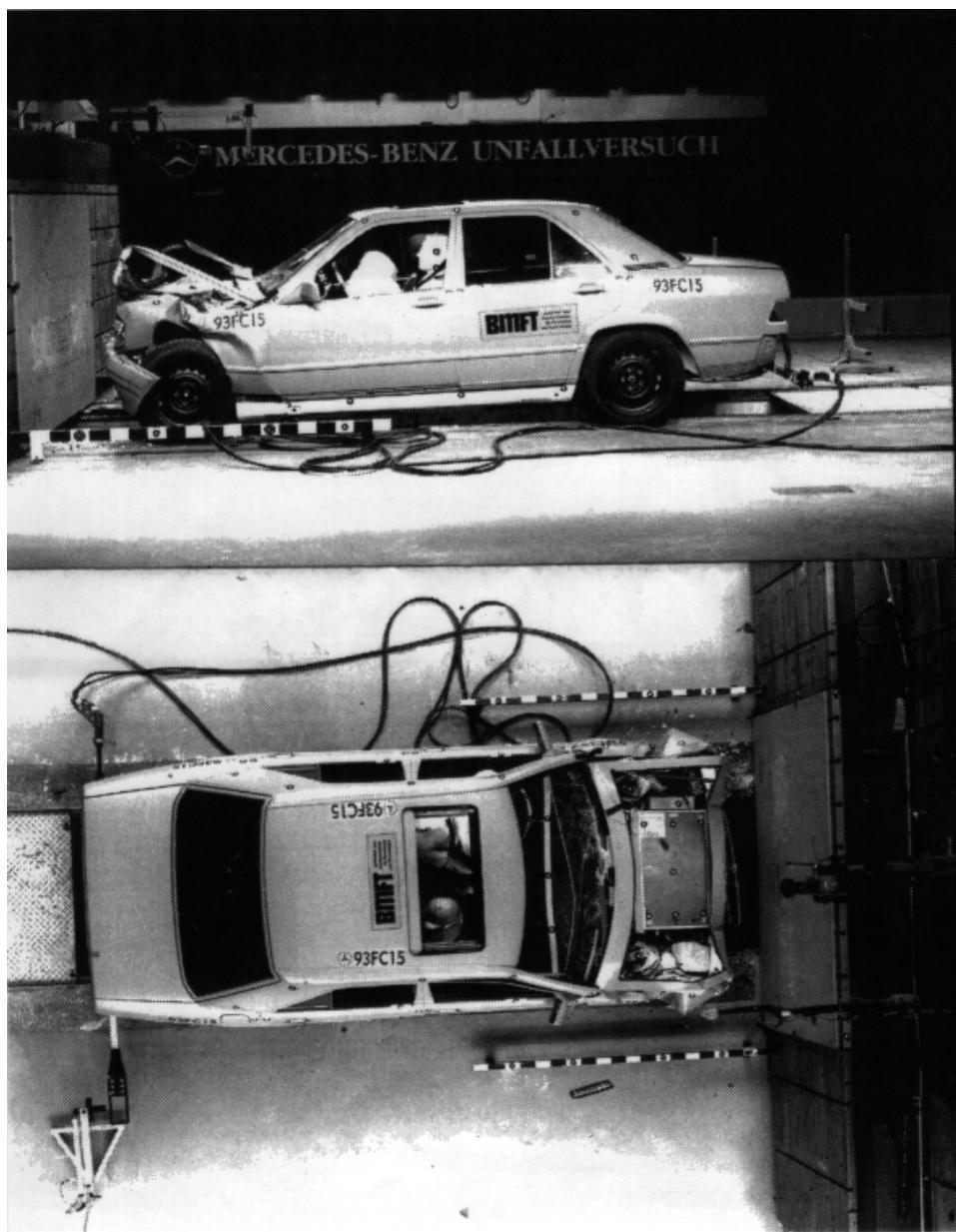


Bild 3: Mercedes-Benz Crashversuch

3.1.2. Technische Daten Mercedes-Benz PKW-W 201-E

Die von Mercedes-Benz auf Rügen eingesetzten 3 Varianten weisen folgende technische Daten auf:

	Einheit	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Antrieb				
Motortyp		Synchron	Asynchron	Asynchron
Hersteller		Siemens	AEG	Bosch
Dauerleistung	kW	18	25	22
Spitzenleistung	kW	30	30	30
max. Drehmoment	Nm	110	160	300
max. Drehzahl	1/min	6000	9000	4400
Getriebe		Schaltgetriebe	Festuntersetzung	entfällt
Anzahl Gänge		5	1	-
Energiespeicher				
Batterietyp		Ni/Cd	NaNiCl2	NaNiCl2
Hersteller		DAUG	AEG	AEG
Spannung	V	180	180	180
Nennenergie	kWh	12,5	25	25
Zellenzahl		150	335	335
Gewicht	kg	300	320	320
Zusatzaggregate				
Ladeleistung Bordlader	kW	3,1	3,1	3,1
Leistung DC/DC-Wandler	kW	1,1	1,1	1,1
Heizung		Standheizung	Standheizung	Standheizung
Gesamtfahrzeug				
Leergewicht	kg	1400	1420	1470
Zuladung	kg	430	410	360
Beschl. 0-50 km/h	sec	9	9	8
Max. Geschwindigkeit	km/h	120	120	116
Verbrauch (ECEn neu)	Wh/km	190	158	158
Reichweite (ECEn neu)	km	65	158	158

3.1.3 Nutzung der Fahrzeuge

Im Dezember 1992 konnten zunächst 2 Fahrzeuge, Nr. 9 und 10 mit Ni/Cd-Batterien, ausgeliefert werden. 6 weitere E-Pkw folgten im Zeitraum 5/93 - 9/93. Hierzu gehörten Fahrzeug Nr. 11 mit Ni/Cd-Batterie und die Fahrzeuge Nr. 12 -16 mit NaNiCl₂-Batterien. Die Auslieferung der Fahrzeuge 17 und 18 mit NaNiCl₂-Batterien erfolgte dann in 5/94 . Ursprünglich sollten diese beiden Fahrzeuge mit Na/S-Batterien ausgestattet werden. Durch Umstellung der Batterietechnik von ABB auf AABG verzögerte sich die Fahrzeug-Auslieferung.

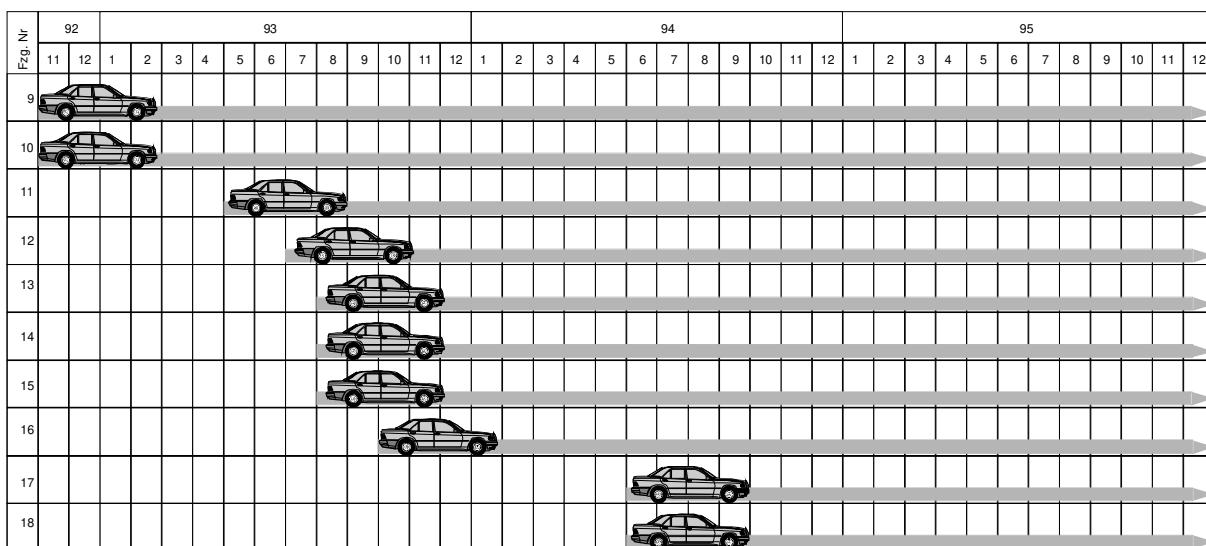


Bild 4: Fahrzeugauslieferung

Die Elektro-Pkw von Mercedes-Benz wurden überwiegend im gewerblichen und kommunalen Bereich eingesetzt. Es hat sich ergeben, daß Privatkunden auf der Insel täglich im allgemeinen sehr kurze Tagesfahrstrecken zurücklegten, während geschäftlich genutzte E-Fahrzeuge intensiver genutzt wurden.

Die E-Pkw wurden auf öffentlichen Straßen unter den für die Insel typischen Bedingungen (dichter Verkehr zur Ferienzeit, streckenweise extrem schlechter Straßenbelag (Kopfsteinpflaster), salzhaltige Luft) eingesetzt. Fahrzeug Nr. 16, das überwiegend von der Wittow-Ferienhaus GmbH genutzt wurde, kam auch im Baustellenbereich zum Einsatz und unterlag deshalb verschärften Einsatzbedingungen.

Die E-Pkw wurden im Förderzeitraum bei folgenden Betreibern eingesetzt:

Fahrzeug-Nr.	Fahrzeugübernahme	Fahrzeughalter/Standort
9	15.12.1992	Rügen-Trans GmbH/Bergen
	15.09.1993	Sander Touristik/Binz
10	16.12.1992	Z-Autovermietung/Saßnitz
	08.11.1993	Planungsbüro Omnen/Zirkow
	30.06.1994	Kurverwaltung Sellin/Sellin
	21.10.1994	H. Preuhs/Buschvitz
11	10.06.1993	Ordnungsamt Binz/Binz
12	17.08.1993	GES m.b.H/Bergen
13	01.09.1993	Gemeindeverwaltung Dranske/Dranske
	17.01.1994	MB-Vertragswerkstatt/Zirkow
	01.07.1995	Fr. Wagner/Zirkow
14	02.09.1993	Landratsamt Bergen/Bergen
15	02.09.1993	Fremdenverkehrsamt Sellin/Sellin
	01.07.1995	Landratsamt Bergen/Bergen
16	29.09.1993	MB-Vertragswerkstatt/Zirkow
	17.01.1994	Wittow-Ferienhaus GmbH/Dranske
17	30.06.1994	Planungsbüro Omnen/Garz
18	01.07.1994	Stöver Frischdienst GmbH/Teschenhagen
	05.09.1994	Pension Wächter/Binz
	16.01.1995	Dr. Rost/Bergen

Die täglich zurückgelegten Fahrstrecken variierten stark, je nach Einsatzfall und Reichweite des E-Pkw. So lag die mittlere Tagesfahrstrecke der Fahrzeuge mit Ni/Cd-Batterien bei 25 km, während die Fahrzeuge mit NaNiCl₂-Batterien im Durchschnitt 60 km täglich zurücklegten. Der Betreiber von der Wittow-Ferienhaus-GmbH nutzte den E-Pkw Nr. 16 besonders intensiv. Hier wurde im Mittel eine Tagesfahrstrecke von 123 km zurückgelegt.

Regelmäßig wurden die Fahrzeuge auch tagsüber nachgeladen, um trotz begrenzter Reichweite mobil zu sein. So wurden mit Ni/Cd-Batterien Tagesfahrstrecken von max. 200 km und mit ZEBRA-Batterien von max. 228 km zurückgelegt.

Insgesamt wurden im Berichtszeitraum bis 31.12.1995 von den 10 E-Pkw von Mercedes-Benz 320 565 km und bis Mitte 1996 über 350 000 km zurückgelegt. Spitzenreiter ist, was die zurückgelegten Kilometer betrifft, das Fahrzeug Nr. 16.

Bis Mitte 1996 hat dieses Fahrzeug alleine über 100 000 km bewältigt, wobei eine Batterie (Z5) nach 17 Monaten und einer Laufleistung von 42 600 km ausgewechselt wurde.

Fahrzeug-Nr.	km-Gesamt zum 31.12.95	Einsatzdauer bis 31.12.95 (Tage)	Standtage* bis 31.12.95	Mittlere Tages- kilometer** (km)
9	17285	1112	162	18,2
10	22052	1112	270	26,2
11	27011	968	63	29,8
12	29597	873	200	50,0
13	29701	853	186	44,5
14	36717	853	145	51,9
15	28718	853	145	40,6
16	80654	824	170	123,3
17	27878	550	51	55,9
18	20952	550	191	58,4
	320565	8548	1583	49,9

* bedingt durch Wartung, Reparatur, Meßfahrten, Öffentlichkeitsarbeit

** abzüglich Standtage

Bedingt durch Wartungs- und Reparaturarbeiten, Meßfahrten und Öffentlichkeitsarbeit war die Nutzung der Fahrzeuge eingeschränkt (siehe obige Tabelle, Standtage). Im Durchschnitt konnten die Fahrzeuge nur zu 81,5% von den Betreibern genutzt werden. Trotz relativ hohem Einsatz bei der Betreuung der Fahrzeuge waren im Servicefall Standzeiten bedingt durch längere Anreisezeiten von Service-Experten aus dem Mutterhaus und fehlende Ersatzteile im wesentlichen für die Elektro-Antriebskomponenten nicht zu vermeiden.

3.1.4 Betriebserfahrungen

3.1.4.1 Allgemeine Betriebserfahrungen

Die Elektro-Pkw von Mercedes-Benz erwiesen sich im Rügenversuch als vollwertige Fahrzeuge. Nach einer kurzen Umstellungszeit hatten sich die Fahrer auf die Elektro-Fahrzeuge eingestellt. Die gegenüber verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen verminderte Leistung wurde von den Nutzern akzeptiert und führte zu einer etwas defensiveren Fahrweise. Die Maximalgeschwindigkeit von 110 km/h reichte aus, um im normalen Verkehr auf der Insel problemlos mitschwimmen zu können.

Der Aktionsradius der Fahrzeuge mit ZEBRA-Batterie von ca. 100 km war völlig ausreichend. Ein Nachladen dieser Fahrzeuge tagsüber war i. a. nicht erforderlich, wurde von den Kunden jedoch häufiger praktiziert.

Bei den 3 Fahrzeugen mit Ni/Cd-Batterien mußten bei einer Reichweite von ca. 50 km allerdings Einschränkungen in Kauf genommen werden. Erschwerend kam hier hinzu, daß die angezeigte Reichweite zu ungenau war.

Sinnvoll erscheint generell, bei der Kundenauswahl Nutzungsanforderungen genauer zu erfragen und den Einsatz der Elektrofahrzeuge nach Aktionsradius und Leistungsfähigkeit gezielt zu planen.

Weiterhin hat der Praxisversuch gezeigt, daß sowohl der Betrieb bei sommerlichen Temperaturen als auch im Winterbetrieb ohne größere Probleme bewältigt werden kann. Lediglich bei den Fahrzeugen mit Ni/Cd-Batterien mußten die Nutzer im Sommer gelegentlich längere Abkühlzeiten in Kauf nehmen, da die Ladung erst bei Batterietemperaturen unter 30°C erfolgen konnte. Im Winter konnten die Fahrzeuge mit einer eingebauten fossilen Zusatzheizung beheizt werden, wobei die Nutzer den Einsatz einer fossilen Heizung eher als „Notlösung“ betrachteten und sich eine emissionsfreie Heizung wünschten.

3.1.4.2 Zuverlässigkeit von Komponenten

Zu den Komponenten mit den häufigsten Störungen/Defekten zählten Ladeanschluß/Kabeltrommel, Batteriesteuergerät, Lenkhelferpumpe/Servomotor, Traktionsbatterien, Wasser-pumpe und Ladegerät.

Traktionsbatterie

Die Erprobung der Elektro-Pkw von Mercedes-Benz auf Rügen lieferte wichtige Erkenntnisse insbesondere hinsichtlich Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Batterien. Dies gilt sowohl für die eingesetzten Ni/Cd-Batterien (in den Fahrzeugen 09,10,11) als auch für die ZEBRA-Batterien (in den Fahrzeugen 12,...18).

Die Fahrzeuge mit Ni/Cd-Batterien wurden über einen Gesamtzeitraum von 41 Monaten erprobt. Nach Inbetriebnahme der Fahrzeuge war zunächst über einen Zeitraum von 1,5 - 2 Jahren ein zufriedenstellender Batteriebetrieb möglich, d.h. 45 - 65 km konnten bewältigt werden. Dann machte sich bei den Fahrzeugen Nr. 9 und 10 eine abnehmende Batteriekapazität bemerkbar. Daraufhin wurde 6/94 eine Batteriewartung durchgeführt, wobei einige Zellen ausgetauscht wurden. Eine anhaltende Verbesserung konnte jedoch nicht erreicht werden. Im Oktober 94 ging die Reichweite von Fahrzeug Nr. 9 erneut auf 20 - 30 km zurück. Schließlich wurden die Batteriesätze in den Fahrzeugen 9 und 10 ausgebaut und bei der DAUG gewartet. Nachfolgend zeigte sich insbesondere am Fahrzeug Nr. 9, daß die durchgeführten Maßnahmen, incl. Tausch einzelner Zellen, keine dauerhafte Verbesserungen brachten. Schließlich mußte Fahrzeug Nr. 9 im Dezember 1995 stillgelegt werden, nachdem insgesamt 17285 km mit dem Batteriesatz zurückgelegt wurden.

Fahrzeug Nr. 10 wurde bis Mitte 96 auf Rügen eingesetzt und war über 41 Monate in Betrieb, wobei 25839 km zurückgelegt wurden. Zuletzt konnten noch 35 - 40 km gefahren werden.

Ein durchaus zufriedenstellendes Ergebnis konnte mit Fahrzeug Nr. 11 erzielt werden. Hier war 6/94 nur eine Batteriewartung erforderlich. Nachfolgend ergaben sich keine Probleme, so daß dieses Fahrzeug ebenfalls bis 5/96 und damit 37 Monate in Betrieb war. Insgesamt

wurden mit diesem Fahrzeug 29839 km zurückgelegt. Zum Versuchsende betrug die Reichweite ca. 50 km.

Zu bemerken ist, daß die Batteriekühlung aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse nicht optimiert werden konnte und sich dadurch möglicherweise der Rückgang der Batteriekapazität erklären läßt. Störend für den Betrieb war der Memory-Effekt und die zu ungenaue Ladezustandsanzeige.

Die Fahrzeuge mit ZEBRA-Batterie wurden über einen Zeitraum von 36 Monaten auf Rügen eingesetzt. In dieser Zeit wurden als Folge von Zellendefekten 5 Batterien Z5 und 5 Batterien Z6 ersetzt. Während in den ersten 2 Jahren 9 Batterien erneuert werden mußten, fiel in den letzten 12 Monaten nur eine Batterie aus.

Im einzelnen ergibt sich zum Versuchsende 5/96 für die Fahrzeuge mit ZEBRA-Batterien folgendes Bild:

Fahrzeug Nr. 12 war insgesamt 35 Monate auf Rügen im Einsatz und legte 37385 Kilometer zurück. In diesem Zeitraum mußte eine Z5 nach 18 Monaten und 18978 km und eine Z6 nach 22 Monaten und 21293 km erneuert werden. Mit dem zuletzt eingesetzten Batteriesatz wurden mit der Z5 über einen Zeitraum von 17 Monaten 18400 km zurückgelegt, mit der Z6 waren es über einen Zeitraum von 12 Monaten 16100 km. Beide Batterien sind zum Versuchsende Mitte 96 noch intakt (keine defekten Zellen).

Fahrzeug Nr. 13 war insgesamt 34 Monate auf Rügen im Einsatz und legte 31594 Kilometer zurück. In diesem Zeitraum mußten zwei Z5 und eine Z6 erneuert werden. Zuerst trat bei einer Z6 nach 9 Monaten und 14563 km ein Isolationsfehler auf, der nachfolgend zu einem Batteriebrand führte. 3 Monate später fiel die erste Z5 bei einer Kilometerleistung von 14888 km aus. Im April 1995 fiel dann die bereits getauschte Z6 erneut aus. Daraufhin wurde der komplette Batteriesatz (Z5 und Z6) ausgebaut und Z5 in das Fahrzeug Nr. 18 eingebaut (hier war zu diesem Zeitpunkt eine Z5 defekt). In Fahrzeug 13 wurde der komplette Batteriesatz erneuert. Anfang Januar 1996 wurden diese Batterien im intakten Zustand dann wieder ausgebaut und in Fahrzeug 14 eingebaut, nachdem für die in diesem Fahrzeug ausgefallene Z6 kein Ersatz zur Verfügung stand. Im Februar konnte Fahrzeug Nr. 13 dann wieder mit dem Batteriesatz aus Fahrzeug Nr. 18 weiterbetrieben werden, nachdem dieses Fahrzeug aufgrund eines defekten Antriebs stillgelegt werden mußte. In der Summe ist die bis zum Versuchsende in Fahrzeug Nr. 13 eingesetzte Z5 24 Monate in Betrieb, bei einer Kilometerleistung von 14300 km. Die Z6 in Fahrzeug Nr. 13 ist seit Beginn der Versuche in Betrieb, d.h. 32 Monate, bei einer Kilometerleistung von 22800 km. Beide Batterien sind zum Versuchsende Mitte 96 noch intakt (keine defekten Zellen).

Fahrzeug Nr. 14 war insgesamt 35 Monate auf Rügen im Einsatz und legte 42759 Kilometer zurück. In diesem Zeitraum ist eine Z5 und eine Z6 ausgefallen. Zunächst fiel die Z5 nach 23 Monaten und einer Kilometerleistung von 30062 km aus. Nachdem diese Batterie 6/95 erneuert wurde, fiel Ende 1995 die Z6 nach 29 Monaten und einer Laufleistung von 36800 Kilometer aus. Da zu diesem Zeitpunkt keine Ersatzbatterie mehr zur Verfügung stand, wurden beide Batterien ausgebaut und der komplette Batteriesatz aus Fahrzeug Nr. 13 eingebaut (s.o.).

Die ausgebauten und noch intakten Z5 war zu diesem Zeitpunkt 6 Monate im Betrieb, bei einer Laufleistung von 6738 km. Der aus Fahrzeug Nr. 13 stammende Batteriesatz ist bei Versuchsende 13 Monate im Betrieb, bei einer Kilometerleistung von 14900 km. Beide Batterien haben bereits defekte Zellen, können jedoch noch weiter betrieben werden.

Fahrzeug Nr. 15 war insgesamt 35 Monate auf Rügen im Einsatz. Hier ist noch der erste Batteriesatz in Betrieb, bei einer Kilometerleistung von 34026 km. Zumindest bei diesem Fahrzeug zeigte sich das Potential der ZEBRA-Batterie. Beide Batterien sind zum

Versuchsende Mitte 96 noch intakt (keine defekten Zellen). Es ist beabsichtigt, die Batterieerprobung mit diesem Fahrzeug fortzuführen.

Fahrzeug Nr. 16 war insgesamt 34 Monate auf Rügen im Einsatz und wurde intensiv genutzt. Insgesamt legte dieses Fahrzeug 101211 Kilometer zurück. Im Fahrzeug befand sich zum Versuchsende nach wie vor die erste Z5, die inzwischen jedoch defekte Zellen aufweist (eine defekte Zelle/Strang). Eine Z6 mußte nach 17 Monaten und einer Kilometerleistung von 42600 km getauscht werden. Diese Z6 ist zum Versuchsende 17 Monate in Betrieb, bei einer Kilometerleistung von 58600 km. Auch diese Batterie weist inzwischen defekte Zellen auf und muß demnächst stillgelegt werden.

Fahrzeug Nr. 17 war insgesamt 36 Monate auf Rügen im Einsatz und legte 33225 Kilometer zurück. In diesem Fahrzeug mußte nach 19 Monaten, bei einer Kilometerleistung von 14397 km, eine Z5 getauscht werden. Zum Versuchsende ist die Z5 noch I.O., Z6 weist jedoch bereits defekte Zellen auf.

Fahrzeug Nr. 18 war insgesamt 29 Monate auf Rügen im Einsatz und legte 20952 Kilometer zurück. Dieses Fahrzeug wurde im Februar 1996 stillgelegt, nachdem der Antrieb nicht mehr repariert werden konnte.

Im Fahrzeug Nr. 18 mußte eine Z5 nach 18 Monaten bei einer Kilometerleistung von 14472 km getauscht werden. Hierzu wurde die Z5 aus Fahrzeug Nr. 13 eingebaut. Nachdem Fahrzeug Nr. 18 frühzeitig stillgelegt werden mußte, wurde der komplette Batteriesatz in Fahrzeug Nr. 13 weiter genutzt.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die von Mercedes-Benz in den Elektro-Pkw auf Rügen eingesetzten Batteriesysteme noch nicht als serienreif zu bezeichnen sind. Zumindest in den ersten beiden Betriebsjahren war die Zahl der ausgefallenen ZEBRA-Batterien zu hoch. Erfreulich ist das Bild im letzten Betriebsjahr. Hier mußte nur eine ZEBRA-Batterie getauscht werden. Nach Abschluß des Rügenversuchs ließen zumindest die ZEBRA-Batterien in den Fahrzeugen 15 und 16 das Potential des Batteriesystems voll erkennen. Als nachteilig im Hinblick auf die Lebensdauer der Batterien hat sich die eingesetzte Serienschaltung der Z5 und Z6 erwiesen. Eine Parallelschaltung oder ein einziger Batterieblock sind für die Serienausführung vorzuziehen. Auch sollten stets beide Batterieblöcke gleichzeitig getauscht werden (auffällig war, daß in den Fahrzeugen 12, 13 und 14 nach einem Schaden eines Batterieblocks in der Folgezeit auch der zweite Batterieblock getauscht werden mußte).

Insgesamt zeigte das AABG-Batteriesystem das erwartete Potential für den Einsatz von Elektrofahrzeugen und kann zur Weiterentwicklung für eine Serie empfohlen werden.

Batteriesteuengerät

Die Batteriesteuengeräte erwiesen sich zu Versuchsbeginn als störanfällig und mußten im Laufe des Fahrbetriebes mehrmals überarbeitet bzw. getauscht werden. Dies führte zu mehrfachen Standzeiten und erheblichem Service-Aufwand.

Ladegerät

Bei den Ladegeräten ergaben sich die Ausfälle hauptsächlich aufgrund von Sicherungsproblemen und Softwarestörungen. Diese Störungen können durch gezielte Entwicklung und eine Serienfertigung vermieden werden.

Kabeltrommel

Die Kabeltrommeln in den Fahrzeugen mußten wegen Mängeln beim Kabelaufrollen durch CEKON-Stecker ersetzt werden. Für eine Serie ist eine kundenfreundliche Ausführung zu erarbeiten.

Lenkhelfpumpe

Mit der Lenkhelfpumpe entstanden Probleme, da sie relativ ungeschützt an der Fahrzeugunterseite angebracht war. Dadurch verschmutzte sie häufig und mußte regelmäßig gewartet werden. Der Service-Aufwand hierfür war erheblich.

Wasserpumpe

Die eingesetzten Wasserpumpen waren handelsübliche Aggregate und hatten noch keine zufriedenstellende Lebensdauer.

E-Motor Servopumpe

Bei diesen Aggregaten traten, bedingt durch Verschmutzung, teilweise Schäden in den Lagerungen auf.

E-Motor

Die E-Motoren haben sich unter den anspruchsvollen Einsatzbedingungen auf Rügen bewährt. Es traten zwei Lagerschäden auf, bei Fzg. 13 und bei Fzg. 16. Hier ist für den Serieneinsatz eine Neudimensionierung der Lagerungen durchzuführen.

Umrichter

Bei den eingesetzten Umrichtern traten vereinzelt Störungen auf:

So fiel bei Fzg. 11 der eingebaute DC/DC-Wandler aus, mußte in Fahrzeug 13 der Umrichter getauscht werden und ließ sich ein störendes Anfahrruckeln in Fahrzeug 18 nicht beseitigen.

Insgesamt erwies sich der von AEG/Schorch speziell entwickelte Asynchronantrieb in Verbindung mit der Festuntersetzung der Firma Getrag als zielführend. Für den Serieneinsatz ist jedoch eine Überarbeitung des Systems, auch hinsichtlich des Gewichtes erforderlich.

Defekte und Störungen W201 Elektro auf Rügen

Zeitraum: 12/92 - 12/95

Fahrzeuge/Anzahl/Störungen

Störung/Defekt	Fzg.-Nr.	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Gesamt
Traktionsbatterie defekt	1				2	3	2		1	1	1	11
Batteriezellen defekt	3	2	1	2	3	1			1	1	1	15
Batteriesteuengerät		2	1	5	4	2	5	2	2	1	1	24
Umrichter/Traktionsmotor			1		1				1		1	4
Getriebe/Kupplung		1	1									2
Hinterachsmitteilstück									1			1
Ladegerät	1	1	2	1		2		1				8
Ladeanschluß/Kabelltrommel	4	3	2	3	4	2	4	1	1			24
DC/DC-Wandler	1	1	2	2								6
Lenkhelfpumpe/Servomotor	2	3	3	1	4	3	1	1				18
Unterdruckpumpe/ Servomotor				2					1	1		4
Wasserpumpe	1	1		2	2	3	1		1			11
Bremsanlage/Bremspoti		2				1		1				4
Fahrrpedalgeber				1								1
Kühlerlüfter					1		2					3
Reichweitenrechner		2	1		1							4
Optischer Sternkoppler										1	1	
Meßanlage		1	1	1								3
Standheizung						1		1				2

3.1.4.3 Meßergebnisse

Verbrauchsdaten der Mercedes-Benz 190 E

Im Versuchsbetrieb wurden je nach Fahrzeug, Batterie und Fahrweise unterschiedliche Verbrauchswerte gemessen.

Der mittlere spezifische Netzverbrauch lag zwischen 31,7 und 48,8 kWh / 100 km. Dabei lag der Energieanteil für den Antrieb bei rund 44% oder rund 16,5 kWh / 100 km, d.h. auf Verbraucher wie beispielsweise AC/DC-Wandler, Traktionsbatterie und Bordnetz entfielen mehr als die Hälfte der aufgewendeten Energie.

Der Energieverbrauch lag im Vergleich mit anderen entsprechenden Fahrzeugen der Rügen- flotte im oberen Bereich. Erklärungen für die Energieverluste sind die versuchstechnische Aufteilung der Batterien in zwei Teilblöcke, die Einschränkung der Rekuperationsnutzung zu Gunsten der Fahrsicherheit sowie ein höherer Verbrauch der nicht optimierten Nebenaggregate.

Das Gesamtgewicht der Fahrzeuge war aufgrund zu hoher Gewichte der elektrischen Antriebskomponenten um ca. 100 - 150 kg zu hoch.

3.1.5 Versuchsbewertung und Ausblick

Die Elektro-Pkw von Mercedes-Benz haben sich auf Rügen durchaus bewährt. Die Fahreindrücke der Nutzer hinsichtlich Komfort, Fahrleistungen und Reichweite sind positiv.

Nach einer kurzen Umstellungszeit hatten sich die Fahrer auf die Elektro-Fahrzeuge eingestellt und konnten im normalen Verkehr problemlos mitschwimmen. Die gegenüber konventionell angetriebenen Fahrzeugen etwas verminderte Leistung wurde akzeptiert und führte zu einer etwas defensiveren Fahrweise. Der Aktionsradius der Elektrofahrzeuge mit ZEBRA-Batterien war völlig ausreichend.

Die TÜV-Abnahme erfolgte durch den zuständigen Techn. Überwachungsverein Südwest in Stuttgart.

Die Anzahl aufgetretener Störungen im praktischen Fahrbetrieb zeigte jedoch deutlich, daß die auf Rügen von Mercedes-Benz eingesetzten Elektro-Pkw noch nicht als serienreif zu bezeichnen sind.

Im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Lebensdauer erwiesen sich einige Nebenaggregate wie Wasser- und Unterdruckpumpen, Antrieb der Servopumpe und Netzanschluß als Schwachstellen. Die eingesetzten Traktionsbatterien sind im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Lebensdauer noch nicht serienreif. Nur einzelne AABG-ZEBRA-Batterien bewährten sich über den gesamten Versuchszeitraum.

So erforderte die Betreuung der E-Fahrzeuge vor Ort einen deutlich höheren Aufwand, als ursprünglich geplant.

Die Gesamtfahrzeug technische Betreuung erfolgte durch das Mercedes-Benz Autohaus Klemaschewski in Zirkow mit einer Servicestation im Nahbereich der DAUG.

Begrenzte Service-Kapazität bei der DAUG-Station auf Rügen erforderte zusätzliche Kapazität für Service-Unterstützung aus dem MB-Mutterhaus in Stuttgart. Bedingt durch die Entfernung traten so auch Standzeiten auf, die im Regelfall vermieden werden können.

Insgesamt waren die gewonnenen Erfahrungen aus dem Rügenversuch sehr wertvoll.

So wurden frühzeitig die notwendigen Weiterentwicklungen angestoßen und im Rahmen der Entwicklung von serienreifen Elektrofahrzeugen im Hause Mercedes-Benz umgesetzt. Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Flottentest von Elektrofahrzeugen auf der Insel Rügen in Kundenhand werden im Rahmen der Entwicklung von Serienfahrzeugen auf Basis der A-Klasse von Mercedes-Benz und einer Ausführung auf Basis des SMART der Fa. MCC berücksichtigt. Im Rahmen des Rügen-Testversuches konnten die Betreiber bereits erste Fahreindrücke mit der Elektro-Version auf Basis der Studie-A bei einer Vorstellung auf Rügen erleben.

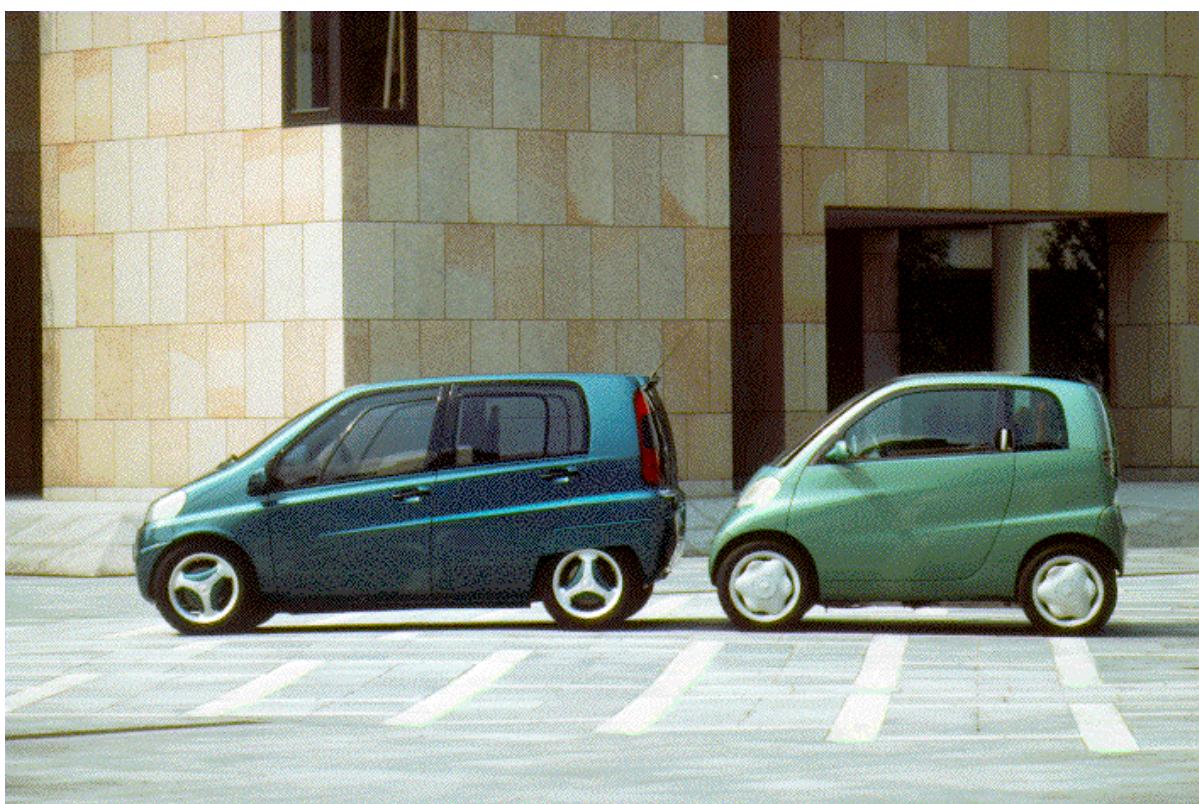


Bild 5: Studie A und SMART-Prototyp

3.2 Mercedes-Benz Transporter MB 100 E

3.2.1 Fahrzeugaufbau

Im Rahmen des Forschungsprojekts war es Aufgabe der Fahrzeughersteller für die auf der Insel Rügen anstehenden Transportaufgaben geeignete Elektrofahrzeuge herzustellen und mit den aktuell modernsten Antriebssystemen und Energiespeichern auszurüsten.

Um die zu erwartenden Aufwendungen in einem überschaubaren Zeit- und Kostenrahmen zu halten, wurden die Elektrofahrzeuge auf Basis der bei Projektbeginn gängigen Serienfahrzeuge erstellt.

3.2.1.1 Fahrzeugausführung

Die von Mercedes-Benz für das Rügenprojekt beizustellenden 10 Elektro-transporter MB 100 E basieren auf dem bewährten Fahrzeug MB 100. Entsprechend der Aufgabenstellung wurden in Abstimmung mit den ausgewählten Fahrzeuganwendern 6 Fahrzeuge als Pritschenwagen und 4 als Kastenwagen mit hohem Dach ausgeführt.

Die MB 100 E-Pritschenwagen, die sowohl für die Güterverteilung vorgesehen waren als auch bei Kommunen und in Kurbetrieben zum Einsatz kamen, erhielten zum Schutz des Ladegutes jeweils einen Spriegelaufbau mit Plane.

Von den MB 100 E-Kastenwagen kamen 3 Fahrzeuge im Postdienst und ein Fahrzeug im Güterverteilerbetrieb zum Einsatz, entsprechend sind die Laderäume der Fahrzeuge mit Schwenktüren im Heck und seitlicher Schiebetür ausgeführt. Eine mit Durchgang versehene Zwischenwand trennt den Laderaum vom Fahrerhaus, um eine sachgerechte Lagerung des Transportgutes zu ermöglichen, bei gleichzeitiger Arbeitsvereinfachung für den Fahrer.

Die vielfältigen Aufgaben auf Rügen und der Insel Hiddensee machten die zusätzliche Anordnung einer Anhängerkupplung für alle Fahrzeuge notwendig. Zur Erleichterung bei der Transportarbeit erhielten alle Fahrzeuge eine elektro-hydraulische Lenkunterstützung.

Bei den Konstruktionsarbeiten für die vom Serienumfang abweichenden notwendigen Fahrzeugänderungen, wie Integration von elektrischen Antriebs- und Speichersystemen und die anderen elektrospezifischen Zusatzaggregate wurde großer Wert darauf gelegt, daß bei Einsatzvielfalt und Leistungsfähigkeit Abweichungen von den vergleichbaren Serienfahrzeugen auf ein notwendiges Mindestmaß beschränkt bleiben.

Fahrzeugänderungen erfolgten bereits im Fertigungswerk des MB 100, in dem die für den Aufbau als Elektrofahrzeug nicht benötigten Konstruktionsteile, wie Dieselmotor, Kraftstofftank und Auspuffanlage sowie alle zugehörigen Details demontiert wurden.

Die Zusatzaufbauten bei den Pritschenwagen, wie Leichtmetallaufbau, Spiegel und Plane wurden in unserem Werk Ludwigsfelde hergestellt und mit dem Fahrzeug integriert.

Wesentlicher Arbeitsumfang ergab sich zwangsläufig bei der Unterbringung der unterschiedlichen Batteriesysteme und Adaption der verschiedenen elektrischen Antriebssysteme sowie der notwendigen Zusatzaggregate. Dieser Arbeitsumfang sowie Inbetriebnahme und Fahrtests erbrachte unser Partnerunternehmen Laramag/Wil.

3.2.1.2 Unterbringung der Traktionsbatterie

Bei dem MB 100 E Plattformwagen sind sowohl die Nickel/Cadmium (Ni/Cd)- als auch die Natrium/Nickelchlorid-Batterien (Na/NiCl₂ ZEBRA-Batterien) zwischen Pritschenaufbau und Fahrgestell untergebracht, so daß die Ladefläche voll genutzt werden kann. Durch die unterschiedliche Höhe der Batteriesysteme mußte die Ladepritsche angehoben werden, was für den täglichen Arbeitsablauf keine Beeinträchtigung darstellt.

Die wartungsfreie Ni/Cd-Batterie, Typ KCF-H 100 von Daug Hoppecke, ist in einem Kunststofftrog zusammengefaßt und zwischen dem Fahrzeug-Längsrahmen montiert. Der geschlossene Batterietrog mit Belüftung und thermischer Auskleidung und Temperierung schützt die Batterie gegen äußere Einflüsse und gewährleistet eine Vergleichmäßigung der Batterietemperatur.

Von den Hochenergie-Batterien der AAB AG kamen 2 ZEBRA-Batterien, Typ Z 5, zum Einbau. Die wartungsfreie Batterie mit Batteriesteuengerät und Lüfter ist zum Schutz gegen äußere Einflüsse in einem geschlossenen Raum zwischen den Achsen installiert. Die notwendige saubere Luftzufuhr für die Batterie wird über entsprechend ausgelegte Luftfilter sichergestellt.

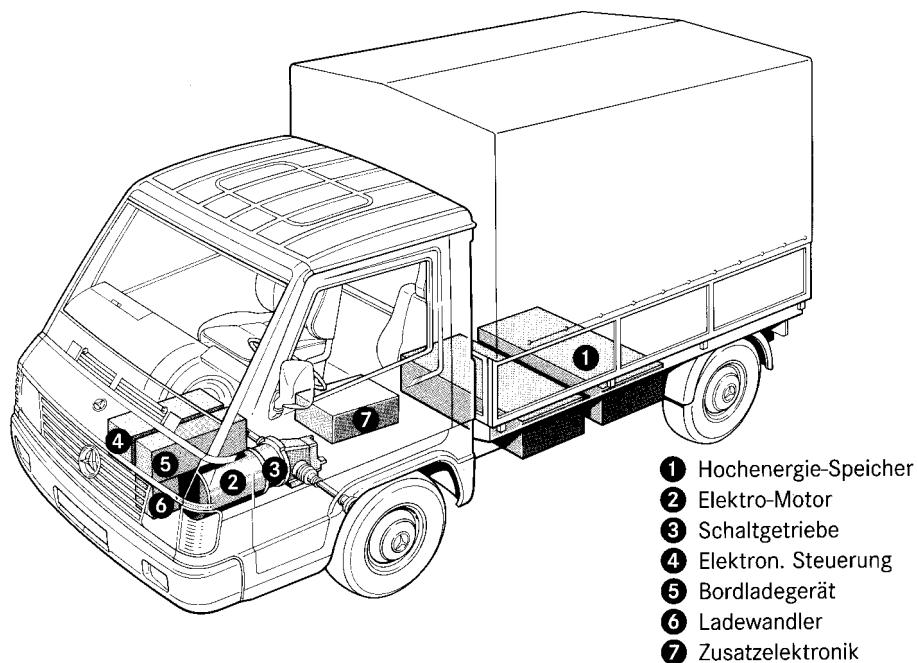


Bild 1: Elektrotransporter MB 100 E, Pritschenwagen

Die vier MB 100 E-Kastenwagen sind ausschließlich mit der ZEBRA-Batterie ausgestattet. Die Batterieanordnung erfolgte im Fahrzeugheck, so daß die Nutzung des Laderaums nicht übermäßig beeinträchtigt ist. Der geschlossene Batterie-Einbauraum, in dem neben den beiden Batterien Z 5 mit peripheren Anlagen auch das Batterieladegerät angeordnet ist, wurde so ausgeführt, daß Gütertransport auch auf der erhöhten Ladeplattform der Batterieabdeckung möglich ist.

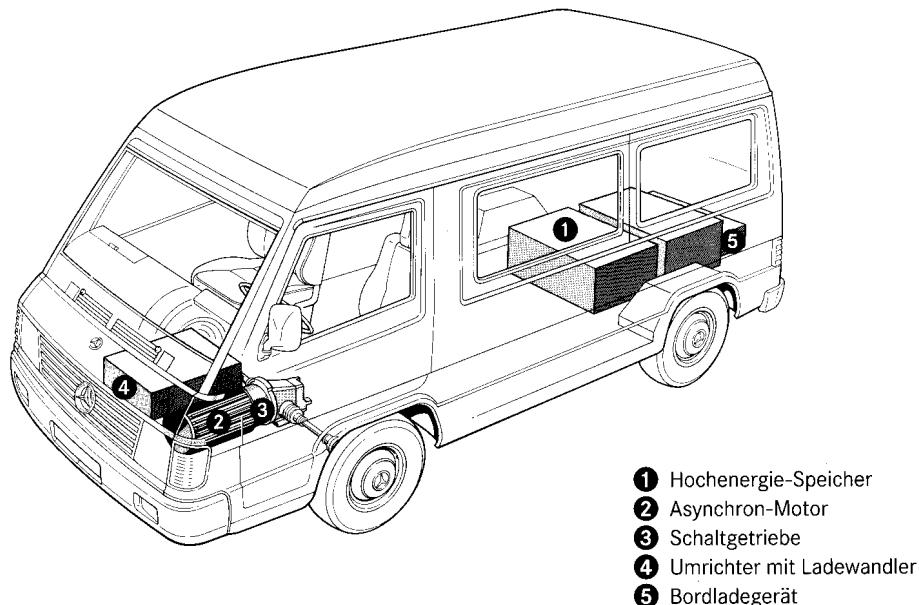


Bild 2: Elektrotransporter MB 100 E, Kastenwagen

3.2.1.3 Einbau des Antriebssystems

Der MB 100 E ist wie das Basisfahrzeug mit Frontantrieb ausgeführt. Das serienmäßige Schaltgetriebe mit Differential wurde grundsätzlich beibehalten. Lediglich bei dem Synchron-antrieb konnte auf das Schaltgetriebe zu Gunsten einer festen Getriebeübersetzung verzichtet werden. Über einen Zwischenflansch ist der jeweilige Gleichstrom- bzw. Drehstrom-Asynchronmotor mit dem Getriebe verbunden. Die Motorlagerung erfolgte an den gleichen Lagerstellen wie der Dieselmotor.

Das Synchron-Antriebssystem ist ein Zwei-Motorenantrieb bei Verzicht auf Schaltgetriebe und Differentialübersetzung. Über eine feste Getriebeübersetzung arbeitet jeder der beiden Synchronmotoren auf ein gelenktes Antriebsrad. Der Doppelantrieb mit Getriebe erforderte eine neue Motorlagerung

Bei dem MB 100 E sind im Motorraum neben dem Antriebsmotor auch die elektronische Steuerung bzw. Wechselrichter unmittelbar über dem Fahrmotor angeordnet. Auf kurze Verbindungen und übersichtliche Anordnung wurde besonderer Wert gelegt.

3.2.1.4 Hilfsaggregate

Neben den Hauptantriebs- und Speicherkomponenten erforderte die Elektrifizierung der MB 100 zur Sicherstellung der Funktionstüchtigkeit und Einsatzerleichterung noch weitere Zusatzaggregate.

Bordladegerät

Alle 10 MB 100 E verfügen über Bordlademöglichkeit mit Anschluß an eine CEN-Steckverbindung 400 V/16A. Bei 9 Fahrzeugen ist das Bordladegerät mit einer max. Ladeleistung von 5 kW separat installiert. Die Ladeleistung ermöglicht eine Volladnung der Batterie innerhalb von 6-7 Stunden. Das Bordladegerät ist bei der Fahrzeugausführung als Kastenwagen mit den ZEBRA-Batterien im Batterieraum untergebracht, beim Pritschenwagen im Motorraum.

Bei dem Fahrzeug mit Synchronantrieb ist das 5kW-Batterieladegerät Bestandteil des Umrichters.

DC/DC-Wandler

Für die 12V-Bordnetzversorgung verfügen die Fahrzeuge mit Gleichstrom-Antriebssystem über einen separaten 12V/60A DC/DC-Wandler, der im Motorraum untergebracht ist.

Bei den Fahrzeugen mit Synchron- bzw. Asynchronantrieben ist die 12V-Bordnetzversorgung jeweils Bestandteil der Wechselrichteranlage.

Bremsunterstützung

Durch Entfall der Vakuumbremsunterstützung beim Dieselantrieb ist für die Elektrofahrzeuge eine 12V Vakuumpumpe erforderlich, angeordnet im Motorraum.

Lenkunterstützung

Da zum Entwicklungszeitpunkt des MB 100 E das Basisfahrzeug serienmäßig über keine hydraulische Lenkunterstützung verfügte, mußte entsprechend den Anforderungen beim Einsatz auf der Insel Rügen jedes Fahrzeug mit einer zusätzlichen elektrohydraulischen Lenkhilfe ausgerüstet werden. Der Elektromotor mit Pumpe ist bei allen Fahrzeugen im Motorraum untergebracht, während das elektronische Steuerteil beim Kastenwagen im Batterieraum und beim Pritschenwagen hinter dem Fahrerhaus unterhalb der Ladeplattform angeordnet wurde.

Zusatzzheizung

Auch bei den zum Einsatz kommenden neuesten Batteriesystemen kann für die Beheizung des Fahrerhauses die elektrische Speicherenergie nicht herangezogen werden. Zur Entfrostung der Frontscheibe und Fahrerhausbeheizung kam alternativ die Diesel-Warmwasserheizung D5W zur Anwendung. Unter Nutzung des von der Grundausstattung vorhandenen Leitungssystems sind Heizaggregate einschließlich Zubehör bei dem Kastenwagen im Motorraum untergebracht. Die Anordnung im Pritschenfahrzeug erfolgte hinter dem Fahrerhaus unterhalb der Ladeplattform.

3.2.2 Beschreibung der Antriebssysteme

Bei den 10 Elektrotransportern MB 100 E kamen drei verschiedene Antriebssysteme zur Anwendung, um Unterschiede in Leistungsfähigkeit und Energieverbrauch bei dem praxisgerechten Einsatz zu ermitteln.

Entsprechend der Bauart des mit Frontantrieb ausgeführten MB 100 E ergaben sich für die verschiedenen Antriebssysteme unterschiedliche Einbausituationen.

3.2.2.1 Gleichstrom-Nebenschlußantrieb

Der kostengünstige Gleichstromantrieb, Fabrikat ABB, fand in 5 Fahrzeugen Berücksichtigung.

Fahrmotor

Der Fahrmotor ist eine fremderregte Gleichstrommaschine Typ TTL 250 CV, die dem Systemanbieter ABB von der Firma Thrigé Titan beigestellt wurde. Die Maschine ist vierpolig mit Wendepolen ohne Kompensationswicklung. Die Luftkühlung erfolgt über einen zusätzlichen 12 V Lüfter.

Technische Daten

Spannungsbereich	75-240 V
Dauerleistung	28 kW
Kurzzeitleistung (1 Min)	38 kW
Ankerstrom (Dauerbetrieb)	160 A
Nenndrehzahl	4300/min
Maximaldrehzahl	6700/min
Feldstrom (max.)	9,5 A
Kühlung	Luft 85 m³/h
Gewicht	84 kg

Motorcontroller

Der Motorcontroller von ABB (Battery Drive Systems) , Norwegen, ist ein Anker- Feldsteller mit der Typenbezeichnung BA 40.

Es handelt sich hierbei um einen transistorisierten Gleichstromsteller. Über ein Parameter - EPROM - ist die jeweilige Betriebsbedingung z.B. Batteriesystem, Motorausführung, adaptierbar.

Technische Daten

Nennspannung	180 - 240 V
Eingangsspannungsbereich	105 - 270 V
max. Ankerstrom (1 Min)	250 A
Feldstrom	0 - 14 A
Taktfrequenz	15, 6 kHz
Kühlung	Luft 150 m ³ /h
Gewicht	24 kg

Nach Prüfstandsmessungen beträgt der Gesamtwirkungsgrad im Teillastbereich zwischen ca. 3 000/min und ca. 4 500/min 85%. Elektrische Energierückspeisung ist bis Fahrzeugstillstand möglich.

3.2.2.2 Asynchron-Antriebssystem

4 MB 100 E sind mit einem Asynchron-Antriebssystem der Firma ELIN, Wien, ausgerüstet. Für die notwendige Fahrleistung stand nur der ELIN-Antrieb in einem überschaubaren Zeitrahmen für die elektrische und mechanische Anpassung an den MB 100 E zur Verfügung.

Fahrmotor

Basierend auf dem Standard-Motorprogramm wurde ein spezieller Drehstrom-Asynchronmotor für Elektrofahrzeuge entwickelt. Das Motorgehäuse ist aus Aluminium-Druckguß gefertigt. Der Motor mit der Typenbezeichnung LCU 716 L04Q92-9 ist fremdbelüftet.

- Technische Daten

Spannung	3 x 150 V
Nennleistung	30 kW
Nenndrehzahl	2150/min
Max. Drehzahl	5130/min
Nennmoment	130 Nm
Kühlung	Luft, fremdbelüftet, temperaturgesteuert
Gewicht	80 kg

Umrichter

Der Umrichter mit der Typenbezeichnung TA-GTR-DCW 1270 ist ein Transistor-Spannungszwischenkreis-Frequenzumrichter. In dem Umrichter integriert ist ein 12 V DC/DC-Wandler für die Bordnetzversorgung.

Technische Daten

Eingangsspannung	150 V - 300 V
Ausgangsstrom	max. 165 A
Frequenz	10-180 Hz
Schaltfrequenz	1kHz
Kühlung	Luft, temperaturgesteuert

DC/DC-Wandler

Ausgangsspannung	13,8 V
Leistung max.	840 W
Ausgangsstrom	70 A
Gewicht Umrichter mit DC/DC-Wandler	60 kg

Das Antriebssystem ist für elektrische Energierückspeisung ausgelegt.

3.2.2.3 Synchron-Antriebssystem

Speziell für den Einsatz in Straßenfahrzeugen wurde der Synchronantrieb in Tandemausführung mit integriertem einstufigen Getriebe entwickelt. Der MED-Motor (Multiple Elektronik Dauermagnetmotor) in Verbindung mit der Stromsteuerung zeichnet sich besonders durch extrem günstiges Leistungsgewicht und Maßhaltigkeit sowie guten Wirkungsgrad aus. Nachteilig sind die derzeitig noch hohen Kosten.

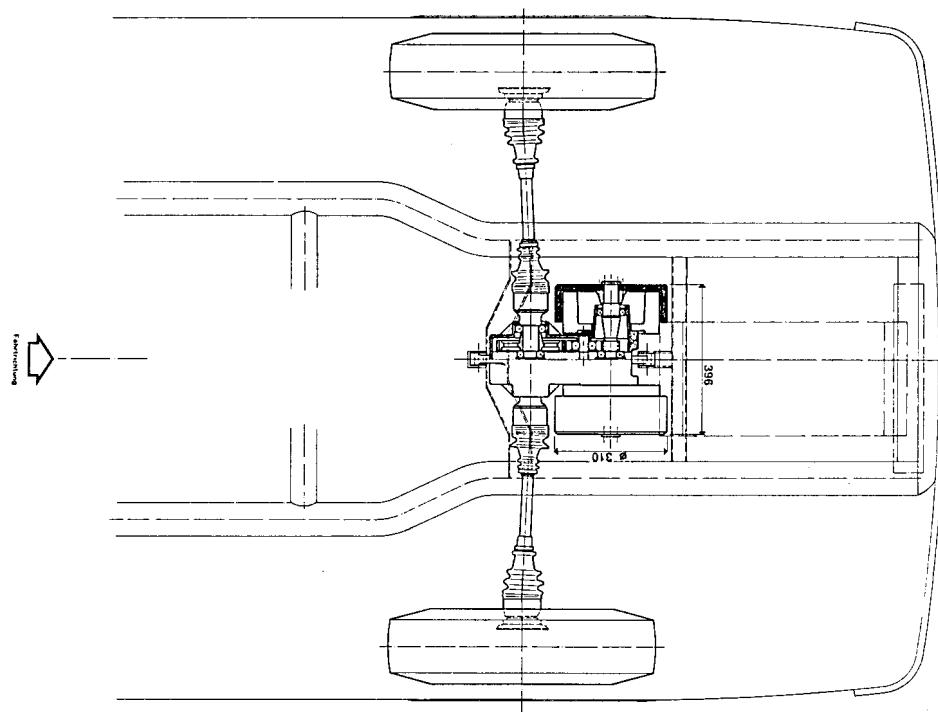


Bild 3: Synchron-Einzelradantrieb

Fahrmotor

Bei dem im MB 100 E verwendeten Synchronantrieb wird durch zwei unabhängig voneinander arbeitende Motoren mit Getriebe über die Gelenkwelle je ein Rad der Vorderachse angetrieben. Durch das Konstruktionsprinzip mit den am Außenläufer angebrachten Permanentmagneten, der den vielphasigen Stator umgreift sowie die Wahl der Werkstoffe Stahl, Alu, GFK, ergibt sich ein in Gewicht und Volumen günstiger Motoraufbau.

Als Magnetwerkstoff wird bei dem Motor des Typs M 32/4 Eisen, Neodymium-Bor verwendet.

Technische Daten

Spannungsbereich	Zweimotorenantrieb bis 400 V
Dauerleistung	2 x 20 kW
Motormoment	2 x 300 Nm
Nenndrehzahl	bis 3 700/min
Übersetzungsgetriebe	i=5
Kühlung	Flüssigkeitskühlung
Gewicht Motor u. Getriebe	2 x 27kg

Leistungselektronik

Die Ansteuerung des Motors erfolgt mit der Mutiplen Stromsteuerung MSS. Der Vier-Quadranten-Steller mit der Typenbezeichnung LMA S5/02.11 beinhaltet neben dem Stromrichter noch den DC/DC-Wandler zur Versorgung der Bordnetzbatterie sowie ein leistungsstarkes Ladegerät

Technische Daten:

DC/DC-Wandler

Ausgangsspannung	14,1 V
max. Leistung	1400 W

Ladegerät

Netzspannung	400 V
Ladestrom	20 A
Kühlung Gesamtsystem	Flüssigkeitskühlung
Gewicht Gesamtsystem	50 kg

3.2.3 Übersicht technische Daten

Die eingesetzten Elektrotransporter haben in den Ausführungen als Kasten- und Pritschenwagen entsprechend dem Basisfahrzeug MB 100 folgende technische Daten:

Ausführung	Pritschenwagen		Kastenwagen
Anzahl	6		4
Radstand	2675 mm	2675mm	
Länge/Breite/Höhe	5130/2000/2780mm	5065/1845/2385mm	
Ladevolumen	11,7 m ³	8,65 m ³	
Ladefläche	6,11 m ²	4,85 m ²	
Radhalbmesser	0,336 m	0,336 m	
Getriebe			
Anzahl der Gänge	4	-	4
Übersetzung	i=24/13,6/8.8/6,5	i=5	i=24/13,6/8,8/6,5
Bauart	Schaltgetriebe	stufenlos	Schaltgetriebe
Antrieb			
Motortyp	Gleichstrom/ Nebenschlußmotor	Synchronmotor	Asynchronmotor
Hersteller	5 ABB	1 Magnet-Motor	4 ELIN
Dauerleistung	30 kW	2x20 kW	22 kW
Spitzenleistung	40 kW	2x20 kW	30 kW
Nenndrehmoment	70 Nm	-	130 Nm
max. Drehmoment	110 Nm	2 x 300Nm	147 Nm
Energiespeicher			
Batterietyp	Na/NiCl ₂	Ni/Cd	Na/NiCl ₂
Hersteller	3 AAB AG	2 DAHO	1 AAB AG
Spannung	230V	240V	284V
Nennenergie (2h)	34kWh	24,4 kWh	34kWh
Nennkapazität	150 Ah	100 Ah	120 Ah
Zellenzahl	440	200	440
Gewicht	450 kg	650 kg	450 kg
Anordnung im Fahrzeug	unterflur	unterflur	unterflur
Fahrzeugdaten			
Zul. Gesamtgewicht	3500 kg	3500 kg	3500 kg
Vorderachslast	1950 kg	1950 kg	1950 kg
Hinterachslast	1950 kg	1950 kg	1950 kg
Zuladung	1180 kg	1035 kg	1180 kg
Leergewicht	2320 kg	2465 kg	2320 kg
Sitzplätze	2	2	2
Fahrleistungsdaten			
Höchstgeschwindigkeit	70 kmh	70 kmh	70 kmh
Beschleunigung von 0-50km/h	17 sec	15 sec	17 sec

Die Fahrleistungsdaten wurden bei der TÜV-Abnahme durch den zuständigen Technischen Überwachungsverein Südwest in Stuttgart ebenso bestätigt, wie die günstigen Geräuschemissionen.

3.2.4 Auslieferung der Fahrzeuge

Obwohl der Fertigungsablauf bei den ersten Fahrzeugen durch verzögerte Beistellung der elektrischen Komponenten, insbesondere bei den Batterien sowie Fertigungsprobleme, nicht dem vorgegebenen Zeitplan entsprach, konnten für den Projektstart am 02.10.92 zwei MB 100 E-Pritschenwagen funktionstüchtig in Rügen vorgestellt werden. Wegen noch fehlender einsatzspezifischer Details und Zulassung durch den TÜV-Südwest erfolgte die Übergabe an die Betreiber erst Ende Februar 1993.

Da die Na/NiCl₂- und Ni/Cd-Batterien für die ersten 3 Fahrzeuge erst Ende Dezember 1992 zur Verfügung standen, wurden Fahrversuche zunächst mit Blei-Batterien durchgeführt.

Weitere Lieferverzögerungen ergaben sich durch Umstellung der zur Anwendung kommenden Batteriesysteme. Von dem Entscheid der ABB AG die Na/S-Batterie bei den Elektro-Pkw und Elektro-Transportern nicht zum Einsatz kommen zu lassen, waren auch 2 MB 100 E betroffen, so daß sich die Anzahl der MB 100 E mit Na/NiCl₂-Batterien von ursprünglich 6 Fahrzeugen auf 8 erhöhte. Entsprechend dem erhöhten Lieferumfang der AAB AG war ein Lieferverzug unvermeidbar.

Ein größerer Zeitaufwand ergab sich bei der Montage des Fahrzeugs Nr. 22 durch die nachträglich beschlossene Anwendung des MM-Synchronmotors, da Zusatzarbeiten für den Einbau des Zweimotorenantriebs mit Tandemgetriebe notwendig waren.

Auch die bei der Fa. ELIN in Auftrag gegebenen Asynchron-Antriebssysteme trugen zur Veränderung des Lieferplans bei.

Einen genauen Überblick über die Auslieferung der Elektrotransporter zeigt Bild 4.

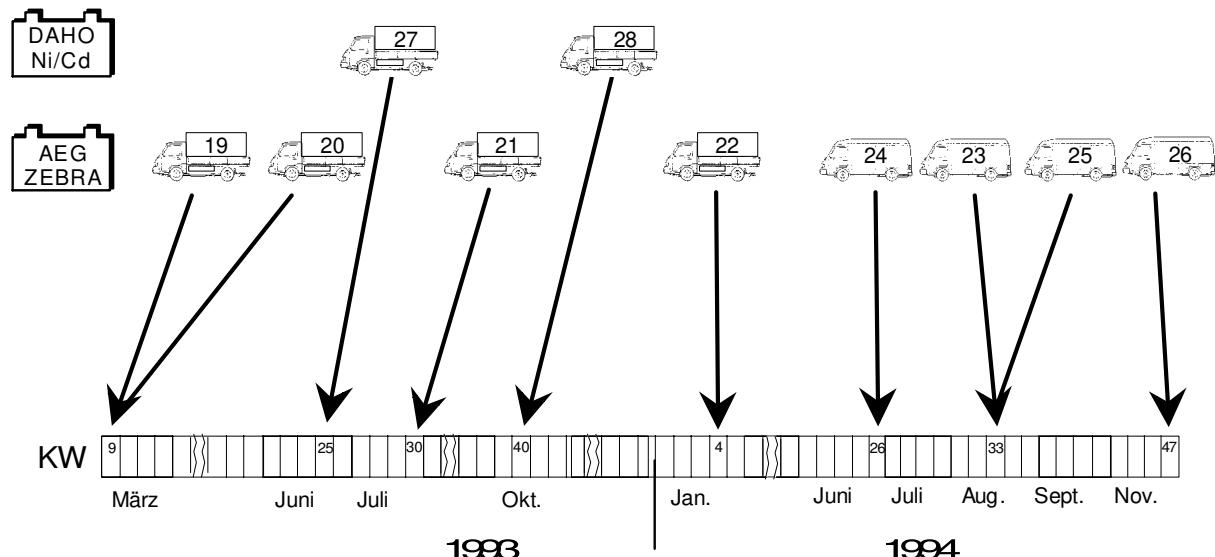


Bild 4: Auslieferung der Elektrotransporter



Bild 5: MB 100 E Pritschenwagen



Bild 6: MB 100 E Kastenwagen

3.2.5 Einsatzbereiche, Nutzerverhalten

Einsatzbereiche

Die 10 Elektrotransporter kamen in sehr unterschiedlichen Arbeitsbereichen zur Anwendung. Nach vorbereitenden Sondierungsgesprächen mit möglichen Fahrzeugbetreibern über Aufgabenstellung und Fahrleistungsanforderungen ergaben sich zu Projektbeginn folgende Einsatzbereiche:

- Postverteilerdienst
- Stückgutverteilung
- Kommunalverwaltung
- Kurverwaltung
- Dienstleistung
- Entsorgung

Während der Projektlaufzeit ergab sich in einigen Fällen leider die Notwendigkeit, den Fahrzeugbetreiber zu wechseln, sei es durch mangelnden pfleglichen Umgang mit den Fahrzeugen oder durch zu geringe Leistungsanforderungen entsprechend der Aufgabenstellung, so daß die Bereiche Warenverteilung und Getränkevertrieb hinzukamen.

Nutzerverhalten

Die Einsatzsituation auf der Insel Rügen und besonderes auf Hiddensee führten durch die Besonderheiten der Straßen mit Kopfsteinpflaster, Plattenwegen und Sandwegen in den Dünenbereichen zu starken Beanspruchungen. Diesen nicht beeinflussbaren Gegebenheiten für die Elektrofahrzeuge wurde von einzelnen Betreibern nicht in dem gebotenen Maße Rechnung getragen, so daß mangelnde Pflege zu Beanstandungen führte. In den weitaus häufigsten Fällen jedoch bemühten sich die Nutzer um die Werterhaltung der kostenneutral überlassenen Fahrzeuge.

Entsprechend den Einsatzbereichen wurden mit 15 km bis 70 km sehr unterschiedliche Tagesfahrstrecken zurückgelegt. Obwohl auch die geringen Tagesfahrstrecken realistisch anstehenden Transportaufgaben entsprachen, wurde doch durch die Umstellung der Transportabläufe, wie z.B. beim Postverteilerdienst oder die Auswahl neuer Fahrzeugnutzer, die Tagesfahrstrecke erhöht.

Diese Maßnahmen erschienen notwendig, um insbesondere bei den Hochtemperaturbatterien den spezifischen Energieverbrauch nicht über Gebühr ansteigen zu lassen. Die 10 MB 100 E hatten bei den unterschiedlichen Einsatzbedingungen bis Ende der Einsatzzeit 30.06.96 zwischen ca. 7 000 km und 27 700 km zurückgelegt bei einer Gesamtfahrstrecke von über 130 000 km.

Da alle Fahrzeuge mit Bordladegeräten ausgerüstet waren, die über eine 400V/ 16A CEN-Steckverbindung aus dem Versorgungsnetz gespeist wurden, bevorzugten die Fahrzeugbetreiber die Batterieladung über Nacht am Fahrzeugstandort. Öffentliche Stromtankstellen, die in Binz, Bergen und Stralsund installiert waren, wurden von den Betreibern der MB 100 E praktisch nicht in Anspruch genommen.

Ein MB 100 E war für den Anschluß an die Schnelladestationen vorbereitet, im Bedarfsfall wurde die Station am Servicestandort in Zirkow genutzt.

3.2.6 Serviceaufgaben

Für die anstehende elektrospezifische Fahrzeugbetreuung wurde in Zirkow eine Servicestation eingerichtet. Zur Durchführung von Wartungsarbeiten und Störungsbehebung sowie die Abwicklung von Messaufgaben stand Fachpersonal der DAUG zur Verfügung.

Neben den Betreuungsaufgaben konnten in Zirkow auch Schnellladungen der Traktionsbatterie durchgeführt werden. Um im Störungsfall die Standzeiten der Fahrzeuge so gering wie möglich zu halten, bestand die Möglichkeit, von den unterschiedlichen Antriebssystemen die wichtigsten elektrischen Komponenten in Zirkow zu bevorraten.

Die fahrzeugtechnische Betreuung erfolgte durch die Mercedes-Benz Vertretung Autohaus Klemaschewski in Zirkow. Bei umfangreichen mechanischen und elektrospezifischen Servicearbeiten oder notwendigen Änderungen und Nachrüstarbeiten wurde Unterstützung vom Stammhaus geleistet. Dieser umfangreiche Serviceeinsatz war im Verlauf des Projekts viermal erforderlich.

3.2.7 Betriebserfahrungen, technische Modifikationen, Nachrüstarbeiten

Bereits in einem frühen Stadium konnte im Informationsaustausch mit den Betreibern festgestellt werden, daß die anstehenden Transportaufgaben bezogen auf Geschwindigkeit, Ladevolumen, Tragkraft und Reichweite mit den Elektrofahrzeugen gleichwertig wie mit Serienfahrzeugen ausgeführt werden können.

Die nach theoretischer Auslegung und durch Versuchsfahrten belegten Reichweiten wurden insbesondere bei den auf Hiddensee eingesetzten Fahrzeugen nicht erreicht. Die Reichweiteneinbuße von ca. 10% liegt in dem vorherrschenden Rollwiderstand auf Pflasterstraßen und Sandwegen begründet ebenso durch erhöhten Luftwiderstand. Bei verschiedenen Fahrzeugbetreibern wurde die realisierbare Tagesreichweite nur zu einem Bruchteil genutzt, da keine größeren Anforderungen bestanden.

Ein Datenerfassungsgerät und Drehstrom-Wh-Zähler zur Ermittlung des Energieverbrauchs mußte entsprechend der Lieferfolge bei den ersten Fahrzeugen auf Rügen nachgerüstet werden.

Einige Anwender sahen eine Ausweitung der Einsatzmöglichkeit der Elektrotransporter durch den Einbau einer Anhängekupplung, so daß alle Fahrzeuge entsprechend ausgestattet wurden. Teilweise erfolgte die Nachrüstung der Fahrzeuge auf Rügen.

In Verbindung mit der Erprobung der Schnelladetechnik erfolgte bei einem MB 100 E der nachträgliche Einbau einer leistungsstarken Spezialsteckverbindung, so daß für dieses Fahrzeug mit Ni/Cd-Batterie an den Schnelladestationen in Zirkow oder Rügen mit einer Ladeleistung von 30 kW bzw. 60 kW Batterieladungen ermöglicht wurden.

Modifikation

Besonders bei den 5 auf Hiddensee eingesetzten MB 100 E zeigten sich bereits frühzeitig starke Sandablagerungen im Bereich der Batterien, obwohl konstruktiv bereits die Batterieeinbauräume entsprechend dicht ausgeführt waren. Über die zur Batteriekühlung notwendigen Ventilatoren wurde der Sand angesogen und im Batterieraum abgelagert.

Sowohl bei den Fahrzeugen mit Ni/Cd-Batterien als auch den ZEBRA-Batterien war eine Verbesserung der Luftansaugfilter notwendig. Bei den ZEBRA-Batterien wurde darüber hinaus der Batterieeinbauraum vollkommen überarbeitet, um das Eindringen von Sand zu verhindern. Die bereits ausgelieferten MB 100 E Pritschenwagen mit ZEBRA-Batterien mußten von Rügen abgezogen und die Änderungsarbeiten beim Hersteller durchgeführt werden.

Zur Komplettierung der Maßnahmen für die Datenerfassung und deren Funktion waren an den Fahrzeugen mit ZEBRA-Batterien Nachrüstarbeiten zur Erkennung der Batteriebeheizung und Batterieladeende erforderlich.

Ebenso war aus gegebenem Anlaß die Installation einer Warnsignalanzeige notwendig, um evtl. auftretende akute Batteriestörungen zu signalisieren.

3.2.8 Zuverlässigkeit der Komponenten

Besonders mit Beginn des Fahrzeugeinsatzes im Winter 1993 war die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge zu beanstanden. Eine noch nicht ausreichende Ersatzteilbevorratung und der personelle Aufbau der Servicestation führten somit zwangsläufig auch zu Standzeiten der Fahrzeuge.

Als erste Maßnahme zur Erhöhung der Betriebssicherheit wurden vor Fahrzeugauslieferung intensivere Testfahrten durchgeführt, die aus Termingründen bei den ersten Fahrzeugen nicht im ausreichenden Maße möglich waren. Auch verstärkt durchgeführte vorbeugende Serviceleistungen trugen ebenso zur Verbesserung der Einsatzzeiten bei, wie die voraus erwähnten Nachrüstarbeiten und Modifikationen.

Mit im Mittel 1,3 Störungen je Fahrzeug und Quartal blieb die Schadenshäufigkeit über die gesamte Einsatzzeit zu hoch, wenn auch über einen längeren Zeitraum mit 0,6 Störungen je Fahrzeug ein durchaus gutes Ergebnis erreicht wurde. Neben der noch nicht ausreichenden Zuverlässigkeit einzelner Komponenten trug zu dem Ergebnis auch der besonders harte Einsatz auf Hiddensee bei.

Eine Aufteilung der Schadensfälle auf die einzelnen Teilbereiche der Elektrotransporter ist aus Bild 7 ersichtlich.

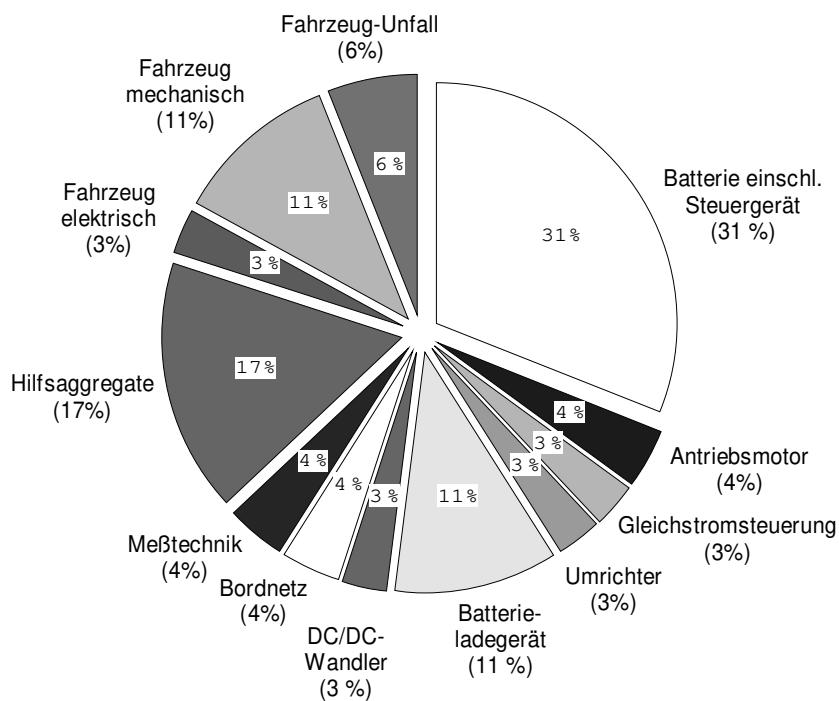


Bild 7: Aufteilung der Störungen

Kommentierung der Schadensfälle

Batterieschäden

Bei den beiden MB 100 E mit Nickel/Cadmium-Batterien traten einige Batteriestörungen auf, die zum Zellenaustausch führten bzw. eine Überarbeitung des Batteriemanagements notwendig machten. Gegen Ende des Projekts machten sich Reichweiteneinbußen bemerkbar.

Bei den 8 MB 100 E mit jeweils 2 ZEBRA-Batterien waren besonders in der Anfangsphase des Projekts Batterieausfälle zu beklagen. So erfolgte in den zuerst ausgelieferten Fahrzeugen bereits die 3. bzw. 2. Batteriebestückung. Schadensursache waren besonders Zellenausfälle und Vakuumverlust. Seit Mitte 94 sind keine direkten Batterieschäden mehr aufgetreten. Die weitaus häufigsten Ausfälle im Batteriebereich waren auf Störungen im Batteriesteuерgerät zurückzuführen. Mehrfache Weiterentwicklungen waren zur Verbesserung der Betriebssicherheit notwendig. Da wegen Lieferengpässe der AAB AG keine Bevorratung der Z 5 -Batterie erfolgte, waren im Störungsfall lange Standzeiten der Fahrzeuge die Folge.

Antriebssystem

Besonders häufige Schäden traten am Motor und Motorcontroller des Gleichstrom/Nebenschlußantriebs auf. Bei den Motorausfällen zeigten sich eindeutig Fertigungsmängel der Ankerwicklung im Bereich des Wickelkopfträgers. Bei den jeweiligen Reparaturen wurden Änderungsmaßnahmen durchgeführt.

Bei dem Asynchron-Antriebssystem traten bei einem der 4 MB 100 E im Umrichter Aussetzer auf, deren Ursache trotz umfangreicher Untersuchungen durch den Hersteller vor Ort nicht herausgefunden wurde. Auch bei weiteren auf Rügen eingesetzten Fahrzeugen war bei dem gleichen Antriebssystem dieser Schaden zu beklagen.

Das beste Ergebnis wurde mit dem MM-Synchron-Antriebssystem erzielt, außer einem unfallbedingten Schaden traten keine Störungen auf.

Ladegerät

Die Fahrzeuge sind sämtlich mit 400 V/16 A Bordladegeräten ausgestattet. Bei der Erstausführung Typ L 12 traten häufige Ausfälle auf. Auch Systemstörungen bei der Erkennung des Ladeendes waren zu beanstanden. Der Nachfolgetyp L 20 war zwar leistungsfähiger, aber auch nicht ganz frei von Störungen.

DC/DC-Wandler und Bordnetzversorgung

Die DC/DC-Wandler zur 12 V-Bordnetzversorgung mußten in einigen wenigen Fällen wegen Ausfall elektronischer Elemente getauscht werden, Störungen im Bordnetz waren vielfach mit den Schäden am DC/DC-Wandler in Verbindung zu bringen.

Meßtechnik

Bei der Meßtechnik führten die Drehstrom Wh-Zähler zu einigen Störungen. Als Ausfallursache kann zeitweilige Überlastung angenommen werden.

Hilfsaggregate

Die Hilfsaggregate, wie Zusatzheizung, elektrische Lenkunterstützung und elektrische Bremsunterstützung trugen mit einer hohen Ausfallrate zu den Störungen bei. Bei den Zusatzheizungen führte besonders Sandeinwirkung zu einer Lebensdauerreduzierung. Auch die elektrischen Unterdruckpumpen zeigten einen zu starken Verschleiß.

Fahrzeugschäden

Mechanische Schäden waren an der Statistik im unerwarteten Umfang beteiligt, wobei auffallend viele Reifenschäden zu verzeichnen waren. Darüber hinaus traten kleinere Karosserieschäden durch Einsatz im schwierigen Gelände oder Unachtsamkeit bei der Fahrzeughandhabung auf.

Gegen Ende des Großversuchs zeigten sich bei einigen auf Hiddensee eingesetzten Fahrzeuge Schäden an der Kupplungsbetätigung. Übermäßiger Kupplungsverschleiß war nicht festzustellen.

Störungen an der Fahrzeugelektrik sind nicht übermäßig aufgetreten.

Zu hoch erscheinen uns die unfallbedingten Schäden, sei es in Verbindung mit anderen Verkehrsteilnehmern oder durch Wildschäden. Der größte Sachschaden und die größte Ausfallzeit entstand durch einen Wildschaden.

3.2.9 Ergebnisse - Verbesserung und Weiterentwicklung

Unter Berücksichtigung der Einsatzdauer der einzelnen Fahrzeuge und der unterschiedlichen Aufgabenstellung mit den mehr oder weniger großen Fahrleistungsanforderungen erreichten die MB 100 E bis zum 30.06.96 die in Bild 8 aufgezeigte Fahrstrecke.

Fahrzeug-Nr.	1993												1994												1995												1996											
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6														
19																																																
	Gemeindeverwaltung												17 600 km																																			
20																																																
	Stückgutabfertigung												26 300 km																																			
21																																																
	Gemeindeverwaltung												19 400 km																																			
22																																																
	Entsorgung												7 000 km																																			
23																																																
	Postverteilerdienst												6 600 km																																			
24																																																
	Postverteilerdienst												18 400 km																																			
25																																																
	Postverteilerdienst												14 300 km																																			
26																																																
	Warenauslieferung												6 300 km																																			
27																																																
	Dienstleistung												10 800 km																																			
28																																																
	Kurverwaltung												9 400 km																																			

Bild 8: Einsatzzeit und Gesamtstrecke.

Fahrzeugstandzeiten verhinderten ein besseres Ergebnis der Fahrleistungen, wozu besonders langwierige Batterieausfälle und Störungen am Antriebssystem beitrugen. Entsprechend der Schadensstatistik und der damit verbundenen Ausfalltage, unter Berücksichtigung der Batterie- und Fahrzeuginspektionen, ergaben sich für die 10 MB 100 E über die mögliche Einsatzzeit ca. 32 % Ausfalltage.

Selbst unter dem Gesichtspunkt, daß die häufigsten Standzeiten in der Anfangsphase des Projekts durch Maßnahmen zum äußeren Schutz der Batteriesysteme und lange Wartezeiten für die Ersatzbeschaffung von Batterien und Antriebsmotoren entstanden sind, muß das Hauptziel der weiteren Entwicklungsarbeiten die Minimierung der Ausfallzeiten sein.

Batteriesysteme

Im Verlauf des Rügenprojekts wurden bei den ZEBRA-Batterien sowohl in der Zellenstruktur als auch im Gesamtaufbau wesentliche Entwicklungen durchgeführt, die zu besseren Standzeiten führten. Besonders notwendig waren diese Arbeiten beim Batteriesteuengerät. Insgesamt konnten in der zweiten Hälfte des Versuchsablaufs gute Standzeiten erzielt werden. Für künftige Anwendungen dürfte eine gute Verfügbarkeit sichergestellt sein.

Die Nickel/Cadmium-Batterie mußte zur besseren Betriebssicherheit im Batteriemanagement überarbeitet werden. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Lebensdauer wird eine Systemverbesserung notwendig sein.

Antriebssystem

Beim Gleichstrom-Nebenschlußantrieb ist auf eine technisch gute Entwicklung und qualitativ anspruchsvolle Ausführung zu achten. Insgesamt hat das Gleichstrom-Nebenschlußsystem keine Vorteile mehr gegenüber dem Drehstromsystem.

Das Angebot bei Asynchron-Antriebssystemen ist inzwischen vielfältig. Bei Beginn des Projekts war für die notwendige Antriebsleistung keine Auswahl vorhanden. Die bei dem eingebauten System aufgetretenen Störungen sind nicht systematisch für Asynchron-Antriebssysteme.

Die besten Einsatzergebnisse in Betriebssicherheit und elektrischen Verbrauchswerten sowie die Auswirkungen auf die Fahrzeughandhabung wurden mit dem Synchron-Antriebssystem erreicht. Eine Optimierung des Umrichtervolumens sowie der Herstellkosten muß das Entwicklungsziel sein.

Ladegerät

Auch die Nachfolgeentwicklungen der auf Rügen eingesetzten Bordladegeräte entsprechen noch nicht im vollen Umfang den notwendigen Qualitätsansprüchen. Bei einem nicht ausreichend vorhandenem Angebot ist bei leistungsstarken Bordladegeräten für Nutzfahrzeuge noch Entwicklungsarbeit zu leisten.

DC/DC-Wandler

Prinzipiell sollte die Bereitstellung von betriebssicheren DC/DC-Wandlern auch für höhere Eingangsspannungen kein Problem darstellen. Heutiger Nachteil ist, daß wegen zu geringer Stückzahlanforderungen keine ausreichenden Entwicklungen betrieben werden.

Hilfsaggregate

Die für Elektrofahrzeuge erforderlichen Servoaggregate haben noch nicht den bei Serienfahrzeugen selbstverständlichen Leistungsstand. Baulich optimierte und elektrisch wie pneumatisch und hydraulisch leistungsfähige Hilfsaggregate tragen zur gesteigerten Leistungsfähigkeit der Elektrofahrzeuge bei, ebenso die den Bedürfnissen von Elektrofahrzeugen angepaßte Zusatzheizung.

Fahrzeugaufbau

In Einzelfertigung dargestellte Elektrofahrzeuge können nur mit besonderem Aufwand an den Qualitätsstandard von Serienfahrzeugen heranreichen, so daß auch Fahrzeugschäden bei dem Großversuch, insbesondere unter den vorherrschenden Einsatzbedingungen nicht auszuschließen waren. Bei künftigen Fahrzeugentwicklungen sollte weitgehend die mögliche Integration von Elektro-komponenten bereits im Entwicklungsstadium Berücksichtigung finden.

3.2.10 Meßtechnik, Datenerfassung

Wesentlicher Bestandteil des Großversuchs mit Elektrofahrzeugen war auch die Erfassung der Daten über den betrieblichen Einsatz, um Hinweise über die zurückgelegten Fahrstrecken, Standzeiten, Energieverbrauch und die Ladepraxis der Betreiber zu erhalten.

Neben den allgemeinen Erkenntnissen über das Verhalten von Fahrer und Fahrzeug als Hinweise für die weitere Entwicklungsarbeit diente das Ergebnis des Energieverbrauchs, besonders bei Erstellung der Energie- und Ökobilanz als Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren.

Als Meß- und Datenerfassungsgeräte dienten in jedem Fahrzeug ein WSE Drehstrom-Wh-Zähler sowie ein Meßwerterfassungsgerät TDS 100.

Nach der Konzeption der Meßdatenerfassung wurden neben dem Gesamt-Netzenergieverbrauch die Energieverbrauchswerte der Hauptkomponenten

- Ladegerät
- Energiespeicher
- Bordnetz
- Antrieb

ermittelt.

Bei dem Gesamt-Netzenergieverbrauch ergaben sich für die MB 100 E Verbrauchswerte zwischen 251 Wh/tkm und 715 Wh/tkm. Diese große Diskrepanz ist naturgemäß in den sehr unterschiedlichen Fahrstrecken je Tag und den Standzeiten begründet. So beinhaltet der Netzenergieverbrauch von 715 Wh/tkm einen Batterieverlust einschließlich Heizung von 559 Wh/tkm bei ZEBRA-Batterien.

Nur auf den Antrieb bezogen beträgt der Energieanteil bei Bremsenergierückspeisung zwischen 100 Wh/tkm und 156 Wh/tkm, wobei die 100 Wh/tkm bei dem Fahrzeug mit dem Synchronantrieb erreicht wurden. Der Rekuperationswirkungsgrad beträgt hierbei $\eta = 11,4\%$.

Es zeigt sich, daß insbesondere bei der Hochtemperaturbatterie das Einsatzverhalten den Energieverbrauch stark beeinflußt. Bei der Ni/Cd-Batterie führte die notwendige Batteriebelüftung zu einem ebenso nicht zu vernachlässigenden E igenverbrauch der Batterie.

3.2.11 Versuchsbewertung, Was brachte Rügen

Das Rügenprojekt mit dem Einsatz von insgesamt 60 Elektrofahrzeugen führte zu einer positiven Öffentlichkeitswirkung mit verstärkter Diskussion zum Thema - „Einsatz von Elektrofahrzeugen“. Vergleiche zu ähnlichen Projekten im Ausland werden angestellt.

Die energetische Bewertung des Rügenprojekts mit Berücksichtigung des Energieverbrauchs und Energie- und Materialbereitstellung für die Energiespeicher über den gesamten Lebensweg soll erstmals zu einer praxisbezogenen umfassenden Ökobilanz führen.

Es kam zu einer positiven Zusammenarbeit der mit den Elektrofahrzeugen befaßten Fahrzeug- und Batterieherstellern mit fruchtbarem Gedankenaustausch zur Lösung der immer noch anstehenden Probleme.

Nach einer Bewertung der Einsatzergebnisse der 10 MB 100 E konnten die anstehenden sehr unterschiedlichen Aufgaben in Fahrleistung, Tagesreichweite und Transportleistung gleichwertig zu Serienfahrzeugen erfüllt werden.

Die mit den neuen Batteriesystemen besonders der ZEBRA-Batterie realisierbaren Tagesfahrstrecken reichen für die weitaus häufigsten Anforderungen an innerstädtische Transportaufgaben aus. Kurze Tagesfahrstrecken, wie sie auf Rügen vielfach anstanden, führten zu einem hohen spezifischen Energieverbrauch. Für derartige Einsätze eignen sich eher Batteriesysteme, die bei normalen Temperaturbereichen arbeiten.

Die Betriebssicherheit von allen elektrospezifischen Komponenten muß erhöht werden, damit neben den hohen Kosten für die Fahrzeugumrüstung nicht auch noch hoher Serviceaufwand zu einer zusätzlichen Belastung des Elektrofahrzeugs führt.

Ein Teil dieser durch das Rügenprojekt gewonnenen Erfahrungen konnten im neu entwickelten Sprinter 308 E und im Vito 108 E bereits verwirklicht werden.



Bild 9: Elektrotransporter 308 E Sprinter



Bild 10: Elektrotransporter 108 E Vito

4. NEOPLAN

4.1 Fahrzeugaufbau des NEOPLAN N 8008 E

Der Aufbau des NEOPLAN Metroliner N 8008 erfüllt zukünftige Anforderungen des "Verband deutscher Verkehrsbetriebe" an künftige Nahverkehrsbusse:

Leicht, sicher, fahrgastfreundlich, attraktiv, wirtschaftlich und umweltfreundlich.



Bild 1: Einer von insgesamt 3 NEOPLAN N 8008 E Bussen mit ABB Hochenergiebatterien Na/S zum Einsatz auf der Insel Rügen

4.1.1 Ausgangspunkt

Für unser Elektrobuskonzept haben wir als Ausgangsbasis den NEOPLAN N 8008 METROLINER Midibus ausgewählt.

Dieser 8-m lange Niederflurbus mit seiner Ultra-Leichtkarosserie ist die ideale Basis für elektrische Busse. Es ist der erste Faserverbundstoff-Bus mit ca. 30 %-iger Gewichtserspartnis. Damit erreichen wir ein günstiges Verhältnis Eigengewicht zu Nutzlastverhältnis trotz des zusätzlichen Batteriegewichts von ca. 600 kg.

„Autofrei“ - ist nicht nur in Innenstädten, historischen Stadtteilen, sondern auch in Kurorten der neue Trend. „Wir wollen bessere Luft, weniger Lärm und Verkehr!“

Um dort die erforderliche Mobilität aufrecht zu erhalten, bedarf es der leisen und abgasfreien Elektrobusse. In der Regel sind Midibusse mit einem Fassungsvolumen von 40 bis 45 Personen hierfür ausreichend. Beim Niederflurbus ersetzt schon an der Tür ein bequemer Schritt das lästige Stufensteigen. Deshalb besonders ideal für Mütter mit Kinderwagen, Rollstuhlfahrer und ältere Menschen. Die Ein-/Ausgänge lassen sich an den Haltestellen zusätzlich absenken. Sein freundlicher Eindruck setzt sich auch bei der Gestaltung des Innenraumes fort. Freundliche Farben, pflegeleichte Materialien, atmungsaktive Sitze, getönte Sonnenschutzverglasung, viel Freiraum und ein gutes Belüftungssystem zeichnen das Erscheinungsbild aus. So verfügt dieser „Großraum-PKW“

über Einzelradaufhängungen an allen vier Rädern, Luftfederung und vier pneumatische Scheibenbremsen.

Prinzipielle Untersuchungen zum Einbau elektrischer Komponenten für den Betrieb von Hochleistungsbatterien fanden im Vorfeld des Versuchs „Rügen e-mobil“ statt. Neben vielen Überlegungen zur Sicherheit galt unser besonderes Augenmerk der besonderen Nutzbarkeit des Busses und der Akzeptanz im öffentlichen Personennahverkehr.

4.1.2 Sicherheitsmerkmale

Obwohl die verwendete Karosserie gegenüber Stahlbussen um ein Drittel leichter ist, ist sie besonders crash-stabil. Unter Aufsicht des TÜV wurden mit Vorserienfahrzeugen Überschlagtests, Front-, Seitenwand- und Heckaufprallversuche, sowie Rütteltests auf einem Hydropulser-Prüfstand durchgeführt. Die Feuerprobe bescheinigte der Karosserie: „Schwer brennbar entsprechend der DIN-Norm 53438.“

Die Grundkonstruktion sieht vor, die Batterien oberhalb der elektrischen Antriebseinheit analog dem Dieselmotor einzubauen. Der Einbauraum ist durch die Heckklappe, die sich über die gesamte Fahrzeugsbreite erstreckt, ausreichend gegen Auffahrunfälle gesichert. Der Faserverbundaufbau zwischen Heckbereich und Innenraum sichert Insassen gegen Aufprall und Auswirkungen bei Batteriezerstörung. Trotzdem wurde als weitere Vorsorge jeder Bus mit einem Brandmelder im Batteriebereich ausgestattet. Im Notfall wird die örtliche Feuerwehr über ein mitgeführtes Mobiltelefon automatisch informiert.



Bild 2: Überschlagtest des MiC nach Bild 3: Tests zum Schutz der Insassen europäischen Normen



Bild 4: Crashtests mit NEOPLAN Metroliner

4.1.3 Auswahl des Batteriesystems

Im öffentlichen Personennahverkehr ist die Einsatzbereitschaft eines Fahrzeugs durch den Fahrplantakt vorgegeben. Für Elektrobusversionen standen zunächst Blei- und NiCd-Batterien zur Auswahl. Aufgrund der höheren Energiedichte (3 bis 4-fach gegenüber Blei-Säure-Batterien) und dem geringeren Gewicht (ca. 560 kg), fiel die Entscheidung jedoch zugunsten der ABB-Hochenergiebatterien Natrium/Schwefel (Na/S). Für die angestrebten Fahrleistungen war ein Na/S Batteriesatz mit drei Batterien des Typs B 17 K notwendig. Jeder der drei Batterieblöcke enthält 240 A08-Zellen mit einer Standardspannung von je 48 V.

Die Batterien werden über drei Bordladegeräte mit 380 V-Netzanschluß in ca. 7 Stunden voll geladen. Zusätzlich erhielten die Fahrzeuge einen 380 V-Anschluß für die Verwendung eines externen Schnellladegerätes. Zusammen mit den on board-Ladegeräten erreichte man eine Gesamtladeleistung von ca. 20 kW. Das entspricht etwa einer dreistündigen Ladezeit.

Die Batterien sind mit einer Kühlbox mit integriertem Öl/Luft Wärmetauscher ausgestattet. Das Batteriemanagement BM 1-3 soll Laden und Entladen regelnd überwachen, die Batterie vor gefährlichen Zuständen wie Tiefentladung oder Überladung schützen und zudem Heizung und Kühlung steuern. Das BM-Netzteil ist auf die Grundspannung von 144 V ausgelegt.

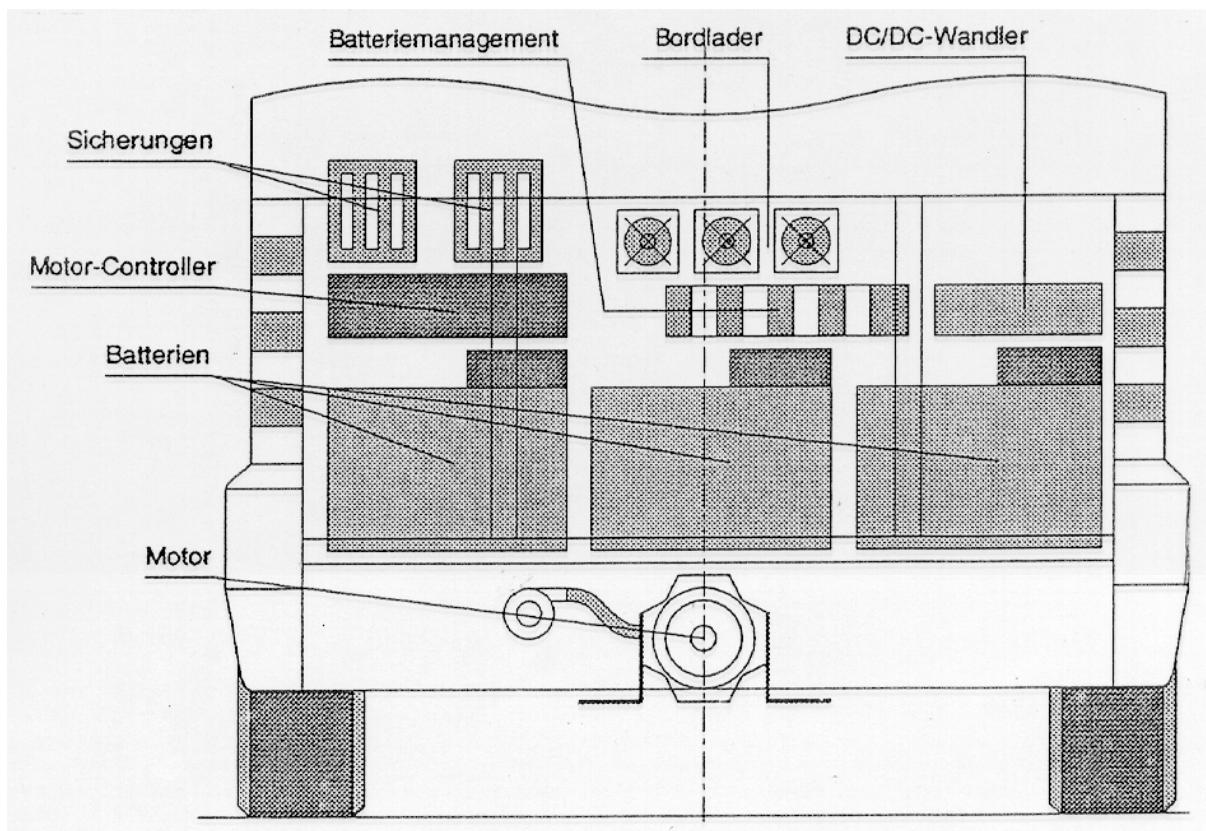


Bild 5: Anordnung wichtiger Elektrobus-Komponenten

4.1.4 Elektrofahrzeugspezifische Komponenten

Anordnung der Antriebskomponenten

Gegenüber dem METROLINER mit Dieselmotor waren Untersuchungen zum Einbau der Antriebsbatterie und Elektrokomponenten (Motor, Getriebe, integrierte Ladegeräte usw.) sowie der Achs-, Federungs- und Radteile notwendig. Dabei haben wir uns für eine „Cradle“-Konstruktion entschieden. Der „Cradle“ ist mit vier Punkten im Heck der Karosserie befestigt. Die Rahmenkonstruktion beinhaltet die Aufnahme bzw. Halterung der Antriebsbatterie, Elektrokomponenten (Motor/Getriebe, on-board-Ladegeräte) sowie die Achs-, Federungs- und Radteile. Ein kompletter Austausch dieser Einheit ist möglich.

Getriebe

Für die besondere Motorcharakteristik des Gleichstrom-Nebenanschlußantriebs wurde ein neues, kompaktes halbautomatisches Vierganggetriebe mit Drucktastenschaltung entwickelt. Damit können, mit fester Hinterachsübersetzung, die Anforderungen an Anfahrsteigfähigkeit, Beschleunigung und Geschwindigkeit für den Linieneinsatz abgedeckt werden.

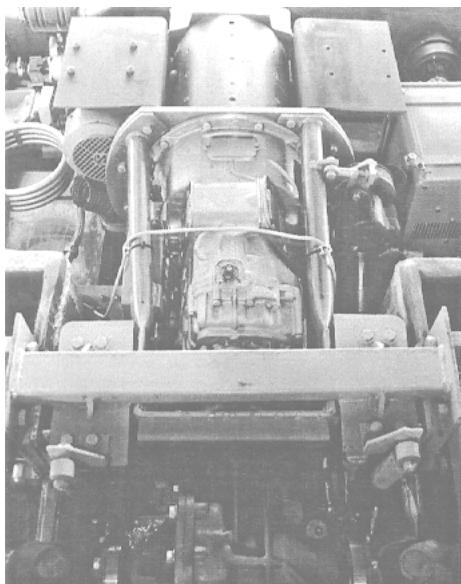


Bild 6: Elektrokomponenten-anordnung

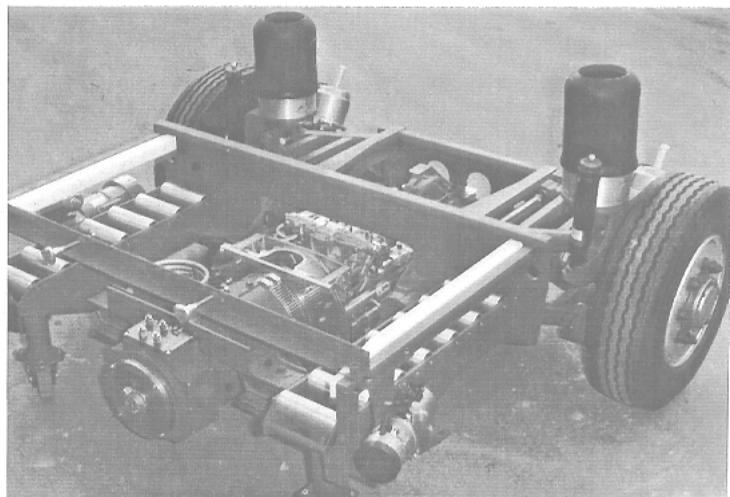


Bild 7: NEOPLAN „Cradle“ Konstruktion beim Bus 29 und bei den Bussen Nr. 30 und 31

Bremssystem

Zwei-Kreis-Druckluftanlage mit elektrischem Luftkompressor für ausreichende Druckluftversorgung. Abstimmung des elektrischen Nutzbremsystems durch Energierückführung (Rekuperation) und der mechanischen Bremsanlage in allen Betriebszuständen.

Lenkung

Lenksäule in Höhe und Neigung verstellbar, mit geschwindigkeitsunabhängiger, elektrischer Servopumpe zur Lenkunterstützung.

Hinterachse und Räder

Verstärkung der Hinterachse und erhöhte Tragfähigkeit der Hinterachsreifen. Gegenüber der Serie ausgestattet mit einer Zweifachbereifung 265/70 R 17,5“.

Heiz- und Kühlsystem

Die Busse verfügen über getrennte Kühl- und Heizkreisläufe für das Antriebssystem und den Fahrgastinnenraum. Zur Beheizung des Innenraums werden zwei Zusatzheizgeräte mit insgesamt 13.000 kcal verwendet.

Fahrerplatz

Die existierende Instrumententafel wurde auf die Belange zur Bedienung des Elektroantriebs umgerüstet. Dieses beinhaltet Ah-Anzeige, Ladeanzeige, Anzeige des Isolationswiderstandes und Störmelder für verschiedene elektrische Komponenten.

Der Tachograf wurde entsprechend abgestimmt. Die Drucktastensteuerung des Getriebes stellt sicher, daß ein Überspringen von Gängen nicht möglich ist.

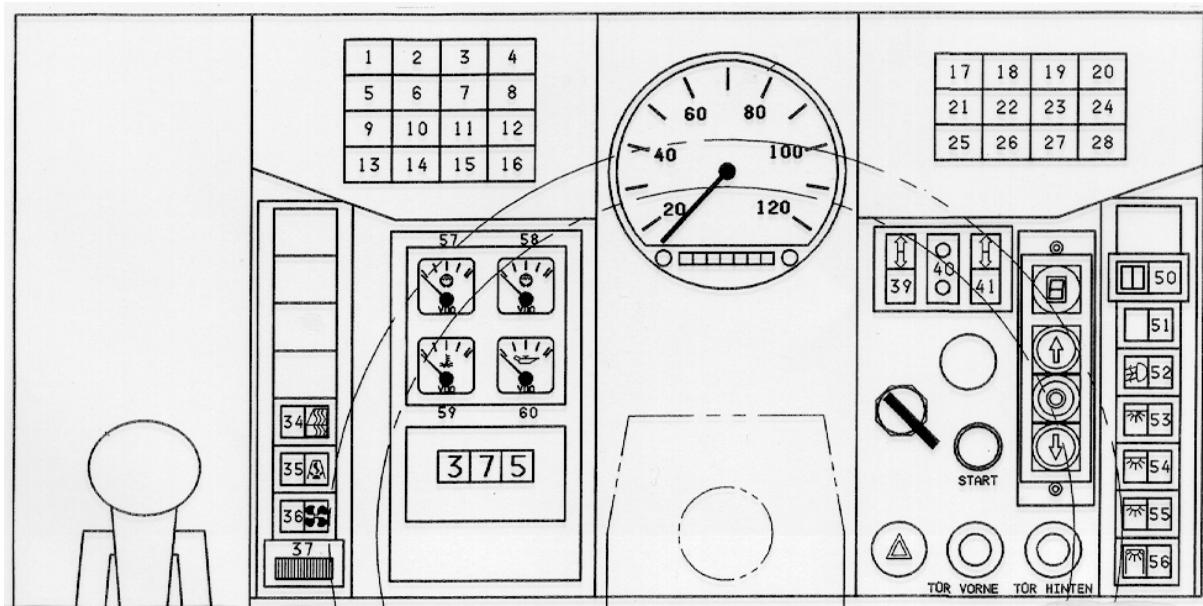


Bild 8: Instrumententafel NEOPLAN N 8008 E-Bus

Bordspannung

Das Bordnetz der Elektrobusse wird mit mehreren kleinen Batterien (6 x 12 V/105 Ah) betrieben. Die Ladung erfolgt über einen DC/DC-Wandler von den Na/S-Batterien. Dabei gilt es, sowohl die Sicherheitsanforderungen der StvZO, als auch die fahrzeugspezifischen Anforderungen zu erfüllen.

4.2 Auslieferung und Einsatz der Fahrzeuge

Der NEOPLAN N 8008 E Rügen I (Nr. 21) in oben wurde am 02.10.1992 im Rahmen einer öffentlichen Präsentation durch den Minister für Forschung und Technologie, Herrn Dr. Riesenhuber, an die Rügener Personenverkehrs GmbH, vertreten durch den Geschäftsführer Herrn Körber, übergeben und ging am 01.12.1992 auf Linie.

Der Bus „Rügen II“ (Nr. 30) folgte am 18. Oktober 1993.

Das Fahrzeug „Rügen III“ (Nr. 31) ging am 15. Mai 1994 in Dienst. Die Busse wurden abwechselnd eingesetzt und fuhren bis zum Nov. 1995 insgesamt 23.480 km.

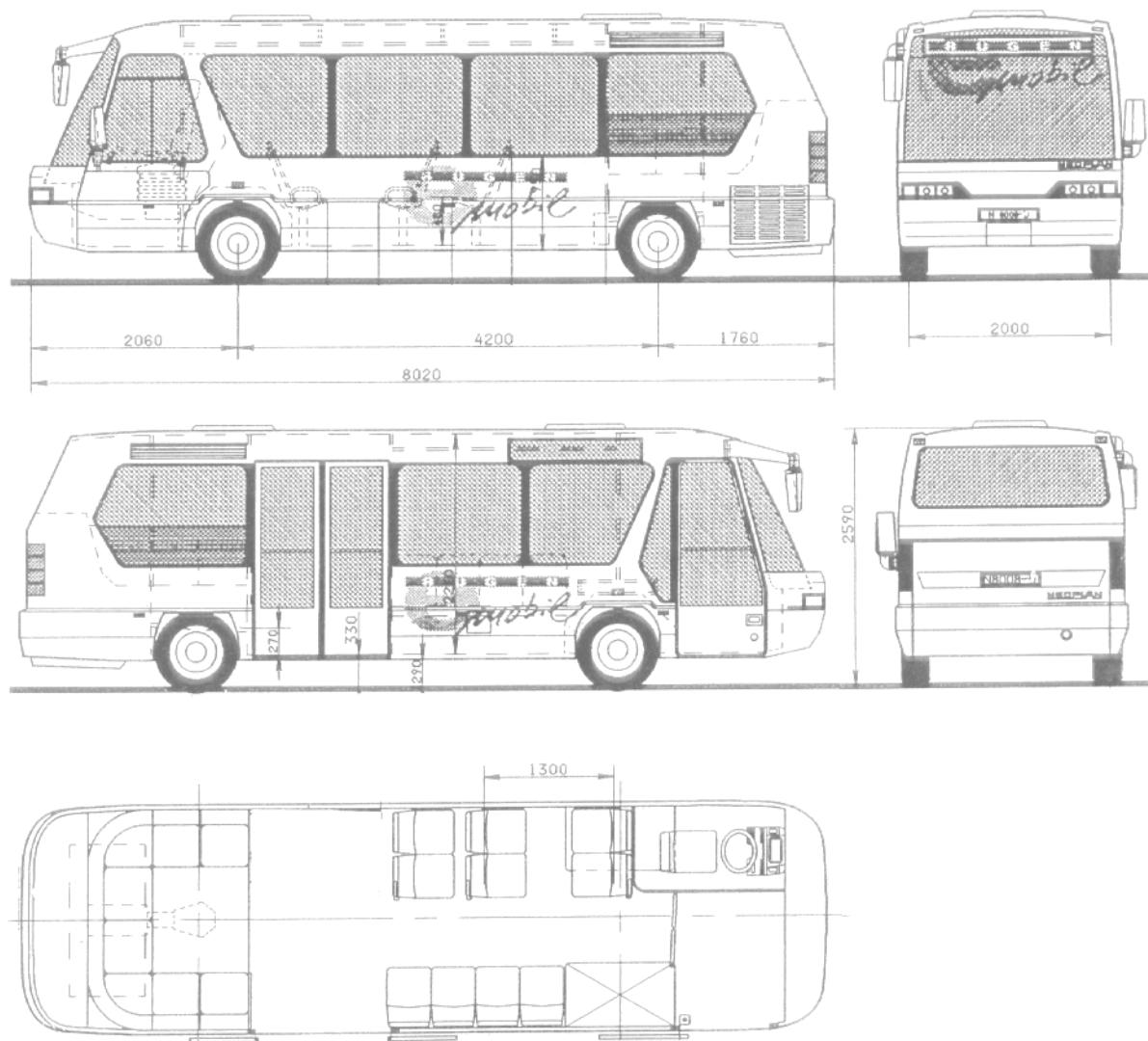


Bild 9: Maßskizze N 8008 E „Rügen“

4.3 Einsatzbereiche und Nutzerverhalten

4.3.1 Einsatzbereiche der NEOPLAN Elektrobusse

Die Busse fuhren bei der Rügener Personennahverkehrs GmbH im öffentlichen Liniennetz des Stadtgebiets Bergen. Die gesamte Linie umfaßte 12,1 km mit 18 Haltestellen. Die Strecke unterteilte sich in zwei Schleifen von je 6 km. Ausgangs- und Endstation war der Zentrale Busbahnhof. Die erste Schleife führte über die südlichen Wohngebiete durch die Innenstadt, die zweite durch das Industriegebiet. Die Strecke wies überwiegend Asphaltbelag auf, jedoch stellten Abschnitte im innerstädtischen Bereich durch das extrem grobe Kopfsteinpflaster und die unebene Fahrbahnfläche außergewöhnliche Anforderungen.

Dabei waren Höhenunterschiede bis zu 40 m vorhanden, die sich insgesamt bis zu 100 m kumulieren.

Meist waren für den Fahrbetrieb zwei Busse verfügbar, die mit unterschiedlicher Dauer zum Einsatz kamen. Die Tagesleistung von Montag bis Freitag betrug bis zu 85 km. Vormittags und nachmittags erlaubte der Fahrplan ein Zwischenladen der Batterien mit den Bordladegeräten. Für Versuchszwecke wurde öfters ein stationäres Ladegerät für 15 kW Schnellladungen verwendet.

Einzelheiten über den Fahrbetrieb ersehen Sie aus dem Abschlußbericht der ABB Hochenergiebatterie GmbH.

4.3.2 Nutzerverhalten

Die Stadt Bergen auf der Insel Rügen hat kein ausgeprägtes innerörtliches Liniennetz. Nach der Wende haben sich viele über die Bequemlichkeit der Autos gefreut, aber bald wurden die Schattenseiten der PkW's erkannt. Die Kurzstreckenfahrten machen einen Großteil des Verkehrs aus. Um der weiteren Luftverschmutzung und anhaltenden Geräuschentwicklung entgegenzuwirken, wurde der Einsatz batterieelektrischer Busse im Rahmen des Forschungsprojekts BMBF „Erprobung von Elektrofahrzeugen der neuesten Generation auf der Insel Rügen“ in der Öffentlichkeit sehr begrüßt. Die Linienführung zwischen Innenstadt und einem am Rande von Bergen angesiedelten Einkaufszentrum wurde richtig gewählt. Mit dem NEOPLAN N 8008 E wurde ein Fahrzeug eingesetzt, das sich sehr rasch zu einem wahren Sympatrieräger entwickelte. Verkehrsbetriebe setzen heute fast ausschließlich große Busse mit Dieselantrieb ein. Damit sind oftmals viele Stadtgebiete nicht erreichbar. Mit dem Einsatz dieser Busse in Bergen zeigt sich, daß neue City-Bus-Konzepte zur Erhöhung der Mobilität der Bürger großen Zuspruch finden.

4.4 Technische Daten des NEOPLAN N 8008 E

Typbezeichnung:	NEOPLAN N 8008 E METROLINER Niederflur ohne Eingangsstufen
Karosserie:	Material und Bauart: Fahrgastzelle in Faserverbund-Werkstoff, selbsttragend, korrosionsbeständig und vollisoliert Türen 900 u. 1350 mm Breite, pneumatisch gesteuert Verglasung mit Sonnenschutzglas
Fahrwerk:	
Federung:	Luftfederung
Bremsen:	Zwei-Kreis-Druckluftsystem, Scheibenbremsen, elektr. Kompressor 200 ccm., elektrische Nutzbremsung durch Energierückführung (Rekuperation)

Lenkung:	ZF Hydrolenkung, Lenksäule in Höhe und Neigung verstellbar, elektr. Servopumpe
Bereifung:	265/70 R 17,5“, 4-fach
Länge/Breite/Höhe:	8020 mm/2300 mm/2590 mm
Wendekreisdurchmesser:	16200 mm
Beförderung:	bis zu 16 Sitzplätze und 20 Stehplätze
Gewichte:	zul. Gesamtgewicht: 8.600 kg Leergewicht mit Batterie 5.800 kg Nutzlast 2.800 kg

Antriebsmotor und Kraftübertragung:

Art:	Nebenschlußmotor ABB TTL 315 C
Kurzzeitleistung:	45 kW - Drehmoment: 300 Nm
Nennleistung:	25 kW - Drehmoment: 180 Nm
Getriebe:	Halbautomatisches 4-Gang Getriebe mit Tastenschaltung LG 100 Schiebeschalter für Rückwärtsgang
Bordnetz:	Spannungswandler DC/DC 144 V/24V -1200 W VARTA 6 x 12 V/105 Ah Batterien
Heizung und Lüftung:	2 Hebedächer 785 x 675 mm, Fahrerplatz- und Fahrgastrauumheizung, 2 Diesel-Wasservorwärmgeräte ges. 13000 kcal.
Innenausstattung:	16 Polstersitze, Fahrerkabine, Transistorleuchten, Ausruf sprechanlage, Haltewunschanzeige, Schallschutzdecke, Seitenwände mit Teppichbezug, hydraulischer Fahrersitz
Antriebsbatterien:	3 ABB NaS-Batterien B 17 k/48 V mit je einer Öl/Luft-Kühlbox
Batteriemanagement	ABB Mod. BM 1-3 mit Ah Anzeige und Shunt (Meßwiderstand) 400 A/150 mV.
Fahrleistungen:	Höchstgeschwindigkeit bis zu 55 km/h
Anfahrsteigfähigkeit:	bis zu 16 %
Reichweite:	bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 30 km/h ca. 100 km

Detaillierte Angaben über die batterieelektrische Ausstattung ersehen Sie aus dem Abschlußbericht der ABB Hochenergie GmbH.

4.5 Antriebssystem des NEOPLAN N 8008 E

Für den Antrieb wurde ein ABB Gleichstrom-Nebenschlußmotor TTL 315 C (IP 54) mit 144 Volt Grundspannung gewählt. Der Motor ist luftgekühlt und wird durch Kühlgebläse 24 V unterstützt. Er hat eine Dauerleistung von 25 kW, in der Spitze von 45 kW.

Der Antriebsmotor wird durch den ABB-Motorcontroller BA 40R2/330 A gesteuert.

Ein vierstufiges automatisiertes Schaltgetriebe in Verbindung mit der gewählten Hinterachsübersetzung 6,17 ermöglicht, daß sich der Bus in Leistung und Geschwindigkeit optimal den Einsatzbedingungen anpaßt.

Der Netzenergiebedarf beträgt pro km 0,73 kWh.

4.6 Betriebserfahrungen und technische Weiterentwicklungen

4.6.1 Betriebserfahrungen:

Der Betreiber nutzte die Busse, aufgrund der großen Nachfrage bis Ende November 1995 sehr intensiv. Im speziellen Fall war die tägliche Reichweite bis zu 80 km ausreichend. Wir kennen auch andere Einsatzfälle, wo Aktionsradien bis zu 200 km für batterieelektrische Busse gefordert wurden. Bei der üblichen Fahrplangestaltung ist meist wenig Zeit, um Batterien ausreichend zwischenzuladen. Hier bedarf es differenzierter Lösungen (siehe Punkt 4.10), um die Anforderungen zu erfüllen.

Die Akzeptanz des NEOPLAN N 8008 E bei den Fahrgästen war außergewöhnlich groß. Durch die vielen Ausfälle der Antriebskomponenten war die Verfügbarkeit der Fahrzeuge unzureichend. Dies führen wir nicht zuletzt auf die unzureichende technische Weiterentwicklung und Betreuung durch die ABB Battery Drive Systems AS, Velby-Norwegen, zurück.

Trotz intensiver Betreuung der Na/S Batterien durch die ABB Hochenergiebatterie GmbH, Heidelberg und laufender konstruktiver Verbesserungen, um die Lebensdauer und Sicherheit zu erhöhen, konnte sich dieses Batteriesystem bedauerlicherweise nicht am Markt behaupten.

Auslieferung	Fahrzeug Nummer	km-Leistung bis Nov. 1995
01.12.1992	Nr. 29	9346
18.10.1993	Nr. 30	7350
18.05.1994	Nr. 31	16784

4.6.2 Technische Weiterentwicklungen

Die Betriebserfahrungen mit den laufenden Fahrzeugen („Rügen 1-3“, Fahrzeugnummer 29-30-31) führten zu verschiedensten Modifikationen, um anfallende System- und Detailmängel zu beseitigen. Schwerpunkte waren Antriebssystem, elektronische

Steuereinrichtungen, Batterien und Ladeeinrichtungen, die Absicherungen und Steckverbindungen. Auch die Anordnung verschiedener Baugruppen wurde geändert.

4.6.3 Antriebsmotor und Controller

Beim Gleichstrom-Nebenschlußmotor Motor ABB-SIGMA TTL 315 C gab es durch Kurzschlüsse an der Statorwicklung öfters Probleme. Defekte infolge Schmutz- und Wasser-einwirkung wurden beseitigt, indem das Kühlgebläse auf absaugend statt drückend umgepolzt wurde.

Die Steuerung erfolgte durch den ABB BA 40 R2/330 A Controller, der sich in seiner Funktion als äußerst unzuverlässig zeigte. Controller-Systemaufbau und Fehler in vielen Details, die fehlende Weiterentwicklung im Rahmen des Feldversuchs beeinträchtigte die Verfügbarkeit der Fahrzeuge. Zum Beispiel führte die Überlastung der Verschraubung für den Strommeßwiderstand zu den häufigsten Ausfällen. Überarbeitungen durch ABB brachten nicht den erwarteten Erfolg.

4.6.4 Getriebe

An den Nebenschlußmotor wurde ein mehrstufiges Schaltgetriebe angebaut, das in seiner Bedienung automatisiert ist. Beim ursprünglichen Modell V 604 konnte der Fahrer die einzelnen Gangstufen durch Drucktasten beliebig anwählen. Dabei kam es vor, daß analog automatischer Getriebe Gangsprünge „geschaltet“ wurden. Dies führte bei entsprechenden Fahrsituationen zu Getriebeschäden, die notwendige Synchronisierung ließ zu wünschen übrig, Ruckbewegungen beim Schalten des Fahrzeugs und Probleme mit Überspannungen traten häufig auf.

Dies führte zu einem neuen Modell LG 100, bei dem durch zentralen Tastendruck die Gangstufen entweder aufwärts oder abwärts schaltbar sind (Abb.8). Bei Erreichen der zugeordneten Drehzahl wird der angewählte Gang durch den ausgelösten elektronischen Impuls eingelegt.

4.6.5 ABB Hochtemperatur Batterien Na/S und Management

Die NaS Batterieblöcke B 17 K /48 V wurden während des Projekts mit unterschiedlichsten Entwicklungsstandards modifiziert. Die Batterien benötigen eine ständige Betriebstemperatur von 300 bis 350°C. Die Batterieabwärme wird über eine Kühlbox (Öl/Luft-Wärmetauscher) abgeführt. Auf die Kühlbox wurde vereinzelt verzichtet, weil der praktische Betrieb gezeigt hat, daß die Belastung der Batterien im Liniennetz sehr gering ist, so daß stabile Tageszyklen auch ohne Kühlung gefahren werden konnten. Die Kühlbox war in der verwendeten Ausführung noch nicht in allen Details ausgereift.

Das Batteriemanagement BM 1-3 wurde für den Betrieb von 3 Batterien eingesetzt. Batterien und Management haben über die Zeit des Feldversuchs keinen ausreichenden Lebensdauernachweis erbracht.

Einzelheiten über die Betriebserfahrungen während des Feldversuchs ersehen Sie im Abschlußbericht Teil 10 der ABB Hochenergiebatterie GmbH.

4.6.6 Ladeeinrichtungen für Bordnetz und Antriebsbatterien

Das verwendete Bordnetz-Batterieladegerät 220 V/4,4 A-24 V/25 A erwies sich als nicht stabil. Die mangelhaft geladenen oder oftmals kurzzeitig entleerten Bordbatterien führten zu

Ausfällen durch Tiefentladung. Im Zuge der Weiterentwicklung wurde auf dieses Gerät völlig verzichtet, stattdessen wurden die Batterien über einen neuausgelegten DC/DC-Wandler geladen (siehe Punkt 4.6.7).

Die 3 thyristorgesteuerten ABB on board-Ladegeräte 144 V/3kW fielen durch thermische Überlastung des öfteren aus. Eine bessere Kühlung der Ladegeräte wurde durch Verlagerung des Einbaus vom Unterflur- in den Kopfbereich des Heckraums erreicht.

Des öfteren wurde die Zwischenladung durch das stationäre Ladegerät vorgenommen, was zu einer Vergrößerung des Aktionskreises führte.

Einzelheiten über die Ladetechnik der Antriebsbatterien entnehmen Sie dem Abschlußbericht der ABB Hochenergiebatterie GmbH.

4.6.7 DC/DC Wandler

Die 24 V Stromversorgung erfolgte aus dem Traktionsnetz (144 V) mit einem DC/DC Wandler. Dieser Wandler wurde neu entwickelt und mußte in seiner Leistung während des Feldversuchs neu definiert werden, da auf den zusätzlichen 12 V Stromkreis verzichtet werden konnte. Die fahrzeugtechnische Stromversorgung erfolgte später einheitlich mit 24 V.

Ursprünglich waren die Fahrzeuge mit 2 DC/DC Wandler ausgestattet. Mit einem luftgekühlten DC/DC Wandler 30 A/800 W, für die Spannungen 144 V/24 V und einem DC/DC mit 800 W für 144V/12V. Verschiedene Steuerkomponenten (z. B. Batteriemanagement) wurden anfangs mit 12 V betrieben. Nach der Vereinheitlichung der Spannungen konnten wir einen leistungsfähigeren DC/DC Wandler mit 1200 W für 144 V/24 V einbauen.

4.6.8 Antriebsanordnung

Beim ersten Fahrzeug N 8008 E (Nr. 29) waren die Fahrwerkskomponenten sowie die elektrischen Antriebsbaugruppen konventionell im Heckbereich angeordnet. Die Zugänglichkeit und Servicefreundlichkeit ließ zu wünschen übrig, der Austausch der Antriebsbatterien war schwierig. Der gewohnte Servicestandard gegenüber Dieselbussen wurde nicht erreicht. Deshalb wurde der Einbau der Antriebsbatterien, Elektrokomponenten (Motor, Getriebe, integrierte Ladegeräte usw.), sowie der Achs-, Federungs- und Radteile auf eine neu entwickelte „Cradle“ Konstruktion umgestellt. Bei den nachfolgenden Fahrzeugen konnte dieses Konzept erstmalig verwirklicht werden. Dadurch besteht die Möglichkeit, den gesamten Heckantriebsstrang mit geringem Aufwand von der Karosserie zu lösen und bei Bedarf zu tauschen. Durch die integrierten Rollenbänder sind die Batterieblöcke einfach zu wechseln. Außerdem erreichten wir weitere Geräuschminderungen, u. a. durch verbesserte Lagerung des Achskopfes und des Antriebsmotors.

4.6.9 Fahrzeugfahrwerk und -aufbau

Lenkung

Durch die Vorderachslasten ist bei E-Bussen eine stärkere servounterstützte Lenkung notwendig. Anfangs wurde die Pumpe über einen Zahnriemen angetrieben und beim Fahrer Unterflur eingebaut. Die Servoleistung war nicht ausreichend, um im Stand die nötigen Lenkbewegungen leichtgängig zu machen. Die Weiterentwicklung führte zu einer elektrischen Servopumpe (Grundspannung 144 V), die im Heck eingebaut wurde. Dadurch wurden die Geräuschprobleme gemindert und die Lenkdrehungen wesentlich erleichtert.

Heizung

Als Heizung dienen die serienmäßige Dachkanalheizung/-Lüftung sowie Konvektorenheizstränge. Zur Erwärmung des Wasserkreislaufs diente ein Zusatzheizerät mit 6500 kcal. Diese Heizleistung erwies sich als nicht ausreichend, so daß ein zweites Gerät nachgerüstet wurde. Die Geräte werden mit Heizöl betrieben.

Druckluftversorgung

Busse werden mit Zwei-Kreis-Druckluftbremssystemen ausgestattet. Die Druckluft fördert ein Kompressor. Dafür wurde ein elektrischer Kompressor mit 100 ccm Fördervolumen ausgewählt. Die Auslegung erwies sich durch den Einbau weiterer druckluftgesteuerter Bauteile als zu gering. Deshalb haben wir einen Kompressor statt mit 24 V, direkt mit 144 V und einer Leistung von 200 ccm eingebaut. Der Antriebsstrom fließt direkt aus der Antriebsbatterie, damit ist der Wirkungsgrad besser als über den DC/DC Wandler.

Das störende Fördergeräusch veranlaßte uns, den Kompressor vom Unterflurbereich des Fahrers ins Heck zu verlagern.

4.6.10 EMV-Messungen

Bei den batterieelektrisch angetriebenen Bussen N 8008 E mit den ABB Gleichstrom-Nebenschlußantrieben wurden EMV-Messungen durchgeführt. Die ermittelten Werte lagen über denen konventioneller Dieselbusse. Dies war darauf zurückzuführen, daß die ABB-Antriebskomponenten in keiner Weise den EMV-Richtlinien entsprachen. An diesem Problem wird derzeit intensiv weitergearbeitet um durch Verwendung neuer Komponenten die erforderliche Abnahme zu erreichen.

4.7 Service

Die Verfügbarkeit der Fahrzeuge hängt sehr wesentlich von der Serviceunterstützung vor Ort und der Verfügbarkeit der Teile ab. Viele Inspektions- und Servicearbeiten an den Bussen konnten durch die betriebseigene Werkstatt der Rügener Personennahverkehrs GmbH durchgeführt werden. Größere Umbauten bzw. Neuauslegungen der Komponenten wurden durch Servicepersonal des NEOPLAN-Werkes Plauen mit Unterstützung der

DAUG-Servicestation in Zirkow erledigt. Das Servicebüro der ABB Hochenergiebatterie GmbH erfüllte vor Ort den Service für Batterie und Management. Verschiedene Arbeiten wurden durch die NEOPLAN Serviceeinrichtung in Rostock unterstützt.

Schwerpunkte der Ausfälle standen meist im Zusammenhang mit Batterien, Controllern, DC/DC Wandler, Ladegeräten und Antrieb. Die Serviceunterstützung durch die ABB/Norwegen war nicht zufriedenstellend. Weniger im personellen Einsatz, als in der Bereitschaft zur notwendigen technologischen Weiterentwicklung der Antriebskomponenten.

4.8 Weiterentwicklung von Bauteilen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit und des Wirkungsgrades

4.8.1 Antriebsmotor und Controller

Inzwischen ist bei den Ersatzcontrollern statt der untauglichen Verschraubung für den Strommeßwiderstand eine technische Lösung durch ein induktives Strommeßverfahren eingeführt worden.

Durch die gemachten Erfahrungen bauen wir zukünftig geschlossene Drehstrom-Asynchron-motoren mit Wasserkühlung und entsprechendem Motormanagement ein. Dieser 144 V-Antriebsmotor hat eine Nennleistung von 60 kW bei einer Drehzahl von 6.000 U/min. Die Asynchronmaschine hat einen günstigen Drehmomentenverlauf, eine höhere Drehzahl und ist heute kostengünstiger als früher verfügbare Modelle.

4.8.2 Getriebe

Beim zuletzt verwendeten Getriebe LG 100 wurden die Gangstufen noch einzeln angewählt. Bei der Nachfolgegeneration werden wir auch darauf verzichten und eine zweistufige Gangvorwahl automatisch in Abhängigkeit von der Drehzahl schalten. Damit sind einerseits Fehlbedienungen durch das Fahrpersonal ausgeschaltet, andererseits trägt die optimale Gangwahl zur Verbesserung der Energiebilanz und zum besseren Fahrverhalten bei.

4.8.3 Batteriesysteme

Die ABB Natrium-Schwefel-Batterien, die wir im Rahmen des Projektes „Rügen“ in den drei Omnibussen eingebaut haben, sind seit Dezember 1995 am Markt nicht mehr erhältlich. Umfassende Erprobungen und die Erfahrungen mit verschiedenen Batteriesystemen haben gezeigt, daß in Verbindung mit Leichtbaukarosserien und angebotenen mobilen, automatischen Wechsel- /Ladeeinrichtungen die geforderte Reichweite von täglich 200 km problemlos erreichbar ist. Die Blei-Säurebatterie ist nach unserer Meinung derzeit die einzige serienreife und kostengünstige Energiequelle für batterieelektrische Midibusse. Aufgrund der hohen Kosten, der geringen Verfügbarkeit und des noch nicht ausgereiften technischen Standards sind andere Batteriesysteme derzeit nur beschränkt eine Alternative.

4.8.4 Ladeeinrichtungen für Batteriesysteme

Wir verwenden in der Weiterentwicklung getaktete Bordladegeräte mit hoher Betriebssicherheit.

4.8.5 Antriebsanordnung

Die im Rahmen des Feldversuchs „Rügen“ entwickelte Cradle-Lösung hat sich bewährt. In kompakten Einheiten können Antriebs- und Batteriesysteme im Heckbereich des Fahrzeugs zuverlässig und servicefreundlich montiert werden.

4.8.6 Fahrzeugfahrwerk- und Aufbau

Bei batterieelektrischen Bussen sind Leichtbaukarosserien vorteilhaft. Die 30-%ige Gewichtsersparnis kompensiert die Zusatzgewichte der Batteriesysteme in hohem Maße, was für Antriebsleistung, Energiebilanz und Reichweite positiv ist.

Leichtbau und Crashsicherheit sind beim NEOPLAN METROLINER N 8008 kein Widerspruch. Die Achskomponenten entsprechen in der Weiterentwicklung den Anforderungen entsprechender Dieselbusse. Laufkultur wird durch geeignete Reifen in Kombination mit der Luftfederung sichergestellt. Die hohen Isolationswerte des Faserverbundwerkstoff-Aufbaus dämmen die externen Geräusche von Reifen (Rollwiderstand), Fahrwerk und Antrieb auf ein Minimum.

Die Materialwahl und erreichte Festigkeit verkörpern einen hohen Sicherheitsstandard.

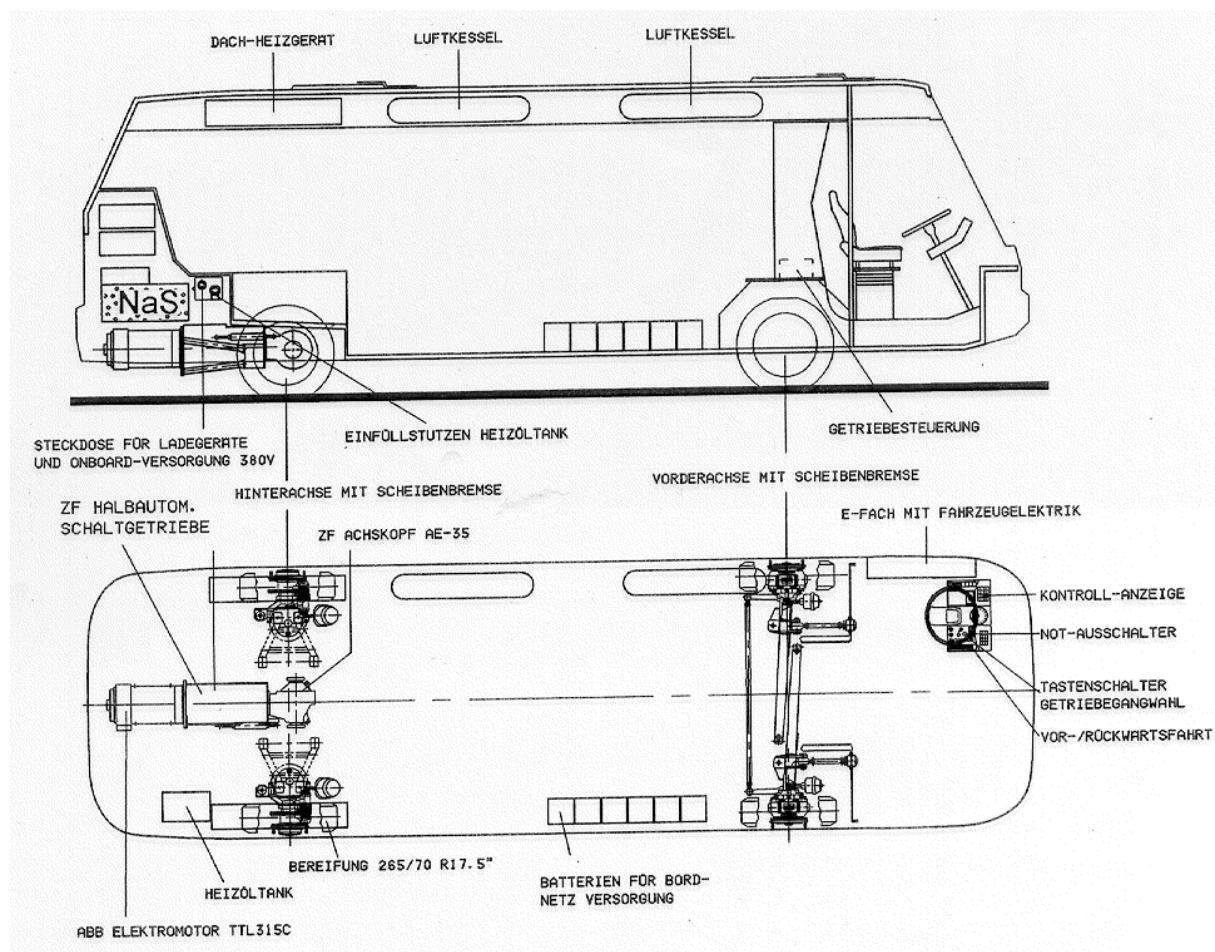


Bild 10: Hauptaggregate und Fahrwerk N 8008E

4.9 Meßtechnik und Datenerfassung

Neben den in der Instrumententafel integrierten Mess- und Überwachungsgeräten wurden alle Fahrzeuge mit dem Datenerfassungssystem TDS 100 ausgerüstet. Zu einem späteren Zeitpunkt erfolgte die Nachrüstung der erforderlichen Energiezähler. Probleme bereitete die Erfassung der Energiewerte der Heizleistung der NaS-Batterie.

Bei Auswertung der Meßdaten durch die HTW Dresden zeigten sich bei den geprüften Fahrzeugen Nr. 30 und 31 Störungen an elektrischen Gebern und Erfassungsgeräten. Im einzelnen verweisen wir auf die Abschlußberichte Teil 10: ABB Hochenergiebatterie GmbH und auf den Bericht der HTW Dresden.

4.10 Zusammenfassung

Wir sind überzeugt, daß in den nächsten Jahren die verkehrspolitischen Konzepte „autofreie Kur- und Fremdenverkehrsorte“, „verkehrsberuhigte Innenstädte“ oder „Erschließung von Altstadtbereichen“ zur wirksamen Verbesserung der Luftqualität in lufthygienisch besonders schutzwürdigen Gebieten verstärkt umgesetzt werden. Dabei gilt es, Bereiche vom konventionellen Autoverkehr weitgehend freizuhalten. Stattdessen sind notwendige Ersatzverkehre mit schadstofffreien oder besonders schadstoffarmen Kraftfahrzeugen alternativ gefordert.

Moderne Elektrobusse sind hierfür besonders geeignet. Dabei können regenerative Energien eine besondere Rolle spielen, damit die Busse nicht nur am Ort ihres Einsatzes, sondern auch ganzheitlich schadstofffrei betrieben werden können.

NEOPLAN als Omnibushersteller bemüht sich, diesen Städten und Gemeinden ein betriebs-sicheres Elektrobus-System anzubieten. Hierfür werden Midibusse mit Reichweiten bis zu 200 km in gewohnten Taktfolgen angeboten (vgl. Bilder 11 bis 13).

Diese Anforderungen sind nach unserer Auffassung bei den derzeit bekannten und verfügbaren Energiepotentialen für batterie-elektrische Busse nur erreichbar:

- durch automatisiertes Wechseln und separates Laden der Batterien.
Dieser Vorgang muß durch die Fahrer bedienbar sein und darf nicht länger als ein Tankstop dauern.
- mit integrierter motorischer, schadstoffarmer Nachladung als Serienhybrid.

In diesem Fall wird die Fahrleistung durch den E-Motor bestimmt, das Nachladen der Batterien erfolgt im Bestpunkt mit einem Klein-Dieselmotor.

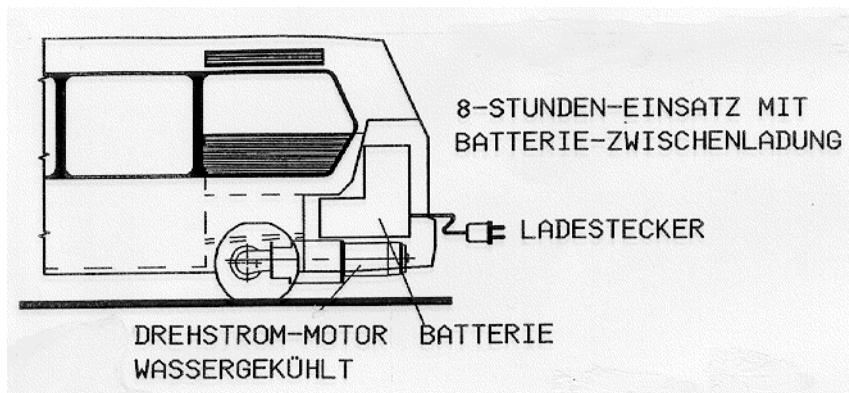


Bild 11: Elektroantrieb mit 144 V Blei- oder 280 V, Hochenergie-Batterien mit Ladestecker

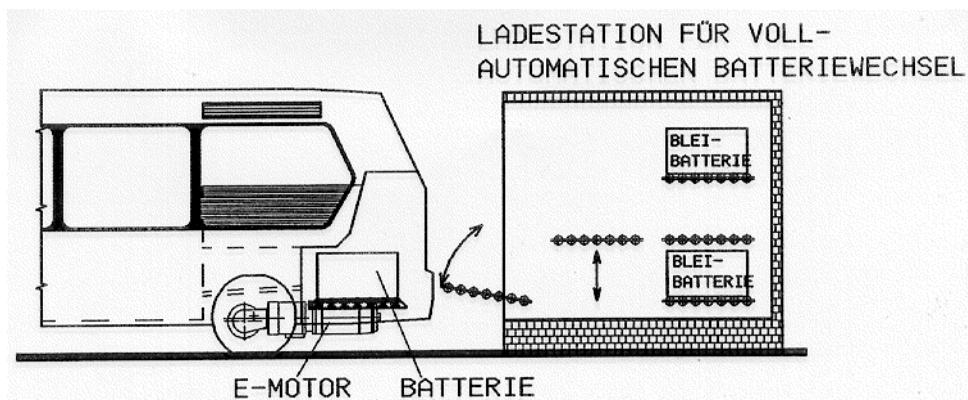


Bild 12: Elektroantrieb mit 144 V Bleibatterie und Wechseltechnik für 24 Stunden Einsatz

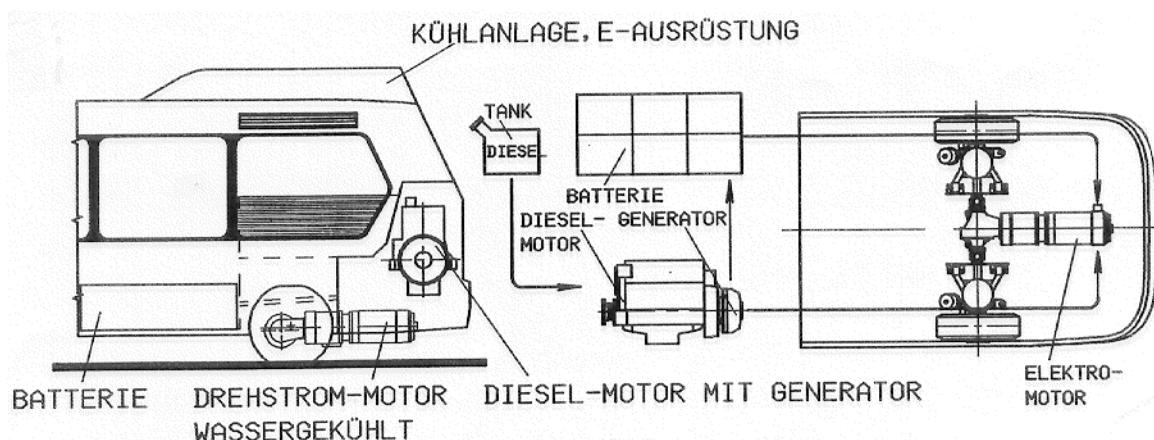


Bild 13: Elektroantrieb mit 280 V, Bleibatterie als Serien-Hybrid

Das BMBF-Projekt „Erprobung von Elektrofahrzeugen der neuesten Generation auf der Insel Rügen“ lieferte uns wichtige Erkenntnisse und Motivation, um elektrische Antriebssysteme für diese neuen verkehrspolitischen Anforderungen abgasfrei - geräuscharm in verkehrsberuhigten Zonen wirtschaftlich anbieten zu können.

Unser Dank gilt allen an diesem Projekt Beteiligten für die gute und faire Zusammenarbeit.

5 Adam Opel AG

Die Adam Opel AG nahm ab dem zweiten Quartal des Jahres 1992 am "Feldtest für Elektrofahrzeuge auf der Insel Rügen" teil.

Das Elektrofahrzeug der Adam Opel AG, der Impuls 3, basiert auf dem Serienfahrzeug Astra Caravan des Modelljahres 1993. Bei der Entwicklung dieses Fahrzeugs wurde der viel-fältigen Nutzbarkeit durch den Fahrzeugbetreiber besonderes Augenmerk gewidmet.

Durch die Unterbringung der Batterien in mehreren Paketen, im Motorraum, unter der Ladefläche und bei NiCd-Batterien auch unter dem Rücksitz, konnte das Raumangebot des Caravans fast vollständig erhalten bleiben. Durch die Verwendung einer verstärkten Hinterachse wurde trotz des zusätzlichen Batteriegewichtes die Nutzlast erhalten.

5.1 Fahrzeugaufbau

5.1.1 Package und Konstruktion

Im zweiten Halbjahr 1992 erfolgte die konstruktive Auslegung der Fahrzeuge. Fahrzeuggberechnung, Definition der Fahrleistungen, Auswahl der Komponenten, Definition der elektrischen Schnittstellen zwischen Batteriecontrollern, Antrieb und Fahrzeug, Sicherheits- und Packageuntersuchungen sowie die gesamten Konstruktionsarbeiten wurden für Fahrzeuge mit wartungsfreien Faserstruktur-NiCd-Batterien (FNC) der Fa. DAUG-Hoppecke (DAHO) und NaS-Batterien der Fa. ABB durchgeführt.

Im Herbst 1992 wurde das Fahrzeugkonzept für NaS-Batterien aufgrund fehlender Lieferbarkeit der Batterien verworfen. Ein erstes, bereits mechanisch fertiggestelltes Fahrzeug mußte verschrottet werden. Die gesamte Konstruktion wurde für den Einsatz von ZEBRA-Batterien, einem NaNiCl_2 -System der Fa. AEG Anglo Batteries (AAB), überarbeitet.

Bild 1 und Bild 2 zeigen das Package der Fahrzeuge mit NiCd- und mit NaNiCl_2 -Batterien.

Im Motorraum wurden der Antrieb mit Getriebe, der Frequenzumrichter, das Ladegerät, ein DC/DC-Wandler, die Standheizung und ein Teil der Batterie untergebracht. Im Fall der NiCd-Batterien wurden weitere Tröge vor der Hinterachse, unter der Rücksitzbank und hinter der Hinterachse, unter der Ladefläche, untergebracht.

Im Frühjahr 1993 wurde die Umkonstruktion der Fahrzeuge für Zebra-Batterien abgeschlossen. Das Package im Motorraum entspricht prinzipiell dem der NiCd-Fahrzeuge. Im Bereich des Laderaumes befindet sich nur noch eine Batterie hinter der Hinterachse. Zur Gewährleistung von ausreichender Bodenfreiheit und spezifiziertem Böschungswinkel mußte in diesem Falle der gesamte Boden des Laderaumes um 60 mm angehoben werden.

Bei beiden Batterietechniken wurde im Fahrzeug eine Starrachse mit Blattfedern eingebaut. Die Ausführung dieses Achstyps gestattet den Einbau rechtwinkliger Batterietröge nahe der Achse und erhöht durch ihre hohe zulässige Achslast die Nutzlast des Gesamtfahrzeugs.

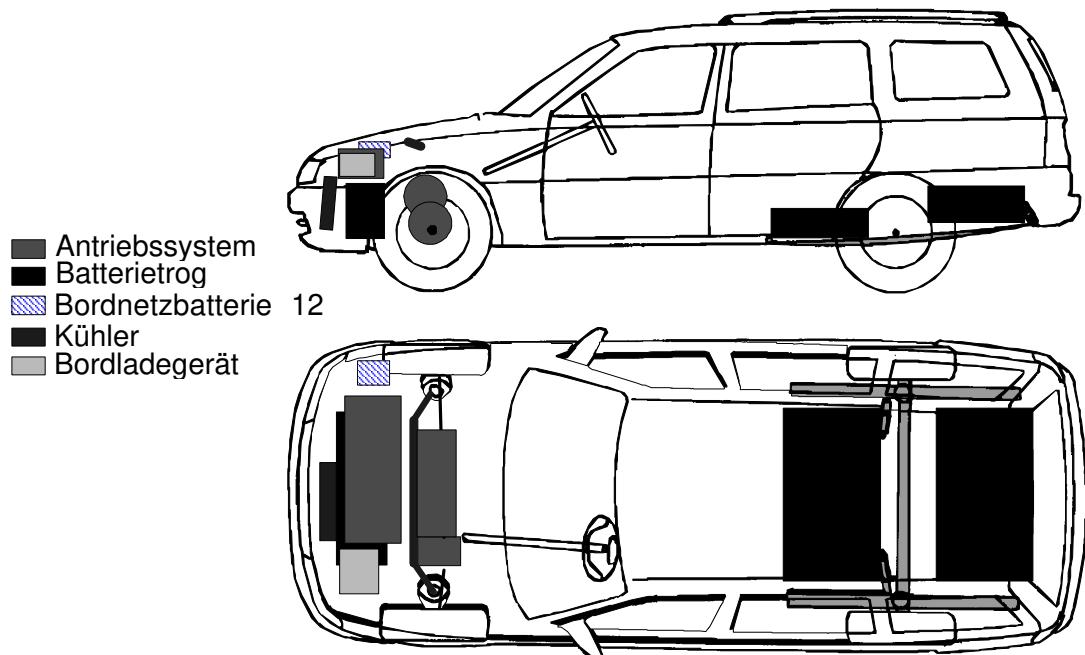


Bild 1: Komponentenanordnung Impuls mit NiCd-Batterien

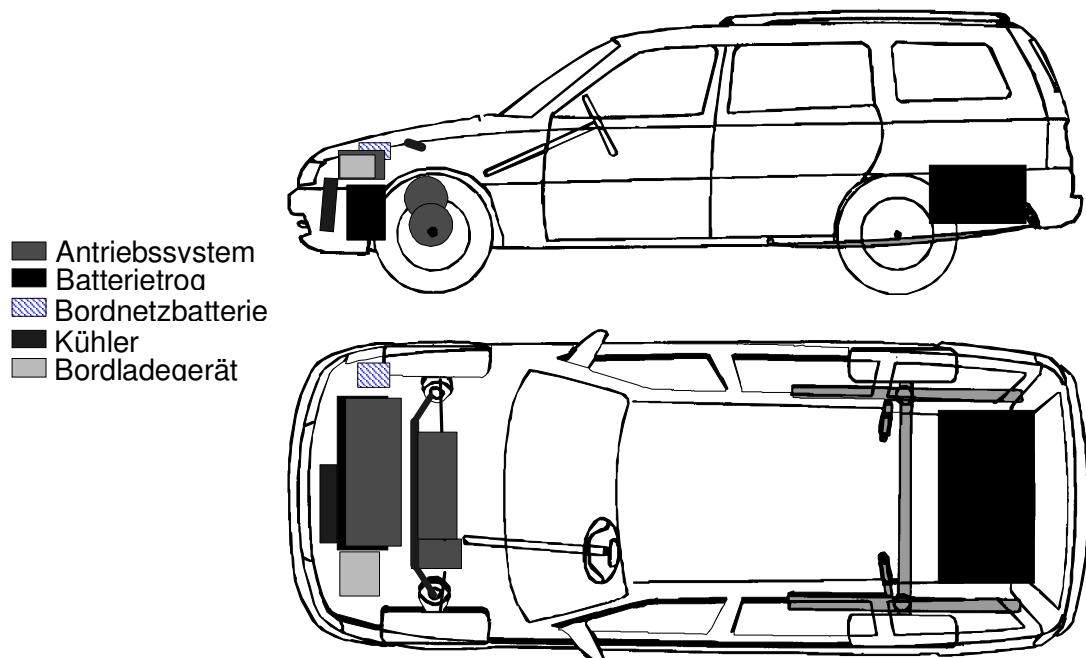


Bild 2: Komponentenanordnung Impuls mit NaNiCl₂-Batterien

5.1.2 Elektrofahrzeugspezifische Komponentenentwicklung

Bordspannungskonzept

Mit einer kleinen Bordnetzbatterie, die permanent von einem DC/DC-Wandler gespeist wird, werden sowohl Sicherheitsanforderungen der StvZO, als auch die zusätzlichen fahrzeugspezifischen Anforderungen erfüllt. Bei den Fahrzeugen müssen der ständige Verbrauch von z.B. Batterielüftern, Batteriemanagementsystemen und des eingebauten Datenerfassungs-systems abgedeckt werden.

Isolationsüberwachungssystem

Zur ständigen Überwachung der galvanischen Trennung zwischen Antriebsbatterien und Bordnetz wurde eine Isolationswiderstandsüberwachung entwickelt.

Getriebe

Für die besondere Motorcharakteristik des Asynchronantriebs wurde ein neues, kompaktes Getriebe entwickelt. Mit fester Übersetzung können die Anforderungen an Anfahrsteigfähigkeit und Höchstgeschwindigkeit abgedeckt werden.

Bremssystem und Elektroantrieb

Das elektrische Nutzbremsystem arbeitet zusammen mit der ABS-Funktion der mechanischen Bremsanlage, um ein Blockieren der Räder durch die Nutzbremsen bei glattem Untergrund zu verhindern.

Heizungs- und Kühlsystem

Die Fahrzeuge wurden mit getrennten Kühl- und Heizkreisläufen ausgestattet. Die Kühlkreisläufe wurden elektrofahrzeugspezifisch dimensioniert. Kühler, Pumpen und deren Regelung wurden abgestimmt.

In allen Fahrzeugen wird der separate Heizkreislauf mit einer neuen, abgasarmen Diesel-Standheizung erwärmt.

5.2 Auslieferung der Fahrzeuge

Die Fahrzeuge mit NiCd-Batterien wurden zwischen Mai und Juli 1993 an die Erstnutzer ausgeliefert. Alle Fahrzeuge wurden vor ihrer Auslieferung umfangreichen internen Tests unterzogen. Die Umkonstruktion der letzten fünf Fahrzeuge von NaS-Batterien auf NaNiCl₂-Batterien sowie Verzögerungen bei der Auslieferung der Zebra Batterien schoben den Aufbau und die Übergabe an die Nutzer auf Rügen in den Zeitraum zwischen Juni und August 1994.

Fzg.	Batt.	Auslieferung	bei km
OP37	FNC	26.05.1993	1049
OP38	FNC	25.05.1993	505
OP39	FNC	28.07.1993	1303
OP40	FNC	29.07.1993	645
OP41	FNC	30.08.1993	1928
OP32	Zebra	28.06.1994	699
OP33	Zebra	20.06.1994	2643
OP34	Zebra	17.06.1994	1203
OP35	Zebra	22.08.1994	111
OP36	Zebra	22.08.1994	2846

Tabelle 1: Fahrzeugauslieferung und km-Stand

5.3 Einsatzbereiche und Nutzerverhalten

5.3.1 Nutzerauswahlverfahren

Im Juni 1992 wurden auf Rügen die ersten Gespräche mit potentiellen Fahrzeugnutzern durchgeführt. Die Nutzer hatten in Fragebögen ihr zu erwartendes Fahrprofil, ihr Transportaufkommen, Einsatzzweck und elektrische Anschlußmöglichkeiten dargelegt. Sofern keine konkreten Fahrzeugvorstellungen vorhanden waren, wurden die Nutzer von der DAUG vorausgewählt. In o.g. Gespräch wurden die zukünftigen Fahrer über die Teilnahmevoraussetzungen informiert:

- elektrische Nachlademöglichkeit vorhanden oder zu schaffen
- Pflicht zur Fahrtenbuchführung
- keine Ersatzansprüche bei Fahrzeugausfall
- Datenerfassungs- und Serviceintervalle
- Betriebskosten durch Nutzer zu tragen

Das Hauptauswahlkriterium war, eine möglichst vielfältige Nutzung der einzelnen Fahrzeuge zu erreichen. Die Verteilung der Fahrzeuge mit NiCd-Batterien und geringerer Reichweite, sowie NaNiCl₂-Batterien und größerer Reichweite wurde entsprechend dem zu erwartenden Fahraufkommen vorgenommen. Die Schnellladung wurde nur in Fahrzeuge eingebaut, deren Fahrer Möglichkeiten zu deren Nutzung haben.

5.3.2 Fahrzeugnutzung

Die zehn Fahrzeuge waren im Verlauf des Tests in Händen von 18 Nutzern. Ein Nutzer wechselte auf Grund größeren Reichweitenbedarfs von einem Fahrzeug mit NiCd-Batterien zu einem Fahrzeug mit NaNiCl₂-Batterien.

Eine detaillierte Beschreibung des Einsatzes ist nur grob darstellbar, da die Nutzer die Fahrzeuge soweit möglich als Ersatz für ihre konventionellen Autos einsetzen sollten. Die aufgezeichneten Daten ermöglichen keine Rekonstruktion der gefahrenen Strecken sondern nur statistische Auswertungen (Siehe Bericht zur Datenerfassung). Tabelle 1 im Anhang (A 5.1) beschreibt kurz den jeweiligen Haupteinsatz der Fahrzeuge.

Nachfolgend werden einzelne Erkenntnisse zur Fahrzeugnutzung aus dem Verlauf des Tests aufgelistet:

- Fahrzeuge, die in einem Fuhrpark tagsüber von mehreren Personen genutzt werden, weisen durchschnittlich geringere km-Leistungen auf als Fahrzeuge die zusätzlich privat betrieben werden.
- Fahrzeuge in einem festen „Fahrplan“ erreichen bis zu 150 km Reichweite ohne Zwischenladung.
- Nutzer vergrößern in den ersten Wochen die Fahrstrecken zwischen den Ladungen Schritt für Schritt.
- Nutzer, die die Fahrzeugreichweite schrittweise bis an deren Grenze „erfahren“, schöpfen öfter die maximal verfügbare Kapazität aus.
- Elektrofahrzeuge benötigen für sinnvollen regelmäßigen Betrieb feste Parkplätze mit Lademöglichkeit. „Laternenparken“ mit gelegentlicher Ladung ist nur ausnahmsweise durchführbar, z.B. bei Besuchen.
- Fahrzeuge, die privat genutzt werden, erzielen nach Fahrzeugen auf festen Routen die größten Fahrleistungen.

5.3.3 Nutzerwechsel

Im Verlauf des Tests wurden aus unterschiedlichen Gründen die Nutzer gewechselt. Besonders Fahrzeuge mit NaNiCl₂-Batterien wurden im Verlauf des Tests oft wegen zu niedriger täglicher Fahrstrecke der Nutzer gegenüber den Angaben im Fragebogen getauscht.

In einem Fall wurde keine Nachlademöglichkeit geschaffen. Die geringe Ladezeit, nur tagsüber während der Arbeitszeit, erlaubte keinen sinnvollen Fahrzeugeinsatz. Das Auto wurde in dieser Zeit zusätzlich noch für betriebliche Fahrten genutzt. Dadurch ergaben sich tägliche Ladezeiten von nur drei bis sechs Stunden, wodurch sich ebenso geringe und für den Nutzer nicht akzeptable Reichweiten einstellten. In Tabelle 2 im Anhang A 5.2 sind die Gründe für Wechsel der Fahrzeugnutzer näher erläutert.

Darüber hinaus wurden Fahrzeuge auch kurzfristig zur Überbrückung von Standzeiten durch z.B. Urlaub des Nutzers getauscht. Dies erfolgte auch zwischen verschiedenen Projektpartnern.

5.3.4 Nutzerakzeptanz

Am 24.04.96 wurde auf Rügen eine Veranstaltung durchgeführt, bei der in persönlichen Gesprächen die Eindrücke der Nutzer zu ihrem bisher gefahrenem Fahrzeug erfragt wurden. Im Anhang (A 5.5) sind die behandelten Themen mit den unbewerteten Antworten der Nutzer zusammengefaßt.

5.3.5 Übersicht Nutzerstatus am offiziellen Versuchsende

Fzg. Nr.	Nutzer	km-Stand 31.12.95	Status 31.12.95
OP32	Ing.-Büro Schwanck	19245	i.O., keine Defekte, tägl. Einsatz
OP33	Landratsamt Bergen	19605	i.O., keine Defekte, tägl. Einsatz
OP34	Elektro Rosenow	30569	i.O. Batterie Z6 zellreduziert tägl. Einsatz
OP35	RPNV, Fr. Förster	26774	i.O., Orig. Reihen-Batteriesatz, kein Defekt
OP36	Wäscherei Sagert	20430	i.O. Batterie Z5 zellreduziert tägl. über 150 km
OP37	Kurverwaltung Binz	21743	i.O. regelmäßige Nutzung mit eingeschr. Reichweite
OP38	Kurverw. Middelh.	26740	i.O. sehr guter Batteriezustand, tägl. Einsatz
OP39	Autohaus Schröter	23541	i.O. Guter Batteriezustand, regelmäßige Nutzung
OP40	Hevag	16773	i.O. Guter Batteriezustand, tägl. geringe Nutzung
OP41	Privat/DAUG	41300	i.O., eingeschränkte Reichweite, tägl. Nutzung.

5.3.6 Schnelladung

Am 22.08.94, bei km-Stand 13117 und am 18.09.94 bei km-Stand 21451 wurden die Fahrzeuge OP38 und OP41, beide NiCd-Batteriesystem, mit Maréchal-Steckdosen zur **Schnellladung** ausgerüstet.

Nach anfänglichen Schwierigkeiten, vor allem der Kommunikation zwischen fahrzeugseitigem Batteriecontroller und der Schnelladestation, wurde die Einrichtung in Zirkow regelmäßig von Fahrzeug OP41 genutzt. Die Ladestation befindet sich am Arbeitsplatz der Nutzerin, die morgens und abends ihren Arbeitsweg mit ca. 60 km zurücklegt. Ohne Schnellladung mußte das Fahrzeug während des ganzen Arbeitstages geladen werden. Mit Schnellladung stand das Auto bereits innerhalb einer Stunde nach Arbeitsbeginn wieder voll geladen für zusätzliche Versorgungsfahrten zur Verfügung.

Einen weiteren Vorteil der Schnellladung stellt die Ladefähigkeit bei höheren Batterietemperaturen dar. Dadurch ist es auch in den Sommermonaten möglich, die Batterien sehr bald nach Fehrtende zu laden (Siehe auch Kap.: 5.5.1 NiCd-Batterien).

Mit FNC-Batterien und Schnellladung wurden im täglichen Einsatz Tagesreichweiten zwischen 150 und 190 km gefahren. Bei einer 12h-Testfahrt, am 27.04.95 konnte mit drei Schnellladungen, mit Fahrzeug OP41, eine Reichweite von genau 400 km erzielt werden. Über 20000 km wurden mit diesem Fahrzeug mit einem Anteil von ca. 30% Schnellladung gefahren. Gegen Ende des Versuchs, bei bisher 40000 km zeigte sich eine Verschlechterung der Batteriekapazität, die einen Einsatz in der bisherigen Weise nicht mehr zuläßt. Eine Aussage, ob dies auf die Schnellladung oder die Batteriealterung zurückzuführen ist, kann nicht getroffen werden, da noch kein weiteres Fahrzeug ohne Schnellladung diesen km-Stand erreicht hat.

Die Mechanik des Stecksystems sowie das sehr inflexible, dicke Leistungskabel an der Ladestation, für die hohen Ladeströme, führten leider oft zu Problemen und Ausfällen im Betrieb. Die Unzuverlässigkeit des gesamten Ladesystems führte auch dazu, daß die Nutzer diese nicht in ihre Fahrtenplanung einbezogen.

Es zeigte sich, daß die Schnellademöglichkeit nur dann genutzt wird, wenn die Fahrzeuge sowieso in deren Nähe sind. Die Nutzer sind nur in Notfällen bereit, die Ladung an der Schnelladestation abzuwarten. Sie ziehen es vor, ihre Routenplanung so zu gestalten, daß Sie auf die Schnellladung nicht angewiesen sind, die Nachtladung wird bevorzugt.

Die Schnellladung wurde in oben beschriebener Konstellation sehr häufig verwendet, weil dieses Fahrzeug für einen langen Arbeitsweg und zusätzliche Fahrten verwendet wurde und die Ladestation auch am Arbeitsplatz stand. Vergleichbar sinnvoller Einsatz der Schnellladung wäre bei Fahrzeugflotten denkbar.

Prinzipielle technische Schwierigkeiten traten bei der Schnellladung nicht auf. Ladezeiten um 30 Minuten, die mit der Ladeleistung dieser Stationen erreichbar sind, haben sich bei der FNC-Batterie bewährt. Die Kühlung war ausreichend.

Während der Fahrt mit der Kühlluft eingetragener Schmutz, speziell Straßensalz, führte bei Nässe zu einer Verringerung des Isolationswiderstands der Batterie gegenüber dem Fahrzeug (Siehe auch Kapitel: 5.5.1 NiCd-Batterien). Eine Isolationsüberwachung in der Ladestation verhinderte deshalb gelegentlich bei großer Feuchtigkeit die Ladung bis die Batterien wieder abgetrocknet waren.

Die Erprobung der Schnellladung ist in diesem Versuch mehr von der technischen Seite zu betrachten, da die Aussagen und Nutzungsgewohnheiten von zwei Nutzern sicherlich nicht repräsentativ zu werten sind.

Im April 1996 wurde ein erstes Fahrzeug mit Zebra-Batterien mit einer Schnelladeforrichtung ausgestattet. Leider gestatten die derzeitig installierten Ladestationen, die nur für die NiCd-Fahrzeuge konzipiert waren, keine wirklichen Schnellladungen. Durch die höhere Batteriespannung des Fahrzeugs wird die obere Spannungsgrenze der Ladestation erreicht bevor sich der maximal zulässige Ladestrom der Batterie einstellt. Es sind somit nur „beschleunigte Ladungen“ in ca. 3 Stunden möglich.

Zusammenfassung Schnellladung:

Die Schnellladung der NiCd-Batterien wirkt sich nicht nachweislich negativ auf den Betrieb der Batterien aus. Schnellladungen können, sofern sie z.B. bei Flottenbetreibern in Fahrpausen eingeplant werden, die Tagesreichweite erheblich erhöhen. Die Nutzung der Schnellladung im privaten Bereich beschränkt sich auf „Notladungen“.

An der Handhabung und Bedienung der Schnellladung sind noch entscheidende Verbesserungen notwendig.

5.3.7 Besondere Ereignisse, Unfälle

Fahrzeug OP38 wurde am 20.10.95 in einen Verkehrsunfall verwickelt. Bei einem Heckaufprall wurde ein Großteil der Fahrzeugheckpartie und der hintere Batterietrog deformiert. Drei mechanisch beschädigte Zellen mußten ausgetauscht werden. Außer einem Zellgehäuse-Isolationsfehler traten bei dem Unfall keinerlei Folgeschäden wie Kurzschlüsse oder Elektrolytaustritt auf. Die Überprüfung der Batterie, der Austausch beschädigter Zellen und die Reparatur des erheblich beschädigten Fahrzeugs dauerte bis 12.12.95. Das Fahrzeug ist seither wieder normal im Einsatz.

5.3.8 Sonstiges

Referenzfahrzeug mit Dieselverbrennungsmotor

Von 21.11.94 bis 11.05.95 war ein Opel Astra mit Dieselmotor als Referenzfahrzeug, zum Vergleich des Fahrverhaltens der Nutzer, im Austausch gegen Elektrofahrzeuge im Einsatz. Das Auto wurde von den Nutzern für einen bestimmten Zeitraum wie das Elektroauto gefahren. Es war ebenso mit einem Datenerfassungsgerät ausgestattet, dessen Betrieb allerdings bei dem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor zu zahlreichen Betriebsstörungen führte. Der Energieverbrauch des Datenerfassungsgerätes belastete die Bordbatterie übermäßig.

5.4 Technische Daten, technische Einzelheiten

Nachfolgend werden die technischen Besonderheiten des Elektrofahrzeugs beschrieben.

5.4.1 Motor

Siemens Drehstrom Asynchronmotor

Drehmoment	Nenn.:	75	Nm
	Max.:	132	Nm
Leistung	Nenn.:	18	kW
	Max.:	56	kW
Drehzahl	Nenn.:	2300	1/Min
	Betrieb.:	10800	1/Min
	Max.:	12000	1/min
Kühlung		Wasser	
Schutzklasse		IP54	

5.4.2 Frequenzumrichter

		NiCd	NaNiCl ₂
Hersteller		Siemens	Siemens
Eingangsspannung	Min	158 V	158 V
	Max	282 V + R*I	350 V
Ausgangsstrom	Max	400 A	400 A
Ausgangsfrequenz	Max	400 Hz	400 Hz
Schutzart		IP23	IP23
Kühlung		Wasser	Wasser
Batteriestrom	Max.:	280 A	210 A
	Max.Reku.:	140 A	100 A
I _{Batt} Leistungsreduziert	Max.:	100 A	16 Stufen zu je 10 A
	Max. Reku.:	140 A	30 A
Leistungsreduzierung		bestimmt durch BSG	bestimmt durch BSG
Abschaltung		unter 130 V Batteriespannung	---

Momentenreduktion ab 10800 1/min bis max. Bremsmoment bei 12000 1/min.

5.4.3 Antriebsstrang

Einganggetriebe mit Differential Gesamtuntersetzung: 10,83 : 1

5.4.4 Bordnetzversorgung

Das Bordnetz, wie bisher 12V, wird aus zwei DC/DC-Wandlern parallel versorgt. Ein leistungsstarker DC/DC-Wandler im Umrichter versorgt die Bordnetzverbraucher während der Fahrt. Ein Zusatz-DC/DC-Wandler speist dauernd die kleine 12V-Bordbatterie und versorgt damit Langzeitverbraucher, wie Lüfter im Ladebetrieb, Batteriecontroller und Meßtechnik. Er versorgt auch sicherheitsrelevante Einrichtungen, Standlicht und Warnblinkanlage.

DC/DC-Wandler im Umrichter:

Eingangsspannung	min.:	158V
	max.:	350V (wie Umrichter)

Ausgangssspannung		13,8V ±0,4V
Ausgangsstrom	max.:	40A
Ausgangsleistung	max.:	550W

Zusatz-DC/DC-Wandler für Langzeitversorgung

Eingangsspannung	min.:	130V
	max.:	380V
Ausgangsspannung	20°C:	13,6V (temperaturkompensiert)
Ausgangsstrom	Nenn.:	13,3A
	Max.:	16,6A
Ausgangsleistung	Nenn.:	185W
	Max.:	230W

Bordbatterie

Durch die permanente Versorgung des Bordnetzes ist es möglich eine kleine, leichte Bordbatterie zu verwenden die nur noch Verbrauchsspitzen kompensiert. Eine wartungsfreie Bleibatterie, 12V, 10 Ah kommt hier zum Einsatz.

Bordnetzüberwachung

Eine Bordspannungsüberwachung warnt bei Überlastung und Fehlern des Bordnetzes.

5.4.5 Standheizung

Um den Wärmebedarf im Winter zu decken wurden die Fahrzeuge mit einer modifizierten Diesel-Standheizung ausgerüstet. Da die Heizung nicht von der Verbrennungsmotor-Kraftstoffpumpe mit Diesel versorgt wird, mußte eine spezielle Version mit eigener elektrischer Pumpe verwendet werden.

Heizsystem:

- Standheizgerät
- Wärmetauscher wie im Serienfahrzeug
- Ausgleichsbehälter

5.4.6 Unterdrucksystem

In Elektrofahrzeugen steht kein Unterdruck aus dem Ansaugtrakt des Verbrennungsmotors zur Verfügung. Eine zusätzliche Vakuumpumpe erzeugt den zur Versorgung des Bremskraftverstärkers notwendigen Unterdruck.

Der erzeugte Unterdruck wird in einem Unterdruckbehälter gespeichert. Nach etwa zwei Bremsungen steigt der Unterdruck so weit an, daß die Vakuumpumpe wieder anläuft.

Die Vakuumpumpe läuft selbsttätig für eine Dauer von ca. 30 s an, wenn ein Unterdruck von nur noch 0,5 bar erreicht ist.

5.5 Batteriesysteme

Ein Ziel des Feldtestes war unter anderem die Erprobung moderner Batteriesysteme. Von den 10 Fahrzeugen wurden fünf mit gasdichten Faserstruktur NiCd-Batterien (FNC) der Fa. DAUG-Hoppecke (DAHO) und fünf weitere mit NaNiCl₂-Hochenergiebatterien, Zebra, der Fa. AEG-Anglo Batteries (AAB) ausgerüstet. Bild 1 und

Bild 2 zeigen die Verteilung der Batterien in den Fahrzeugen.

Die **NiCd-Batterien** wurden in drei einzelnen luftgekühlten Batterietrögen, im Motorraum, unter den Rücksitzen und unter der Ladefläche eingebaut. Dabei unterscheidet sich der vordere Batterietrog sowohl in der Zellenzahl als auch in der Lage der Zellen von den hinteren beiden Trögen. Die vorderen Zellen, 36 Stück, sind liegend, die hinteren, je Trog 70 Zellen, stehend eingebaut.

Bei den Zebra-**NaNiCl₂ Batterien** wurde eine des Typs Z6 im Motorraum und eine weitere Batterie Z5 unter der Ladefläche installiert. Zur Erhaltung der Bodenfreiheit mußte der Ladeboden dafür um 60 mm angehoben werden.

Die Batterien befinden sich komplett außerhalb des Fahrgastraumes.

Batterieaufteilung:

		NiCd	NaNiCl ₂
Einzelzelle	Nennspannung/V	1,2	2,58
	Kapazität/Ah	70	30
Vordere Batterie	Zellenzahl	36	3 x 39
	Spannung/V	43	100,6
Mittlere Batterie	Zellenzahl	70	--
	Spannung/V	84	
Hintere Batterie	Zellenzahl	70	3 x 73
	Spannung/V	84	188,3
Gesamtsystem	Zellenzahl	176	113
	Spannung/V	211	289
	Nennenergie/kWh	14,8	26,0
Kühlung		Luft	Luft
Heizung		--	AC_Netz und DC

5.5.1 NiCd-Batterien

Beim Umbau konventioneller Fahrzeuge müssen Kompromisse bei der Unterbringung der Batterien eingegangen werden. Durch die Einbausituation der Batterien im Fahrzeug in drei Batterieträger treten Temperaturunterschiede, vor allem während der Fahrt auf. Im Verlauf der längeren Ladephase gleichen sich diese aus. Dennoch muß die Batterie mit einem höheren Ladefaktor betrieben werden. Im Verlauf des Tests wurde der Ladefaktor, zur Reduzierung des Gesamtenergieverbrauchs, in mehreren Softwareversionen optimiert. Der Energieverbrauch konnte in Einzelfällen erheblich reduziert werden.

Die installierte Software mußte für die meisten Nutzungsfälle noch ausreichende Überladung zum Ausgleich der Selbstentladung, des Verbrauchs der Datenerfassung und der Batterie-klimatisierung zur Verfügung stellen. Bei Fahrzeugen, die über lange Zeit mit geringen Tagesfahrleistungen und seltenen Ladungen betrieben werden, traten dennoch Probleme durch Auseinanderlaufen einzelner Zellen auf. Durch „Zyklisieren“, Tiefentladen mit anschließender Volladung, konnte dieser Zustand immer behoben werden.

Der Einbau in drei Batterieträgen bedingt darüber hinaus einen höheren Bedarf an Kühlleistung für drei Batterielüfter. Eine getrennte Temperaturregelung der einzelnen Batterieträge konnte mit dem derzeitigen Management noch nicht durchgeführt werden.

Bei hohen Temperaturen im Sommer wirkte sich bei diesen Batterien ein systembedingtes Problem, Normalladungen durften nicht bei mehr als 30°C Batterietemperatur stattfinden, besonders stark aus. Unter solchen Gegebenheiten war es tagsüber nahezu nicht mehr möglich die Batterien mit dem Normalladegerät zu laden. Schnelladung war auch bei höheren Temperaturen möglich. Im Verlauf des Feldtests konnte nach vorliegenden Erfahrungen diese Grenze auf 35°C angehoben werden. Mit dieser neuen Grenze kamen die Nutzer gut zurecht, zumal sie das Fahrzeug ohnehin vorwiegend nachts laden.

Am 14.12.93 trat bei einem Fahrzeug unerwartet eine Zellumpolung mit starker Wärmeentwicklung auf. Nach Analyse und Laborsimulation des Vorgangs wurden alle Batterien sukzessive mit elektronischen Zellspannungsüberwachungssystemen ausgerüstet, die ein Umpolen und Tiefentladen der Batterien verhindern. (vgl. Bericht Batteriehersteller). Durch den Einbau der Überwachungsschaltung im Batterietrog verschlechterte sich in der vorhandenen Auslegung die Luftkühlung zusätzlich. Außerdem führte die Vielzahl der neuen Schaltungen zu einigen Störungen durch deren Ausfall.

Durch die Luftkühlung der Batterien im Kraftfahrzeug wurden erhebliche Mengen Schmutz und im Winter Straßensalz in den Batterietrog eingetragen. Trotz zusätzlicher Kunststoffkästen im Batterietrog reduzierte sich der Isolationswiderstand zwischen Traktionsstromkreis und Fahrzeug bei nasser Witterung.

Die Schnelladestation, die den Isolationswiderstand zusätzlich überwacht, ließ dann eine Schnellladung, bis zum Trocknen der Batterien nicht mehr zu.

Bei einem Crashtest eines Fahrzeugs mit NiCd-Batterien traten keine kritischen Situationen auf. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der elektrischen Sicherheit. Der Test mit geladenen NiCd-Batterien bestätigte die einwandfreie Funktion der eingebauten Sicherseinrichtungen.

Es erfolgte keinerlei Elektrolytaustritt.

Die im Verlauf des Tests durchgeföhrten Arbeiten im Zusammenhang mit den Batterien sind in Tabelle 3 im Anhang (A 5.3 und A 5.4) beschrieben.

Zusammenfassung: Das wartungsfreie alkalische System hat seine Funktionsfähigkeit gezeigt. Elektrofahrzeuge für kürzere Reichweiten könnten gut mit diesem System betrieben werden. Es bestehen keine prinzipiellen Sicherheitsbedenken. Die Schnellladung eröffnet bei entsprechender Infrastruktur zusätzliche Möglichkeiten. Die Einbausituation, die Luftkühlung und das Lademanagement bedürfen noch Verbesserungen. Einzelne Zellen mußten

erneuert oder überarbeitet werden. Aussagen zur Lebensdauer der Batterie können derzeit noch nicht getroffen werden.

5.5.2 Zebra-Batterien

Fahrzeuge mit Zebra-Batterien konnten auf Grund der Liefersituation erst ab Mitte 1994 am Feldtest auf Rügen teilnehmen. Die zwei Batterien waren ursprünglich als dreisträngige Ausführungen, Z5 mit 188V und Z6 mit 100V, in Reihe geschaltet.

Anfänglich lagen Probleme vorwiegend in der Elektronik und der Software der Batteriesteuengeräte, BSG. Die Kommunikation zwischen den BSG's führte auch oft zu Ausfällen.

Zwischen 3000 und 20 000 km traten einzelne Zelldefekte in den Batterien auf. Aufgrund der unterschiedlichen Spannungen der drei parallel geschalteten Zellstränge traten Ausgleichsströme innerhalb der Batterie auf, die zu Überladungen und Tiefentladungen einzelner Zellen führten. Nach einigen weiteren tausend Kilometern waren die Batterien nicht mehr einsetzbar. Batterien mit unterschiedlichen Ladezuständen wurden vom BSG detektiert. Auftretende Störungen führten zum Entzug der Entladefreigabe, der DC/DC-Wandler zur Versorgung des 12V-Systems schaltete ab und die Bordbatterie wurde entladen.

Es zeigte sich, daß in dieser Verschaltung einzelne Batterien des Systems nicht ausgetauscht werden konnten. Neue Batterien mit abweichendem Innenwiderstand können nur mit mehreren Ausgleichsladungen über einen längeren Zeitraum in das bestehende System eingefügt werden.

Nur ein Fahrzeug fährt noch in dieser Verschaltung ohne Zelldefekt, mit 26774 km Laufleistung und dem ersten Batteriesatz.

Nach diesen negativen Erfahrungen mit der Reihenschaltung dieser Batterien erfolgte ein Umbau von vier Fahrzeugen auf Batterien in Parallelschaltung. Dadurch können Ausgleichsströme bei unterschiedlichen Zell- und Ladezuständen mittels zwischengeschalteter Schütze verhindert werden.

Die Tabelle 4 im Anhang beschreibt die Arbeiten, die im Zusammenhang mit den Batterien durchgeführt wurden.

Zusammenfassung: Die Batterie zeigt ein hohes Potential für den zukünftigen Einsatz in Elektrofahrzeugen, die täglich größere Strecken zurücklegen. Das Konzept des ursprünglich erprobten Systems hat sich, aufgrund unzureichender Zuverlässigkeit nicht bewährt. Ergebnisse der derzeitigen Verschaltung stehen noch aus. Die Hard- und Software des Batteriemanagementsystems ist noch in vielen Details verbesserungswürdig.

5.6 Antriebssystem

Alle Opel Fahrzeuge im Feldtest waren mit dem gleichen Antriebssystem der Fa. Siemens ausgerüstet. Der eingesetzte Umrichter ist zwar in vielen Fahrversuchen auf das Fahrzeug abgestimmt, dennoch treten gelegentlich Abschaltungen des Antriebs auf. Die Regelung des Antriebs kann bei extremen Drehmomentänderungen, wie durchdrehenden und plötzlich greifenden Rädern nicht folgen und schaltet ab. Bei weiterentwickelten Steuerungen mit leistungsfähigeren Prozessoren treten diese Probleme nicht mehr auf.

Im Verlauf des Tests zeigten nur der DC/DC-Wandler und die Vorladeschaltung der Zwischenkreiskondensatoren einige Ausfälle.

Der Asynchronantrieb hat sich sowohl bezüglich Fahrkomfort als auch Zuverlässigkeit bewährt. Aussagen zu Wirkungsgraden und Ausnutzung sind im Berichtsteil Datenerfassung nachzulesen.

5.7 Komponenten

Im nachfolgenden Abschnitt werden die weiteren elektrofahrzeugspezifischen Komponenten bezüglich Erfahrungen, Zuverlässigkeit und Ausfällen behandelt.

5.7.1 Ladegeräte

Die Ladegeräte verursachten anfänglich erheblichen Wartungsaufwand. Sicherungen, die mit ihren Nennwerten betrieben wurden, führten wie auch Bauteile der Eingangsschutzbeschaltung bei allen Geräten im Verlauf des Tests zu Ausfällen und wurden gegen thermisch stabilere Typen getauscht.

Gegen Ende des Tests traten weit weniger Defekte an den Geräten auf.

Speziell bei Ladegeräten mit sehr langen Einschaltzeiten muß besonderer Wert auf Langzeit-stabilität der eingesetzten Bauteile gelegt werden.

5.7.2 DC/DC - Wandler

Die Fahrzeuge sind zur Versorgung des Meßsystems und der ständigen Verbraucher mit dem permanent arbeitenden kleinen DC/DC-Wandler zur Stützung des Bordnetzes ausgestattet. Die hochintegrierten Bausteine mit besonderer Regel- und Filterbeschaltung arbeiteten sehr zuverlässig. Es trat nur ein Leiterbahnbruch auf.

5.7.3 Standheizungen

Die ursprünglich eingesetzten Diesel - Standheizungen waren sehr unzuverlässig. Sie wurden alle ausgetauscht. Die Sonderentwicklung, mit eigener Kraftstoffpumpe zeigt auch heute noch oftmals Startprobleme und entwickelt teilweise erhebliche Mengen Rauch bei

der Abschaltung. Eine Eigenschaft, die besonders beim Elektroauto auf Unverständnis stößt und auch von den Nutzern stark kritisiert wird.

In diesem Bereich sind Verbesserungen zwingend notwendig.

5.7.4 Sonstige Komponentendefekte

Eine Kabeltrommel hatte defekte Schleifkontakte. Sonst traten nur noch Fehler durch Mißbrauch wie z.B. gewaltsames Ziehen am Kabel auf.

Der Fehlerstromschutzstecker (FI) erwies sich empfindlich gegen mechanische Beanspruchung. Die Schäden lassen sich auf heruntergefallene Stecker zurückführen. Dieses Steckersystem ist nur bedingt für den KFZ-Einsatz geeignet.

In der ersten Zeit des Tests traten in verschiedenen Anwendungen, wie bei den Ladegeräten beschrieben, Sicherungsdefekte durch deren Überlastung auf. Die Sicherungen aus Standardanwendungen mußten für den Einsatz im Kraftfahrzeug besonders ausgewählt werden.

Fehler im Kabelsatz und dessen Steckverbinder sind auf den Aufbau als Prototypen in wenig automatisierter Handarbeit zurückzuführen.

5.8 Service

Vor Auslieferung der ersten Fahrzeuge, im Februar 1993, wurde ein KFZ-Elektriker der zuständigen Opel - Vertragswerkstatt eine Woche in Rüsselsheim für den Service auf Rügen ausgebildet. Ein Werkstatthandbuch zur Behandlung elektrofahrzeugspezifischer Besonderheiten wurde erstellt.

In Zusammenarbeit mit der Fa. DAUG waren kleinere Reparaturen kurzfristig auf Rügen durchzuführen.

Umfangreichere Reparaturen und Umbauten wurden weiterhin vom Personal aus Rüsselsheim in der Werkstatt der Fa. DAUG auf Rügen ausgeführt. Im Verlauf des Tests fanden darüber hinaus 16 Servicefahrten nach Rügen statt.

Einzelne Reparaturen konnten meist schnell behoben werden. Zeitaufwendig gestaltete sich auf Rügen der Umbau im Rahmen von Modifikationen aller Fahrzeuge eines Typs aufgrund gesammelter Erfahrungen während des Fahrzeugbetriebs, z. B. der Ausbau aller Batterien für Servicezwecke. Diese Arbeiten wurden je nach Dringlichkeit sukzessive ausgeführt.

Falls Teile an die jeweiligen Hersteller zur Reparatur gesandt werden mußten, entstanden oft lange Transport- und Ausfallzeiten. Kapazitätsengpässe des Personals auf Rügen zur Fehlersuche und Behebung führten zu nicht vernachlässigbaren Standzeiten der Fahrzeuge.

Der Service der Batterien wurde auch oftmals vom Batteriehersteller vor Ort an den Fahrzeugen durchgeführt.

5.9 Ergebnisse, Betriebserfahrungen und technische Modifikationen

Bereits im Verlauf der Tests wurden viele Teile auf Grund der gemachten Erfahrungen verbessert.

5.9.1 Fahrzeug

- Anbau eines Spritzwasserschutzes für Batteriecontroller der Zebra Batterie
- Verbesserter Wasser- und Straßensalzschutz der Leitungsverlegung
- Einbau einer verbesserten Standheizung
- Modifikation und Gewichtsverbesserung des Heiz- Kühlsystems durch Mehrfachnutzung eines Ausgleichsbehälters
- Geänderte Leitungsführung der Leistungsverkabelung und Erprobung von Batteriehauptschützen bei parallelgeschalteten Batteriesätzen
- 12V Bordnetz bei Zebra-Batterien redundant versorgt
- Vereinfachung der Zugänglichkeit serviceintensiver Komponenten

5.9.2 NiCd

- Einbau einer Ladegerätabschaltung bei Übertemperatur der Batterie
- Ausrüstung der Einzelzellen mit einem Zellspannungs-Überwachungssystem mit Abschaltung des Antriebs im Störungsfall
- Änderung der Luftführung, Montage von Luftleitblechen.
- Anpassung der Einschaltzeiten der Luftkühlung
- Softwaremodifikation zur Optimierung des Energieverbrauchs und des Batterieverhaltens unter verschiedenen Einsatzbedingungen
- Verbesserung der oberen Ladeanfangstemperatur

5.9.3 Zebra

- Parameteroptimierung der Software zur Optimierung des Energieverbrauchs und der Zuverlässigkeit unter verschiedenen Einsatzbedingungen.
- Software mit Fehlerspeicher zur Erleichterung der Diagnose
- Einbau eines Alarmgebers für außerordentliche Betriebszustände der Batterie
- Parallelschaltung von zwei Batterien mit einzelnen Hauptschützen

5.10 Ergebnisse

In Kapitel 5.9 wurden die bei diesen Fahrzeugkonzepten umgesetzten Verbesserungen bereits beschrieben. Bei zukünftigen Entwicklungen sollten noch folgende Punkte berücksichtigt werden.

5.10.1 Fahrzeugnutzung

Die Fahrzeuge zeigen bei regelmäßiger Nutzung mit Ladung über Nacht eine hohe Zuverlässigkeit und werden von den Nutzern als „Erstfahrzeuge“ betrachtet. Nach kurzer Gewöhnungszeit kamen die meisten Nutzer gut mit den Eigenschaften des Elektrofahrzeugs zurecht. Die Auswirkungen von ungünstigem Gebrauch, wie seltenen Nachladungen und langen Standzeiten müssen noch über Kontrollsystme bestmöglich abgefangen werden.

5.10.2 NiCd - Batterien

Der Einbau der Batterien sowie die Luftkühlung müssen noch weiter entwickelt werden. Eine Verringerung des Isolationswiderstands durch eingetragenen Schmutz und durch Straßen-salz muß soweit möglich verhindert werden.

Durch intelligenteres Batteriemanagement muß der Ladefaktor weiter optimiert werden. Die Selbstentladung muß möglichst verringert werden.

5.10.3 Zebra - Batterien

In Fahrzeugen mit großer täglicher Fahrleistung ist dieses System gut geeignet. Die Zuverlässigkeit der peripheren Geräte wie Batteriecontroller, Kommunikationseinrichtungen und Schütze muß gesteigert werden. Insbesondere die Erkennung von i.a. unkritischen Zuständen, wie Zelldefekten sollte zu einer automatischen Parameteranpassung führen.

Die Batterie ist durch Ihre Eigenschaft niederohmiger defekter Zellen fehlertolerabel. Dennoch ist eine einheitlich hohe Qualität, wie sie durch Serienfertigung erzielbar scheint, notwendig.

5.11 Meßtechnik und Datenerfassung

Obwohl die Datenerfassung bereits beim Entwurf berücksichtigt wurde, traten bei deren Betrieb anfänglich erhebliche Schwierigkeiten auf. Der Abgleich der Kanäle, Behebung von Beeinflussung durch andere Komponenten sowie die Erstellung automatisierter Datenauswertungssoftware erforderte viel Aufwand. Die Meßtechnik mußte mehrmals an neue Datenerfassungsaufgaben angepaßt werden.

Der Stromverbrauch des Meßgerätes belastet auch die Bordbatterie. Es mußte eine permanente zusätzliche Versorgung des Bordnetzes eingebaut werden, die selbst in der Energiebilanz zu berücksichtigen war. Weitere Informationen, siehe Berichtsteil Datenauswertung.

5.12 Zusammenfassung, Bewertung

Antriebe und Komponenten haben sich prinzipiell bewährt und ihre Funktionsfähigkeit bewiesen. Es sind vielfältige Verbesserungen in Details notwendig. Die Integration der verwendeten Komponenten, wie Ladegerät, Antrieb und DC/DC-Wandler zeigt Perspektiven zur Gewichtseinsparung. Verbesserte Ladealgorithmen und Verringerung des Energieverbrauchs peripherer Komponenten sowie Steigerung der Batterieeffizienz sind die wichtigsten Schritte zu weiterer Energieeinsparung. Die Verwendung von einer Batterieeinheit lässt darüber hinaus erhebliche Energie- und Kosteneinsparungen sowie gesteigerte Batterielebensdauer erwarten.

Regelmäßige Nutzung der Elektrofahrzeuge hat sich im Verlauf des Tests als vorteilhaft erwiesen. Nach Aussage der Nutzer sind Elektrofahrzeuge für ihren alltäglichen Betrieb vollkommen ausreichend. Sie werden sogar als Erstfahrzeug betrachtet, wenn ein konventionelles Zweitfahrzeug zur Verfügung steht.

Viele aufgetretene Fehler sind auf das Prototypenstadium der Fahrzeuge zurückzuführen. Die Zuverlässigkeit der elektrofahrzeugspezifischen Komponenten wurden im Verlauf des Tests erheblich verbessert. Nach dem bisherigen Verlauf können noch keine Aussagen zur Lebensdauer der Batterien und zur Dauerhaltbarkeit der Komponenten getroffen werden. Die Adam Opel AG betreibt alle Fahrzeuge auch nach dem offiziellen Ende des Tests weiter.

5.13 Status zum 30.06.96

Fzg. Nr.	Nutzer	km-Stand 30.06.96	Status 30.06.96
OP32	Ing.-Büro Schwanck	23056	i.O., Z6 zellreduziert, tägl. Einsatz
OP33	Landratsamt Bergen	31636	i.O., keine Defekte, tägl. Einsatz
OP34	Elektro Rosenow	38338	i.O. Batterie Z6 zellreduziert tägl. Einsatz
OP35	RPNV, Fr. Förster	32798	i.O., Orig. Reihen-Batteriesatz, kein Defekt
OP36	Wäscherei Sagert	34615	i.O. Batterien Z5 und Z6 zellred., tägl. über 150 km
OP37	Kurverwaltung Binz	24816	i.O. regelm. Nutzung, eine Zelle stillgelegt
OP38	Ordnungsamt Binz	34500	i.O. sehr guter Batterie-zustand, tägl. Einsatz
OP39	Autohaus Schröter	27174	i.O. Guter Batteriezustand, regelmäßige Nutzung
OP40	Hevag	20787	i.O. Guter Batteriezustand, tägl. geringe Nutzung
OP41	Kurverw. Middelh.	45864	i.O., eingeschränkte Reich-weite, tägl. Nutzung.
	Gesamt	313584	

6. Volkswagen

6.1 Citystromer

Der Golf Citystromer, ein ausgereiftes Fahrzeug mit allen Sicherheitsaspekten, ist als Stadtfahrzeug besonders geeignet. Der Citystromer wurde so konzipiert, daß verschiedene Batteriesysteme im Fahrzeug verwendet werden können. Dieses Sonderfahrzeug wird als Kleinserie direkt an der Fertigungsstrecke gefertigt.

6.1.1 Fahrzeugaufbau

Der Golf ist als Zweitürer mit der CL-Version mit folgenden Veränderungen zum Citystromer umgestaltet worden:

- Hinterachse
- Bodengruppe
- Kofferraum
- Kabelbaum
- Kombiinstrument
- Lenkhilfe
- Servobremse
- Heizung

Besonderer Schwerpunkt wurde auf die Gewichtsverteilung der Batteriemodule im Fahrzeug gelegt.

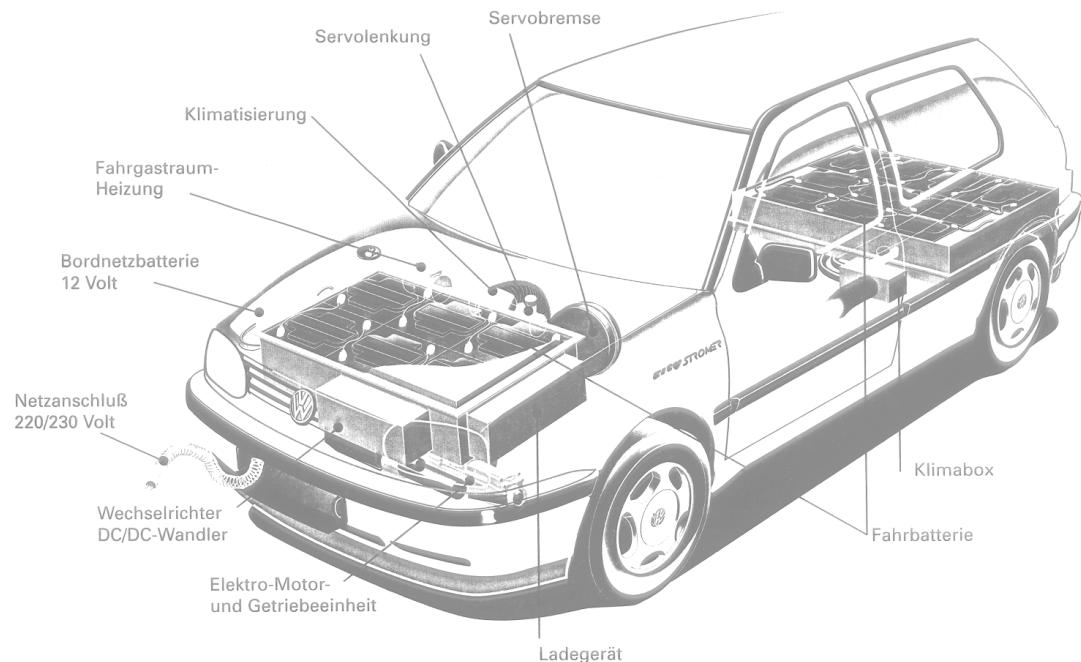


Bild 1: Aufbau Golf Citystromer

6.1.2 Auslieferung der Fahrzeuge

Fzg.-Nr.	Fzg.-Herstellung	Batterie-Lieferung	Auslieferung
42	April 1994	Juni 1994	August 1994
43	März 1993	Mai 1994	August 1994
44	März 1993	Mai 1993	Juni 1993
45	März 1993	März 1994	Mai 1994
46	Juni 1992	Juli 1992	August 1992
47	April 1993	Dez. 1994	Februar 1995
48	März 1993	März 1994	Mai 1994
49	März 1993	Mai 1994	August 1994
50	April 1993	Dez. 1994	Februar 1995

6.1.3 Fahrzeugeinsatz

Fahrzeug-Nr. 42: Einsatz beim Energiewirtschaftsunternehmen HEVAG in Sagard

Das Fahrzeug war als Dienstfahrzeug zwischen den einzelnen Außenstellen der Energieversorgung von Rügen eingesetzt (Normale Pkw-Anwendung). Mit Zwischenladungen sind tägliche Fahrstrecken über 100 km zurückgelegt worden. Das Fahrzeug wurde in der gesamten Projektlaufzeit stets gepflegt.

Fahrzeug-Nr. 43: Einsatz beim Landratsamt in Bergen

Das Fahrzeug wurde dem Fuhrpark des Landratsamtes zugeordnet und ist je nach Fahrstreckenanfall verschiedenen Fahrern zugeteilt worden. Der Einsatz konnte hinsichtlich der möglichen Reichweite jedoch nicht immer optimal erfolgen.

Fahrzeug-Nr. 45: Einsatz im Außendienst eines Verlagsvertreters

Das Fahrzeug wurde überwiegend von einem Ehepaar genutzt. Die Fahrstrecken sind durch die Tätigkeit bedingt sowohl in der Stadt als auch über Land abwechselnd je nach Bedarf gefahren worden. Das Fahrzeug wurde verantwortungsbewußt genutzt.

Fahrzeug-Nr. 46: Meßfahrzeug bei HTW-Dresden, Forschungsinstitut für Fahrzeugeotechnik

Das Fahrzeug wurde als Meßfahrzeug dem Forschungsinstitut für die Inbetriebnahme der gesamten Fahrzeugmeßtechnik, Auswertungen sowie der Erprobung der erstellten Klassiersoftware zur Verfügung gestellt. Die Reichweite des Fahrzeuges stand hier nicht im Mittelpunkt.

Fahrzeug-Nr. 47: Einsatz als Zustellfahrzeug der Deutschen Post AG

Das Fahrzeug ist im harten Alltag der Postzustellung über Land auf Rügen eingesetzt worden. Diese Anwendung stellt sehr hohe Anforderungen an das allgemeine Fahrzeug. Eine Geländeausführung ist bei den Wegeverhältnissen notwendig. Bei festgelegten Streckenführungen konnte die optimale Reichweite nicht ausgenutzt werden.

Fahrzeug-Nr. 48: Einsatz im Biosphärenreservat Südost-Rügen

Das Fahrzeug ist als umweltfreundliches Fahrzeug vor Ort im Biosphärenreservat zu allen möglichen Anwendungen benutzt worden. Der Einsatz im Gelände stellte an das Fahrzeug hohe Ansprüche.

Fahrzeug-Nr. 49: Einsatz in einem Versorgungsnetz von dezentralen Lebensmitteldepots

Das Fahrzeug wurde mit seiner größeren Reichweite optimal in den betrieblichen Ablauf eingebunden. Auf den einzelnen Camping- und Wochenendgebieten war der Einsatz eines Elektrofahrzeuges besonders gern gesehen.

Fahrzeug-Nr. 50: Einsatz als Zustellfahrzeug der Deutschen Post AG

siehe Fahrzeug-Nr. 47

6.1.4 Technische Daten des Golf-Citystromers

Fahrzeug:

	Golf A3	Golf A3	Golf A3
Fzg.-Nr.:	42, 44, 46	45, 48	43, 49, 47, 50
Leergewicht:	1480 kg	1300 kg	1220 kg
Zuladung:	320 kg	320 kg	320 kg

Antrieb:

Motortyp	Synchronmotor	dito	dito
Hersteller	Siemens	dito	dito
Dauerleistung	18 kW	dito	dito
Nenndrehmoment	75 Nm	dito	dito
max. Drehmoment	75 Nm	dito	dito

Getriebe:

Anzahl der Gänge:	5	5	5
-------------------	---	---	---

Energiespeicher:

Batterietyp	Pb - Gel	Ni/Cd	Na/NiCl ₂
Hersteller	VARTA/Sonn.	DAHO	AABG
Spannung	96 V	130 V	186 V 142 V
Nennenergie	11,4 kWh	14,4 kWh	22 kW 17 kW
Nennkapazität	160 Ah	100 Ah	136 Ah 120 Ah
Zellenanzahl	48 (16 Module)	108	288 228
Anordnung im Fahrzeug	vorn und hinten	vorn und hinten	hinten hinten

6.1.5 Beschreibung des Antriebssystems

Der Zentralantrieb des Golf-Citystromers besteht aus einem Umrichter, Synchronmotor und einem 5-Gang-Getriebe.

Der eingesetzte Drehstromantrieb, dessen Umrichter und Motor auf Grund ihrer Flüssigkeitskühlung in sehr kompakter Ausführung gefertigt ist, konnte im Fahrzeug relativ service-freundlich untergebracht werden.

Der Drehstrommotor wird über einen Umrichter gespeist, der mit Leistungstransistoren und Freilaufdiode aus der Batteriespannung ein Drehspannungssystem variabler Amplitude und Frequenz generiert. Dieses System mit dem direktangeschalteten 5-Gang-Seriengetriebe ermöglicht eine optimale Energieausnutzung der Batterie mit hohem Wirkungsgrad in mechanischer Antriebsleistung umzuwandeln.

Eine Rückgewinnung der Energie bis zu 15 % durch Nutzbremsung erhöhte die mögliche Reichweite pro Ladung nicht unerheblich.

6.1.6 Betriebserfahrungen

Batteriesystem Pb-Gel

Durch produktionsbedingte Mängel der einzelnen Batteriemodule wurde die gesamte Batterie nach ca. 2000 km getauscht. Nach dem Wechsel sind keine Beanstandungen der einzelnen Module aufgetreten. Der Einbauort der Klimabox für den hinteren Trog war bei schlechten Straßenverhältnissen nicht genug geschützt und wird bei Bodenberührung beschädigt, wobei dann die Ladung der Traktionsbatterie unterbrochen wird.

Batteriesystem Ni/Cd

Um eine Tiefentladung der einzelnen Zellen zu verhindern, ist an allen Systemen eine Spannungsüberwachung nachträglich installiert worden. Die Batteriesysteme funktionierten bis zur Veränderung des Ladeverfahrens weitgehend störungsfrei. Nach Änderung ging zwar der Energieverbrauch zurück, die Vergleichsmäßigung der Zellen im Batterieverband war jedoch unbefriedigend. Die Reichweite mit einer Volladung ging zurück.

Batteriesystem Na/NiCl₂

Die beiden Batteriesysteme (Z8) zeigten im Feldversuch keine auffälligen Störungen. Auch ein ungewolltes Abkühlen der Batterie (Fahrzeug 1 Woche nicht an der Steckdose) bereitete keine Probleme beim Wiederaufheizen und anschließenden Laden.

Das Batteriemanagement ist bei den ersten gelieferten Batterien mit einem zusätzlichen Verlängerungskabel an einem servicefreundlicheren Ort verlegt worden.

Die später hinzukommenden Batteriesysteme Z5 mit Luftkühlung (Ersatz für Na/S-Batterie) sind auch im hinteren Trog des Fahrzeuges untergebracht. Bei einer Batterie wurde nach einer Laufzeit von ca. 6.000 km ein Vakuumverlust festgestellt. Beim Abkühlen der Batterie durch das Service-Team ist durch einen Softwarefehler die Batterie durch Kaltbelastung innerlich zerstört worden. Das System wurde kurzfristig getauscht und zeigte keine Auffälligkeiten.

Antrieb

Der verwendete Antrieb wie unter 6.1.5 beschrieben, zeigte keine Auffälligkeiten. Bei zwei Umrichtern, die mit einem nachgemeldeten Fabrikationsfehler geliefert wurden, sind erst nach Auftreten der Störung im Feldversuch die entsprechenden Nachrüstarbeiten durchgeführt worden. Die Störung äußerte sich durch fehlerhaftes Ansteuern des Motorfeldes.

12 V-Bordnetz

Durch den Einsatz der Meßtechnik wurde auch die Bordbatterie im Ruhezustand des Fahrzeugs belastet (ca. 700 mA). Der DC/DC-Wandler ist nur im Fahrbetrieb sowie in der Ladephase der Traktionsbatterie in Betrieb, da davon ausgegangen worden ist, daß kein Verbraucher bei ausgeschaltetem Fahrzeug die Bordbatterie belastet. Als Abhilfe ist ein Hilfs-DC/DC-Wandler von 1 Ampere zusätzlich eingebaut worden.

Fahrzeugheizsystem

Da zur Zeit keine ausreichende Wärmequelle zur Beheizung zur Verfügung steht (Motorwärme durch Verluste reicht nicht), ist beim Golf Citystromer die serienmäßige 5 kW Warmwasser-Standheizung der Fa. Ebersbächer verwendet worden. Bei stark veränderten klimatischen Verhältnissen vor Ort traten trotz Einsatz der Serienheizung Anlaufschwierigkeiten der einzelnen Systeme auf.

Fahrzeug allgemein

Die Fahrzeuge vor Ort wurden durch die Straßenverhältnisse einer Belastung unterzogen, die bei normalem Stadtfahrzeugen nicht der Regel entspricht (stark beschädigte Kopfsteinpflasterstraßen zwischen den Orten, schmale Betonstreifen mit seitlichen Absätzen bis zu 30 cm sowie ausgefahreneren Sandwege mit Schlaglöchern so groß, daß die Bodenwanne aufsetzt). Häufige Schäden an Fahrzeugrädern sowie Beschädigungen an der Bodengruppe und Karosserie waren die Folge. Die Aufhängung der Tröge, Motor und der elektrischen Komponenten hatte keine Schäden durch die extremen Belastungen aufgezeigt.

Die Unterbringung der Ladekabel hat sich nicht bewährt und ist daher bei einigen Fahrzeugen geändert worden. Der Stauraum ist um ein Vielfaches vergrößert worden, um das

Spiralkabel besser aufzunehmen zu können. Der angegossene Schukostecker hat den Belastungen nicht standgehalten und mußte an mehreren Fahrzeugen gewechselt werden.

6.1.7 Service

Der direkte Service vor Ort wurde von den Mitarbeitern der DAUG-Zirkow mit Unterstützung der Projektgruppe DAUG-Braunschweig auch in den Fällen größeren Arbeitsaufwandes jederzeit gewährleistet. Trotz Kapazitätsengpässen im personellen Bereich stand bei Fahrzeugproblemen jeglicher Art primär der Betreiber im Vordergrund. Auch in den administrativen Abläufen war stets eine gute Zusammenarbeit gewährleistet. Bei speziellen Servicearbeiten und speziellen Fahrzeugüberprüfungen wurde eine Mannschaft von Volkswagen direkt aus dem Forschungszentrum Wolfsburg eingesetzt. Trotz Beschränkung auf ein Mindestmaß, ist der anfallende Serviceaufwand auf Rügen größer gewesen, als bei Projektanfang geplant wurde.

6.1.8 Zuverlässigkeit der Komponenten

Das Projekt zeigte, daß Fahrzeuge, die nicht als Serienfahrzeuge gefertigt werden, sehr störanfällig sind. Weiterhin zeigte dieser Feldversuch, daß nicht nur die Elektrokomponenten störanfällig waren, sondern daß im Mittel ca. 30 % der Standzeiten der Fahrzeuge durch Ursachen von allgemeinen Fahrzeugkomponenten hervorgerufen wurden.

Antriebssystem

Das Antriebssystem von Siemens ist außer den zwei Fertigungsfehlern im gesamten Zeitraum sehr stabil und ohne weitere Ausfälle gelaufen. Dieses Antriebssystem war sehr zuverlässig mit den jeweiligen Batteriesystemen im Einsatz.

Batteriesystem Pb-Gel

Nach anfänglichen Produktionschwierigkeiten war die Pb-Gel-Batterie ohne besondere Wartung im Einsatz. Die Klimabox belüftete die Tröge und heizte bei niedrigen Temperaturen die Batteriemodule, wobei hier noch die Isolierung der Tröge wesentlich verbesserungsfähig ist.

Batteriesystem Ni/Cd

Die Zellen der Batterie sind im Golf liegend gelagert. Sie haben trotz der Einbaulage keinen Elektrolytverlust aufgezeigt. Die Zellenungleichmäßigkeiten sind erst mit der geänderten Ladestrategie aufgetreten. Des weiteren zeigt es sich wieder, daß die Batterie nach Möglichkeit immer leer gefahren werden sollte.

6.1.9 Ergebnisse

Antrieb

Der von Volkswagen verwendete Antrieb zeigte sich im Feldversuch als sehr stabil und zuverlässig. Die Abstimmung mit dem 5-Gang-Getriebe spiegelt sich im positiven Verbrauch des Fahrzeuges wieder. Die Einstellung der rückgespeisten Energie kann im Einzelfall noch erhöht werden.

Kilometerleistung der Fahrzeuge

Fzg.-Nr.	km-Leistung
42	27.504 km
43	28.170 km
44	16.175 km
45	18.725 km
46	Meßtechnikfahrzeug in Dresden
47	13.061 km
48	14.318 km
49	33.032 km
50	6.570 km
Gesamte Laufleistung der Fzg.	
157 555 km	

6.1.10 Meßtechnik und Datenerfassung

Schon beim Bau der Fahrzeuge wurden die Komponenten für die meßtechnische Konfiguration in Abstimmung mit der HTW-Dresden berücksichtigt. Einzelne Veränderungen wurden bei speziellen Komponenten durch HTW im SETUP b erücksichtigt.

Die angefallenen Datenmengen konnten mit der Klassiersoftware der HTW gut verarbeitet werden. Einige notwendige Korrekturen der angepaßten Meßkomponenten konnten durch die kurzfristige Auswertung der Daten geändert werden. Die Auswertung der gesamten Datenmengen über den Einsatzzeitraum der Fahrzeuge werden wichtige Erkenntnisse für die Weiterentwicklung der E-Fahrzeug-Komponenten ergeben.

6.2 Elektro - Van

Der Elektro-Van ist ein Fahrzeugkonzept für Innenstädte, Kurzonen, Verteilerbetriebe und innerbetrieblichen Transport. Als Caravelle für den Personenverkehr ist er mit seiner Antriebsanlage und seinem wartungsfreien Batteriesystem speziell für die Anwendung im innerstädtischen Kurzstreckenverkehr entwickelt worden. Die Fahrleistungen wurden im Hinblick auf möglichst geringen Energieverbrauch so festgelegt, daß problemloses Mitschwimmen im innerstädtischen und stadtnahen Verkehr möglich ist. Die Bedienung des Fahrzeugs mit 5-Ganggetriebe ist ähnlich der eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor, erfordert also keine besondere Eingewöhnung.

6.2.1 Fahrzeugaufbau

Der Elektro-Van ist als Caravelle mit folgenden Veränderungen umgestaltet worden:

- Hinterachse
- Rohkarosse
- Kabelbaum
- Hinterachse
- Servobremse
- Lenkhilfe
- Kombiinstrument
- Heizung

Besondere Schwerpunkte wurden auf die Gewichtsverteilung mit gleichmäßiger Belüftung der Batteriezellen gelegt.

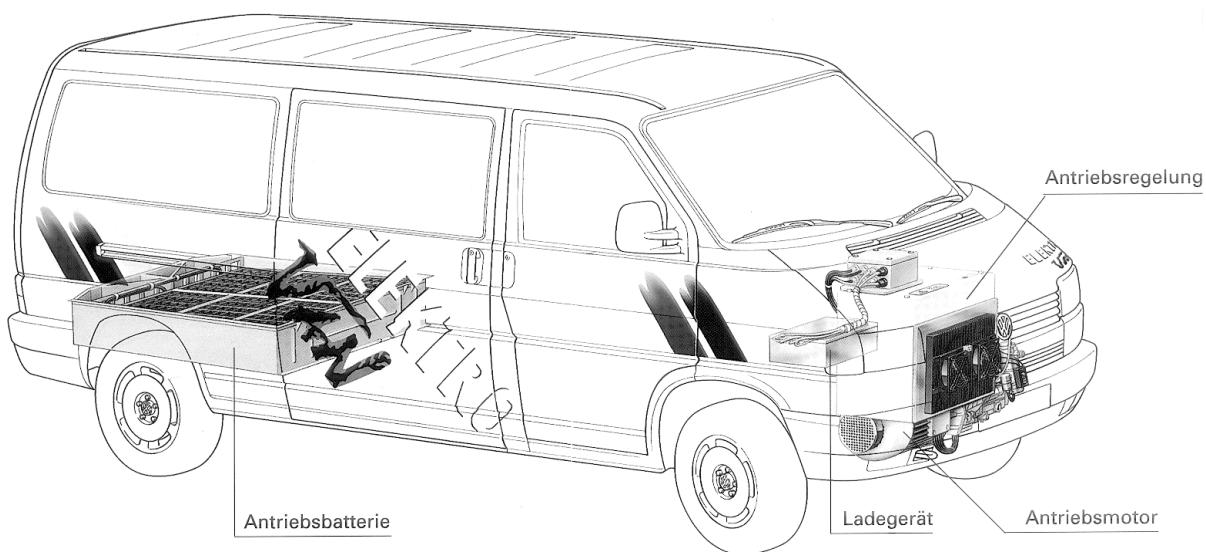


Bild 2: Aufbau Elektro-Van

6.2.2 Auslieferung der Fahrzeuge

Fzg.-Nr.	Fzg.-Herstellung	Batterie-Lieferung	Auslieferung
51	Februar 1993	Februar 1993	19. Mai 1993
52	Februar 1993	Februar 1993	29. Mai 1993
53	Februar 1993	Februar 1993	29. Juni 1993
54	März 1993	März 1993	29. Juni 1993
55	März 1993	März 1993	13. Juli 1993
56	April 1993	April 1993	3. September 1993
57	April 1993	Juni 1993	21. Januar 1994
58	Mai 1993	Juni 1993	11. Februar 1994
59	Mai 1993	Juli 1993	11. Februar 1994
60	Mai 1993	Juli 1993	11. März 1994

6.2.3 Fahrzeugeinsatz

Fahrzeug-Nr. 51: Einsatz bei der DLRG

Das Fahrzeug wurde bei der DLRG in Binz zum Transport von Rettungsschwimmern zu den einzelnen Aufsichtsstationen am Badestrand eingesetzt. Die Personen- sowie Materialverteilung erfolgte mehrmals am Tag. In den Pausen wurde die Batterie ständig nachgeladen. Durch den häufigen Einsatz pro Tag wurde eine hohe Kilometerleistung mit dem Fahrzeug erzielt. Für Rettungszwecke ist das Fahrzeug aus Sicherheitsgründen nicht eingesetzt worden.

Fahrzeug-Nr. 52: Einsatz im Jugenddorf Garz

Für das Jugenddorf konnte der Elektro-Van mit seinen sieben Sitzplätzen zum Personentransport optimal eingesetzt werden. Durch die Lage des Jugenddorfs wurden längere Tagesfahrten durchgeführt. Auf die Kilometerleistung wirkte sich dies positiv aus.

Fahrzeug-Nr. 53: Einsatz im IFA Ferienpark Rügen

Im IFA Ferienpark in Binz wurde das Fahrzeug überwiegend zum Personenverkehr zwischen Hotel und Bahnhöfen eingesetzt. Bei Ausflügen wurden mit Zwischenladungen (längere Pausen) auch weitere Strecken (80 - 90 km) gefahren.

Fahrzeug-Nr. 54: Einsatz beim Hotel im Seepark Rügen

Fahrzeugeinsatz wie bei Fahrzeug Nr. 52, jedoch häufig bessere Ausnutzung der Batteriekapazität, da die Anlage weiter von den Bahnhöfen sowie den Sehenswürdigkeiten auf Rügen entfernt liegt.

Fahrzeug-Nr. 55: Einsatz bei der Volkssolidarität in Bergen

Das Fahrzeug wurde zur Betreuung von sozial schwachen Menschen innerhalb der Stadt Bergen eingesetzt. Des Weiteren wurde die Möglichkeit der größeren Ladefläche für tägliche Essentransporte (Essen auf Rädern) genutzt. Die tägliche Verfügbarkeit des Fahrzeugs hatte bei dieser Anwendung einen hohen Stellenwert.

Fahrzeug-Nr. 56: Einsatz in der Reha-Ostseeklinik für Mutter und Kind

Der Einsatz des Fahrzeugs wurde besonders in dieser Anlage hinsichtlich der Emissionsfreiheit vor Ort begrüßt. Die Abgeschiedenheit dieser Anlage hatte aber zur Folge, daß die Reichweite des Fahrzeugs nicht genutzt wurde.

Fahrzeug-Nr. 57: Einsatz im täglichen Betrieb des Strandhotels Rügen in Binz

Das Fahrzeug ist überwiegend im innerstädtischen Hotelbetrieb eingesetzt worden. Die Fahrten zu den Bahnhöfen und Sehenswürdigkeiten im nahen Umkreis überwogen auch hier.

Fahrzeug-Nr. 58: Einsatz bei der Gemeinde Putgarten / weiterer Einsatz bei der DAUG-Zirkow

Anders als vorgesehen konnte das Fahrzeug von der Gemeinde aus Wettbewerbsgründen nicht als Personalförderungsmittel eingesetzt werden. Dem Einsatz als Allround-Fahrzeug für Gemeindefarbeiten (Gartengeräte) konnte nicht zugestimmt werden. Ein Nutzerwechsel wurde daraufhin vereinbart.

Die Service-Station der DAUG-Zirkow benötigte ein zusätzliches Fahrzeug mit der Sitzkapazität der Caravelle vor Ort. Des Weiteren wurde nach Errichtung der Schnellladungsstation das Fahrzeug mit dem Batteriesystem Ni/Cd zur Schnellladung eingesetzt.

Fahrzeug-Nr. 59: Einsatz im Nationalpark Jasmund

Ein Naturschutzgebiet ist ein ideales Einsatzgebiet für Elektrofahrzeuge. Das jedenfalls sollte man im ersten Ansatz glauben. Leider sind die Wege im Nationalpark aus der Jahrhundertwende und somit so holperig, daß die einzelnen Komponenten auf das extremste beansprucht wurden. Ausfälle der verschiedenen Komponenten war die Folge der harten Beanspruchung.

Fahrzeug-Nr. 60 Einsatzfahrzeug für die Service-Station DAUG-Zirkow

Das Fahrzeug wurde für die koordinierenden Aufgaben des DAUG-Serviceteams eingesetzt. Fahrten zum Auslesen der Klassierdaten sowie viele Präsentationen von Elektrofahrzeugen und Schnellladungen vor Ort wurden mit diesem Elektro-Van erledigt.

6.2.4 Technische Daten des Elektro-Van

Fahrzeug: **Elektro-Van**

Fzg.-Nr.:	51 - 60
Leergewicht:	2270 kg
Zuladung:	630 kg
Sitzplätze:	7

Antrieb:

Motortyp	Asynchronmotor
Hersteller	ELIN
Dauerleistung	22 kW
Nenndrehmoment	100 Nm
max. Drehmoment	137 Nm

Getriebe:

Anzahl der Gänge:	5
-------------------	---

Energiespeicher:

Batterietyp	Ni / Cd
Hersteller	DAHO
Spannung	228 V
Nennenergie	22,8 kWh
Nennkapazität	100 Ah
Zellenanzahl	190
Anordnung im Fahrzeug	über der Hinterachse

6.2.5 Beschreibung des Antriebssystems

Der Elektroantrieb des Elektro-Van besteht aus einem oberflächengekühlten Asynchronmotor und einem mikrorechnergeregelten Wechselrichter. Dieser verwendet IGBT-Module (Insulated Gate Bipolar Transistor) als Leistungsschalter und erzeugt ein dreiphasiges Drehspannungssystem, das in Frequenz und Amplitude regelbar ist. Die Spannung wird so optimal an die Erfordernisse des Asynchronmotors angepasst.

Am serienmäßigen 5-Gang-Schaltgetriebe angeflanscht, erzeugt das Antriebssystem die erforderliche Zugkraft für den Vortrieb des Fahrzeugs.

Es ist auch in der Lage, Bremsenergie in die Batterie zurückzuspeisen. Hierdurch kann die Reichweite des Elektro-Fahrzeugs erheblich vergrößert werden.

6.2.6 Betriebserfahrungen

Batteriesystem Ni/Cd

Die im Elektro-Van eingesetzten Batteriesysteme der Fa. DAHO verhielten sich ähnlich wie im Golf-Citystromer. Die Batterie ist von der Zellenanzahl größer und die Zelle steht aufrecht im Trog.

Nach anfänglichen Kühlungsproblemen der Batterie konnte durch konstruktive Änderungen der Luftführung die Problematik behoben werden. Bei diesen verwendeten Batterien wurde nach ca. 12.000 - 15.000 km eine Wartung notwendig (Elektrolytverlust).

Antrieb

Der verwendete Antrieb wie unter 6.2.5 beschrieben, zeigte im ersten Jahr wenige Auffälligkeiten. Der Asynchronmotor hat bei allen Umweltbedingungen sowie bei den unterschiedlichsten Laufleistungen der Fahrzeuge keine erkennbaren Störungen gezeigt.

Mit zunehmender Laufleistung der Fahrzeuge traten Störungen (Aussetzer) an mehreren Umrichtern auf. Die Fehler im Umrichter waren überwiegend nicht reproduzierbar, daher mußten die zuständigen Umrichter-Platinen im Tauschverfahren ständig gewechselt werden (Platinen mußten vom Hersteller auf Fehler überprüft und gegebenenfalls repariert werden).

Am Fahrzeug Nr. 60 traten Mitte 1995 während der Fahrt an den internen Anschlüssen des Umrichters so große Übergangswiderstände auf, daß die Anschlußklemmen verdampften und somit der gesamte Umrichter unbrauchbar wurde. Eine Reparatur des Umrichters war nicht mehr möglich.

Lenkung

Bei den ersten Fahrzeugen wurden für die Elektro-Mechanischen-Lenkungen ungekapselte Motore verwendet. Diese zeigten im Einsatz hohe Verschleißerscheinungen durch Feuchtigkeit und Schmutz. Nach Wechseln der betreffenden Lenkungen wurden keine Beanstandungen mehr registriert.

6.2.7 Service

Der Service vor Ort war auch bei den Elektro-Vans wie unter 6.1.7 beschrieben. Durch die spätere Häufigkeit der Umrichterstörungen wurde die Kapazität des Teams sehr strapaziert, (Holen von Liegenbleibern).

6.2.8 Zuverlässigkeit der Komponenten

Bremsanlage

Bei einigen Fahrzeugen mußte der Unterdruckschalter für die Bremsanlage gewechselt werden. Die Baureihe der Schalter ist anfällig gegen Feuchtigkeit und wurde zum späteren Zeitpunkt gegen eine neues Modell ausgetauscht.

Lenkung

Die verwendete Elektro-Mechanische-Lenkung hat sich bei diesen Fahrzeugen besonders bewährt. Die geringe Stromaufnahme (1/7 einer Hydraulikpumpe) kommt der Reichweite zugute.

Antrieb

Wie unter 6.2.6 beschrieben, hat sich der robuste Asynchronmotor sehr stabil verhalten. Mit zunehmender Laufleistung traten extreme Störungen im Umrichter auf, welche zu häufigen, plötzlichen Ausfällen der Fahrzeuge führten. Dadurch ergaben sich hohe Standzeiten der Fahrzeuge im Jahr 1995. Drei Fahrzeuge konnten aufgrund dieser Aussetzer nicht mehr im Feldversuch eingesetzt werden, da die notwendige Sicherheit nicht mehr gewährleistet war.

Batteriesystem Ni/Cd

siehe 6.1.8

Fahrzeug allgemein

Die Fahrzeuge haben sich im Praxistest sehr bewährt und hatten trotz des hohen Gewichtes (Batteriegewicht 520 kg) keine Ausfälle. Durch die Überlänge der Fahrzeuge (Langer Radstand), benötigten die Nutzer besondere Hinweise.

6.2.9 Ergebnisse

Kilometerleistung der Elektro-Vans

Fahrzeug-Nr.	km-Leistung
51	42.863 km
52	17.597 km
53	22.718 km
54	23.582 km
55	18.260 km
56	14.852 km
57	15.058 km
58	19.533 km
59	20.094 km
60	10.772 km
Gesamte Laufleistung der Fahrzeuge	205.329 km

6.2.10 Meßtechnik und Datenerfassung

siehe Punkt 6.1.10

6.2.11 Versuchsbewertung

Das geförderte Forschungsprojekt auf Rügen liefert den Fahrzeugentwicklern Daten über die eingesetzten Komponenten. Diese Daten, die im Alltagstest bei den schwierigsten Umgebungsbedingungen aufgezeigt wurden, fließen bei der Weiterentwicklung von Fahrzeugen und Komponenten ein.

7. ABB Hochenergiebatterie

7.1 Zusammenfassung

Die ABB Hochenergiebatterie GmbH rüstete drei Metroliner-Busse von Neoplan mit je drei modifizierten Standardbatterien B17 (Energieinhalt 58 kWh pro Bus), Batteriemanagement und je drei Bordladegeräten aus. Die Busse waren an 5 Tagen pro Woche im öffentlichen Personennahverkehr in Bergen im Einsatz. Auf der 85 km langen Tagesfahrstrecke bestand in Pausen die Gelegenheit zum Zwischenladen. Der Netzstromverbrauch betrug im Wochenmittel 0,85 kWh pro km, und zwar unabhängig von der Jahreszeit (der Fahrgastrauum wurde mit Dieselöl beheizt). Die Analyse der Meßwerte ermöglichte die vollständige Bilanzierung der Energieströme beim Fahren. Die wichtigsten Anteile sind Rollenergie (38 %), Bordenergie (19 %), Joulesche Verluste in der Batterie (12 %) und im Motor/ Steller/Getriebe (20 %) sowie die Reibenergie des Bremsens (11 %). Durch regeneratives Bremsen speist der Motor 12 % zurück, wovon 40 % direkt in das Bordnetz und 60 % in die Batterie fließen. Die Jouleschen Verluste der Batterie tragen zur Deckung ihrer Wärmeverluste bei, so daß im Wochenmittel nur noch 0,05 kWh Netzenergie pro km zur Warmhaltung erforderlich waren.

Ohne Zwischenladen und 80 %-iger Nutzung der Batteriekapazität beträgt bei dieser Fahrweise die Reichweite 66 km, mit Zwischenladung über den Bordlader (6 kW) 110 km. Versuche zum schnellen Zwischenladen der Batterien mit einer Leistung von 18 kW über ein stationäres Ladegerät zeigen, daß eine Erweiterung der Tagesfahrstrecke auf 150 km möglich ist. Ergänzend hierzu fanden Laboruntersuchungen statt, die die Grenzen der Schnelladefähigkeit von ABB Hochenergiebatterien ausloteten. Danach kann mit viertelstündigem Ladestrom (C/0,25h) etwa 35 % des Batterieinhaltes (35 Wh/kg) zurückgeladen werden.

Der ökologische Vergleich zwischen einem Bus mit elektro- bzw. dieselmotorischen Antrieb auf Basis des 13-Stufen-Tests und des deutschen Stromerzeugungsmixes erbringt eine deutliche Minderung der globalen Schadstoffemissionen, während die globalen CO₂-Emissionen vergleichbar sind. Auf der Basis des realen Belastungsprofils von Rügen verursacht der Elektroantrieb ab einer täglichen Fahrstrecke von 15 bis 25 km weniger globale CO₂-Emissionen als der Dieselantrieb.

Für BMW und VW wurden Natrium/Schwefel-Batterien entwickelt, die den Platzverhältnissen im Fahrzeug angepaßt waren. Die Batterien basieren auf den Konstruktionsprinzipien der Standardbatterien. Mit über 100 Wh/kg erreichten sie die damals weltweit höchste Energiedichte von Traktionsbatterien für Elektroautos. Diese Batterien, ebenso wie die für Mercedes-Benz geplanten Standardbatterien für Pkw und Transporter, kamen nicht zum Einsatz, weil die nachträglich eingebrachte Forderung nach einem zehnmal größeren Verformungswiderstand nicht mehr in der Laufzeit des Projektes zu realisieren war.

7.2 Einleitung

ABB-Projektpartner im Verbundprojekt „Erprobung von Elektrofahrzeugen der neuesten Generation auf der Insel Rügen“ war die ABB Hochenergiebatterie GmbH. Ihre Batterien waren für den Einsatz in Personenkraftwagen, Transportern und Bussen vorgesehen. Im Unterauftrag der ABB Hochenergiebatterie GmbH entwickelte die ABB CEAG Stromversorgungstechnik GmbH Ladegeräte für die Fahrzeuge mit ABB Hochenergiebatterien. Elektroantriebe der ABB Industri AB, Norwegen, die einige Projektpartner in ihren Fahrzeugen einsetzten, fielen nicht in die Förderung dieses Forschungsprojektes, sondern entstammen bilateralen Geschäftsbeziehungen.

Zu Beginn des Forschungsvorhabens im Jahr 1991 war geplant, ABB Batterien und Ladegeräte in folgenden Fahrzeugen einzusetzen:

- Personenkraftwagen der 3er-Reihe von BMW,
- Personenkraftwagen des Typs 190 von Mercedes Benz,
- Personenkraftwagen vom Typ Golf von VW,
- Transporter MB100 von Mercedes Benz,
- Busse Metroliner von Neoplan.

Die Fahrzeuge von Mercedes Benz und Neoplan sollten modifizierte Standardbatterien erhalten. Für die Pkw von BMW und VW mußten neue Batterien entwickelt werden, die den Platzverhältnissen in den Fahrzeugen angepaßt waren.

Parallel zum Flottentest in Rügen führte die Deutsche Automobilindustrie im Jahr 1993 Versuche mit Hochenergiebatterien verschiedener Hersteller durch, bei denen die Batterien extrem zerstörenden Belastungen ausgesetzt waren. Die Forderungen an die Widerstandsfähigkeit gegen Deformation war in diesem Test zehnmal höher angesetzt, als es die Spezifikationen der ABB-Batterien vorsahen. Diese Spezifikationen waren von der ABB Hochenergiebatterie GmbH gemeinsam mit drei deutschen Automobilherstellern und dem TÜV-Südwest in den Jahren von 1983 bis 1992 sukzessiv erarbeitet und von allen Beteiligten akzeptiert worden.

Das Erfüllen der nachträglich eingebrachten Forderungen nach einer höheren Steifigkeit ließ sich nicht durch Modifizieren der vorhandenen Batterien erreichen. Derart schwerwiegende Änderungen erforderten eine komplette Neukonstruktion der Zelle und des Batteriegehäuses mit den entsprechenden Versuchsprogrammen und Investitionen für die Produktionsmittel. Dies war nicht mehr in der Restlaufzeit dieses Forschungsprojektes realisierbar. Von den am Projekt beteiligten Automobilherstellern hatte nur Neoplan wegen der günstigeren Einbauverhältnisse im Bus keine Bedenken gegen den Einsatz der ABB Hochenergiebatterien. Die anderen Automobilhersteller rüsteten ihre Fahrzeuge mit Batterien anderer Hersteller aus.

Die Busse von Neoplan kamen bei der Rügener Personennahverkehrs GmbH in Bergen im Liniendienst zum Einsatz. Zu einer viermonatigen Unterbrechung des Betriebes kam es nach zum damaligen Zeitpunkt unerklärlichen Vorfällen mit Batterien, die sich außerhalb des Flottenversuches ereigneten, und die die ABB Hochenergiebatterie GmbH veranlaßte, ihre Batterien in die Fabrik zurückzuziehen. Die Vorfälle waren Anlaß zu einer Reihe von Verbesserungen, die sukzessiv in die nächsten Batterien einflossen. Im Dezember 1995 wurden die Busse nach planmäßigem Abschluß der Versuchszeit zurückgezogen. Während

dieser Zeit erhielten die Busse mehrmals neue Batteriesätze, die dem neusten Entwicklungsstand entsprachen. Zu sicherheitsrelevanten Ereignissen kam es nicht.

Die nachfolgenden Kapitel dieses Berichtsteils sind die Kurzfassung eines ausführlicheren Berichtes /Birnbreier-96/, der weitere Erläuterungen und Details enthält.

7.3 Aufbau und Betrieb der Neoplan-Busse

7.3.1 Lieferumfang

Die Metroliner Busse N 8008 E von Neoplan /Neoplan/ wurden mit je drei Hochenergiebatterien vom Typ B17 ausgestattet. Gegenüber der Standardausführung waren sie mit einer verstärkten Stromdurchführung ausgestattet, die einen Betriebsdauerstrom von 300 A zuließ. Jede Batterie hatte eine Nennspannung von 48 V und eine Nennkapazität von 400 Ah. Dies entspricht einem Nennenergieinhalt von 19,2 kWh. Auf die Masse bzw. auf das Volumen bezogen ergeben sich Energiedichten von 104 Wh pro kg bzw. 140 Wh pro Liter. Die stationären Wärmeverluste einer Batterie betragen 120 W.

Zur Vermeidung der Folgen von Kurzschlüssen in der externen Batterieverkabelung erhielt jede Batterie eine wiedereinschaltbare Sicherung, die auch vom Batteriemanagement betätigt werden konnte. Bei Servicearbeiten war es dann auch möglich, die Batterien freizuschalten.

Zu Beginn des Projektes war jede Batterie mit einer externen Kühleinheit ausgestattet, die bei lang anhaltender Höchstlast die Jouleschen Verluste in der Batterie über ein Wärmeträgeröl an die Umgebungsluft abgibt. Wegen der geringen Strombelastung im realen Fahrbetrieb wurde diese Kühlung jedoch nicht aktiviert, so daß später auf den Einbau der Kühleinheit verzichtet wurde.

Jedes Fahrzeug erhielt eine Batteriemanagementeinheit, das die Temperatur der Batterie regelt, den Ladezustand mißt, Erdschlüsse des Systems überwacht und den elektrischen Zustand der Batterie durch Messung der Teilspannungen und des Stromes diagnostiziert. Sein Leistungsbedarf beträgt 20 W.

Zum Laden der Batterien wurden drei Bordladegeräte je Fahrzeug installiert. Sie ermöglichen das Laden mit einer maximalen Leistung von 9 kW. Ihr Wirkungsgrad beläuft sich auf 92 %.

Für Schnellladungen wurde ein stationäres Ladegerät mit einer maximalen Leistung von 20 kW am Busbahnhof in Bergen zur Verfügung gestellt. Nach Herstellerangaben beträgt der Wirkungsgrad 90%.

7.3.2 Aufbau des Antriebssystems

Der prinzipielle Aufbau des Antriebssystems geht aus Bild 1 hervor. Es stellt den Zustand dar, wie er bei Projektabschluß existierte.

Die drei Batterien sind in Reihe geschaltet und bieten eine Leerlaufspannung von 149,5 V im vollen Zustand und 136,8 V im entladenen Zustand. Der Innenwiderstand der Anordnung beträgt nominal 60 mΩ und ist über den gesamten Ladezustand konstant. Im realen

Fahrbetrieb ändert sich der Innenwiderstand mit der Batterietemperatur, und zwar vermindert er sich um $2 \text{ m}\Omega$ bei einem Temperaturanstieg von 10 K.

Die drei Bordladegeräte werden beim Laden an je eine Phase des Niederspannungsnetzes angeschlossen. Das stationäre Ladegerät konnte über einen Gleichstromstecker die Batterien laden. Das Batteriemanagement überwachte beide Ladegeräte. Der Parallelbetrieb von Bordlader und stationärem Ladegerät war möglich. Das Laden der 24 V-Bordbatterie erfolgte anfänglich über ein separates Ladegerät später über das Ladegerät der Traktionsbatterie und den DC/DC-Wandler.

Während des Fahrens bezieht das Batteriemanagement seinen eigenen Energiebedarf und den Bedarf für die Batterieheizung aus der Traktionsbatterie. Um eine ungleichmäßige Entnahme aus den Batterien zu vermeiden, wird hierfür die Gesamtspannung angezapft und nicht die Spannung der Einzelbatterie. Ist das System an das Niederspannungsnetz angeschlossen, so versorgt dieses das Batteriemanagement und die Batterieheizung. Die zur Spannungsanpassung notwendigen Transformatoren haben im Heizbetrieb einen Wirkungsgrad von 93 % und Leerlaufverluste von 7 W.

Die Einbauplanung für die Unterbringung der Speicher und Ladegeräte erfolgte gemeinsam mit Mitarbeitern der Fa. Neoplan. Die Ausführung ist im Berichtsteil der Fa. Neoplan näher beschrieben.

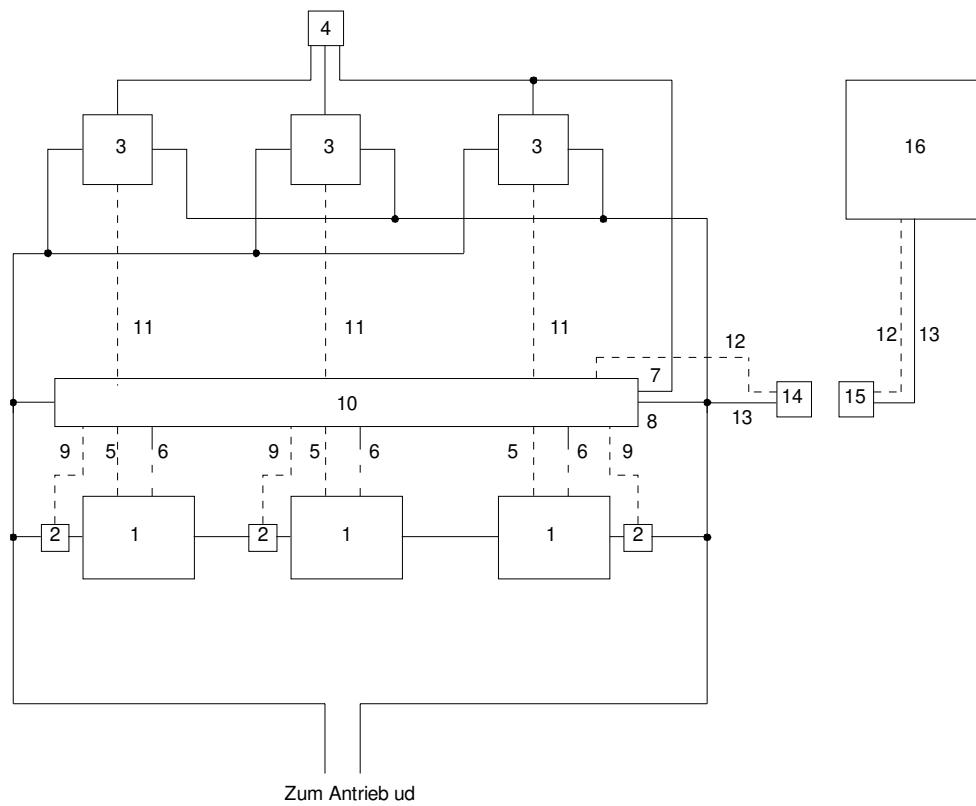


Bild 1: Schema der Anordnung von Batterie und Ladeeinrichtungen

- 1 Batterien
- 2 Sicherungen
- 3 Bordladegeräte
- 4 3-Phasenstecker zum Niederspannungsnetz
- 5 Kabel zur Batterieheizung
- 6 Meßleitungen für Temperaturen und Teilspannungen
- 7 Wechselstromversorgung des Batteriemanagements
- 8 Gleichstromversorgung des Batteriemanagements
- 9 Fernauslöser für die Sicherungen
- 10 Batteriemanagement

- 11 Steuerleitungen für die Bordlader
- 12 Steuerleitung für das stationäre Ladegerät
- 13 Stromkabel zum stationären Ladegerät
- 14 Stecker zum stationären Ladegerät
- 15 Gegenstecker zu 14
- 16 Stationäres Ladegerät

7.3.3 Charakteristika der Fahrstrecke und des Fahrstils

Die Busse kamen bei der Rügener Personennahverkehrs GmbH im Stadtgebiet von Bergen zum Einsatz. Die Fahrstrecke unterteilte sich in zwei Schleifen von je 6 km. Ausgangspunkt war stets der Busbahnhof. Der erste Teil führte über die südlichen Wohngebiete durch die Innenstadt, der zweite Teil durch das Industriegebiet. Auf der gesamten Fahrstrecke von 12,1 km befanden sich 18 Haltestellen. Die Fahrstraße wies überwiegend Asphaltbelag auf, in der Innenstadt herrschte jedoch grobes Kopfsteinpflaster vor. Bild 2 zeigt das Höhenprofil der Fahrstrecke, die mehrmals täglich befahren wurde.

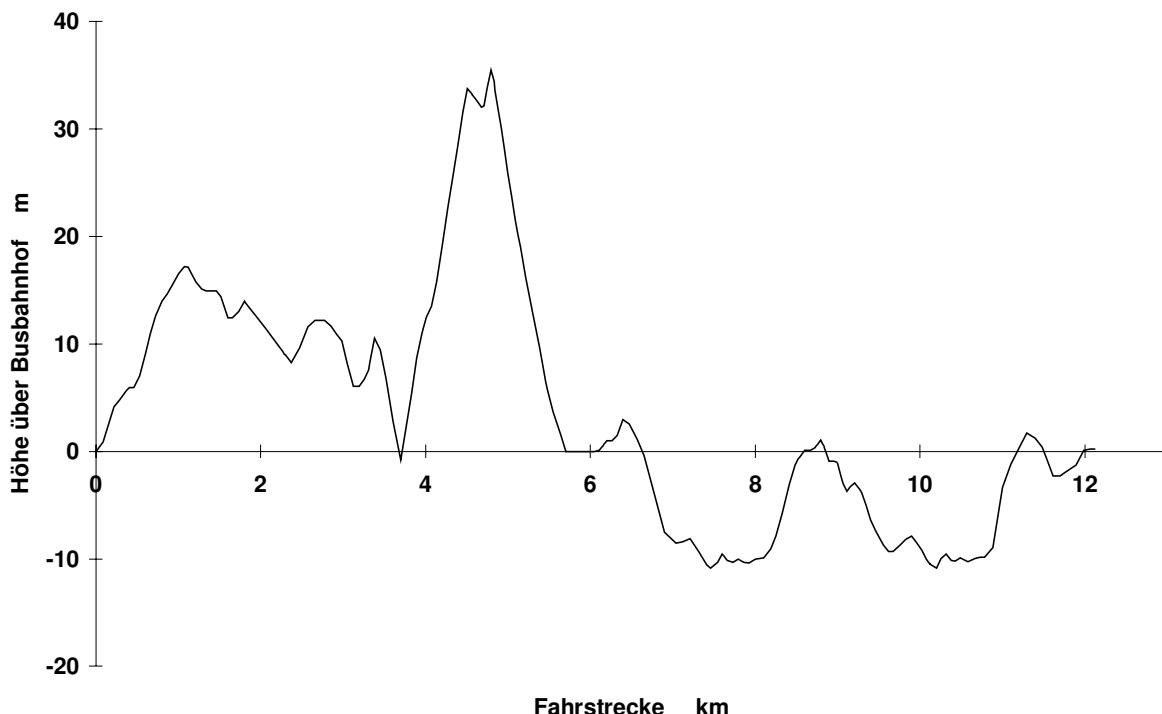


Bild 2: Höhenprofil der Fahrstrecke

Die kumulierte Steigung betrug etwa 103 Höhenmeter. Während der Projektdauer änderte sich der Fahrweg geringfügig. Die gesamte Länge der Fahrstrecke betrug im Mittel 85 km pro Tag. Der Fahrbetrieb fand von Montag bis Freitag statt. Am Wochenende und an Feiertagen waren die Busse nicht im Einsatz. In Pausen am Vormittag und am Mittag bestand die Möglichkeit zum Zwischenladen. Diese erfolgte in der Regel mit dem Bordladegerät mit einer Leistung von etwa 6 kW.

Die Fahrgeschwindigkeit betrug im Mittel 23 km/h und erreichte Spitzenwerte von 50 km/h. Berücksichtigt man die Standzeiten, so beträgt die Durchschnittsgeschwindigkeit 17 km/h. Die Betriebsweisen Beschleunigung, Konstantfahrt, Verzögerung und Halten verteilten sich auf je ein Viertel der Zeit. Die Anfahrsbeschleunigung aus dem Stand lag bei etwa $1,1 \text{ m/s}^2$ und die Bremsverzögerung zum Stillstand bei etwa $1,4 \text{ m/s}^2$.

7.3.4 Energetische Bilanzierung des Fahrbetriebes

Die Kenntnis des Höhenprofils der Fahrstrecke und der Meßwerte von Geschwindigkeit, Batterieleistung, Batteriestrom und Bordverbrauchsleistung mit einer Auflösung von einer Sekunde sowie des Wirkungsgrades des Antriebsystems erlaubte die vollständige Bilanzierung des Fahrbetriebes. Sie ist für eine Rundfahrt in Bild 3 dargestellt.

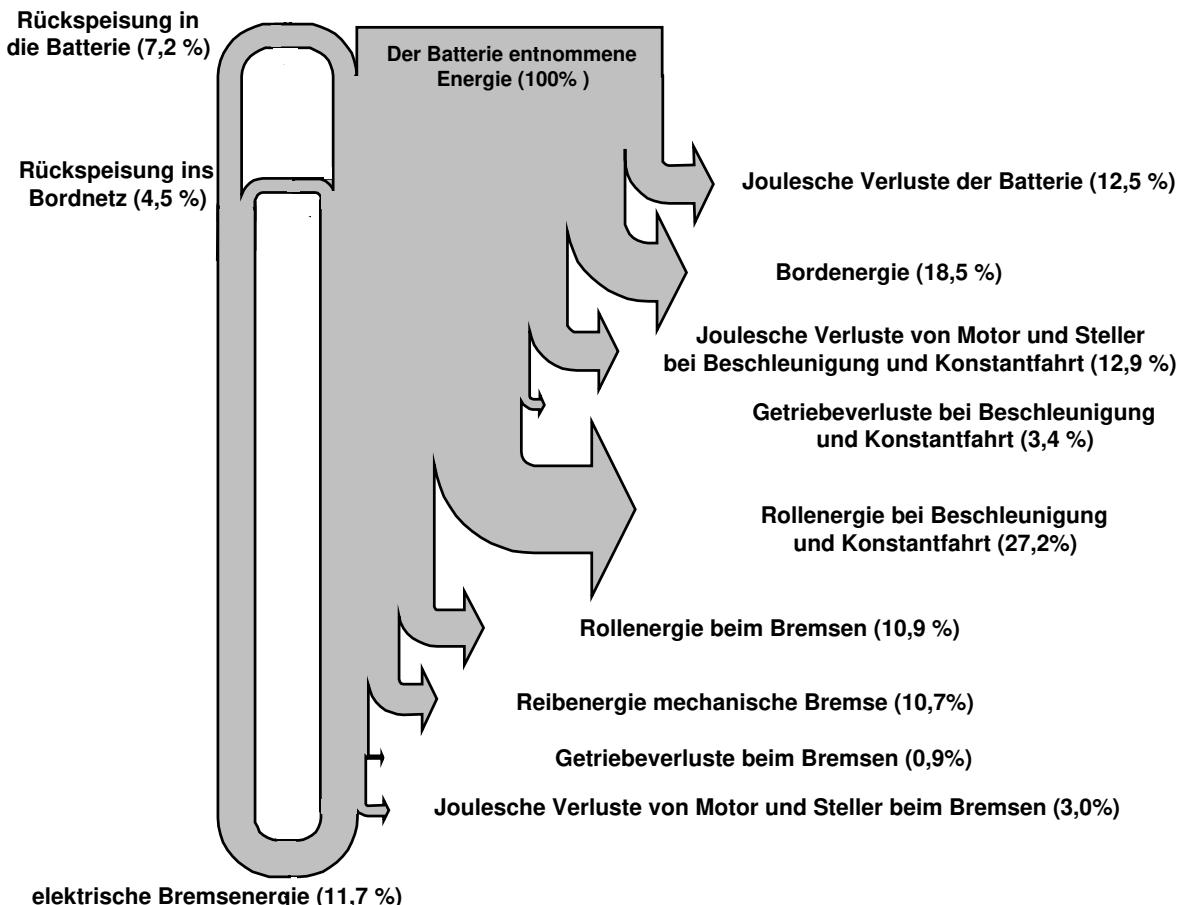


Bild 3: Energiebilanz einer Fahrt

Die wichtigsten Anteile auf der Verbraucherseite sind Rollenergie mit 38% und Bordenergie mit 19%. Die Jouleschen Verluste betragen in der Batterie 12%, im Antrieb/Motor 16% und im Getriebe 4%. Die Rückspeisung von elektrischer Energie beträgt 12%, wovon 40% direkt in das Bordnetz und 60% in die Traktionsbatterie fließen.

Kumuliert man die Energieentnahme aus der Batterie während des Fahrens über eine längere Periode, so erhält man gemäß Bild 4 einen mittleren spezifischen Verbrauch von 0,73 kWh/km. Dieser Wert ist praktisch unabhängig von der Jahreszeit (Die Heizung des Busses erfolgte über eine Brennstoffheizung).

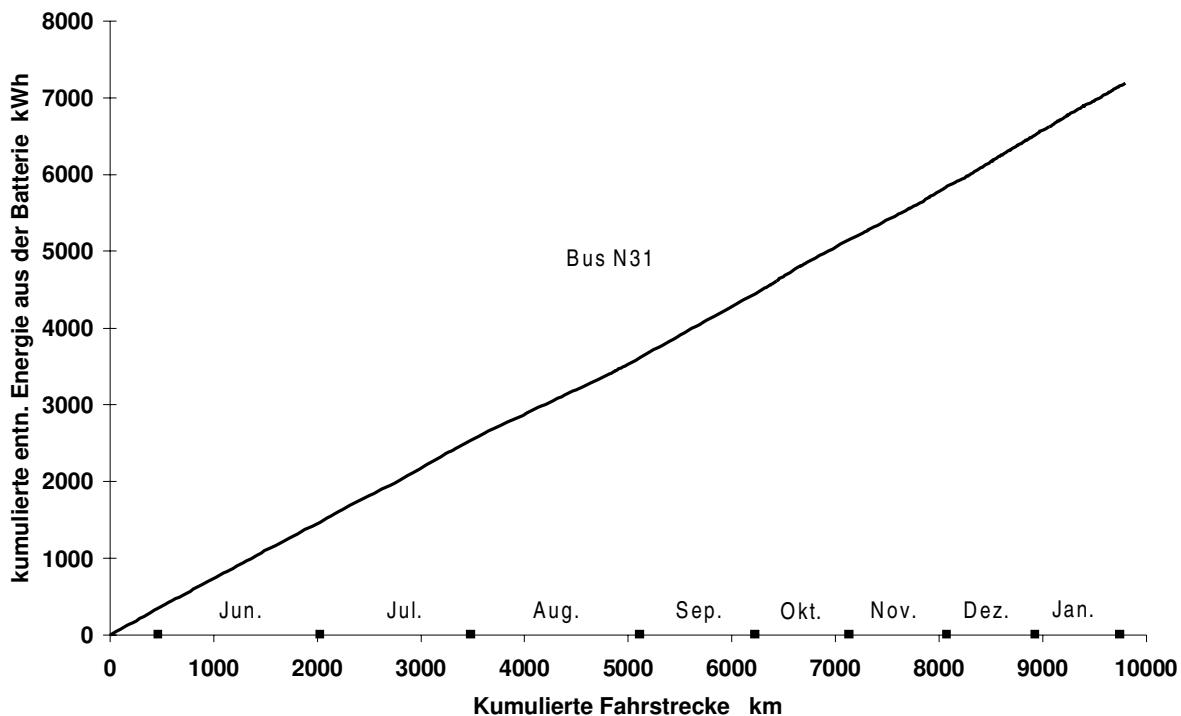


Bild 4: Kumulierte Energieentnahme (Freie Enthalpie) über der kumulierten Fahrstrecke bzw. der Jahreszeit. Anmerkung: Die kürzere Fahrstrecke in den Wintermonaten war die Folge des Wechselbetriebes mit einem anderen Bus.

Für eine vollständige Bilanzierung der Energieverbräuche muß man darüber hinaus noch den Wirkungsgrad des Ladegerätes und den Bedarf für das Warmhalten der Batterie berücksichtigen. Da die Traktionsbatterie während des Fahrens mehr Joulesche Wärme erzeugt als zur Deckung der Wärmeverluste erforderlich sind, steigt die Batterietemperatur an und speichert Wärme, die später abgegeben wird. Bild 5 zeigt hierzu den täglichen Netzenergiebedarf als Funktion der täglich zurückgelegten Fahrstrecke. Bei der Standardfahrstrecke von 85 km pro Tag ist danach noch ca. 1 bis 1,5 kWh pro Tag oder 0,016 kWh/km Netzenergiebedarf erforderlich. Berücksichtigt man die zwei Stillstandstage am Wochenende, so erhöht sich dieser Wert auf 0,05 kWh/km. Der gesamte spezifische Verbrauch an Netzenergie ist in Bild für die Fälle von 5 und 7 Fahrtagen pro Woche zu je 85 km unter den Fahrbedingungen in Bergen dargestellt. Daraus ergeben sich die Verbrauchswerte von 0,8 bis 0,85 kWh/km.

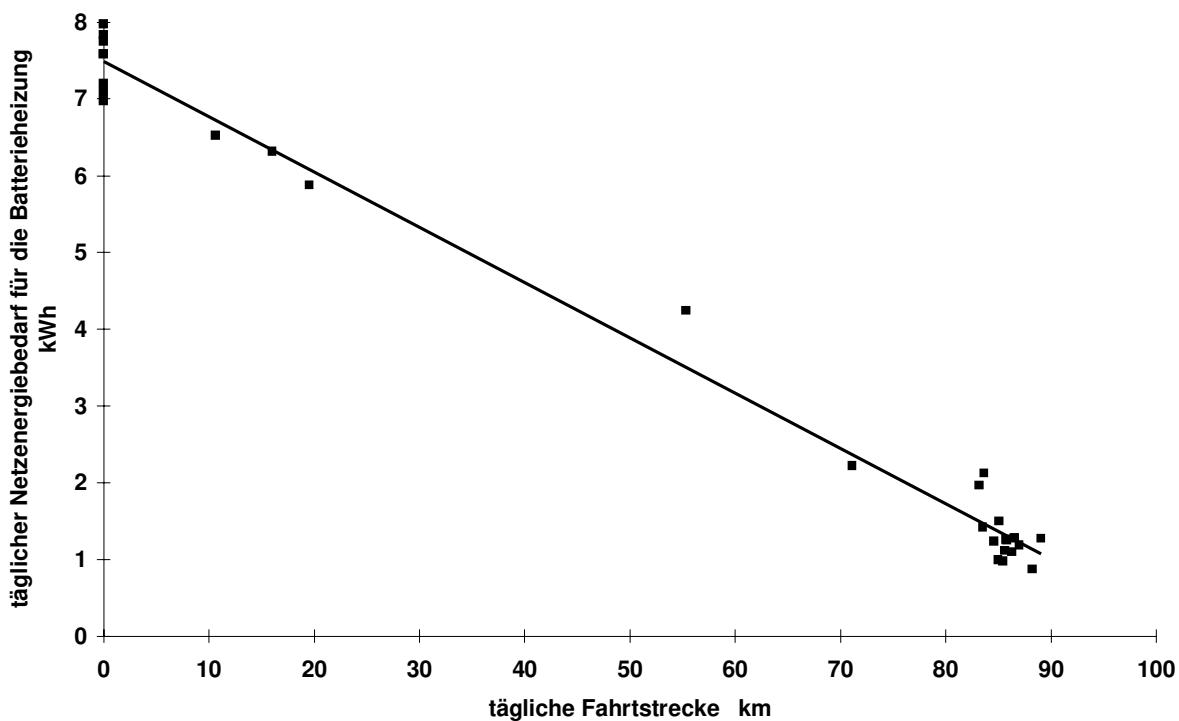


Bild 5:Täglicher Netzenergiebedarf für das Warmhalten der Batterie als Funktion der täglichen Fahrstrecke

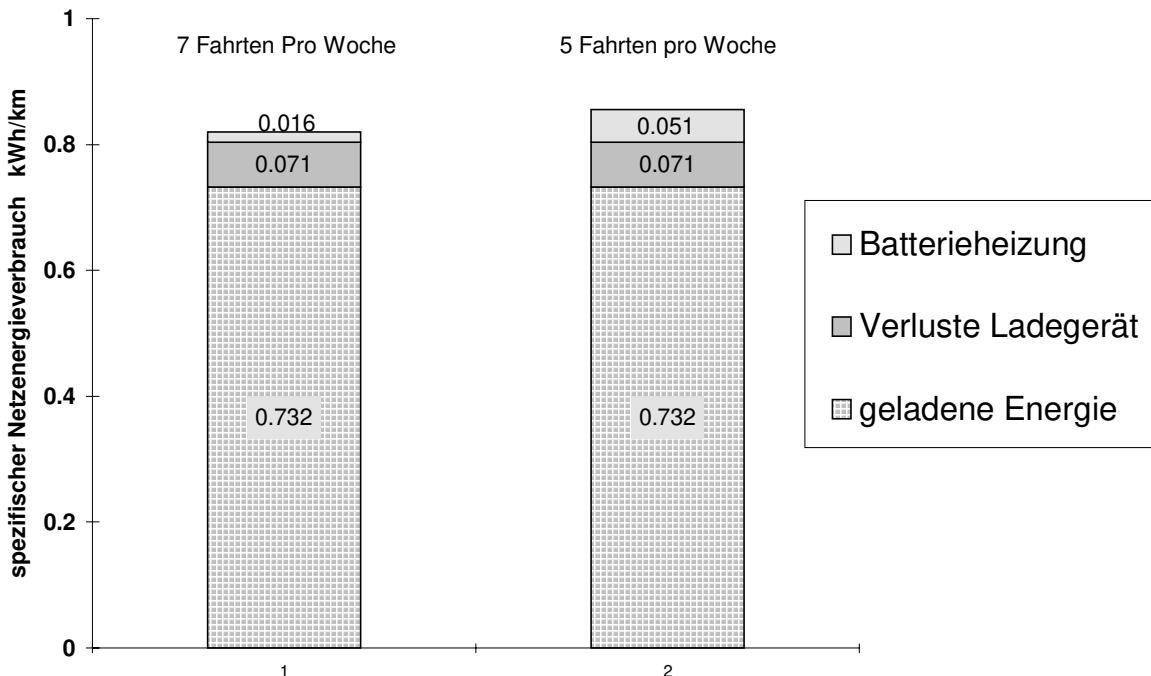


Bild 6: Spezifischer Netzenergieverbrauch, aufgeschlüsselt nach Fahren, Laden und Heizen der Batterie

7.3.5 Schnellladung

Mit dem stationären Ladegerät am Busbahnhof wurde versuchsweise auch die schnelle Zwischenladung erprobt. Der Batteriewirkungsgrad lag im Fall des Ladens mit dem Bordladegerät mit 30 A bei 98,5 % und verminderte sich beim Ladestrom von 120 A mit dem stationären Ladegerät auf 94 %. Auf den Netzenergieverbrauch wirkt sich das Schnellladen praktisch nicht aus, da die erhöhten Jouleschen Verluste des Ladens in der Batterie zu einer Verminderung der Heizenergie zum Warmhalten der Batterien führen und der Wirkungsgrad des Schnelladegerätes etwa genauso groß ist wie der des Bordladers.

Der Vorteil des schnellen Zwischenladens liegt in einer deutlichen Erweiterung der täglichen Fahrstrecke, einer flexibleren Einsatzplanung und der besseren Amortisation der Investitionen für den Bus. Aufbauend auf den Ergebnissen in Bergen und Messungen zum Schnell-laden an Batterien im Labor (siehe Kapitel 7.4) ließen sich die realisierbaren Reichweiten unter Zuhilfenahme von Schnellladungen berechnen.

Tabelle 1 stellt die mögliche Reichweite und die Energieverbräuche bei einem 12-Sunden Fahrbetrieb mit verschiedenen Ladeleistungen gegenüber. Dabei wurden Fahrverhalten und Energiebedarf des realen Betriebes in Bergen zugrunde gelegt und die Nutzung der Batteriekapazität auf 80 % ihres Nennwertes begrenzt.

Ladestrom A	0	40	120	300	600
Wirkungsgrad Batterie	1	0,985	0,94	0,89	0,81
Wirkungsgrad Ladegerät	0,92	0,92	0,9	0,9	0,9
Netzanschlußleistung kW	0	6,6	21,3	56,2	123,5
Zwischenladezeit h	0	5,50	3,33	1,77	0,99
min. Anzahl der Ladestops	0	1	2	3	4
Netzenergieverbrauch Zwischenladen kWh	0,0	36,4	70,9	99,2	122,2
Netzenergieverbrauch Nachtladen kWh	53,0	53,0	53,0	53,0	53,0
Netzenergieverbrauch Batterieheizung kWh	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0
Netzenergieverbrauch gesamt kWh	55,8	89,4	123,8	152,1	175,2
<hr/>					
Tagesfahrstrecke km	66	111	147	174	187
Spezifischer Netzenergieverbrauch kWh/km	0,851	0,808	0,840	0,874	0,936

Tabelle 1: Mögliche Tagesfahrstrecken und Energieverbräuche mit schnelllem Zwischenladen

Zwischenladen mit 40 A bedeutet die Benutzung des Bordladers, 120 A stellt das in Rügen eingesetzte stationäre Ladegerät zur Verfügung. 300 A sind der für diesen Batterietyp maximale Ladestrom. Mit dem hypothetischen Ladestrom von 600 A könnte man die Reichweite eines Dieselbusses in diesem Einsatzfeld erreichen, wobei vorausgesetzt wurde, daß dieser in einem 12-Stunden-Betrieb eine Stunde Pause (für den Fahrer) aufweist.

Mit Zwischenladen läßt sich die tägliche Fahrstrecke auch mit moderaten Ladeströmen mehr als verdoppeln. Es sei darauf hingewiesen, daß sich bei Zwischenladungen mit Strömen oberhalb ca. 100 A die Batterie nicht mehr in einem Zuge volladen läßt, sondern daß das Zwischenladen auf mehrere Halte zu verteilen ist.

7.3.6 Vergleich der globalen Emissionen für Busse mit elektro- und dieselmotorischem Antrieb

Vergleich auf Basis des 13-Stufen Tests

Für Fahrzeuge mit dieselmotorischem Antrieb und einem zulässigen Gesamtgewicht über 3500 kg sowie mehr als 9 Sitzplätzen findet in Europa allgemein der 13-Stufen Test nach ECE R49 Anwendung. Es handelt sich hierbei um einen Prüfstandstest für Motoren ohne Fahrzeug. Dabei werden die Emissionen bei verschiedenen Betriebszuständen gemessen und in Relation zur abgegebenen mechanischen Arbeit gesetzt. Der Bezug zur Arbeit ermöglicht es, Motoren unterschiedlicher Größe miteinander zu vergleichen. Diese Rahmenbedingung ist bei dem Test für PKW nicht gegeben, weil alle Fahrzeuge unabhängig von ihrer Motorleistung und ihrem Gewicht die gleichen Grenzwerte für Abgasemissionen einhalten müssen.

Für den Elektroantrieb kann man den 13-Stufen-Test in analoger Weise durchführen. Um vergleichbar mit dem Dieselmotor zu sein, ist natürlich das komplette Antriebssystem zu untersuchen, also Motor, Antriebssteuerung, Batterie, Batteriemanagement und Ladegerät. Die Ergebnisse des nachfolgend dargestellten Vergleiches beziehen sich auf das Antriebssystem des Neoplan-Busses und den Dieselmotor OM 616 von Mercedes Benz, der mit einer maximalen Leistung von 55 kW dem Bus etwa die gleiche Fahrdynamik verleihen würde wie der Elektroantrieb. Eine direkte Messung der beiden Antriebsarten im 13-Stufen-Test erfolgte nicht. Es standen jedoch für beide Varianten detaillierte Meßdaten zur Verfügung /Siencnic-91/, /Weimer-91/, die die Berechnung des Energiebedarfes unter den vorgeschriebenen Testbedingungen ermöglichen. Aus der rechnerischen Simulation des Elektroantriebes resultiert ein Netzenergiebedarf für den 13-Stufen-Test von 1,44 kWh für 1 kWh mechanische Energie aus dem Motor. Dies entspricht einem Gesamtnutzungsgrad von 69,4%. Im Fall des Dieselmotors ergibt sich ein Kraftstoffverbrauch von 367g/kWh was einem Gesamtnutzungsgrad von 23,1 % entspricht.

Unter Berücksichtigung der Emissionsgrenzwerte nach Euro II und der Vorketten für die Strom- bzw. Dieselölherstellung bis zur Primärenergie gem. /GEMIS-94/ folgen die in Bild 7 und Bild dargestellten Werte für die Schadstoff- und CO₂-Emissionen. Das Ergebnis der Analyse zeigt, daß der Elektrobus bezüglich der globalen Schadstoffemissionen von CO, NMVOC, NOx und Staub dem Dieselbus deutlich überlegen ist. SO₂ fällt in beiden Fällen etwa in der gleichen Menge an. Die CH₄-Emissionen sind beim Elektroantrieb deutlich höher, wirken sich aber beim Treibhauseffekt nur geringfügig aus. Die CO₂- und die äquivalenten CO₂-Emissionen sind vergleichbar groß, wobei bei der Nutzung von Grundlaststrom etwa 10% weniger anfallen als beim Dieselantrieb.

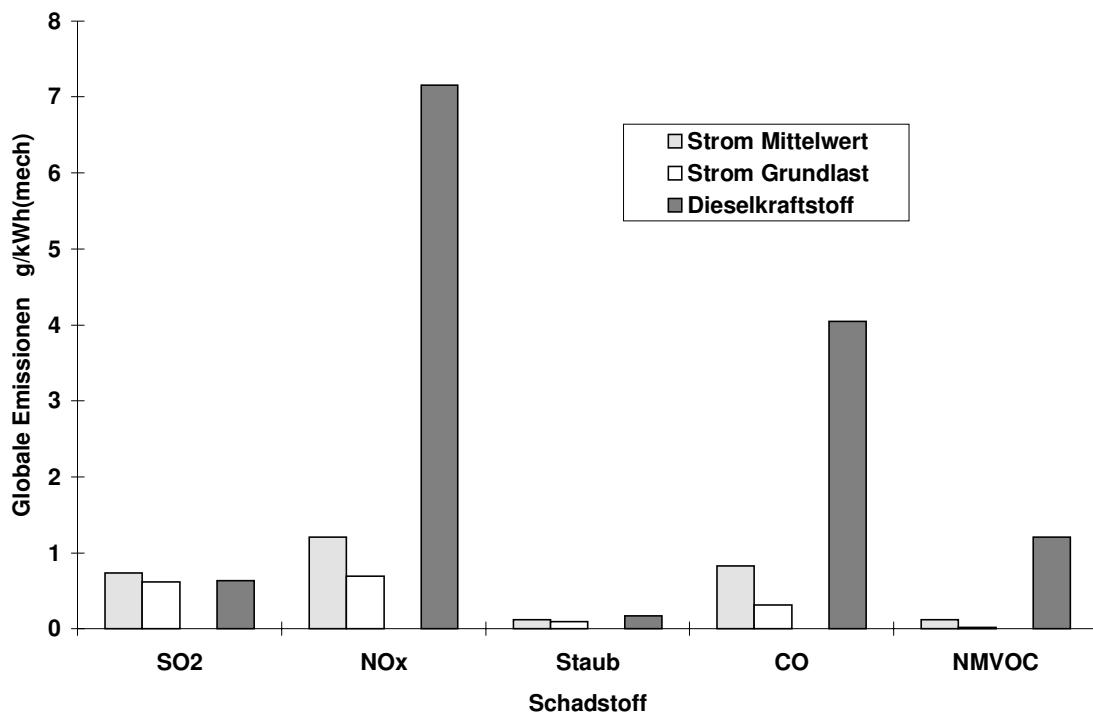


Bild 7: Globale Emissionen aus dem 13-Stufen-Test für verschiedene Schadstoffe

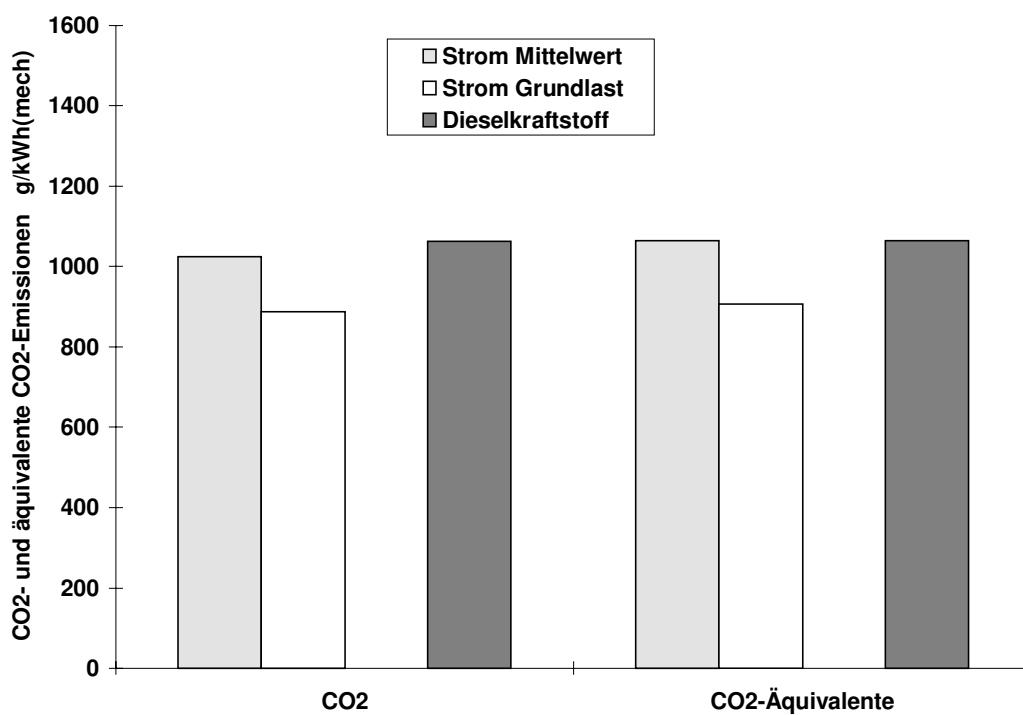


Bild 8: CO₂- und äquivalente CO₂-Emissionen für Diesel- und Elektroantrieb

Vergleich auf Basis der Verbrauchsdaten in Rügen

Eine andere Möglichkeit, die beiden Antriebsarten miteinander zu vergleichen besteht darin, das in der realen Fahrt gemessene Belastungsprofil des Elektrobusses auf den Dieselmotor anzuwenden. Durch die Kenntnis des Wirkungsgradfeldes in Abhängigkeit von Drehmoment und Motordrehzahl ist dies für den Verbrauch bzw. die CO₂-Emissionen rechnerisch durchführbar. Sie führt beim Dieselantrieb zu einem Kraftstoffverbrauch von 22kg/100km.

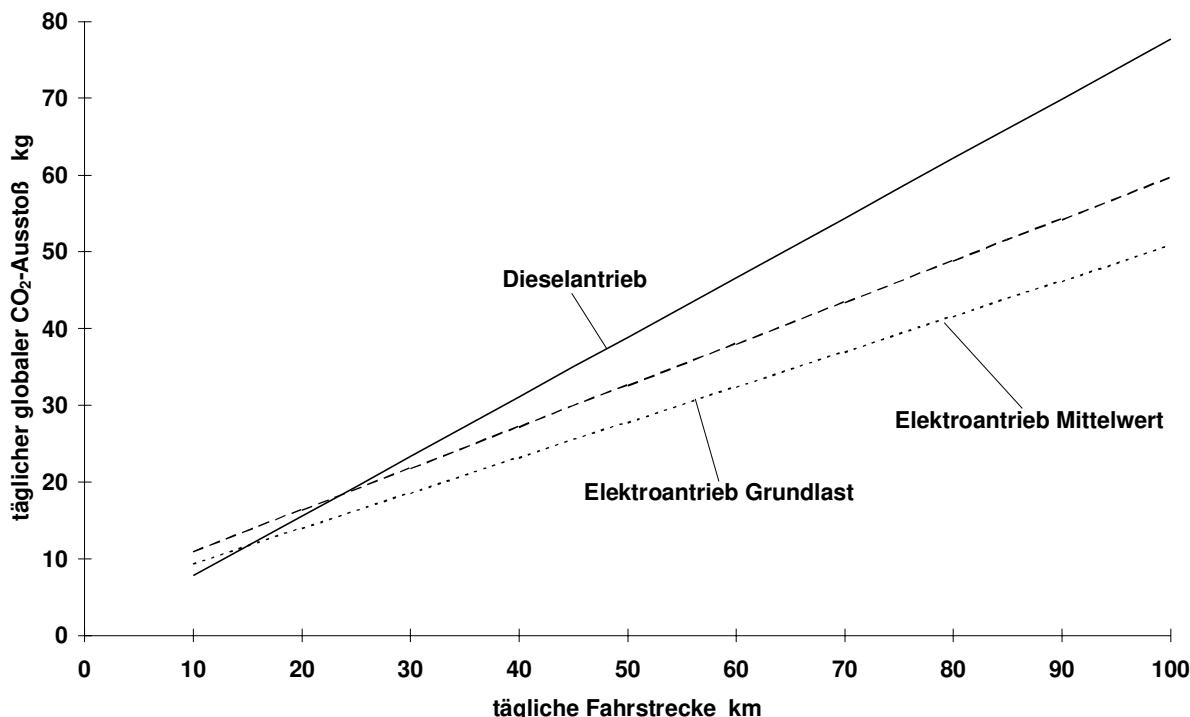


Bild 9: Vergleich der globalen CO₂-Emissionen von Diesel- und elektro-motorischem Antrieb mit unterschiedlicher Stromnutzung während des Tages

Der Vergleich ist aus Bild 9 ersichtlich, das den täglichen Ausstoß an CO₂ über der täglichen Fahrstrecke darstellt. Im Fall des Elektroantriebes ist der Energieaufwand für das Warmhalten der Batterien berücksichtigt. Daraus geht hervor, daß der Elektrobus bereits zwischen 15 und 25 km täglicher Fahrstrecke geringere CO₂-Emissionen aufweist als der Dieselbus. Weiterhin ist anzumerken, daß bei den Tagesfahrstrecken in Rügen von 85 km sich eine weit günstigere CO₂-Bilanz ergibt als aus dem 13-Stufen-Test.

7.3.7 Betriebserfahrungen

Während der Projektlaufzeit kam es aus organisatorischen und technischen Gründen zu Unterbrechungen des Fahrbetriebes. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, stand Bus N29 wegen des Rückziehens der Batterien von April bis August 1993 still.

Stillstandszeiten der Busse, die aufgrund technischer Probleme entstanden, waren im Wesentlichen auf Fehler an Batterien und am Batteriemanagement zurückzuführen. Der Ausfall von Ladegeräten hatte wegen des Einbaues von drei Bordladern und der Verfügbarkeit des stationären Ladegerätes in der Regel keine Unterbrechung des

Fahrbetriebes zur Folge. Tabelle 2 stellt die während der Projektdauer aufgetretenen Fehler, ihre Ursachen und die durchgeführten oder möglichen Abhilfemaßnahmen zusammen.

Das Batteriemanagement war aus einem Laborgerät weiterentwickelt worden und erwies sich beim Einsatz in den Bussen als störungsanfällig. Die in Auftrag gegebene Entwicklung eines Kfz-tauglichen Batteriemanagements wurde nicht mehr abgeschlossen, so daß durch Anpassungen und Reparaturen der Einsatz aufrechterhalten werden mußte. Als besonders hinderlich für die softwaremäßige Weiterentwicklung der Überwachungs- und Betriebsstrategie erwies sich der benutzte Prozessor, und zwar sowohl von der Kapazität als auch von der Programmiersprache.

7.3.8 Verbesserungspotentiale für den Energieverbrauch

An dieser Stelle sind nur die Verbesserungspotentiale angeführt, die das Antriebssystem des Busses hergeben. Verbrauchsminderungen des Busses z.B. durch Reifen mit geringerem Rollwiderstandsbeiwert oder Maßnahmen zur Verminderung des Bordenergieverbrauches bleiben hier unberücksichtigt.

Ein Ansatzpunkt, den Wirkungsgrad des Antriebssystems zu verbessern, besteht in der Anhebung der Systemspannung. Der vorliegende Antrieb hatte eine Nennspannung von 144 V, was auf den Wunsch nach Kompatibilität mit Bussen mit Bleibatterien zurückzuführen ist. Mit Natrium/Schwefel-Batterien lassen sich problemlos z.B. 360 V realisieren, was bei den 3 B17 Batterien lediglich eine Änderung von 10 auf 4 parallele Stränge bedeutet. Bei dieser Spannung setzt man vorteilhafterweise Drehstromantriebe ein, die bei gleichem Motorgewicht einen Wirkungsgrad aufweisen, der bei hoher Belastung um ca. 5 %-Punkte höher ist als der hier eingesetzte Gleichstromantrieb. Batterieseitig lassen sich die Wärmeverluste noch deutlich mindern, indem man statt drei Batterien eine baut, die alle 720 Zellen enthält. Dies ist mit dem angewandten Konstruktionsprinzip möglich. Der Vorteil einer Einzelbatterie ist die geringere Oberfläche und die geringere Anzahl von Stromdurchführungen. Eine solche Batterie hätte die Abmessungen von 1462x733x340 mm³ und einen Gesamtwärmeverlust von 245 W gegenüber 360 W bei drei Batterien. Mit neueren Fertigungstechniken, die in der letzten Zeit bei anderen Batterien angewandt wurden, ließen sich sogar unter 200 W Wärmeverluste erreichen. Der Vorteil des geringen Wärmeverlustes wird allerdings nur bei geringen täglichen Fahrstrecken deutlich. Unter den Bedingungen des Betriebes in Bergen mit 85 km Fahrstrecke pro Tag würde nur die Nachheizenergie für das Warmhalten an den Werktagen eliminiert und am Wochenende um etwa 30 % vermindert. Nutzt man sowohl die antriebs- als auch batterieseitigen Verbesserungen, so hätte sich im Fall des Fünf-Tage-Betriebes im Bergen der Netzenergieverbrauch von 0,85 Wh/km auf 0,82 Wh/km erniedrigt.

Fehler	Ursache	Behebung
Kapazitätsverlust einer Batterie	Ausfall von mehr als zwei Zellen in einer Gruppe der Batterie	Zuverlässigkeit der Zelle erhöhen, Qualitätssicherungsmaßnahmen in der Fertigung
Kapazitätsverschiebung zwischen den drei Batterien	Kriechströme zwischen den Polen oder Spannungsabgriffen einer Batterie durch Schmutz	Einbauraum gegen Verschmutzung schützen. Synchronisation durch Einzelladen der Batterie.
Externer Kurzschluß einer Batterie	Unsachgemäße Wartungsarbeiten im Fahrzeug. Batterien wurden nicht getrennt	Überstromschutz für jede Batterie. Hinweise auf der Batterie. Schulung
Unbeabsichtigtes Abkühlen einer Batterie	Fehlfunktion des BM	Neuentwicklung des BM
Unbeabsichtigtes Abkühlen aller Batterien bei Umbauarbeiten in Plauen	Nicht erkanter Netzstromausfall über längere Zeiten	Warnmeldung (Hupe, Leuchte) über BM
Batterie unter Betriebstemperatur	Vakuumverlust der Wärmedämmung, Undichtigkeit einer Schweißnaht	Qualitätssicherung in der Fertigung
Batterie erreicht obere Betriebs-temperatur	Wärmeeverlust der Wärmedämmung zu klein (Sonderversuch). Dadurch Aufschaukeln der Temperatur über mehrere Tage	Standard Fertigungsverfahren oder Batteriekühlung
Überstromschalter der Batterie schaltet ungewollt	Sicherung zu knapp dimensioniert, Alterung der Sicherung, Motorcontroller außerhalb der Toleranz	Träge Sicherungskennlinie
Drehstromstecker und Gegenstecker verschweißt	Schlechte Kontakt-eigenschaften	Neuwertige Stecker höherer Stromtragfähigkeit
Gegenstecker des Schnelladegerätes beschädigt	Mechanische Überbelastung	Robustere Steckerausführung
Batterie wird nicht geladen	Abregelung oder Defekt des Ladegerätes durch thermische Überlastung	Bessere Kühlung des Ladegerätes, günstigerer Einbauort im Fahrzeug Redesign des Ladegerätes

Tabelle 2: Fehler, Ursachen und ihre Behebung

7.4 Schnellladung mit ABB Hochenergiebatterien

Hochenergiebatterien bieten in der Regel die Voraussetzung für einen ganztägigen Fahrbetrieb ohne Nachladung während des Tages. Dies bringt den Vorteil mit sich, daß die Ladegeräte auf minimale Leistung ausgelegt werden können und somit

- die geringsten Kosten aufweisen,
- ein geringes Gewicht besitzen, so daß die Unterbringung im Fahrzeug möglich ist,
- die Stromversorgung aus dem Netz unproblematisch ist und
- unter Umständen preisgünstiger Nachtstrom zur Verfügung steht.

Für einige Anwendungsfälle, wie zum Beispiel bei Elektrobussen, ist eine Zwischenladung am Tage wünschenswert. Damit läßt sich die Tagesfahrstrecke ausdehnen. Dies bringt für den Betreiber den Vorteil einer besseren Abschreibung der Investitionen des Busses. Andererseits erfordert die Zwischenladung die Zusatzinvestition eines Schnelladegerätes und des zugehörigen Stromanschlusses. Da der Strom zu Spitzenlastzeiten des Strombedarfes benötigt wird, ist unter Umständen auch ein höherer Leistungs- und/oder Arbeitspreis zu zahlen. Wegen des hohen Gewichtes sind Schnelladegeräte nicht mehr im Fahrzeug unterzubringen, so daß man zum Zwischenladen stets den Standort des Ladegerätes anfahren muß, was im Fall eines Busses mit regelmäßigen Routen jedoch keinerlei Einschränkung bedeutet.

Zur Vorbereitung einer schnellen Zwischenladung für den Betrieb der Busse in Rügen, fanden systematisch Laborversuche zum Schnellladen von Batterien statt. Ziel der Untersuchungen war es, die Grenzen der Schnelladefähigkeit von Natrium/Schwefel-Batterien zu bestimmen. Der Einfluß folgender Parameter auf das Ladeverhalten wurde untersucht:

- Ladestrom
- Ladeverfahren
- Abschaltkriterien für den Abbruch des Ladens
- Kühlbedingungen

Als günstigstes Ladeverfahren erwies sich eine Kombination aus anfänglich Konstantstrom-Laden, gefolgt von einer Phase des Ladens mit kontanter Spannung und dem Abbruch des Ladens über ein Widerstandskriterium. Bei verstärkter Kühlung der Batterie läßt sich die Schnelladefähigkeit bei hohen Stromstärken deutlich verbessern. Das Ergebnis der Untersuchungen ist in dem folgenden Ragone-Diagramm Bild zusammengefaßt. Es zeigt die Ladeleistung und die ohne Unterbrechung rückladbare Energie bezogen auf die Masse der Batterie. Bei der höchstzulässigen Last von ca. 140 W/kg lassen sich somit in einer viertel Stunde 35 Wh/kg rückladen. Macht man den Vergleich zu anderen Batterien, so untermauern diese Werte die Fähigkeit des Schnellladens der Natrium/Schwefel-Batterie. Die besten Blei/Säure-Batterien weisen heute eine Energiedichte von 35 Wh/kg auf. Um die gleichen Ladeeigenschaften wie Natrium/Schwefel-Batterien zu erreichen, müßten sie in einer viertel Stunde zu 100 % wiederaufladbar sein.

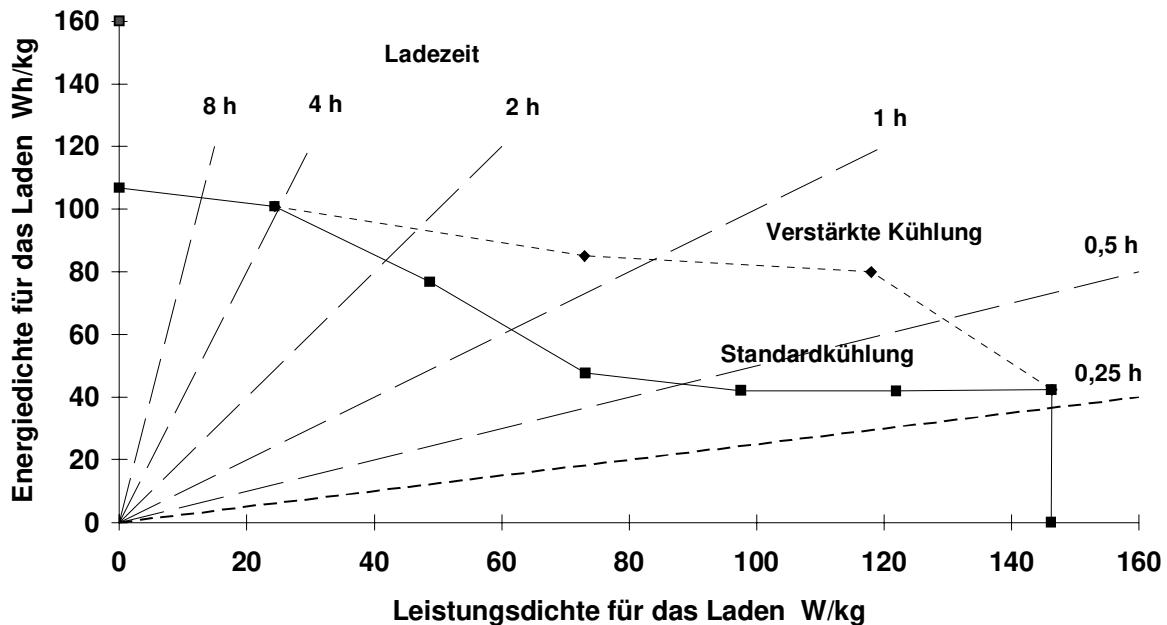


Bild 10: Ragone-Diagramm für das Laden einer B17-Hochenergiebatterie

7.5 Entwicklung von Sonderbatterien

Im Rahmen dieses Projektes wurden für VW und BMW zwei Sonderbatterien entwickelt, deren Abmessungen den Einbauverhältnissen in den jeweiligen Fahrzeugen angepaßt waren. Bezuglich Fahrzeuggtauglichkeit und Sicherheit entsprachen die Batterien den Spezifikationen, die in einer mehrjährigen Zusammenarbeit zwischen den Fahrzeugherstellern, dem TÜV Südwest und der ABB Hochenergiebatterie GmbH erarbeitet wurden. Bei Crashtests mit mehreren Batterien gleicher Konstruktionsweise in Fahrzeugen blieben alle Batterien unversehrt /Bräming-95/.

Beiden Batterien lag das Konstruktionsprinzip der Standardbatterien zugrunde. Energieinhalt und Leistung ergeben sich dann ausschließlich aus der Anzahl der einsetzbaren Zellen, die in einer Serien-Parallel-Anordnung verschaltet sind. In den ausgeführten Batterien waren Module von acht Zellen in Reihe geschaltet, die ihrerseits aus einer Anordnung von vier parallelen Strängen zu je zwei in Reihe liegenden Zellen bestanden. Jedem dieser Module lag ein Überbrückungselement parallel, das bei Hochohmigkeit des Moduls z.B. bei Ausfall einer Zelle diesen irreversibel kurzschloß. Damit verliert die Batterie 4 V ihrer Spannung, die Kapazität bleibt aber vollständig erhalten. Ohne Überbrückungselement ginge beim Ausfall einer Zelle ein Viertel des Energieinhaltes verloren.

Da die Standardkühleinheit nicht für die Größe der Batterien ausgelegt war, wurde zusätzlich eine neue leistungstärkere Version entwickelt, die in ihren Abmessungen ebenfalls für die spezifischen Einbauverhältnisse ausgelegt war.

Aus den Anforderungen der Einbauverhältnisse ergaben sich folgende Batteriedaten:

Fahrzeughersteller		BMW	VW
Länge	mm	665	665
Breite	mm	849	694
Höhe	mm	345	345
Anzahl der Zellen		360	288
Nennspannung	V	180	144
Nennkapazität	Ah	160	160
Nennenergieinhalt	kWh	28,8	23,0
Dauerleistung	kW	25,8	20,6
Spitzenleistung	kW	33,1	26,5
Gewicht	kg	265	214
Wärmeverluste	W	126	111

Tabelle 3: Zusammenstellung der wichtigsten Batteriedaten.

Der spezifische Energieinhalt liegt für beide Batterien bei einer 5-stündigen Entladung (DIN) bei 106 Wh/kg und bei einer 3-stündigen Entladung (USABC) bei 104 Wh/kg. Dies sind die höchsten Energiedichten die zum Zeitpunkt der Entwicklung weltweit erreicht wurden. Die Spitzenleistungsdichte konnte in später gebauten Batterien noch erhöht werden und erreichte bei einer Entladetiefe von 80 % /USABC-93/ den Wert von 140 W/kg. Der Lade-/Entladewirkungsgrad beträgt bei 5-stündiger Entladung und 10-stündiger Ladung 93 %. Für die Bedingungen nach USABC (3 h entladen und 6 h laden) sind es noch 89 %. Bild 11 zeigt hierzu den entsprechenden Spannungsverlauf, der auf die Nennspannung und die Nennkapazität normiert ist. Die Absolutwerte ergeben sich durch Multiplikation mit den Nenndaten aus Tabelle 3.

Das Ragone-Diagramm der Batterien ist in Bild 12 dargestellt, wobei der gestrichelte Teil der Geraden den Bereich andeutet, in dem die Batterie aufgrund der Auslegung der Kühlung nicht ohne Unterbrechung voll entladbar ist.

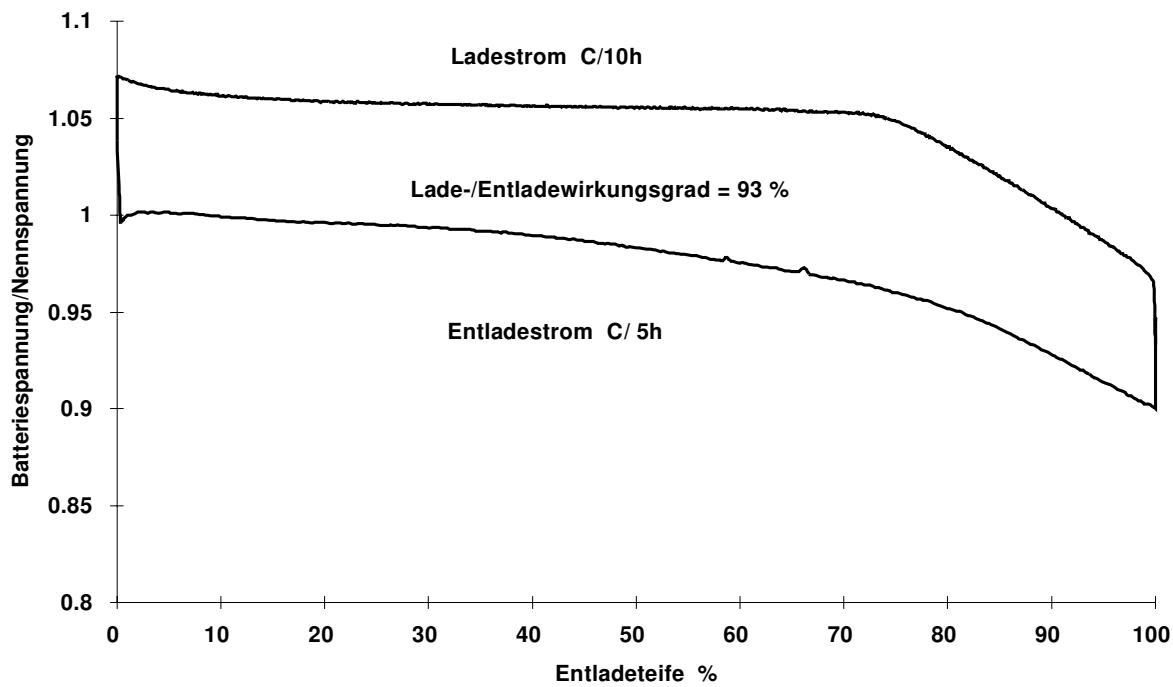


Bild 11: Normierte Batteriespannung während eines Entlade-/Ladevorganges mit Strömen von C/5h bzw. C/10h.

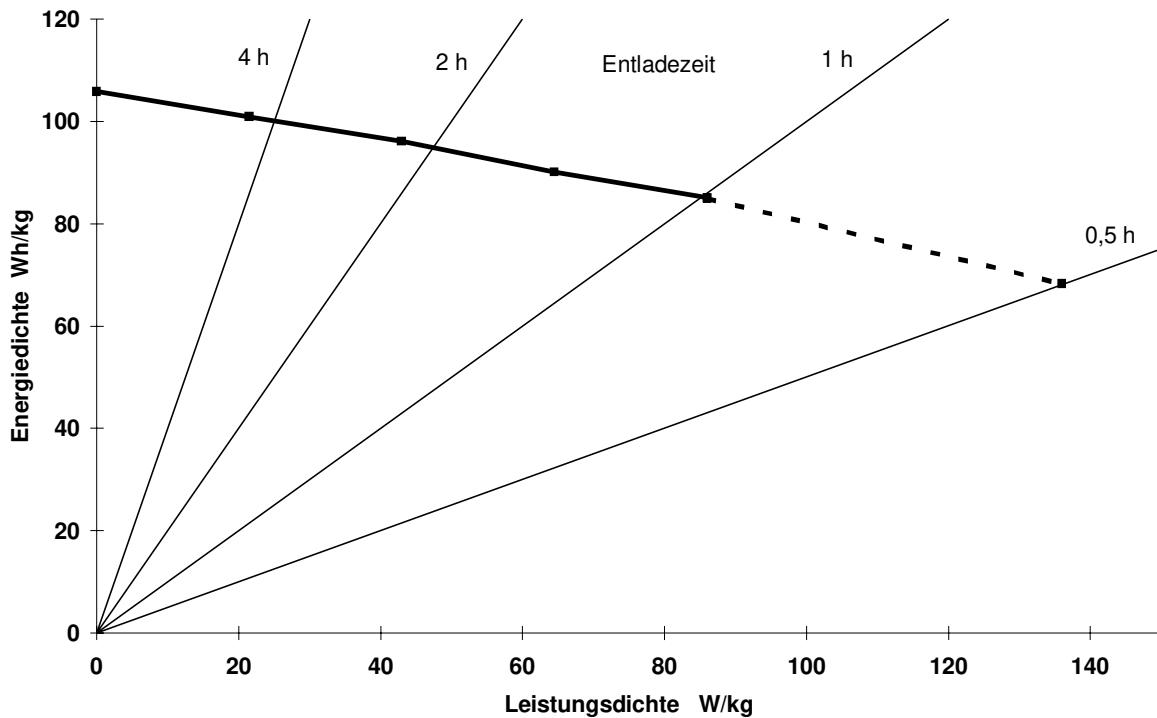


Bild 12: Ragone-Diagramm der Batterien.

7.6 Entwicklung eines Bordladegerätes

Die Entwicklung des Bordladegerätes erfolgte bei der ABB CEAG Stromversorgungstechnik GmbH im Unterauftrag der ABB Hochenergiebatterie GmbH. Sie sind sowohl einzeln an der Standardsteckdose für den Einsatz in Elektro-Pkw als auch im Dreierpaket an Drehstromsteckdosen für den Einsatz in Transportern oder Elektrobussen konzipiert.

Die allgemeinen Anforderungen nach geringem Gewicht, hohem Wirkungsgrad und minimaler Rückwirkung auf das Versorgungsnetz sind besonders vorteilhaft zu erfüllen mit getakteten AC/DC-Wandlern. Um die teuren und voluminösen Speicher kondensatoren zu vermeiden, wurde das Schaltungskonzept des sog. Overlapping Converters angewandt. Dies ist ein einstufiger Wandler mit sinusförmiger Stromaufnahme entsprechend EN 60 655-2. Einstufig bedeutet hier, daß keine Energie zwischengespeichert, sondern die Netzeistung direkt dem Verbraucher, d.h. der Batterie, zugeführt wird. Bei konstanter Batteriespannung entsteht dann ein sin²-förmiger Ladestrom mit einer Frequenz von 100 Hz

Dieser pulsierende Strom weist allerdings einen höheren Effektivwert als ein Gleichstrom auf, so daß die Jouleschen Verluste in der Batterie höher sind als beim idealen Gleichstromladen. Für das Laden mit 3 kW an der einphasigen Steckdose führt dies zu einer Verminderung des Batterieladewirkungsgrades für die Batterien von BMW und VW von 98% auf 97 %. In dem Bussen von Neoplan sind 3 Ladegeräte zu je 3 kW Leistung eingebaut. Wären alle drei Geräte an einer Netzphase angeschlossen, so würde der Ladewirkungsgrad der Batterien von 97,5 % auf 96,25 % sinken. Da die Geräte jedoch aus einem Drehstromnetz versorgt werden, überlagern sich die Ströme der einzelnen Geräte zu einem fast idealen Gleichstrom, so daß sich der Gleichstromwirkungsgrad einstellt. Bei nur zwei Phasen entsteht ein resultierender Ladestrom, der eine Minderung des Ladewirkungsgrades von nur 0,5 % gegenüber dem Gleichstromwert zur Folge hat. Die in allen betrachteten Fällen geringen Abweichungen vom idealen Gleichstromwirkungsgrad sind also aus energetischer Sicht zu akzeptieren.

Die wichtigsten Daten des Ladegerätes sind in folgender Tabelle zusammengefaßt:

Ladeleistung:	ca. 3 kW
Ausgangsspannung:	120 V bis 240 V in Stufen nach Anwendung
Leistungsfaktor:	> 0,99 nach EN 60 555-2
Eingangsstrom:	max. 15 A geregelt, umschaltbar auf 9 A über Signaleingang
Eingangsspannung:	230 V ±15 % einphasig
Wirkungsgrad:	>92 % für Leistungen > 800 W
Umgebungstemperatur:	-20 °C bis +40 °C mit voller Leistung +40 °C bis +80 °C mit reduzierter Ausgangsleistung
Schutzart:	IP 54 ohne Einbeziehung des Lüfters
Schutzklasse:	I

Mechanische Festigkeit:	Prüfbedingungen in allen 3 Raumachsen:
	a) Amplitude der Auslenkung 3 mm konstant im Bereich 10 Hz bis 18 Hz
	b) Amplitude der Beschleunigung 40 m/s ² konstant im Bereich 10 Hz bis 300 Hz
Funkentstörung:	nach VDE 0871 Kurve B Eingang, Kurve A Ausgangs- und Signalleitung
Kühlung:	forcierte Lüftung durch Anbaulüfter
Geräuschentwicklung:	<= 40 dB (A) nach DIN 45 630
Abmessungen:	ca. 300 x 120 x 150 mm ³ mit Anbaulüfter
Gewicht:	ca. 6 kg

Tabelle 4: Technische Daten des Bordladegerätes

7.7 Literatur

- /Birnbreier-96/ Birnbreier,Mennicke: Erprobung von Elektrofahrzeugen der neuesten Generation auf der Insel Rügen, Abschlußbericht der ABB Hochenergiebatterie GmbH , März 1996. (unveröffentlicht)
- /Brämig-95/ Brämig et al: Sicherheit von Elektrofahrzeugen, Fachtagung der DGES: Elektrofahrzeuge im Aufschwung - Zukunftsvisionen und Realität, Berlin 27. und 28.4.1995
- /Gemis-94/ Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 2.1, Erweiterter Endbericht, Öko-Institut Darmstadt 1994
- /Neoplan/ MIC: Der Metroliner im Carbondesign. Broschüre von Neoplan Stuttgart
- /Siencnik-91/ Siencnik: Der Verbrennungsmotor: Stand, Entwicklung und Perspektiven aus der Sicht der Forschung und Industrie, Seminar „Luftreinhaltung im Verkehr“ Haus der Technik, Essen 1991
- /USABC-93/ United States Advanced Battery Consortium: Electric vehicle battery test procedure manual, Initial Release February 1993
- /Weimer-91/ Weimer: Messungen am Trige Titan Motor und Sigma Antrieb, Technischer Bericht der Lehrstuhls Leistungselektronik und Elektronik, Universität Kaiserslautern, 1991 (unveröffentlicht)

8. AEG Anglo Batteries

8.1 Einleitung und Zusammenfassung

Die AEG Anglo Batteries GmbH hat am BMBF Forschungsvorhaben „Elektrofahrzeuge der neusten Generation - Praxistest Rügen“ mit 51 ZEBRA Batterien von zusammen mehr als 800 kWh Batteriekapazität in 31 der 60 auf Rügen eingesetzten Elektrofahrzeuge teilgenommen.

Nach anfänglichen Problemen unter den rauen Umweltbedingungen am Baltischen Meer, auf Kopfsteinpflaster und Sandpisten, hat das ZEBRA Batteriesystem über 3 Jahre im Sommer und Winter seine Stärken demonstriert. Man hat viele Impulse für die Weiterentwicklung des ZEBRA Batteriesystems erhalten. Das BMBF Forschungsvorhaben „Elektrofahrzeuge der neuesten Generation - Praxistest Rügen“ schaffte damit wesentliche Voraussetzungen für den heutigen hohen Standard der Zuverlässigkeit, Robustheit und Sicherheit der ZEBRA Batterien.

Hersteller	Fahrzeug	Anzahl	Batterien [Typ]	Nennspannung [V]	Nennenergieinhalt [kWh]
BMW	3er	6	Z8	181	21,7
BMW	3er	1	Z5	188	17,0
Mercedes	190	7	Z5 + Z6	173	25,5
Mercedes	Transporter	8	Z5 + Z5	227	34,0
Opel	Astra Caravan	5	Z5 + Z6	284	25,5
VW	Golf	2	Z8	181	21,7
VW	Golf	2	Z5	188	17,0
Gesamt		31	51		802,6

Tabelle 1: Elektrofahrzeuge auf Rügen mit ZEBRA Batterien

Die 51 ZEBRA Batterien haben insgesamt ungefähr mit 173 MWh 797.000 km zurückgelegt. Dabei sind die Elektrofahrzeuge mit ZEBRA Batterien im Rahmen des Projektes überdurchschnittlich viele Kilometer gefahren. Eine wesentliche Erkenntnis ist dabei, daß der Nutzer Fahrzeuge mit einer größeren Reichweite besser akzeptiert und dabei seinen Nutzungsgrad erhöht. Fahrzeugreichweiten von 50 km sind nicht ausreichend, da der Fahrer eine Reserve zu seiner Sicherheit wünscht.

Fahrzeuge	Batterietyp	min. km-Leistung [km]	max. km-Leistung [km]	max. Ø km-Leistung [km/Tag]	min. Ø spez. Verbrauch [kWh/tkm]	Ø Reichweite [km/Ladung]
BMW 3er	Z5 oder Z8	11957	24573	63	0,186	83
Mercedes 190	Z5 + Z6	14644	100299	134	0,215	79
Mercedes Transporter	Z5 + Z5	5066	24614	43	0,251	53
Opel Astra Caravan	Z5 + Z6	19800	33020	60	0,176	98
VW Golf	Z5 oder Z8	5959	28566	61	0,169	74
Projekt gesamt		5066	100299	134	0,169	98
Basis		3/96	6/96	1995 (HTW Dresden)	1995 (HTW Dresden)	errechnet

Tabelle 2: Einsatzprofil der Fahrzeuge mit ZEBRA Batterien

In Tabelle 2 fällt besonders ein Mercedes Fahrzeug auf, das durchschnittliche Tagesstrecken von 134 km erreicht hat. Dieser Anwender zeigt, daß zuverlässige Elektrofahrzeuge auch ohne Schnellladung große Tageswegstrecken zurücklegen können. Die Effekte der Schnellladung auf die Nutzung der Elektrofahrzeuge mit ZEBRA Batterien können in diesem Rahmen nicht beurteilt werden, da die Schnellladung für diese Fahrzeuge erst im 1. Halbjahr 1996 zum Einsatz kam. Unter optimalen Bedingungen liegt die Reichweite bei einzelnen Fahrzeugen sogar über 150 km pro Ladung.

Berücksichtigt man, daß

- die Fahrzeuge konvertiert und nicht optimiert wurden,
- das Gesamtsystem unausgereift, zum Teil mit 2 Batterien in Serie, aufgebaut war,
- Integrationsfehler zu Ausfällen führten,

so wird verständlich warum keine statistischen Ausagen über die Lebensdauer der ZEBRA Batterie gemacht werden können.

Die Ergebnisse auf der Basis des Entwicklungsstandes der Batterie von 1992/93 aus Tabelle 2 und Anlage A 8.2 zeigen in Einzelfällen aber das Potenzial des ZEBRA Batteriesystems: Über 100.000 km bei ungefähr 800 Nennzyklen in einem Einsatzzeitraum von ca. 3 Jahren.

8.2 Das ZEBRA Batteriesystem

Die AEG Anglo Batteries GmbH, Ulm, ein Joint-Venture der Daimler Benz AG und der Anglo American Corp., betreibt die Entwicklung, Produktion und Vermarktung der ZEBRA-Batterie, die auf dem elektrochemischen System Na / NiCl_2 mit keramischen Elektrolyten beruht.

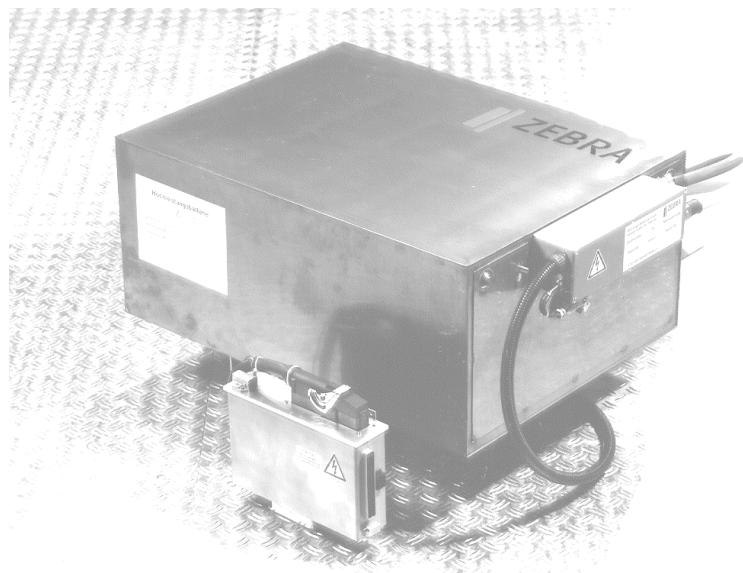


Abbildung 1: ZEBRA Batterie Z5

Ausgangsmaterial für die Elektroden ist Kochsalz und Nickel in Verbindung mit einem keramischen Festelektrolyt, der zusammen mit den Elektroden in einem Zellbecher angeordnet die Zelle bildet.

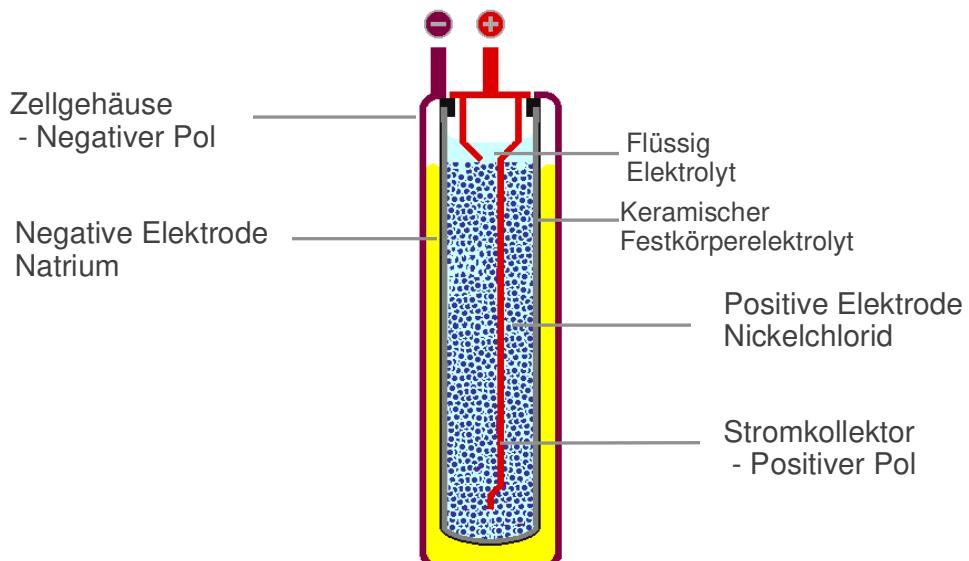


Abbildung 2: Die ZEBRA Zelle

Während des Ladevorgangs wird aus Nickel (Ni) und Kochsalz (NaCl) Natrium (Na) und Nickelchlorid (NiCl_2) gebildet. Beim Entladen entsteht wieder Kochsalz (NaCl) und Nickel (Ni). Dieser Vorgang ist vollständig reversibel und läuft ohne Nebenreaktionen ab.

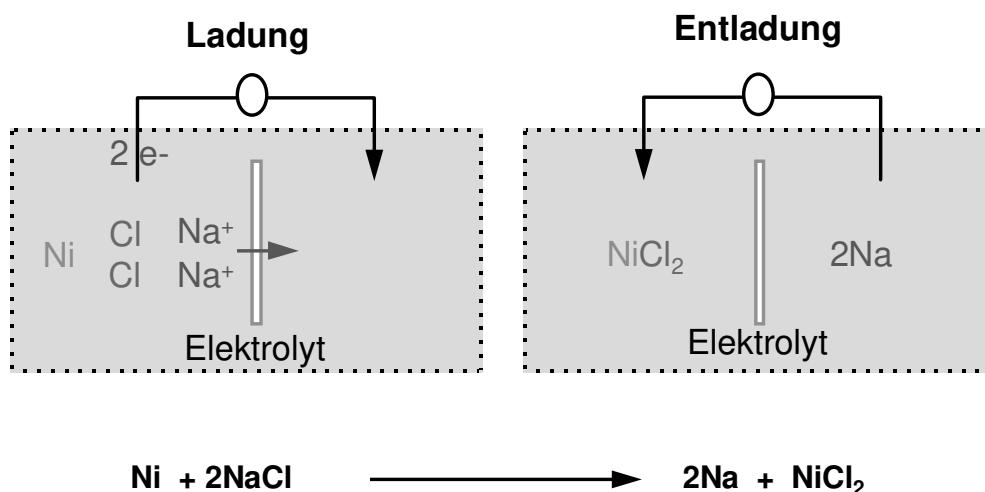


Abbildung 3: ZEBRA Zellreaktion

150-500 Zellen werden zu einer Batterie zusammengeschaltet, deren Gehäuse nach dem Prinzip der Thermosflasche doppelwandig und vakuumisiert ist. Eine elektrische Heizung (wahlweise zusätzlich Kühlung) ist zur Temperaturregelung eingebaut.

Die ZEBRA-Batterie ist schnellladefähig: 50% der entladenen Energie können innerhalb von 45 Minuten wieder aufgeladen werden.

Die interne Betriebstemperatur liegt bei $270\text{-}350^\circ\text{C}$. Durch diesen Betriebstemperaturbereich kann die Batterie nicht nur Elektrizität, sondern auch nutzbare Wärme für eine Fahrzeugheizung im Winter speichern.

Für den Hochleistungsbetrieb ist eine Batteriekühlung erforderlich, die wegen der hohen Betriebstemperatur auch bei tropischen 50°C im Schatten problemlos funktioniert. Leistung und Lebensdauer sind damit unabhängig von klimatischen Einflüssen. Bei Abkühlung der Batterie treten keine Ladungsverluste auf. Der Ladezustand bleibt zeitlich unbegrenzt erhalten. Die Batterie ist korrosionsfrei. Die ZEBRA-Batterie ist tolerant gegen Überstrom und gegen mehrfaches Abkühlen und Aufheizen, also äußerst sicher.

Die komplette ZEBRA Batterie ist recyclingfähig. Wir garantieren heute schon die Rücknahme.

8.3 Lieferungen

Die Auslieferung der Batteriesysteme, bestehend aus dem wartungsfreien doppelwandig vakuumisierten Batterieblock, dem Batteriesteuengerät und der Kühlung, erfolgte vom zweiten Halbjahr 1992 bis einschließlich dem zweiten Halbjahr 1994 an die Fahrzeughersteller. Dieser lange Lieferzeitraum, der auch auf die Erweiterung des Lieferumfangs der AEG Anglo Batteries GmbH zurückzuführen ist, führte zum Einsatz von ZEBRA Batterien in unterschiedlichen Entwicklungsstadien. Ab 1994 sind die Batteriesysteme aus unserer

Pilotlinie, die der Erprobung von Serienfertigungsprozessen dient und die Produktmuster für Flottenerprobungen wie dem BMBF Forschungsvorhaben „Elektrofahrzeuge der neusten Generation - Praxistest Rügen“ zur Verfügung stellt, geliefert worden. Die technische Ausführung der jeweiligen ZEBRA Batterien sowie ihre Zuordnung zu den einzelnen Elektrofahrzeugen ist aus der Anlage 1 und 2 zu entnehmen.

8.4 Betreuung der Rügenfahrzeuge

Um eine bestmögliche Betreuung der 31 Elektrofahrzeuge mit ZEBRA Batteriesystemen zu gewährleisten, wurde - nachdem alle ZEBRA Batterien ausgeliefert waren - im 2-wöchigen Rythmus ein Serviceingenieur der AEG Anglo Batteries GmbH nach Rügen abgestellt.

Zeitraum	Serviceeinsätze
bis 1. Halbjahr '94	Einsatz nach Bedarf
2. Halbjahr '94	9
1. Halbjahr '95	12
2. Halbjahr '95	8
1. Halbjahr '96	5

Tabelle 3: Unterstützung durch die AEG Anglo Batteries GmbH vor Ort auf Rügen

Durch den regelmäßigen Einsatz des Services vor Ort konnte die Verfügbarkeit der Elektrofahrzeuge deutlich verbessert werden. Die über die Zeiträume reduzierte Anzahl von Serviceeinsätzen spricht für die gestiegene Zuverlässigkeit des ZEBRA Batteriesystems. In diesem Rahmen wurden 103 Meßfahrten/ Konstantentladungsmessungen durchgeführt, um den Zustand der Batterien zu beurteilen.

8.5 Probleme im Rahmen des Flottenversuchs

Die wesentlichen Probleme, die während der Projektlaufzeit auftraten, betrafen die Steuerelektronik des Batteriesystems und die Verschaltung der Batterien in Serie.

In der Anfangsphase spiegelten sich hierbei insbesondere die Probleme in der Abstimmung der Kommunikation/Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Batteriesystem wider.

Im Verlauf des Projektes wurde zur Verbesserung dieser Komponente die Software für das Batteriesteuergerät schrittweise weiterentwickelt und die zugekauft Elektronik einer strikteren Qualitätssicherung unterzogen und die Zuverlässigkeit den Umweltbedingungen angepaßt. Die Verschaltung der ZEBRA Batterien wurde soweit möglich von der Serien- auf die Parallelschaltung umgestellt. Damit laufen zum Ende des Projektes die ZEBRA Batteriesysteme weitgehend störungsfrei.

8.6 Weiterentwicklung des Batteriemanagementsystems

Die Verbesserung der Peripherieelektronik und ihrer Software zum optimalen Einsatz und zum Schutz der ZEBRA Batterien erfolgte in folgenden Schritten:

Einführung	Änderung	Auswirkung
Juni '94	Ah-Zähler	Toleranzen der Integration des Stromes über die Zeit konnten zu Tiefentladungen führen, deshalb wird die Batterie durch einen gewollten Offset geschützt
Juni '94	Übertragungsformat	Diagnose einer Batteriestörung kann jetzt per Standardmodem als Fernanalyse erfolgen
Sep '94	Alarmfunktion	Beim Verlassen des erlaubten Betriebsfensters bzgl. Übertemperatur und Isolationsfehler wird der Nutzer durch ein akustisches Signal gewarnt
Sep '94	Freigabe	Bei Übertemperatur wird die Freigabe bei Wiedererreichen der erlaubten Betriebstemperatur erteilt
Sep '94	Betriebsparameter	Die Berechtigung zum Eingriff auf die Betriebsparameter für die ZEBRA Batterie wird zum Schutz vor Änderungen durch Paßwortlevels geschützt
Dez '94	Ladefreigabe	Auch bei negativem Ah-Zähler (durch den Offset) wird die Freigabe zur Ladung erteilt
Dez '94	Ah-Zähler	Der Offset wird nur berechnet, wenn das Fahrzeug nicht am Netz hängt - also in Betrieb ist
Dez '94	Strommeßung	Die Genauigkeit der Strommessung wird durch die Berücksichtigung des Shuntwiderstandes erhöht
Dez '94	Hauptschütze	Die Schaltung der Hauptschütze erfolgt zeitlich verzögert, damit bei kurzzeitigen Störungen keine ständigen Ein-/Ausschaltvorgänge auftreten
März '95	Ah-Zähler	Verbesserung der Genauigkeit durch Unterdrückung des Offset bei offenen Hauptschützen (kein Fahrbetrieb)
März '95	Fehlerspeicher	Einführung eines historischen Fehlerspeichers mit einer Löschschutzvorrichtung
Mai '95	Schnellladung	Steuerung für Schnellladung wurde integriert
Mai '95	Ladeschluß	Ladeschlußerkennung wurde als Anpassung für die Parallelschaltung geändert
Nov '95	Fehlerspeicher	Der Fehlerspeicher wird ergänzt zur verbesserten Auswertung durch die Speicherung des Datums
April '96	Betriebsparameter	Die Betriebsparameter werden doppelt gespeichert, damit es zu keinem Datenverlust kommen kann
April '96	Freigabe	Die Freigabe erfolgt auch nach Aufheizen automatisch

Tabelle 4: Entwicklungsschritte Batteriesteuergerät

Diese Schritte verbesserten die Sicherheit, die Zuverlässigkeit und ermöglichen ab März 1995 die eindeutige Verfolgung eines Fehlers, so daß die Ursache einer Störung im Gesamtsystem Elektrofahrzeug wesentlich schneller lokalisiert werden konnte. Dies erhöhte die Zuverlässigkeit und damit die Einsatzzeiten der Fahrzeuge mit ZEBRA Batterien.

8.7 Ausfallursachen für die ZEBRA Batterien und daraus abgeleitete Entwicklungsmaßnahmen zur Beseitigung der Fehlerquellen

Das ZEBRA Batteriesystem bestehend aus dem doppelwandig vakuumisierten Batterieblock, dem Batteriesteuergerät und der Kühlung ist wartungsfrei. Die Peripheriegeräte können ausgetauscht werden. Wird das Batteriegehäuse äußerlich beschädigt, so reduziert der Vakuumbehälter seine thermische Isolationseigenschaft. In diesem Fall treten erhöhte thermische Verluste auf, die durch ein erneutes Dichtschweißen des Vakuumbehälters behoben werden können. Dieser Fehler, der reparabel ist wird nicht weiter betrachtet. Er trat teilweise durch unsachgemäßes Handling bei der Integration der Batterien in die Fahrzeuge auf. Fallen Zellen aus, so sind Zellfehler in der Größenordnung von bis zu 5% der Gesamtzellzahl der Batterie tolerierbar. Weitere Zellfehler können nicht wie bei anderen Batteriesystemen durch einen Tausch der einzelnen Zellen behoben werden, sondern erfordern den Austausch der gesamten Batterie. Im Fall der Serienschaltungen wurden die Batterien, soweit von Fahrzeugseite möglich, in Abstimmung mit den Fahrzeugherstellern vorsorglich ausgetauscht, um im Rahmen des Rügen Projektes zuverlässigen Betrieb der ZEBRA Batterien zu gewährleisten. Die Ausfälle sowie auch die vorsorglich außer Betrieb genommen Batterien sind in der Tabelle 5 aufgeführt.

Ausfallgrund	Kaltbelastung	Serienschaltung	Kurzschluß	Sonstiges
Batterietyp	Z5/005	Z5/015	Z5/020	Z5/010
und	Z5/006	Z5/018	Z8/005	(bei Reparatur)
Serien-	Z5/009	Z5/019	Z8/011	Z8/006
nummer	Z5/017	Z5/023		(Tiefentladung)
	Z5/109	Z5/032		
		Z5/034		
		Z5/035		
		Z5/036		
		Z5/039		
		Z5/040		
		Z5/044		
		Z5/063		
		Z5/073		
		Z6/004		
		Z6/008		
		Z6/009		
		Z6/012		
		Z6/015		
		Z6/016		
		Z6/019		
		Z6/029		
Gesamt	5	21	3	2

Tabelle 5: Außerbetrieb genommene ZEBRA Batterien im Rahmen des BMBF-Projektes (Stand 6/96)

Der Austausch der Batterien verlief aufgrund von Produktionsengpässen oder da die Produktion einiger Typen eingestellt wurde nicht immer reibungslos, so daß teilweise erhebliche Stillstandszeiten auftraten. Die in Tabelle 5 aufgeführten Ursachen für die Außerbetriebnahme der Batterien wurden jeweils eingehend untersucht und haben dabei mit folgenden Ergebnissen zur Weiterentwicklung der ZEBRA Batterie beigetragen:

- **Zerstörung der Batterien durch Belastung im kalten Zustand:**

ZEBRA Batterien dürfen nur innerhalb ihrer Betriebstemperaturgrenzen belastet werden. Die ersten Fahrzeuge wurden ohne Schalt-/Schutzelemente zum Ladegerät, Umrichter und DC/DC-Wandler aufgebaut, da auf Basis der Hauptschütze des Antriebes eine ungewollte Belastung, d.h. eine Belastung der Batterie bei Freigabeentzug durch das Batteriesteuengerät, ausgeschlossen wurde. Dies entsprach dem Stand der Technik, denn Vorversuche mit Zellen zeigten, daß diese im kalten Zustand so hochohmig sind, daß kein Strom fließt.

Der Praxisbetrieb auf Rügen zeigte, daß Batterien trotz Freigabeentzug mit einem Leckstrom betrieben wurden. Daraufhin wurde das Batteriesteuengerät weiterentwickelt, damit es alle Verbraucher - einschließlich sich selbst - elektrisch von der Batterie trennen kann. Diese Steuerelektronik entzieht nicht nur allen Verbrauchern das Freigabesignal, sondern steuert außerdem Hauptschütze, die die Batterie elektrisch vom Restsystem trennen.

- **Ausfall der Batterien durch den Betrieb von seriell verschalteten Batterien:**

Eine wesentliche Erkenntnis der Erprobung von ZEBRA Batterien im Rahmen des BMFT Rügen-Projektes war der Ausfall von Batterien durch Zelfehler in seriell verschalteten Batteriesystemen. Diese Ausfälle traten bei Batteriesystemen mit Z5 und Z6 Batterien in Reihe auf. Diese Batterien haben aufgrund ihrer unterschiedlichen Dimensionen voneinander abweichende Gehäuseoberflächen und damit ein anderes thermisches Verhalten (Verhältnis von Wärmeverlusten zu den ohmischen Verlusten -Erwärmung- einer Batterie). Die interne Betriebstemperatur der ZEBRA Batterie ist proportional zu ihrem Innenwiderstand, d.h. eine wärmere Batterie hat einen geringeren Innenwiderstand als eine kältere Batterie.

Der unterschiedliche Widerstand der Batterien bewirkt eine nicht gewünschte Verteilung der Ladespannungen. Dies führt zur Überladung der Batterie mit dem höheren Widerstand. Damit ist ein in Reihe geschaltetes ZEBRA Batteriesystem instabil, da ständig überladene Zellen vor ihrem Ausfall hochohmig werden.

Auf der Basis dieser Erkenntnis werden ZEBRA Batterien beim Laden nur noch parallel verschaltet eingesetzt. So wird durch die Verteilung des Stroms in Abhängigkeit des Batterieinnenwiderstandes, das Erreichen des Ladeschlußkriteriums aller ZEBRA Batterien im System zum gleichen Zeitpunkt sichergestellt.

- **Zerstörung der Batterie durch einen internen Kurzschluß:**

Im Falle eines internen Kurzschlusses wurde die gesamte gespeicherte Energie in Wärme umgesetzt.

Die Ursache des Kurzschlusses konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden, obwohl daraufhin verschiedene Schadensverläufe an Versuchsmustern simuliert und nachvollzogen wurden. Die Untersuchung der ausgefallenen Batterie und ihrer Zellen konnte einen Kurzschluß zwischen Zellen nachweisen. Der Zerstörungsgrad war aber so fortgeschritten, daß eine weitere Analyse anhand der Batterie nicht mehr möglich war.

Dieser Vorfall wurde von uns auf Basis des Stands der Technik nicht erwartet, deshalb ist die gesamte Batteriekonstruktion einer weiteren detaillierten Analyse bzgl. ihrer Sicherheit unterzogen worden. Damit hat dieser Vorfall und die darauf folgenden Versuche und Weiterentwicklungen wesentlich dazu beigetragen, den heutigen hervorragenden Sicherheitsstand des ZEBRA Batteriesystems nach bis heute mehr als 50 Einzelversuchen zur Sicherheit zu erreichen.

Im Einzelnen wurde

- das Isolationsmaterial zwischen den Zellen höher und dicker dimensioniert,
 - das Batteriesteuergerät durch Paßwortlevels vor der Veränderung von Steuergrößen geschützt und
 - die Batteriesicherheit in den Mittelpunkt aller Weiterentwicklungen gestellt.
- Sonstiges - Tiefentladung:

Eine Batterie wurde durch ein falsch dimensioniertes/ eingestelltes Ladegerät tiefentladen. Dabei wurden insbesondere auch die für das ZEBRA Batteriesystem vorgegebene Ladeströme über die Zeit und die Ladespannung nicht eingehalten. Aus der Sicht der Batterie handelt es sich hierbei um einen Ausfall durch Fremdeinwirkung. Um solche Ausfälle durch nicht angepaßte Fremdsysteme in Zukunft ausschließen zu können, wird der Fahrzeugaufbau und die Erstinbetriebnahme sowie die Anpassung des Batteriesystems an das Fahrzeug in Zusammenarbeit mit dem Hersteller heute wesentlich detaillierter durch unsere Serviceingenieure überprüft und dem Kunden Empfehlungen für Ladegeräte bzw. genaue Vorgaben für die Einstellung der Restsystemgeräte und deren Kommunikation mit dem Batteriesteuergerät gegeben. So können schon im Vorfeld beim Aufbau eines Elektrofahrzeugs die Voraussetzungen für eine hohe Lebensdauer des Batteriesystems geschaffen werden.

- Sonstiges - Reparatur:

Eine Batterie wurde bei der Reparatur des Vakuumbehälters zerstört.

Durch Schulungen zu Prozeßabläufen und Qualitätssicherungsmaßnahmen wurde die Fertigung ständig verbessert.

Das Qualitätsmanagementsystem der Firma AEG Anglo Batteries GmbH wurde von der DQS im März 1996 nach ISO 9000 und DIN EN ISO 9001 zertifiziert.

8.8 Ergebnisse

Die Akzeptanz des Elektrofahrzeugs und damit auch der Batterie hängen im wesentlichen von

- der Zuverlässigkeit und einfachen Bedienung,
- den Aktionsradius und
- der gewünschten Beschleunigungsleistung ab,

wobei das konventionelle Fahrzeug und seine Sicherheit dem Nutzer als Maßstab dienen.

Die ZEBRA Batterie konnte nach anfänglichen Optimierungen insbesondere die Anforderungen bzgl. der Sicherheit, Zuverlässigkeit und dem der Nutzung angepaßten

Aktionsradius erfüllen. Außerdem wurde die von der Außentemperatur unabhängige Einsatzbereitschaft der ZEBRA Batterie sehr positiv bewertet.

Weitere Entwicklungsschritte für die Serie des Elektrofahrzeuges werden gemeinsam von Batterieherstellern und Fahrzeugproduzenten unternommen, wobei das Elektrofahrzeug mit ZEBRA Batterie beste Aussichten hat, sich in einem Markt für umweltfreundliche Mobilität mit einem definierten Einsatzbereich durchzusetzen.

8.9 ZEBRA Batterien heute

- **Zuverlässigkeit und Lebensdauer:**

Die erwartete Lebensdauer der wartungsfreien ZEBRA Batterie ist größer als 1000 Nennzyklen, das heißt 1000 vollständige Lade-/Entladezyklen. Damit wird je nach Anwendung eine Lebensdauer im Fahrzeug von über 150.000 km erreicht. Bestätigt wurde dies durch ein MB 190-Elektrofahrzeug der Daimler Benz Forschung mit einer ZEBRA Batterie, das rund um Stuttgart im Straßenverkehr in 3,5 Jahren über 112.000 km ohne Wartung der Batterie erreicht hat. Auch ein Mercedes Fahrzeug des Rügen Projektes hat dies mit über 100.000 km bestätigt.

Darüberhinaus haben wir für das Batteriesteuengerät einen Partner gefunden, der die Elektronik auf Basis der strikten Zuverlässigkeitsanforderungen der Automobilindustrie weiterentwickelt.

- **Reichweite:**

Mit einer Energiedichte von nahe 90 Wh/kg hat ein Elektrofahrzeug mit ZEBRA Batterien eine Reichweite von 150 -250 km in Abhängigkeit der Fahrzeugauslegung und des Fahrstils.

- **Leistung:**

Mit einer Leistungsdichte von heute 120 W/kg bei 80% Entladetiefe (DOD), 2/3 der Nennspannung (OCV) und einem 30 Sekunden-Peak erfüllt die ZEBRA Batterie noch nicht die Wünsche der Automobilindustrie. Deshalb haben wir eine neue Zelle entwickelt und im Labor bereits erprobt, die bei den oben genannten Bedingungen (80% DOD, 2/3 OCV, 30s) eine Batteriespitzenleistung von 150 W/kg erreicht. Diese Technologie fließt in die Serie ein und wird voraussichtlich ab Mitte 1997 von der Pilotlinie verfügbar sein.

- **Sicherheit:**

Trotz der hohen Energiedichte ist die ZEBRA Batterie ein sicherer und zuverlässiger Energiespeicher, von dem selbst bei einem Unfall kein zusätzliches Gefahrenpotential sowohl für Fahrzeuginsassen als auch für umstehende Personen ausgeht. Dies ist in den letzten 5 Jahren durch mehr als 50 Sicherheitstests an Batterien bestätigt worden. Dabei flossen diese Informationen sowie die Rückmeldung des Services von Batterien aus dem Feld, wie z.B. dem BMBF Projekt auf Rügen, in die kontinuierliche Verbesserung der Sicherheitsstandards ein.

Serienfertigung:

Gemeinsam mit unseren Kunden entwickeln wir zur Zeit anwendungsspezifische Batterietypen, die auf Basis unserer Serienentscheidung in 1997 nach einer Kommissionierung 1999 voraussichtlich ab dem Jahre 2000 in Serie produziert werden.

9. DAUG - HOPPECKE

DAUG - HOPPECKE wurde von der DAUG (Deutsche Automobilgesellschaft), eine Tochtergesellschaft der Daimler Benz und Volkswagen AG, und HOPPECKE, einem privaten mittelständischem Unternehmen für die Produktion von alkalischen Batteriesystemen gegründet. DAUG - HOPPECKE ist allgemein für die Produktion von FNC-Batterien (Faser Nickel Cadmium Batterien) und deren Vertrieb zuständig. Das Projekt wurde von DAUG durchgeführt.

Im Entwicklungszentrum DAUG-Esslingen wurde der Grundstein für die FNC-Technologie gelegt und zusammen mit DAUG-HOPPECKE zur Marktreife und wirtschaftlichem Erfolg geführt. Weitere zukunftsweisende Systeme wie Nickel Metallhydrid und Nickel Zink befinden sich im Prototypen- bzw. Laborstadium.

9.1. Technische Systembeschreibung

9.1.1. Nickel Cadmium Zellen und Batterien in Fasertechnologie

Die in den Fahrzeugen eingesetzten Traktionsbatterien sind aus Einzelzellen zusammengesetzt, die elektrisch in Reihe verschaltet sind.

Faserstruktur-Technologie

Die Elektroden der Zellen bestehen aus einem dichten dreidimensionalen Netz (Abb 1) metallbeschichteter Kunststofffasern (300 m pro cm^3), in das die positiven und negativen Aktivmassen eingelagert sind und das auch die kleinsten Aktivmassenbereiche stromleitend erfaßt. Der innige Kontakt zwischen Aktivmasseteilchen und Stromleitung garantiert den geringen Innenwiderstand, die hohe Belastbarkeit und die Schnelladefähigkeit der Faserstrukturelektroden.

Die Technologie erlaubt es, die Leitfähigkeit der Gerüste, das Gewicht der Elektroden und Zellen, die Porenstruktur, die Elektrodendicke, die Abmessungen und Form der Elektroden, die Aktivmassen usw. ohne großen Aufwand den unterschiedlichsten Anforderungen in der Praxis anzupassen und zu optimieren.

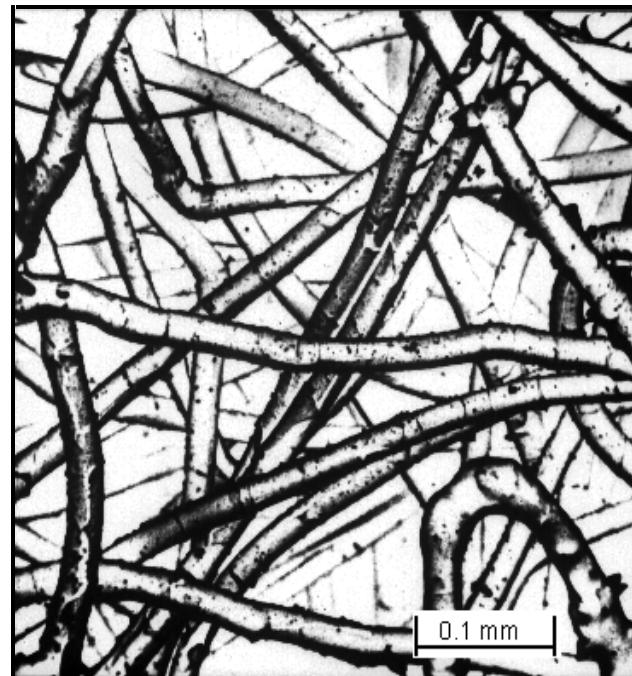


Abb.1: Faser-Struktur

Recom-Prinzip als neues Zelldesign

Eine neuartige Plattenanordnung sowie die Fasertechnologie erlauben es, die bisher für "Consumer-Zellen" bestehende Größenbeschränkung gasdichter Zellen von ca. 10 Ah zu durchbrechen und auf 100 Ah anzuheben.

Gegenüber den "Consumer-Zellen" enthält die Recom-Ausführung ein zusätzliches ungefülltes Fasergerüst, das am Potential der Negativen liegt und für eine effektive und gleichmäßige Rekombination des Sauerstoffs in der Überladephase sorgt. Der rasche Sauerstoffverzehr unter Vakuum im Zellinnern ermöglicht die Verwendung von Zellgehäuse in Quaderform aus dünner Metallfolie, die Vorteile hinsichtlich des Gashaushalts und für die Wärmeabfuhr bieten. Das Zellgehäuse ist mit einem wiederschließendem Sicherheitsventil ausgerüstet, um selbst nach unsachgemäßem Gebrauch (Überhitzung, Umpolen) die Zelle gebrauchsfähig zu erhalten.

Recom-Prinzip

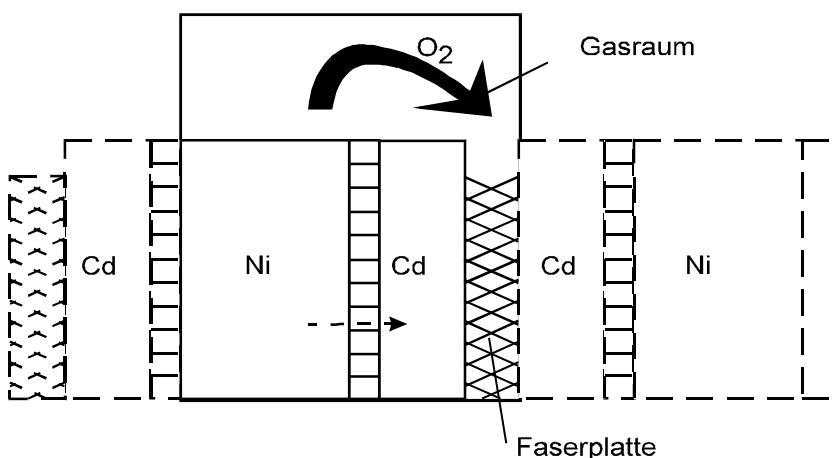


Abb.2: Recom-Prinzip

niedriges Gewicht sind attraktive Voraussetzungen für ein breites Anwendungsspektrum der Recom-Zellen in Elektro-Fahrzeugen.

Die Elastizität und die große Oberfläche des Gerüstes bieten weiter viele praktische Vorteile gegenüber anderen Technologien:

- o absolut wartungsfreie Zellen
- o hohe Energiedichten (> 45 Wh/kg)
- o hohe Leistungsdichten (> 700 W/kg)
- o kurze Ladezeiten (< 30 Minuten)
- o hohe Zyklusfestigkeit (> 2000 Vollentladungen)
- o hohe Crash-Sicherheit

Die räumliche Trennung von Speicherelektroden und Rekombinationsplatten ermöglicht die gezielte Anpassung der Zelle durch beliebige Plattenstärken an die jeweils geforderten Energie- und Leistungsdichten. Im Unterschied zu konventionellen Ausführungen verkrafteten Recom-Zellen hohe Ladeströme auch in der Überladephase. Das Vakuum im Innern der Zelle bleibt dabei erhalten. Wartungsfreiheit, Zyklusfestigkeit und

9.1.2. Batterie-Peripherie

In allen Fahrzeugen werden komplett Traktionssysteme inklusive elektrischem und thermischem Management (Abb. 3) der Zellen und Ladegerät eingesetzt. Die notwendige Hardware ist von DAUG entwickelt worden und wird den spezifischen Erfordernissen der Fahrzeuge angepaßt. Das Ladegerät wurde von der Fa. Brusa zugekauft und für FNC-Recom-Batterien modifiziert.

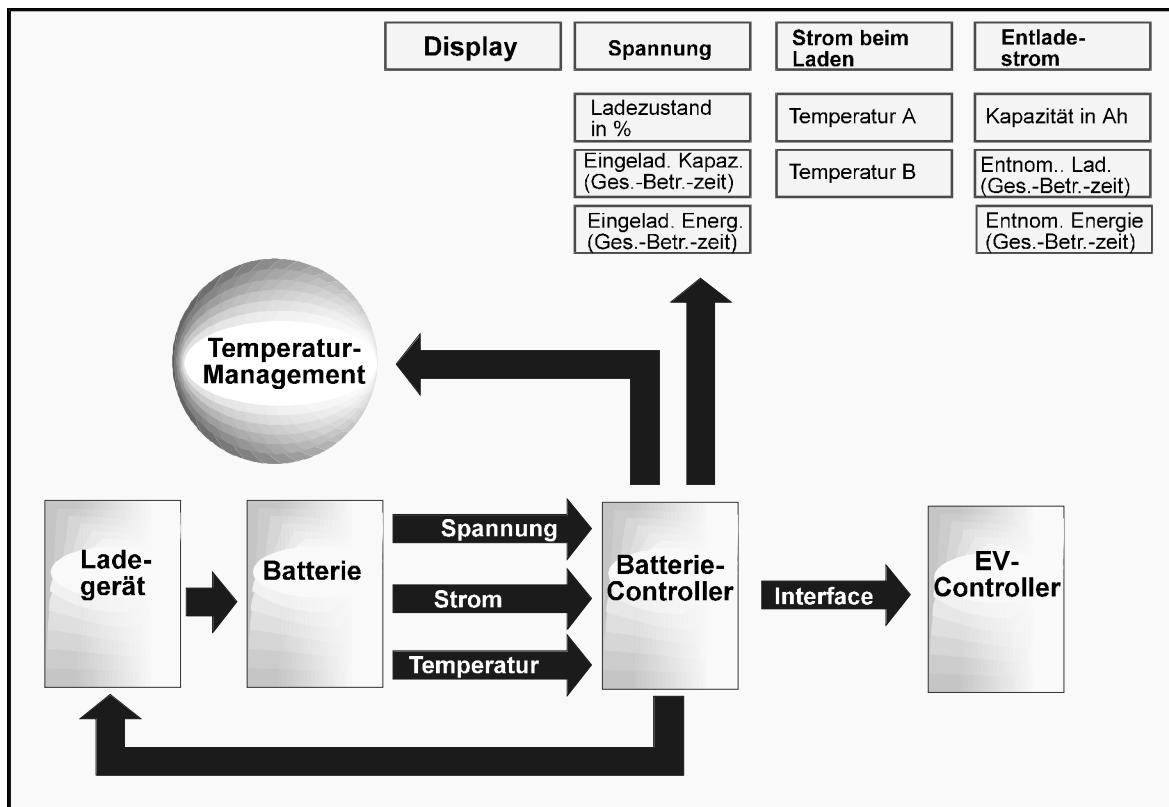


Abb. 3: Thermisches und elektrisches Batteriemanagementsystem (schematisch)

Der Batteriecontroller erfaßt die Spannung, den Strom und die Temperatur der Batterie. Er zählt ein- und ausgeladene Ampere- und Wattstunden während des Fahrbetriebes und summiert sie über die gesamte Lebensdauer der Batterie. Die Anzeige der Daten erfolgt an einem gut lesbaren Display.

Im Batteriecontroller sind die erforderlichen Ladealgorithmen einprogrammiert. Er ist in der Lage sämtliche Vorgänge zu steuern. Ebenso überwacht der Controller die Temperaturverteilung in der Batterie. Die angestrebte gleichmäßige Temperaturverteilung in der gesamten Batterie wird durch ein spezielles Luftkanalsystem gewährleistet, das jeder Zelle Luft der gleichen Temperatur und Menge zuführt, so daß zwischen den Zellen einer Batterie nur wenig Temperaturunterschiede auftreten. Der Controller gibt ferner direkte Signale an den Motorcontroller, um z.B. das regenerative Bremsen oder die Leistungsentnahme aus der Batterie zu steuern.

9.2. Batterieherstellung und Einbau

Die fertigen Platten (positive und negative Einzelektroden) wurden von DAUG-HOPPECKE bezogen und in der DAUG zu Plattenstapeln vormontiert. Nach Einschieben des Staps in das Metallgehäuse und Verschweißen des Zellendeckels wurden die Zellen mit Elektrolyt gefüllt, formiert und anschließend zu Batterieeinheiten zusammengestellt. Es kamen zwei unterschiedliche Zellvarianten mit 70Ah bzw. 100Ah Nennkapazität zum Einsatz (s. Anhang A 9.1 und A 9.2). Nachstehend sind die den Fahrzeugen zugeordneten Batterievarianten aufgelistet:

Fahrzeugherrsteller	Fahrzeugtyp	Fahrzeug- bezeichnung	Fahrzeug- Nr.	Anzahl	Zellen- zahl	Zelltyp	Energie -inhalt [kWh]
Adam Opel AG	PKW	Astra	37 - 41	5	176	H 70	14,8
BMW AG	PKW	BMW 3er	08	1	133	H 70	11,2
Mercedes Benz AG	PKW	MB 180	09 - 11	3	150	H 70	12,6
-dito-	Transporter	MB 100	27 , 28	2	204	H 100	24,5
Volkswagen AG	PKW	A3	45 , 48	2	108	H 100	12,9
-dito-	Transporter	Caravelle	51 - 60	10	190	H 100	22,8

Tabelle 1: Batterievarianten im Rügen

Die Einbausituation der Batterien in die Fahrzeuge gestaltete sich mitunter etwas schwierig. Die aufgetretenen Probleme konnten jedoch durch intensive Zusammenarbeit mit den Fahrzeugherrstellern gelöst werden. Vorteilhaft erwies sich dabei der Aufbau der Batterie aus Einzelzellen, die die Aufteilung der Gesamtbatterie in Teileinheiten zuließen. Dadurch konnte das begrenzte Platzangebot in den Fahrzeugen zur Unterbringung der Batterie optimal genutzt werden, was sich günstig auf die Reichweite der Fahrzeuge auswirkte.

Besondere Sorgfalt beim Einbau der Batterien bzw. Teilbatterien mußte auf die Dimensionierung, Positionierung und Anbringung der Zu- und Abluftkanäle der Luftkühlung für die Zellen im Fahrzeug gelegt werden. Um eine optimale Kühlwirkung und eine lange Funktionsfähigkeit der Zellen im Fahrbetrieb zu garantieren, müssen die Zellen mit ca. einem Liter Kühlluft pro Zelle und Sekunde versorgt werden.

Ebenso gewissenhaft mußte auch die Verkabelung und die Schnittstellen zum Batteriecontroller vorbereitet werden, damit eine fehlerfreie Interaktion zwischen Batteriecontroller und Motorcontroller, Ladegerät und Kühlung der Zellen stattfinden kann.

9.3. Betreuung der Batterien - Inspektionen

Die erste Inspektion der Batterien fand erst eineinhalb Jahre nach Projektbeginn und einer durchschnittlichen Kilometerleistung von über 10.000 km pro Fahrzeug statt. Weitere Inspektionen erfolgten in etwa 5.000 km Abständen oder nach Bedarf. Die dabei durchgeführten Arbeiten umfassen Spannungsmessungen der Zellen unter Last, Überprüfen des Innendrucks der Zellen und wenn notwendig Reinigungsarbeiten. Auffällige Zellen wurden ausgetauscht. Insgesamt wurden ca. 7% der eingesetzten Zellen aussortiert und einer Prüfung unterzogen. Eine Liste der Inspektions termine ist im Anhang A 9.3 beigefügt.

9.4. Besonderheiten im Versuchsablauf - technische Änderungen

Der Versuchsablauf darf über die gesamte Versuchsdauer hinweg als erfolgreich beschrieben werden; es gab nur wenige bemerkenswerte Ereignisse und technische Änderungen:

- o Einführung einer modifizierten Lademethode und Ver minderung der Stillstandsverbräuche, um Energie zu sparen und den Wirkungsgrad der Batterien zu verbessern.
- o Einbau eines Diagnosesystems zum frühzeitigen Erkennen defekter Einzelzellen
- o Einführung der Schnellladetechnik

In der Öffentlichkeit wird die mangelnde Reichweite von Elektrofahrzeugen als stärkster Nachteil gegenüber den schadstoffausstoßenden konventionellen Fahrzeugen angeführt. Dies veranlaßte die Batteriehersteller Lademethoden zu wählen, die immer vollgeladene Batterien garantieren. Das bedeutet, daß solange das Fahrzeug an der Ladestation angeschlossen ist, vom Fahrbetrieb unabhängige Nebenverbräuche nachgepuffert werden, was den Energieverbrauch signifikant erhöht und den Wirkungsgrad erheblich verschlechtert. Wie in der Praxis im Rügenversuch zu sehen war, wird vom Nutzer die installierte Reichweite eines Fahrzeuges nur selten genutzt (Abb. 4), d.h. daß der volle Ausgleich der Nebenverbräuche nicht notwendig ist.

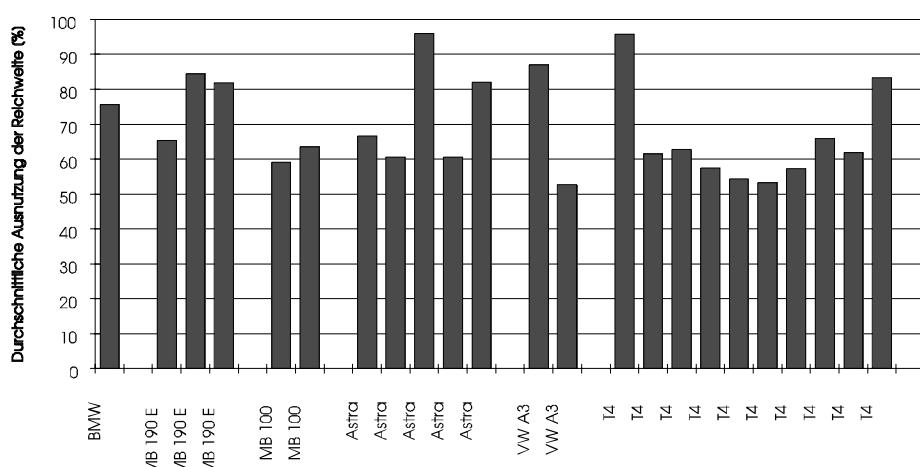


Abb. 4: Durchschnittliche Ausnutzung der installierten Reichweite

Daraufhin wurde das Ladeverfahren der Batterien so abgeändert, daß in der Hauptladephase nur noch ca. 6% der Nennkapazität überladen und in der Nachladephase (Standzeit) nur noch geringe von der Standzeit abhängige Mengen nachgepuffert wurden. Dies führte dazu, daß einer 28,8 kWh-Batterie in der Nachladephase nur noch ca. 2% (0,5 kWh) pro Tag nachgeliefert wurden; vor der Reduzierung waren es bis zu 5 kWh im gleichen Zeitraum.

Durch eine defekte Zelle kam es zu lokalen Überhitzung im Batteriekasten, dessen Kunststoffeinsatz (Modulkasten) sich dabei entzündete. Um weitere Vorfälle dieser Art zu vermeiden, wurde in allen Fahrzeugen das **Diagnosesystem** der Einzelspannungsüberwachung installiert, das frühzeitig defekte Zellen im Batterieverband lokalisiert und durch einen Signal-ton anzeigt.

Ein wesentlicher Schritt, um die Verfügbarkeit, Nutzung und Reichweite von Elektro-Fahrzeugen zu erhöhen, war die Errichtung der **Schnelladestationen** in Zirkow und Bergen.

9.5. Schnelladung

Von den 23 Fahrzeugen mit Nickel Cadmium Batterien wurden 10 Fahrzeuge für die Schnelladung umgerüstet. Im einzelnen betrifft es die Fahrzeuge Nr.8 (BMW), Nr.28 (MB180 Transporter), Nr.38 und 41 (Opel Astra), Nr.45 (VW Golf A3) und Nr. 51, 52, 53, 58, und 60 (VW T4 Transporter, Caravelle).

Im Mai 1994 konnte die erste 30 kW-Schnelladestation in Zirkow in Betrieb genommen werden. Erste Versuche wurden mit einem VW T4 Transporter durchgeführt, der mit einer 190ig-zelligen 100 Ah - Batterie ausgerüstet war.

Ziel des Versuches war es, die Kommunikation zwischen Batteriemanagement und Ladestation zu dokumentieren, die Sicherheitsfunktionen und die Bedienerfreundlichkeit des gesamten Systems zu überprüfen und das Batterieverhalten bei aufeinanderfolgenden Schnellladungen zu testen.

Die Versuche zeigten, daß die Batterie innerhalb einer Stunde aufgeladen und die Reichweite je Schnellladung um 70 bis 75 km vergrößert werden kann. Tagesreichweiten bis über 300 km konnten ohne Überhitzung der Batterie problemlos realisiert werden. Der Wirkungsgrad der Batterie lag über 70% (Tabelle 2).

Mittlere Reichweite bei Normalladung ("on-board"-Ladegerät):	70 to 95 km
Mittlere Reichweite bei Schnellladung (30kW-Ladestation):	70 to 75 km
Gesamtlademenge mit Schnellladung:	594 Ah
Entnommene Lademenge nach Schnellladung:	533 Ah
Ah-Wirkungsgrad	0.89
Eingeladene Energie mit Schnellladung	164 kWh
Entnommene Energie nach Schnellladung	118 kWh
Wh-Wirkungsgrad	0.72

Tabelle 2: Schnellladung mit 30 kW-Ladestation in Zirkow (VW Caravelle)

Nach einer 16-monatigen Erprobungszeit der Ladestation in Zirkow wurde in Bergen eine zweite Ladestation in Betrieb genommen. Die maximale Leistung dieser Station beträgt 60 kW und ermöglicht mit 200A-Ladestrom die Volladung der Batterie ca. 30 Minuten (Abb. 5).

Um die Temperaturstabilität des Batteriesystems zu testen, wurden während einer 24-stündigen Testfahrt mit einem VW T4 Transporter 16 "Non-stop"- Fahrten mit dazwischenliegenden Schnellladungen durchgeführt und somit keine "Abkühlzeit" für das Batteriesystem erlaubt. Die durchschnittliche Fahrzeit je Fahrt betrug ca. 1 Stunde und die Aufladezeit lag bei 30 Minuten. Es konnten über 850 Kilometer im Dauerbetrieb zurückgelegt werden, was für die Batterie einen Energiedurchsatz von 268 kWh bzw. 926 Ah bedeutete. Die Temperatur der Batterie blieb stabil und überstrich in der jeweiligen Periode aus Ladung und Entladung (Fahren) den Temperaturbereich von 22°C und 37°C (Abb.6).

Vergleichende Messungen mit der Bordladung ergaben keinen erhöhten Energiebedarf bei Schnellladungen. Der Wirkungsgrad bei Schnellladung konnte gegenüber der Bordladung bzw. Normalladung sogar verbessert werden. Dies ist auf die bessere Ladungsannahme der Nickel Cadmium Batterien bei höheren Strömen zurückzuführen (Abb.7).

Der Schnelladeversuch macht deutlich, daß mit Zwischenladungen innerhalb einer akzeptablen Wartezeit von weniger als 30 Minuten die tägliche Reichweite des Fahrzeuges auf einige hundert Kilometer erhöht werden kann, wobei die Temperaturgrenzen der Batterie nicht überschritten werden und auch der spezifische Energieverbrauch nicht erhöht wird.

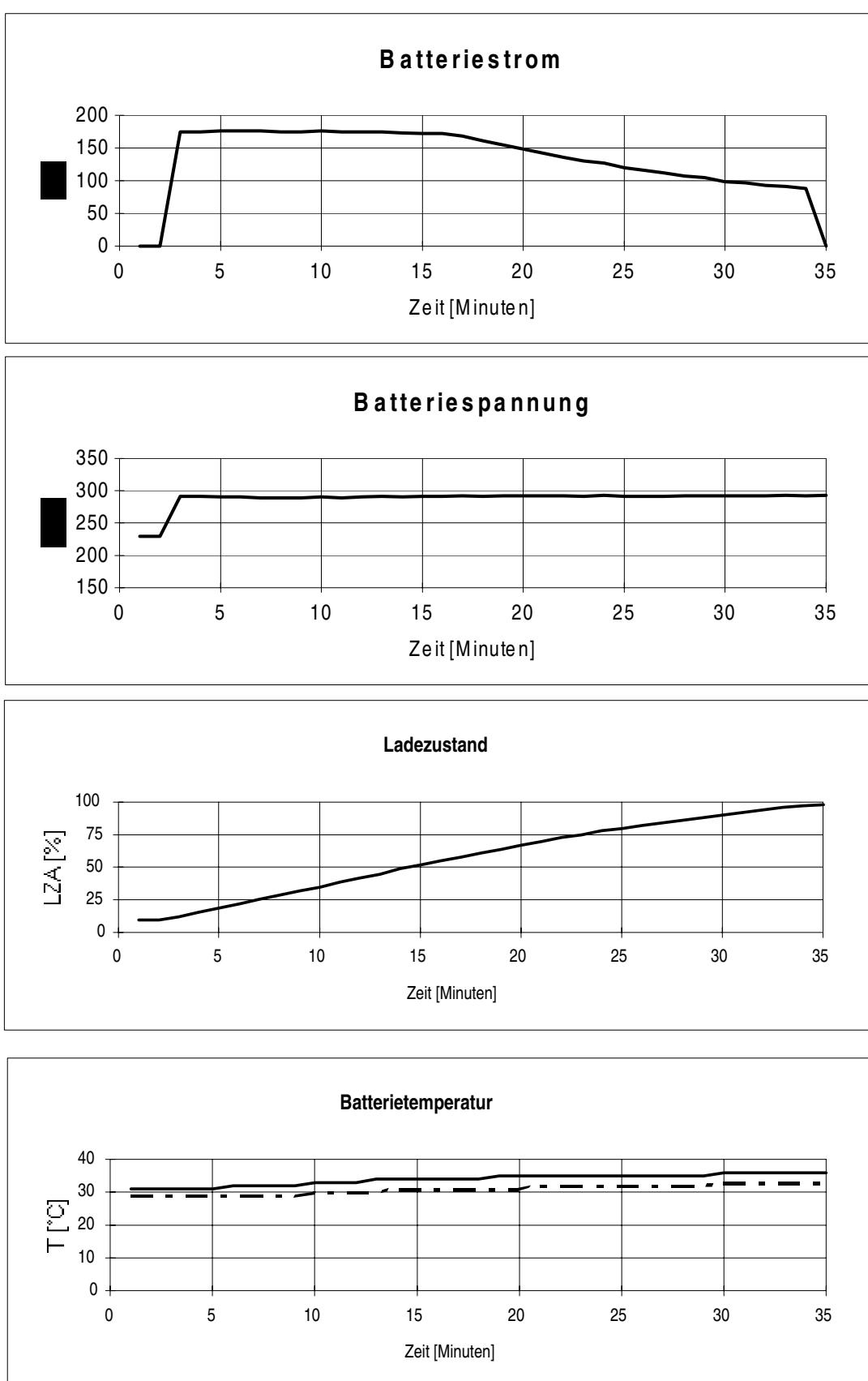


Abb.5: 60 kW-Schnellladung (Fahrzeug 58 / VW Caravelle)

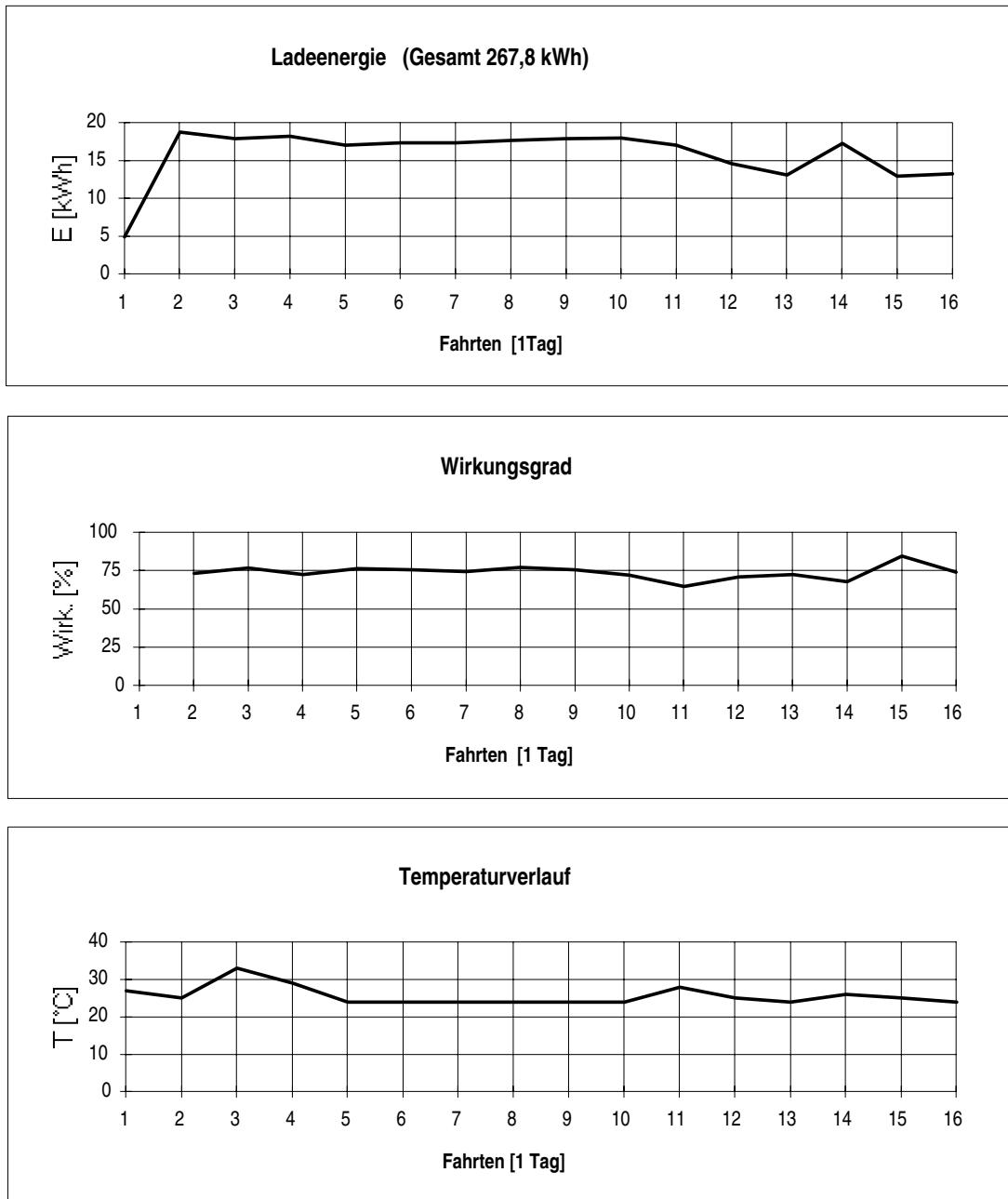


Abb.6: 24 Stunden Schnelllade-Dauertest (Fahrzeug 58)

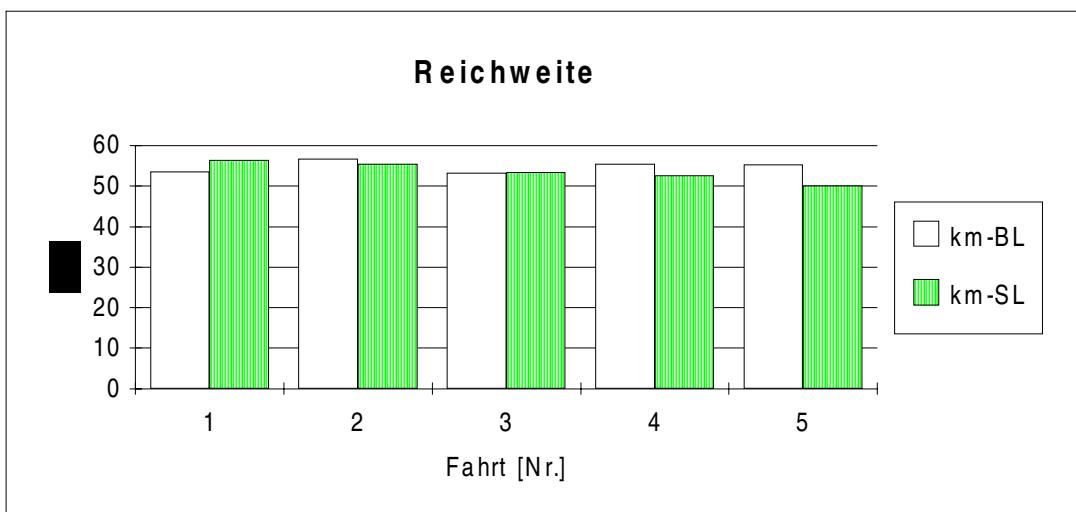
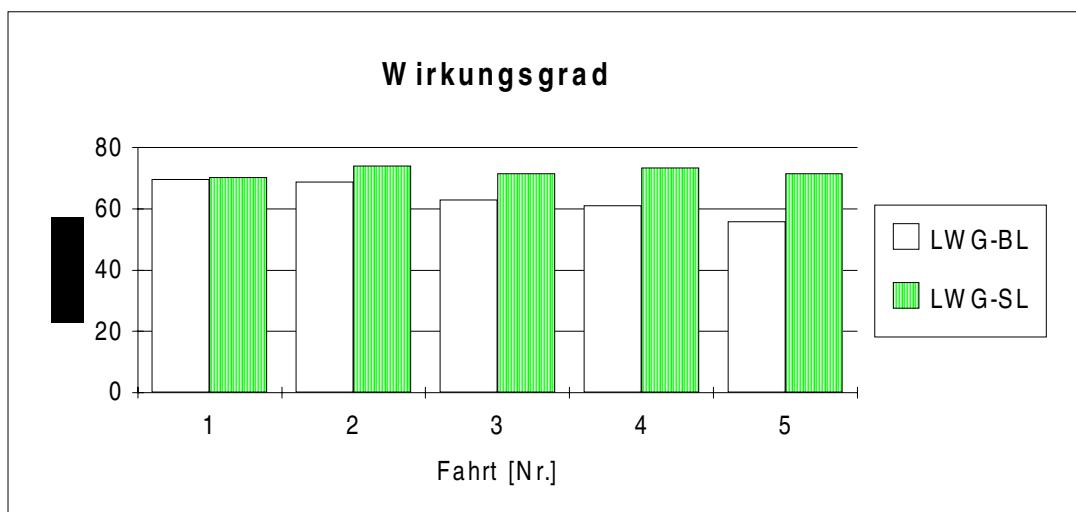
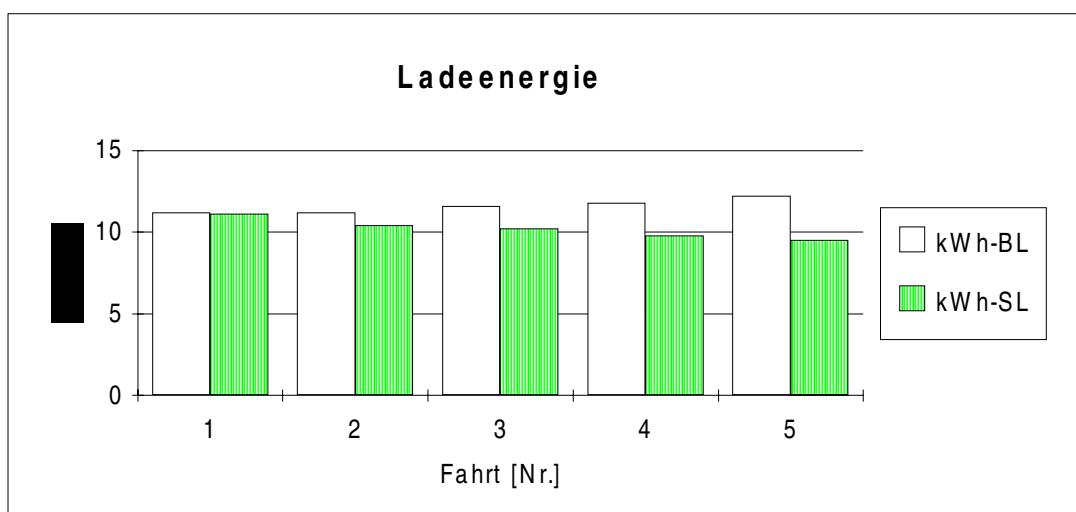


Abb.7: Energieaufnahme, Ladewirkungsgrad und Reichweite bei Schnell- und Normalladung (Fahrzeug 45 / VW Golf)

9.6. Batteriestatistik, Lebensdauer / km-Leistung

Die 23 mit FNC Batterien ausgerüsteten Fahrzeuge legten insgesamt mehr als 443.000 km zurück. Die geringste Kilometerleistung liegt bei 6.714 km und die beste bei 42.863 km, durchschnittlich kommen auf jedes Fahrzeug ca. 19.200 km. Die dem Batteriecontroller entnommenen aufsummierten batteriespezifischen Daten der Fahrzeuge sind in Tabelle 3 zusammengefaßt. Wie oft 85% der Nennkapazität einer Batterie während der Versuchsdauer durchgesetzt worden sind, gibt die Rubrik "Zyklen" in Tabelle 3 an:

Fahrzeug	Fahrzeug	Ablese-	km-Stand	Ah	kWh	Zyklen
Nr.		datum		Entladen	Entladen	
8	BMW	30.10.1995	15250	22675	3368	469
9	MB 190 E	26.08.1995	16908	21313	3916	518
10	MB 190 E	23.12.1995	22052	25427	4690	522
11	MB 190 E	29.12.1995	27643	32190	5407	676
27	MB 100	29.12.1995	10334	17205	4202	324
28	MB 100	29.05.1995	6714	10033	2464	196
37	Astra	31.12.1995	21976	20893	4257	479
38	Astra	20.10.1995	24151	23896	4911	577
39	Astra	30.11.1995	22745	15357	3126	343
40	Astra	22.12.1995	16773	15954	3522	401
41	Astra	30.01.1996	41807	35028	7112	738
45	VW A3	15.12.1995	17677	23807	2951	415
48	VW A3	20.12.1995	11911	26877	3369	462
51	T4	24.11.1995	42863	40882	8691	589
52	T4	20.12.1995	15889	17419	3785	340
53	T4	01.10.1995	20913	24880	5544	438
54	T4	31.12.1995	22061	27175	6046	505
55	T4	24.12.1995	16226	20996	4739	393
56	T4	05.10.1995	13486	15901	3491	333
57	T4	31.12.1995	13415	16253	3683	308
58	T4	09.01.1996	15606	18106	4072	312
59	T4	13.12.1995	17971	20877	4596	382
60	T4	15.11.1994	8640	8886	1965	136
		Summe	443011	502030	99908	

Tabelle 3: Während der Laufzeit aufsummierte Batteriedaten

Kumuliert waren die Fahrzeuge mit FNC-Batterien 19.500 Tage vor Ort auf Rügen. Dabei wurden ca. 100 Ereignisse gezählt, die ausschließlich der Traktionsbatterie angelastet und ca. 65 Ereignisse, die auf Batterieinspektionen zurückgeführt werden konnten, d.h. 5,1 Ereignisse pro 1.000 Tage Betrieb ($3,7 / 10.000 \text{ km}$) beruhten auf allgemeinen Batterievorfällen und 3,3 pro 1.000 Tage ($1,5 / 10.000 \text{ km}$) wurden durch Inspektionen verursacht (Anhang A 9.4). Die Traktionsbatterie erweist sich als relativ zuverlässige Komponente, die nur 20% aller ermittelten Ereignisse verschuldet und liegt damit im Bereich konventioneller Fahrzeugkomponenten (siehe auch Kapitel 1.5)

9.7. Batterieausfälle

Während der gesamten Versuchsdauer wurden nur drei Batterien und eine Teilbatterie ausgetauscht. Zwei davon wurden durch Ladefehler (Gerätedefekt), starke Überladung mit Elektrolytzersetzung, beschädigt; die Dritte mußte wegen ungenügender Kapazität ersetzt werden.

Normalerweise wird die Ladung bzw. das Ladegerät durch ein Signal des Batteriecontrollers, der einen definierten Temperaturanstieg am Ladeende erkennt, abgeschaltet. In beiden Fällen mit Ladefehler konnte das Signal zwar gesendet aber vom Ladegerät nicht verwertet werden. In dem einen Fall war dies auf den Zusammenbruch der Bordnetzspannung aufgrund eines defekten DC-DC-Wandlers zurückzuführen, der die Funktion des Batterie-controllers störte. Bei der zweiten Batterie war ein Temperatursensor am Ladegerät falsch montiert worden.

In der Teilbatterie kam es an einer defekten Zelle zur lokalen Überhitzung im Batteriekasten, dessen Kunststoffeinsatz (Modulkasten) sich dabei entzündete. Der Defekt an der Zelle war vermutlich durch häufiges Umpolen entstanden, das schließlich zur Erhöhung des Innenwiderstandes und starkem Erhitzen der Zelle während des Fahrbetriebs führte. Um weitere Vorfälle dieser Art zu vermeiden, wurde das Diagnosesystem der Einzelspannungsüberwachung in allen Fahrzeugen installiert.

9.8. Ergebnisse - Verbesserung und Weiterentwicklung von Bauteilen

Da es sich bei den FNC-Recom-Batterien nicht mehr um Labormuster sondern um Prototypbatterien handelt, fielen für den Herstellprozeß der Batterien keine grundlegenden Erkenntnisse ab. Wertvolle Ergebnisse konnten jedoch in der Betriebs- und Verhaltensweise der Batterien im alltäglichen Einsatz gesammelt werden, die sich insbesondere auf Service und Wartung der Traktionsbatterien und das thermische und elektrische Management sowie auf Sicherheitsaspekte ausgewirkt haben und auswirken werden.

Konventionelle Verbrennungsfahrzeuge werden regelmäßig nach einer gewissen Zeit oder zurückgelegten Distanz gewartet. Diese **Serviceinspektionen** dienen dazu, rechtzeitig verbrauchte Teile zu erkennen und auszutauschen, um die volle Funktionsfähigkeit des Fahrzeugs zu erhalten und die Gebrauchszeit zu erhöhen. Diese Maßnahmen sind zukünftig aufgrund der Projekterfahrungen auch auf Elektrofahrzeuge anzuwenden und auf das Batteriesystem auszuweiten, was zu Projektbeginn jedoch nicht im Ablaufplan vorgesehen wurde. Die einfachen Servicearbeiten können mit wenig Aufwand in die regelmäßigen Fahrzeuginspektionen eingebunden werden.

Die Serviceinspektionen erhöhen zusätzlich die **Funktions- und Betriebssicherheit** der Batterien. Unregelmäßigkeiten werden rechtzeitig erkannt; Maßnahmen können sofort eingeleitet und Batterieausfälle verhindert werden. Die Einzelspannungsüberwachung gibt zusätzliche Sicherheit zwischen den Serviceintervallen.

Der **Batteriecontroller** für das elektrische und thermische Management zeichnete sich während der gesamten Versuchsdauer durch äußerste Zuverlässigkeit aus. Es wurde kein Ausfall registriert.

Sehr viel Sorgfalt wurde auf die **Kühlung/Temperaturausgleich** der Zellen in den Batteriebehältern gelegt. Leider gelang es aufgrund fahrzeugspezifischer Gegebenheiten (Aufteilung der Batterie in 3 Teile, u.ä.) nicht bei allen Autos eine akzeptable Vergleichsmäßigung der Temperatur der einzelnen Zellen zu erreichen. Ungleichmäßige Temperaturreteilung in den Batterieteilen war der überwiegende Grund für Zellausfälle. Vor allem die Anbringung, Positionierung und Dimensionierung der Zu- und Abluftkanäle im Stau- bzw. Saugdruckbereich der Fahrzeuge muß zukünftig besser optimiert werden, um hohe Vergleichsmäßigung und Kühlwirkung zu erzielen. Auch im Innern des Batteriekastens sind durch Veränderung des Anblaswinkels für die Kühlluft und optimierter Zellanordnung noch Verbesserungen möglich.

Wesentliche Erkenntnisse für den praktischen Gebrauch von Elektroautos wurden bei der Durchführung des Teilprojektes **Schnelladeversuche** erhalten. Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Ladezeiten unter 30 Minuten wurden nachgewiesen, ohne die Batterie zu überhitzen
- Energiewirkungsgrade über 70%
- unbegrenzte Verfügbarkeit der Fahrzeuge (24 Stunden Test mit 820 km Fahrstrecke)
- Infrastruktur des Netzes größtenteils vorhanden (360V Netz)

9.9. Versuchsbewertung

Was sofort auffällt ist das Nutzerverhalten, das einige überraschende Merkmale aufweist. Von wenigen Vielfahrern abgesehen, wird die verfügbare Reichweite der Fahrzeuge nicht genutzt. Die Fahrzeuge werden überwiegend für Kurzstrecken eingesetzt. Offensichtlich stellt die Angst, auf offener Strecke mit leerer Batterie liegen zu bleiben, eine Hemmschwelle dar, die ausgedehnte Fahrten mit dem Elektrofahrzeug verhindert. Andererseits bestätigen die auf Rügen durchschnittlich täglich gefahrenen 40 bis 60 km die allgemeine Statistik. Dies kann die Argumentation nähren, daß der Durchschnittsfahrer kein Auto mit **Reichweiten von mehreren hundert Kilometer** für seinen täglichen Bedarf benötigt. In jedem Fall konnten die beiden **Schnelladestationen** in Bergen und Zirkow die verbrauchte Fahrenergie schnell wiederaufladen und den Teilnehmern "Sicherheit" vor ungenügender Reichweite geben. Daß dies möglich ist, hat der Rügenversuch eindrucksvoll belegt.

Aus diesen Ergebnissen heraus scheinen **Reichweiten** von 70 bis 90 Kilometer pro Ladung, so wie es das Nickel / Cadmium System bietet im großen und ganzen für den Alltagsbetrieb ausreichend zu sein.

Weiterhin geht aus den Daten über die Ausfallzeiten hervor, daß die **Zuverlässigkeit** des Batteriesystems FNC-Recom der DAUG im Bereich der mechanischen Komponenten der Fahrzeuge liegt.

10 HET Energieversorgung

(Hanseatische Elektrotankstellen HEVAG- PreussenElektra-Sydkraft GbR)

10.1. Übersicht über Ladeverfahren für Traktionsbatterien

10.1.1 Übersicht

Die prinzipiellen Ladeverfahren für Traktionsbatterien von Elektrostraßenfahrzeugen sind in Bild 1 dargestellt.

Wesentliche Funktions- und Bauart-Merkmale vermittelt die folgende Tabelle:

Verfahren	Ladeleistung	Ladegerät	Ankopplung
AC	2 bis 11 kW	im Fahrzeug	Schuko- oder CEE-Stecker
DC	18 bis 60 kW	extern	Spezialstecker
MF-AC	1 bis 150 kW	geteilt, im Fahrzeug und extern	induktiv = kontaktlos

10.1.2 Laden mit Wechsel-/Drehstrom (AC)

Das zur Zeit gebräuchlichste Ladeverfahren ist die Normalladung mit Wechsel- und Drehstrom (240 V/ 50 Hz oder 400 V/ 50 Hz) über fahrzeuginterne Ladegeräte (AC/DC-Wandler), die über Batteriecontroller gesteuert werden.

Die Leistung der Bordladegeräte orientiert sich an den standardisierten Netzanschlussmöglichkeiten (übliche Hausinstallation mit einem Nennstrom von max. 16 A/Außenleiter).

Die benutzte Steckdose sollte in der Bauart CEE ausgeführt und zwingend durch einen 30 mA Fehlerstromschutzschalter gesichert sein (siehe Bild 2).

Vorrangig erfolgt die Aufladung der Batterien am Abstellplatz des Fahrzeuges in den Nachtstunden.

Über öffentliche "Stromtankstellen" auf Park-and Ride-Plätzen, an Einkaufzentren, in Bahnhofsnähe, in zentralen Parkhäusern oder anderen Schwerpunkten des ruhenden Verkehrs kann mit diesen Ladeverfahren pro Stunde Ladezeit etwa fünf bis zehn Kilometer Reichweite geladen werden.

Bild 1: Ladeverfahren für E-Fahrzeuge

Ladeverfahren für Elektrofahrzeuge

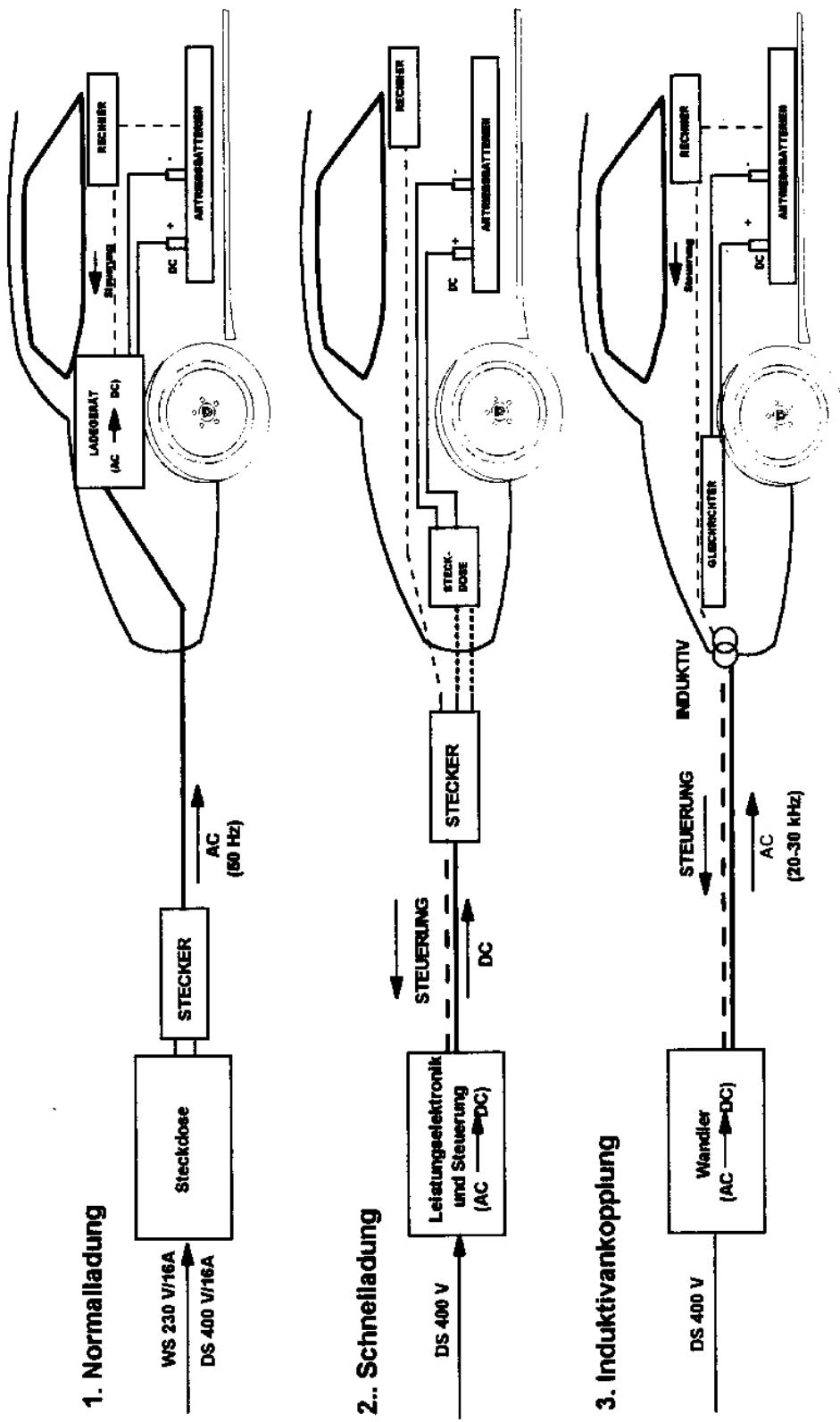
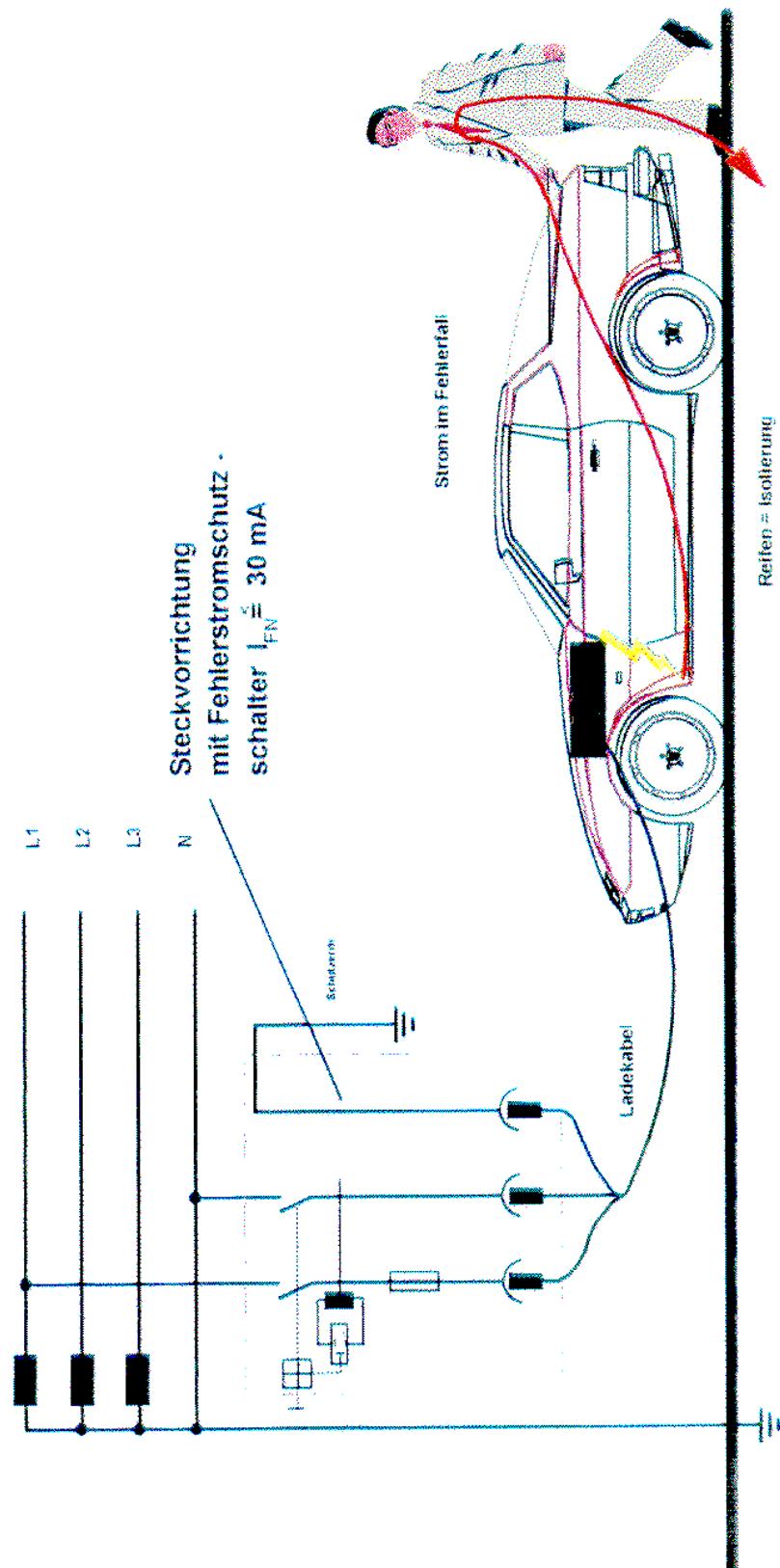


Bild 2: Normalladung - Sicherheit

**Normalladung - Sicherheit durch FI - Schutzschalter ($I_{FN}^{\leq} = 30 \text{ mA}$)
unbedingt erforderlich !**



10.1.3 Laden mit Gleichstrom (DC)

Die Mobilität des Elektrostraßenfahrzeugs kann durch drastische Verkürzung der Ladezeit (Schnellladung) wesentlich erhöht werden. Eine technische Variante ist das Laden mit hoher Leistung durch externe Bereitstellung der Energie auf dem Niveau der Batteriespannung. Dafür stehen technisch ausgereifte leistungselektronische Energiewandler (AC/DC) mit hohem Wirkungsgrad zur Verfügung. Für die Energieübertragung sind hochflexible Kabel für Ströme bis 200 A sowie spezielle Steckverbindungen erforderlich.

Durch Kommunikation des Batteriecontrollers mit der Steuerung des Energiewandlers wird erreicht, daß Ladestrom und Ladespannung stets der Ladekennlinie der Batterie entsprechen.

Die Baugruppen eines für AC/DC-Ladung geeigneten Fahrzeuges sind in Bild 3 dargestellt.

10.1.4 Laden mit Wechselstrom im Mittelfrequenzbereich (MF-AC)

Die induktive Energieübertragung im Mittelfrequenzbereich ist eine Variante für das universelle Laden der Traktionsbatterien im Leistungsbereich von einigen wenigen kW aus der Haushaltssteckdose bis zur Schnellladung mit 100 kW und mehr.

Dieses Verfahren beinhaltet auch grundsätzliche Möglichkeiten für das automatische An-docken des Fahrzeuges an die Ladestation, da die Energieübertragung berührungslos über einen Luftspalt erfolgt. Bild 4 ist ein Prinzipschaltbild für dieses Verfahren.

Bild 3: AC/DC-Fahrzeugladung

AC/DC - Fahrzeugladung / Prinzipschaltbild

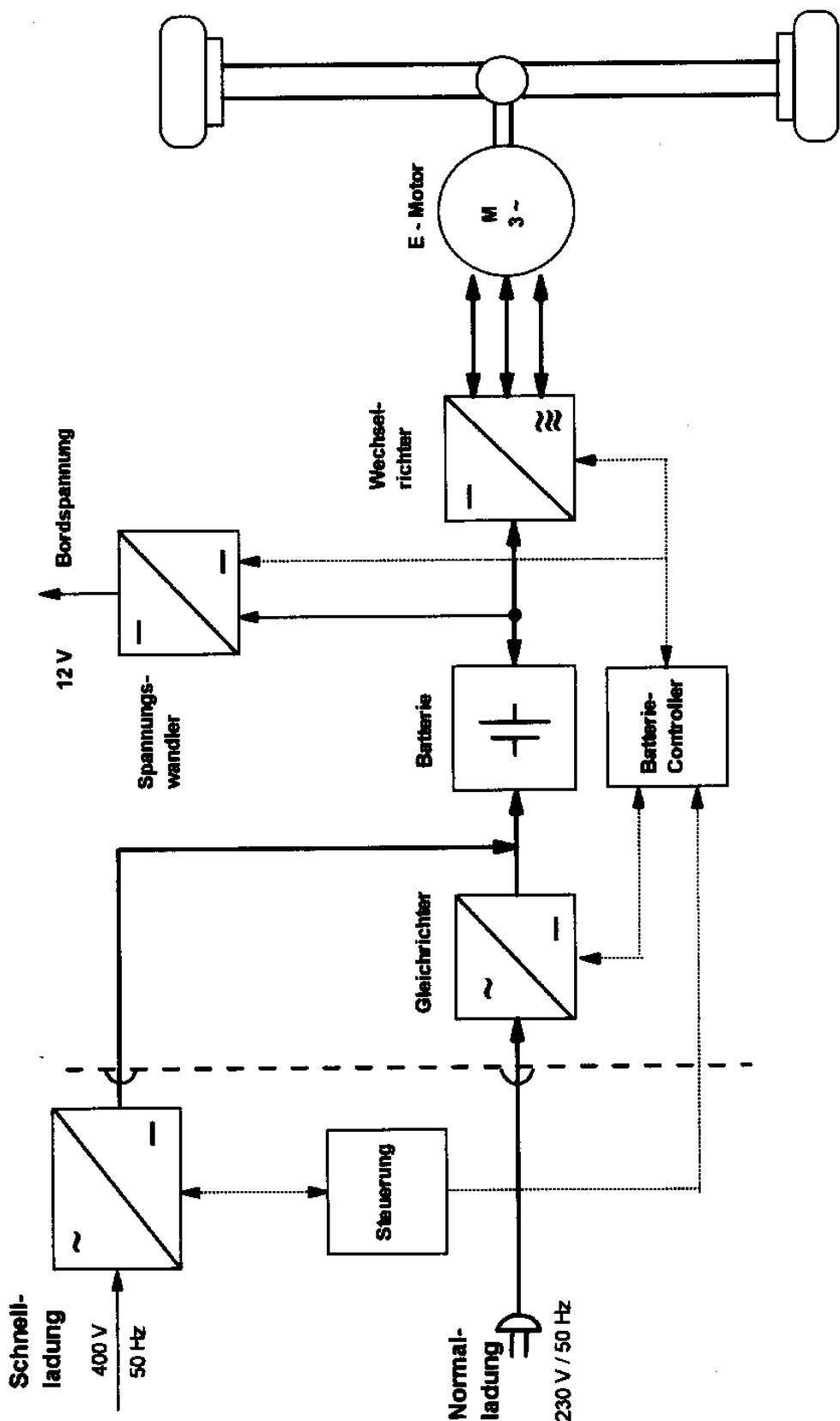
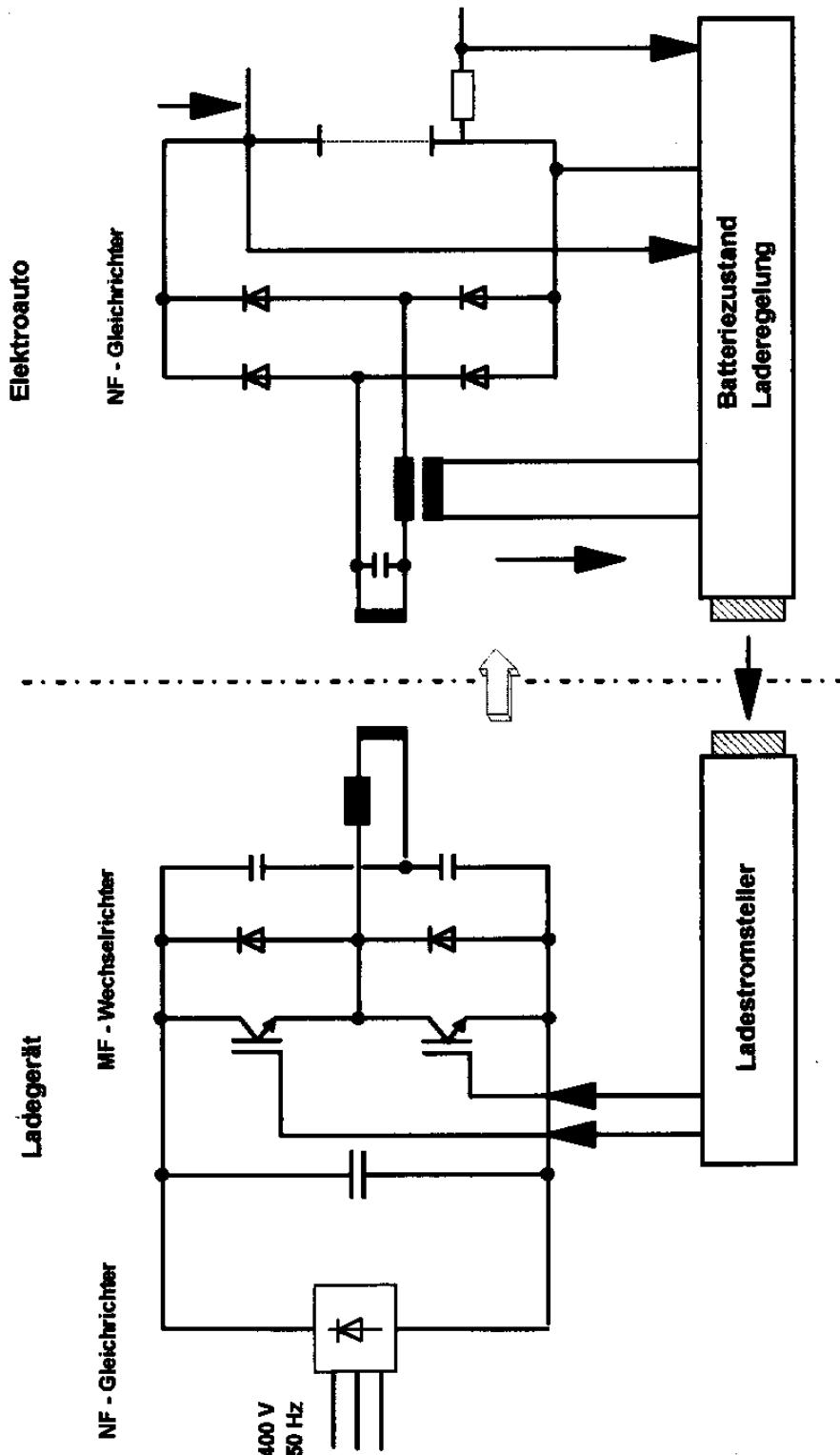


Bild 4: MF-AC Fahrzeugladung

MF - AC - Fahrzeugladung / Prinzipschaltbild



10.2. Planung und Vorbereitung der projektspezifischen Infrastruktur

Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projektes sollen 60 PKW und Kleintransporter unterschiedlicher Fabrikate und Typen sowie 3 Neoplan-Nahverkehsbusse Typ "Metroliner Carbon" mit folgenden Batteriesystemen erprobt werden:

Natrium-Schwefel	(ABB)
Natrium-Nickel-Chlorid	(AABG)
Nickel-Cadmium	(DAUG-HOPPECKE)
Blei-Gel	(VARTA)

In Bezug auf die Aufladung der Traktionsbatterien wurde die Aufgabenstellung der DAUG vom 07.05.1992 wie folgt präzisiert:

- a) Vorrangig werden die Batterien in den Nachtstunden über die Bordladegeräte am A-bstellplatz des Fahrzeuges (Garage oder Betriebshof) geladen.
- b) An ausgewählten öffentlichen Standorten sind Ladestationen zu installieren, an denen unter Nutzung der Bordladegeräte der Energievorrat ergänzt werden kann.
- c) Für die Erprobung der Schnellladefähigkeit dafür prädestinierter Batteriesysteme ist eine Ladestation zu entwickeln, die außer der Energielieferung auch Aufgaben des Batterie- und Last-Management erfüllen kann.

Folgende Aufgaben sind nicht Gegenstand der Aufgabenstellung für die projektspezifische Infrastruktur:

- Aufladung der NaS-Batterien der Neoplan-Busse (Ladestation des Fahrzeugherstellers beim Betreiber der Fahrzeuge).
- Energiegewinnung aus regenerativen Energiequellen (Sonne und Wind).

10.3. Normalladung mit Wechsel-/Drehstrom

10.3.1 Aufgabenstellung

Nachtladung an den Fahrzeugstandorten

Es wird davon ausgegangen, daß den Fahrzeughaltern in ihren Garagen oder Betriebshöfen sichere und ausreichend belastbare Stromkreise und Steckdosen zur Verfügung stehen.

Nachladung an öffentlichen Ladestationen

Standortauswahl

Die Standortauswahl wurde nach folgenden Kriterien vorgenommen:

- Territoriale Verteilung der Fahrzeugnutzer
- Einschätzung möglicher Fahrtziele mit längerer Aufenthaltsdauer am Zielort (Behörden, touristische Schwerpunkte, Einkaufzentren)
- Örtliche Gegebenheiten
- Haltung der Gemeindeverwaltungen zu dem Forschungsprojekt.

Nach diesen Gesichtspunkten wurden auf der Insel Rügen vier Standorte ausgewählt (siehe Bild 5). Mit der außerhalb des Erprobungsgebietes in Stralsund eingerichteten Ladestation sollte ein Anreiz zur Ausschöpfung der maximalen Reichweite gegeben werden.

Anforderungen an die Ausrüstung, Gestaltung und Bedienung der Ladestationen

Die Anforderungen wurden aus dem Ergebnisbericht des ad-hoc-Arbeitskreises "Elektrotank-stellen" abgeleitet und für das Rügenprojekt modifiziert. Sie sind in der folgenden Kurzfassung zusammengestellt:

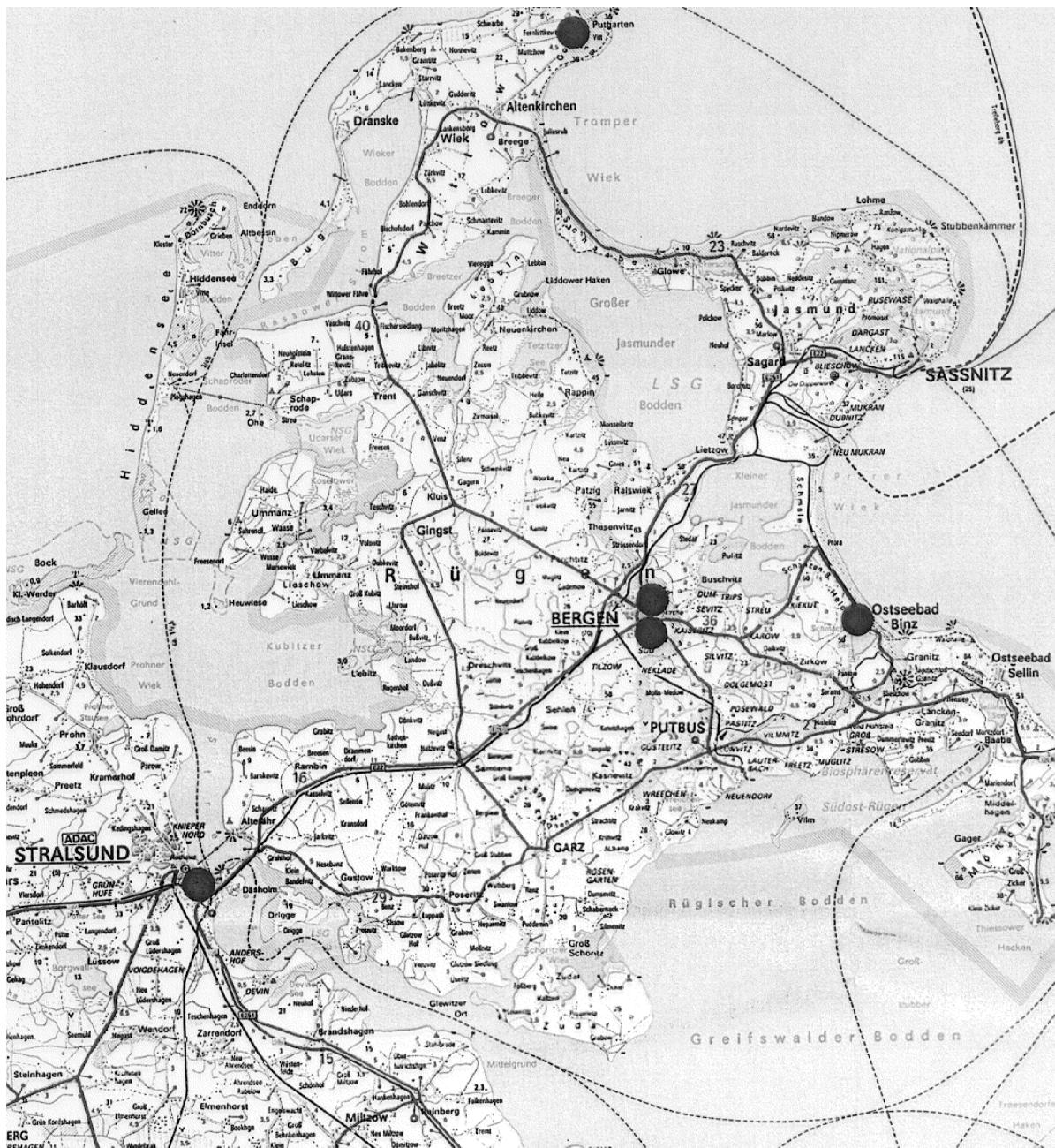
Allgemeine Anforderungen/Voraussetzungen

- Die Ladestationen werden aus dem Niederspannungsnetz des EVU versorgt und von dem EVU betrieben.
- Der Stromverkauf erfolgt verbrauchsabhängig an den Fahrzeugnutzer.
- Die Energieabgabe ist in der Menge nicht begrenzt.
- Die Aufstellung der Ladestationen erfolgt im öffentlichen Verkehrsraum. Die Benutzung der Parkfläche ist für den Fahrzeugnutzer kostenfrei.

Elektrische Ausrüstung:

- Der Anschluß an das EVU-Netz erfolgt nach den technischen Anschlußbedingungen (TAB).
- Steckdosenkombination: Schuko-Steckdose
- CEE-Steckdose 16 A, dreipolig
- CEE-Steckdose 16 A, fünfpolig
- Leitungsschutzschalter 16 A, B-Charakteristik
- Fehlerstromschutzschalter 25 A/30 mA, vierpolig
- Meßeinrichtung zur Erfassung und Abrechnung der Energielieferung
- Anzeige des Betriebszustandes.

Bild 5: Standorte öffentlicher Ladestationen für Normalladung



Konstruktiver Aufbau:

- Gewährleistung des VDE-Schutzgrades IP 54
- Korrosionsfeste und mechanisch robuste Ausführung für Freiluftaufstellung
- Abgeschlossener, aber für den Kunden zugänglicher Bereich für die Steckdosen und Schutzschalter
- Abgeschlossener und für den Kunden nicht zugänglicher Bereich für den Netzanschluß, die Meßeinrichtung und anderen Hilfseinrichtungen
- Sicherung gegen Stromdiebstahl und gegen willkürliche Unterbrechung des Ladevorganges.

Bedienung:

- Einfache und leicht ausführbare Handhabung
- Kurze und verständliche Benutzeranleitung vor Ort
- Bargeldlose Benutzung mit Magnet- oder Chipkarte bzw. Data-key

Design:

- Funktionsgerecht
- Optisch ansprechend

Erzeugnisübersicht

Zum Zeitpunkt der Einsatzvorbereitung (2. Halbjahr 1992) waren nur wenige, individuell konstruierte und gefertigte Ladestationen bekannt, welche die aufgeführten Kriterien differenziert und in unterschiedlicher Qualität erfüllten.

- a) LEW-Solartankstelle
Lech-Elektrizitätswerke AG Augsburg
Prototyp LEW-Betriebsbüro in 87700 Memmingen
- b) Ladestation für Elektromobile Typ EML/S
K. Biesinger GmbH
69434 Hirschhorn/Neckar
- c) Elektrotankstelle Typ A
Technische Werke der Stadt Stuttgart
70173 Stuttgart
- d) Stromtankstellen VAT 2000
ABN-Werner Braun GmbH Elektrotechnische Fabrik
74196 Neuenstadt
- e) Intelligente Stromtankstelle "Neue Welle"
ARGE EVN/AEG/ÖAMTC/UHER
EVN Energie-Versorgung Niederösterreich AG
A-2344 Wien

Die Auswahl wurde zwischen den Erzeugnissen a, b und e vorgenommen. Bei nahezu gleicher elektrotechnischer Ausrüstung bestehen Unterschiede

im Benutzerwerkzeug:

- a) Magnetkarte, Leseeinheit mit motorischem Karteneinzug
- b) Data-key
- e) Chipkarte, manuelle Einführung in die Leseeinheit

in der Abrechnungsmethode:

- a) Nutzeridentifikation durch Magnetkarte
 - Speicherung des Energieverbrauches in der Zentraleinheit
 - Rechnungslegung durch das EVU in angemessenen Zeitabständen
- b) Geldwertabbuchung vom Data-key
 - Lesen und Beschreiben des Data-key kann an beliebiger Stelle im EVU vorgenommen werden
- e) Geldwertabbuchung von der Chipkarte

zu b und e: Nach Verbrauch des gespeicherten Geldwertes muß ein neuer Betrag auf die Chipkarte oder den Data-key eingegeben werden. Für den Verbrauch erfolgt Rechnungslegung.

im Design:

- a) ansprechendes Industriedesign
- b) Funktionsgerecht, optisch wenig anspruchsvoll
- e) Modernes Design mit futuristischer Note

im Preis:

(für zwei von einander unabhängige Ladeanschlüsse, ohne Benutzerwerkzeuge und Zubehör)

- a) 47.000,00 DM
- b) 6.600,00 DM
- e) 19.700,00 DM

10.3.2 Ausgeführte Geräte und Infrastrukturmaßnahmen

Nutzerspezifische Maßnahmen

Gründe für nutzerspezifische Maßnahmen:

Bei der Projektdurchführung mußte festgestellt werden, daß die technischen Einrichtungen für die Nachladung an den Fahrzeugstandorten zumindest in Bezug auf den Stand der technischen Sicherheit und auf mögliche Unfallgefahren zu überprüfen waren. Ein weiterer Grund ergab sich durch die Situation, Fahrzeuge aus kollektiv genutzten Kundenanlagen zu versorgen und dafür Untermessungen einzurichten.

Ausgeführte Maßnahmen:

- a) Überprüfung der für die Ladung der Traktionsbatterien benutzten Steckdosen im Heim- und Geschäftsbereich auf DIN/VDE-gerechte Ausführung und Vorhandensein eines Fehlerstromschutzes. Überprüft wurden (Juli/August 1994) die Kundenanlagen von sechs Fahrzeugnutzern.
Die Kosten der Überprüfung und Nachrüstung wurden von der HET getragen.
- b) Ladeanschluß für Neoplan-Bus:
Installation eines 32-A-Anschlusses mit EVU-Messung in der Gemeindeverwaltung Hiddensee in Vitte.
(Da keine zweckbestimmte Nutzung erfolgte, wurde der Anschluß 1995 der Gemeinde übereignet).
- c) Ladeanschluß für die Verwaltung Naturpark Rügen (Gademow):
Installation eines 16-A-Anschlusses mit Untermessung.
- d) Ladeanschluß für den Fremdenverkehrsverband Sellin:
Anschluß im Wohnbereich des Fahrzeugnutzers Herr Reymann in Bergen, Hermann-Matern-Straße.
Die Stadtverwaltung Bergen hat die dafür erforderliche personengebundene Parkfläche nicht genehmigt. Der Anschluß wurde nicht installiert.

Öffentliche Ladestationen Typ EML

Hersteller:	K. Biesinger GmbH Neckarsteinscher Straße 74 69434 Hirschhorn a. N.
Ausführung:	Standsäule zum gleichzeitigen Anschluß von einem oder zwei Fahrzeugen.
Ansicht:	Bild 6
Schaltbild:	Bild 7

Bild 6: Normalladestation

Normalladestation TYP EML

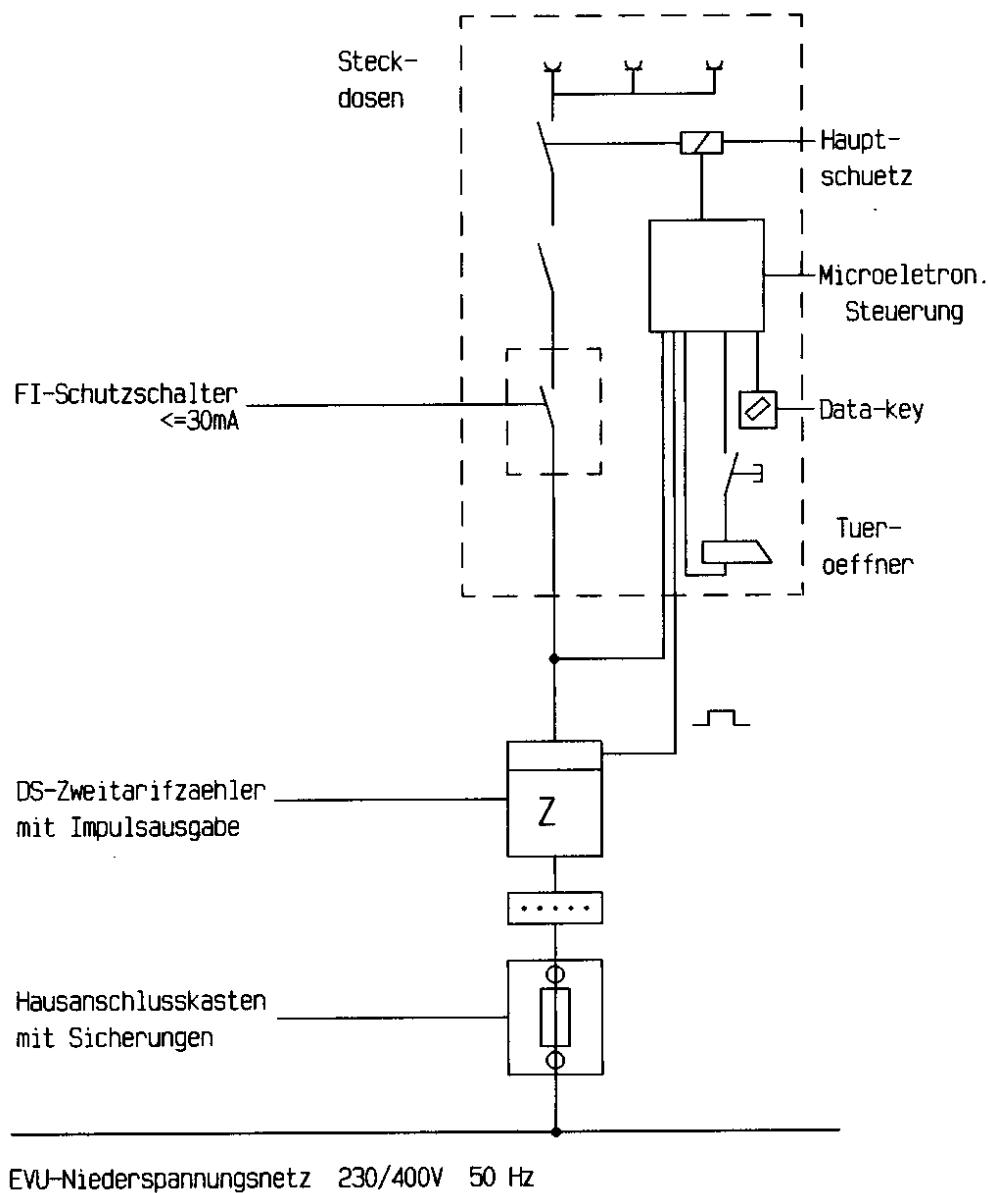


Bild 7: Normalladestation- Prinzipschaltung

Normalladestation

Prinzipschaltbild (Fabrikat Biesinger KG)

Typ EML



Technische Beschreibung:

Gehäuse:

Standsäule und Gehäuse für die Funktionsbaugruppen aus Edelstahl, einbrennla ckiert.

Massive Bodenverankerung.

Ausstattung:

Zweitarif-Drehstromzähler mit Impulsausgang, dreipoliger Sicherung, vierpoliger FI-Schalter 25 A/ 30 mA, fünfpolige CEE-Steckdose 16 A, dreipolige CEE-Steckdose 16 A, Schuko-Steckdose.

Mikroelektronische Steuerung, elektrische Türverriegelung, Data-key-Aufnehmer.

Schutzgrad: IP 54

Funktion:

Mit dem Benutzerwerkzeug "Data-key" werden die Funktionen für den Ladevorgang eingeleitet und beendet sowie die bezogene Energiemenge wertmäßig abgebucht.

Der Bedienungsablauf wird durch Textausgaben auf dem Display unterstützt. Nutzer-Identifikation, Plausibilitätsprüfungen und Schaltvorgänge werden von einem Rechner ausgeführt. Das Programm ist auf einen EPROM abgelegt und kann nutzerspezifischen Anforderungen angepaßt werden.

Die Herstellung und Trennung der Steckverbindung für den Fahrzeuganschluß erfolgen im spannungsfreien Zustand.

Die elektrische Arbeit wird von dem Drehstromzähler mit SO-Schnittstelle erfaßt. Die Meßimpulse werden im Rechner verarbeitet und mit dem Datenspeicher des Data-key abgeglichen.

Das Beschreiben und Lesen des Data-key erfordert ein Zusatzgerät für einen handelsüblichen PC. Für die Energielieferung steht im Data-key ein 6-stelliger Speicherplatz (999.99) zur Verfügung, der für die Einheiten "kWh" oder "DM" genutzt werden kann.

Standorte:

a) Bergen (Kreisstadt, Verwaltungs-, Kultur- und Einkaufszentrum)

HEVAG Energieberatungsstelle (Ausgabestelle für die Data-key), Ladestation mit einem Fahrzeuganschluß.

Bahnhofstraße, öffentlicher Parkraum, Ladestation mit zwei Fahrzeuganschlüssen.

b) Binz (bedeutender Ferien- und Kurort)

Großparkplatz Proraer Chaussee, Ladestation mit zwei Fahrzeuga nschlüssen.

c) Putgarten (archäologische und geolog. Besonderheiten an der nördlichsten Landste lle)

Großparkplatz am Ende der öffentlichen Straße, Ladestation mit zwei Fahrzeuga nschlüssen

d) Stralsund (Hafenstadt mit bedeutenden Baudenkälern aus dem Mittela lter)

Hauptverkehrsstraße zum Stadtzentrum vor der ehemaligen Betriebsverwaltung HEVAG, Ladestation mit einem Fahrzeuganschluß.

Netzanschluß:

Alle Stationen sind über Erdkabel an das jeweilige Ortsnetz der HEVAG angeschlossen. Die Ladestationen wurden mit den vorgeschriebenen Hausanschlußkästen und Hauptsicherungen nachgerüstet.

Verkehrsleiteinrichtungen:

Die Straßenverkehrsordnung in der gültigen Fassung bietet nur geringe Möglichkeiten, auf Ladestationen für Elektrostraßenfahrzeuge hinzuweisen. Durch das Landratsamt Rügen wurde die Beschilderung der Parkfläche in Bergen mit den Zeichen VZ 314 (600 x 600 mm) und dem Zusatzzeichen "E-Fahrzeuge" (330 x 600 mm) genehmigt. Das Ordnungsamt der Stadt Bergen hat durch gezielten Einsatz der Politessen für die Beachtung der Zeichen Sorge getragen und die Nutzung der Parkflächen durch konventionelle Fahrzeuge weitestgehend unterbunden.

In Binz wurde durch Nachrüstung der vorhandenen VZ 314 mit den Zusatzzeichen "E-Tankstelle" (330 x 600 mm) auf die Lademöglichkeit für Elektrostraßenfahrzeuge hingewiesen.

Service:

Für die ständige Gewährleistung der Funktionsfähigkeit und für die schnelle Störungsbeseitigung wurden folgende Service-Dienste eingerichtet:

- Monatliche Kontrolle und Funktionsüberprüfung durch einen ortsansässigen Fachbetrieb
- Bevorratung von Hauptbaugruppen und EPROM's in angemessener Stückzahl
- Angabe eines ständig erreichbaren Telefonanschlusses für Störungsmeldungen an den Ladestationen.

10.3.3 Betriebsergebnisse

Energieabsatz über die öffentlichen Ladestationen:

Die öffentlichen Ladestationen wurden zeitgestaffelt installiert.

Die Inbetriebnahme erfolgte:

in Binz	am 02.10.1992	(Geräteaus tausch am 29.04.1993)
in Bergen	am 26.04.1993	Energieberatungszentrum
	am 27.04.1993	Bahnhofstraße
in Stralsund	am 15.09.1993	
in Putgarten	am 13.10.1993	

Bis Stichtag 31.03.1996 wurden folgende Energiemengen abgegeben:

Binz	7.930 kWh
Bergen EBZ	737 kWh
Bergen Bhfstr.	7.315 kWh
Stralsund	208 kWh
Putgarten	814 kWh
Gesamt	17.004 kWh

An den Ladestationen in Binz, Bergen und zeitweise auch in Putgarten wurden permanent Nachladungen von Fahrzeugen vorgenommen, für die im Heimbereich der Fahrzeughalter dafür keine Möglichkeiten bestanden oder geschaffen werden konnten.

Die während der Projektlaufzeit eingeführte kostenfreie Energielieferung über die öffentlichen Ladestationen (Normal- und Schnellladung) hatte keinen signifikanten Einfluß auf die Energieabgabe.

Bewertung der Standorte und der Inanspruchnahme der Lademöglichkeiten:

Generell liegt die Inanspruchnahme der öffentlichen Ladestationen deutlich unter den Erwartungen der HET. Die standortabhängige Inanspruchnahme ist differenziert zu bewerten. Die Ladestation in Stralsund wurde im wesentlichen nur von dem in Stralsund wohnenden DAUG-Mitarbeiter genutzt und galt darüber hinaus wegen eines längeren Ausfalls infolge einer Beschädigung als unsichere Lademöglichkeit. Auch die Nutzung der Ladestation in Putgarten lässt sich im wesentlichen zuordnen. Zum einen wurde das zeitweilig dem Ordnungsamt der Gemeinde Putgarten zugeteilte Fahrzeug an der öffentlichen Ladestation nacht- und nachgeladen und zum anderen erfolgten vereinzelt Nachladungen mit Fahrzeugen der DAUG bei Besichtigungsfahrten. Ein detaillierter Benutzungsnachweis ist für die einzelnen Stationen nicht geführt. Im Rügenprojekt hatten die öffentlichen Ladestationen überwiegend demonstrative und dekorative Wirkung.

10.3.4 Störungen/Mängel/Änderungen

Beschädigungen/Störungen durch Fremdeinwirkungen:

Die Schäden durch Vandalismus sind verhältnismäßig gering und waren in Stralsund am häufigsten: Mehrmals wurde die Tür zum nicht belegten Steckdosenraum aufgebrochen, Data-key-Aufnehmer wurden verstopft bzw. die Abdeckung demoliert. Beschädigungen an den Data-key-Aufnehmern wurden auch an den Stationen in Bergen-Bahnhofstraße und in Binz festgestellt. Graffitis wurden selten und dann nur kleinflächig aufgebracht.

Durch eine fehlerbehaftete Verlängerungsschnur verursachte ein Nutzer einen Ausfall in der Elektrik.

Störungen/Ausfälle:

Hardwareseitig traten in mehreren Fällen Störungen mit Ausfall durch zu schwach bemessene Gerätesicherungen bzw. durch Defekt des Steuertrafos auf. In der Verrechnung der

Energielieferung mit dem Data-key traten in zwei Fällen Differenzen auf, die durch Austausch des EPROM's (Software) behoben werden konnten.

Schwachstellen in der E-Technik und Mechanik:

- ungenügende Wirkung der Heizung
- unzuverlässige Funktion des Türöffners
- ungenügende Haltbarkeit des Anstriches (innen und außen).

Änderungen/Nachrüstung

Im Oktober 1994 veranlaßte der Hersteller einen Programmaustausch von der Version EML-D V 2.04 auf die Version LCST 07.94, der für das Projekt aber keine praktische Bedeutung hatte.

Auf Veranlassung der BMW AG erfolgte eine Nachrüstung der Ladestationen. Die von BMW für die Normalladung verwendeten Schukostecker mit integriertem Fehlerstromschutzschalter (Fabrikat Knopp 220 V-16 A-30 mA) erfordern zum Einschalten des FI-Schalters eine Spannung, die technologisch bedingt an der Steckdose der Ladestation erst nach dem Schließen der Abdeckung und dem Programmstart ansteht. Durch Überbrückung der L1-Kontakte am Hauptschütz mit dem Widerstand 40 k-Ohm/10 W wurde eine Hilfsspannung für den FI-Schalter bereitgestellt.

10.4. Schnellladung mit Gleichstrom

10.4.1 Aufgabenstellung

Argumente für die Schnellladung:

Durch die Aufladung der Traktionsbatterie mit hoher Leistung ist eine Verkürzung der Ladezeit auf weniger als 1/20 der Ladezeit bei Normalladung möglich.

Die damit erreichbaren Fahrleistungen von 300 bis 400 km/Tag eröffnen dem Elektrostraßenfahrzeug neue Einsatzmöglichkeiten. Potentieller Nutzer der Schnellladung ist der Wirtschaftsonderverkehr. Diese Nutzergruppe umfaßt insbesondere:

- Kundendienste der Versorgungsunternehmen
- Sonderfahrzeuge des kommunalen Fuhrparks
- Post-, Paket- und Kurierdienste
- Taxen im Stadtbereich.

Die Schnelllademöglichkeit schafft für diese Nutzergruppe wichtige Freiheitsgrade bei der täglichen Disposition des Fahrzeugeinsatzes und trägt zur besseren Auslastung des Fuhrparks bei, und zwar unabhängig von Batteriekapazität und -ladezustand.

Für die Batterie werden durch die wechselnde Anwendung der Ladeverfahren positive Auswirkungen auf den Alterungsprozeß und eine längere Nutzungsdauer erwartet (Regenerierungseffekt).

Anforderungen an die Funktion und Bedienung:

Für die gerätetechnische Umsetzung der Schnellladung standen zum Zeitpunkt der Projektentwicklung leistungsstarke AC/DC-Wandler, mikroelektronische Datenverarbeitungsgeräte für den industriellen Einsatz zur Prozeßsteuerung und -überwachung sowie Abrechnungssysteme für die Ware/Geld-Beziehung aus dem Verkaufsbereich der Mineralölindustrie zur Verfügung.

Gemeinsam mit den Batterie- und Fahrzeugherstellern wurden die technischen und ergonomischen Anforderungen für die Kombination der vorgenannten Baugruppen zu einer universell anwendbaren Ladestation ausgearbeitet und in einem Pflichtenheft dokumentiert.

Allgemeine Anforderungen:

- Hohe Flexibilität in Bezug auf Eigentümer, Betreiber und Einsatzort
- Nutzungsfähig für alle gegenwärtig bekannten und anpassungsfähig an künftige Batteriesysteme
- Gleiches Handling wie beim Betanken mit flüssigen Treibstoffen
- Aufladen und möglichst auch Bezahlen durch Selbstbedienung
- Beaufsichtigungsfreier Betrieb.

Funktionsanforderungen:

- Energielieferung auf der Batteriespannungsebene
- Steuerung des Ladestroms und der Ladespannung alternativ nach
 - der gespeicherten Ladekennlinie
 - den Vorgaben des Batterie-Management-Systems (BMS)
 - freiem manuellen parametrisieren.
- Speicherung frei programmierbarer Ladekennlinien
- Freigabe des Ladevorganges nach Prüfung relevanter Batterieparameter (Batteriespannung, Temperaturen in den Zellen, Innenwiderstand u. a.)
- Überwachung parametrierbarer Grenzwerte für den Ladestrom, die Ladespannung und der Batterie-Temperaturen während des Ladevorganges.
- Absteuerung des Ladevorganges bei Grenzwertüberschreitung
- Sanftanlauf zu Beginn und rückwirkungsfreie Absteuerung zur Beendigung des Ladevorganges
- Selbstüberwachung und automatische Schnell-Abschaltung im Störungsfall
- Elektromechanische Sicherheitsschleife für die Freigabe und für die Unterbrechung der Leistungsübertragung
- Berücksichtigung des Lastganges in dem Versorgungsnetz durch Aufschaltung eines Last-Management-Systems (LMS).

Elektrotechnische Vorgaben:

- Anschluß an Niederspannungsnetz 400 V/50 Hz
- Zulässige Änderungen:
 - Spannung +/- 10 %
 - Frequenz +/- 5 %
- Leistungsfaktor innerhalb des gesamten Arbeitsbereiches > 0,75 ind.
- Oberwellengehalt < 5 %
- Gleichspannungsausgang
 - Spannung, stufenlos steuerbar 140 V bis 310 V
 - Strom, stufenlos steuerbar nach vorgegebenen Wert 0 % bis 100 %
 - Restwelligkeit, bezogen auf den vorgegebenen Ladestrom < 10 %
- Zulässiger Fehler in der Ladestromkontrolle < 2 %

Konstruktiver Aufbau:

- Eine Übereinstimmung mit der geometrischen Form konventioneller Zapfsäulen für flüssige Treibstoffe ist anzustreben
- Die Ladestation muß sich sowohl in die landläufig bekannten Tankstellen integrieren als auch mit geringem Nachrüstungsaufwand separat aufstellen und betreiben lassen
- Modularer, servicefreundlicher Aufbau
- Gewährleistung des für Freiluftaufstellung erforderlichen VDE-Schutzgrades
- Auslegung für Umgebungstemperaturen von - 30°C bis + 50°C, relative Luftfeuchtigkeit max. 95 %.

Bedienung/Verkaufsabrechnung:

- Die Bedienung und die Verkaufsabrechnung sollen nach allgemein bekannten Handlungsabläufen erfolgen:
 - Anschluß der Energieleitung an das Fahrzeug: Analog der Fahrzeugbetankung mit flüssigen Treibstoffen und mit möglichst geringem Kraftauwand ausführbar.
 - Verkaufsabrechnung: Analog der Bedienung eines Bankautomaten.
- Wenige und kurze Benutzungshinweise vor Ort müssen für die Bedienung ausreichen
- Anzeige des Strompreises, der geladenen Elektrizitätsmenge, des Rechnungsbetrages, des Ladezustandes der Batterie sowie des Abbruches der Ladung wegen zu hoher Batterietemperatur
- Manuelle Eingriffsmöglichkeiten zum vorzeitigen Beenden des Ladevorganges und für Not-Aus.

Fahrzeugschlüsse:

- Steckbare Verbindung mit beidseitigem Berührungsschutz
- Hochflexibles, leichtes zug- und torsionsarmes 3-Leiter-Kabel für hohe Strombelastung (mindestens 200 A) mit integrierten Datenleitungen
- Stecker und Steckdose müssen für Freiluftbetrieb konstruiert sein und den im Fahrtrieb auftretenden Belastungen (Stoß, Vibration, Feuchtigkeit etc.) standhalten
- Zuverlässige Energie- und Datenübertragung
- Elektromechanische Funktionselemente für die Sicherheitsschleife müssen integriert sein
- Schnittstelle für den Datenaustausch zwischen Fahrzeug und Ladestation nach CAN-Bus-Norm.

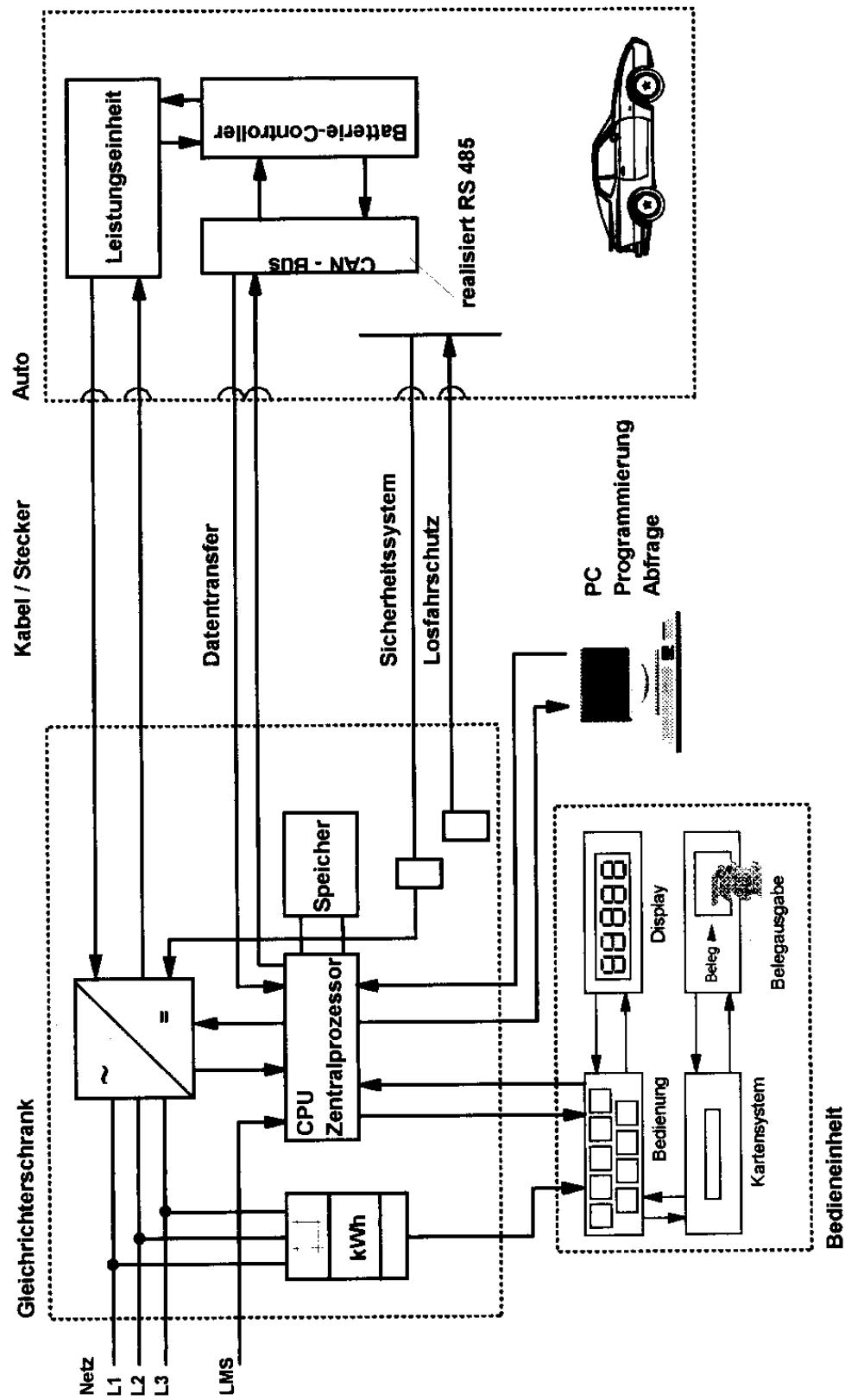
Sonderausstattung der Prototypen für F/E-Aufgaben:

- Elektronischer Datenspeicher für die Langzeitspeicherung aller signifikanten Informationen oder Ladevorgänge:
 - Identifikation des Fahrzeuges und der Batterie
 - Vom BMS vorgegebenen Parameter
 - Energiebezug aus dem Netz (kWh)
 - Eingespeicherte Energiemenge in Ah und kWh
 - Beginn und Ende des Ladevorganges mit Datum/Uhrzeit
- ausgewählter Parameter im Zeitraster von 60 Sekunden über die Zeit des Ladevorganges:
 - Strom und Spannung am Ausgang des Energiewandlers
 - Max. 4 Batterietemperaturen
 - Max. 4 Batteriepotentiale
 - Eingespeicherte Energiemenge
 - Ladezustand der Batterie
 - Statusmeldungen
- Ereignisspeicher für max. 100 Ereignisse:
 - Störabschaltung
 - Ausfall EVU-Netz
- Modem für den Fern-Zugriff auf das Steuerprogramm und auf den Datenspeicher.

Das Prinzipschaltbild für eine Schnellladestation mit Verkaufsabrechnung über Magnet- oder Chipkarte ist in Bild 8 dargestellt.

Bild 8: Systemdarstellung Schnellladung

Systemdarstellung Schnellladung



10.4.2 Ausgeführte Geräte und Infrastrukturmaßnahmen

Schnelladestation FC 310 (Zirkow)

Hersteller:	GL Stromrichtertechnik GmbH Tempelhofer Straße 14 52068 Aachen
Ausführung:	Prototyp in Containerbauweise für die Erprobung der Ladetechnologie mit folgenden Baugruppen: Leistungseinheit, Kontrollrechner, Abrechnungseinheit, Klimaanlage und E-Verteilung mit Verbrauchsmessung für die Leistungseinheit und für die Nebenanlagen.
Ansicht:	Bild 9
Schemata:	Bild 10 Prinzipschaltbild der Ladestation Bild 11 Übersichtsschaltbild Bedieneinheiten Bild 12 Blockschaltbild Leistungseinheit

Leistungsdaten:

Leistungsteil:

Netzspannung	400 V +/- 15 %
Netzfrequenz	50 Hz +/- 2 Hz
Leistungsaufnahme	33 kVA
Netzleistungsfaktor	0.766
Ausgangsspannung	0 bis 300 V =
Ausgangsstrom	bis 100 A
Restwelligkeit	< 5 %
Statische Regelgenauigkeit	1 %
Umgebungstemperatur	0 bis + 60°C
Kühlung	Fremdkühlung, trockene staubfreie Luft, 0 bis + 40°C

Steuerungsteil:

Allgemein	16-Bit Mikroprozessor-System Taktfrequenz 8 MHz, 128 kB, Echtzeituhr, batteriegepfu f-fertiges RAM, EEPROM, 12-Bit-AD- und DA-Wandler
Potentialtrennung	Ansteuerung über Impulstransformatoren, Anwender-schnittstelle vom Leistungsteil galvanisch getrennt
Kontakteingänge	Pull Up Widerstand 3,3 kOhm gegen 24 V, High Pegel 15-30 V, Low Pegel 0-5 V
Schnittstellen	RS232, RS485, RS422 als Option
Kontrollrechner:	

Motherboard		486DX 66 MHz VESA-BUS
Arbeitsspeicher		8 MB
Grafikkarte		SVGA VESA-BUS 1 MB RAM
Monitor		SVGA EIZO 14"
Festplatten		2 * 270 MB
Laufwerk		3,5" 1,44 MB
Schnittstellen	COM1:	RS422 potentialgetrennt Volduplexübertragung Kontrollrechner ↔ Leistungseinheit
	COM2:	RS232 Mouseansteuerung
	COM3:	RS485 potentialgetrennt Simplexübertragung Fahrzeug → Kontrollrechner
	COM4	bis COM6: RS232 frei
	LPT1:	Drucker
Abrechnungseinheit:		Tankstellen-Management-System Scheidt & Bachmann GmbH 41238 Mönchengladbach

Standort, Aufbau und technische Ausstattung:

Standort und Aufbau der 30-kW-Ladestation wurden weitestgehend durch den Prototyp-Charakter und dem daraus zu erwartenden Betreuungsaufwand bestimmt. Die Aufstellung im Nahbereich der DAUG-Werkstatt in Zirkow sicherte sowohl den unmittelbaren Zugriff auf die Station zur Funktionserprobung mit den dafür geeigneten Fahrzeugen wie auch eine gewisse Aufsicht durch das DAUG-Personal und ermöglichte darüber hinaus den schnellen Informationsaustausch zwischen den an der Erprobung und dem Betrieb beteiligten Partnern. Die technische Ausstattung ist ebenfalls durch den Prototyp-Charakter geprägt (Klimaanlage, Abrechnungseinheit und 2. Festplatte im Kontrollrechner), entspricht aber prinzipiell den Forderungen der Aufgabenstellung.

Bild 9: Schnelladestation Zirkow

Schnelladestation Zirkow

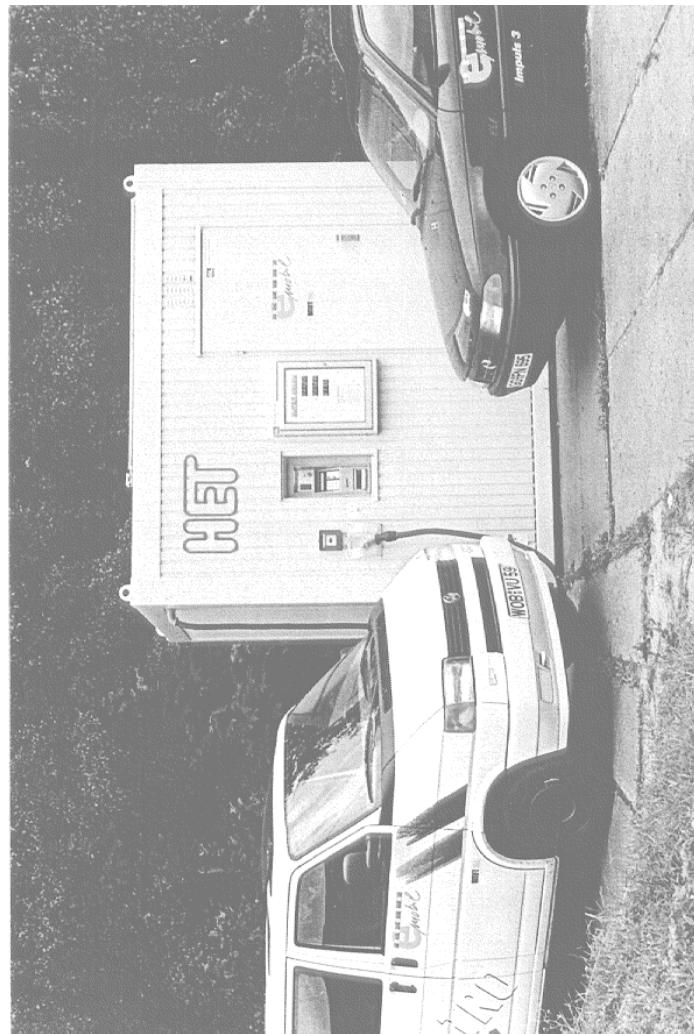
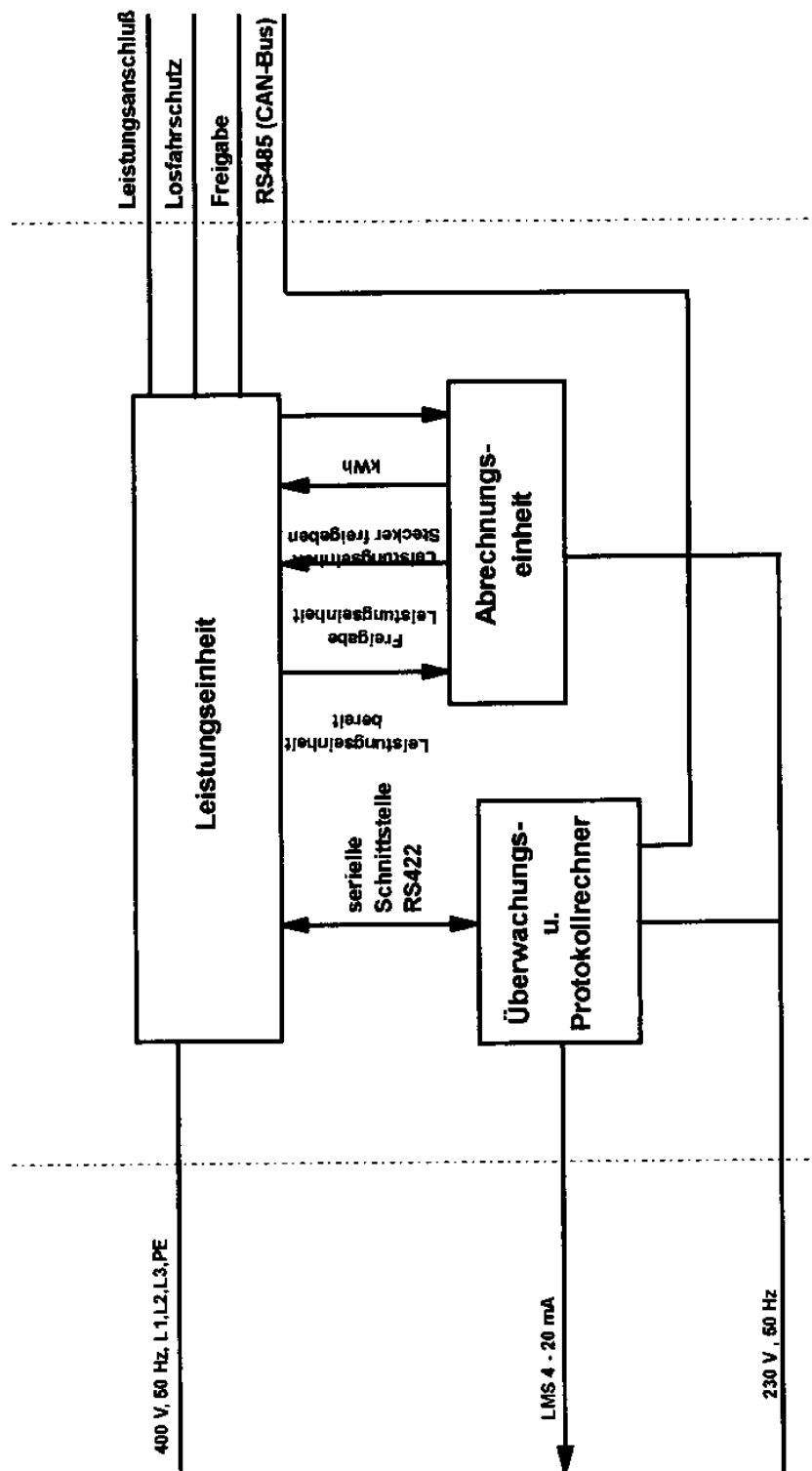


Bild 10: Schnelladestation Zirkow - Prinzipschaltung

Schnelladestation FC 310 Zirkow Prinzipschaltbild



Funktionsweise der Leistungseinheit:

Der Leistungsteil des Gleichrichtergerätes wird durch die vorgeschaltete Einschaltsteuerung über einen primärseitig umschaltbaren Transformator an das Netz mit annähernd konstanter Spannung und Frequenz geschaltet. Die Auswahl der jeweiligen Primärwicklung erfolgt in Abhängigkeit von der geforderten Ladespannung. (Vorgabe aus dem Batteriecontroller oder dem Batterie-Management-System). Der Stromrichter besteht aus einer 6-pulsigen Drehstrombrücke, die von einer stromrichternahen Baugruppe gesteuert wird. Im Gleichspannungskreis ist ein Filter zur Glättung der Ausgangsspannung und zur Reduzierung der Oberwellen angeordnet.

Der Steuerungsteil steuert die Stromrichter mit den notwendigen Sollwerten für Strom und Spannung an. Er enthält weiterhin die gesamte Überwachungseinheit für die Leistungseinheit mit detaillierter Anzeige der Störungen und ihrer Ursachen. Eine manuelle Parametrierung der Steuerung kann über eine Tastatur mit Bedienerführung vorgenommen werden.

Aufbau und Funktionsweise der Steuerung:

Das Steuermodul ist in sinnvoll abgegrenzte Funktionseinheiten aufgeteilt und auf genormten Europakarten mit 96-poligen Stecksystem untergebracht.

Frontseitig sind verschiedenfarbige Leuchtdioden sowie Meßbuchsen zur Signalkontrolle angeordnet. Das Steuermodul ist mit einer rückseitigen Verdrahtungsbaugruppe ausgerüstet, die die Verbindung zwischen den Steckbaugruppen herstellt und Anpassungsbauelemente sowie Programmierschalter für die Anpassung der Steuerung an die Leistungseinheit enthält.

Neben der Tastatur- und Anzeigeeinheit mit Klartextanzeige enthält das Regelsystem verschiedenefarbige Leuchtanzeigen zur Signalisierung des Betriebszustandes.

Grüne LED's kennzeichnen fehlerfreien Betrieb. Gelbe LED's haben eine Achtung-Funktion (Grenzwert angefahren). Rote LED's kennzeichnen Fehlerzustände.

Das Steuermodul enthält eine Mikroprozessor-Steuerung (MPS) und eine in konventioneller Relaistechnik ausgeführte Ein-Aus-Steuerung (EAS). Die EAS bearbeitet anlagentechnische Signale unabhängig von der MPS. Das Betriebspogramm (Software) der MPS ist in fünf Funktionsbereiche aufgeteilt:

- Kommunikation mit dem Anwender
- Sollwertmäßige Ansteuerung des Stromrichter
- Betriebszustandsmeldung
- Überwachung
- Schutz.

Über die digitale Schnittstelle an der MPS wird die vom Batteriecontroller vorgegebene **Spannungskennlinie** vgewählt. Abhängig von der Vorwahl wird eine frei parametrierbare digitale Referenzquelle auf den Sollwert eingestellt. Der Referenzausgang steuert den Spannungsregler des autarken Stromrichtergerätes an. Die Grundanzeige der Betriebszustandsmeldung zeigt ständig

- den ausgewählten Spannungsmaximalwert
- Ausgangsspannung
- Stromsollwert
- Ausgangstrom

und im Falle eines Fehlers die Störungsursache.

Bild 11: Schnelladestation Zirkow - Übersicht

Schnelladestation FC 310 Zirkow
Übersicht der Bedieneinheiten

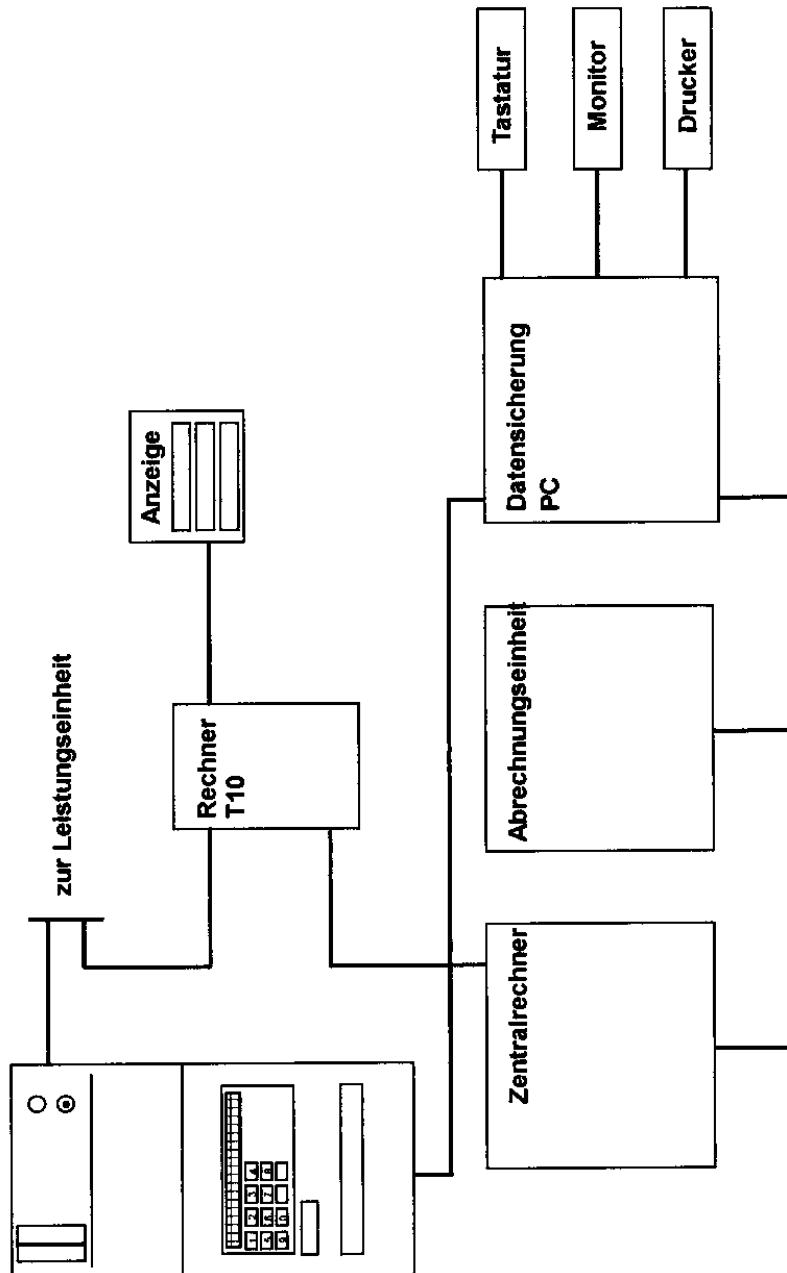
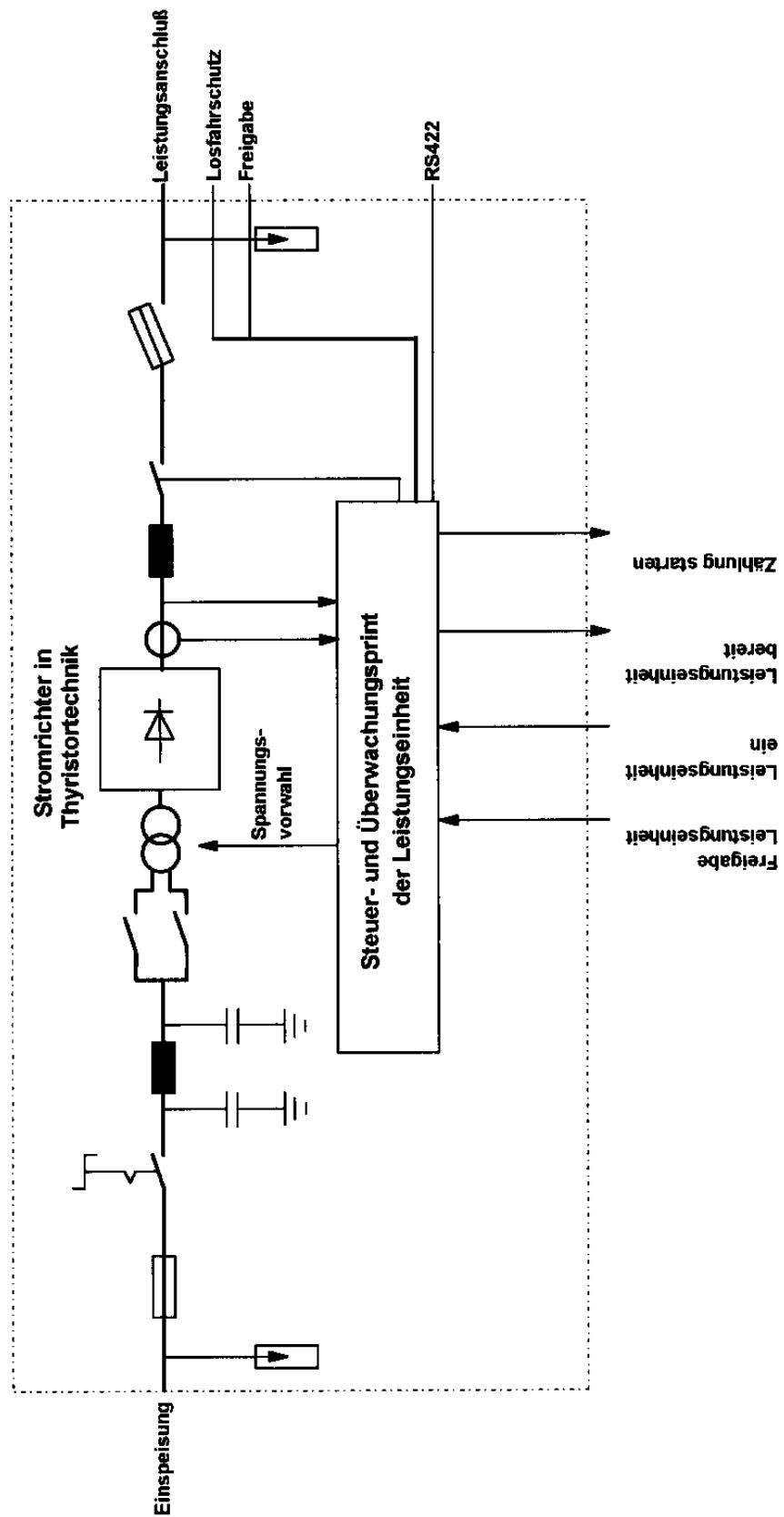


Bild 12

Schnelladestation Zirkow - Blockschaltbild

Schnellladung FC 310 Zirkow
Blockschaltbild der Leistungseinheit (Thyristortechnik)



Schnelladestation FC 320 (Bergen)

Hersteller:	GL Stromrichtertechnik GmbH Tempelhofer Straße 14 52068 Aachen
Ausführung:	Prototyp für den kommerziellen Einsatz und zur Integration in Tankstellen für Mineralölprodukte. Leistungseinheit in Modulbauweise, eingebaut in eine Zapfsäule der Fa. Wayn-Dresser Europa S.A., Niederlassung Einbeck.
Ansicht:	Bild 13
Geräteplan:	Bild 14
Schemata:	Bild 15 Prinzipschaltbild Ladestation Bild 16 Blockschaltbild Leistungs- und Steuereinheit Bild 17 Blockschaltbild Stromrichter

Leistungsdaten:

Leistungsteil:

Netzspannung	400 V +/- 15 %
Netzfrequenz	50 Hz +/- 2 %
Ausgangsspannung	0 bis 300 V =
Ausgangsstrom	bis 200 A
Umgebungstemperatur	- 15 bis + 40°C
Feuchtebeanspruchung	Klasse F DIN 40040
Kühlung	Fremdkühlung, trockene staubfreie Luft 0 bis 40°C

Steuerungsteil:

Allgemein	16-Bit Mikroprozessor-System Taktfrequenz 8 MHz, 128 kB, batteriegepuffertes RAM, EEPROM, Echtzeituhr, 12-Bit-AD- und DA-Wandler
Potentialtrennung	Anwenderschnittstelle vom Leistungsteil galvanisch getrennt
Kontakteingänge	Pull Up Widerstand 3,3 kOhm gegen 24 V, High Pegel 15-30 V, Low Pegel 0-5 V
Schnittstellen	RS232, RS485, RS422 als Option

Kontrollrechner:

Motherboard	486DX 70 MHz VESA-BUS
Arbeitsspeicher	8 MB
Grafikkarte	SVGA VESA-BUS 1 MB RAM
Monitor	SVGA EIZO 15"
Festplatten	1 * 450 MB
Laufwerk	3,5" 1,44 MB
Modem	28,8 kBd
Schnittstellen	COM1: RS422 potentialgetrennt Voll duplexübertragung Kontrollrechner ↔ Leistungseinheit COM2: Mouseansteuerung COM3: RS485 potentialgetrennt Simplexübertragung Fahrzeug → Kontrollrechner COM4 bis COM6: RS232 frei LPT1: Druckeranschluß

Abrechnungseinheit: Keine eigene Abrechnungseinheit.

Standort, Aufbau und technische Ausstattung:

Standort und Outfit erfüllen wesentliche Anforderungen aus der Aufgabenstellung hinsichtlich der Eingliederung der Elektro-Tankstellen in die bekannten Tankstellen für Mineralölprodukte. Die ARAL-Tankstelle Bergen, Stralsunder Chaussee, wurde wegen ihrer zentralen Lage und der günstigen Infrastruktur als Standort für den Prototyp einer kommerziell einsetzbaren Schnelladestation ausgewählt.

Die technische Ausstattung erfüllt die Forderungen der Aufgabenstellung. Der Leistungsteil ist modular aufgebaut und besteht aus 4 Leistungsstromquellen mit je 15 kW Ausgangsleistung 300 V 50 A DC. Die Ladestation ist mit folgenden Funktionen an die Tankstelle gekoppelt:

- a) Freigabe durch den Tankwart vom Steuerpult der Tankstelle auf Anforderung
- b) Registrierung und Abrechnung der Energielieferung über das Tankstelle-Management-System (TMS Fabrikat Scheidt & Bachmann).

Die Energieabgabe wird durch eine elektronische Gleichstrommessung mit einem Fehler < 1 % ermittelt und an das TMS übertragen. Der Energiebezug der Schnelladestation (Batterieladung und Eigenverbrauch) wird in einer EVU-eigenen DS-Wandlermessung ermittelt.

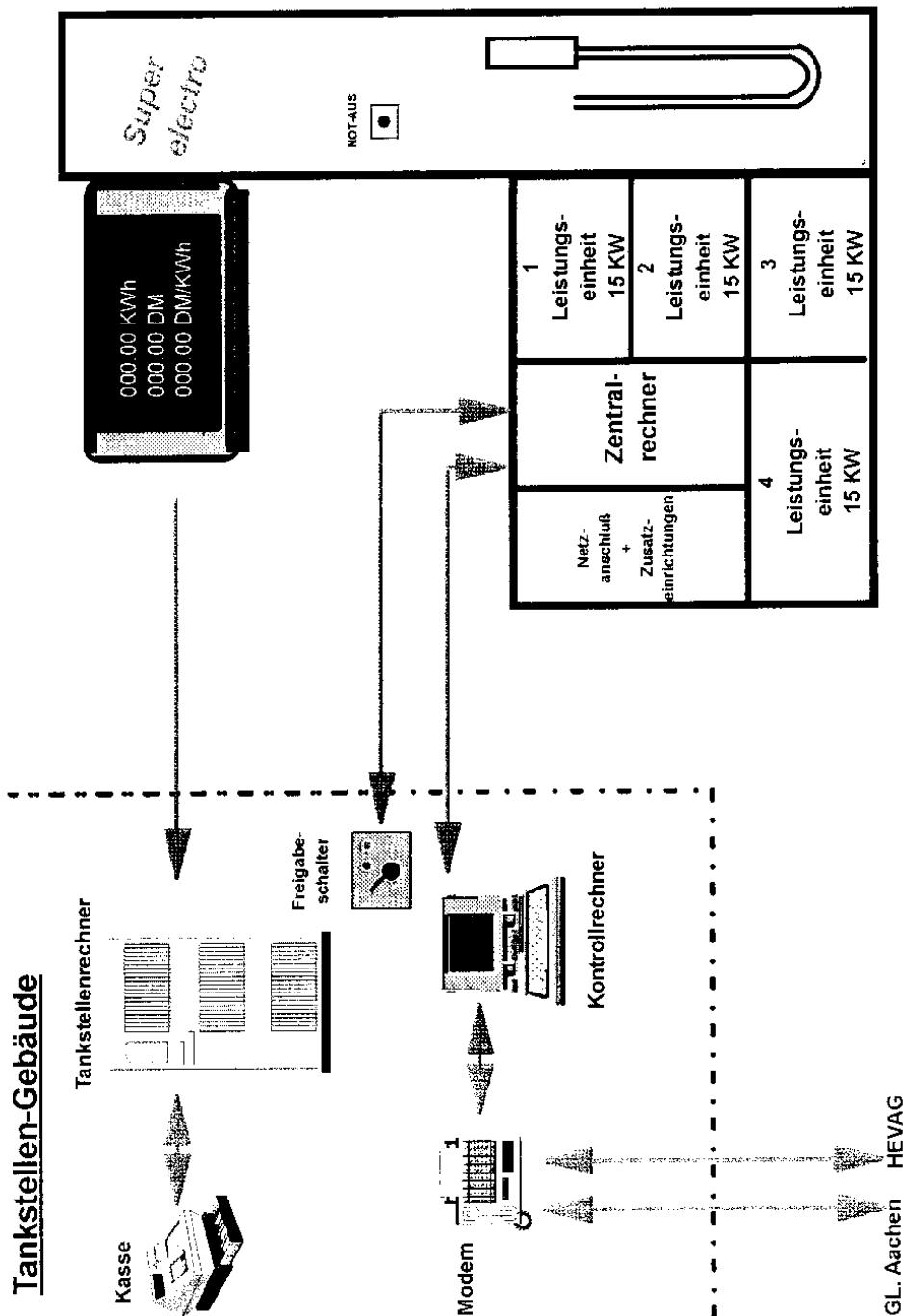
Bild 13: Schnellladestation Bergen

Schnellladestation Bergen



Bild 14: Schnelladestation Bergen FC 230

Schnelladestation FC 230 Bergen



Funktionsweise Leistungseinheit:

Die Leistungseinheit besteht aus vier baugleichen Leistungsstromquellen mit primärer Taktung und einem Hochfrequenztransformator zur Potentialtrennung. Jedes Modul kann bis zu 15 kW Leistung abgeben. Die Einschaltung der Module erfolgt vom Steuerrechner über Hauptschütze und durch ein Signal zur Aufsteuerung der Ausgänge. Im Gleichspannungskreis jeder Stromquelle ist ein Filter angeordnet, der die Restwelligkeit glättet und eine konstante, oberwellenarme Spannung am Ausgang bereitstellt. Die Ausgänge der Module sind über Entkoppeldioden parallel geschaltet.

Die Mikroprozessorsteuerung steuert die Stromquellen mit den notwendigen Sollwerten für den Ausgangsstrom an. Die Regelung der Ausgangsspannung und des Ausgangsstromes erfolgt zentral im Steuerrechner nach den Vorgaben des Batteriecontrollers.

Aufbau und Funktionsweise der Steuerung:

Der Aufbau des Steuermodules und seine Funktionen sind weitestgehend mit der Steuerung der FC 310 identisch. Softwareseitig sind die Spannungs- bzw. Stromregelungen der Funktionsweise der Stromquellen angepaßt. Über die digitale Schnittstelle der MPS werden die vom Batteriecontroller vorgegebene **Stromkennlinie** sowie die **zulässige Ladespannung** vgewählt. Abhängig von der Vorwahl wird eine frei parametrierbare Referenzquelle auf den Sollwert eingestellt. Der Referenzausgang steuert den Stromsollwerteingang der Stromquellen an. Die Regelung des Ausgangsstromes erfolgt durch die Steuerung.

SEPM-Steckvorrichtung

Technische Beschreibung und Leistungsdaten:

Diese von der MARECHAL TECHNICAL GROUP entwickelte Steckverbindung erfüllt wichtige Parameter für die Stromversorgung von Elektrostraßenfahrzeugen:

- Sicherheit bei dem Laden der Fahrzeuge und ergonomische Form
- Gut zugängliche Anschlußmöglichkeit, die eine ungehinderte Funktion gewährleistet
- Leistungskontakte für Strombelastungen von 100 A bis 400 A,
- Phasenkontakte für 16 A bis 50 A
- Eine Steckdose im Fahrzeug für Normal- und Schnellladung
- Nacheilende Pilot- und Hilfskontakte für Sicherheitsschaltung und Daten austausch.

Die Stirndruckkontakte mit selbstreinigenden Silberplättchen sind korrosionsbeständig und ermöglichen einen optimalen Stromfluß. Mit ihnen können mindestens 20.000 Schaltungen ausgeführt werden. Da die Form des SEPM-Steckers der Zapfpistole einer üblichen Tanksäule gleicht, bedarf es keiner Umstellung des Nutzers auf das elektrische System. Die SEPM-Steckverbindung läßt sich mit geringem Kraftaufwand stecken bzw. trennen (Auszug aus dem Firmen-Prospekt).

Bild 15: Schnelladestation Bergen - Prinzipschaltbild

Schnellladestation FC 320 Bergen Prinzipschaltbild

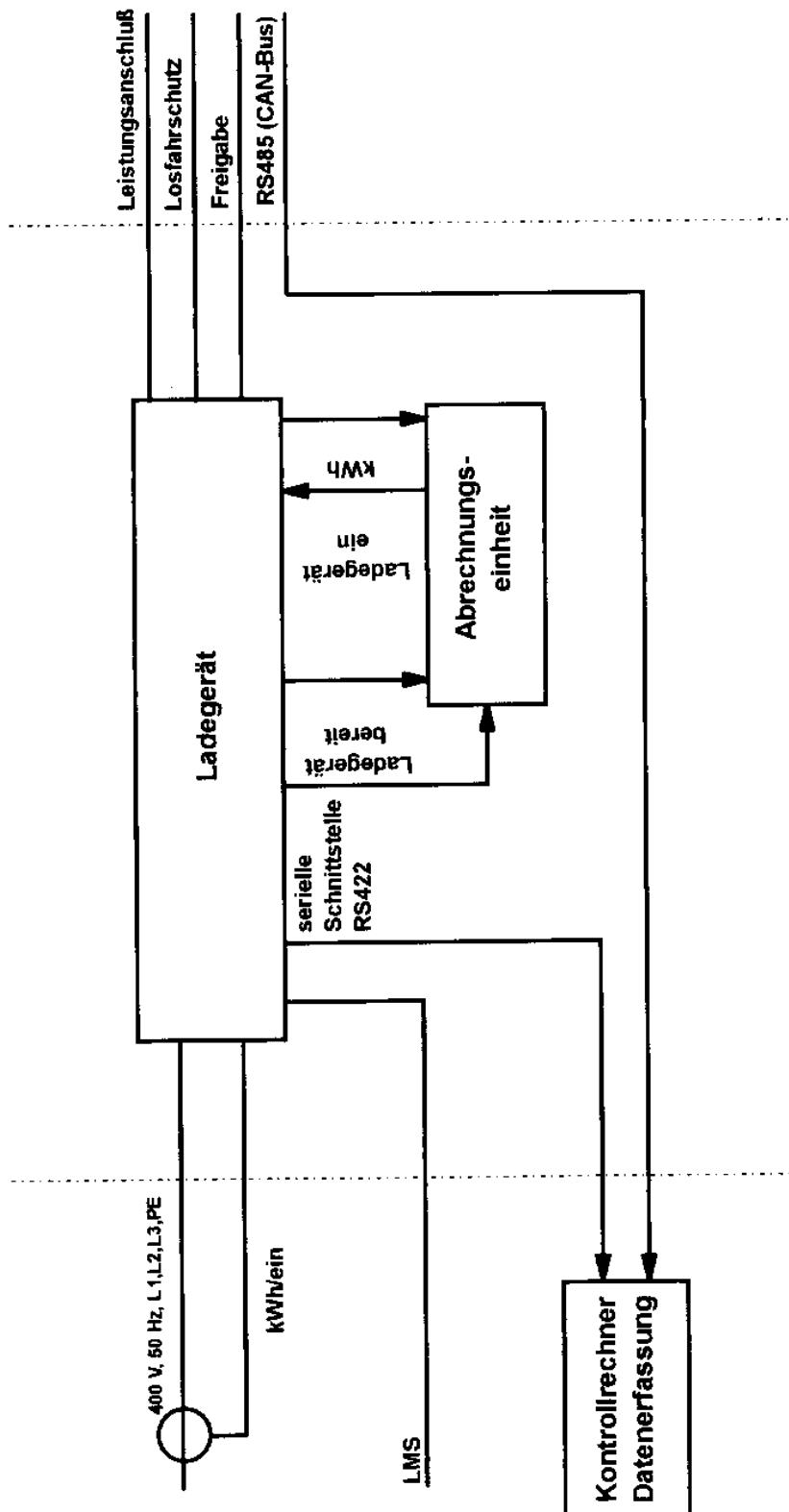


Bild 16: Schnelladestation Bergen - Blockschaltbild

Schnellladung FC 320 Bergen Blockschaltbild der Leistungs- und Steuereinheit

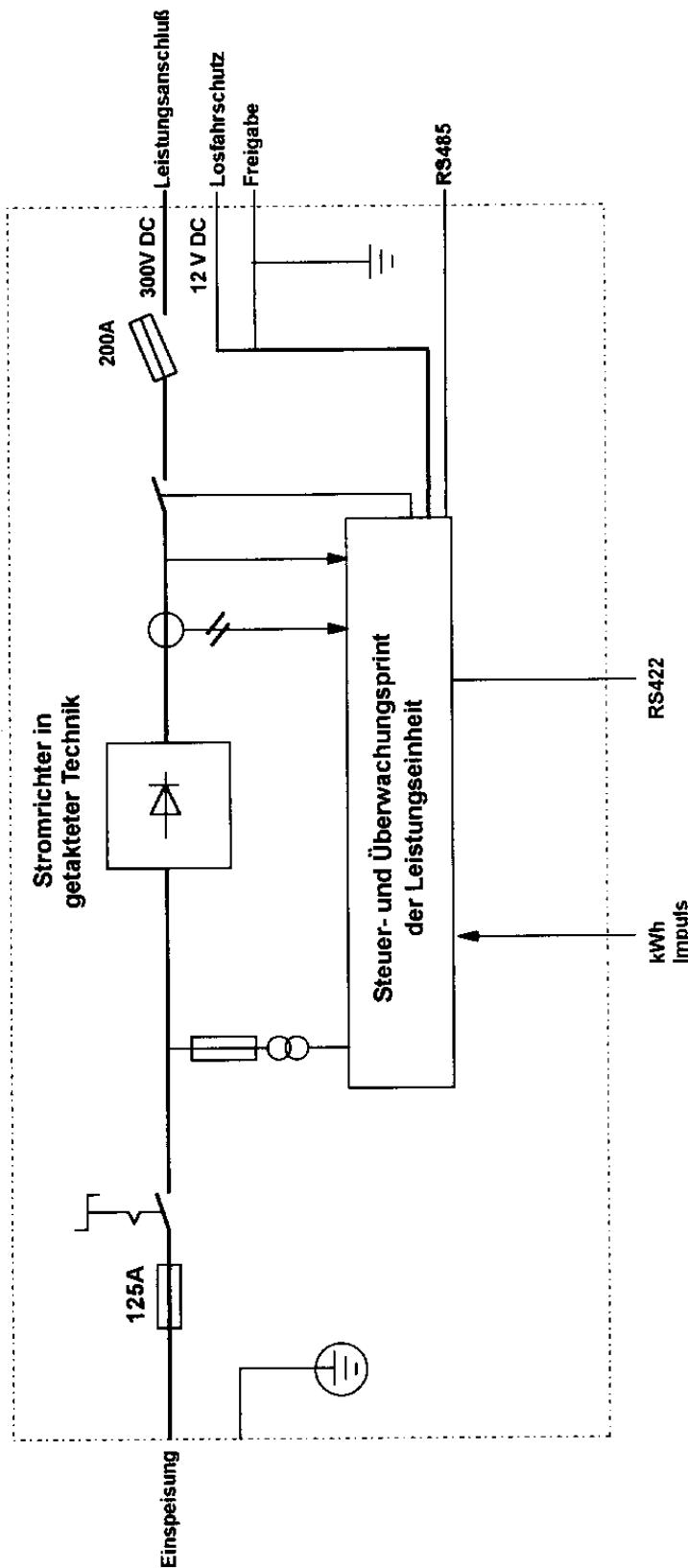
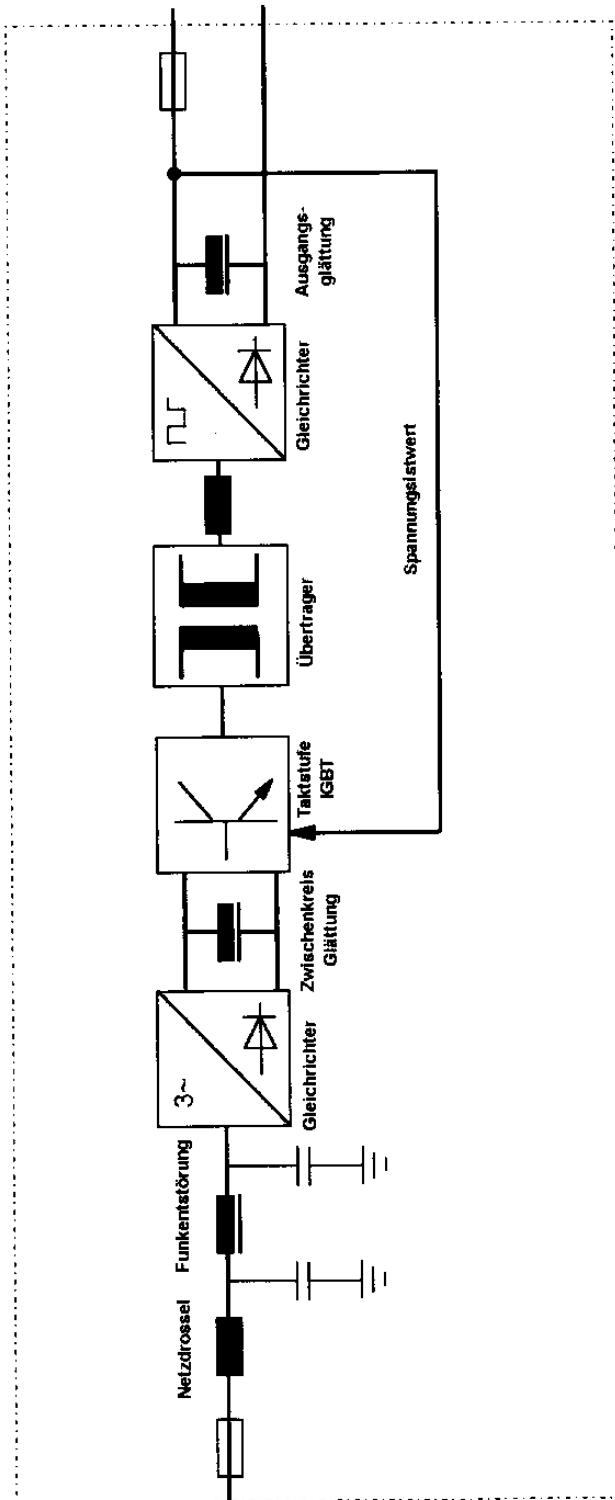


Bild 17: Schnelladestation Bergen - Blockschaltbild Stromrichter

Schnelladestation FC 320 Bergen
Blockschatzbild Stromrichter



10.4.3 Betriebsergebnisse

Energieabsatz:

Der Energieabsatz aus Sicht des EVU ist identisch mit dem Energiebezug der Schnellladestationen, gemessen im Netzeingang. Die Abgabe auf der Gleichspannungsseite wird nur in den Ladeprotokollen dokumentiert.

Ladestation	Inbetriebnahme	Energiebezug bis 31.03.1996
FC 310	31.03.1994	6.792 kWh
FC 320	20.06.1995	4.538 kWh

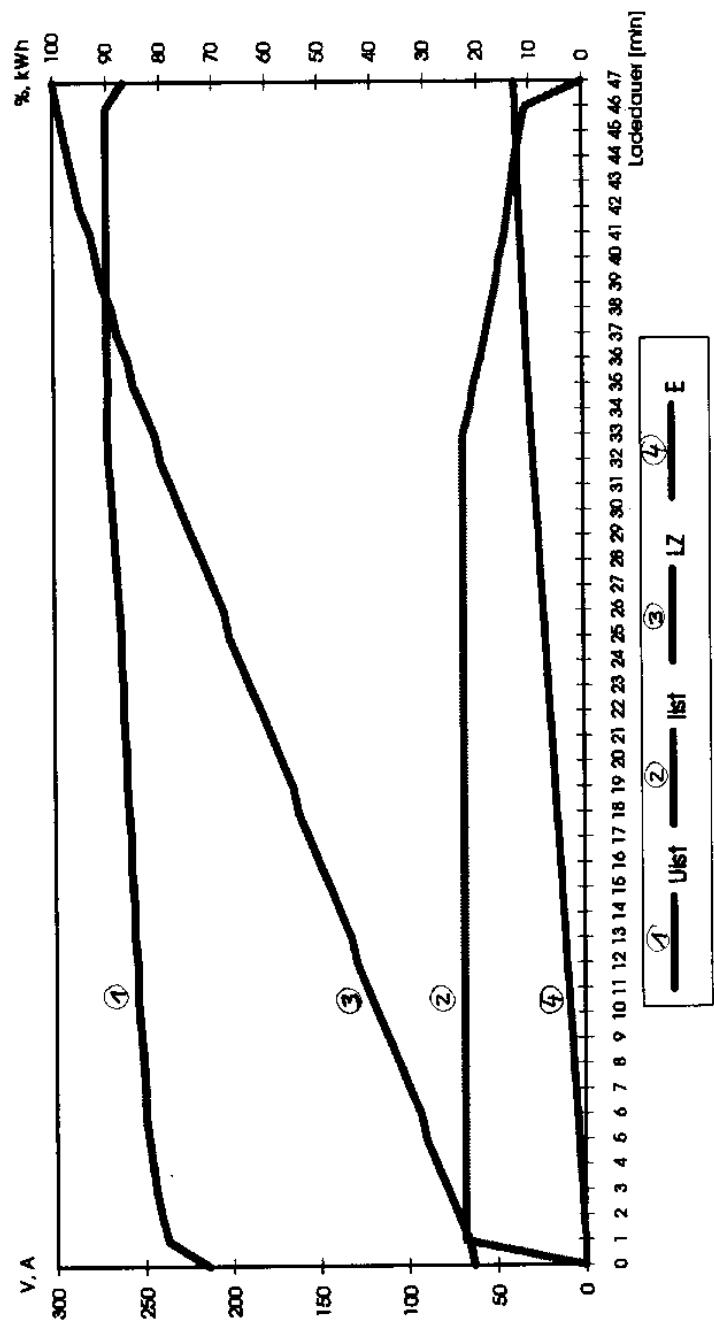
Verlauf und Dauer der Ladungen:

In der technologischen Kette der Schnellladung EVU-Netz - Ladestation - Batterie wirkt die Ladestation als passive Baugruppe, da die Ausgangsspannung und der Ausgangstrom von dem Batteriecontroller spezifisch für jede Batterie vorgegeben werden. Verlauf und Dauer der Ladung werden durch die Batterie bestimmt. In den bisherigen Erprobungs- und Betriebsphasen wurde bei keiner der beiden Ladestationen die maximale Ausgangsleistung angefahren.

Typische Beispiele für Strom- und Spannungswerte während der Ladung von NiCd-Batterien mit unterschiedlicher Kapazität sind aus den Bildern 18 bis 21 ersichtlich.

Bild 22 zeigt die analoge Darstellung für die Schnellladung von ZEBRA-Batterien (NaNiCl_2).

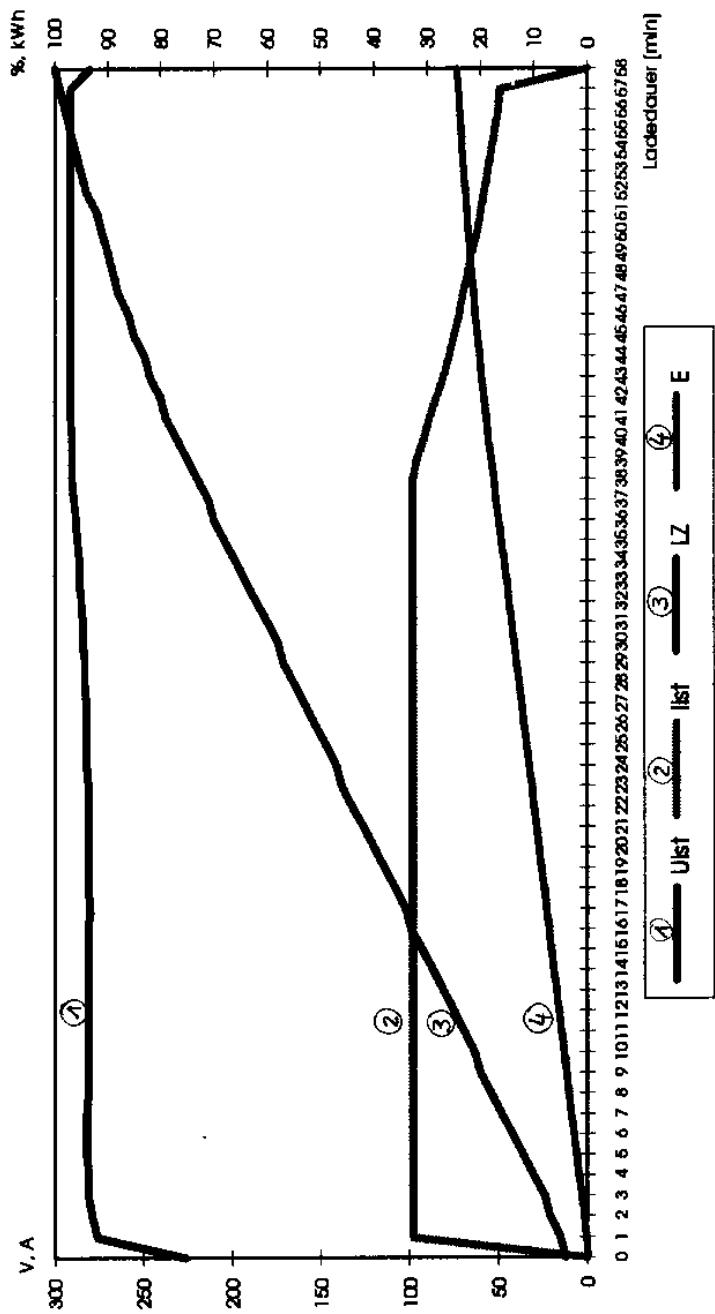
Bild 18: Ladeparameter während der Schnellladung mit $I_{\text{soll}} = 70 \text{ A}$



Ladeparameter U [V] und I[A] während der Schnellladung mit $I_{\text{soll}} = 70 \text{ A}$

FC 310

Bild 19: Ladeparameter während der Schnellladung mit $I_{\text{soll}} = 100 \text{ A}$



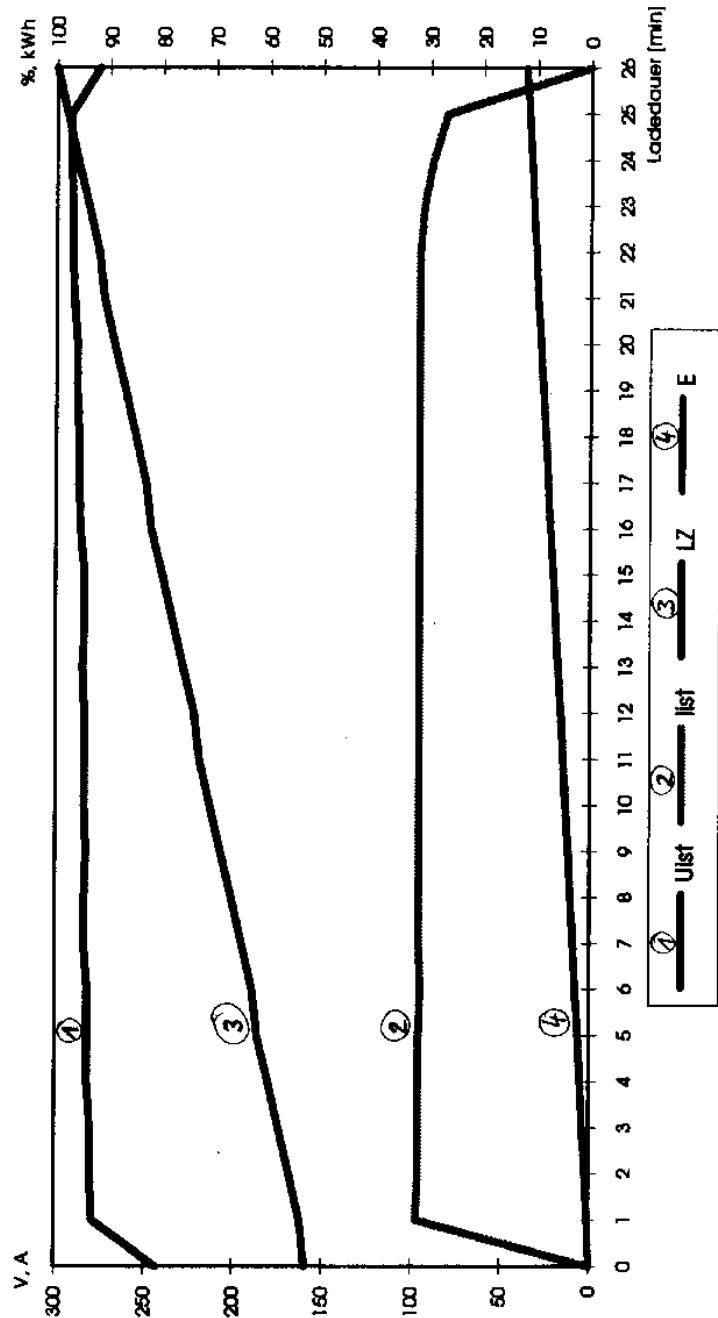
FC 310

Ladeparameter U [V] und I[A] während der Schnellladung mit $I_{\text{soll}} = 100 \text{ A}$

U_{max} : 294 V	I_{LZ} = Ladezustand [%]
Ladeprotokoll:	60c6001
Fahrzeug:	VW T4
Batterie:	NiCd
Datum:	06.12.1994

E = geladene Energiemenge [kWh]

Bild 20: Ladeparameter während der Schnellladung mit $I_{\text{soll}} = 100 \text{ A}$



FC 320

Ladeparameter U [V] und I[A] während der Schnellladung mit $I_{\text{soll}} = 100 \text{ A}$

Umax: 292 V	LZ = Ladezustand [%]
Ladeprotokoll: 5174142	
Fahrzeug: VW T4	E = geladene Energiemenge [kWh]
Batterie: NiCd	
Datum: 04.07.1995	

Bild 21: Ladeparameter während der Schnellladung mit $I_{\text{soll}} = 200 \text{ A}$

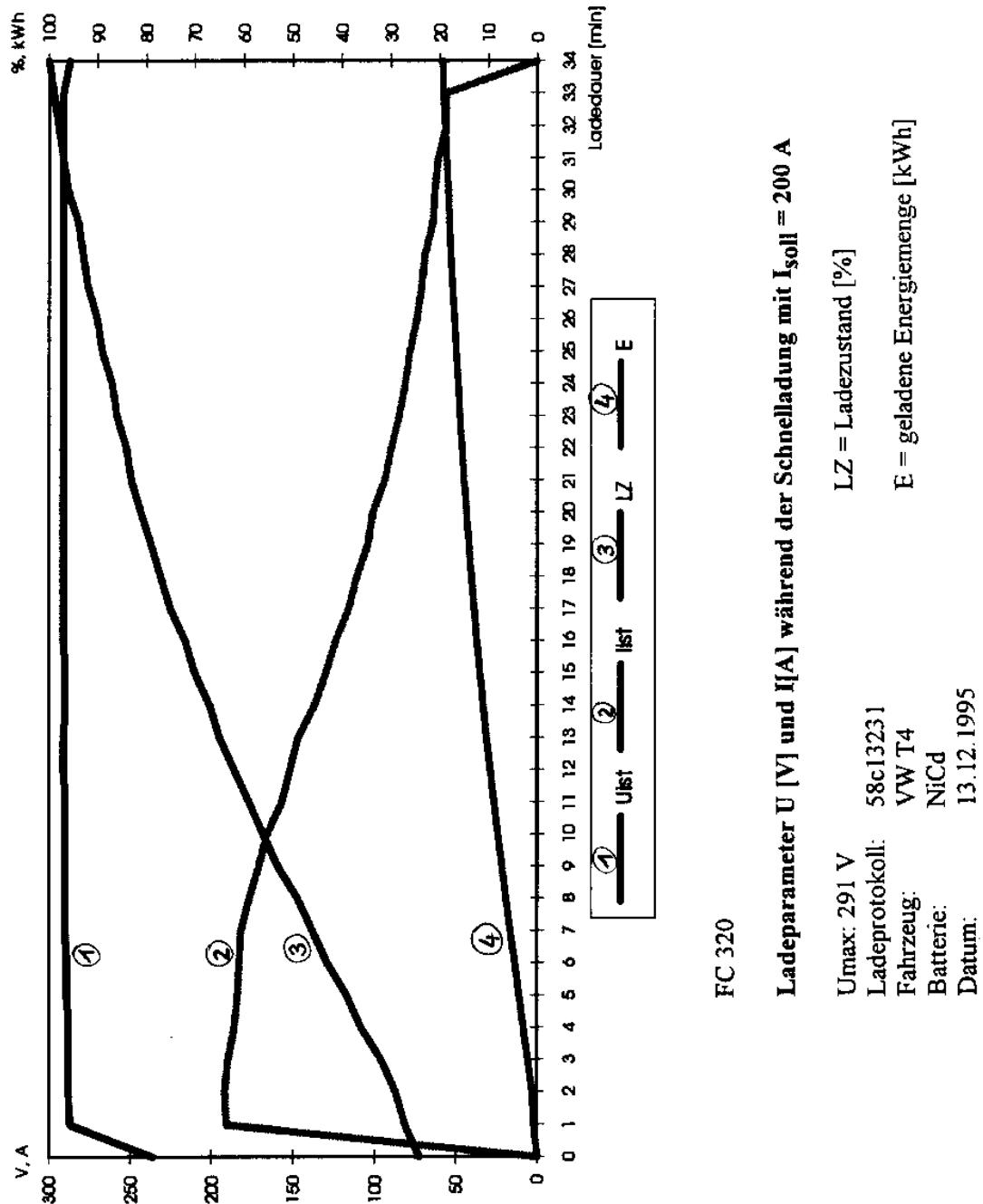
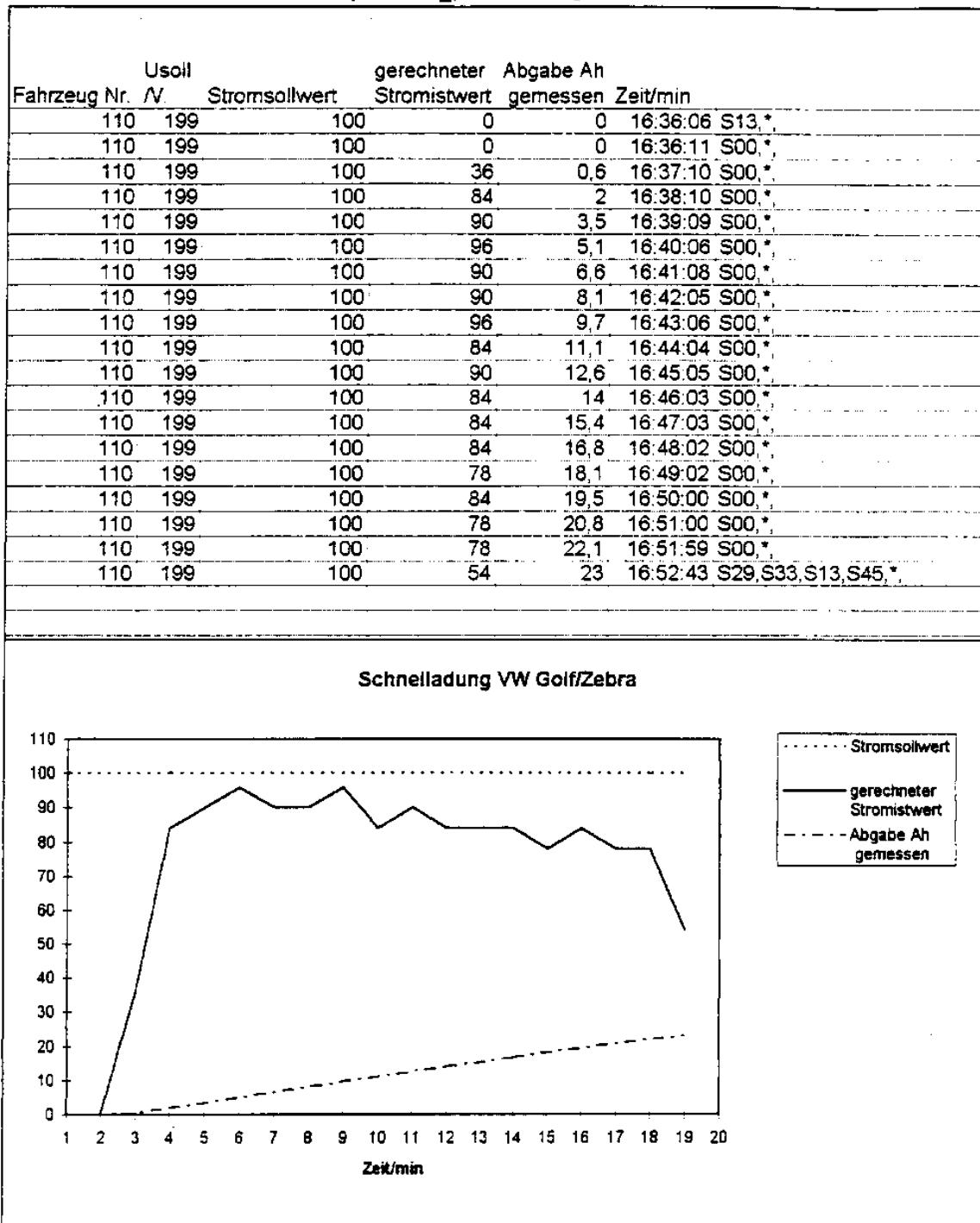


Bild 22: Ladeparameter während der Schnellladung, Na / NiCl₂- Batterie

**Ladeparameter während der Schnellladung einer ZEBRA-Batterie
(NaNiCl₂), Fahrzeug VW Golf**



10.4.4 Störungen/Mängel/Veränderungen

Ladestation FC 310:

Beschädigungen/Störungen durch Fremdeinwirkungen:

Mit Inbetriebnahme der FC 310 traten Störabschaltungen sowohl in der Ladestation selbst als auch in der auf den gleichen Netzknoten einspeisenden Photovoltaikanlage (20 kWp) auf. Messungen des Ingenieurunternehmen für Energieversorgung GmbH, Dresden, führten zu der Feststellung, daß die Photovoltaikanlage allein aber insbesondere im Parallelbetrieb mit der FC 310 unzulässige Oberschwingungspegel verursacht, die Auslöser für die Störabschaltungen sein könnten (Bericht als Anhang A 10.3).

Wegen der komplexen Wirkung der unterschiedlichsten Störquellen in der Erprobungsphase der Ladestation konnten die Ursachen nicht endgültig aufg eklärt werden.

Offensichtlich haben sich die extern verursachten Störabschaltungen aber erheblich reduziert und beeinträchtigen gegenwärtig nicht den Betriebsablauf.

Störungen/Ausfälle:

Die Erprobungsphase der Ladestation war durch eine unzuverlässige Funktion und durch eine hohe Ausfallrate gekennzeichnet. Die Ursachen dafür sind den folgenden Komplexen zuzuordnen:

a) Datenaustausch zwischen dem Batteriecontroller und der Ladestation:

Mechanische und elektrische Mängel in der SEPM-Steckverbinding, Unterbrechungen oder Anschlußfehler in den Datenleitungen sowohl in der Steckverbindung und als auch in einigen Fahrzeugen. Beeinträchtigung durch elektrische Störfelder.

b) Bedienungs- und Abrechnungseinheit (TMS):

Der Magnetkartenleser war ungeschützt den Umwelteinflüssen (Staub) ausgesetzt, wodurch zunehmend Lesefehler auftraten.

c) Softwarefehler.

d) Ausfall elektronischer Bauelemente. (Eine Baugruppe des Steuermoduls mußte komplett ausgewechselt werden).

e) Ansprechen externer und interner Sicherheitsfunktionen: Unzulässige Temperaturdifferenz in der Batterie, zu hohe Temperaturen in der Batterie, Erdschluß im Batteriebereich z. B. durch Feuchtigkeit, Fehler in der Stromversorgung.

f) Abschaltungen im EVU-Netz.

Häufigkeit und Ursachen der Ausfälle sind in den Tabellen 1 und 2 zusammen gestellt.

Änderungen/Nachrüstungen:

- Einsatz mechanisch verstärkter SEPM-Stecker und Steckdosen jeweils nach dem aktuellen Entwicklungsstand.
- Ersatz der Parksteckdose durch eine Gabel mit Meldekontakten zur Aufhängung des Steckers.
- Schutz des geparkten Ladesteckers durch eine Abdeckhaube.

- Außerbetriebnahme der Bedienungs- und Abrechnungseinheit (TMS), Start des Lad e-programms durch manuelle Eingabe.
- Mehrfacher Austausch der Software gegen weiteren twickelte Versionen.
- Anbringung einer Überdachung in Leichtbauweise über dem Fahrzeug-Stellplatz als Wetterschutz beim Andocken des Fahrzeuges.
- Einbau von RFC-Filter in die Datenleitungen der schnelladefähigen Fah rzeuge.
- Einrichtung einer Kommunikationsverbindung zwischen dem PC der GL Stromrichte r-technik GmbH in Aachen und dem Kontrollrechner in der Ladestation zur Fehlerfestste l-lung und -behebung.

Ladestation FC 320:

Beschädigungen/Störungen durch Fremdeinwirkungen:

Durch Vandalismus wurden Lüftungsgitter (Plastik) der Leistungseinheit beschädigt. Gefahren für Personen und Auswirkungen auf die Funktion der Anlage bestehen bei dem gegenwärtigen Schadensumfang noch nicht.

In der Folge eines schweren Gewitters wurde die elektronische Ausrüstung der Tankstelle erheblich beschädigt, so daß der Tankstellenbetrieb über mehr als 24 h nur eingeschränkt möglich war. Von den Baugruppen der FC 320 war nur das Modem zerstört. Nach Neustart der Software war die Ladestation wieder voll funktionsfähig.

Störungen/Ausfälle:

Infolge des kompakten Aufbaues der Leistungseinheit kam es in den Leistungsstromquellen zur thermischen Überbeanspruchung mit Totalausfall einiger elektrischer Bauelemente.

Durch Störeinstrahlung aus den Leistungsstromquellen in die Datenleitungen traten Fehler im Datenaustausch auf.

Häufigkeit und Ursachen der Ausfälle sind in den Tabellen 1 und 3 zusammen gestellt.

Klassifikation der Ausfälle:

- a) Stationsfehler: Übertemperatur in der Leistungseinheit, Netzausfall, Hard- und Software-Fehler.
- b) Kommunikation: Fehler in der Datenübertragung zwischen Fahrzeug und Ladestation z. B. durch schlechte Kontaktierung, Störungen durch elektrische Fremdpegel.
- c) Fahrzeug: Ansprechen der Sicherheitsfunktionen bei Temperaturabweichungen in der Batterie sowie bei Erdschluß durch Feuchtigkeit.
- d) Kurzladung: Nicht aufgeklärter Abbruch im Programmablauf, der sofort oder innerhalb weniger Minuten nach dem Programmstart eintritt.

Änderungen/Nachrüstungen:

- Leistungseinheit: Verbesserungen in der Fremdkühlung, Einsatz thermisch höher belastbarer Bauelemente in den Leistungsstromquellen.
- Software: Nachbesserungen durchgeführt:
- Einbau von RLC-Filter in die Datenleitung der Fahrzeuge.

Im Ergebnis der Änderungen und Nachrüstungen wurde die Zuverlässigkeit der Ladestation auf ca. 90 % verbessert (Angabe für den Zeitraum Oktober 1995 bis April 1996).

- Nachrüstung der Fahrzeuge Nr. 32 (Opel Astra) und Nr. 49 (VW Golf):

Im April 1996 wurden v. g. Fahrzeuge mit Compiler für den Datenaustausch zwischen Batteriecontroller und Schnelladestation nachgerüstet. Dadurch wurde für die ZEBRA-Batterie die Erprobung ihrer Schnellladefähigkeit ermöglicht. Der Ladestrom ist durch den Batteriecontroller auf max. 100 A begrenzt.

SEPM-Steckverbindung:

Störungen/Ausfälle:

Der Einsatz der SEPM-Steckverbindungen im Rügen-Projekt begann mit Labor-Mustern aus der Entwicklungsphase. Die aufgetretenen Ausfälle hatten ihre Ursache in der unzureichenden mechanischen Festigkeit im Bereich der Steckerführung und der Steckerabdeckung. Offensichtlich erfolgte auch die Anordnung der Steckdosen in einigen Fahrzeugen des Rügen-Projektes nicht nach den Vorstellungen der SEPM-Konstrukteure, wodurch die Steckdosen zusätzlichen Einflüssen durch Regenwasser, Schmutz u. a. ausgesetzt waren.

Änderungen/Nachrüstungen:

- Konstruktive Verbesserungen.
- Verwendung anderer Werkstoffe, insbesondere Verwendung von Metall für die Decke I-verriegelung im Stecker.
- Individuelle Schutzmaßnahmen gegen Wasser und Schmutz für die Steckdosen in den Fahrzeugen und an den Ladestationen.
- Veränderungen in der Führung und Befestigung des Ladekabels zur Entlastung der Steckverbindung.
- Einsatz eines verbesserten Kabeltyps in der FC 320.

Tabelle 1: Schnellladung - Störungsarten

Schnellladung - Störungsarten



	Station	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mär	Apr	Su.: Okt
Station intern	Zirkow	1					1			1			2
Bergen	2	1	1				2						3
Verbindung Fzg - Stat	Zirkow	4	3	13			1	10				3	14
Bergen	9	3	9			9	1			6	1		17
Fahrzeug	Zirkow	4	1			1	3	2	4				10
Bergen						1	1	1	2				5
Fahrzeug Sicherheitsfunk.	Zirkow												0
Bergen	4					2		3	1	2	1		9
Kurzladung unklar	Zirkow	4	22	8	4	4	3	1	3				11
Bergen	26	8	3		(27)	3	3			2			8
ab Oktober :													
Stationsfehler													5 Sicherheitsfunktion Fzg. 9
Verbindg, Fzg. - Stat.													Kurzladung unklar 19
Fahrzeug													15

Tabelle 2: Station Zirkow

Station : Zirkow ab 01.06.1995



Fahrzeug	BMW	MB 100	Astra	Astra	T 4	T 4	T 4	T 4
Nr.	8	28	38	41	51	52	53	58
	Ladg. Fehler							
Jun	1	0	1	1	21	6	4	2
Jul			14	6	27	11		
Aug	3	1	19	10	13	13		1
Sep	1		2	1	4	1	1	1
Okt	6	12			10	4	2	4
Nov	5	2			2	9	3	2
Dez	1	2	4	1	2	1		1
Jan	3	10	3	31	6			1
Feb								
Mär						3		3
Apr	2	2	1	4	2		1	
Summe: ab Okt.	14	3	9	0	27	4	37	9
						16	4	11
							3	7
							2	19
								1

ab Oktober:

149 Ladungen
26 Fehlladungen

zirka 17%

Tabelle 3: Station Bergen

Station : Bergen, ab 20.06.1995



ab Oktober: 202 Ladungen

23 Fehlladungen zirka 10%

10.4.5 Bewertung der Schnellladung

Mit den ausgeführten Ladestationen wurde die Anwendbarkeit der Schnellladung aus einer externen Gleichstromquelle für die Batterie-Typen NiCd und NaNiCl₂ nachgewiesen.

Die projektierten Leistungsparameter wurden von den Ladestationen im wesentlichen erreicht. Wegen fehlender Abnahme konnte die max. Ausgangsleistung reproduzierbar nicht demonstriert werden. Mit dem Fahrzeug Nr. 58 (VW T4) wurden Leistungstests an der FC 320 gefahren und kurzzeitig ein Ladestrom um 197 A erreicht.

Für jedes der einzelnen Leistungsmodulen der FC 320 wurde eine fahrbare Leistung von 15 kW nachgewiesen.

Energiewirtschaftlich relevante Parameter aus dem Dauerbetrieb der FC 320 wurden durch die Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden erfaßt und ausgewertet (siehe Anhang Nr. 4). Wesentliche Feststellungen dieser Untersuchung sind:

- Bei den während der Überprüfung durchgeführten Ladevorgängen traten keine Probleme auf.
- Die Datenaufzeichnung arbeitet noch nicht zuverlässig, insbesondere zum Ladungsbeginn treten Datenverluste auf.
- Der Wirkungsgrad ist abhängig von der Leistungsabgabe und erreicht Werte zwischen 0,75 (10 kW) und ca. 0,9 (50 kW).

10.5. Generelle Einschätzung und Beurteilung der Projektergebnisse

Normalladung:

Den überwiegenden Teil der Traktionsenergie erhielten die Batterien durch die Aufladung in den Nachtstunden, die wiederum am häufigsten in den Garagen oder Betriebshöfen der Fahrzeughalter durchgeführt wurde.

Unter der Annahme, daß alle Betreiber von Elektrostraßenfahrzeugen über die Lademöglichkeit im Heim- oder Gewerbebereich verfügen, haben Normalladestationen im öffentlichen Bereich nur eine untergeordnete Bedeutung für die Fahrzeugversorgung. Stimulierende und dekorative Wirkungen könnten die Ladestationen an exponierten Stellen des öffentlichen und geschäftlichen Lebens, z. B. im Bereich von Einkaufszentren u. ä. haben. Die Anforderungen an die elektrotechnische Ausrüstung sowie an das Zahlungssystem sind stark von der Infrastruktur abhängig, in welche die Ladestation eingefügt werden sollen. Die mechanische Ausführung sollte in einem ansprechenden Design erfolgen und eine angemessene Widerstandsfähigkeit gegenüber mutwilligen Zerstörungsblicken aufweisen.

Die im Rügen-Projekt eingesetzten Ladestationen TYP EML der Firma K. Biesinger GmbH haben die Aufgabenstellung zwar erfüllt, können aber für künftige Projekte nur bedingt empfohlen werden.

Schnellladung/Ladestationen des Typs FC 3xx:

Das erprobte Verfahren der Schnellladung aus einer externen Gleichstromquelle ist durch den Umgang mit hohen Gleichspannungen und -strömen gekennzeichnet und erfordert entsprechende Maßnahmen zur Gewährleistung der technischen Sicherheit und des Ar-

beitsschutzes. Die diesbezüglichen Anforderungen der Aufgabenstellung sowie die danach vorgenommene technische Ausführung haben sich zwar als ausreichend erwiesen, beinhaltet aber insbesondere für die Steckverbindung die Aufgabe zur Minimierung des Restrisikos.

Hervorzuheben ist, daß in der gesamten Projektlaufzeit kein Unfall durch elektrischen Strom im Zusammenhang mit der Aufladung der Traktionsbatterien eingetreten ist.

Wegen fehlender Voraussetzungen seitens der Batterietechnik konnten weder die Notwendigkeit noch die Funktion

- der Ladegerät-Steuerung nach Batterie-Kennlinien
- eines Batterie-Management-Systems

nachgewiesen oder getestet werden.

Auch ein Lastmanagement für das EVU-Netz läßt sich aus dem Rügen-Projekt nicht begründen.

Die in der Aufgabenstellung fixierten Annahmen und Grundforderungen für die Schnellladung haben sich im praktischen Betrieb als zutreffend erwiesen. Das Prinzip der Schnellladung hat sich bewährt und kann ein wichtiges Element für die Erweiterung des Aktionsbereiches elektrischer Straßenfahrzeuge sein.

10.6 Empfehlungen für Weiterentwicklungen und für künftige ESF-Infrastrukturen

1. Batteriemanagement und Technologie der Schnellladung müssen mit dem Ziel verbessert und optimiert werden, eine höhere spezifische Ladeleistung sowie eine, mit konventionellen Tankstellen vergleichbar hohe Funktionszuverlässigkeit im Dauerbetrieb zu erreichen.
2. Für das Ladeverfahren aus externer Gleichstromquelle ist die Weiterentwicklung folgender wesentlicher Komponenten von Bedeutung:
 - Anschlußstecksystem (Verbesserung der mechanischen und elektrischen Zuverlässigkeit, leichte Handhabung).
 - Anschlußkabel (Entwicklung hochflexibler Mehrleiter-Kabel).
 - Datenschnittstelle (universelle Schnittstelle mit hoher Zuverlässigkeit unter den Betriebsbedingungen eines Straßenfahrzeuges, z. B. CAN-Bus).
 - Steckdose im Fahrzeug (einheitliche Einbaustelle unter Beachtung ergonomischer Ansprüche, Schutz gegen Feuchtigkeit auch während des Ladevorganges).
3. Das Verfahren der Batterieladung mit Wechselstrom im Mittelfrequenzbereich ist eine interessante Alternative zur Ladung mit Gleichstrom und sollte auf ein vergleichbares technisches know-how entwickelt werden.
4. Um einen hohen technologischen Stand sowie eine Akzeptanz auf breiter Basis zu erreichen, sind Konzeptionen künftiger Infrastrukturen für die Versorgung von ESF in enger Zusammenarbeit zwischen Batterielieferanten, den Fahrzeugherstellern, den regionalen Energieversorgungsunternehmen und potentiellen ESF-Nutzergruppen auszuarbeiten.

11. A.S.E Solaranlage

Der Energiebereitstellung für die Elektrofahrzeugflotte wurde in dem Projekt auf Rügen eine große Aufmerksamkeit gewidmet, dies bezieht sich insbesondere auf die Solarenergie als regenerativer Energieträger. Wegen der überdurchschnittlich hohen Sonneneinstrahlung auf der Insel Rügen war die Einbindung einer Photovoltaikanlage in das Energieversorgungskonzept naheliegend.

Die ASE (Angewandte Solarenergie - A.S.E. GmbH), ein von der Deutsche Aerospace AG und der Nukem GmbH am 1. Juli 1994 gegründetes Gemeinschaftsunternehmen, wurde mit dem Bau eines Solargenerators im Rahmen des Rügen-Projektes beauftragt. Ein 200m² großer photovoltaischer Generator mit 336 monokristallinen Solarmodulen wurde in Zirkow auf Rügen in die Dachfläche des Werkstattgebäudes der DAUG integriert.

Die Photovoltaikanlage wurde vom Wirtschaftsministerium Mecklenburg-Vorpommerns mit insgesamt 300.000 DM gefördert.

11.1 Systembeschreibung

Für den Bau und die Nutzung der Anlage waren Verhandlungen über die Rechtsgrundlagen mit den Eigentümern des Geländes in Zirkow notwendig. Die Nutzungsverträge wurden Ende 1992 von der DAUG abgeschlossen, so daß nach der Modulfestlegung (Laminate mit Hochleistungszellen) Installationspläne erstellt und die Module gefertigt werden konnten.

Über einen Gruppenkasten, in dem Schalt- und Sicherungseinrichtungen untergebracht sind, wird der PV-Generator mit dem Wechselrichter verbunden. Der Wechselrichter (Bild 1) formt den eingehenden Gleichstrom in einen netzangemessenen Drehstrom um.

Die Anbindung an das öffentliche Versorgungsnetz der HEVAG erfolgte über die Verteilungsanlage der Deutschen Automobilgesellschaft mbH über die zugelassenen Meß- bzw. Zähleinrichtungen.

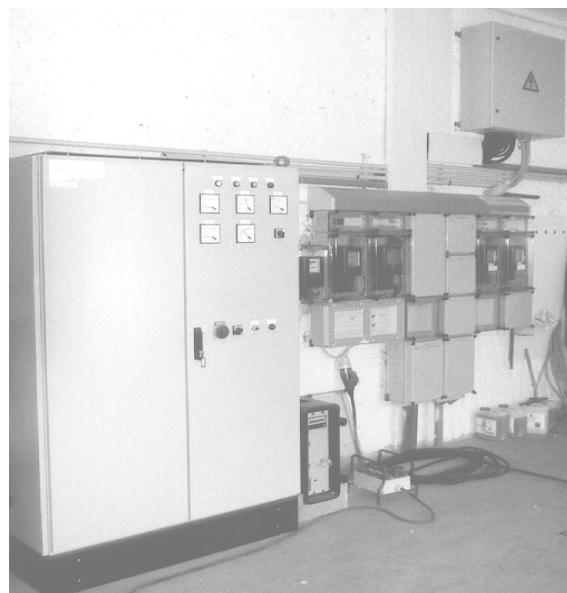


Bild 1: links Wechselrichter der PV-Anlage, rechts oben Gruppenkasten (zusammenführung der einzelnen Solarstränge)

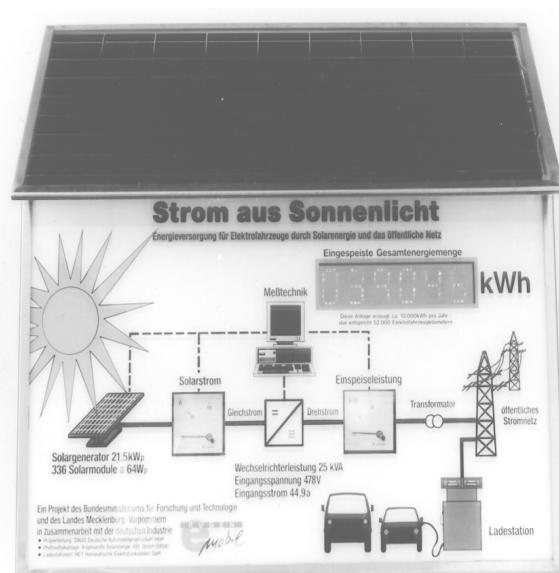


Bild 2: Außenanzeige der Photovoltaikanlage mit schematischer Darstellung

Der schematische Aufbau der Photovoltaikanlage wurde, zusammen mit Anzeigen für die erzeugte Energiemenge, dem Solarstrom und der momentan eingespeisten Energiemenge, in einer Außenanzeige für die Öffentlichkeit dargestellt (Bild 2).

Die bei dieser Pilotanlage angewandte Dachintegration war die erste, großflächig erstellte Dachhaut in dieser Ausführung.

Das Montagesystem hat die Forderungen, Dichtigkeit, Witterungsbeständigkeit, UV-Stabilität zu erfüllen sowie Vorschriften und Empfehlungen in Bezug auf Statik und Elektrik einzuhalten. Aufgrund dieser Anforderungen wurde ein Hohlkammerprofil gewählt, das aus Aluminiumprofilen im nicht bewitterten Teil und aus V2A-Profilen im bewitterten Teil besteht. Die Übergänge an die konventionelle Dacheindeckung sind mit speziellen Kantprofilen aus V2A-Stahl erstellt (Bild 3).

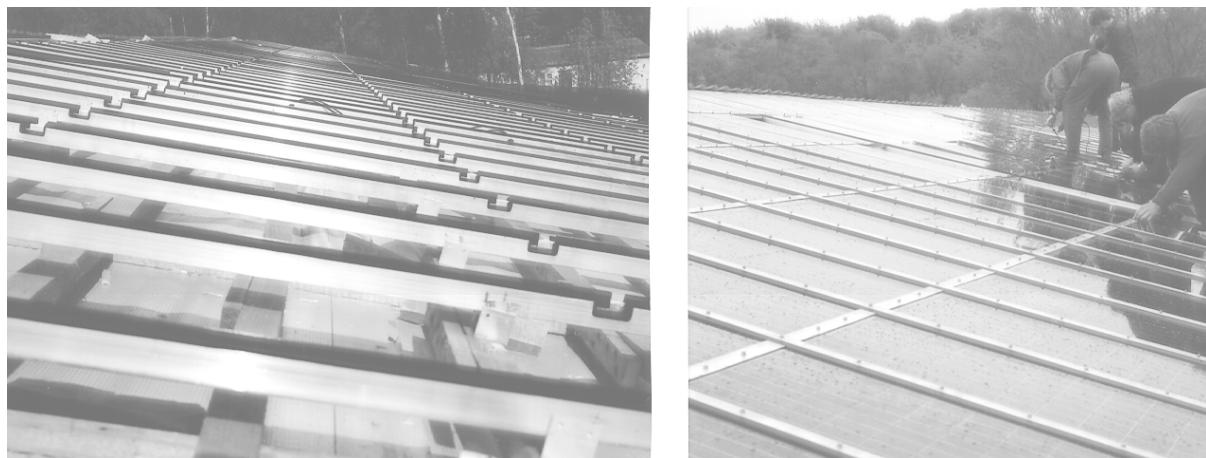


Bild 3: Bau der Solaranlage als Dachintegration auf der Südseite des DAUG Werkstattgebäudes in Zirkow

Die rahmenlosen Spezial-Module sind mit EPDM Spezialprofildichtungen mechanisch spannungsfrei in die Konstruktion eingebettet. Für die Anlagen- und Wetterdatenerfassung ist eine entsprechende Sensorik eingebunden.

Technische Daten des Solargenerators:

Modultype	Monokristallin	=	MQ 40 HKL
Anzahl	aktiv (Verbund)	=	336 Stück (340)
Aufteilung	Reihenschaltung	=	24 Stück
	Parallelschaltung (String)	=	14 Stück
Verschaltung	Gruppenanzahl	=	1 Stück
Generatordaten	Nenngleichspannung U_{nenn}	=	478 V
	Leerlaufgleichspannung	=	576 V
	Kurzschlußstrom I_k	=	48,3 A
	Strom im MPP I_{MPP}	=	44,9 A
	Gesamtleistung kWp	=	21,5 kW

Technische Daten des Wechselrichters nach Datenblatt:

Wechselrichtertyp	=	SWR 25
Nenngleichspannung U_{MPP} (Regelung)	=	478 V (320-700 V)
max. Betriebsgleichspannung	=	700 V
Nennspannung AC	=	400 V (3 Phasen)
Nennfrequenz	=	50 Hz
Nennleistung	=	25,5 kW

11.2 Betriebsergebnisse

Nach Fertigstellung der Dachunterkonstruktion für die Dachintegration der Photovoltaikanlage am 4.05.1993 und dem daran anschließenden Aufbau der Dachintegration erfolgte am 10.05.1993 eine Teilabnahme des Solargenerators.

Nach Lieferung und Anschluß des Wechselrichters wurde der Solargenerator am 6.07.1993 in Betrieb genommen. Die technische Endabnahme erfolgte am 25.11.1993. Mit der Anlagenvermessung begann die WIP-München im Januar 1994. Aufgrund diverser Änderungen sind die Meßdaten erst ab Januar 1995 belastbar.

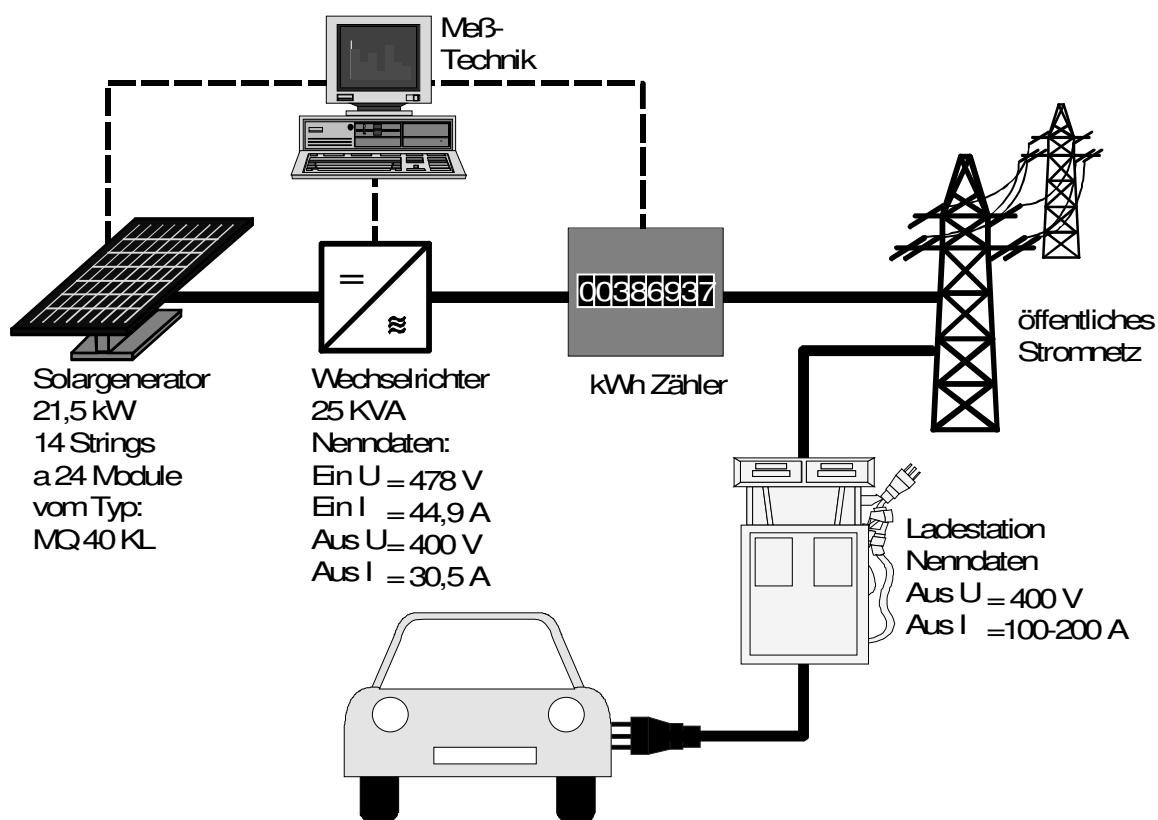


Bild 4: Schema der Photovoltaikanlage

Die PV-Anlage in Zirkow arbeitet im reinen Netzparallelbetrieb, d.h. die erzeugte Energie wird, nachdem sie von Gleich- in Wechselstrom gewandelt wurde (Bild 4), direkt in das öffentliche Versorgungsnetz gespeist. Vorgeschaltet ist nur der Eigenverbrauch im DAUG Werkstattbereich, wie z.B. Licht oder das Laden von Fahrzeugen.

Im Rahmen des MuD-Programms werden sowohl Meteorologische Meßdaten, wie eingeschaltete Energie, mittlere Modultemperatur und Stunden der Einstrahlung, aufgenommen, wie auch die Energiewerte von Solargenerator und Wechselrichters. Darüber hinaus werden verschiedene Statusparameter und Betriebswirkungsgrade zur Beurteilung der PV-Anlage mit erfasst. In Tabelle 1 ist beispielhaft die Auswertung für das zweite Halbjahr 1995 dargestellt.

Name der PV-Anlage: Zirkow (31)		
Anzahl der gemessenen Stunden		4415,0
Azahl fehlender Daten	%	0,1
Meteorologische Meßdaten		
Eingestrahlte Energie in Panelebene	kWh/m ²	485,8
Mittlere Modultemperatur	°C	12,5
Sonnenstunden > 100 W/m ²	h	1261,0
Energiewerte		
Summe eingestrahlte Energie (Array-Fläche)	kWh	78191,0
Energieabgabe Solargenerator	kWh	7480,7
Theo. mögliche Energie Solargenerator	kWh	8927,6
Energie in den Inverter (DC)	kWh	7480,7
Energie aus dem Inverter (AC)	kWh	7053,1
PV-Use, von Verbrauchern genutzte Solarenergie	kWh	7053,1
Beurteilungs-Parameter		
Betriebszeit Inverter	h	1236,9
Störung Inverter	h	74,4
Solargenerator Betriebswirkungsgrad	%	9,6
Inverter Beriebswirkungsgrad	%	94,3
Solarer Nutzungsfaktor	%	9,0
Gesamtertragsfaktor	kWh/kWp*d	1,78
Performance Ratio	%	67,5

Tabelle 1: Halbjahres-Auswertung der PV-Anlage (01.07.95 - 31.12.95); Quelle: WIP

In den ersten 36 Monaten nach der Inbetriebnahme der Photovoltaikanlage wurden rund 40.000 kWh Solarstrom erzeugt und in das öffentliche Netz eingespeist. Somit konnten rund 8% der Elektrofahrzeuge mit regenerativer Energie versorgt werden.



Bild 5: Elektrofahrzeuge vor dem Werkstattgebäude mit fertiggestellter Solaranlage

Probleme bei der Einspeisung in das Netz gab es nicht, allerdings schaltete sich die Solaranlage von Zeit zu Zeit ab. Vermutlich hängt dies aber mit Netzschwankungen zusammen, die zum Einzelausstieg führen und bei Überschreiten einer Summe von Vorfällen zur Gesamtabschaltung führen. Liegt eine Einzelstörung vor, fährt die Anlage selbstständig wieder an, bei einer Sammelstörung muß eine Handquittierung erfolgen, d.h. die Anlage mußte von Mitarbeitern wieder in Betrieb genommen werden.

Bild 6 schlüsselt in Form eines Balkendiagrammes die photovoltaisch erzeugten Energiemengen auf, die theoretisch, praktisch und tatsächlich im Jahr 1995 erzeugt bzw. genutzt wurden. Die saisonalen Schwankungen der Einspeisemengen ergeben sich aus den unterschiedlichen Witterungsverhältnissen bzw. der variablen Sonnenscheindauer.

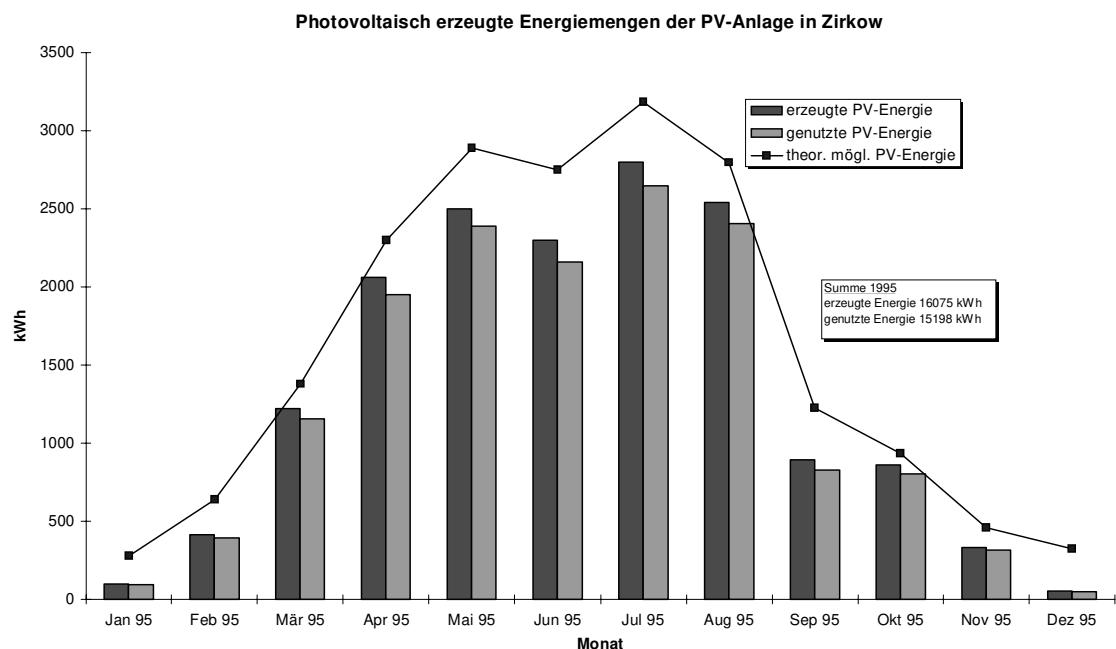


Bild 6: Einspeisung der Energiemenge der PV-Anlage in Zirkow 1995

12. HTW Datenerfassung und -auswertung

(Hochschule für Technik und Wirtschaft, Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik)

12.1. Einführung

Um die Erfüllung der beiden Hauptzielstellungen des Projektes

- Erstellung von Energie- und Ökobilanzen unter Praxisbedingungen und
- Demonstration des technologischen Fortschritts der neuesten Generation von Elektrofahrzeugen

bewerten zu können, war es erforderlich, mit Hilfe einer geeigneten Meßtechnik umfangreiche Daten über den Energieverbrauch, die Nutzungsparameter der Fahrzeuge und deren Komponenten zu erfassen. Zusätzlich zu den automatisch gewonnenen Meßdaten sollten durch Befragung der Nutzer Informationen über die Akzeptanz der Elektrofahrzeuge ermittelt werden.

Für die Meßdatenerfassung mußte ein leistungsfähiges und für alle Fahrzeugtypen einsetzbares Meßdatenerfassungssystem ausgewählt werden. Es war außerdem vorgesehen, alle Fahrzeuge damit auszurüsten. Deshalb sollte es folgende grundsätzliche Eigenschaften besitzen:

- für den On-board-Einsatz geeignet sein
- automatisch und ohne Mitwirkung des Nutzers arbeiten
- eine On-board-Vorverarbeitung der Meßdaten gestatten
- eine Langzeiterfassung ermöglichen und
- einen niedrigen Preis aufweisen.

Bereits vor dem offiziellen Projektstart, im Oktober 1992, vereinbarten die Projektpartner im August 1992, das Meßwerterfassungssystem TDS 100 der Fa. rd-electronic, Höhenkirchen, für das Rügenprojekt einzusetzen. Bis auf die On-board-Vorverarbeitung der Meßdaten erfüllte das System die oben genannten Forderungen.

Etwa zur gleichen Zeit wurde die Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTW) im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung des Versuches mit der Datenerfassung und -auswertung beauftragt. Für die HTW ergaben sich damit folgende Aufgaben:

- Erarbeitung einer Konzeption zur Meßdatenerfassung und -auswertung
- Formulierung einer Aufgabenstellung für die On-board-Vorverarbeitung
- Erprobung der Klassierung
- Auslesen der Meßdaten aus den Fahrzeugen aus Rügen
- Auswerten der Meßdaten und Prüfen auf Plausibilität sowie - wenn erforderlich auf Genauigkeit
- Aufbereitung und Übermittlung der Ergebnisse an das IFEU für die Bearbeitung der ökologischen Gesamtbilanz
- zwischenzeitliche Übergabe von Ergebnissen an die Fahrzeug- und Batteriehersteller
- Gesamtauswertung der Meßdaten aller Fahrzeuge.

Das von der HTW erarbeitete und mit allen Projektpartnern abgestimmte Meßprogramm ist Anlage der zwischen allen Projektpartnern abgeschlossenen "Vereinbarung zur Datenerfassung und -auswertung im Rahmen des Rügenprojektes". Sie enthält auch Festlegungen über die Behandlung der auf Rügen ermittelten Daten. Die Vereinbarung, einschließlich des

Meßprogramms, bildete die Grundlage für die gesamte Meßdatenerfassung und -auswertung im Rügenprojekt.

Bei einigen Fahrzeugherstellern gab es zum Beginn des Projektes schon Einsatzerfahrungen mit dem Meßwerterfassungssystem TDS 100. Es war für die Erfassung zeitabhängiger Signale an Elektrofahrzeugen gut geeignet. Um das Gerät für die Langzeiterfassung der Meßdaten einsetzen zu können, war eine leistungsfähige Software zur Vorverarbeitung von Meßdaten on-board erforderlich. Die dafür von der HTW ausgearbeitete Aufgabenstellung für den Geräte- und Firmwareentwickler rd-electronic enthielt folgende Hauptforderungen:

- Vorverarbeitung der Meßdaten durch Linearisierung, Zählung, Verweildauerklassierung und mehrdimensionale Klassierung
- Speicherung von Tagesprotokollen über mindestens einen Monat und
- genügend Rechen-, Zähl- und Klassierkanäle zur Erfüllung der Festlegungen aus der Meßtechnikkonzeption.

Die Struktur der Datenerfassung und -auswertung ist im Bild 1.1 dargestellt.

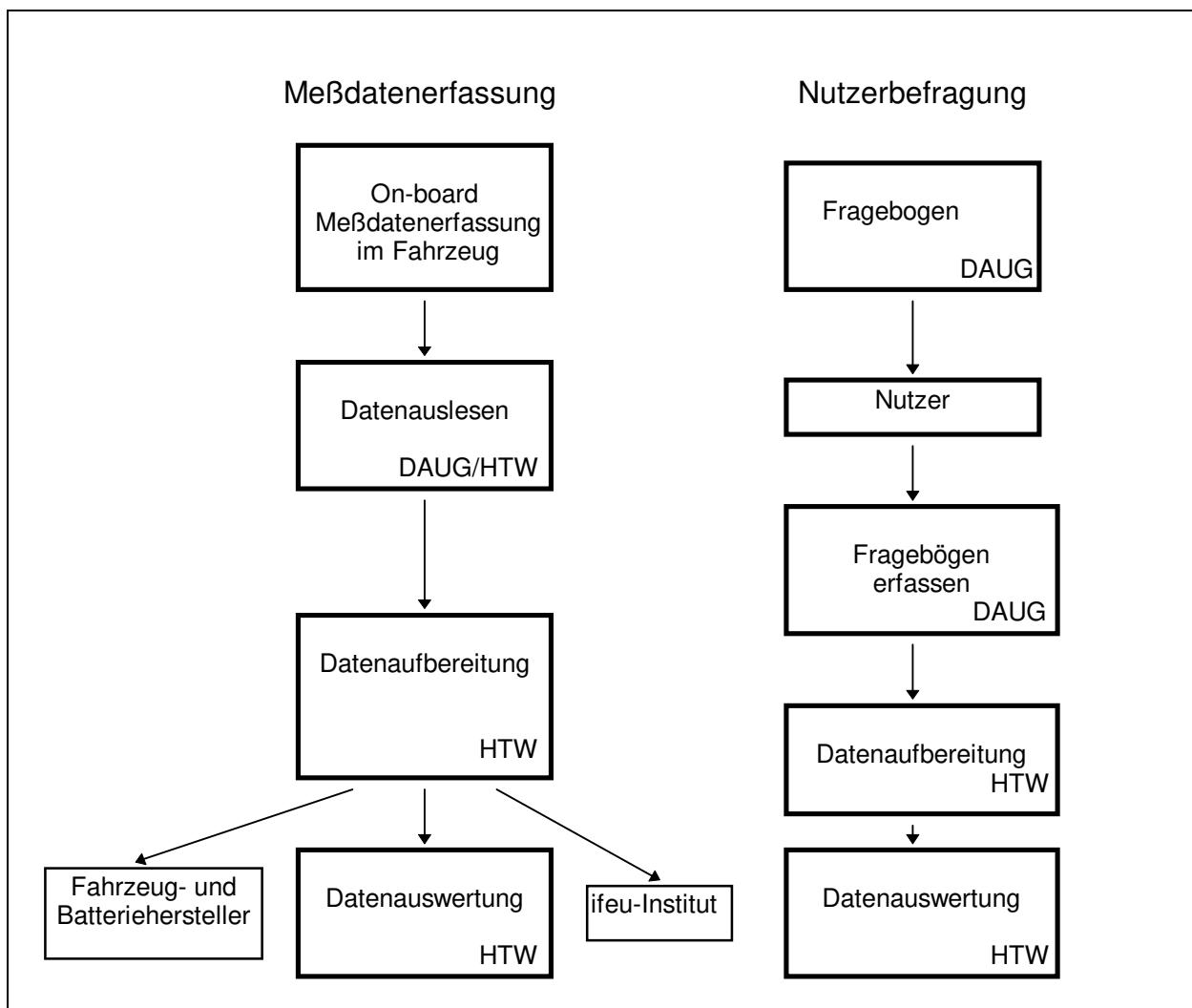


Bild 1.1: Struktur der Datenerfassung und -auswertung

Für das Auslesen der Meßdaten auf Rügen und die Akzeptanzuntersuchungen erfolgte die sinnvolle Vereinbarung, diese arbeitsteilig von der DAUG/Zirkow und der HTW Dresden

durchzuführen. Die HTW führte in der Zeit von 6/1993 bis 12/95 in Abständen von 6 bis 8 Wochen einwöchige Einsätze auf Rügen durch, in denen

- die Klassiersoftware erprobt
- Meßdaten ausgelesen und
- notwendige Änderungen in den Meßeinstellungen und Klassierbedingungen (Meß- und Klassier-Setups) erfolgten
- Überprüfungen der Fahrzeugsignale in Verbindung mit den Klassierbedingungen sowie
- Überprüfungen der Genauigkeit wichtiger Signale, wie das Tachometersignal oder Leistungsparameter, durchgeführt wurden.

Die DAUG erarbeitete in Abstimmung mit allen Projektpartnern die Fragebögen für die Akzeptanzuntersuchungen, verschickte sie an die Nutzer und holte die Antworten ein. Von der HTW erfolgte die Auswertung der Fragebögen.

Der zeitliche Ablauf des Einsatzes der Fahrzeuge auf Rügen sowie die Erprobung der Klassiersoftware und deren Einführung in die Fahrzeuge ist aus Bild 1.2 zu ersehen.

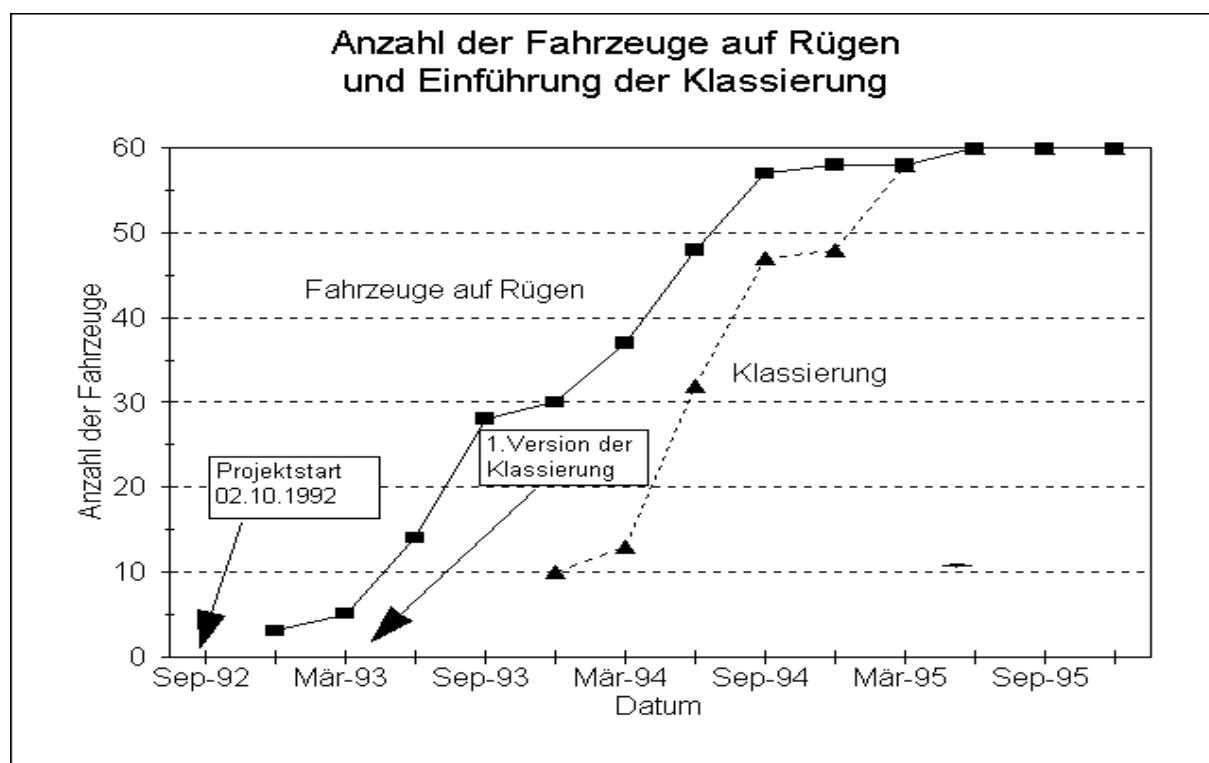


Bild 1.2: Zeitlicher Ablauf für die Erfassung klassierter Daten

Bereits vor dem offiziellen Projektstart stellte VW der HTW einen VW Golf Citystromer mit Blei-Batterie (das Fahrzeug V46) für die Erprobung des TDS 100 und der Sensoren sowie die Erarbeitung der Meßtechnikkonzeption zur Verfügung. Das Fahrzeug verblieb über die gesamte Projektlaufzeit bei der HTW in Dresden, weil es für die schrittweise Erprobung der Softwareversionen in Verbindung mit den dazu notwendigen EPROMs für das TDS 100 erforderlich war. Außerdem ermöglichte es die vorbereitende Bearbeitung von Meß- und Klassiersetups für Rügen.

Die erste von rd electronic erarbeitete Version der Klassiersoftware für das TDS 100 lag 6/1993 bei der HTW vor. Nach ersten Erprobungsschritten am Golf Citystromer in Dresden konnte Ende 1993 die Klassiersoftware in die ersten Fahrzeuge auf Rügen implementiert werden.

1994 war eine aufwendige Erprobungsarbeit mehrerer Versionen der Klassiersoftware in der Fahrzeugflotte auf Rügen notwendig. Jede neue Version erforderte einen EPROM-Wechsel im TDS der Fahrzeuge. Um den Fahrzeugeinsatz möglichst wenig zu stören, erfolgte der Wechsel meist beim Nutzer. Außerdem waren Abstimmungen mit den Fahrzeugherstellern nötig, um die Ziele der Meßdatenvereinbarung erfüllen zu können.

Als Voraussetzung für die spätere Meßdatenauswertung war sicherzustellen, daß die ermittelten Daten plausibel sind. Es erfolgte deshalb die Festlegung, daß nach einer Prüfung von gemessenen Daten durch die HTW und den entsprechenden Fahrzeugherstellern ein gemeinsames Protokoll über die meßtechnische Abnahme der Fahrzeuge unterschrieben wird.

Im 4. Quartal 1994 konnten die ersten Fahrzeuge meßtechnisch abgenommen werden. Damit war die in der Meßtechnikkonzeption vorgesehene umfangreiche Datenerfassung möglich. Die im Punkt 12.4 dargestellte Datenauswertung bezieht sich deshalb auf das Jahr 1995.

Die aus dem Jahre 1994 vorhandenen zahlreichen archivierten Tagesdatensätze sind durch Fehler in der Klassiersoftware und fehlende Signale in den Fahrzeugen so korrekturbedürftig, daß ihre Auswertung sehr aufwendig wäre und nur wenig aussagefähige Werte liefern würde. Sie wurden deshalb im vorliegenden Bericht nicht berücksichtigt.

Während der laufenden Meßdatenerfassung 1995 waren in kurzen Abständen Datenauswertungen von der HTW notwendig, um Hardwareausfälle möglichst früh zu erkennen und wenig Datenverluste zuzulassen. Die Klärung der Ursachen für nicht plausible Daten war meist vor Ort auf Rügen notwendig. Außerdem erforderten Änderungen an den Fahrzeugkomponenten neue Bedingungen in der Klassierung. Zusätzlich erfolgten im Rahmen der Rügeneinsätze auch Überprüfungen zur Genauigkeit der Meßdatenerfassung.

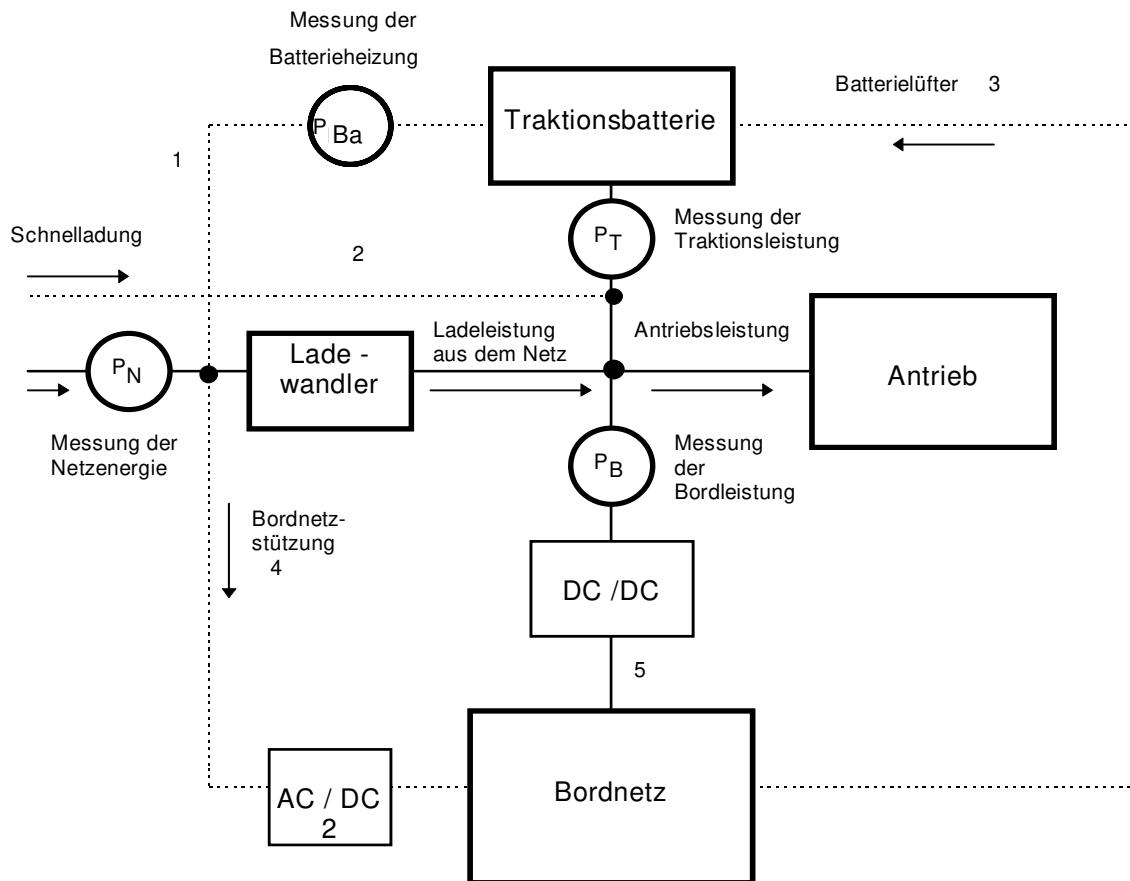
Die Daten der Zwischenauswertungen wurden dem IFEU Heidelberg zur Vorbereitung der ökologischen Bilanzrechnungen und den Fahrzeug- sowie Batterieherstellern zur Verfügung gestellt.

12.2. Konzeption zur Meßdatenerfassung

Die vereinbarte Konzeption zur Meßdatenerfassung enthält die Zielstellungen, den Energieverbrauch der Elektrofahrzeuge und ihrer Hauptkomponenten sowie Größen, welche die Nutzungsart charakterisieren, zu erfassen und auszuwerten. Als Hauptkomponenten gelten dabei:

- der Ladewandler
- die Traktionsbatterie
- der Antrieb und
- das allgemeine Bordnetz.

Die der Energieerfassung zugrunde liegende Struktur des Elektrofahrzeugs zeigt Bild 2.1. Der Komplex Traktionsbatterie umfaßt dabei neben der eigentlichen Batterie auch das dazu erforderliche Batteriemanagement, und im Antrieb ist das Motormanagement enthalten.



Die unterbrochen eingezeichneten Verbindungen sind nicht in allen Fahrzeugen gleichermaßen vorhanden:

- 1: Die Energie der Batterieheizung wird - wenn möglich - durch ein zweites LVM-Gerät erfaßt. Bei den NEOPLAN-Bussen können nur die Einschaltzeiten der Heizungen der drei Einzelbatterien gemessen werden. In den OPEL- Fahrzeugen befindet sich das zweite LVM vor dem Ladewandler, so daß die Heizenergie aus der Differenz von Netzenergie und Eingangsenergie des Ladewandlers bestimmt werden muß.
- 2: Nur bei schnellladefähigen Fahrzeugen
- 3: Der Batterielüfter ist nicht bei allen Batteriesystemen vorhanden
- 4: Bei einigen Fahrzeugen gibt es zur Stützung der Bordbatterie während langer Standzeiten ein spezielles Netzgerät.
- 5: In den OPEL- und VW- Fahrzeugen wird die Bordleistung hinter dem DC/DC -Wandler gemessen. Der Vergleich mit anderen Fahrzeugen erfordert daher die Berücksichtigung des Wirkungsgrades des Bordnetzladewandlers.

Bild 2.1 Struktur des Elektroautos

Das meßtechnische Ziel zur Energieerfassung bestand darin, neben den Hauptverbräuchen der vier Komplexe, notwendige zusätzliche Hilfsenergien den Komplexen richtig zuordnen zu können. Daß dieses Ziel nicht durchgängig erreicht werden konnte, wird unter Punkt 12.4.3 erläutert.

Die Meßstellen für die Energieerfassung sind im Bild 2.1 eingezeichnet. Gemessen werden die Leistungen und die entsprechenden Energien ergeben sich durch Integration. Zur Mes

sung der Netzeistung dienen bei den Pkws Netzenergiezähler LVM 210 der Fa. WSE. Die Pkws benutzen nur eine Phase. Die gleichen Geräte werden auch für die Messung der Heiz-energie aus dem Netz benutzt. Die Transporter (MB 100E), Kleinbusse (VW T4) und Busse (NEOPLAN) verwenden für die dreiphasige Messung Leistungs-/Energie-Transmitter LVT 310 ebenfalls von WSE. Beide Gerätetypen liefern 1 Impuls/Wh. Die der Leistung entsprechende Ausgangsfrequenz der Geräte wird im TDS 100 gemessen und erfaßt.

Die Traktions- und Bordleistung werden aus den dazugehörigen Strömen und Spannungen berechnet. Mit Hilfe von Shunts bzw. Hall-Wandlern erfolgt die Umwandlung der Ströme in proportionale Spannungen. Spannungsteiler passen die Spannungen der Traktionsbatterien an einen im TDS vorhandenen Bereich an. Das TDS mißt die Spannungen unter Berücksichtigung der Wandlerkoeffizienten. Aus den Meßwerten für die Ströme und Spannungen errechnet das TDS in Echtzeit die Traktions- und Bordleistung.

Die Ladeleistung aus dem Netz und die Antriebsleistung werden vom TDS aus Traktions- und Bordleistung berechnet. Alle Fahrzeuge besitzen einen Losfahrschutz. Dieser gewährleistet, daß sich Laden aus dem Netz und Fahren ausschließen.

Für die Berechnung der spezifischen Energieverbräuche und zur Charakterisierung der Nutzungsarten ist die Erfassung des gefahrenen Weges notwendig. Die Tachometer der Fahrzeuge liefern elektrische Signale, deren Frequenzen der Geschwindigkeit proportional sind. Die Messung der Frequenzen erfolgt vom TDS unter Berücksichtigung der Proportionalitätsfaktoren.

Zusätzlich zu den bisher erläuterten Signalen ist die Erfassung einiger Zustandssignale, die als binäre Signale im Fahrzeug erzeugt werden, erforderlich. Solche Zustände sind z.B.:

- Fahrschalter (Klemme 15) ein/aus
- Batterie voll/nicht voll
- Innenraumheizung ein/aus und
- Losfahrschutz ein/aus.

Das TDS ist für die Erfassung von zeitabhängigen Signalen an Elektrofahrzeugen sehr gut geeignet, weil

- es die erforderlichen Meßkanäle besitzt
- eine ausreichende Genauigkeit aufweist
- die Meßabtastrate in großen Bereichen wählbar ist und
- die Leistung on-board immer mit einer Abtastrate von 500 Hz berechnet wird sowie
- für alle Kanäle über das Meßintervall der Mittelwert, der Maximalwert, der Minimalwert, die Varianz und/oder ein Stützwert gespeichert werden können.

Das TDS enthält folgende Erfassungskanäle:

- 6 Analogkanäle für die Messung von Spannungen und in Verbindung mit Sensoren auch für Ströme und Temperaturen
- 3 Counterkanäle zur Frequenzmessung
- 8 Digitalkanäle zur Erfassung von Zustandssignalen
- 3 virtuelle Leistungskanäle für die Leistungsmessung und
- 1 Statuskanal für die Überwachung der Digitalkanäle.

Zur Realisierung der Aufgabenstellung für die Klassierung waren keine Hardwareänderungen erforderlich. In die Klassiersoftware sollten folgende Eigenschaften aufgenommen werden, die im Rahmen der Entwicklung auch verwirklicht wurden:

- programmierbare Klassier- und Protokollzeit
- Berechnung neuer Signale aus den Meßkanälen (Rechenkanäle)
- Summation/Integration abgetasteter Meßsignale unter vorgegebenen Bedingungen (Zählkanäle)
- Summation/Integration über Meß- oder Rechenkanäle bzw. der Klassierzeit unter vorgegebenen Bedingungen
- eindimensionale Klassierung über einen Meß- oder Rechenkanal bzw. die Zeit unter vorgegebenen Bedingungen und
- zweidimensionale Klassierung über zwei Kanäle unter vorgegebenen Bedingungen.

Als Bedingungen können Vergleichsoperationen mit den Signalen (z.B. Signalwert $<=>$ vorgegebener Wert) und logische Verknüpfungen dieser Vergleichsoperationen benutzt werden. Bei den ein- und zweidimensionalen Klassierungen steht als zusätzlicher Kanal die aktuelle Tageszeit zur Verfügung.

Die Klassierzeit (zeitlicher Abstand zwischen zwei Klassierzeitpunkten) wurde allgemein auf 1 s gesetzt und die Protokollzeit (Abstand zwischen zwei Speicherungen aller Werte) betrug generell 24 h, so daß Tagesprotokolle entstanden.

Die Rechenkanäle dienen dazu, neue Signale für die Klassierung zu generieren, wie z.B. durch Summation von Traktions- und Bordleistung für die Klassierung der Lade- und Antriebsleistung.

Zählkanäle sind Hilfskanäle, mit denen Integrationen bis zum Erreichen der Klassierbedingungen durchgeführt werden können. Z.B. ist es für die Klassierung der Energie einer Fahrt erforderlich, die Antriebsleistung bis zum Ende der Fahrt zu integrieren, dann die entsprechende Klasse um 1 zu erhöhen und den Zählkanal zurückzusetzen.

Mit Hilfe der Kanäle zur Summation/Integration werden alle über den Tag integrierten Werte, wie z. B. die gefahrene Strecke pro Tag oder der Energieverbrauch des Fahrzeugs, erfaßt.

Die ein- und zweidimensionalen Klassierkanäle dienen zur Bildung und Erfassung von Häufigkeitsverteilungen. Der zu klassierende Signalbereich von Meß-, Rechen- und Zählkanälen sowie die Anzahl der Klassen ist dafür wählbar. Am Ende der Klassierzeit wird geprüft, ob die Klassierbedingungen erfüllt sind und wenn ja, wird der Klassenzähler um 1 erhöht.

Das TDS gestattete in Verbindung mit der Klassiersoftware, alle in der Meßdatenvereinbarung vorgesehenen Größen (Energien, Wege, Zeiten, Verteilungen), wie sie unter Punkt 12.3 erläutert werden, zu erfassen.

12.3. Meßdatenerfassung

12.3.1. Messung zeitabhängiger Signale

Die meßtechnische Konfigurierung der Elektrofahrzeuge und ihre Überprüfung ist eine wichtige Voraussetzung für die Erfassung klassierter Daten. Obgleich die Meßdatenerfassung für alle Fahrzeuge nach der einheitlichen unter Punkt 12.2 dargelegten Konzeption erfolgte, ergaben sich sehr unterschiedliche meßtechnische Ausrüstungen der Fahrzeuge. In Tabelle 3.1 sind die Meßkanäle der verschiedenen Fahrzeugtypen angegeben. Zusätzlich unterscheidet sich die verwendete Sensorik, so daß für Kanäle, die mit der gleichen Größe belegt sind, verschiedene Wandlerfaktoren einzustellen sind. Solche voneinander abweichenden Kanäle sind:

- Traktionsspannung
- Traktionsstrom
- Bordstrom und
- Geschwindigkeit.

Alle für die Messung zeitabhängiger Signale notwendigen Informationen, wie Kanalbelegungen, Meßbereiche, Abtastrate u.a. werden mit Hilfe eines Laptops und der TDS.EXE über die RS232-Schnittstelle eingestellt. Die Einstelldaten können als SET-File gespeichert und in andere gleichartige Fahrzeuge eingelesen werden. Die 7 verschiedenen Fahrzeugtypen erforderten 13 SET-Files, weil für einige Fahrzeugtypen 2 bis 3 Varianten von Meßkonfigurationen zu berücksichtigen waren. Während der Projektzeit waren außerdem mehrere Änderungen an den SET-Files notwendig, weil Fehler zu korrigieren waren und sich Komponenten geändert hatten.

Das TDS besitzt die günstige Eigenschaft, daß die Erfassung zeitabhängiger Signale und die Klassierung gleichzeitig gestartet sein können und parallel ablaufen. Dadurch war es möglich, die Klassierung ohne Einbau eines zweiten Gerätes zu überprüfen.

Außer zur Überprüfung der Klassiersoftware während ihrer Entwicklung wurden Signalverläufe aufgenommen, um Fehler in der Hard- und Software zu ermitteln.

Bild 3.1 zeigt ein Beispiel für die Aufzeichnung einiger wichtiger Signale des Elektrofahrzeugs. Nach dem Stoppen des Meßvorgangs im TDS können die Daten zweckmäßigerverweise mit einem Laptop über eine RS232-Schnittstelle ausgelesen werden. Es entstehen dabei zwei Dateien im Format des Signalanalyseprogramms DIA-PC der Fa. GfS Aachen. Mit Hilfe dieses Programms erfolgte die Off-line-Analyse der Signale.

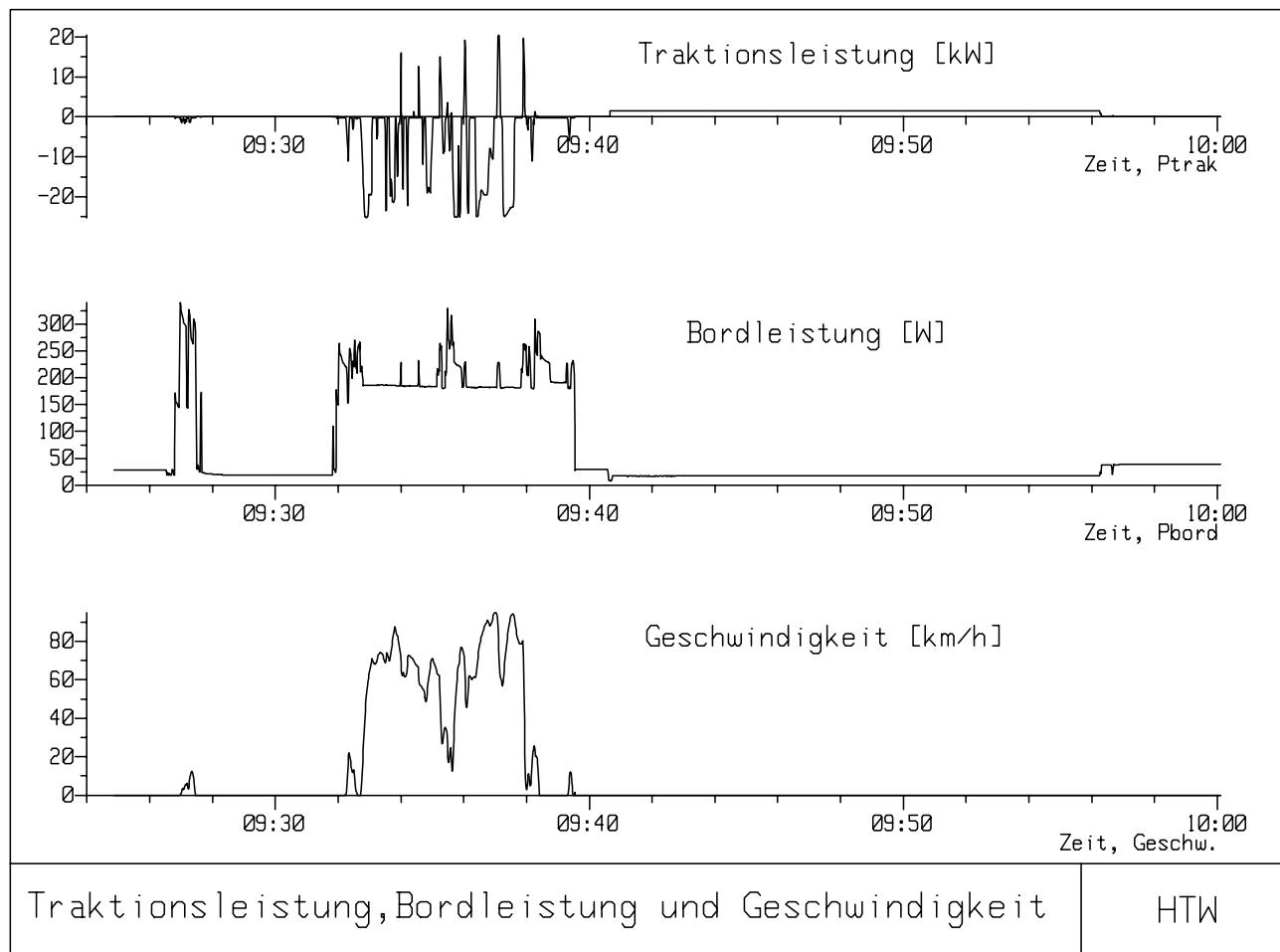


Bild 3.1: Ausgewählte Meßsignale eines Beispieldfahrzeugs

Die Integration über die Summe der Traktions- und Bordleistung im Zeitintervall der Fahrt ergibt z.B. die Antriebsenergie einschließlich der Rekuperation. Wird die Integration über die Summe im gleichen Zeitintervall unter der Bedingung durchgeführt, daß die Signalamplitude positiv ist ($P_{trak} > 0$), so erhält man die rekuperierte Bremsenergie. In entsprechender Weise erfolgte die Off-line-Berechnung wichtiger Größen und der Vergleich mit Ergebnissen aus der Klassierung.

Der zur Verfügung stehende Arbeitsspeicher für die Meßdaten beträgt ca. 850 kByte. Damit ist die Aufnahme von Signalverläufen, je nach Anzahl der Meßkanäle und der Intervallzeiten, über die Zeit von 1 bis 2 Tagen möglich.

Fahrzeugtyp	BMW B01...B07 NaNiCl	BMW B08 NiCd	MB 190 M09...M11 NiCd	MB 190 M12...M18 NaNiCl	MB 100 T19...T26 NaNiCl	MB 100 T27...T28 NiCd
Analogkanal 1	Tractionsspannung	Tractionsspannung	Tractionsspannung	Tractionsspannung	Tractionsspannung	Tractionsspannung
Analogkanal 2	Traktionsstrom	Traktionsstrom	Traktionsstrom	Traktionsstrom	Traktionsstrom	Traktionsstrom
Analogkanal 3	Bordstrom	Bordstrom	Bordstrom 1	Bordstrom	Bordstrom	Bordstrom
Analogkanal 4	Außentemperatur	Außentemperatur	Außentemperatur	Außentemperatur	Außentemperatur	Außentemperatur
Analogkanal 5	Batterietemperatur (nur B07)		Bordstrom 2			
Analogkanal 6	Strom für Heizung					
Leistungskanal1 (L1)	Traktionsleistung (L1=A1 * A2)					
Leistungskanal2 (L2)	Bordleistung (L2=A1*A3)	Bordleistung (L2=A1*A3)	Bordleistung 1 (L2=A1*A3)	Bordleistung (L2=A1*A3)	Bordleistung (L2=A1*A3)	Bordleistung (L2=A1*A3)
Leistungskanal3 (L3)	Heizleistung (L3=A1*A6)	Heizleistung (L3=A1*A6)	Bordleistung 2 (L3=A1*A5)			
Counterkanal 1	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit
Counterkanal 2	Netzleistung	Netzleistung	Netzleistung	Netzleistung	Netzleistung	Netzleistung
Counterkanal 3	Leistung für Batterie- heizung		Standheizung	Standheizung	Leistung für Batte- rieheizung	
Digitalkanal 1	Klemme 15					
Digitalkanal 2			Batterievoll	Laden	Losfahrschutz	Losfahrschutz
Digitalkanal 3	Losfahrschutz	Losfahrschutz		Batterielüfter 1	Laden	Batterievoll
Digitalkanal 4	Ladeende/Batterievoll	Batterievoll	Batterielüfter 1	Batterielüfter 2		
Digitalkanal 5	Heizung	Heizung	Batterielüfter 2 u. 3		Heizung	Heizung
Digitalkanal 6	Frequenzsignal für Laden	Frequenzsignal für Laden		Leistung für Batte- rieheizung		
Digitalkanal 7						
Digitalkanal 8						

Tabelle 3.1 Blatt 1: Meßkanäle von BMW, MB 190 und MB 100

Fahrzeugtyp	NEOPLAN	OPEL	OPEL	GOLF	VW T4
Fahrzg.-Nr	N29...N31	O32...O36	O37...O41	V42...V50	C51...C60
Batterie	NaS	NaNiCl	NiCd		NiCd
Analogkanal 1 (A1)	Tractionsspannung	Tractionsspannung 1	Tractionsspannung	Tractionsspannung	Tractionsspannung
Analogkanal 2 (A2)	Traktionsstrom	Traktionsstrom	Traktionsstrom	Traktionsstrom	Traktionsstrom
Analogkanal 3 (A3)	Bordstrom	Bordstrom	Bordstrom	Bordstrom	Bordstrom
Analogkanal 4 (A4)	Außentemperatur	Außentemperatur	Außentemperatur	Außentemperatur	Außentemperatur
Analogkanal 5 (A5)		Tractionsspannung 2			
Analogkanal 6 (A6)		Bordspannung	Bordspannung	Bordspannung	Bordspannung
Leistungskanal 1 (L1)	Traktionsleistung (L1=A1*A2)	Traktionsleistung 1 (L1=A1*A2)	Traktionsleistung (L1=A1*A2)	Traktionsleistung (L1=A1*A2)	Traktionsleistung (L1=A1*A2)
Leistungskanal 2 (L2)	Bordleistung (L2=A1*A3)	Bordleistung (L2=A3*A6)	Bordleistung (L2=A3*A6)	Bordleistung (L2=A3*A6)	Bordleistung (L2=A3*A6)
Leistungskanal 3 (L3)		Traktionsleistung 2 (L3=A5*A2)			
Counterkanal 1	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit	Geschwindigkeit
Counterkanal 2	Netzleistung	Netzleistung	Netzleistung	Netzleistung	Netzleistung
Counterkanal 3		Eingangsleistung des Ladewandlers		Batterieheizleistg. (bei NaNiCl-Batt.)	
Digitalkanal 1	Klemme 15	Klemme 15	Klemme 15	Klemme 15	Klemme 15
Digitalkanal 2	Losfahrschutz	Laden	Batterievoll		
Digitalkanal 3	Batterieheizung 3	Losfahrschutz	Batterieheizung	Laden	
Digitalkanal 4	Batterieheizung 1				Ladeende
Digitalkanal 5	Batterieheizung 2			Heizung	Heizung
Digitalkanal 6		Batterielüfter hinten	Batterielüfter		
Digitalkanal 7		Batterielüfter vorn			
Digitalkanal 8		Heizung	Heizung	Frequenzsignal für Laden	

Tabelle 3.1 Blatt 2: Meßkanäle von NEOPLAN-Bussen, Opel, VW

12.3.2. Erfassung integrierter und klassierter Meßdaten

Die allgemeine Meßdatenerfassung erfolgte mit Hilfe der Klassiersoftware des TDS (CLASS.EXE). Um die Klassierung starten zu können, ist vorher eine entsprechende Konfigurierung der Kanäle, deren Arten unter Punkt 12.2 erläutert wurden, notwendig (CSE-File). Die unterschiedlichen Fahrzeugvarianten erforderten hierfür 16 CSE-Files, die ebenfalls während des Versuches mehrere Veränderungen erfahren haben.

Für die weiteren Ausführungen ist es notwendig, einige Begriffe eindeutig zu definieren.

Tagesprotokoll

Das Tagesprotokoll enthält alle vom TDS gemessenen und berechneten Klassierdaten eines Tages. Ein Tag dauert 24 Stunden, beginnt nachts 3:00:00 Uhr und wird im TDS gespeichert. Die gespeicherten Tagesprotokolle können kurzfristig oder in größeren Zeitabständen ausgelesen werden.

Ladung

Die Ladung bezieht sich auf die Traktionsbatterie. Eine Ladung beginnt, wenn die der Traktionsbatterie zugeführte Leistung eine vorgegebene Grenze übersteigt und sich das Fahrzeug nicht bewegt, es sich also nicht um rekuperierte Bremsenergie handeln kann. Beendet ist die Ladung, wenn die Bedingungen nicht mehr erfüllt sind. Das kann durch den Abbruch der Ladung (Netzstecker gezogen) oder durch Erreichen des Zustandes "Batterie voll" erfolgen.

Ladeende

Als Ladeende wird das Beenden der Ladung durch den Zustand "Batterie voll geladen" bezeichnet. Ein Abbruch der Ladung vom Nutzer durch Ziehen des Netzsteckers gilt nicht als Ladeende. Im Tagesprotokoll sind Ladeendewerte solche Werte, die bis zum letzten Ladeende des Tages ermittelt wurden.

Fahrt

Eine Fahrt beginnt mit dem Einschalten des Fahrschalters (Klemme 15 "ein"), unter der Bedingung, daß nicht aus dem Netz geladen wird. Sie endet durch den Beginn eines Standvorgangs. Eine gefahrene Strecke ohne eingeschaltete Klemme 15 wird bei den integrierten Weggrößen berücksichtigt aber nicht bei den Klassierungen "Weg einer Fahrt" und "Weg bis zur nächsten Ladung".

Bewegungszeit

Eine Bewegungszeit beginnt jeweils während der Fahrt, wenn die Geschwindigkeit größer Null ist und endet, wenn sie gleich Null wird.

Haltezeit

Mit Haltezeit werden Zeitintervalle während der Fahrt bezeichnet, in denen die Geschwindigkeit ununterbrochen gleich Null ist.

Stand

Ein Stand beginnt mit dem Ausschalten der Klemme 15 (Ende einer Fahrt) oder dem Ende einer Ladung. Das Ende eines Standvorgangs liegt vor, wenn eine Fahrt oder eine Ladung beginnt.

Das Meßprogramm (CSE-File) bestimmt, welche Größen unter welchen Bedingungen erfaßt, jeweils über den Tag integriert oder als Häufigkeitsverteilungen on-board ermittelt und als Tagesdateien (Tagesprotokolle) gespeichert werden. Neben den Tagesdaten enthalten die Dateien Werte, die bis zum letzten Ladeende eines Tages integriert wurden. Diese sogenannten Ladeendewerte dienen zur Ermittlung der kurzfristigen Energiebilanz für das Fahrzeug.

Die im Rahmen der Klassierung erfaßten Werte und Verteilungen sind in den Tabellen 3.2.1 und 3.2.2 aufgeführt. Alle für die Energiebilanz relevanten Größen sind zusätzlich als Ladeendewerte vorhanden.

Für die Ermittlung der Netzenergie, der Heizenergie aus dem Netz, des Weges sowie der Zeit sind keine Bedingungen erforderlich. Sie werden über den ganzen Tag bzw. bis zum letzten Ladeende des Tages integriert. Bei allen anderen Größen erfolgt die Integration unter der Voraussetzung, daß eine oder mehrere logisch verknüpfte Bedingungen erfüllt sind. So wird z.B. der Antriebsweg durch Integration der Geschwindigkeit nur dann ermittelt, wenn die Antriebsleistung die vorgegebene Offsetgrenze unterschreitet.

Von den eindimensionalen Häufigkeitsverteilungen enthält nur die Klassierung der Tagestemperatur keine Bedingungen. Bei allen anderen Verteilungen erfolgt die Zählung in der Signalklasse nur, wenn die logischen Bedingungen erfüllt sind. In der Verteilung "Beginn einer Fahrt" erfolgt die Zählung in der Tageszeitklasse z.B. nur, wenn der Fahrdauerzähler = 3 und die Klemme 15 eingeschaltet ist.

Für die richtige Klassierung der Meßdaten sind die Bedingungen von sehr entscheidender Bedeutung. Wegen auftretender Störimpulse, war z.B. die Bedingung Fahrdauerzähler = 1 durch die Bedingung Fahrdauerzähler = 3 zu ersetzen. Da es sich um Sekundenwerte handelt entsteht dadurch ein Fehler von 3 Sekunden in den davon abhängigen Klassierungen.

In Kanälen, die als Bedingungen Leistungswerte des TDS enthalten, sind die dazugehörigen fahrzeugabhängigen Offsetgrenzen zu beachten.

Besonders unterscheiden sich die Fahrzeuge hinsichtlich der Kanäle "Ladedauer" und "Ladeende". Da der Zustand "Ladeende" für die Bildung kurzfristiger Energiebilanzen von großer Bedeutung ist, war für die richtige Erkennung dieses Zustandes eine sorgfältige Erprobung notwendig. In der Regel stand dafür kein eindeutiges binäres Signal zur Verfügung.

Der Energiefluß in die Traktionsbatterie und in das Bordnetz hinein ist positiv definiert. Die Ladeleistung und die rekuperierte Bremsleistung sind damit positiv, weil sie aus der Summe von Traktions- und Bordleistung berechnet werden. Die Antriebsleistung wird demzufolge negativ.

Zwischen einigen Größen der Tabelle 3.2.1 bestehen folgende Beziehungen:

Energieaufnahme = Ladeenergie + Ladeenergie aus der Rekuperation

Weg = Antriebsweg + Rollweg + Bremsweg

Zeit = Ladezeit + Fahrzeit + Standzeit

Mit den in den Tabellen 3.2.1 und 3.2.2 aufgeführten Größen werden alle für die Energiebilanz und die Charakterisierung der Nutzungsart erforderlichen Größen berechnet.

	Bezeichnung	Bedeutung
Energieaufnahme	Eaufn	Integration über die Traktionsleistung, Stromrichtung positiv, während der Ladung muß die Traktionsleistung größer als die Offsetgrenze sein
Energieabgabe	Eabg	Integration über die Traktionsleistung, Stromrichtung negativ, während des Standes muß die Traktionsleistung kleiner als die Offsetgrenze sein
Ladeenergie bei Rekuperation	Eladruect	Energieaufnahme der Traktionsbatterie während der Fahrt (Rekuperationsenergie)
Energie nach dem Ladewandler	Eladnetz	Integration der Summe von Traktionsleistung und Bordleistung während der Ladung
Netzenergie	Enetz	Energieaufnahme aus dem Netz
Bremsenergie	Ebrems	Integration über positive Werte der Summe von Traktionsleistung und Bordleistung während der Fahrt
Antriebsenergie	Eantr	Integration über negative Werte der Summe von Traktionsleistung und Bordleistung während der Fahrt
Bordenergie	Ebord	Integration der Bordleistung. Während des Standes wird nur außerhalb der Offsetgrenze integriert
Ladeenergie	Elad0	Ladeenergie aus dem Netz
Teil der Bordenergie	Ebordb	Energieaufnahme des Bordnetzes aus der Traktionsbatterie während der Fahrt
Weg	Weg	Gesamte gefahrene Wegstrecke
Antriebsweg	Wgantr	Wegstrecke mit negativer, außerhalb der Offsetgrenze liegender Antriebsleistung
Rollweg	Wgroll	Wegstrecke ohne Antriebsleistung und ohne Bremsen, die Leistung liegt innerhalb des Offsetfensters
Bremsweg	Wgbrems	Wegstrecke mit positiver, außerhalb der Offsetgrenze liegender Antriebsleistung, d.h. Rückspeisung
Ladezeit	Ladezt	Zeit des Tages, in der das Fahrzeug geladen wird und die Traktionsleistung größer als die Offsetgrenze ist
Standzeit	Standzt	Zeit des Tages, in der das Fahrzeug steht und nicht geladen wird
Fahrzeit	Fahrzt	Zeit des Tages, in der Klemme 15 „ein“ ist und nicht geladen wird
mittlere Beschleunigung	Mitbp	Summation über die Beschleunigungsmeßwerte
Zeit	Zeit	Zeit des Tages (Protokolltag), in der das TDS mit Energie versorgt wird
Positiver Traktionsstrom	Ahple	Integrierter Strom in die Traktionsbatterie bis zum letzten Ladeende in Ah, Traktionsleistung muß größer als die Offsetgrenze sein
Negativer Traktionsstrom	Ahnle	Integrierter Strom aus der Traktionsbatterie bis zum letzten Ladeende in Ah, Traktionsleistung muß kleiner als die Offsetgrenze sein
Ladeenergie der Batterie bei Schnellladung	Eladqu	Integration über die Traktionsleistung bei Schnellladung
Ladeenergie von Batterie und Bordnetz bei der Schnellladung	Eldntzqu	Integration der Summe von Traktions- und Bordleistung bei der Schnellladung
Ladedauer 2	Laded2	Summe der Zeit für die Nachladungen bei NiCd-Batterien
Batterieheizung	Ebahz	Energie zur Heizung der Traktionsbatterie bei NaNiCl- oder NaS-Batterien
Heizung	Heizg	Einschaltzeitdauer der Fahrzeugheizung

Tabelle 3.2.1: Integrierte Größen

	Bezeichnung	Bedeutung
--	-------------	-----------

Ladebeginn	BgeLadg	Häufigkeit des Beginns einer Ladung in Abhängigkeit der Tageszeit, 24 Klassen zu je 1 Stunde
Standbeginn	BgeStand	Häufigkeit des Beginns eines Standvorgangs in Abhängigkeit der Tageszeit, 24 Klassen zu je 1 Stunde
Fahrtbeginn	BgeFahrt	Häufigkeit des Beginns einer Fahrt in Abhängigkeit der Tageszeit, 24 Klassen zu je 1 Stunde
Ladende	Ldende	Häufigkeit des Ladeende in Abhängigkeit der Tageszeit, 24 Klassen zu je 1 Stunde
Laden	Laden	Anzahl von Sekunden in jeder Stunde des Tages, in denen geladen wird, 24 Klassen zu je 1 Stunde
Fahren	Fahren	Anzahl von Sekunden in jeder Stunde des Tages, in denen gefahren wird, 24 Klassen zu je 1 Stunde
Stehen	Stehen	Anzahl von Sekunden in jeder Stunde des Tages, in denen das Fahrzeug steht, 24 Klassen zu je 1 Stunde
Haltezeit	Haltezt	Klassiert die Haltezeiten während einer Fahrt, 30 Klassen zu je 120 Sekunden
Bewegungszeit	Bewzt	Klassiert die Zeiten während einer Fahrt, in denen sich das Fahrzeug ununterbrochen bewegt, 30 Klassen zu je 120 Sekunden
Fahrtzeit	Fahrtz	Klassiert die Gesamtzeit einer Fahrt, 30 Klassen zu je 240 Sekunden
Ladedauer	Laded	Klassiert die Ladedauer ohne Nachladungen, 24 Klassen zu je 1 Stunde
Ladedauer einer Schnellladung	Ladedqu	Klassiert die Ladedauer von Schnellladungen, 24 Klassen zu je 1 Stunde
Standdauer	Standd	Klassiert die Standdauer, 24 Klassen zu je 1 Stunde
Geschwindigkeit	Geschw	Klassiert die Geschwindigkeit im Bereich von 0...150 km/h, 30 Klassen zu je 5 km/h
Beschleunigung	Beschl	Klassiert die Beschleunigung, 20 Klassen zu je 0,28 m/s*s
Weg einer Fahrt	WgeFahrt	Klassiert den Weg einer Fahrt, 30 Klassen zu je 5 km
Weg bis Ladung	WgbLadg	Klassiert den Weg bis zur nächsten Ladung, 30 Klassen zu je 5 km
Traktionsleistung	Ptrak	Klassiert die Traktionsleistung von -40 kW...40 kW, 40 Klassen zu je 2 kW
Energie einer Fahrt	Efahrt	Klassiert die Energie, die für eine Fahrt benötigt wird, 30 Klassen zu je 1 kWh
Energie einer Ladung	Elad	Klassiert die Energie einer Ladung, 30 Klassen zu je 1 kWh
Energie einer Schnellladung	Eladqu	Klassiert die Energie einer Schnellladung, 30 Klassen zu je 1 kWh
Außentemperatur	Ta	Klassiert die Außentemperatur von - 40 °C...+80 °C, 40 Klassen zu je 3 °C

Tabelle 3.2.2: Häufigkeitsverteilungen

12.3.3. Meßunsicherheit

12.3.3.1. Abschätzung der zu erwartenden Meßfehler

Die Meßunsicherheit der verschiedenen erfaßten Größen und Verteilungen hängt von den eingesetzten Meßgeräten und -wandlern, sowie von der Meßkonzeption ab. Die Fehlergrenzen für die verwendeten Meßgeräte und -wandler sind in Tabelle 3.3.1 aufgeführt.

Meßgerät/Sensor	relativer Fehler	sonstige Fehler
LVM - Leistungsmesser	+/- 1,5 %	+/- 5 Digits (1 Digit = 1W)
TDS 100	+/- 1,0 %	+/- 0,1% v. Endwert (EW)
Spannungsteiler/Shunts	+/- 1,0 %	
Tachosignal (nach StVZO)	+/- 4,0 %	
LEM-Wandler		Offset: 0,1 % v. EW Kalib- u. Nullpktfehler: 2,0 % v. EW Verstärkungsschwankung: 1%/20° K

Tabelle 3.3.1: Fehlergrenzen der verwendeten Meßgeräte und -wandler

Netzenergiemessung

An der Messung der Leistung aus dem Netz ist die Meßkette

- LVT 210 bzw. LVT 310 und
- TDS/Counterkanal

beteiligt. Im Counterkanal des TDS wird die Ausgangsfrequenz des LVM gemessen, indem die Impulse im vorgegebenen Zeitintervall von 1 s gezählt werden. Die Meßunsicherheit wird durch das LVM bestimmt und erhöht sich nicht durch die Frequenzmessung im TDS. Im TDS gehen keine Impulse verloren und die Zeitbasis ist durch den internen Quarztakt sehr genau.

Eine Ladung erfolgt mit etwa 3 kW. Für 12 kWh werden bei der NiCd-Batterie ca. 4 h benötigt. Die Leistung kann dabei mit einer Unsicherheit von +/-50 W (1.7%) behaftet sein. Die geladene Energie liegt möglicherweise im Bereich 12 +/- 0.2 kWh. Sinkt dagegen die Ladeleistung auf 100 W ab, kann die Unsicherheit dieser Leistung +/-6.5 W also 6.5% betragen.

Die Heizleistungen aus dem Netz für die NaNiCl₂-Batterien liegen zwischen 125 und 250 W. Der mögliche Fehler beträgt dann entsprechend 5.5 % bzw. 3.5 %.

Wegen einer einfacheren Drahtführung wird im Opel Astra statt der Heizleistung die Eingangsleistung des Ladewandlers gemessen, und die Heizleistung muß aus der Differenz von Netzleistung und Eingangsleistung des Ladewandlers berechnet werden. Die Batterie im Opel benötigt eine Heizleistung von 225 W. Damit ergeben sich folgende Werte:

Netzleistung: 3 kW +/- 50 W

Ladewandler-Eingangsleistung: 2.775 kW +/- 46.6 W

Heizleistung: 225 W +/- 97 W (+/- 43%)

Die Auswertungen unter Punkt 12.4.3.3 zeigen, daß die Heizenergiemessung aus dem Netz bei den Opelfahrzeugen relativ große Fehler aufweist.

Traktionsenergiemessung

In allen Fahrzeugen außer den Opel-Fahrzeugen mit NaNiCl_2 -Batterie werden zur Strom-Spannungs-Wandlung Shunts eingesetzt. Zur Spannungsmessung dienen, wie unter Punkt 12.2. erläutert, Spannungsteiler. Die Spannungs- und Stromwerte werden im TDS gemessen und für die Leistungsermittlung multipliziert. Unter Berücksichtigung der Meßketten ergeben sich folgende Meßunsicherheiten:

$$\text{Spannung: } U = U_S (1 +/ - 2\% \text{ v.W.} +/ - 0.1\% \text{ v.EW.})$$

$$\text{Strom: } I = I_S (1 +/ - 2\% \text{ v.W.} +/ - 0.1\% \text{ v.EW.})$$

Zur Abschätzung der möglichen Fehler sind sowohl die Sollwerte als auch die Meßbereichsendwerte erforderlich. Die auf den Meßbereichsendwert bezogenen Fehler sind absolute Fehler (Offset-Fehler).

Die Offset-Problematik soll an einem Beispiel verdeutlicht werden. Angenommen, das Fahrzeug ist mit einem Shunt 250 A/25 mV und einem Spannungsteiler 80:1 ausgerüstet. Die Nennspannung der Batterie soll 180 V betragen. Am TDS ergibt sich dann der 300 A Strombereich durch den im TDS vorhandenen 30 mV-Bereich. Für die Spannung erhält man einen 240 V-Bereich, weil am TDS der 3 V-Bereich eingestellt wird. Mit diesen Werten kann bei einer Leistung $P_S=0$ ($I_S=0$) durch den Strom-Offset eine Leistung von $+/- 54$ W vorgetäuscht werden. Durch Integration über einen ganzen Tag erhält man scheinbar eine Energie von 1.3 kWh. Es ist deshalb erforderlich, durch Einführung von Schranken, den Fehler durch den Offset des TDS zu reduzieren.

Nimmt man an, daß die Ladespannung der Batterie 200 V beträgt und mit etwa 3 kW geladen wird, sind infolge der oben genannten relativen und absoluten Fehler folgende Unsicherheiten möglich:

$$\text{Spannung: } 200 \text{ V} +/ - 4 \text{ V} +/ - 0.25 \text{ V}$$

$$\text{Strom: } 15 \text{ A} +/ - 0.3 \text{ A} +/ - 0.3 \text{ A}$$

$$\text{Leistung: } 3 \text{ kW} +/ - 0.064 \text{ kW} +/ - 0.120 \text{ kW}$$

$$3 \text{ kW} +/ - 0.184 \text{ kW (6.1 \%)} \\$$

Mit relativ großen Fehlern ist im ungünstigsten Fall bei der Ermittlung des Ladewandlerverlustes zu rechnen. Für eine Ladeleistung von 3 kW und einen Wirkungsgrad des Ladewandlers von 90% ist eine Netzeistung von 3.3 kW erforderlich. Die maximale Unsicherheit dafür beträgt 54.5 W. Durch die Differenzbildung der beiden großen Leistungen (vor dem Wandler 3,3 kW und hinter dem Wandler 3 kW) und den beiden möglichen Fehlern, 50 W beim LVM und ca. 180 W beim TDS, ergibt sich für den

Ladewandlerverlust : 300 W $+/- 230$ W. Die Meßergebnisse unter Punkt 12.4. werden zeigen, daß so große Fehler nur selten auftreten.

Untersuchungen an den Fahrzeugen zeigten, daß die Stromwandler in Verbindung mit dem TDS zu höheren Offsetwerten führen können. Um sicherzustellen, daß der vorgegebene Offset-Wert mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht überschritten wird, diente als Offset-Grenze allgemein das 2.5-fache, also 0.25% vom Bereichsendwert.

Im Opel Astra mit NaNiCl_2 -Batterie wird zur Traktionsstrommessung statt eines Shunts ein Hall-Wandler (LEM-Wandler) verwendet. Abgeleitet aus den technischen Daten der Wandler sind hierfür wesentlich größere Fehler zu erwarten. Für 60 K Temperaturdifferenz (Sommer/Winter) ist mit einem Fehler von 3% zu rechnen. Der absolute Gesamtfehler, der

beim Einsatz eines Shunts durch das TDS bestimmt wird (0,1% vom Endwert), kann sich durch den Kalibrier-/Nullpunktfehler des LEM-Wandlers auf 2.2% vom Endwert erhöhen.

Die für die einzelnen Fahrzeugtypen verwendeten Grenzwerte einschließlich der Shunt- und Meßbereiche sind in Tabelle 12.3.3.2 eingetragen.

Fahrzeugtyp	Shunt	Meßbereich des TDS 100	Offsetfehler des Stromes	Offsetfehler der Leistung
BMW	250 A / 25 mV	1000 A / 100 mV	2,5 A	450 W
MB 190 (NaNiCl)	200 A / 200 mV	300 A / 300 mV	0,75 A	130 W
MB 100E (NiCd)	400 A / 100 mV	400 A / 100 mV	1 A	240 W
NEOPLAN		400 A / 100 mV	1 A	144 W
OPEL (NiCd)	300 A / 150 mV	600 A / 300 mV	1,5 A	315 W
OPEL (NaNiCl)	300 A / 3 V	300 A / 3000 mV	0,75 A	216 W
GOLF (NiCd)	300 A / 100 mV	300 A / 100 mV	0,75 A	108 W
T4	300 A / 100 mV	300 A / 100 mV	0,75 A	171 W

Tabelle 3.3.2: Grenzwerte für Traktionsstrom und -leistung

Bis Mai 1995 nutzte der BMW die TDS-Einstellung 300 A/30 mV zur Strommessung. Danach erfolgte eine Umstellung auf den Bereich 1000 A/100 mV, weil unter Vollast der Maximalwert 300 A überschritten wird.

Bordenergiemessung

Die oben erläuterte Offset-Problematik gilt im gleichen Maße für die Messung der Bordleistung und -energie. Die in den verschiedenen Fahrzeugtypen eingesetzten Shunts und die in den Klassierkonfigurationen angewendeten Offset-Grenzen sind in Tabelle 12.3.3.3 angegeben.

Fahrzeugtyp	Shunt	Meßbereich des TDS 100	Offsetfehler des Stromes	Offset-Fehler der Leistung
BMW	20 A / 20 mV	30 A / 30 mV	0,075 A	13,5 W
MB 190(M13..M18)	10 A / 100 mV	10 A / 100 mV	0,025 A	4,0 W
MB 100E	10 A / 100 mV	10 A / 100 mV	0,025 A	4,3 W
Neoplan	20 A / 100 mV	60 A / 300 mV	0,15 A	21,6 W
Opel	100 A / 100 mV	100 A / 100 mV	0,25 A	3,0 W
Golf	60 A / 100 mV	60 A / 100 mV	0,15 A	1,8 W
VW T4	40 A / 100 mV	40 A / 100 mV	0,1 A	1,2 W

Tabelle 3.3.3: Grenzwerte für Bordstrom und -leistung

Geschwindigkeitsmessung

Wie unter Punkt 12.2 erläutert, liefern die Tachometer aller Fahrzeuge ein elektrisches Signal, dessen Frequenz der Geschwindigkeit proportional ist. Die dazugehörigen Wandlerkoeffizienten sind für die einzelnen Fahrzeugtypen unterschiedlich. Die Frequenzmessung erfolgt in der gleichen Weise wie bei der Netzenergiemessung im TDS. Da diese sehr genau ist, ergibt sich durch die Meßkette kein Zusatzfehler. Als Meßunsicherheit für die Geschwindigkeitsmessung gilt deshalb die Angabe für den Wandler.

Für die Größen Weg und Beschleunigung ist mit der gleichen Unsicherheit zu rechnen, weil durch die mathematischen Operationen, Integration und Differentiation, im TDS kein Zusatzfehler entsteht.

12.3.3.2. Vergleichsmessungen

Zur Klärung der Ursache für nicht plausible Meßdaten erfolgte eine Überprüfung der zu erwartenden Meßunsicherheit durch Vergleichsmessungen.

Netzleistung

Ein zusätzliches LVM 210 diente als Vergleichsmeßgerät für die Überprüfung der Netzenergiemessung an allen Fahrzeugen. Außerdem wurde ein Shunt in Verbindung mit einem Digitalvoltmeter für Vergleichsmessungen benutzt.

Traktions- und Bordleistung

Vergleichsmessungen bei der Traktions- und Bordleistung erfolgten ebenfalls mit einem Shunt oder verschiedenen Stromzangen und einem Digitalvoltmeter.

Weg

Die gefahrene Wegstrecke hat für die Berechnung der spezifischen Verbrauchswerte entscheidende Bedeutung. Zwei Prüfstrecken bildeten die Grundlage für die Überprüfung der Wegmessung. Auf der ebenen und geraden Verbindungsstraße von Binz nach Prora war ein Abschnitt von 684 m markiert, dessen Länge mit Hilfe eines mechanischen Wegmessers ermittelt worden war. Außerdem diente die Strecke von Zirkow über Prora und Binz nach Zirkow zur Überprüfung. Die Länge der Strecke wurde mit 22.5 km aus der Mittelung mehrerer Fahrzeugmessungen berechnet.

Wirkleistung

Die Ströme bei Netz- und Traktionsleistungsmessung sind nicht sinusförmig. Obgleich die technischen Daten des LVM bzw. LVT sinusförmige Signale voraussetzen, war aus dem Meßverfahren abzuleiten, daß die Geräte ohne wesentliche Erhöhung der Meßunsicherheit für die Elektrofahrzeugmessungen einsetzbar sind. Messungen mit einem Shunt und Digital-Oszilloskops bestätigten die Erwartungen. Die Überprüfung der Wirkleistung bei der Traktion erfolgte ebenfalls mit dem oszillografischen Verfahren und brachte auch ein positives Ergebnis.

12.4. Meßdatenauswertung

12.4.1. Vorbehandlung der Meßdaten

Das TDS 100 erzeugt täglich ein Datenprotokoll. Voraussetzung dafür ist, daß die Klassierung vorher gestartet wurde und das TDS von der Bordspannung versorgt wird. Fällt während der laufenden Messung am TDS die Versorgungsspannung aus, so ruht die Messung und die Klassierung. Da das TDS eine Stützbatterie enthält, bleiben die bis zum Ausfall der Versorgungsspannung gesammelten Daten und die Programmierung erhalten. Erhält das TDS wieder Versorgungsspannung, so werden die bis zum Ausfall gesammelten Daten in einem Protokoll gespeichert und ein neues Protokoll begonnen. Ein Zeitkanal läßt erkennen, ob an einem Tag eine solche Unterbrechung der Versorgung vorlag.

Mit Hilfe eines Laptops und der Klassiersoftware (CLASS.EXE) erfolgte das Auslesen der täglich abgespeicherten Protokolle aus dem TDS 100. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Auslesungen lag zwischen einem Tag und 3 Monaten. Damit enthalten die ausgelesenen Datensätze der Fahrzeuge 1 bis etwa 100 Tagesdateien.

Die dabei entstehenden Dateien erzeugt das TDS 100 im Format des Signalanalyse-Programmsystems DIA/DAGO. Dieses Programmsystem ist für die Analyse der zeitabhängigen Signalverläufe sehr gut geeignet. Für die weitere Verarbeitung der klassierten Meßdaten bietet aber ein Tabellenkalkulationsprogramm günstigere Funktionen. Da das DIA-Datenformat nicht direkt in ein Tabellenkalkulationsprogramm einlesbar ist, wurde ein Konvertierungsprogramm erarbeitet.

Ein weiteres Hilfsprogramm diente zum Einlesen der konvertierten Dateien aller Fahrzeuge eines Auslesezeitraums in ein Tabellenkalkulationsprogramm und zur Speicherung der Meßdaten in Dateien mit der Erweiterung .WK3. Dieses LOTUS-1-2-3-Format (ab 1.0) kann von vielen Tabellenkalkulations- und Statistikprogrammen (EXCEL 5.0, Quattro Pro 3.0, SYSTAT u.a.) gelesen werden.

Auf der Basis dieser Daten erfolgten im Laufe des Jahres 1995 Zwischenauswertungen, über deren Ergebnisse die Projektpartner informiert wurden.

Ein weiterer Arbeitsschritt bestand in der Zusammenfassung aller Daten eines Fahrzeugs für das Jahr 1995 in einer Datei. Eine solche Jahresdatei zu einem Fahrzeug, die als Ausgangsbasis für die weitere Auswertung dient, enthält mehrere Tabellen. Die Anzahl der Zeilen dieser Tabellen ergibt sich aus den für das Fahrzeug meßtechnisch erfaßten Nutzertagen, also für das Jahr 1995 maximal 365 Zeilen. Die Tabelle mit den aufsummierten Werten (Energien, Wege und Zeiten bis zum Tagesende sowie bis zum Erreichen des Landendes) enthält abhängig von der Fahrzeugkategorie ca. 45 Spalten. Weiterhin gibt es 20 Tabellen mit den eindimensionalen Häufigkeitsverteilungen, die je nach Anzahl der vorgegebenen Klassenzahl 29 bis 45 Spalten besitzen.

Die einzige erfaßte zweidimensionale Häufigkeitsverteilung (Traktionsleistung und Geschwindigkeit) wird gesondert in Dateien zusammengefaßt, weil sie für sich schon aus 30 Tabellen mit über 40 Spalten besteht. Die Auswertung dieser Daten ist nur für spezielle Untersuchungen vorgesehen.

Tabelle 4.1 zeigt für die verschiedenen Fahrzeugtypen die vorliegenden Tagesprotokolle von Nutzertagen (Fahrzeug betriebsbereit beim Nutzer, auch Standtage beim Nutzer enthalten) (vgl. auch Anhang A 1.3).

Fahrzeug-hersteller	Typ	Anzahl der Fzg.	Nutzertage	auswertbare Tagesprotokolle	%
BMW	3-er	8	1429	992	69
Mercedes Benz	MB 190	10	2582	1877	73
	MB 100E	10	2783	2049	74
Opel	Astra	10	2638	2189	83
VW	GOLF	9	2285	1937	85
	T4	10	2457	2296	93
NEOPLAN	Bus	3	228	111	49

Tabelle 4.1: Anzahl der auswertbaren Tagesprotokolle bezogen auf Nutzertage

Die Zahl der Tagesprotokolle ist geringer als die Zahl der Nutzertage, weil sowohl subjektive Fehler als auch objektive Ausfälle der Meßtechnik auftraten.

Die wichtigsten Ausfallursachen waren:

- defekte Sicherung im TDS
- Kommunikation mit dem TDS nicht möglich
- Speicherüberlauf durch nicht gelöschte Daten und
- nicht gestartete Klassierung.

Der Umfang aller 1995 ausgelesenen Daten beträgt ca. 526 Mbyte. Diese Daten hat die DAUG/Zirkow archiviert. Außerdem liegen sie als Kopie in der HTW Dresden vor.

Ein Tagesprotokoll enthält ohne die zweidimensionale Klassierung 640 Werte. Hätte man auf die Klassierung der Daten verzichtet und die Auswertung off-line durchgeführt, so wären Signalaufzeichnungen mit einer Abtastrate von 1 s erforderlich gewesen. Bei dieser Abtastrate von 1 s und 14 Meßkanälen wären 1.2 Mio. Meßwerte/Tag angefallen. Für das Jahr 1995 und alle Rügenfahrzeuge (14484 Tagesdateien) wären 17.4 Mrd. Meßwerte bzw. bei 2 Byte/Meßwert ca. 35 000 Mbyte für die Rügenflotte zu archivieren und zu verarbeiten gewesen.

12.4.2. Plausibilitätsprüfung der Meßdaten

Aus meßtechnischer Sicht gliederten sich die 60 Fahrzeuge des Rügenprojektes in 16 Gruppen. Für jede Gruppe waren 2 Setups, je 1 für Messung und Klassierung, erforderlich. Mit Setup wird das Meßprogramm bezeichnet, das in Verbindung mit dem Steuerprogramm des TDS für die Messung (TDS.EXE) und Klassierung (CLASS.EXE) die Skalierungen, sowie Meß- und Klassierbedingungen festlegt.

Die voneinander abweichenden Setups ergaben sich aus den unterschiedlichen technischen Bedingungen bei den Fahrzeugen. Die Fahrzeuge sind mit verschiedenen Batterien ausgerüstet, die verwendeten Teiler und Shunts unterscheiden sich, die Geschwindigkeitsgeber der einzelnen Fahrzeuggruppen besitzen verschiedene Skalierungsfaktoren und auch bei den digitalen Kanälen treten Unterschiede auf.

Wegen der sehr umfangreichen Zielstellung für die Meßdatenerfassung und der eingesetzten anspruchsvollen Meßtechnik waren große Anstrengungen der Fahrzeughersteller

und der HTW in Verbindung mit der DAUG/Zirkow erforderlich, um plausible Daten erhalten zu können.

Folgende Hauptprobleme traten bei der Meßdatenerfassung zusätzlich zu den oben erwähnten auf:

- die Netzleistungsimpulse fehlten oder waren nicht einwandfrei (LVM- bzw. LVT-Ausfall)
- die Leistungsmessung für die Batterieheizung fehlte oder funktionierte nicht einwandfrei (LVM)
- für die Erkennung des Zustandes "Batterie voll" war kein eindeutiges Signal vorhanden
- es traten Ausfälle von Analogkarten auf
- die Geschwindigkeitsimpulse fehlten oder waren nicht einwandfrei
- die vorgegebenen Offset-Grenzen wurden überschritten und
- es gab Fehler in den Setups.

Wegen der oben genannten Ausfälle und Fehler sind nicht alle Meßdaten in den vorbehandelten Tagesprotokollen einwandfrei und plausibel. Um aber alle brauchbaren Meßdaten verwerten zu können, mußte eine aufwendige Plausibilitätsprüfung und nachfolgende Streichung von fehlerhaften Werten durchgeführt werden.

Kriterien für die Plausibilitätsprüfung ergeben sich aus Abschätzungen für die Größenordnung aller erfaßten Daten und aus Beziehungen, die aus der Blockschaltung der Elektrofahrzeuge (Bild 2.1) abgeleitet werden können.

Die gemessene Netzenergie muß etwa gleich der Summe der Energieverbräuche in den Hauptfunktionsgruppen sein. Der Wirkungsgrad des ACDC - Wandlers liegt im Bereich 0.5-0.9. Der spezifische Antriebsverbrauch ist relativ konstant.

Sind bestimmte Werte falsch, können daraus abgeleitete Größen nicht ermittelt werden. Besondere Bedeutung hat die Wegstreckenmessung, weil bei einem nicht richtig gemessenen Weg alle darauf bezogenen Größen (spezifische Energieverbräuche) verfälscht werden.

Eine weitere wichtige Größe ist der Netzenergieverbrauch. Ist z. B. die gemessene Netzenergie = 0 (defekter Netzenergiezähler), so liegt der Verbrauch des Gesamtfahrzeugs nicht vor, und der spezifische Verbrauch sowie der Verlust und der Wirkungsgrad des ACDC-Wandlers können nicht berechnet werden. Besonders kritisch sind falsch gemessene Werte, die nicht so einfach wie ein Totalausfall zu erkennen sind, nur zeitweise auftreten und erst durch aufwendige Quervergleiche zu ermitteln sind.

Zur Bewertung des Versuches ist es notwendig, Mittelwerte für die verschiedenen wichtigen Größen aus den Tagesprotokollen zu berechnen. Um dabei systematische Fehler möglichst auszuschließen, müssen falsche Werte aus den Tabellen gestrichen werden. Bei der Streichung bzw. Mittelwertbildung ist zu berücksichtigen, daß Werte, die in Bilanzen einbezogen werden, sich auf die gleiche Grundgesamtheit beziehen. Die Plausibilitätsprüfung erforderte einen großen manuellen Aufwand, weil rechentechnische Hilfen nur wenig genutzt werden konnten.

12.4.3. Energiebilanzen

Energiebilanzen können als Mittelwerte über größere Zeitabschnitte oder aus den Ladeendewerten (Batterie voll) errechnet werden.

Das Meßprogramm gestattet es, den Gesamtverbrauch des Fahrzeugs und den Energieverbrauch für die einzelnen Funktionsgruppen des Elektrofahrzeugs

- ACDC-Wandler (on-board)
- Traktionsbatterie
- Antrieb und
- Bordnetz

zu bestimmen.

Für die Berechnung des Energieverbrauchs der einzelnen Funktionsgruppen werden Hilfsenergien (Batterieheizung und Lüfterverbrauch) ermittelt, die den entsprechenden Verbrauchern zugerechnet werden.

12.4.3.1. Netzenergieverbrauch der Fahrzeuge

Voraussetzung für die Berechnung des spezifischen Netzenergieverbrauchs ist, daß sowohl die Messung der Netzenergie als auch die des gefahrenen Weges plausible Werte liefert hat.

Selektiert man unter dieser Voraussetzung aus den Jahresdateien aller Fahrzeuge die Tageswerte für die Netzenergie und den gefahrenen Weg und summiert die so für gültig eingeschätzten Werte, so erhält man die ersten vier Spalten in Tabelle 4.3.1.

Es soll schon an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß die Anzahl der auswertbaren Tage in Tabelle 4.3.1 im allgemeinen größer ist, als in den Tabellen der folgenden Abschnitte 12.4.3.2 bis 12.4.3.5. Für die Tabelle 4.3.1 besteht nur die Forderung, daß die beiden Größen Weg und Netzenergie plausible Werte aufweisen. Für die Tabellen 4.3.4. bis 4.3.12 sind dagegen außer dem Weg auch plausible Werte für mehrere mit dem TDS gemessene energierelevante Größen erforderlich.

Fzg	Anzahl Tage	Netzenergie kWh	Weg km	Mittlerer Weg/Tag km/Tag	Mittlerer Spez. Verbrauch kWh/km	Weg(Fahrtenbuch) km
B01	200	2661,9	9877,0	49,4	0,270	0,191
B02	142	1565,3	5211,8	36,7	0,300	0,213
B03	22	309,7	1395,5	63,4	0,222	0,157
B04	49	658,3	1771,9	36,2	0,372	0,263
B05	84	1268,5	4039,0	48,1	0,314	0,223
B06	253	3077,7	11051,2	43,7	0,278	0,198
B07	128	2196,8	6538,0	51,1	0,336	0,214
B08	12	93,2	517,4	43,1	0,180	0,129
M09	25	139,4	396,7	15,9	0,351	0,237
M10	0					3893
M11	222	2298,5	6442,6	29,0	0,357	8299
M12	79	1237,1	3568,3	45,2	0,347	9925
M13	261	3720,3	8361,4	32,0	0,445	10672
M14	239	4089,9	10995,0	46,0	0,372	10666
M15	194	2522,2	6108,8	31,5	0,413	0,248
M16	246	10692,7	33080,8	134,5	0,323	0,275
M17	288	4578,9	11783,2	40,9	0,389	13616
M18	136	2906,0	8721,0	64,1	0,413	13871
T19	191	2608,4	3466,7	18,2	0,752	0,222
T20	0					4633
T21	238	4573,3	7159,0	30,1	0,639	12796
T22	269	3251,1	2966,6	11,0	1,096	8284
T23	84	1004,4	1021,4	12,2	0,983	3494
T24	145	2629,2	3220,0	22,2	0,817	4430
						8218

Fzg	Anzahl Tage	Netzenergie kWh	Weg km	Mittlerer Weg/Tag km/Tag	Mittlerer Spez. Verbrauch kWh/km	Weg(Fahrtenbuch) km
T25	202	6066,7	8756,7	43,4	0,693	11669
T26	122	878,5	481,8	3,9	1,823	2105
T27	5	49,1	26,2	5,2	1,874	3502
T28	99	834,9	865,5	8,7	0,965	2533
N30	0					2112
N31	7	373,2	430,0	61,4	0,868	8237
O32	116	1623,1	5694,6	49,1	0,285	12964
O33	160	2236,9	6982,7	43,6	0,320	11809
O34	225	3883,2	12322,2	54,8	0,315	17383
O35	298	4779,4	17795,6	59,7	0,269	21013
O36	198	2726,7	10540,9	53,2	0,259	13128
O37	70	850,2	2851,8	40,7	0,298	7383
O38	240	1969,4	6376,6	26,6	0,309	10921
O39	212	1591,8	5289,4	25,0	0,301	8137
O40	111	588,5	1747,4	15,7	0,337	4860
O41	157	2275,9	8481,2	54,0	0,268	14300
V42	272	4071,0	13770,2	50,6	0,296	16161
V43	226	3177,8	13825,1	61,2	0,230	15381
V44	121	638,3	2336,3	19,3	0,273	4951
V45	293	2524,4	6519,2	22,2	0,387	8051
V46						6770
V47	176	1874,0	5785,9	32,9	0,324	7210
V48	287	3673,3	10570,5	36,8	0,348	12968
V49	247	3231,7	13004,9	52,7	0,248	17409
V50	156	1584,2	4410,1	28,3	0,359	5744
C51	238	5834,1	13259,8	55,7	0,440	14088
C52	261	3487,2	4663,3	17,9	0,748	6457
C53	203	2945,5	6173,5	30,4	0,477	7099
C54	313	3868,2	5545,2	17,7	0,698	6485
C55	179	2433,5	3746,5	20,9	0,650	6997
C56	224	2023,0	2607,0	11,6	0,776	4651
C57	131	2076,2	3073,2	23,5	0,676	8464
C58	179	2911,0	6554,7	36,6	0,444	9473
C59	225	3758,4	7994,2	35,5	0,470	9622
C60	15	225,4	360,4	24,0	0,625	1452

Tabelle 4.3.1: Netzenergieerfassung aller Rügenfahrzeuge 1995

Für die Berechnung des spezifischen auf die Masse bezogenen Verbrauchs wurde bei allen Fahrzeugen das Leergewicht plus 80 kg angesetzt. Dieser Ansatz ist sicher für die Pkw bis auf wenige Ausnahmen richtig. Die Transporter, Kleinbusse und der NEOPLAN-Bus werden wahrscheinlich im Mittel etwas höher belastet gewesen sein.

Da es sich um Tageswerte und nicht um Ladeendewerte handelt, treten Fehler durch den unbekannten Zustand der Batterie auf. Bei deutlich weniger als 100 Erfassungstagen ist der spezifische Verbrauch mit einer steigenden Unsicherheit behaftet.

Zusammengefaßt ergeben sich für das Jahr 1995 folgende Werte:

Gesamtstrecke laut Fahrtenbücher : 570 788 km

davon meßtechnisch erfaßt : 360 536 km

ermittelter Energieverbrauch aus dem Netz : 139 148 kWh.

Damit gibt es für 63% der gefahrenen Gesamtstrecke auf Rügen (einschließlich Erprobungsfahrten) Meßdaten aus der Nutzung.

Die schnellladefähigen Fahrzeuge haben fahrzeugseitig 1408,2 kWh aus den Schnellladestationen in Zirkow und Bergen getankt. Mit dem Ansatz eines Wirkungsgrades von 0,9

wurde diese Energie auf die Netzseite hochgerechnet und bei den einzelnen Fahrzeugen berücksichtigt. Der Anteil der Schnellladung am Gesamtverbrauch beträgt etwa 1.1%.

Für den NEOPLAN-Bus gibt es nur 32 Tage, von denen Meßergebnisse zur Netzenergie vorliegen. Aus der Plausibilitätsbetrachtung geht aber hervor, daß die Werte der letzten 13 Tage fehlerhaft sind. Der Dreiphasen-Wechselstrom-Zähler hat wahrscheinlich eine Phase nicht gemessen, so daß die Werte zu klein sind. Deshalb erfolgte die Berechnung für eine repräsentative Woche. Aufgrund der wenigen vorhandenen Daten sind die Werte statistisch nicht abgesichert.

Abgesehen vom NEOPLAN-Bus ist es wegen der geringen Aussagekraft zweckmäßig, Fahrzeuge mit weniger als 70 auswertbaren Tagen aus der weiteren Betrachtung der Tabelle 4.3.1 herauszulassen. Aus der Spalte Weg/Tag ist abzulesen, daß die tägliche Wegstrecke der einzelnen Fahrzeuge sehr unterschiedlich ist. Der niedrigste Wert beträgt 3.9 km beim Transporter MB 100E (T26) und den maximalen Wert weist das Fahrzeug MB 190 (M16) auf. Außer bei Fahrzeugen mit Blei-Batterie hängt bei allen anderen Fahrzeugen der spezifische Verbrauch sehr wesentlich von der täglich gefahrenen Wegstrecke ab.

Für den Bus N29 liegen für 1995 keine Fahrleistungen vor (längere Reparaturen) und das Fahrzeug V46, VW Golf, wurde zur Erarbeitung und Überprüfung von Meßsetups in Dresden bei der HTW benutzt. Bei den weiteren Fahrzeugen ohne Meßwerte für den Verbrauch und den Weg (M10, T20, N30) war im Erfassungszeitraum der Netzenergiezähler defekt.

Unter obigen Voraussetzungen sind folgende Fahrzeuge am wirtschaftlichsten gefahren:

Fahrzeugtyp	Batterietyp	Weg [km/Tag]	Spezifischer Verbrauch [kWh/tkm]
BMW 3-er	NaNiCl ₂	49,4	0.191
MB 190	NiCd	29,0	0.241
	NaNiCl ₂	134,5	0.215
MB 100E	NiCd	8,7	0.351
	NaNiCl ₂	30,1	0.251
NEOPLAN	NaS	61,4	0.169
Opel Astra	NiCd	54,0	0.175
	NaNiCl ₂	53,2	0.176
VW Golf	NiCd	36,8	0.252
	NaNiCl ₂	61,2	0.169
	Pb-Gel	19,3	0.173
VW T4	NiCd	55,7	0.187

Tabelle 4.3.2: Fahrzeuge mit den niedrigsten mittleren Verbrauchswerten

In Tabelle 4.3.3 sind die Werte der einzelnen Fahrzeugtypen zusammengefaßt aufgeführt.

		BMW	MB 190	MB 100	NEOPLAN	OPEL	VW GOLF	VW T4	Summen Mittelwerte
Erfassungstage		890	1690	1355	7	1787	1778	1968	9475
Netzenergie	kWh	11831	32185	21895	373	22525	20775	29562	139148
Erfaßter Weg	km	40402	89458	27964	430	78082	70222	53978	360536
Mittlerer Weg	km/Tag	45,4	52,9	20,6	61,4	43,7	39,5	27,4	38,7
Spezifischer Verbrauch	kWh/km	0,293	0,360	0,783	0,868	0,285	0,296	0,548	
	kWh/tkm	0,204	0,240	0,306	0,169	0,194	0,210	0,233	

Tabelle 4.3.3: Netzenergieerfassung bezogen auf Fahrzeugtypen

12.4.3.2. Antriebsenergie und Rekuperation

Die spezifischen Verbrauchswerte für den Antrieb können sowohl aus den Tageswerten als auch aus den entsprechenden Werten bis Ladeende ermittelt werden. Bild 4.3.1 zeigt beispielhaft die Tageswerte der gemessenen Antriebsenergien in Abhängigkeit von den dazugehörigen gefahrenen Wegen für ein Fahrzeug Opel Astra mit NaNiCl_2 -Batterie. Im Bild 4.3.2 sind für das gleiche Fahrzeug die bis Ladeende aufgezeichneten Antriebsenergien und Wege dargestellt.

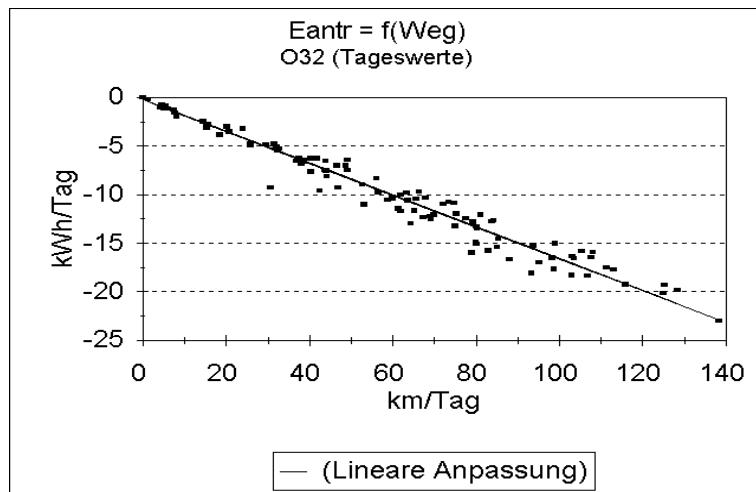


Bild 4.3.1: Antriebsenergie ohne Rekuperation (Tageswerte) O32

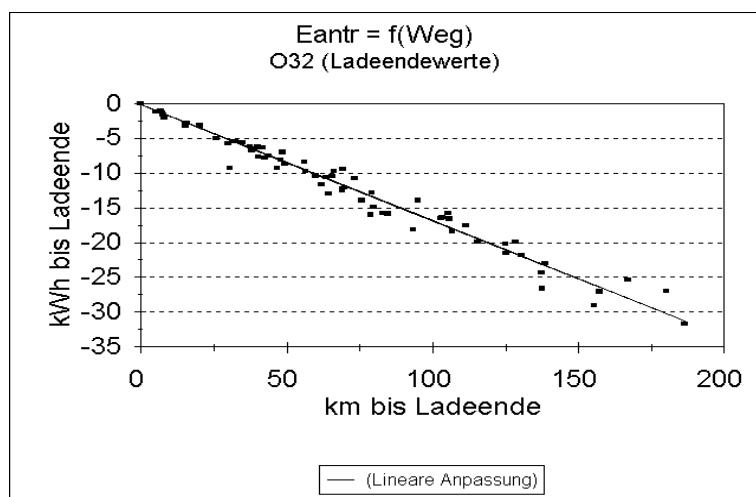


Bild 4.3.2: Antriebsenergie ohne Rekuperation (Ladeendewerte) O32

Die Steigungen der beiden Regressionsgeraden stimmen sehr genau überein. Daraus ergibt sich ein spezifischer Verbrauch für den Antrieb ohne Rekuperation von 0.166 kWh/km.

Zeichnet man die sich täglich ergebenden spezifischen Verbräuche in Abhängigkeit vom Weg in ein Diagramm, so ergibt sich Bild 4.3.3. Aus dieser Darstellung ist die Schwan-

kungsbreite des spezifischen Antriebsverbrauchs deutlicher zu erkennen. Die Standardabweichung für die dargestellten Stichprobendaten beträgt 0.025 kWh/km und damit auf den spezifischen Antriebsverbrauch bezogen 15%. Für die Spannweite erhält man $R = 0.240 - 0.131 = 0.109$ kWh/km, wenn man den weit abweichenden Wert nicht berücksichtigt. Die damit vorliegende Schwankung ist zu erwarten, weil die Zuladung beim Opel Astra bis zu 20% betragen kann. Dabei wird als Gesamtmasse das Leergewicht plus 80 kg (Fahrer) gerechnet. Außerdem rufen andere fahrdynamische Parameter Änderungen im spezifischen Antriebsverbrauch hervor.

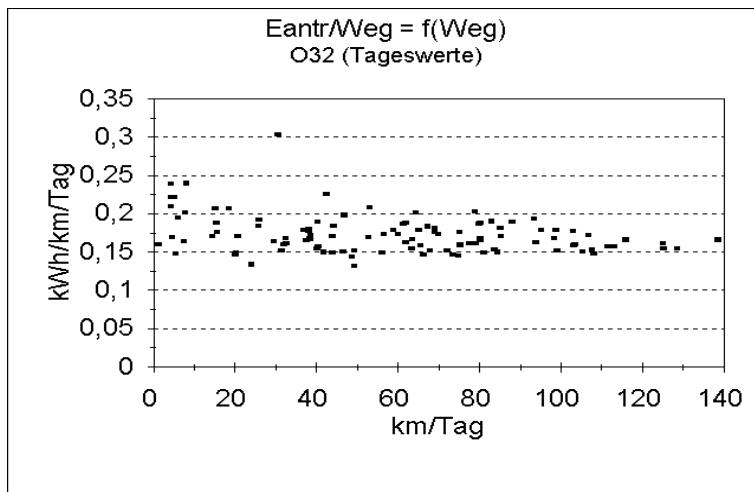


Bild 4.3.3.: Spezifische Antriebsenergie ohne Rekuperation (Tageswerte) O32

In gleicher Weise kann man die rekuperierten Bremsenergien in Abhängigkeit vom Weg in ein Diagramm zeichnen und eine lineare Regression durchführen. Das Ergebnis zeigt Bild 4.3.4.

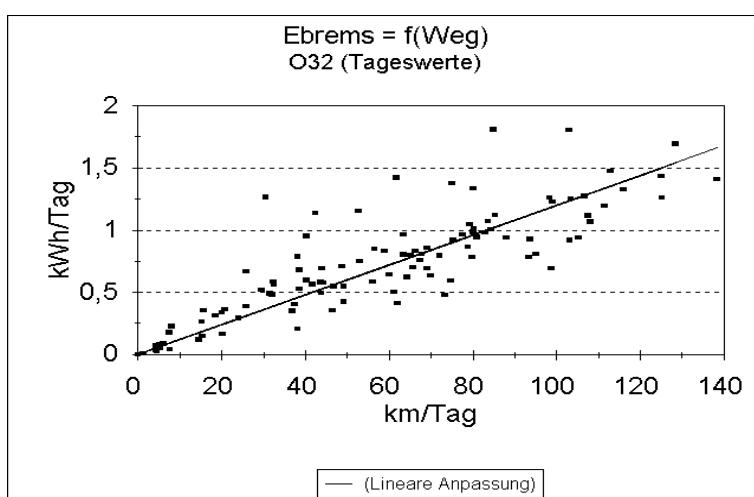


Bild 4.3.4: Rekuperierte Bremsenergie (Tageswerte) O32

Es ist deutlich zu erkennen, daß die Tageswerte der rekuperierten Bremsenergien eine wesentlich größere relative Streuung als die der Antriebsenergien aufweisen. Aus der Darstellung der Rekuperationsrate in Abhängigkeit vom Weg (Bild 4.3.5) ist abzulesen, daß die tägliche Rekuperationsrate bei dem Fahrzeug zwischen 2% und 14% lag. Die Rekuperation ist stärker durch Nutzungsparameter (Orts- oder Überlandfahrt) beeinflußt als die Antriebsenergie.

Unter Berücksichtigung der Rekuperation wird zur Berechnung der mittleren Motorenergie (Antriebsenergie einschließlich rekuperierte Bremsenergie) die oben dargestellte mittlere Antriebsenergie um die mittlere rekuperierte Bremsenergie verringert.

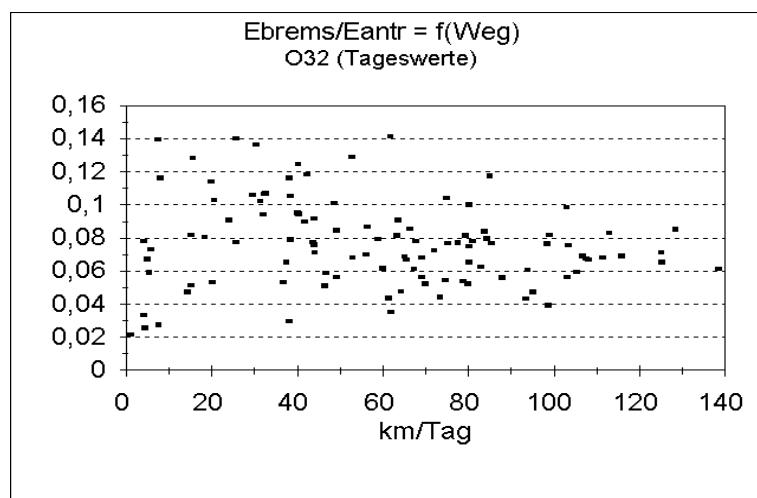


Bild 4.3.5: Rekuperationsrate (Tageswerte) O32

Die Fahrzeuge im Rügenversuch sind mit folgenden Motortypen ausgerüstet:

- permanent erregter Synchronmotor von UNIQ (BMW B01..B06,B08)
- Gleichstrom-Nebenschlußmotor von ABB (BMW B07)
- permanent erregter Synchronmotor von Siemens (MB 190 M09..M11)
- Asynchronmotor von AEG (MB 190 M12..M16,M18)
- Asynchronmotor von Bosch (MB190 M17)
- Gleichstrom-Nebenschlußmotor von ABB, 30 kW (MB 100E T19..T21T27,T28)
- Synchronmotor von MM-Larag (MB 100E T22)
- Asynchronmotor von ELIN (MB 100E T23..T26)
- Gleichstrom-Nebenschlußmotor von ABB, 25 kW (NEOPLAN)
- Asynchron-Drehstrom von Siemens, 24 kW (Opel Astra O32..O36)
- Asynchron-Drehstrom von Siemens, 26 kW (Opel Astra O37..O41)
- Synchronmotor von Siemens (VW Golf V42..V50)
- Asynchron-Drehstrom von ELIN (VW T4 C52..C60).

Die unterschiedlichen Motortypen konnten in der Meßdatenerfassung und -auswertung einheitlich behandelt werden.

In Tabelle 4.3.4 sind die erfaßten mittleren Verbrauchswerte des Antriebs für die Rügenfahrzeuge aufgeführt.

Fzg	Masse t	Anzahl Tage	Mittlerer Weg km/Tag	Antriebsenergie ohne Rekuperation kWh/km	Antriebsenergie mit Rekuperation kWh/km	Rekuperation %	Antriebsenergie mit Rekuperation kWh/tkm
B01	1,41	170	49,3	0,156	0,111	17,2%	0,129
B02	1,41	125	39,0	0,152	0,108	18,7%	0,123
B04	1,41	43	36,6	0,185	0,131	10,6%	0,165
B05	1,41	35	46,5	0,154	0,110	17,2%	0,128
B06	1,41	124	49,5	0,157	0,112	19,2%	0,127
B07	1,57	92	49,9	0,191	0,122	6,6%	0,178
B08	1,40	13	59,1	0,123	0,088	8,1%	0,113
M09	1,48	44	13,8	0,200	0,135	11,3%	0,177
M11	1,48	91	29,8	0,164	0,111	6,7%	0,153
M12	1,50	79	45,2	0,168	0,112	9,2%	0,153
M13	1,50	173	27,5	0,184	0,123	2,0%	0,181
M14	1,50	68	47,0	0,169	0,113	3,3%	0,164
M15	1,50	130	30,5	0,170	0,114	5,4%	0,161
M16	1,50	196	133,6	0,186	0,124	1,6%	0,183
M17	1,50	225	39,4	0,165	0,110	8,1%	0,152
M18	1,50	84	63,5	0,180	0,120	1,3%	0,178
T19	2,55	33	23,9	0,414	0,162	4,1%	0,397
T20	2,55	140	43,1	0,379	0,149	6,9%	0,353
T21	2,55	95	30,7	0,316	0,124	3,0%	0,307
T22	2,55	198	11,4	0,286	0,112	11,4%	0,254
T23	2,55	85	12,1	0,300	0,118	8,5%	0,274
T24	2,55	145	22,2	0,349	0,137	8,0%	0,321
T25	2,55	135	59,4	0,334	0,131	3,9%	0,321
T26	2,55	112	3,1	0,287	0,113	7%	0,268
T27	2,75	122	11,6	0,489	0,178	2,0%	0,479
T28	2,75	76	7,0	0,306	0,111	4,8%	0,292
N31	5,15	7	61,4	0,517	0,100	13,0%	0,450
O32	1,47	85	44,9	0,168	0,114	7,7%	0,155
O33	1,47	146	45,7	0,172	0,117	8,0%	0,158
O34	1,47	182	52,5	0,184	0,125	10,7%	0,164
O35	1,47	178	60,8	0,185	0,126	10,9%	0,165
O36	1,47	187	54,7	0,144	0,098	5,8%	0,136
O37	1,53	70	40,7	0,184	0,120	3,7%	0,177
O38	1,53	240	26,6	0,186	0,122	12,1%	0,164
O39	1,53	159	24,4	0,179	0,117	13,3%	0,156
O40	1,53	111	15,7	0,147	0,096	5,8%	0,138
O41	1,53	108	45,3	0,157	0,102	7,7%	0,144
V42	1,58	163	46,8	0,158	0,100	8,3%	0,145
V43	1,36	136	54,6	0,155	0,114	7,5%	0,143
V44	1,58	121	19,3	0,148	0,094	9,2%	0,134
V45	1,38	151	21,6	0,151	0,110	6,9%	0,141
V47	1,30	50	35,9	0,169	0,130	3,9%	0,162
V48	1,38	142	31,0	0,176	0,127	6,7%	0,164
V49	1,36	143	37,6	0,170	0,125	5,7%	0,160
V50	1,30	43	25,1	0,229	0,176	0,4%	0,228
C51	2,35	175	52,2	0,224	0,095	3,6%	0,216
C52	2,35	232	17,9	0,246	0,105	7,0%	0,229
C53	2,35	155	31,6	0,219	0,093	6,9%	0,204
C54	2,35	311	17,4	0,243	0,103	3,4%	0,235
C55	2,35	163	22,9	0,276	0,117	8,9%	0,251
C56	2,35	198	11,4	0,208	0,088	5,3%	0,197
C57	2,35	131	23,5	0,250	0,106	6,5%	0,233
C58	2,35	102	39,6	0,239	0,102	5,0%	0,227
C59	2,35	198	37,0	0,253	0,108	8,3%	0,232
C60	2,35	15	24,0	0,249	0,106	3,3%	0,241

Tabelle 4.3.4: Mittlerer Antriebsverbrauch aller Rügenfahrzeuge

Tabelle 4.3.5. zeigt den Bereich der spezifischen Antriebsenergien ohne Rekuperation für die verschiedenen Fahrzeugtypen. Fahrzeuge mit weniger als 70 auswertbaren Tagen sind nicht berücksichtigt. Ausreißer sind in Klammern angegeben.

Fahrzeugtyp	spezifische Antriebsenergie ohne Rekuperation [kWh/tkm]
BMW 3-er	0.088..0.112 (0.122 für B07)
MB190	0.110..0.124 (0.135 für M09)
MB100E	0.111..0.149 (0.178 für T27)
NEOPLAN	0.100
Opel Astra	0.096..0.126
VW Golf	0.094..0.130 (0.176 für V50)
VW T4	0.088..0.117

Tabelle 4.3.5: Bereich der spezifischen Antriebsenergien ohne Rekuperation

Berücksichtigt man, daß die Fahrzeugmasse sowohl bei den Pkw als auch besonders bei den größeren Fahrzeugen durch den Ladezustand um 20-30% (>50% beim Bus) schwanken kann, sind für die Antriebe ohne Rekuperation keine Qualitätsunterschiede abzuleiten.

Deutliche Abweichungen zeigen sich im Anteil der rückgespeisten Energie. Auffällig ist, daß die BMW-Fahrzeuge eine hohe Rekuperationsrate besitzen. Wegen der geringen Anzahl von auswertbaren Tagesprotokollen, sind die Werte von den Fahrzeugen B03, B04, B05 und B08 statistisch nicht genügend aussagefähig. Für die Fahrzeuge B01, B02 und B06 ergibt sich eine Rekuperationsrate von ca. 18%. Das Fahrzeug B07 nimmt eine Sonderstellung ein. Es ist schwerer und hatte einen anderen Ausrüstungsstand als die übrigen Fahrzeuge.

Die Rekuperationsrate hängt von mehreren Faktoren ab. Grundsätzlich bestimmt das Geschwindigkeits- und Höhenprofil einer Fahrt das Verhältnis von Roll- und Luftwiderstandskräften zu den Trägheitskräften (Beschleunigung und Verzögerung) und Potentialkräften. Davon abgeleitet, ist die Rekuperationsrate davon abhängig, welcher Anteil der in den Bremsvorgängen steckenden Trägheitsenergie in elektrische Energie umgesetzt werden kann.

Die höheren Werte der Rekuperationsrate bei den BMW-Fahrzeugen können also durch ein anderes Fahrprofil und/oder durch Umsetzung eines größeren elektrischen Anteil der mechanischen Bremsenergie in elektrische Energie begründet sein.

Die Fahrzeuge BMW (B01) und Opel Astra (O32) unterscheiden sich in der Rekuperationsrate obgleich bei den beiden Fahrzeugen die mittlere tägliche Fahrstrecke fast gleich war (49 bzw. 46 km), ihre mittlere Geschwindigkeit 40 km/h betrug und die mittlere Beschleunigung bei 0.55 bzw. 0.57 km/h/s lag. Unterschiede bestanden dagegen bei den mittleren Weganteilen.

Neben dem Gesamtweg eines Tages werden in der Klassierung die Anteile

- Antriebsweg, d.h. Fahren mit Antriebsenergie
- Rollweg, d. h. Fahren ohne Antriebsenergie
- Bremsweg, d.h. Fahren mit Rekuperation

erfaßt. In den Bedingungen für die drei Wegerfassungen waren Grenzen für die Antriebsleistung notwendig. Unter Punkt 12.3.3.1 wird erläutert, daß als Grenzbetrag immer das 2.5-

fache des TDS-Offsets galt. Der momentan gemessene Weg wurde zum Rollweg addiert, wenn die Antriebsleistung im Bereich zwischen der negativen und positiven Fehlergrenze lag. Außerhalb dieses Fenster wurde je nach Polarität der Antriebsleistung der gemessene Weg zum Antriebs- oder Bremsweg addiert.

Im Bild 4.3.6 sind für die beiden Fahrzeuge BMW (B01) und Opel Astra (O32) die mittleren Weganteile dargestellt. Der Rollweg ist beim BMW sehr klein (2%) und statt 7% beim Opel werden beim BMW 23% des Gesamtweges zur Rekuperation genutzt. Beim BMW gibt es praktisch kein Rollen, weil nach dem Wegnehmen des Fußes vom „Gaspedal“ sofort die elektrische Bremse einsetzt. Von der Verringerung des Rollweges um 26 % beim BMW gegenüber dem Opel treten 16 % als Erhöhung des Bremsweges und 10 % als Erhöhung des Antriebsweges auf.

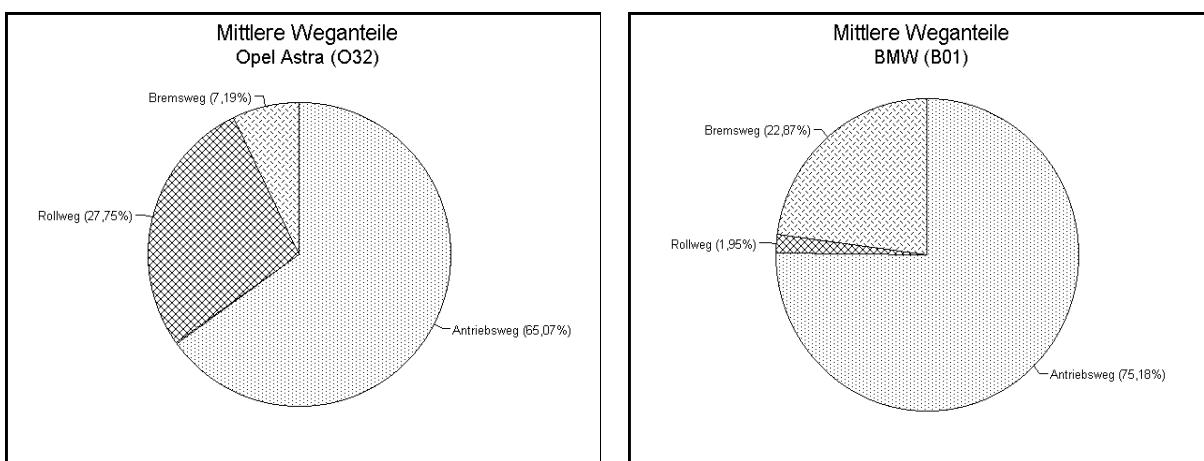


Bild 4.3.6: Weganteile bei BMW und Opel (B01 und O32)

Ob die höhere Rekuperationsrate der BMW-Fahrzeuge durch das Fahrprofil oder die elektrische Nutzung der Bremsenergie begründet ist, kann nur durch eine detaillierte Analyse der zeitabhängigen Signalverläufe von Geschwindigkeit, Höhe und Antriebsleistung ermittelt werden. Diese war im Rahmen des Versuches nicht vorgesehen.

Einige Fahrzeuge MB190 weisen eine besonders niedrige Rekuperationsrate auf. Bei den MB 190-Fahrzeugen gibt es einen leicht zugänglichen Schalter auf der Mittelkonsole, mit dem die elektrische Bremse ausgeschaltet werden kann. Bild 4.3.7 zeigt deutlich, daß beim Fahrzeug M14 an vielen Tagen der Schalter ausgeschaltet war (Rekuperierte Bremsenergie = 0). Setzt man voraus, daß der Schalter an den übrigen Tagen eingeschaltet war, ergeben sich für die Rekuperationsrate Werte von 4-15%. Die mittlere Rekuperationsrate ohne Berücksichtigung der Tage mit ausgeschalteter Rekuperation liegt dann bei etwa 10%.

Beim Fahrzeug VW Golf V50 registrierte das TDS eine wesentlich größere spezifische Antriebsenergie als für die vergleichbaren anderen VW Golf. Die starke Abweichung ist erst bei den Endauswertungen aufgefallen. Die Ursache dafür konnte im Rahmen des Projektes nicht mehr geklärt werden.

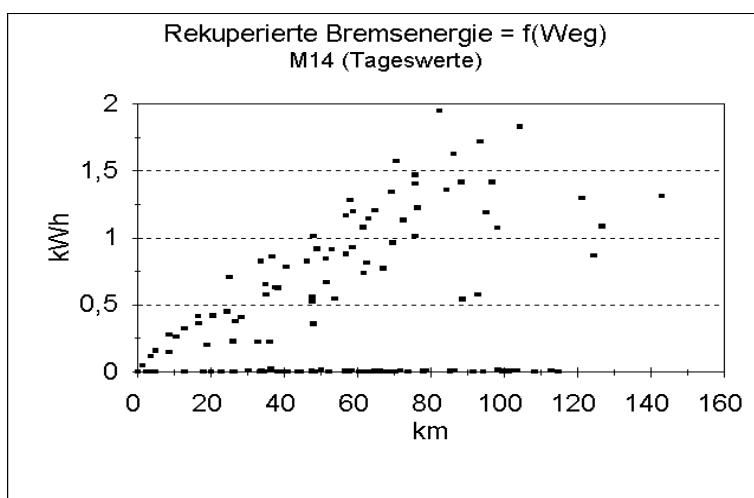


Bild 4.3.7: Rekuperierte Bremsenergie des MB 190 (M14)

12.4.3.3. Energieverbrauch der Traktionsbatterien

In den Rügenfahrzeugen sind folgende Batteriesysteme in der Erprobung gewesen:

- Nickel-Cadmium-Batterie von der DAUG-Hoppecke (B08, M09..11,T27,T28, O37..41,V45,V48,C51..C60) in 23 Fahrzeugen
- Natrium-Nickelchlorid-Batterie von der AEG Anglo Batteries ("Zebra"-Batterie) (B01..B07, M12..M18, T19..T26, O32..O36, V43,V47, V49, V50) in 31 Fahrzeugen
- Blei-Gel von Varta (V42, V44, V46) in 3 Fahrzeugen
- Natrium-Schwefel-Batterie von ABB (N29..N31) in 3 Fahrzeugen.
-

Die Natrium-Nickelchlorid- und die Natrium-Schwefel-Batterie arbeiten in einem erhöhten Temperaturbereich (ca. 300° C). Sie benötigen deshalb zusätzlich Heizenergie zum Ausgleich der Wärmeverluste. Während der Ladung oder Standzeiten mit Netzverbindung wird diese Energie aus dem Netz entnommen. In Standzeiten ohne Netzverbindung liefert die Batterie selbst die notwendige Heizenergie.

Bei Temperaturen um und unter 0 °C werden auch die Blei-Batterien geheizt.

Zur Kühlung benötigen die eingesetzten Nickel-Cadmium-Batterien Energie zum Antrieb von Lüftern. Diese Energie wird aus dem Bordnetz genommen.

Diese Besonderheiten der einzelnen Batterietypen mußten bei der Meßdatenerfassung und -auswertung berücksichtigt werden. Die Heizenergie aus dem Netz und Lüfterenergien wurden den Verlusten der jeweiligen Batterien zugerechnet.

Durch die gesonderte Erfassung der Lade- und Entnahmeenergie für die Traktionsbatterie können der innere Verlust einschließlich Heizung in Standzeiten ohne Netzverbindung und der Wirkungsgrad der einzelnen Batteriesysteme bestimmt werden.

Wegen der Speicherwirkung der Batterie sind Bilanzen nur zwischen Zuständen "Batterie voll" oder über lange Zeiträume möglich.

Nickel-Cadmium-Batterie

Der Batterieverlust ergibt sich für die Nickel-Cadmium-Batterien aus der Differenz zwischen aufgenommener und abgegebener Energie zwischen zwei Ladeende-Zuständen ("Batterie voll"), ggf. zuzüglich der im gleichen Zeitraum benötigten Lüfterenergie. Im Bild 4.3.8 sind beispielhaft für ein Fahrzeug VW Caravelle mit NiCd-Batterie die bis Ladeende ermittelten Batterieverluste in Abhängigkeit vom dazugehörigen Weg aufgetragen. Auffällig in dem Diagramm ist die Gruppe mit Verlustwerten größer >14 kWh.

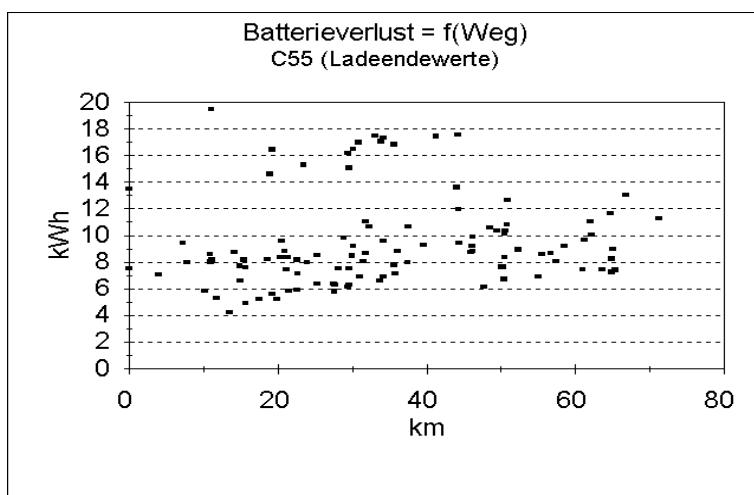


Bild 4.3.8: Batterieverluste der Nickel-Cadmium-Batterie des VW T4 (C55)

Die weitere Analyse zeigt, daß bei diesen Werten erst nach 3 Tagen (ca. 70 h) wieder der Zustand "Batterie voll" erreicht wurde. Im Rahmen der Klassierung erfolgte neben der Erfassung der Energien und des Weges auch die Erfassung der Zeit zwischen Ladeendezuständen. Die Zeit zwischen den Ladeendezuständen ist für das gleiche Fahrzeug im Bild 4.3.9 dargestellt.

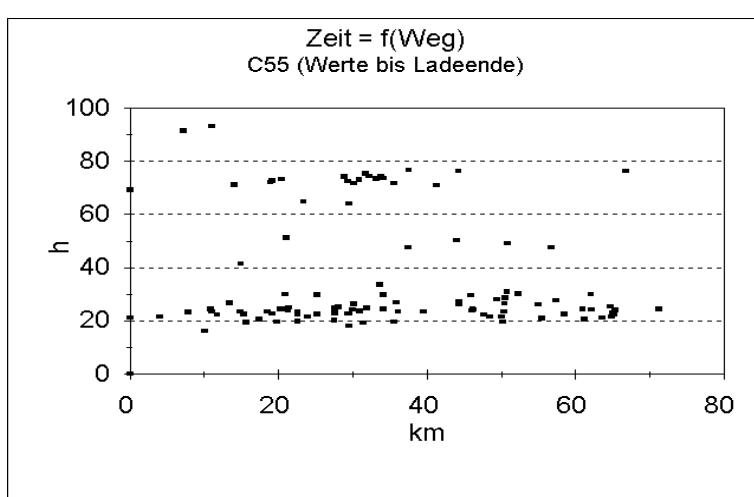


Bild 4.3.9: Zeiten zwischen Zuständen "Batterie voll" beim C55

Die großen Verlustwerte gehören ausnahmslos zu Zeiten zwischen Ladeenden von ca. 70 h. Bis Mitte Sept. 1995 betragen die Standverluste bei dem Fahrzeug ca. 4.2 kWh/Tag. Bei längeren Standzeiten mit Netzverbindung nach Erreichen des Ladeendes erzeugte das Batteriemanagement automatisch Nachladezyklen von etwa 4 Minuten, die den oben genannten Tagesverbrauch ergaben.

Ab Mitte Sept. 1995 reduzierte die DAUG die Standverluste auf ca. 0.200 kWh/Tag. Bild 4.3.10 zeigt die Batterieverluste für danach liegende Ladeendewerte. Die Verluste gingen dadurch von 17 kWh auf 10 kWh für Zeiten zwischen zwei Zuständen "Batterie voll" von ca. 70 h herunter. Bei 30 km Fahrstrecke ergibt sich als niedrigster Verlust 6 kWh. Dazu gehören Zeiten zwischen zweimal Ladeende von etwa 20 h.

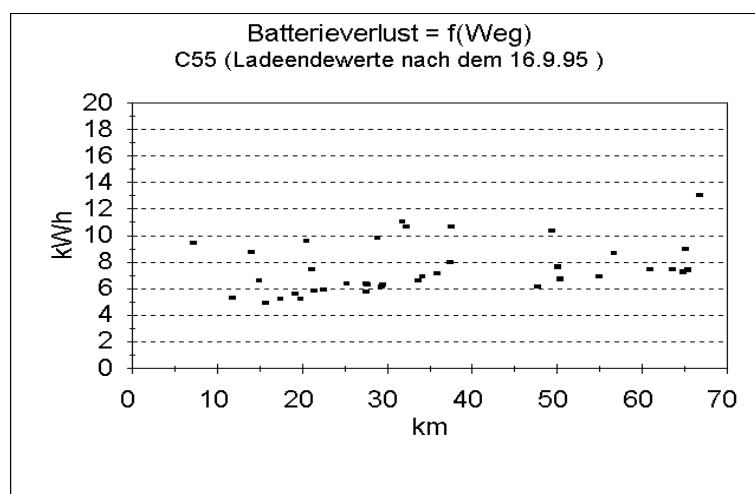


Bild 4.3.10: Batterieverlust der NiCd-Batterie des C55 nach Sept. 1995

Bild 4.3.11 zeigt den errechneten Wirkungsgrad der Batterien für alle Ladeendewerte.

Die niedrigen Werte für den Wirkungsgrad (<0.5 für gefahrene Wegstrecken zwischen 20 und 50 km) gehören zu den großen Zeiten (> 2 Tage) zwischen zweimal Ladeende (s. Bild 4.3.9).

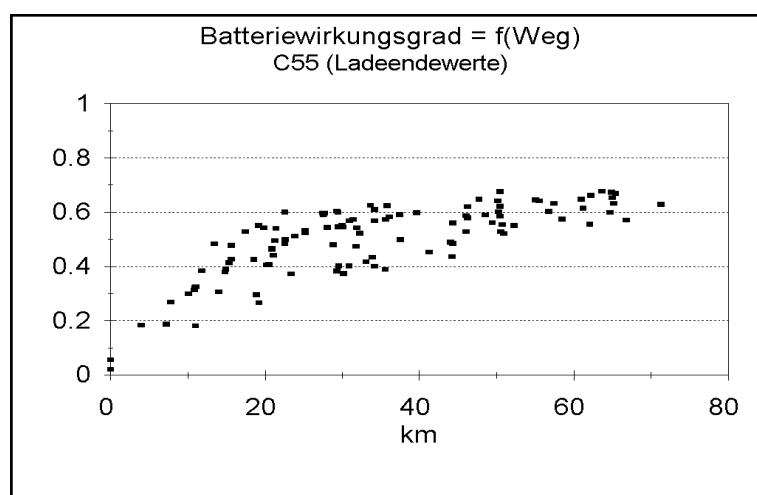


Bild 4.3.11: Errechneter Batteriewirkungsgrad des C55

Im Bild 4.3.12 ist der spezifische Verlust aufgetragen.

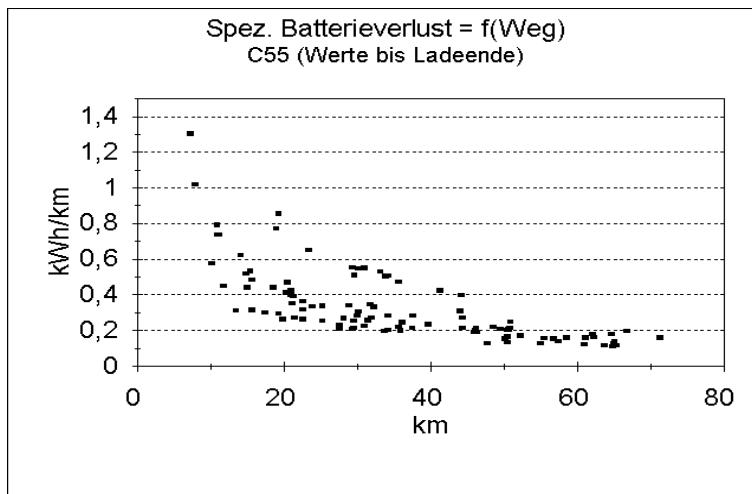


Bild 4.3.12: Spezifischer Batterieverlust der Nickel-Cadmium-Batterie des C55

Für die Traktionsbatterien wurden etwa ab März 1995 die von der Batterie aufgenommenen (Ahp) und abgegebenen Amperestunden (Ahn) im TDS jeweils bis zum Ladeende registriert. Das Amperestundenverhältnis für den gleichen VW T4 ist im Bild 4.3.13 dargestellt. Man kann ablesen, daß die Punkte zu drei Kurven gehören. Die am höchsten liegende Kurve wird durch Punkte erzeugt, bei denen der Abstand vom letzten Ladeende ca. 24 h betrug und die nach der Standverlustreduzierung lagen. Zur mittleren Kurve gehören Punkte deren Abstand vom letzten Ladeende ebenfalls nicht wesentlich größer als 24 h war und aus der Zeit vor dem 15.9.95 stammten. Die Punkte der niedrigsten Kurve entstanden vor dem 15.9.95 und der Abstand vom letzten Ladeende war ungefähr 3 Tage. Ergebnisse nach der Standverlustreduzierung und einem Abstand von ca. 3 Tagen liegen im Bereich der mittleren Kurve.

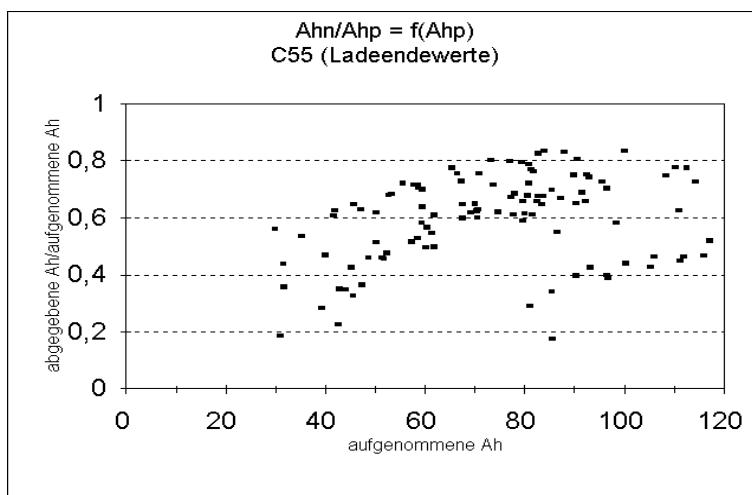


Bild 4.3.13: Amperestundenverhältnis der Nickel-Cadmium-Batterie des C55

Natrium-Nickelchlorid-Batterie

Der Batterieverlust setzt sich bei dieser Batterie aus der Differenz von aufgenommener und abgegebener Energie sowie der aus dem Netz entnommenen Heizenergie zusammen. Auch hier erfolgt die Bilanzierung auf der Basis von Ladeendewerten. Bild 4.3.14 zeigt am

Beispielfahrzeug BMW (B01), das mit einer Zebra-Batterie bestückt ist, die ermittelten Batterieverluste in Abhängigkeit vom dazugehörigen Weg. Die in diesen Gesamtverlusten enthaltenen Heizungsenergien aus dem Netz sind als Tageswerte im Bild 4.3.15 eingezeichnet.

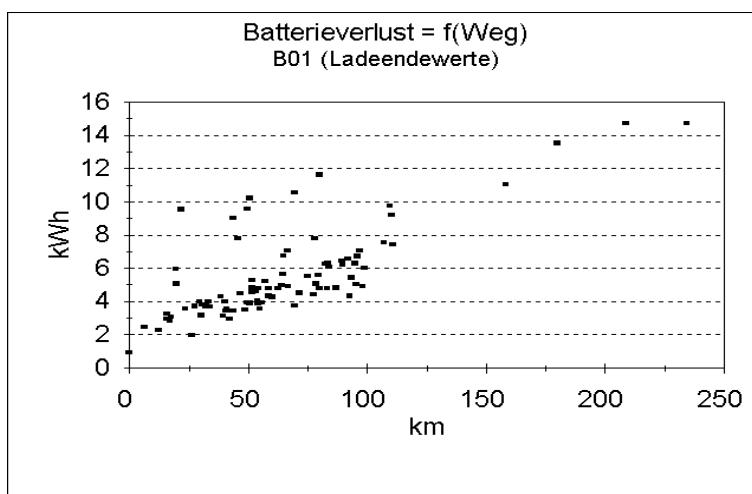


Bild 4.3.14: Batterieverlust der Natrium-Nickelchlorid-Batterie des BMW (B01)

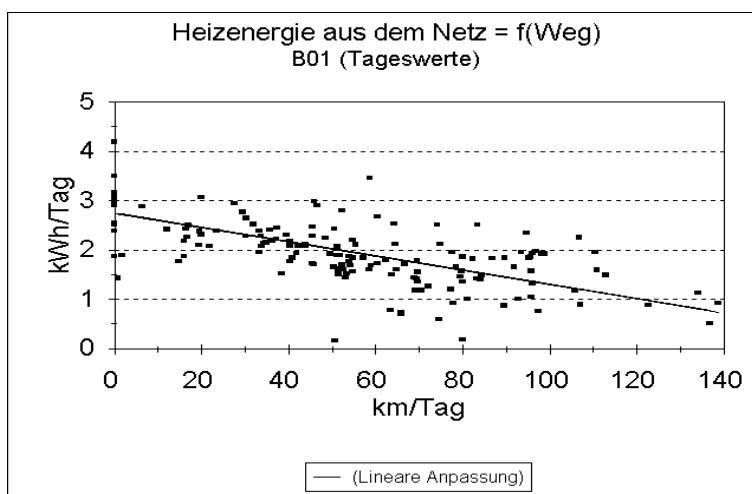


Bild 4.3.15: Heizenergie aus dem Netz der Natrium-Nickelchlorid-Batterie des BMW (B01)

Der Standverbrauch liegt im allgemeinen bei 3 kWh/Tag. Als Standverbrauch wird die erforderliche Heizenergie für Tage, an denen das Fahrzeug nicht gefahren wird und 24 h mit dem Netz verbunden ist, gerechnet. Die grafische Darstellung (Bild 4.3.15) zeigt, daß die erforderliche Heizenergie erst bei hohen Tages-km-Leistungen (über 100 km) gegen Null tendiert. Die Streuung wird, abgesehen von möglichen Fehlmessungen, durch die Nutzung beeinflußt.

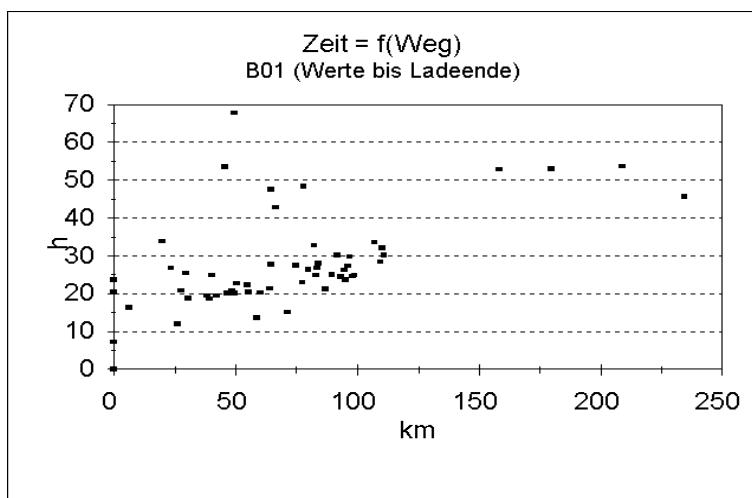


Bild 4.3.16: Zeiten zwischen Ladeende beim BMW (B01)

Die Analyse der Zeit zwischen zwei Zuständen "Batterie voll" zeigt (Bild 4.3.16), daß sie häufig etwa 24 h beträgt, also in der Regel die Batterie täglich voll geladen wird. Einige Werte liegen aber bei zwei und drei Tagen. Mit diesen großen Abständen zwischen zwei Zuständen "Batterie voll" sind relativ hohe Batterieverluste (Bild 4.3.14), kleine Wirkungsgrade (Bild 4.3.17) und hohe Werte im spezifischen Batterieverlust (Bild 4.3.18) verknüpft.

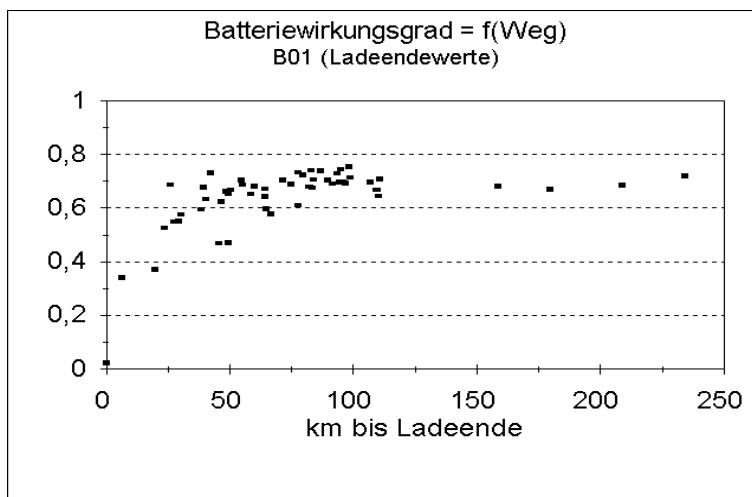


Bild 4.3.17: Wirkungsgrad der Natrium-Nickelchlorid-Batterie des BMW (B01)

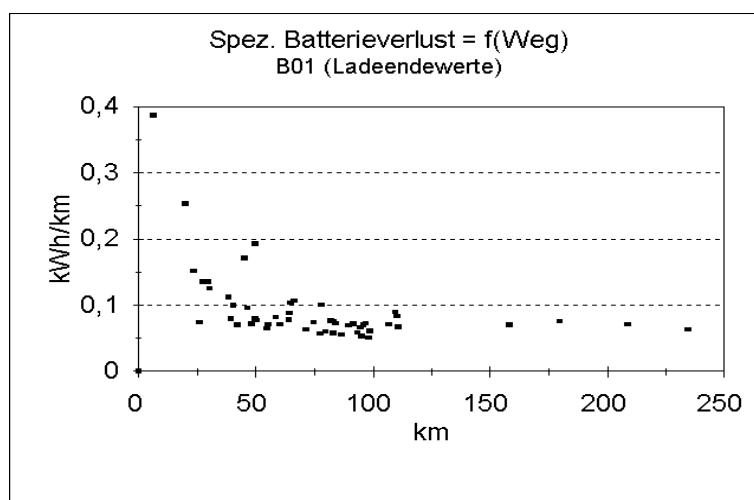


Bild 4.3.18: Spezifischer Verlust der Natrium-Nickelchlorid-Batterie des BMW (B01)

Natrium-Schwefel-Batterie

Wie schon unter Punkt 12.4.3.1 erwähnt, liegen von den NEOPLAN-Bussen keine völlig einwandfreien Meßdaten vor. Beim Bus N29 gibt es auch laut Fahrtenbuch 1995 keinen gefahrenen Weg beim Nutzer. Der Bus N30 ist gemäß Fahrtenbuch 2112 km beim Nutzer gefahren. Davon wurden zwar 409 km meßtechnisch erfaßt, aber dabei funktionierte die Netzenergiezählung nicht und der Batterieheizungsverbrauch konnte nicht kontrolliert werden, weil dafür die nötige Ausrüstung fehlte.

Für den Bus N31 sind 1995 im Fahrtenbuch 8237 km registriert. Davon gibt es für 3541 km Meßdaten. Trotzdem können nur wenige Tagesdaten zur Auswertung dienen. Ab dem 15.2.1995 war die Netzenergiezählung ausgefallen. Sie war erst ab dem 22.11.1995 wieder betriebsfähig, hat danach aber nicht richtig gemessen.

Erst ab dem 22.11.1995 konnte die Kontrolle der Batterieheizung in Betrieb genommen werden, weil bis dahin die erforderliche Hardware nicht installiert war. In den danach noch möglichen 13 Tagen lagen von den drei notwendigen Kontrollsingale nur zwei Signale am Meßsystem an. In den folgenden Diagrammen ist als Heizenergie für die dritte Batterie der Mittelwert aus den beiden gemessenen benutzt worden.

Die Bilder 4.3.19, 4.3.20 und 4.3.21 zeigen den Batterieverlust, die benötigte Heizenergie aus dem Netz und den Batteriewirkungsgrad in Abhängigkeit vom gefahrenen Weg. Vom Fahrzeug- und Batteriehersteller lag kein auswertbares Signal für den Zustand "Batterie voll" vor. Deshalb erfolgte in einer gemeinsamen Abstimmung zwischen den verantwortlichen Projektpartnern die Festlegung, bei der Auswertung davon auszugehen, daß am Tagessende die Traktionsbatterie vollgeladen ist. Die Analyse der Nutzung zeigte, daß diese Festlegung für den Bus berechtigt war.

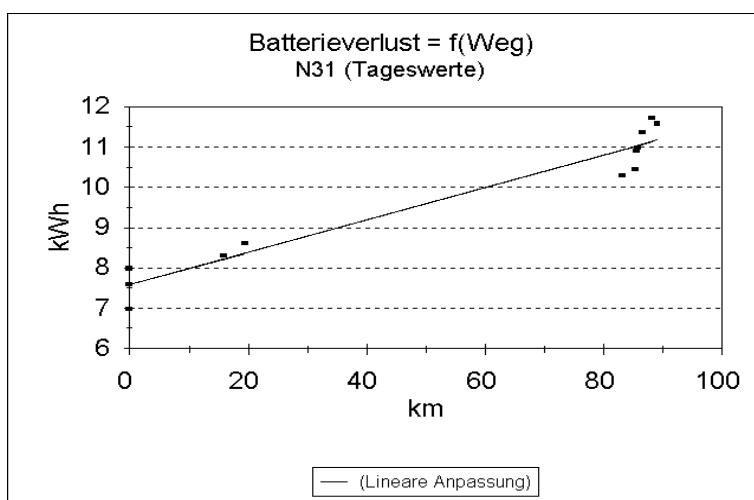


Bild 4.3.19: Batterieverlust der Natrium-Schwefel-Batterie des NEOPLAN-Busses (N31)

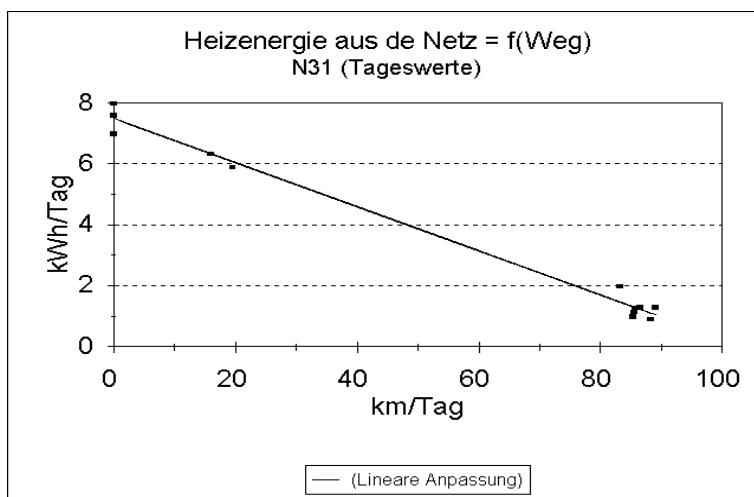


Bild 4.3.20: Heizenergie aus dem Netz der Na/S-Batterie des NEOPLAN-Busses (N31)

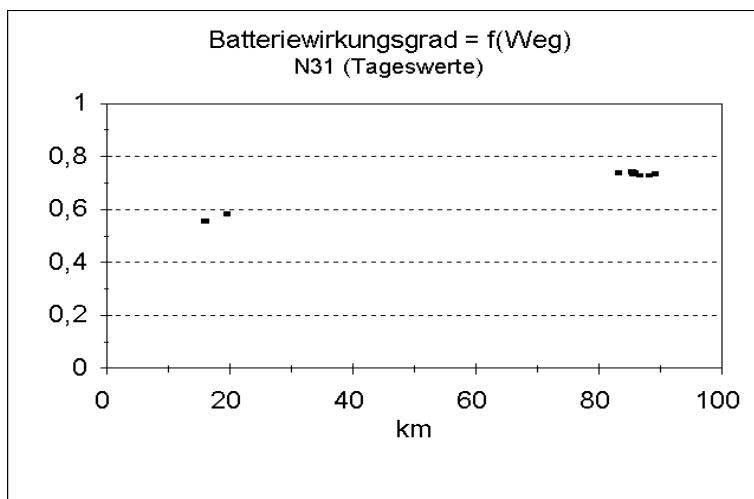


Bild 4.3.21: Wirkungsgrad der Natrium-Schwefel-Batterie des NEOPLAN-Busses (N31)

Für die beiden vorkommenden Fahrstrecken ergeben sich folgende spezifische Verluste:

Tägliche Fahrstrecke [km]	spezifischer Verlust [kWh/km]
83	0.13
20	0.43

Blei-Gel-Batterie

Für die Sommermonate erfordert die Blei-Gel-Batterie keine zusätzliche Heizung, so daß sich der Batterieverlust nur aus der Differenz von aufgenommener und abgegebener Energie ergibt. Die ohne Berücksichtigung der Heizung ermittelten Batterieverluste und -wirkungsgrade zeigen die Bilder 12.4.3.22 und 12.4.3.23. Ohne Heizung erhält man aus der Steigung der Regressionsgeraden als spezifischen Batterieverlust 0.05 kWh/km. Dieser Wert gilt unabhängig von der gefahrenen Wegstrecke.

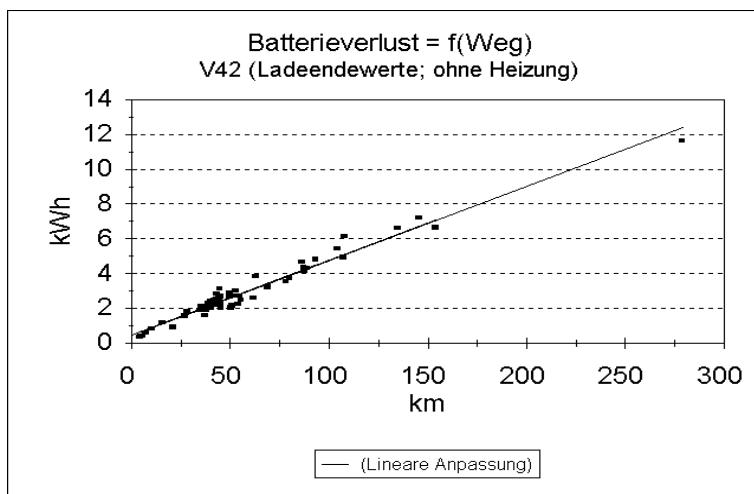


Bild 4.3.22: Verlust der Blei-Gel-Batterie des VW Golf (V42) ohne Heizung

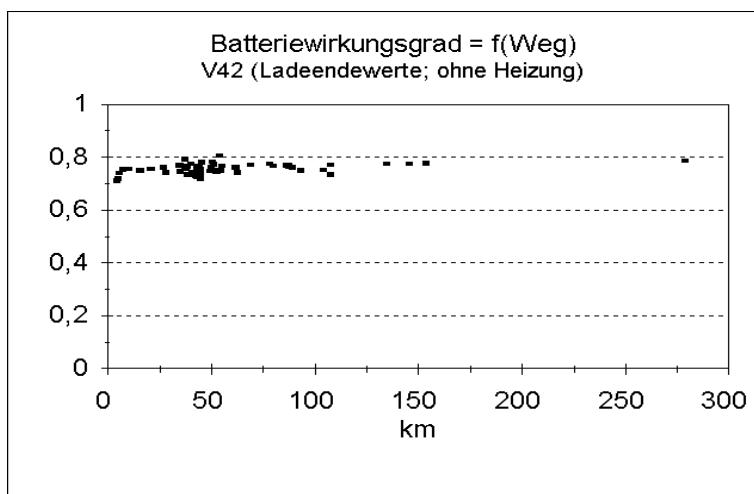


Bild 4.3.23: Wirkungsgrad der Blei-Gel-Batterie des VW Golf (V42) ohne Heizung

Die Messung der an kalten Tagen benötigten Heizenergie war vom Hersteller nicht vorgesehen. Es kann dafür nur indirekt eine abschätzende Berechnung durchgeführt werden. Die Energie für die Heizung wird wie bei den geheizten Batterien hinter dem Netzenergiezähler, wie in der Blockschaltung Bild 2.1 dargestellt, abgenommen. Dadurch entsteht scheinbar ein verringelter Wirkungsgrad des Ladewandlers. Dieser ist im Bild 4.3.24 dargestellt. Die daraus berechnete Heizenergie unter Voraussetzung eines konstanten Wirkungsgrads des Ladewandlers von 0.82 zeigt Bild 4.3.25.

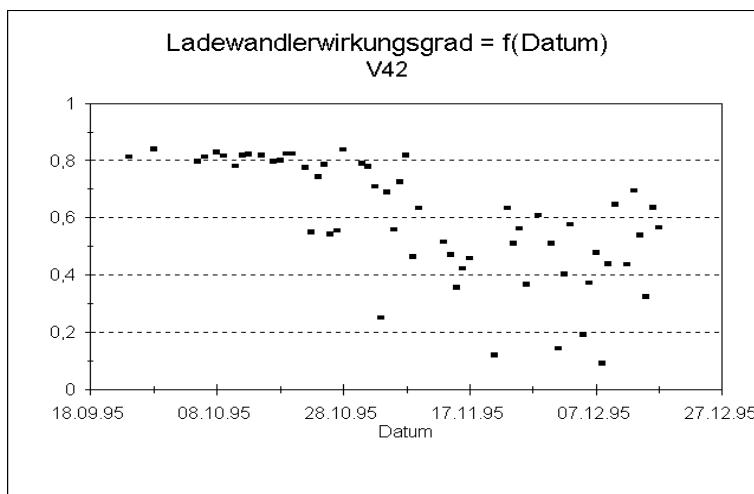


Bild 4.3.24: Scheinbarer Wirkungsgrad des Ladewandlers beim VW Golf (V42)

Seit Beginn der ersten kalten Tage ab Ende Oktober lag die mittlere Heizenergie für die 56 Tage bei 11.8 kWh/Tag und der Maximalwert bei 17 kWh/Tag. Beim Fahrzeug V42 erfolgte meßtechnisch die Klassierung der Außentemperatur. Die daraus ermittelte mittlere Tages-temperatur ist in Bild 4.3.26 eingezeichnet. Berücksichtigt man, daß die Tagesschwankung um den Mittelwert ca. +/- 6 K beträgt, ist zu erkennen, daß ab Ende Oktober 1995 Werte unter 0 °C auftraten. Rechnet man mit ca. 100 kalten Tagen im Jahr, ergibt sich im Jahresdurchschnitt ein Heizverlust von 3.2 kWh/Tag. Für die mittlere Tagesfahrleistung des V42 von 47 km/Tag, erhält man einen geschätzten spezifischen Verlust durch die Heizung von 0.068 kWh/km. Der gesamte spezifische Verlust einschließlich des gemessenen inneren Verlustes von 0.029 kWh/km beträgt dann 0.097 kWh/km (s. Tabelle 4.3.10).

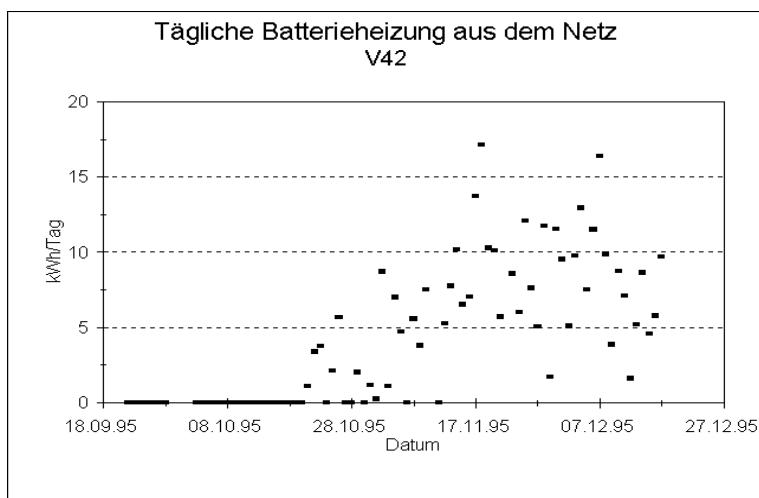


Bild 4.3.25: Errechnete Heizenergie beim VW Golf (V42)

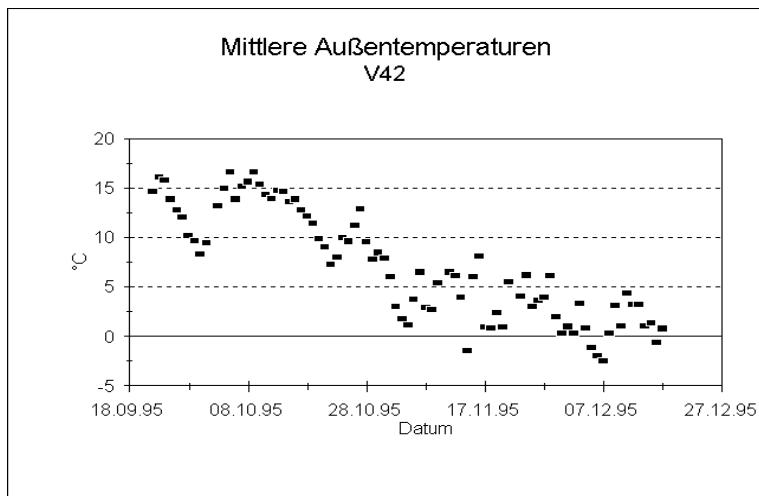


Bild 4.3.26: Ermittelte mittlere Außentemperatur beim VW Golf (V42)

Standverluste der NaNiCl₂-, NaS- und NiCd-Batterien

In den folgenden zwei Tabellen (Tabellen 4.3.6 und 4.3.7) werden die ermittelten Standverluste der NaNiCl₂ - und NiCd-Batterien angegeben. Bei der Natrium-Schwefel-Batterie des Busses N31 betrug der Standverlust 7.5 kWh/Tag. Standverluste treten auf, wenn das Fahrzeug längere Zeit nicht zum Fahren benutzt wird und mit dem Netz verbunden ist. Bei den NaNiCl₂- und NaS-Batterien handelt es sich dabei um den Energiebedarf für die Heizung aus dem Netz und bei den NiCd-Batterien um den Bedarf für die Nachladungen. Für einige NiCd-Batterien kann der Standverbrauch nicht angegeben werden, weil bei diesen Fahrzeugen entweder keine Standtage aufgetreten sind oder sie nicht mit dem Netz verbunden waren.

Fahrzeug	Herstellerangabe [kWh/Tag]	Standverlust [kWh/Tag]
B01	3,9	3,0
B02	3,9	3,0
B03	3,9	3,0
B04	3,9	2,9
B05	3,9	3,3
B06	3,9	3,0
M12	5,4	4,6
M13	5,4	5,1
M14	5,4	4,5
M15	5,4	4,6
M16	5,4	5,3
M17	5,4	5,4
M18	5,4	5,2
T19	6,0	5,6
T20	6,0	4,9
T21	6,0	5,8
T22	6,0	5,7
T23	6,0	5,4
T24	6,0	6,1
T25	6,0	6,1
T26	6,0	5,6
O32	5,4	5,2
O33	5,4	5,0
O34	5,4	5,0
O35	5,4	
O36	5,4	5,5
V43	3,9	
V47	3,0	2,9
V49	3,9	3,0
V50	3,0	2,8

Tabelle 4.3.6: Standverluste der NaNiCl₂-Batterien

Fahrzeug	Verlust vor 9/95 [kWh/Tag]	Verlust nach 9/95 [kWh/Tag]
B08		
M09		
M11		
T27	1,00	
T28	2,00	0,25
O37		0,09
O38		
O39		
O40	0,10	0,18
O41	0,12	0,21
V45	0,95	0,08
V48	1,20	0,09
C51		
C52	2,80	0,44
C53	1,00	0,44
C54	2,90	0,19
C55	4,10	0,10
C56	3,60	0,26
C57	3,50	0,21
C58	2,50	0,18
C59	2,50	0,26
C60	1,70	

Tabelle 4.3.7: Standverluste der NiCd-Batterien

Bezieht man die Standverluste auf die Nennenergie der Batterien, so ergeben sich die in Tabelle 4.3.8 angegebenen prozentualen Verluste pro Tag.

Bei den Fahrzeugen MB 190, MB 100E und Opel Astra war die Traktionsbatterie aus zwei konstruktiv getrennten Teilbatterien aufgebaut. Aus der Tabelle 4.3.8 ist zu erkennen, daß eine solche Lösung mit höheren Wärmeverlusten verbunden ist.

Batterietyp	Fahrzeugtyp	vor 9/95 %/Tag	nach 9/95 %/Tag
NaNiCl ₂	BMW MB 190 MB 100E Opel Astra VW Golf	13.8 19.2 17.6 19.3 13.6	
NaS	NEOPLAN-Bus		13
NiCd	Opel Astra VW Golf VW T4	6.9 15.3	1.4 0.6 1.3

Tabelle 4.3.8: Prozentuale Standverluste der Batterien

Schnellladung

Im Rahmen des Projektes waren nur die Nickel-Cadmium-Batterien für die Schnellladung vorbereitet. Von den 23 Fahrzeugen mit NiCd-Batterie waren 10 schnelladefähig ausgerüstet. Für die Schnellladung standen zwei Stationen zur Verfügung. Die Station in Zirkow mit einer Leistung von 30 kW war seit Oktober 1994 und die Station in Bergen mit 60 kW Leistung war seit August 1995 in Betrieb. Die gesamte aus den Schnellladestationen getankte und meßtechnisch erfaßte Energie wurde schon unter Punkt 12.4.3.1 erwähnt. Die von den einzelnen Fahrzeugen gezapften und erfaßten Energien sind in Tabelle 4.3.9 aufgeführt.

Fahrzeug-Typ	Fahrzeug-Nr	Ladeenergie nach dem Ladewandler [kWh]	Anteil der Schnellladung an der Ge- samtladung	
		gesamt		
MB 100E Opel VW T4	T28	445,37	25,10	5,6%
	O38	1714,35	49,26	2,9%
	O41	1261,50	246,09	19,5%
	C51	3439,34	589,69	17,1%
	C52	2324,59	3,90	0,2%
	C53	1863,52	9,23	0,5%
	C55	2021,62	8,59	0,4%
	C57	1314,22	4,07	0,3%
	C58	1510,97	472,26	31,3%
	Gesamt	15895,48	1408,20	8,9%

Tabelle 4.3.9: Ladeenergien aus der Schnellladung für die einzelnen Fahrzeuge

Im Rahmen des Großversuches wurden die Batterien gemischt, d. h. sowohl schnell als auch normal (über den On-Board-Ladewandler) geladen. Am Ende einer Schnellladung entsteht im allgemeinen kein Ladeendesignal sondern erst bei einer folgenden Normalladung bis zum Zustand „Batterie voll“. Damit können auch keine differenzierten Werte z. B. zum Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Schnellladung ermittelt werden. Bei den Fahrzeugen mit mehr als 10 % Schnellladung kann aber aus dem Wirkungsgradverlauf abgelesen werden, daß sich der Wirkungsgrad in Zeiten häufiger Schnellladung nicht verändert hat.

Für zwei Fahrzeuge, einen Pkw Opel Astra und einen Kleinbus VW T4, sind in den Bildern 4.3.27 bis 4.3.30 die Verteilungen der Ladeenergie und der Ladedauer bei Schnellladevorgängen dargestellt. Etwa bei einem Drittel der Schnellladungen beider Fahrzeuge liegt die Ladeenergie unter 1 kWh und die Ladedauer unter 3 min. Es handelt sich dabei um abgebrochene Ladevereuche. Die Ladeleistung lag für den Opel Astra maximal bei 18 kW und beim VW T4 bei 30 kW. Damit erfolgte die Schnellladung bei beiden Fahrzeugen etwa mit der fünffachen Leistung gegenüber der Normalladung. Für eine Energiemenge in Höhe der Nennenergie der Batterie dauerte die Ladung beim Opel Astra ca. 50 min und beim VW T4 ca. 90 min. Nur das Fahrzeug C58 konnte mit der maximalen Ladeleistung der Schnellladestation in Bergen von 60 kW geladen werden.

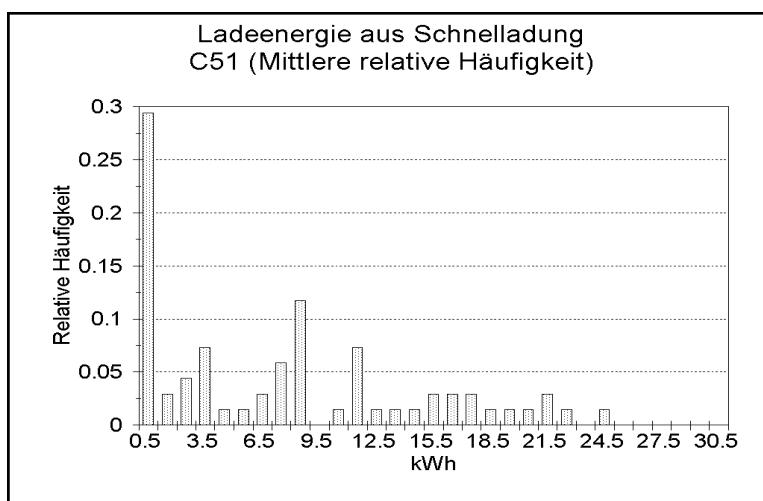


Bild 4.3.27: Ladeenergie der Schnellladung des C 51

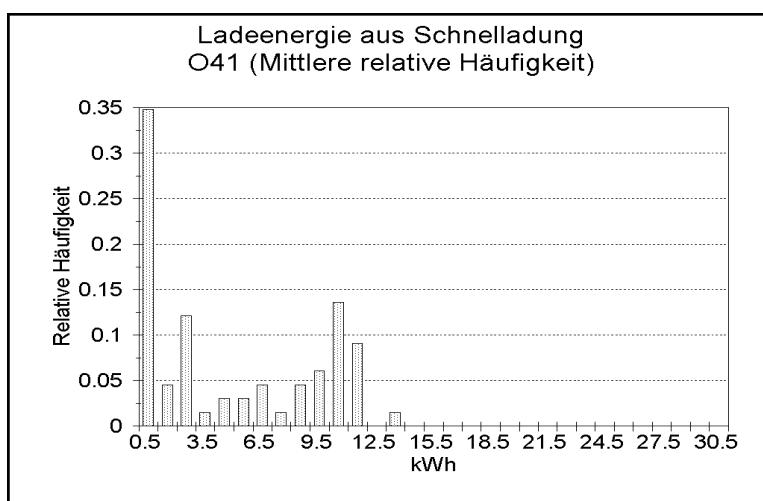


Bild 4.3.28: Ladeenergie der Schnellladung des O 41

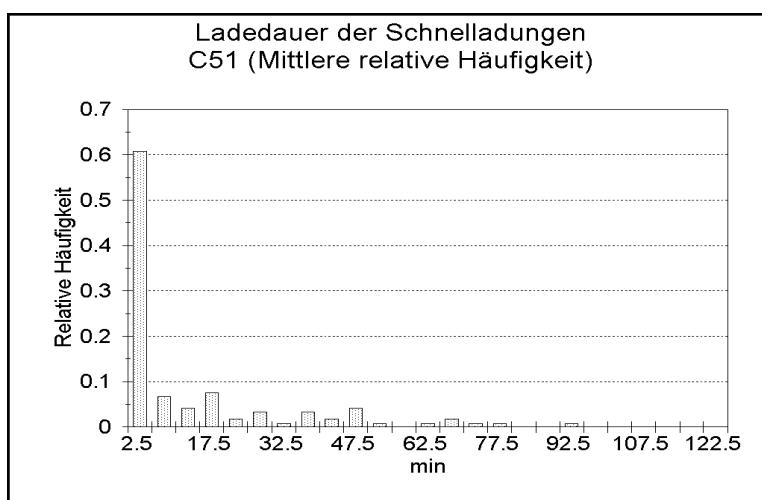


Bild 4.3.29: Ladedauer der Schnellladung des C51

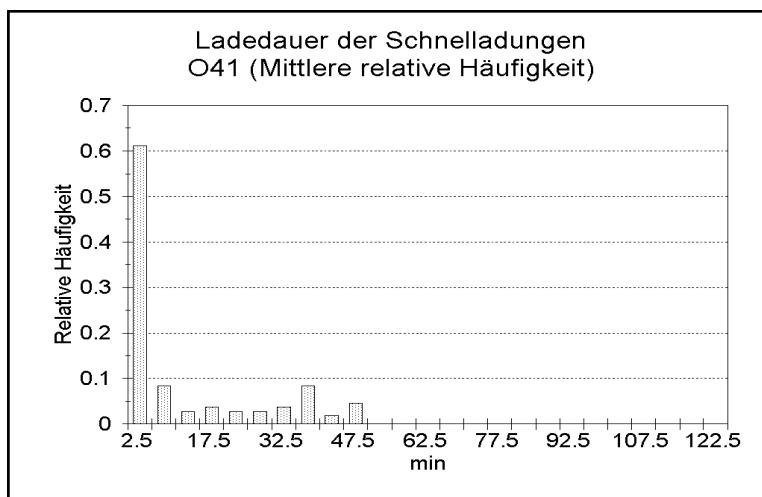


Bild 4.3.30: Ladeedauer der Schnellladung des O 41

Batterieverluste aller Fahrzeuge

In Tabelle 4.3.10 sind die Batterieverluste in den einzelnen Fahrzeugen gegliedert nach Batteriesystemen zusammengefaßt dargestellt.

Aufgrund des ungünstigen Meßverfahrens beim Opel Astra mit NaNiCl_2 -Batterien für die Heizleistung aus dem Netz (s. Punkt 12.3.3.1) sind die dafür erforderlichen Energien stärker fehlerbehaftet als bei anderen Fahrzeugen. Besonders weit weicht der Wert beim O35 vom erwarteten ab.

In den Fahrzeugen MB 190 und Opel Astra wurde die für die Batterielüfter benötigte Energie gesondert erfaßt. Aus der ermittelten Einschaltzeit und der vorgegebenen Lüfterleistung wird die Energie berechnet. Sie wird in der Verlustrechnung für Batterie und Bordnetz berücksichtigt, beträgt aber nur ca. 1% der Energieaufnahme der Batterie.

Fzg.-Nr.	Batt.typ	Nennenergie der Batterie kWh	Fahrzeug-Masse t	Weg km/Tag	Netzenergie für Batterieheizung kWh/Tag	Batterieverlust ohne Heizung kWh/Tag	Spezifischer Verlust der Traktionsbatterie kWh/km	Verlust der Traktionsbatterie kWh/tkm
B01	NaNiCl	21,7	1,41	49,3	2,038	2,258	0,087	0,062
B02	NaNiCl	21,7	1,41	39,0	1,896	1,315	0,082	0,058
B04	NaNiCl	21,7	1,41	36,6	1,263	2,708	0,109	0,077
B05	NaNiCl	21,7	1,41	46,5	1,939	4,404	0,136	0,096
B06	NaNiCl	21,7	1,41	49,5	2,197	1,486	0,074	0,052
B07	NaNiCl	17,0	1,57	49,9	0,000	3,600	0,072	0,046
M12	NaNiCl	26,0	1,50	45,2	2,506	2,482	0,110	0,074
M13	NaNiCl	26,0	1,50	27,5	2,156	3,792	0,216	0,144
M14	NaNiCl	26,0	1,50	47,0	2,440	3,261	0,121	0,081
M15	NaNiCl	26,0	1,50	30,5	3,290	2,725	0,197	0,131
M16	NaNiCl	26,0	1,50	133,6	1,356	6,080	0,056	0,037
M17	NaNiCl	26,0	1,50	39,4	3,074	2,818	0,150	0,100
M18	NaNiCl	26,0	1,50	63,5	3,054	3,901	0,110	0,073
T19	NaNiCl	34,0	2,55	23,9	3,368	3,590	0,291	0,114
T20	NaNiCl	34,0	2,55	43,1	2,666	2,955	0,130	0,051
T21	NaNiCl	34,0	2,55	30,7	1,758	5,609	0,240	0,094
T22	NaNiCl	34,0	2,55	11,4	4,780	2,089	0,603	0,236
T23	NaNiCl	34,0	2,55	12,1	4,340	1,095	0,449	0,176
T24	NaNiCl	34,0	2,55	22,2	4,295	1,672	0,269	0,105
T25	NaNiCl	34,0	2,55	59,4	2,808	5,936	0,147	0,058
T26	NaNiCl	34,0	2,55	3,1	3,776	0,830	1,486	0,583
O32	NaNiCl	25,9	1,47	44,9	2,901	2,842	0,128	0,087
O33	NaNiCl	25,9	1,47	45,7	3,270	2,766	0,132	0,090
O34	NaNiCl	25,9	1,47	52,5	2,351	4,265	0,126	0,086
O35	NaNiCl	25,9	1,47	60,8	1,285	3,296	0,075	0,051
O36	NaNiCl	25,9	1,47	54,7	3,183	2,110	0,097	0,066
V43	NaNiCl	22,0	1,36	54,6	3,137	1,886	0,092	0,068
V47	NaNiCl	17,0	1,30	35,9	1,769	2,260	0,112	0,086
V49	NaNiCl	22,0	1,36	37,6	1,536	1,920	0,092	0,068
V50	NaNiCl	17,0	1,30	25,1	2,048	1,546	0,143	0,110
N31	NaS	57,6	5,15	61,4	3,025	6,851	0,161	0,031
B08	NiCd	12,0	1,4	59,1		8,272	0,140	0,100
M09	NiCd	12,5	1,48	13,8		4,551	0,330	0,223
M11	NiCd	12,5	1,48	29,8		3,840	0,129	0,087
T27	NiCd	24,4	2,75	11,6		6,149	0,530	0,193
T28	NiCd	24,4	2,75	7,0		3,696	0,528	0,192
O37	NiCd	15,0	1,53	40,7		3,906	0,096	0,063
O38	NiCd	15,0	1,53	26,6		2,495	0,094	0,061
O39	NiCd	15,0	1,53	24,4		2,478	0,102	0,066
O40	NiCd	15,0	1,53	15,7		2,079	0,132	0,087
O41	NiCd	15,0	1,53	45,3		4,735	0,105	0,068
V45	NiCd	14,4	1,38	21,6		3,767	0,174	0,126
V48	NiCd	14,4	1,38	31,0		3,963	0,128	0,093
C51	NiCd	22,8	2,35	52,2		6,734	0,129	0,055
C52	NiCd	22,8	2,35	17,9		5,639	0,315	0,134
C53	NiCd	22,8	2,35	31,6		5,123	0,162	0,069
C54	NiCd	22,8	2,35	17,4		5,988	0,344	0,146
C55	NiCd	22,8	2,35	22,9		6,478	0,283	0,120
C56	NiCd	22,8	2,35	11,4		4,808	0,422	0,179
C57	NiCd	22,8	2,35	23,5		4,287	0,182	0,078
C58	NiCd	22,8	2,35	39,6		5,374	0,136	0,058
C59	NiCd	22,8	2,35	37,0		6,564	0,177	0,075
C60	NiCd	22,8	2,35	24,0		6,050	0,252	0,107
V42	Pb	11,4	1,58	46,8		1,348	0,029	0,018
V44	Pb	11,4	1,58	19,3		0,704	0,036	0,023

Tabelle 4.3.10: Mittlere Batterieverluste aller Fahrzeuge

Die letzte Spalte in Tabelle 4.3.10 zeigt deutlich, daß Fahrzeuge mit einer niedrigen Tages-km-Leistung einen hohen spezifischen auf die Masse bezogenen Verlust aufweisen. Man kann deshalb nur Fahrzeuge mit unterschiedlichen Batteriesystemen vergleichen, wenn etwa eine gleiche Tages-km-Leistung vorliegt.

Betrachtet man Pkw mit ca. 50 km/Tag, so zeigt sich, daß die beiden Batterietypen Natrium-Nickelchlorid- und Nickel-Cadmium-Batterie im spezifischen auf die Masse bezogenen Verlust der Batterien ähnliche Werte aufweisen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß es sich in Tabelle 4.3.10 um Mittelwerte des ganzen Jahres handelt und damit die Herabsetzung der Standverluste bei den Nickel-Cadmium-Batterien nicht voll eingegangen ist. Wenn die Standverluste so niedrig bleiben können, werden sie voraussichtlich unter denen der Natrium-Nickelchlorid-Batterie liegen.

Der Verlust der Natrium-Schwefel-Batterie des N31 ist deutlich kleiner. Das für diesen Batterietyp vorliegende Datenmaterial ist aber so gering, daß daraus keine gesicherten Aussagen abgeleitet werden können.

Die Blei-Batterie hat unter Berücksichtigung der Heizung wahrscheinlich einen höheren Verlust als die beiden erstgenannten Batterietypen.

Für das Fahrzeug B07 konnte der Verbrauch für die Heizung der Traktionsbatterie aus dem Netz nicht ermittelt werden, so daß die spezifischen Werte für den gesamten Energieverlust der Batterie nicht angegeben werden können.

Energiedurchsatz der Traktionsbatterien

Im folgenden wird abgeschätzt, wie hoch der Energiedurchsatz der einzelnen Batterien während des Versuches auf Rügen war. Der Energiedurchsatz ausgedrückt als Vielfaches der Nennenergie kann nicht genau berechnet werden, weil nur für einen Teil der auf Rügen insgesamt gefahrenen Strecke plausible Meßdaten vorliegen.

Mit Hilfe der Meßdaten kann die im Mittel von der Traktionsbatterie je Fahrzeug und Kilometer aufgenommene Energie berechnet werden.

Aus den Fahrtenbüchern der einzelnen Fahrzeuge geht die gesamte auf Rügen gefahrene Strecke hervor. Außerdem gibt es von der DAUG/Zirkow Informationen, nach welcher Fahrstrecke ein kompletter bzw. teilweiser Batteriewechsel stattgefunden hat.

Durch eine Hochrechnung unter Nutzung der aus den Meßdaten berechneten Energieaufnahme der Batterien pro km Fahrstrecke, der Nennenergie der Batterie und der gesamt gefahrenen Kilometer wird für jede Batterie der Energiedurchsatz als Vielfaches der Nennenergie der Batterie abgeschätzt.

In der Tabelle 4.3.11 sind die benutzten Daten und die daraus errechneten Zyklen mit Batterie-Nennenergie eingetragen.

Fzg.-Nr.	Batterie-typ	Batteriebauart	Nenn-Energie kWh	Mittlere Fahrstrecke km/Tag	Spez. Eingangs-Energie der Batt. kWh/km	Fahrtenbuch bis Dez 95 km 1.Batt.Satz	Zyklen 1. Batt Satz	bis Dez 95 km 2.Batt. Satz	Zyklen 2. Batt. Satz
B01	NaNiCl	1-teilig	21,7	49,3	0,194	21922	196	169	2
B02	NaNiCl	"	21,7	39,0	0,214	18856	186		
B03	NaNiCl	"	21,7	62,6	0,200	7693	71	1791	17
B04	NaNiCl	"	21,7	36,6	0,287	11957	158		
B05	NaNiCl	"	21,7	46,5	0,231	20921	223		
B06	NaNiCl	"	21,7	49,5	0,199	2859	26	14626	134
B07	NaNiCl	"	17	49,9	0,250	17332	255		
M12	NaNiCl	2-teilig	26	45,2	0,248	17657*	168	8327	79
M13	NaNiCl	"	26	27,5	0,312	12931*	155	8930*	107
M14	NaNiCl	"	26	47,0	0,272	34791*	364		
M15	NaNiCl	"	26	30,5	0,259	26454*	264		
M16	NaNiCl	"	26	133,6	0,266	78149*	799		
M17	NaNiCl	"	26	39,4	0,264	22779*	232		
M18	NaNiCl	"	26	63,5	0,242	14644*	136		
T19	NaNiCl	"	34	23,9	0,519	4975	76	11308	173
T20	NaNiCl	"	34	43,1	0,500	23663*	348		
T21	NaNiCl	"	34	30,7	0,494	15436*	224		
T22	NaNiCl	"	34	11,4	0,575	5863*	99		
T23	NaNiCl	"	34	12,1	0,531	4975	78		
T24	NaNiCl	"	34	22,2	0,530	13370	208		
T25	NaNiCl	"	34	59,4	0,549	12688	205		
T26	NaNiCl	"	34	2,5	0,514	3153	48		
O32	NaNiCl	"	25,9	44,9	0,187	18546*	134		
O33	NaNiCl	"	25,9	45,7	0,211	16962*	138		
O34	NaNiCl	"	25,9	52,5	0,230	29366*	260		
O35	NaNiCl	"	25,9	60,8	0,211	26663*	217		
O36	NaNiCl	"	25,9	54,7	0,171	17584*	116		
V43	NaNiCl	"	22	54,6	0,147	20144	134		
V47	NaNiCl	"	17	35,9	0,234	7210	99		
V49	NaNiCl	"	22	37,6	0,176	25279	202		
V50	NaNiCl	"	17	25,1	0,236	5744	80		
N29	NaS	3-teilig	57,6		0,700	4239	52	4020*	51
N30	NaS	"	57,6		0,700	7380*	90		
N31	NaS	"	57,6	61,4	0,696	12000*	144	5252	63
B08	NiCd	Einzel-zellen	12			14460		34	
M09	NiCd	"	12,5	13,8	0,298	15885*	379		
M10	NiCd	"	12,5		0,300	21902*	526		
M11	NiCd	"	12,5	29,8	0,303	26093*	633		
T27	NiCd	"	24,4	11,6	1,593	8486*	554		
T28	NiCd	"	24,4	7,0	0,820	7112	239		
O37	NiCd	"	15	40,7	0,253	20274*	342		
O38	NiCd	"	15	26,6	0,263	26005*	455		
O39	NiCd	"	15	24,4	0,256	5306	91	16931*	289
O40	NiCd	"	15	15,7	0,286	15848*	303		
O41	NiCd	"	15	45,3	0,228	39338*	597		
V45	NiCd	"	14,4	21,6	0,329	16865	385		
V48	NiCd	"	14,4	31,0	0,296	17214	354		
C51	NiCd	"	22,8	52,2	0,374	3910	64	36821*	604
C52	NiCd	"	22,8	17,9	0,636	14468	403		
C53	NiCd	"	22,8	31,6	0,405	20560	366		
C54	NiCd	"	22,8	17,4	0,593	20895*	544		
C55	NiCd	"	22,8	22,9	0,553	15615	378		
C56	NiCd	"	22,8	11,4	0,660	14150	409		
C57	NiCd	"	22,8	23,5	0,575	12518*	315		
C58	NiCd	"	22,8	39,6	0,377	15355*	254		
C59	NiCd	"	22,8	37,0	0,400	17466*	306		
C60	NiCd	"	22,8	24,0	0,531	9954	232		
V42	Pb-Gel	Module	11,4	46,8	0,252	22154*	489		
V44	Pb-Gel	"	11,4	19,3	0,232	1764*	36	5770	117

* 1 Teilbatterie vorher getauscht bei Na/NiCl₂ | Na/S | Pb; bzw. 1 - 20% der Zellen getauscht bei Ni/Cd

Tabelle 4.3.11: Abschätzung des Energiedurchsatzes für die Batterien

Die spezifische Energieaufnahme der Traktionsbatterien ergibt sich aus folgender Betrachtung: Vom mittleren spezifischen Energieverbrauch der Fahrzeuge gemäß Tabelle 4.3.1 wird für die geheizten Batterien (NaNiCl und NaS) der aus Tabelle 4.3.10 berechnete mittlere spezifische Energieverbrauch für die Heizung der Batterie aus dem Netz abgezogen. Durch Multiplikation mit dem mittleren Wirkungsgrad der Ladewandler von 0,85 erhält man die mittlere spezifische Eingangsenergie der Traktionsbatterien. Der geringe Verbrauch des Bordnetzes während der Ladung wurde vernachlässigt.

Für die Fahrzeuge B03, B07, T22, N29, N30 und M10 fehlte ein plausibler Wert für die Heizenergie und/oder den spezifischen Netzenergieverbrauch. Deshalb wurde aus dem Vergleich mit ähnlichen Fahrzeugen für diese Fahrzeuge ein Wert für die mittlere spezifische Eingangsenergie der Traktionsbatterie angenommen. Weil für das Fahrzeug B08 ein solcher Vergleichswert fehlt, kann der Energiedurchsatz für dieses Fahrzeug nicht eingeschätzt werden.

Aus den Unterlagen geht hervor, daß bei den Fahrzeugen B01, B03, B06 sowie T19 die Natrium-Nickelchlorid-Batterie, beim Fahrzeug N29 die Natrium-Schwefel-Batterie und bei den Fahrzeugen B08, O39, C51 die Nickel-Cadmium-Batterie komplett getauscht wurden. Außerdem erfolgte bei den Fahrzeugen M12 und M13 nacheinander der Tausch beider Teilbatterien, so daß nach den angegebenen Fahrkilometern auch hier die komplette Batterie getauscht war. In den Fahrzeugen M13, N29 und V44 war ein zusätzlicher Austausch einer kompletten Batterie notwendig, wobei die getauschten Batterien mit weniger als 100 Zyklen belastet waren.

In den Fahrzeugen M14, M16, M17, M18, T20, T21, T22, O32, O33 sowie O36 erfolgte ein Austausch einer der beiden Natrium-Nickelchlorid-Teilbatterien und in den Fahrzeugen M09, M10, M11, T27, O37, O38, O39, O40 sowie O41 ein teilweiser Austausch von Zellen der Nickel-Cadmium-Batterie. Dabei wurden 1% bis 20% der Zellen einer Batterie ausgetauscht.

Auf Rügen ergaben sich bis Versuchsende folgende maximal erreichte Werte für den Energiedurchsatz der verschiedenen Batterietypen bezogen auf die Nennenergie der Batterien:

Natrium-Nickelchlorid-Batterien	800 Zyklen (MB 190 - M16),
Nickel-Cadmium-Batterie	630 Zyklen (MB 190 - M11),
Natrium-Schwefel-Batterie	210 Zyklen (NEOPLAN - N31),
Blei-Gel-Batterie	490 Zyklen (GOLF - V42).

12.4.3.4. Energieverbrauch der Ladewandler

Im allgemeinen werden die Traktionsbatterien über den on-board befindlichen Ladewandler aus dem Netz geladen. Im Laufe des Auswertezeitraums 1995 wurden zunehmend Fahrzeuge mit NiCd-Batterien schnellladefähig und nutzten die Stationen in Zirkow und Bergen. Der Wirkungsgrad der Schnelladestation wird mit 0,9 eingesetzt.

Am Beispiel des Fahrzeugs Mercedes Benz MB 190 (M15) sollen die typischen Verbrauchsparameter erläutert werden. Der Verlust des Ladewandlers ergibt sich bekanntermaßen aus der Differenz von Ein- und Ausgangsenergie. In den Bildern 4.3.31 und 4.3.32 sind die erfaßten Werte für den Ladewandlerverlust in Abhängigkeit von der Eingangsenergie und der Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der gefahrenen Wegstrecke dargestellt.

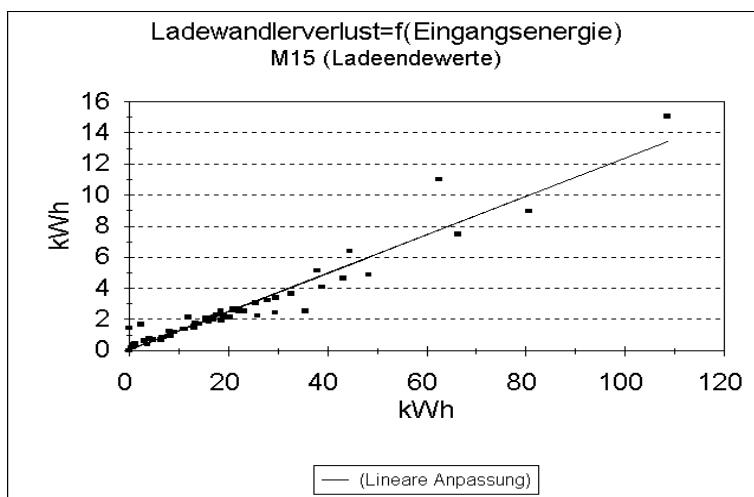


Bild 4.3.31: Ladewandlerverlust in Abhängigkeit von der Eingangsenergie beim M15

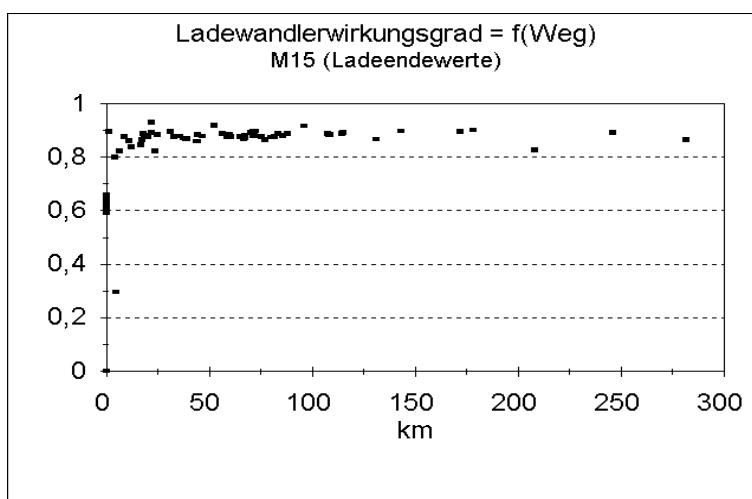


Bild 4.3.32: Wirkungsgrad des Ladewandlers in Abh. vom gefahrenen Weg beim M15

Den daraus ermittelten spezifischen Ladewandlerverlust in Abhängigkeit vom Weg zeigt Bild 4.3.33.

Der mittlerer errechnete Wirkungsgrad liegt für diesen Ladewandler bei 0.88. Für den spezifischen Verbrauch erhält man für Wege >50 km Werte zwischen 0.02 und 0.04 kWh/km. Wie aus Bild 4.3.33 zu ersehen ist, steigen die Werte für kleinere Wege zwischen den Zuständen "Batterie voll" an.

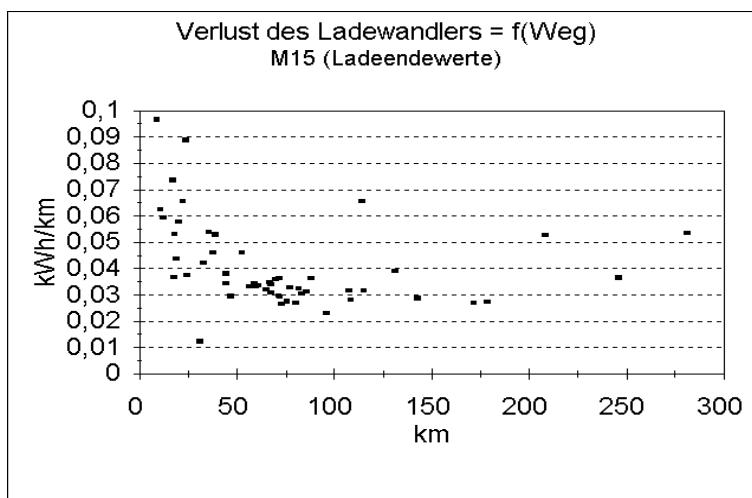


Bild 4.3.33: Spez. Verlust des Ladewandlers in Abh. vom gefahrenen Weg beim M15

Die Abweichungen der gemessenen Verlustwerte von der Regressionsgeraden im Bild 4.3.31 werden durch folgende Ursachen hervorgerufen:

- unterschiedliche zeitliche Abstände zwischen Ladeendezuständen
- nicht richtig erfaßtes Ladeende und
- Meßfehler (vgl. 12.3.3.1)

In Tabelle 4.3.12 sind die Ladewandlerverluste aller Fahrzeuge aufgeführt.

Der Wirkungsgrad charakterisiert die Qualität des Ladewandlers am eindruckvollsten. Voraussetzung ist dabei, daß genügend Energie über den Wandler fließt. Die Wirkungsgrade liegen zwischen 56% und 95%.

Der Ladewandler des MB 190 mit NaNiCl-Batterie enthält einen Lüfter, der vom Bordnetz versorgt wird und immer eingeschaltet ist, solange geladen wird. Die dafür erforderliche Energie ergibt sich aus der Ladedauer und der vorgegebenen Lüfterleistung. Diese Energie wird in den Verlust des Ladewandlers eingerechnet und aus der gemessene Bordenergie herausgerechnet. Bei einer mittleren Ladedauer von 6 h/Tag sind dafür 0.330 kWh/Tag erforderlich. Der M16 mit 15.4 h/Tag Ladedauer benötigt für den Lüfter 0.85 kWh/Tag.

Bei einigen Fahrzeugen sind keine vernünftigen Werte vorhanden, so daß die spezifischen Verluste und der Wirkungsgrad des Ladewandlers nicht ermittelt werden konnten. Die fehlenden Werte bei den Fahrzeugen B08, M09, T20, T27, und N31 sind durch den langfristigen Ausfall des Netzenergiezählers (LVM bzw. LVT) und der fehlerhafte Wert beim Fahrzeug V43 ist durch Meßfehler verursacht.

Fzg.-Nr.	mittlerer Weg km/Tag	Energie vor dem Ladewandler kWh/Tag	Ladeenergie nach dem Ladewandler kWh/Tag	Spezifischer Verlust des Ladewandlers kWh/km	kWh/tkm	Wirkungsgrad des Ladewandlers
B01	49,3	11,00	10,05	0,019	0,014	91%
B02	39,0	9,70	8,78	0,023	0,017	91%
B04	36,6	12,53	10,89	0,045	0,032	87%
B05	46,5	13,66	13,41	0,005	0,004	98%
B06	49,5	10,99	8,75	0,045	0,032	80%
B07	49,9	16,93	12,60	0,087	0,055	74%
B08	59,1					
M09	13,8					
M11	29,8	10,29	9,80	0,016	0,011	95%
M12	45,2	13,15	11,23	0,042	0,028	85%
M13	27,5	11,27	10,21	0,039	0,026	91%
M14	47,0	15,00	12,91	0,045	0,030	86%
M15	30,5	9,98	8,92	0,035	0,023	89%
M16	133,6	41,07	34,43	0,050	0,033	84%
M17	39,4	12,58	10,50	0,053	0,035	83%
M18	63,5	19,75	17,61	0,034	0,022	89%
T19	23,9	15,12	13,77	0,056	0,022	91%
T20	43,1					
T21	30,7	17,92	16,00	0,062	0,024	89%
T22	11,4	7,38	5,94	0,126	0,049	81%
T23	12,1	7,48	5,15	0,193	0,076	69%
T24	22,2	13,84	9,61	0,190	0,075	69%
T25	59,4	35,21	25,87	0,157	0,062	73%
T26	3,1	2,49	2,13	0,115	0,045	86%
T27	11,6	0,40	11,01			
T28	7,0	7,35	5,69	0,238	0,086	77%
N31	61,4					
O32	44,9	10,82	10,09	0,016	0,011	93%
O33	45,7	11,05	10,28	0,017	0,011	93%
O34	52,5	14,28	13,34	0,018	0,012	93%
O35	60,8	14,53	13,75	0,013	0,009	95%
O36	54,7	10,85	9,85	0,018	0,012	91%
O37	40,7	12,15	11,13	0,025	0,016	92%
O38	26,6	7,98	6,88	0,041	0,027	86%
O39	24,4	7,43	6,53	0,037	0,024	88%
O40	15,7	5,30	4,63	0,043	0,028	87%
O41	45,3	10,22	9,09	0,025	0,016	89%
V42	46,8	15,59	8,67	0,148	0,094	56%
V43	54,6	9,96	10,44			
V44	19,3	5,28	3,45	0,094	0,060	65%
V45	21,6	8,64	7,17	0,068	0,049	83%
V47	35,9	9,64	8,38	0,035	0,027	87%
V48	31,0	11,13	9,49	0,053	0,038	85%
V49	37,6	9,49	8,27	0,032	0,024	87%
V50	25,1	8,22	6,79	0,057	0,044	83%
C51	52,2	19,91	16,68	0,062	0,026	84%
C52	17,9	12,74	10,13	0,146	0,062	80%
C53	31,6	14,57	12,05	0,080	0,034	83%
C54	17,4	12,44	10,41	0,116	0,049	84%
C55	22,9	14,68	12,40	0,099	0,042	85%
C56	11,4	8,90	7,24	0,146	0,062	81%
C57	23,5	15,85	10,23	0,239	0,102	65%
C58	39,6	11,03	10,31	0,018	0,008	93%
C59	37,0	16,75	15,86	0,024	0,010	95%
C60	24,0	15,03	12,33	0,113	0,048	82%

Tabelle 4.3.12: Ladewandlerverluste aller Fahrzeuge

12.4.3.5. Energieverbrauch des allgemeinen Bordnetzes

Wie unter Punkt 12.3.2 beschrieben, wird der Energieverbrauch des Bordnetzes vom Meßsystem sowohl als Tageswert als auch als Ladeendewert erfaßt. Zur Vermeidung von Fehlern infolge des TDS-Offsets (Strommessung) werden außerhalb der Fahrt nur Werte registriert, die oberhalb der gewählten Offsetgrenze liegen.

Das Bordladeregime in den verschiedenen Fahrzeugtypen ist unterschiedlich. Beim BMW 3-er wird außerhalb der Fahrt (Klemme 15 "Aus") die Bordbatterie nicht geladen. Die Fahrzeuge Mercedes Benz MB 190 können die Bordbatterie in allen drei Anwendungsphasen (Fahren, Laden und Stehen) laden. Bei anderen Fahrzeugen erfolgt die Ladung der Bordbatterie beim Fahren und Laden.

Die folgenden Diagramme zeigen für einige Beispieldfahrzeuge mit typischen Bordenergieverbächen die erfaßten Tageswerte.

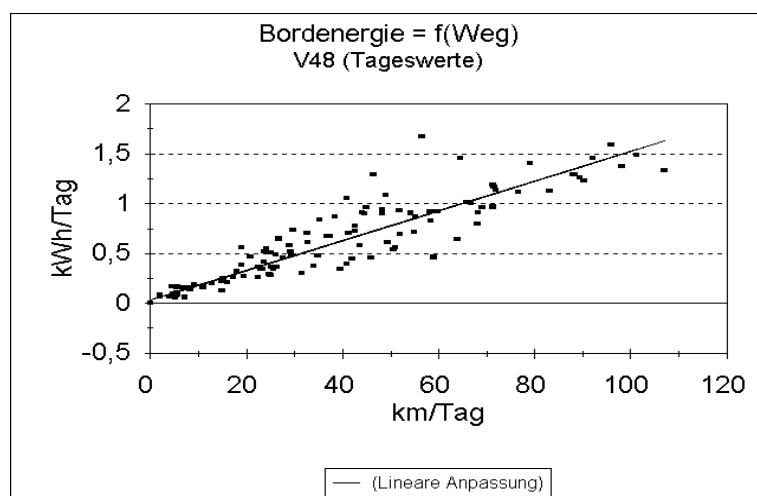


Bild 4.3.34: Täglicher Bordenergieverbr. des VW Golf (V48) in Abh. vom gefahrenen Weg

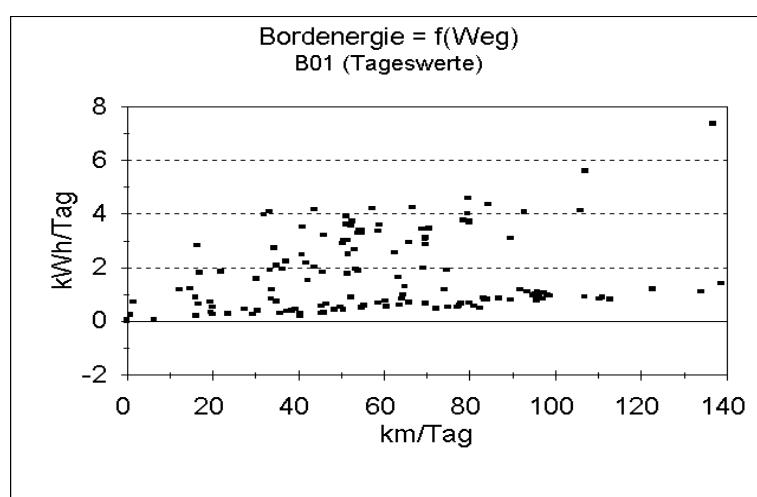


Bild 4.3.35: Täglicher Bordenergieverbr. des BMW (B01) in Abh. vom gefahrenen Weg

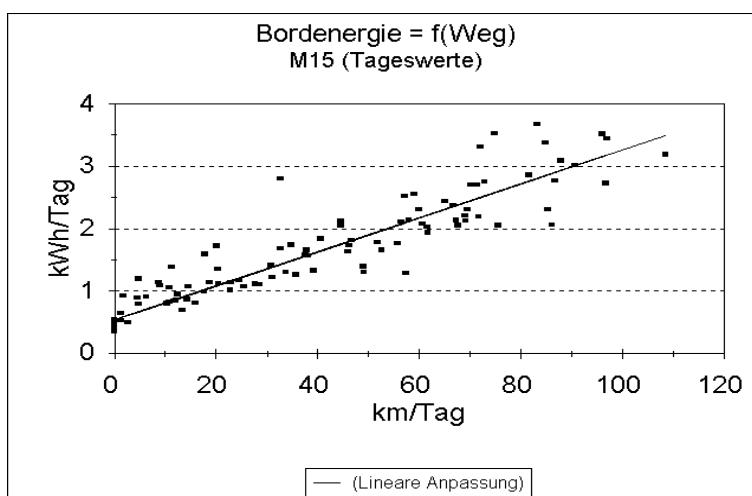


Bild 4.3.36: Täglicher Bordenergieverbrauch des Mercedes Benz MB 190 (M15) in Abhängigkeit vom gefahrenen Weg

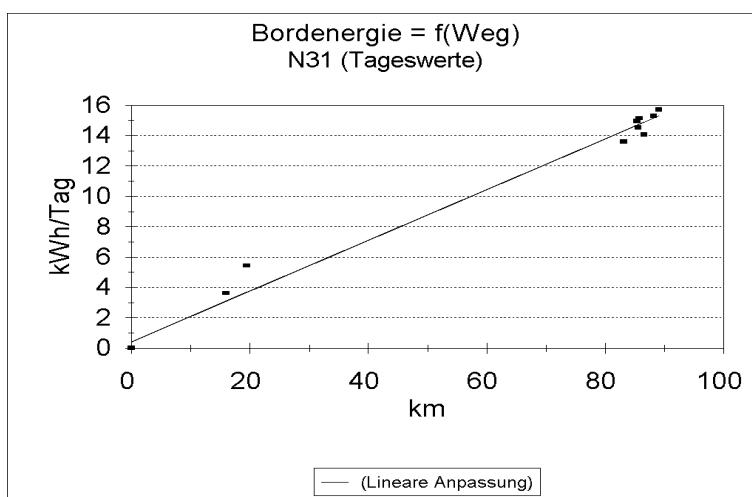


Bild 4.3.37: Täglicher Bordenergieverbrauch des NEOPLAN-Busses (N31) in Abhängigkeit vom gefahrenen Weg

Der mittlere spezifische Bordverbrauch beträgt beim Golf (Bild 4.3.34) 0.015 kWh/km. Das entspricht bei der für das Fahrzeug ermittelten mittleren Geschwindigkeit von 39 km/h einer Leistung von 590 W. Der spezifische Bordverbrauch weist eine Spannweite von 0.007 kWh/km bis 0.030 kWh/km auf. Diese wird durch die unterschiedliche Benutzung von Zusatzverbrauchern wie Licht, Innenraumgebläse u.a. hervorgerufen.

Der hohe Bordenergieverbrauch beim BMW wird durch die elektrische Innenraumheizung verursacht. Alle anderen Fahrzeuge hatten eine Kraftstoffheizung für den Fahrgastrraum. Die niedrigen Werte im Bild 4.3.35 stammen aus den Sommertagen. Für diese Zeit liegt der spezifische Bordverbrauch beim BMW bei etwa 0.01 kWh/km. Als mittlerer Bordverbrauch ohne Heizung für das ganze Jahr ist auch beim BMW mit dem Wert von etwa 0.015 kWh/km zu rechnen.

Die Bordbatterie des MB 190 wird aus Sicherheitsgründen im Rügenversuch auch während langer Standphasen mit ca. 0.5 kWh/Tag geladen. Der spezifische Bordverbrauch liegt bei

Fahrstrecken über 50 km bei etwa 0.04 kWh/km. Dieser Verbrauch erklärt sich durch die Servo-Lenkung und andere Komfortzusatzgruppen.

Ein wesentlich höherer Bordenergieverbrauch ist auch beim NEOPLAN-Bus zu verzeichnen (Bild 4.3.37). Der daraus berechnete spezifische Bordverbrauch beträgt 0.17 kWh/km. Der Bus fuhr im Betrachtungszeitraum mit einer mittleren Geschwindigkeit von 10.2 km/h. Damit entspricht der spezifische Verbrauch einer Leistung von 1.72 kW. Daran ist mit ca. 550 W der Kompressormotor beteiligt. Der Bus ist mit weiteren Zusatzverbrauchern ausgestattet, die den Bordnetzverbrauch plausibel erscheinen lassen.

Wie die Zusammenstellung der erfaßten Bordenergieverbräuche in Tabelle 4.3.13 zeigt, weisen auch die Transporter und Kleinbusse einen höheren Bordenergieverbrauch als die PKW auf.

Der durch die implementierte Meßtechnik hervorgerufene höhere Bordenergieverbrauch von ca. 120 Wh/Tag und die bei einigen Fahrzeugen aufgetretene Offsetüberschreitung im Bordnetz wurden korrigiert.

12.4.3.6. Heizung des Fahrgastraumes

Die Heizung des Fahrgastraumes und die Erfassung der dafür benötigten Energie war bei den verschiedenen Fahrzeugtypen unterschiedlich gestaltet. Die BMW-Fahrzeuge hatten eine elektrische Heizung und entnahmen die dafür notwendige Energie dem allgemeinen Bordnetz. Alle anderen Fahrzeuge besaßen eine Benzin- (Mercedes Benz 190 und VW T4) oder Dieselheizung (Mercedes 100E, NEOPLAN, Opel Astra und VW Golf).

Bei den BMW-Fahrzeugen war eine eindeutige Trennung des Energiebedarfs der Heizung für den Fahrgastraum von der Energie für das übrige Bordnetz während des Versuches nicht möglich. Eine Einschätzung des Verbrauchs für die Heizung wird weiter unten angegeben.

Der Kraftstoffverbrauch der Heizung bei den Pkw Mercedes Benz MB 190 wurde gemessen und im Tagesprotokoll erfaßt. Bei den übrigen Fahrzeugen erfolgte die Erfassung des Kraftstoffverbrauchs der Heizung über die Messung der Einschaltdauer der Heizung, die ebenfalls im Tagesprotokoll enthalten ist. Da die Verbrauchswerte der einzelnen Heizanlagen von der Einstellung abhängig sind, kann der Kraftstoffverbrauch für die Heizung nicht genau angegeben werden. Außerdem waren die Nutzer angehalten, die getankte Kraftstoffmenge in das Fahrtenbuch einzutragen.

Bild 4.3.38 zeigt die auf Rügen an den Fahrzeugen VW T4 (C54) und Mercedes Benz MB 190 (M17) gemessenen Tagesmittelwerte für den Temperaturverlauf über das Jahr 1995. Dabei ändert sich die Temperatur im Tagesverlauf etwa im Bereich $\pm 10^\circ$ um den Tagesmittelwert.

Fzg.-Nr.	Mittlerer Weg km/Tag	Bordenergie kWh/Tag	Spezifischer Verbrauch des Bordnetzes	
			kWh/km	kWh/tkm
B01	49,3	1,430	0,029	0,021
B02	39,0	2,551	0,065	0,046
B04	36,6	2,151	0,059	0,042
B05	46,5	3,119	0,067	0,048
B06	49,5	1,476	0,030	0,021
B07	49,9	0,482	0,010	0,006
B08	59,1	3,905	0,066	0,047
M09	13,8	0,592	0,043	0,029
M11	29,8	0,934	0,031	0,021
M12	45,2	1,883	0,042	0,028
M13	27,5	1,367	0,050	0,033
M14	47,0	1,953	0,042	0,028
M15	30,5	1,322	0,043	0,029
M16	133,6	3,968	0,030	0,020
M17	39,4	1,844	0,047	0,031
M18	63,5	2,473	0,039	0,026
T19	23,9	0,682	0,029	0,011
T20	43,1	1,166	0,027	0,011
T21	30,7	0,953	0,031	0,012
T22	11,4	0,612	0,054	0,021
T23	12,1	0,451	0,037	0,015
T24	22,2	0,671	0,030	0,012
T25	59,4	0,761	0,013	0,005
T26	3,1	0,061	0,020	0,008
T27	11,6			
T28	7,0	0,287	0,041	0,015
N31	61,4	10,409		
O32	44,9	0,328	0,007	0,005
O33	45,7	0,272	0,006	0,004
O34	52,5	0,458	0,009	0,006
O35	60,8	0,490	0,008	0,005
O36	54,7	0,305	0,006	0,004
O37	40,7	0,025	0,001	0,000
O38	26,6	0,293	0,011	0,007
O39	24,4	0,327	0,013	0,009
O40	15,7	0,444	0,028	0,018
O41	45,3	0,176	0,004	0,003
V42	46,8	0,359	0,008	0,005
V43	54,6	0,755	0,014	0,010
V44	19,3	0,326	0,017	0,011
V45	21,6	0,445	0,021	0,015
V47	35,9	0,364	0,010	0,008
V48	31,0	0,445	0,014	0,010
V49	37,6	0,418	0,021	0,016
V50	25,1	0,433	0,017	0,013
C51	52,2	1,412	0,027	0,012
C52	17,9	0,509	0,028	0,012
C53	31,6	0,718	0,023	0,010
C54	17,4	0,390	0,022	0,010
C55	22,9	0,247	0,011	0,005
C56	11,4	0,249	0,022	0,009
C57	23,5	0,545	0,023	0,010
C58	39,6	0,623	0,016	0,007
C59	37,0	0,920	0,025	0,011
C60	24,0	0,501	0,021	0,009

Tabelle 4.3.13: Mittlerer Bordenergieverbrauch aller Fahrzeuge

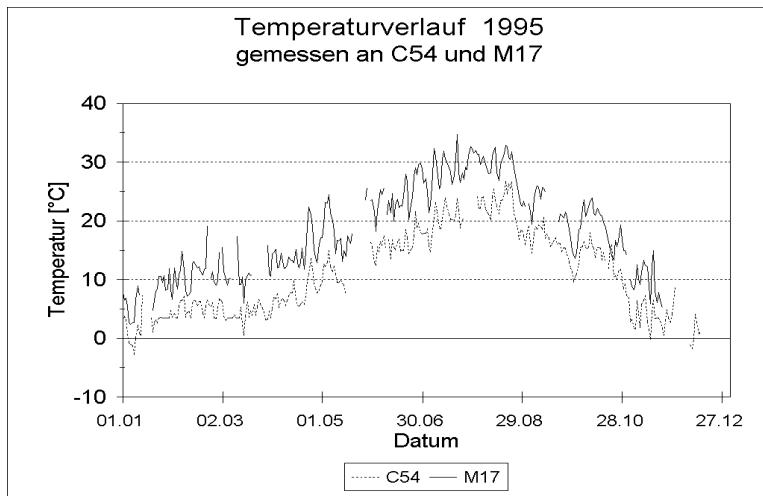
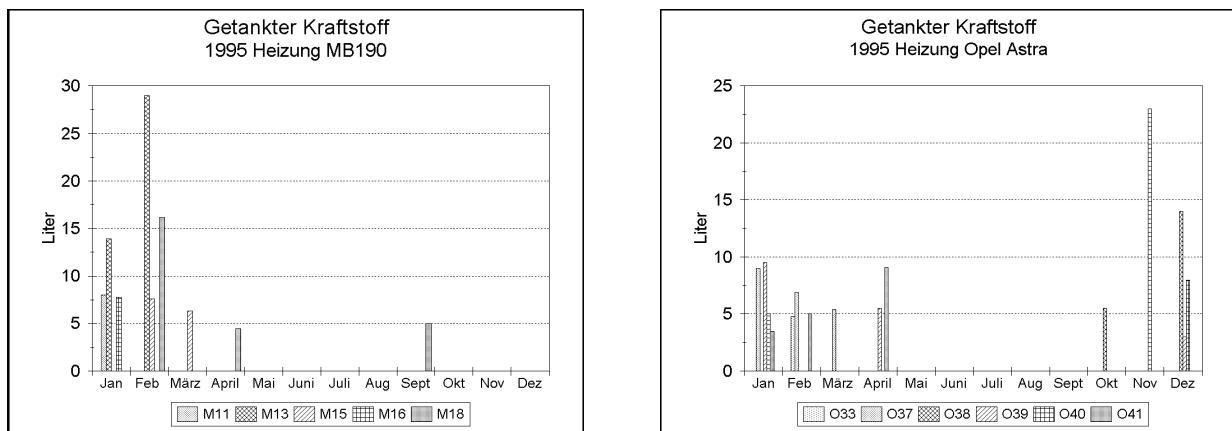


Bild 4.3.38: Gemessener Temperaturverlauf auf Rügen

Die Abweichungen zwischen beiden Fahrzeugen können durch Meßfehler oder durch einen anderen Stellplatz bedingt sein. Vergleiche mit anderen Fahrzeugen zeigen, daß eine da-zwischen liegende Kurve wahrscheinlich ist.

Im Bild 4.3.39 sind die Eintragungen zum getankten Kraftstoff für die Heizung aus den Fahrtenbüchern der Fahrzeuggruppen Mercedes Benz MB 190 und Opel Astra aufgeführt.



Bilder 4.3.39: Getankter Kraftstoff laut Fahrtenbücher von MB 190 und Opel Astra

Die Eintragungen in den Fahrtenbüchern scheinen lückenhaft zu sein. In den Fahrtenbüchern der Fahrzeuge MB 190 (M09, M12, M14, M17) und Opel Astra (O32, O34 und O36) fehlen jegliche Eintragungen zum getankten Kraftstoff. Die anderen Fahrzeuggruppen liefern ähnliche Ergebnisse. Die Eintragungen in den Fahrtenbüchern sind deshalb wenig aussagefähig.

Für die folgenden Betrachtungen wurden Beispieldfahrzeuge ausgewählt, die genügend plausible Daten von kalten und warmen Tagen liefert haben.

Wie schon oben erwähnt, gestatteten die Fahrzeuge Mercedes Benz MB 190, den Kraftstoffverbrauch direkt zu messen. Im Bild 4.3.40 ist der Kraftstoffverbrauch für ein Beispiel-fahrzeug (M17) dargestellt.

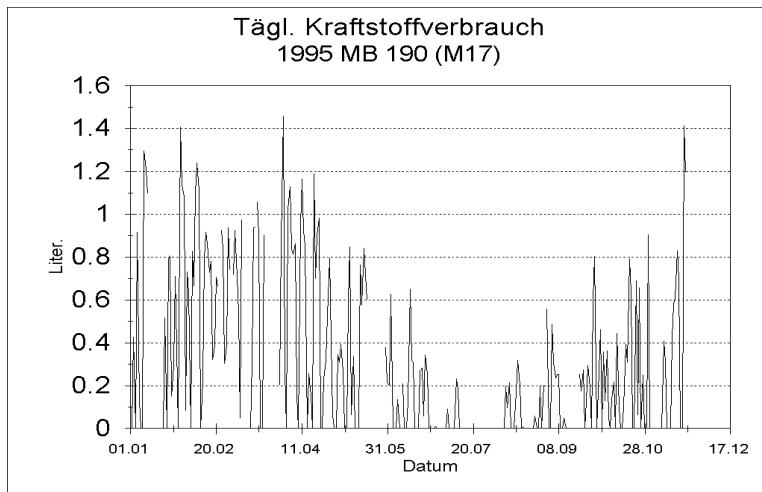


Bild 4.3.40: Täglicher Kraftstoffverbrauch der Fahrzeugheizung beim MB 190 (M17)

Vergleicht man den Verlauf der maximalen Verbrauchswerte aus Bild 4.3.40 mit dem Temperaturverlauf im Bild 4.3.38, so erkennt man, daß der Nutzer nur im wärmsten Monat nicht geheizt hat.

Im Bild 4.3.41 ist der Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit vom Weg aufgetragen. Für das Fahrzeug MB 190 M17 ist daraus abzulesen, daß maximal ein Verbrauch von ca. 1,4 Liter/75 km auftrat. Die Werte für einen Weg unter 50 km/Tag sind dabei nicht betrachtet, weil der Anteil für die Heizung im Stand des Fahrzeugs gegenüber dem wegabhängigen Anteil ansteigt.

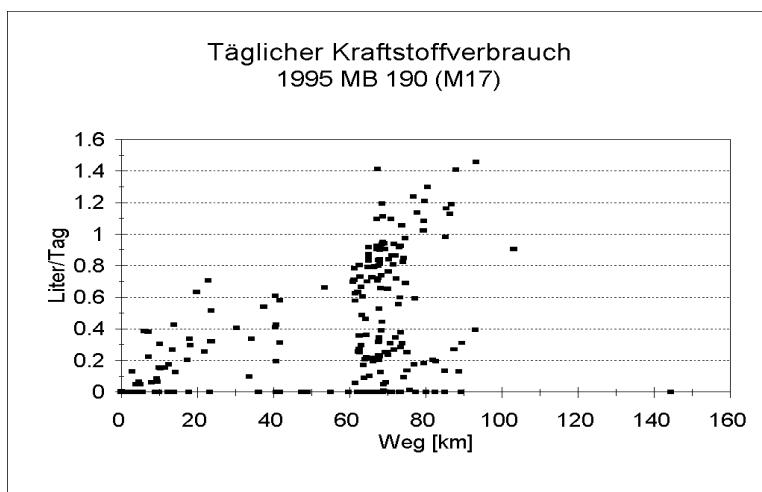


Bild 4.3.41: Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit vom Weg für das Fahrzeug MB 190 (M17)

Der Jahresmittelwert von 0,75 Liter/100 km für dieses Fahrzeug liegt gegenüber anderen MB 190 hoch (M13 - 0,74, M15 - 0,43, M18 - 0,63 Liter/100 km). Der Kraftstoffverbrauch für die Heizung ist sehr nutzerabhängig.

Bei einem spezifischen Energiegehalt von 9,2 kWh/Liter für Ottokraftstoff (Dichte 0,76 kg/Liter und spezifischem Heizwert 43,5 MJ/kg) ergibt sich aus dem mittleren Verbrauch für das Fahrzeug M17 ein spezifischer Energiebedarf für die Heizung von 0,069 kWh/km.

Die BMW-Fahrzeuge besitzen, wie bereits oben erwähnt, eine elektrische Heizung, deren Energiebedarf aus dem Bordnetz entnommen wird. Der Bordenergieverbrauch des Fahrzeugs B01 ist im Bild 4.3.42 dargestellt.

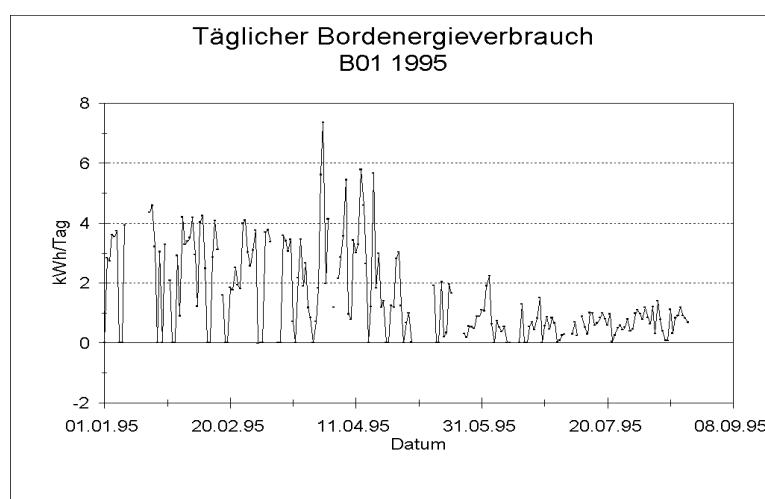


Bild 4.3.42: Bordenergieverbrauch des Fahrzeugs BMW (B01)

In den warmen Sommermonaten ist der Bordenergiebedarf niedrig und man kann davon ausgehen, daß nicht geheizt wurde. Da auf Rügen auch im Sommer mit Licht gefahren wird, kann der erhöhte Verbrauch in den kälteren Monaten der Heizung zugerechnet werden. Der wegabhängige Bordenergieverbrauch für das Fahrzeug BMW B01 ist im Bild 4.3.43 eingetragen.

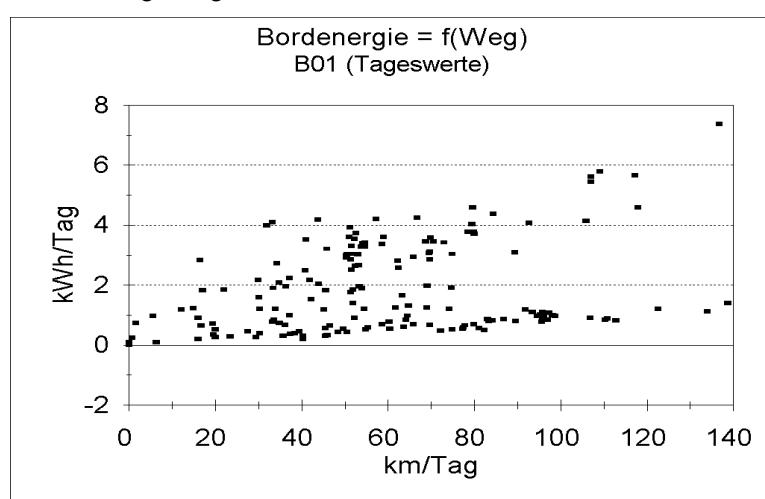


Bild 4.3.43: Bordenergieverbrauch in Abh. vom Weg für das Fahrzeug BMW (B01)

Aus dem Bild 4.3.43 ist abzulesen, daß der normale Bordenergiebedarf bei etwa 1 kWh/100 km liegt und der maximale mit Heizung bei ca. 8 kWh/100km. Es werden also maximal etwa 7 kWh/100 km oder 0,07 kWh/km für die Heizung verbraucht. Der mittlere spezifische Heizungsverbrauch im erfaßten Zeitraum lag bei 0,021 kWh/km.

Bei allen anderen Fahrzeugen konnte nur die Einschaltzeit gemessen werden. Für die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs der Heizung ist der Verbrauch pro Stunde erforderlich. Hierfür gibt es einen vom Hersteller angegebenen Maximalwert. Der wirkliche Verbrauchswert kann je nach Bedarf bzw. Einstellung darunter liegen. Im Bild 4.3.44 ist für das Fahrzeug Opel Astra O35 die tägliche Einschaltzeit der Heizung dargestellt.

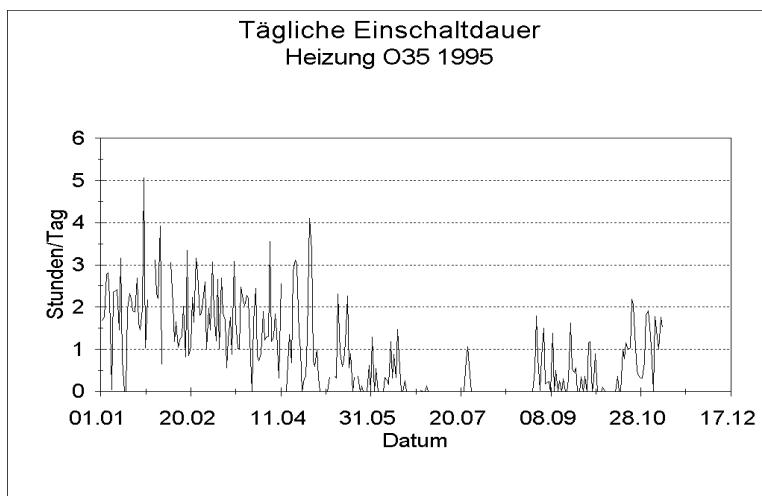


Bild 4.3.44: Tägliche Einschaltzeit der Heizung beim Fahrzeug Opel Astra (O35)

Stellt man die Einschaltzeit der Heizung in Abhängigkeit vom Weg dar, so ergibt sich Bild 4.3.45.

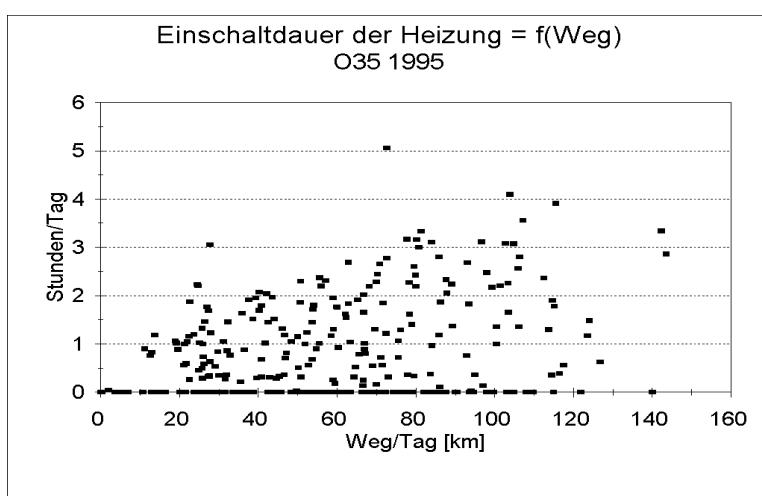


Bild 4.3.45: Einschaltzeit der Heizung in Abhängigkeit vom Weg beim Fahrzeug (O35)

Sieht man von den beiden weit abliegenden Punkten ab, die mit wesentlich geringeren Fahrzeiten verbunden sind, so kann man eine Einschaltdauer von maximal ca. 4 h/100 km ableSEN. Die Heizungsanlage des Opel Astra verbraucht laut Herstellerangabe maximal 0,5 kg Dieselkraftstoff/Stunde (spezifischer Heizwert für Dieselkraftstoff 42,5 MJ/kg) und im Teillastbereich 0,25 kg/h. Mit dem maximalen Verbrauchswert ergibt sich ein Bedarf von 2 kg/100 km und umgerechnet 0,24 kWh/km. Die mittlere Einschaltdauer lag für den Erfassungszeitraum bei 0,014 h/km. Nimmt man an, daß für die halbe Einschaltdauer der Teillastverbrauch galt, dann ergibt sich ein mittleren spezifischen Energiebedarf von 0,062 kWh/km.

12.4.4. Nutzungscharakteristiken

Einige in den Tagesprotokollen erfaßten Größen und Verteilungen dienen zur Beurteilung der Fahrzeugnutzung. Sie sollten Aufschluß über Fragestellungen geben, wie z.B.:

- wann und wie weit wird mit den Elektrofahrzeugen auf Rügen gefahren ?
- mit welcher Geschwindigkeitsverteilung wird gefahren und welche Leistungsanforderungen aus der Traktionsbatterie gehören dazu?
- wann, wie oft und wieviel Energie wird geladen?

Die DAUG/Zirkow vergab die Fahrzeuge in Verbindung mit den Herstellern an sehr verschiedene Nutzer. Dadurch entstanden sehr unterschiedliche Nutzungsmuster sowohl in Bezug auf die Fahrleistungen als auch im Ladeverhalten. Die Jahresfahrleistung und deren Erfassung zeigte bereits Tabelle 4.3.3 in Verbindung mit dem Netzenergieverbrauch der Fahrzeuge. Im folgenden werden Diagramme erläutert, die Antworten auf die oben genannten Fragen geben.

12.4.4.1. Fahrleistungen

In den Tabellen 4.3.4 und 4.3.10 bis 4.3.13 ist bereits der Nutzungsparameter „mittlere Fahrstrecke/Tag“ für jedes Fahrzeug enthalten. An zwei typischen Beispielen soll die wöchentliche Verteilung der Fahrleistung deutlich gemacht werden. Bild 4.4.1 zeigt diese vom Fahrzeug Mercedes Benz MB 190 (M16). Dieses Fahrzeug erzielte im Projekt die größten Fahrwege.

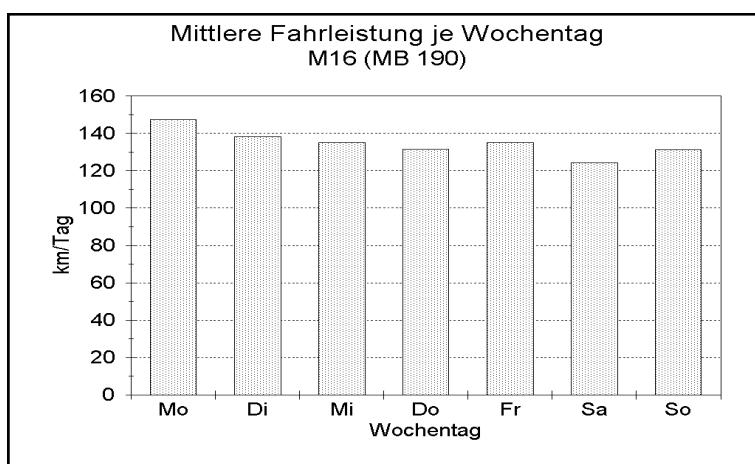


Bild 4.4.1: Wöchentliche Verteilung der Fahrkilometer beim MB 190 (M16)

Allgemein ist festzustellen, daß Nutzer mit großen Fahrwegen eine fast gleichmäßige Verteilung auf die Wochentage aufweisen. Bei den meisten Fahrzeugen wird dagegen das Wochenende nur schwach genutzt. Etwa 50% der Fahrzeuge werden am Samstag und Sonntag wenig gefahren. Weitere 20% fahren auch am Samstag, wobei die Fahrwege deutlich unter denen an Werktagen liegen. Die restlichen Nutzer fahren am Wochenende nur geringfügig weniger als in der Woche. Nur ein Fahrzeug, der BMW B07, den ein Pastor fuhr, weist am Wochenende mehr Kilometer auf. Ein Beispiel für einen kleinen Fahrweg am Wochenende zeigt Bild 4.4.2. Es handelt sich dabei um ein BMW-Fahrzeug (B05), welches ein Mitarbeiter der DAUG/Zirkow vorwiegend für die Fahrt zur Arbeit und Heimfahrt benutzt hat.

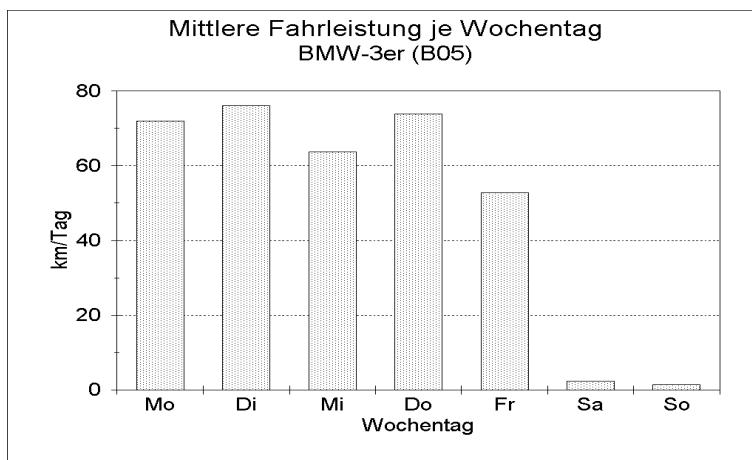


Bild 4.4.2: Wöchentliche Verteilung der Fahrkilometer beim BMW (B05)

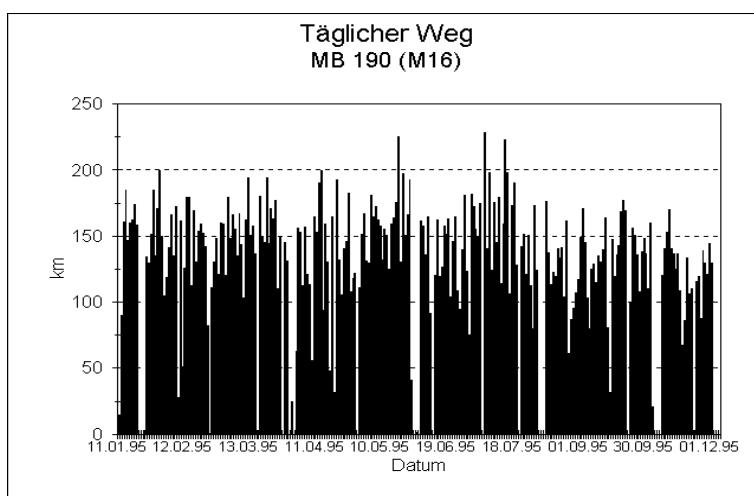


Bild 4.4.3: Täglicher Fahrweg des MB 190 (M16)

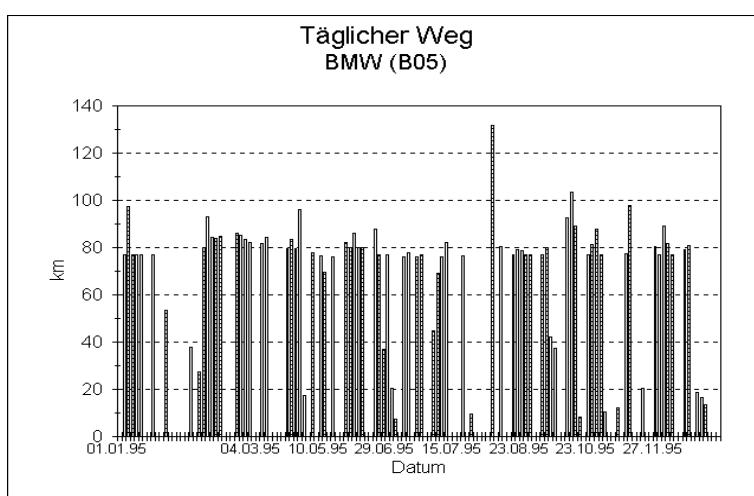


Bild 4.4.4: Täglicher Fahrweg des BMW (B05)

Auch die Darstellung der täglichen Fahrwege (Bild 4.4.3 und 4.4.4) zeigt die unterschiedliche Nutzung der beiden Fahrzeuge. Einige Tage ohne gefahrenen Weg sind auch durch Wartung und Reparatur hervorgerufen.

Fahrweite

Die Reichweite ist für das Elektroauto eine viel diskutierte Größe. Auf Rügen wurden Meßdaten über die in der Praxis aufgetretenen Fahrwege ermittelt. Dabei muß man davon ausgehen, daß die Nutzer in der Regel eine Sicherheitsreserve in der Batterie behalten haben. Eine Bestimmung der Reichweite z. B. durch gezieltes Leerfahren der Batterie, war nicht vorgesehen.

Für die im Bild 4.4.3 erkennbaren hohen Tagesfahrleistungen von über 200 km beim MB 190 (M16) erfolgten mehrere Zwischenladungen und auch beim BMW (B05, Bild 4.4.4) fand für die 130 km eine Zwischenladung statt.

In Tabelle 4.4.1 sind zusätzlich zur mittleren Fahrstrecke pro Tag der maximal gefahrene Weg eines Tages und der maximale Weg bis zur nächsten Ladung angegeben. Im maximalen Weg bis zur nächsten Ladung zeigt sich der Vorteil der Natrium-Nickelchlorid-Batterie gegenüber der Nickel-Cadmium-Batterie. Mehrere Pkw mit Natrium-Nickelchlorid-Batterie fuhren etwa 150 km mit einer Ladung. Die Fahrzeuge mit Nickel-Cadmium-Batterie erreichten maximal 90 km (O41). Die größere Reichweite der Natrium-Nickelchlorid-Batterie ist durch die höhere Energiedichte und die damit entsprechend höhere Nennenergie der Batterien begründet.

Eine Abschätzung der maximalen Reichweiten kann man mit Hilfe der Verbrauchswerte aus den Tabellen 4.3.4 und 4.3.12 durchführen. Der Opel Astra O36 mit Natrium-Nickelchlorid-Batterie benötigte für Antrieb und Bordnetz 0.144 kWh/km. Bei der vorliegenden Fahrweise und einer Nennenergie von 25.9 kWh könnte eine Reichweite von 180 km erzielt werden. Die gleiche Betrachtung ergibt für den Opel Astra O41 mit Nickel-Cadmium-Batterie und der Nennenergie von 15 kWh sowie einem Verbrauch für den Antrieb und das Bordnetz von 0.149 kWh/km eine maximale Reichweite von 100 km.

Fzg.-Nr.	Batterietyp	Mittlerer Weg km/Tag	Max. Weg km/Tag	Maximaler Weg bis Ladung km
B01	NaNiCl	49,3	139	75
B02	NaNiCl	39,0	139	80
B03	NaNiCl	62,6	115	100
B04	NaNiCl	36,6	86	
B05	NaNiCl	46,5	93	80
B06	NaNiCl	49,5	168	100
B07	NaNiCl	49,9	106	79
B08	NiCd	59,1	99	50
M09	NiCd	15,6	54	40
M11	NiCd	29,8	82	60
M12	NaNiCl	45,2	198	90
M13	NaNiCl	27,5	96	85
M14	NaNiCl	47,0	143	100
M15	NaNiCl	30,5	109	100
M16	NaNiCl	133,6	228	150
M17	NaNiCl	39,4	103	142
M18	NaNiCl	63,5	154	90
T19	NaNiCl	23,9	66	65
T20	NaNiCl	43,1	97	70
T21	NaNiCl	29,6	101	70
T22	NaNiCl	11,4	66	65
T23	NaNiCl	12,1	65	70
T24	NaNiCl	22,2	62	60
T25	NaNiCl	43,4	119	65
T26	NaNiCl	3,1	122	105
T27	NiCd	11,6	42	40
T28	NiCd	7,0	57	50
N31	NaS	35,4	89	85
O32	NaNiCl	45,5	139	110
O33	NaNiCl	45,7	164	115
O34	NaNiCl	52,5	160	105
O35	NaNiCl	60,8	140	100
O36	NaNiCl	54,7	168	145
O37	NiCd	40,7	123	70
O38	NiCd	26,6	151	80
O39	NiCd	24,4	96	65
O40	NiCd	15,7	58	60

Fzg.-Nr.	Batterietyp	Mittlerer Weg km/Tag	Max. Weg km/Tag	Maximaler Weg bis Ladung km
O41	NiCd	45,3	324	90
V42	NiCd	46,8	110	60
V43	NaNiCl	59,4	128	120
V44	NiCd	19,3	57	50
V45	NiCd	21,6	98	80
V47	NaNiCl	35,9	70	60
V48	NiCd	31,0	107	65
V49	NaNiCl	42,3	112	145
V50	NaNiCl	26,1	74	50
C51	NiCd	52,2	187	95
C52	NiCd	17,9	81	70
C53	NiCd	31,6	106	65
C54	NiCd	17,7	114	65
C55	NiCd	22,9	71	70
C56	NiCd	11,4	81	60
C57	NiCd	23,5	79	45
C58	NiCd	39,6	184	85
C59	NiCd	37,0	97	70
C60	NiCd	20,7	87	55

Tabelle 4.4.1: Fahrstrecken aller Fahrzeuge

Die folgenden Bilder zeigen Häufigkeitsverteilungen von Größen für die oben benutzten Beispieldfahrzeuge, die zur Charakterisierung des Nutzungsverhaltens dienen. Es handelt sich dabei um

- den Beginn einer Fahrt (Bilder 4.4.5 und 4.4.6)
- den Weg einer Fahrt (Bilder 4.4.7 und 4.4.8)
- den Weg bis zur nächsten Ladung (Bilder 4.4.9 und 4.4.10)
- die Fahrdauer (Bilder 4.4.11 und 4.4.12)
- die Energie einer Fahrt (Bilder 4.4.13 und 4.4.14).

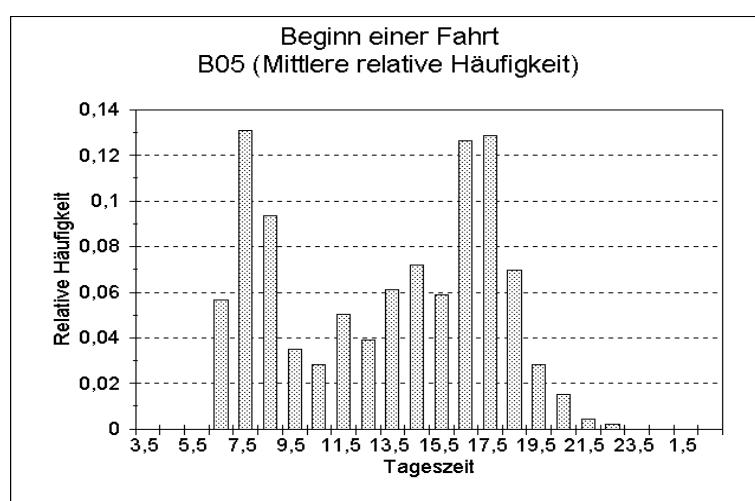


Bild 4.4.5: Beginn einer Fahrt beim BMW (B05)

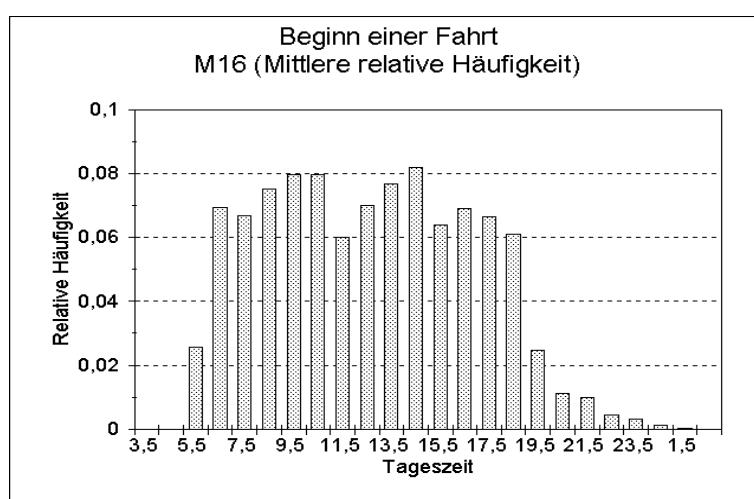


Bild 4.4.6: Beginn einer Fahrt beim MB 190 (M16)

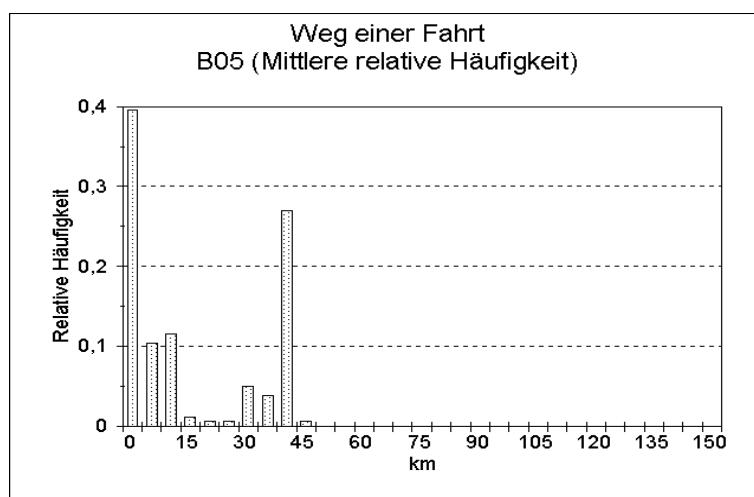


Bild 4.4.7: Weg einer Fahrt beim BMW (B05)

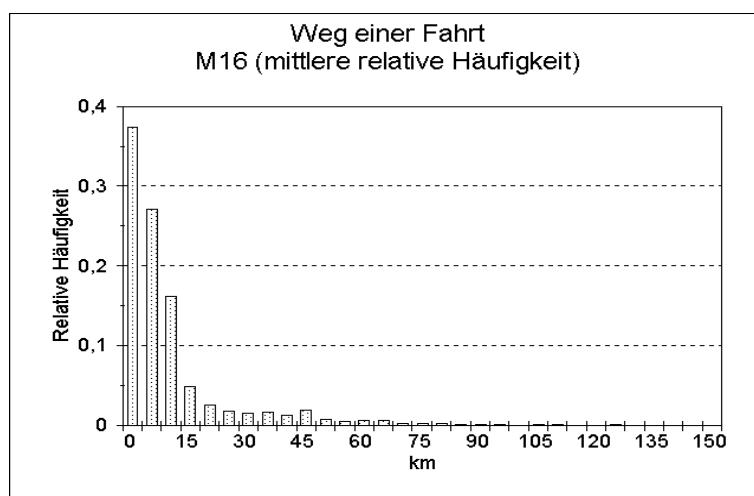


Bild 4.4.8: Weg einer Fahrt beim MB 190 (M16)

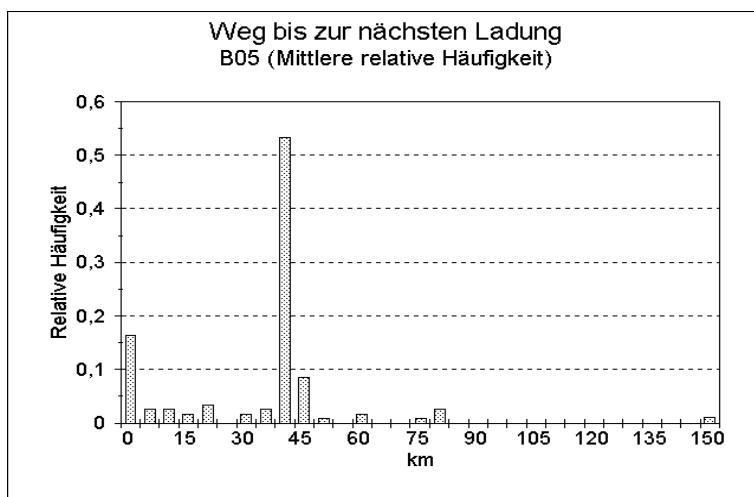


Bild 4.4.9: Weg bis zur nächsten Ladung beim BMW (B05)

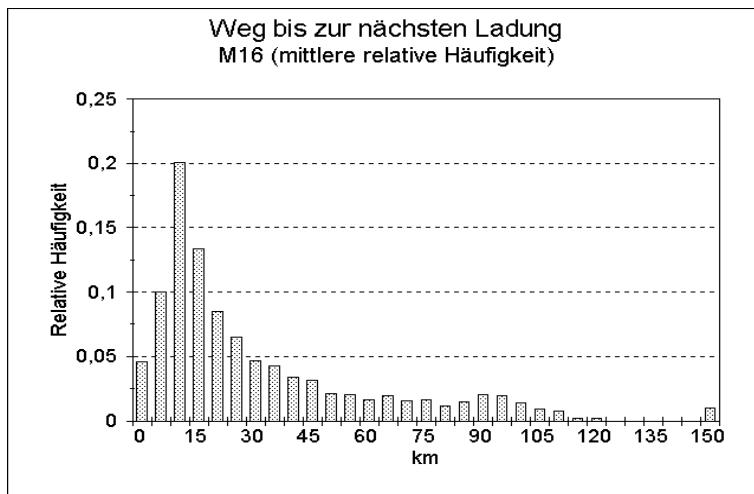


Bild 4.4.10: Weg bis zur nächsten Ladung beim MB 190 (M16)

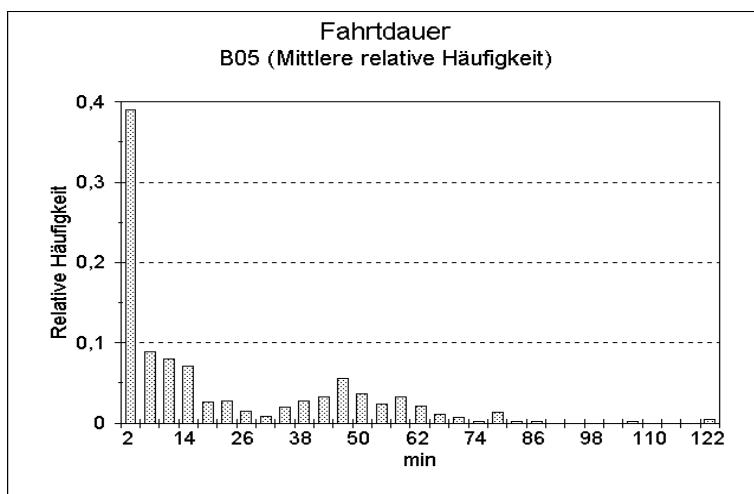


Bild 4.4.11: Fahrdauer beim BMW (B05)

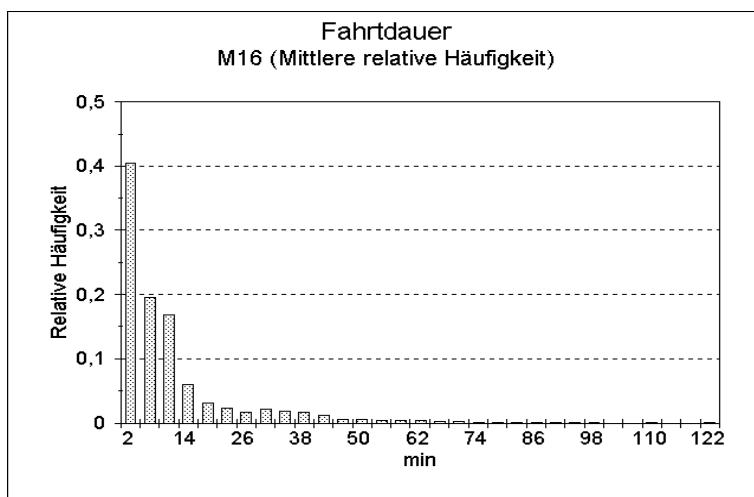


Bild 4.4.12: Fahrdauer beim MB 190 (M16)

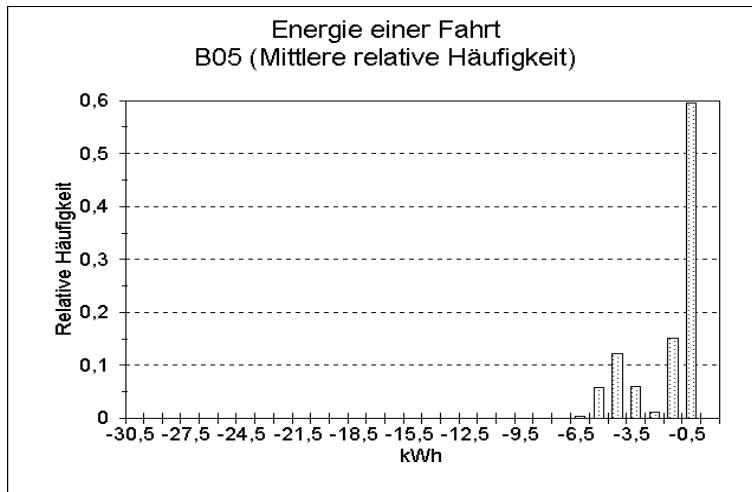


Bild 4.4.13: Energie einer Fahrt beim BMW (B05)

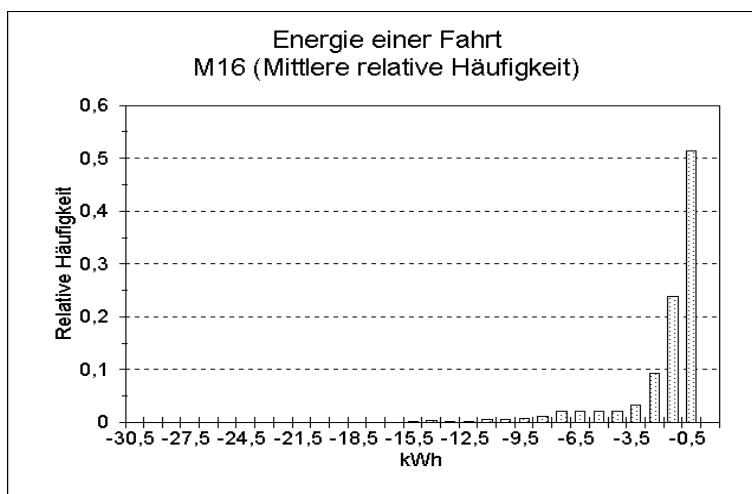


Bild 4.4.14: Energie einer Fahrt beim MB 190 (M16)

Die Analyse ist nur fahrzeugbezogen sinnvoll, weil bei einer Mittelung schon über eine Fahrzeuggruppe Besonderheiten geglättet werden. Außerdem würde bei einem gewichteten Mittel, z.B. durch den absolute Fahrweg, ein Fahrzeug wie der Mercedes MB 190 (M16) andere in den Hintergrund drängen. Für ein Fahrzeug muß natürlich über den Erfassungszeitraum gemittelt werden. Für bestimmte Untersuchungen liegen die Tagesverteilungen vor und können genutzt werden.

Die Bilder zum BMW zeigen typisch die Nutzung eines Fahrzeugs morgens für den Weg zur Arbeitsstelle und abends zurück (Bild 4.4.5). Die Fahrt zur Arbeitsstelle beginnt schwerpunktmäßig zwischen 6 und 7 Uhr. Die Rückfahrt erfolgte in einem größeren Zeitbereich zwischen 16 und 18 Uhr. In wenigen Fällen lag der Beginn der Fahrt erst zwischen 21 und 22 Uhr.

Der Weg einer Fahrt (Bild 4.4.7) beträgt häufig zwischen 40-45 km. Im Vergleich mit Bild 4.4.4 wird deutlich, daß es sich um einmal die Strecke von zu Hause zur Arbeitsstelle handelt. Die Fahrt zur Arbeit oder zurück dauerte in der Regel etwa 50 min. Das entspricht einer mittleren Geschwindigkeit von 48 km/h.

Die Energie einer Fahrt erfaßt die für den Antrieb erforderliche Energie einschließlich recuperierten Bremsenergie. Aus Bild 4.4.13 geht hervor, daß ein Maximum der Häufigkeitsverteilung bei etwa 4.5 kWh liegt. Für die häufig auftretende Wegstrecke von 40 km ergibt sich daraus ein Antriebsverbrauch von 0.112 kWh/km.

Betrachtet man die entsprechenden Bilder vom Fahrzeug MB 190 (M16), so erkennt man deutliche Unterschiede zum BMW (B05). Die Fahrten beginnen gleichmäßig über den Tag verteilt mit einem geringen Rückgang um die Mittagszeit. Es sind vorwiegend kürzere Wegstrecken zu verzeichnen und die Häufigkeit nimmt für lange Wege ab. Die Häufigkeitsverteilung der Fahrdauer nimmt ähnlich wie der Weg einer Fahrt ab. Das ist ein typischer Zusammenhang. Er zeigt, daß die mittlere Geschwindigkeit für einen Nutzer relativ konstant ist. Eine weitere Proportionalität besteht auch bei diesem Fahrzeug zwischen dem Weg einer Fahrt und der dazu erforderlichen Energie (s. Energie einer Fahrt, Bild 4.4.14).

Das Fahrtverhalten der Nutzer wird sehr wesentlich durch das Geschwindigkeitsprofil deutlich. Damit in Zusammenhang steht auch die Häufigkeitsverteilung der aus der Traktionsbatterie entnommenen Leistung und der Beschleunigung. In den Bildern 4.4.15 bis 4.4.20 sind die Verteilungen für die beiden Fahrzeuge BMW (B05) und MB 190 (M16) dargestellt.

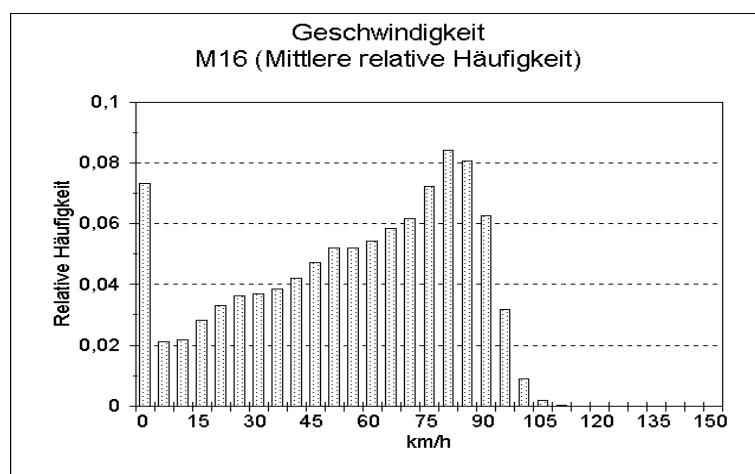


Bild 4.4.15: Mittlere Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeit beim MB 190 (M16)

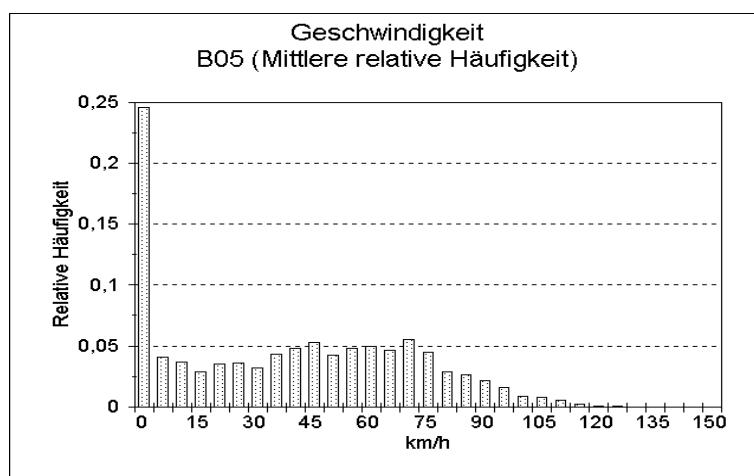


Bild 4.4.16: Mittlere Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeit beim BMW (B05)

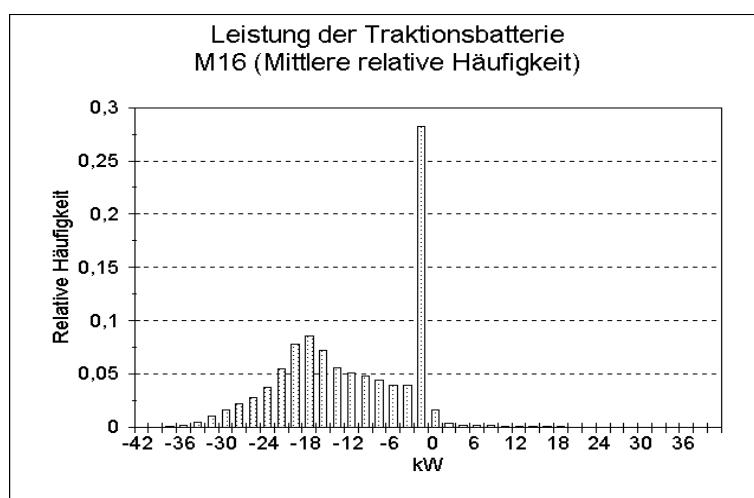


Bild 4.4.17: Mittlere Häufigkeitsverteilung der Traktionsleistung beim MB 190 (M16)

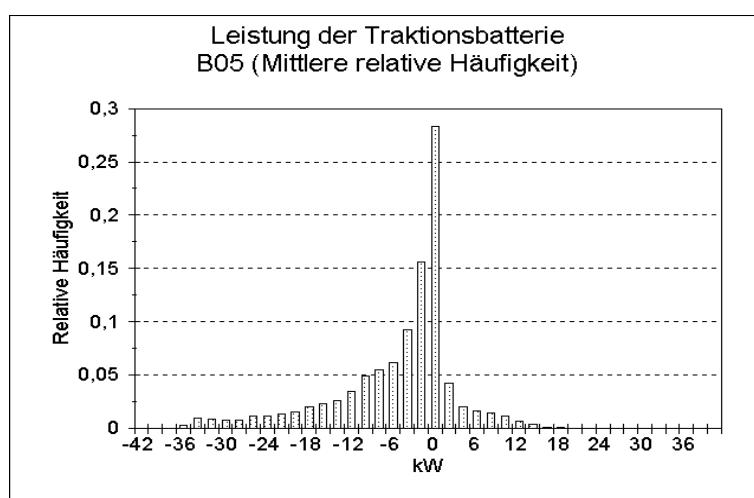


Bild 4.4.18: Mittlere Häufigkeitsverteilung der Traktionsleistung beim BMW (B05)

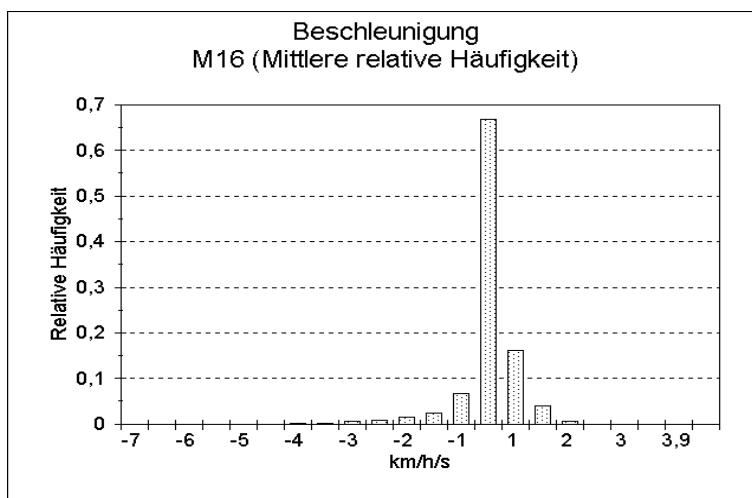


Bild 4.4.19: Mittlere Häufigkeitsverteilung der Beschleunigung beim MB 190 (M16)

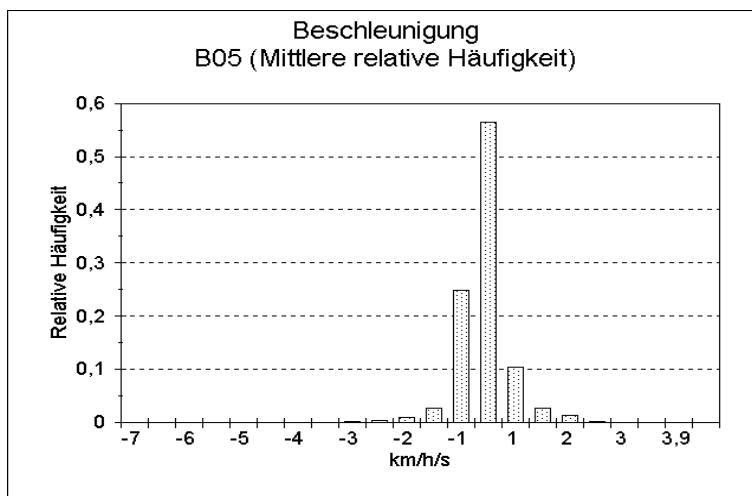


Bild 4.4.20: Mittlere Häufigkeitsverteilung der Beschleunigung beim BMW (B05)

Für die beiden Fahrzeuge liegen zusätzlich folgende Tagesmittelwerte vor:

	B05	M16
Weg	46.5 km	133.6 km
Fahrtzeit	1.3 h	2.5 h
Beschleunigung	0.00797 m/s ²	0.0171 m/s ²

Daraus können folgende fahrtbezogene Größen berechnet werden:

	B05	M16
Geschwindigkeit	35.4 km/h	53.4 km/h
Beschleunigung	0.147 m/s ²	0.164 m/s ²

Beide Werte beziehen sich auf die Fahrtzeit. Während der Fahrt gibt es Zeiten, in denen sich das Fahrzeug nicht bewegt. Diese Bewegungszeit beträgt in Abhängigkeit von aktuellen Bedingungen (Stau mit eingeschaltetem Motor, häufiger Ampelhalt u.a.) im Mittel etwa

80% der Fahrdauer. Die Diagramme beziehen sich auch auf die Fahrt, d. h. eingeschalteter Fahrtschalter.

Abgesehen von den großen Werten der relativen Häufigkeit für Geschwindigkeiten unter 2.5 km/h ist die Geschwindigkeitsverteilung beim B05 fast ausgeglichen, wogegen beim M16 bei 80 km/h ein deutliches Maximum liegt. Die Geschwindigkeitsprofile spiegeln sich auch in der Traktionsleistungsverteilung wider. Obgleich sich die Fahrzeugbeschleunigungen nicht gravierend unterscheiden zeigt die mittlere Häufigkeitsverteilung der Traktionsleistung vom M16, daß die elektrische Bremse meist ausgeschaltet war.

12.4.4.2. Ladeverhalten

Neben den energetischen Größen, die unter Punkt 4.3.3 behandelt wurden, gibt es im Tagesprotokoll einige Größen und Verteilungen, die das Nutzungsverhalten in Bezug auf die Ladung charakterisieren.

Die maximale Ladedauer hängt nicht nur von den Nutzern, sondern auch von der Nennenergie und dem Laderegime der Fahrzeuge ab. Infolge der unterschiedlichen Batteriesysteme in den Fahrzeugen und der damit verbundenen spezifischen Kapazität ist die maximal mögliche Energieaufnahme der Batterien verschieden.

Alle Pkw werden einphasig aus dem Netz mit <3.5 kW geladen. Die Kleinbusse (VW T4) nutzen 2 Phasen und die Transporter sowie der NEOPLAN-Bus werden aus 3 Phasen geladen.

Ein weiterer Unterschied ergibt sich aus dem Laderegime der Batterien. Bei den NiCd-Batterien der DAUG/Esslingen ist die Ladeleistung über die Ladedauer nahezu konstant. Dagegen fällt die Ladeleistung bei den NaNiCl-Batterien der AABG am Ende der Ladung exponentiell ab. Für die geteilten Batterien in den Fahrzeugen MB190, MB 100E und Opel Astra ergaben sich durch Probleme im Batteriemanagement über größere Zeiträume extrem große Ladezeiten.

Die sehr großen Ladezeiten mit Leistungen, die z.T. unter der Offsetgrenze des TDS lagen, führten zu Fehlern in der Erkennung des Ladeabruchs und auch des Ladeendes.

Eine ähnliche Problematik gab es über längere Zeiten bei den Fahrzeugen mit Blei-Gel-Batterien (VW V42 und V44). Die Ladeleistung fällt auch bei diesen Batterien vor dem Erreichen des Zustandes "Batterie voll" exponentiell auf sehr kleine Werte ab. Da ein spezielles Ladeendesignal im ersten Halbjahr fehlte, konnte das Ladeende nicht richtig erkannt werden.

Zeichnet man die 3 Häufigkeitsverteilungen für den täglichen Zeitbedarf zum Laden, Fahren und Stehen eines Fahrzeugs als Stapelbalken in ein Diagramm wird das Lade- und Fahrverhalten besonders deutlich. In den Bildern 4.4.21 bis 4.4.24 sind für vier verschiedene Beispieldfahrzeuge solche Diagramme dargestellt.

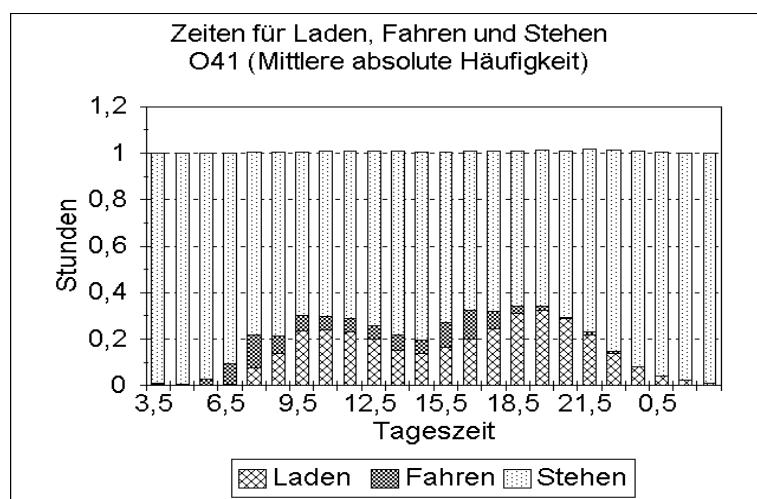


Bild 4.4.21: Zeiten für Laden, Fahren und Stehen beim Opel Astra (O41)

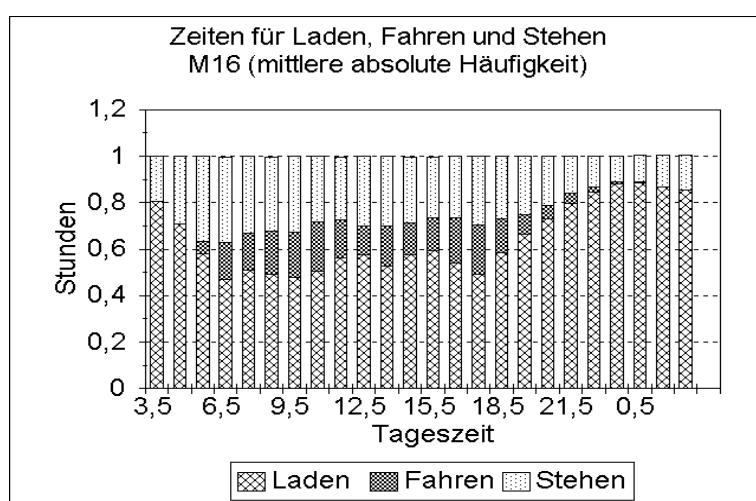


Bild 4.4.22: Zeiten für Laden, Fahren und Stehen beim MB 190 (M16)

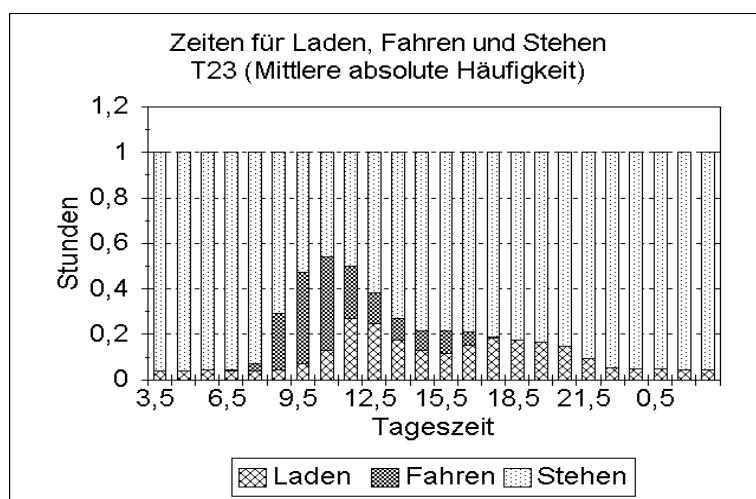


Bild 4.4.23: Zeiten für Laden, Fahren und Stehen beim MB 100E (T23)

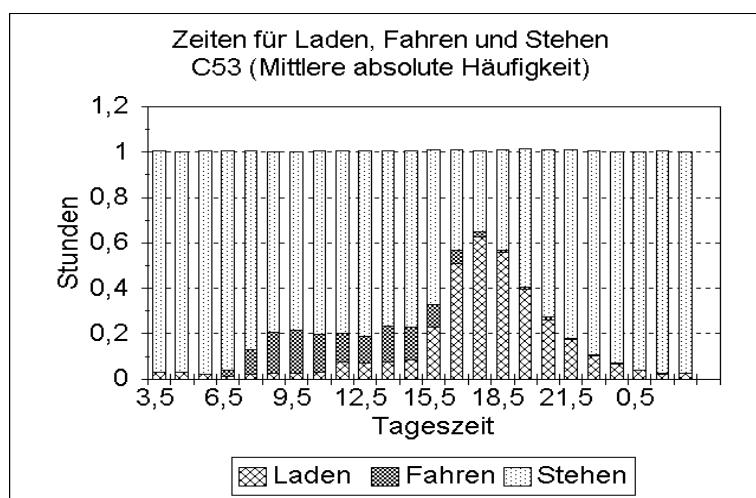


Bild 4.4.24: Zeiten für Laden, Fahren und Stehen beim VW T4 (C53)

Aus dem Diagramm des Opel Astra ist die Nutzung des Fahrzeugs für den Weg zur Arbeit und zurück zu erkennen. Nach der Fahrt am Morgen wird die Zeit zwischen 9 und 12 Uhr für die Ladung genutzt und nach der Heimfahrt erfolgt eine Ladung zwischen 16 und 22 Uhr.

Das Fahrzeug MB 190 (M16), mit den größten mittleren Fahrstrecken im Projekt, nutzt über 75% des Tages zum Laden und Fahren.

Die beiden größeren Fahrzeuge, der Transporter (M100E) und der Kleinbus (VW T4), werden ausschließlich dienstlich genutzt. Die Fahrten liegen zwischen 7 und 16 Uhr und die Ladung erfolgt unmittelbar danach bis in die frühen Abendstunden. Etwa 70% der Nutzer haben in der Zeit von 18 bis 24 Uhr geladen. Dieser Schwerpunkt der Ladungen in den Abendstunden lässt sich sicher mit einem materiellen Anreiz für Elektrofahrzeugbetreiber in die Nachtstunden mit schwacher Netzbelastung verschieben.

Die Ladedauer bei den NiCd-Batterien von DAUG-HOPPECKE hängt im wesentlichen von der Fahrstrecke ab. Für die PKW streute die mittlere Ladedauer vom wenig gefahrenen Opel O40 mit 1.7 h für einen mittleren gefahrenen Weg von 15.4 km/Tag bis 6 h beim Opel O41 mit 45,3 km/Tag mittleren Weg.

Wie schon oben erwähnt, traten durch die sehr geringen Ladeleistungen bei den Fahrzeugen mit geteilter NaNiCl₂-Batterie Fehler in der Bestimmung der Ladedauer, des Ladebeginns und -endes auf. Für den BMW B01, der keine geteilte Batterie enthält, ergab sich eine mittlere Ladedauer von 5.7 h bei einer mittleren Ladung von 10 kWh und einem mittleren Weg von 50 km/Tag.

12.5 Akzeptanzuntersuchungen

Während des Flottentests sollten auch Informationen über die Akzeptanz der Elektroautos durch die Fahrer ermittelt werden. Dazu wurden von der DAUG in Abstimmung mit den Projektpartnern 2 Fragebögen erarbeitet, die von der HTW ausgewertet wurden.

Die erste Befragung erfolgte bei Übergabe der Fahrzeuge und sollte Informationen über die Person des Fahrers und über seine Erfahrungen mit anderen Kraftfahrzeugen liefern. Der zweite Fragebogen wurde während des Versuchs ausgegeben, um Aufschluß darüber zu erhalten, wie die Nutzer mit den Elektroautos zureckkommen, sie einsetzen und insgesamt beurteilen. Der Fahrer des NEOPLAN-Busses wurde mündlich befragt, da seine Aussagen statistisch nicht verwertbar waren (keine anderen Fahrer).

Zur Einschätzung der Ausgangssituation liegen 147 Fragebögen vor, 119 Befragungen wurden während des Projektes durchgeführt.

12.5.1. Ausgangssituation

Die Elektroautos wurden überwiegend von Kleinbetrieben und Behörden bzw. Verwaltungen genutzt. Daraus resultiert, daß ein Teil der Fahrzeuge von mehreren Fahrern betrieben wurden.

Die Befragten wurden in den meisten Fällen durch die Medien (Zeitung, Rundfunk, Fernsehen) oder durch direkte Ansprache von DAUG-Mitarbeitern oder anderen Personen, die

bereits am Projekt beteiligt waren, zur Teilnahme gewonnen. Es handelt sich also nicht um einen zufälligen oder repräsentativen Bevölkerungsquerschnitt.

Die Altersstruktur der Fahrer ist in Bild 5.1 dargestellt. Unter ihnen sind 28 % Frauen.

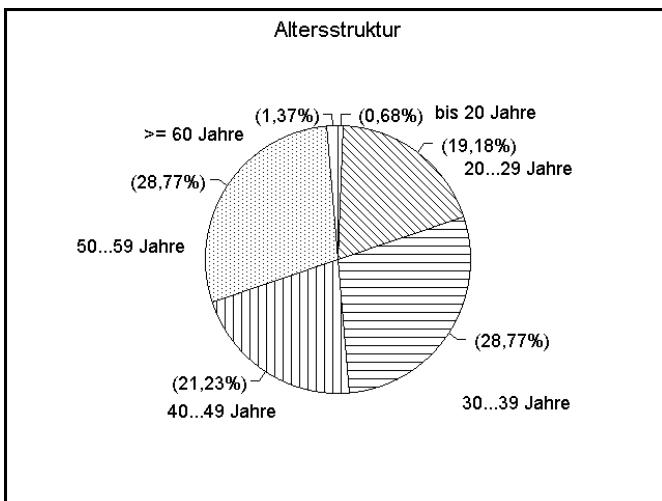


Bild 5.1: Altersstruktur der Nutzer

Von den Befragten haben alle Erfahrungen mit dem Führen von verbrennungsmotorisch betriebenen Kraftfahrzeugen. Nach den in den letzten 2 Jahren vor der Projektteilnahme zurückgelegten Jahreskilometern (Bild 5.2) können sie überwiegend als erfahrene Fahrzeugführer eingeschätzt werden. 15 % sind innerhalb des Projektes schon einmal mit einem anderen Elektroauto gefahren.

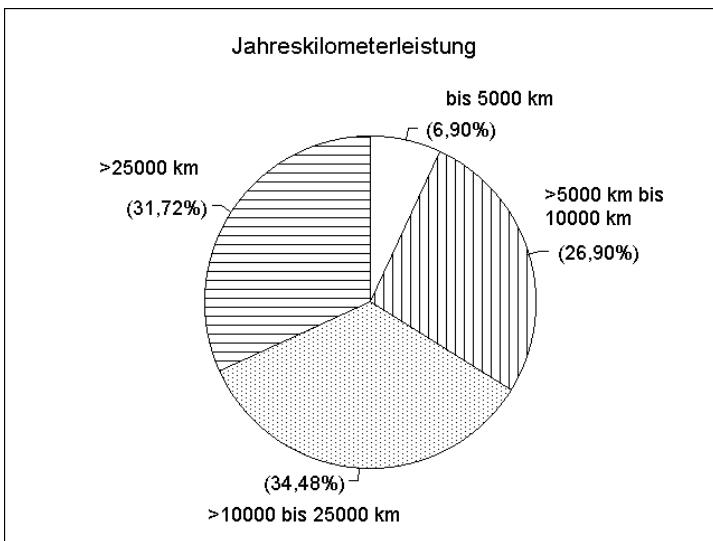


Bild 5.2: Durchschnittliche Jahreskilometerleistung

Wie die Fahrer ihren Fahrstil selbst einschätzen, ist in Bild 5.3 dargestellt.

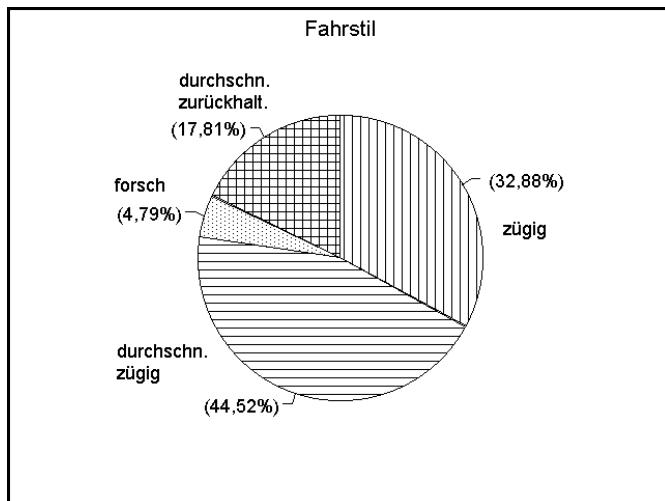


Bild 5.3: Selbsteinschätzung des Fahrstils

Bemerkenswert ist die Tatsache, daß 73 % der vor ihrer Mitarbeit im Projekt Befragten den gleichen Preis und 9,6 % auch einen höheren Preis für ein E-Fahrzeug bezahlen würden wie für ein vergleichbares Fahrzeug mit Verbrennungsmotor.

12.5.2. Fahrzeugeinsatz

Die zweite Befragung erfolgte, nachdem die Nutzer mindestens einen Monat, im Durchschnitt jedoch rund 1 Jahr, Erfahrungen mit den Fahrzeugen sammeln konnten. Tabelle 5.1 gibt darüber Auskunft, wie die Fahrzeuge genutzt wurden. Der große Anteil geschäftlicher Nutzung hängt mit der Fahrzeugverteilung und der Fahrzeugart (Transporter) zusammen. In Tabelle 5.1 sind deshalb beide Fahrzeuggruppen getrennt aufgeführt. Die Unterteilung der nichtgeschäftlichen Fahrten in Heimfahrt, Einkaufen, Privatfahrten und Freizeit ist sicherlich ungenau, da nicht immer eine exakte Trennung möglich ist.

	Geschäftlich	Heimfahrt	Einkaufen	Privat	Freizeit
MB100/T4	88,2 %	7,8 %	0,9 %	1,6 %	1,5 %
PKW	57,8 %	25,2 %	4,8 %	5,4 %	5,8 %

Tabelle 5.1: Nutzungsspektrum, getrennt nach Transporter/Kleinbus und PKW

Als Gesamteinschätzung des Fahrzeugs durch die Nutzer ergaben die Befragungen, daß 90 % der Fahrer mit dem Fahrzeug insgesamt zufrieden bzw. sehr zufrieden waren. Lediglich ein Befragter war absolut unzufrieden.

Etwa 80% der Befragten schätzte die Pannenhäufigkeit klein bzw. wie erwartet ein. Für nur 20 % war die Störanfälligkeit der Fahrzeuge größer als erwartet.

Hinsichtlich der Fahrqualität im öffentlichen Straßenverkehr wurde eine Einschätzung der Beschleunigungs- und Steigverhalten erfragt. Die Bilder 5.4 und 5.5 stellen die Ergebnisse für die PkW und die Transporter bzw. Kleinbusse dar.

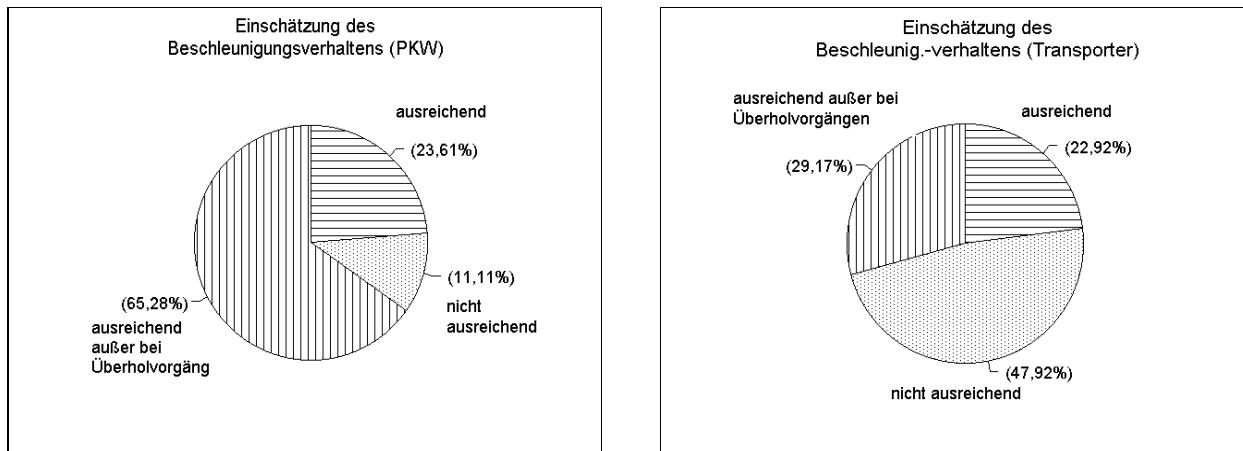


Bild 5.4: Einschätzung des Beschleunigungsverhaltens

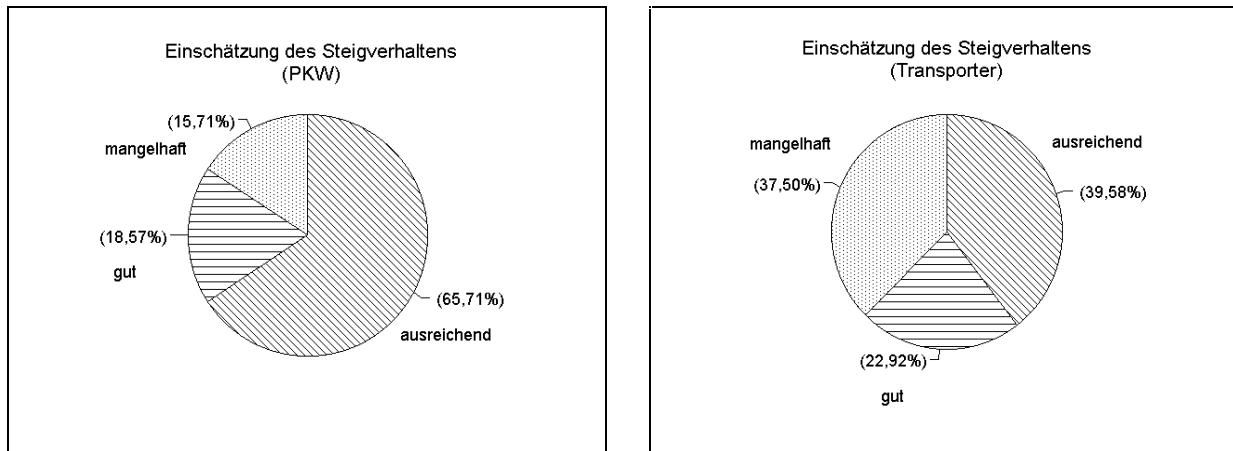


Bild 5.5: Einschätzung des Steigverhaltens

Wie die Grafiken zeigen, wurden Steig- und Beschleunigungsverhalten überwiegend bei den Transportern kritisiert. Das Ergebnis entsteht hauptsächlich durch die VW-Busse. Während die Fahrer der VW-T4 zu 62 % mit dem Beschleunigungsverhalten und zu 45 % mit dem Steigverhalten unzufrieden waren, bemängelten nur 20 % der Nutzer den MB 100.

Da die Fahrzeugführer über den Einfluß der Rekuperation und des Rollens auf die maximal mögliche Reichweite informiert waren, sind die Aussagen, daß 86 % der Befragten das Bremsen und 77 % das Rollen bewußt genutzt haben, positiv einzuschätzen. Die Meßdatenauswertung zeigt jedoch, daß einige Fahrer trotz gegenteiliger Aussage im Fragebogen die elektrische Bremse ausgeschaltet hatten und damit die Möglichkeit der Rekuperation nicht genutzt haben (MB 190).

Bei 53 % der Befragten hat sich mit der Nutzung des Elektroautos der Fahrstil verändert. Die neue Qualität des Fahrens wird als vorausschauender, ruhiger oder auch ökonomischer bezeichnet. Ob sich die Änderung der Fahrweise künftig auch auf das Führen von herkömmlichen Fahrzeugen auswirkt, wurde im Fragebogen nicht hinterfragt.

Die begrenzte Reichweite von Elektroautos erfordert die Signalisierung, wann eine Ladung notwendig wird. Zur richtigen Einschätzung des Ladezeitpunktes sollte eine genaue Ladezustandsanzeige nach Meinung der Nutzer gut ablesbar, evtl. mit digitaler Anzeige vorhanden sein. Häufig wird der Vorschlag unterbreitet, ähnlich wie bei herkömmlichen Fahrzeugen, eine Reserveanzeige vorzusehen. In einigen Fahrzeugtypen ist dies bereits vorhanden. Über 50 % der Versuchsteilnehmer haben ihre Autos mindestens einmal leer gefahren.

Als Ladeort wird für die Transporter überwiegend die Firma angegeben. Bei den PKW teilt es sich zwischen Wohnung und Arbeitsstelle auf. Das Tanken an speziellen Tankstellen hatte im Projekt eine untergeordnete Bedeutung.

Eine wesentliche Frage war die nach dem Handling beim Laden. Ein Teil der Fahrzeuge hat einen Aufrollmechanismus (BMW, OPEL, teilweise MB190), andere besaßen fahrzeugseitig fest angebrachte Leitungen, die während der Fahrt in einen speziellen Hohlraum gestopft (Golf) oder auch Verbindungskabel, die zur Fahrt lose im Fahrzeug verstaut wurden (MB100, teilweise MB190, T4). Mit den Ladetechnologien hatten 62 % der Befragten nie Probleme, 8 % dagegen oft. In einigen Fällen bereitete das Verklemmen des Aufrollmechanismus Probleme. Als potentielle Quelle von Verletzungen wurden die Steckdosen der MB100 und das Kabelfach beim Golf genannt (hierbei handelt es sich um nicht serienmäßige Nachrüstungen).

Beim täglichen Fahrzeugeinsatz nutzten nach Aussage der Fahrer 79 % den "Zündschlüssel" wie bei einem normalen Kraftfahrzeug, d.h. der Schlüssel wird beim Verlassen des Fahrzeugs abgezogen und bei längeren Standzeiten (Stau o.ä.) wird das Fahrzeug ausgeschaltet. Bemerkenswert ist aber, daß bei 9 % der Befragten das abgestellte Fahrzeug häufig eingeschaltet bleibt. Zusatzverbraucher, wie Lüfter oder Radio, werden bei 79 % genauso genutzt, wie bei einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor.

Zu den Besonderheiten eines Elektroautos gehören die relativ geringen Fahrgeräusche. Bei 53 % entstanden daraus keine Konfliktsituationen. Bei 10 % der Befragten gab es oft Probleme mit Fußgängern, die das nahende Fahrzeug nicht hörten. Bei Einsatz in Fußgängerzonen oder auf Strandpromenaden sind derartige Probleme häufiger zu erwarten.

12.6. Zusammenfassung der Ergebnisse

Aus der Sicht der meßtechnischen Begleitung des Flottenversuchs auf Rügen und den Arbeiten im Rahmen der Datenerfassung und -auswertung kann zusammenfassend auf folgende Ergebnisse hingewiesen werden:

- die Zielstellung des Versuches, umfangreiche Meßdaten für die Energie und Ökobilanz unter Praxisbedingungen zu gewinnen, wurde erfüllt. Die erfaßten Daten im Umfang von 570 MB liegen in archivierter Form vor und stehen den Projektpartnern für weitere Auswertungen zur Verfügung.
- das TDS 100 mit seinen Meßmöglichkeiten und der Klassiersoftware ist für die Meßdatenerfassung an Elektroautos gut geeignet. Die erarbeiteten und erprobten Meß- und Klassievorlagen für die Fahrzeuge können die Grundlage für zukünftige Langzeiterprobungen an Elektroautos bilden.
- die Demonstration des technologischen Fortschritts der neuesten Generation von Elektrofahrzeugen wird aus den im Versuch ermittelten Tagesfahrleistungen und Reichweiten (mit einer Ladung) deutlich. Ein Opel mit NiCd-Batterie fuhr unter Nutzung der Schnelladung an einem Tag 324 km und ein Mercedes Benz 190 erreichte ohne Schnellladung aber mit normalen Zwischenladungen 223 km. Praktisch erzielten Fahrzeuge mit Nickel-Cadmium-Batterien eine Reichweite von 80-90 km und Fahrzeuge mit Natrium-Nickel-chlorid-Batterien 150 km.
- am wirtschaftlichsten fuhren ein Opel Astra mit Nickel-Cadmium-Batterie und einem Verbrauch von 0,175 kWh/tkm, ein BMW mit Natrium-Nickelchlorid-Batterie und einem Netzenergieverbrauch von 0,186 kWh/tkm sowie ein Neoplan-Bus mit Na/S-Batterie und einem Verbrauch von 0,169 kWh/tkm. Wegen der großen Abhängigkeit des Netzenergieverbrauchs von der Fahrleistung und der großen Spannweite bei der Fahrleistung ist eine Mittelung nicht sinnvoll.
- für die einzelnen Fahrzeugtypen ergaben sich Abweichungen in der rekuperierten Bremsenergie. Die BMW wiesen mit ca. 18% die höchsten Werte auf. Die Rekuperation wird stark durch die Nutzung beeinflußt. Das zeigt sich bei allen Fahrzeugen in einem großen Streubereich der rekuperierten Bremsenergie.
- bei den Nutzern werden die Elektroautos überwiegend positiv beurteilt. Nach kurzer Zeit hatten sich die Fahrer an das Elektroauto gewöhnt. Auch mit den Ladetechnologien kam der größte Teil der Fahrer gut zurecht. Die begrenzte Reichweite der Elektroautos hatte keinen wesentlichen Einfluß auf die Fahrtenplanung.
- wegen der begrenzten Reichweite wird eine genaue Ladezustands- bzw. Restreichweitenanzeige für besonders wichtig angesehen. Etwa 50% der Befragten gab an, daß sie mindestens einmal die Batterie leergefahren hatten.

13 IFEU Vergleichende Ökobilanz

Bilanz der Emission von Luftschatdstoffen und Lärm sowie des Energieverbrauchs

13.1 Bilanzierung

13.1.1 Ziele der „Vergleichenden Ökobilanz“

Der wichtigste Aspekt, der den Einsatz von Elektrofahrzeugen favorisiert, ist, daß sie am Einsatzort emissionsfrei fahren, dort also keine Luftschatdstoffe emittieren. Die von konventionellen Fahrzeugen freigesetzten direkten Emissionen werden also bei deren Substitution mit Elektrofahrzeugen vermieden. Diesem offensichtlichen Vorzug der Elektrofahrzeuge stehen nicht ohne weiteres erkennbare Emissionen gegenüber, die beispielsweise bei der Stromerzeugung oder bei der Produktion der Batterien anfallen.

Im vergangenen Jahrzehnt sind zahlreiche Umweltanalysen und ökologische Vergleiche von Elektro- und Verbrennungs-Kfz unternommen worden, wie zum Beispiel /SPORCK-MANN 90/; /BLÜMEL 92/; /HOFFMANN 92/; /FFE 92/; /TÜV 93/; /KOLKE 95/; /VDEW 96/. Ange- sichts der wenigen verfügbaren Meßdaten mußten in diese Arbeiten notgedrungen zahlreiche Annahmen eingehen. In der Regel basierten sie auf wenigen Fahrzeugen, meist mit nur einem Batterietyp und stützten sich auf einen konstanten Energieverbrauchswert unter Normbedingungen. Selten wurden die Rohstoffbereitstellung und Produktion der Fahrzeuge berücksichtigt. Demgegenüber kann die „Vergleichende Ökobilanz“ im Rahmen des „Praxistests Rügen“ auf ein außerordentlich umfangreiches Datenmaterial zurückgreifen. Es beruht auf einer Fahrleistung von mehr als 1 Million Fahrzeugkilometern einer Flotte von 60 Elektrofahrzeugen mit vier verschiedenen Batterietypen.

Ziel der hier vorgestellten „Vergleichenden Ökobilanz“ ist es,

- dieses Datenmaterial so aufzubereiten, daß die wesentlichen Einflußgrößen auf den Energieverbrauch und die Emissionen herausgearbeitet und quantitativ beschrieben werden,
- mit Hilfe eines hierzu entwickelten Rechenprogrammes die wesentlichen Einflußgrößen zu variieren und ihren Effekt in Sensitivitätsanalysen darzustellen,
- maßgebliche Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen einerseits und Verbrennungsmotor-angetriebenen Fahrzeugen andererseits im lokalen, regionalen und globalen Bereich herauszustellen
- und schließlich die Vor- und Nachteile der beiden Antriebssysteme unter Variation der wichtigsten Parameter der Nutzung zu beschreiben und zu vergleichen.

Damit ermöglicht die „Vergleichende Ökobilanz“

- auf aktuellen Daten und Erkenntnissen basierend zu beurteilen und zu bewerten, an welchen Orten, unter welchen Nutzungsbedingungen mit welchem Batterietyp ein Elektro-Kfz einem Verbrennungs-Kfz hinsichtlich welcher Wirkungen überlegen, unterlegen oder gleichrangig ist,
- Einsatzbedingungen abzuleiten, unter denen bestimmte ökologische Vor- bzw. Nachteile von Elektrofahrzeugen und konventionellen Fahrzeugen besonders hervortreten, um diese gezielt zu fördern bzw. zu vermeiden,
- Anforderungsprofile an die Fahrzeuge oder einzelne Fahrzeugkomponenten zu entwickeln, denen sie unter ökologischen Aspekten entsprechen müssen, und
- schließlich mit dem entwickelten Instrumentarium die Umweltwirkungen absehbarer oder möglich erscheinender Verbesserungen der gegenübergestellten Systeme abzuschätzen.

13.1.2 Methodik und Bilanzierungsmerkmale

Das dieser „Vergleichenden Ökobilanz“ zugrunde liegende Konzept weist im wesentlichen folgende Merkmale auf:

- Die Bilanzierung erstreckt sich über den **gesamten Lebensweg** der Elektro- wie der Verbrennungskraftfahrzeuge. Das heißt grundsätzlich werden die Umweltbelastungen durch Produktion, Betrieb sowie Wiederverwertung der Fahrzeuge und ihrer Komponenten, die damit zusammenhängenden Transportprozesse und die Bereitstellung der eingesetzten Endenergeträger für alle Lebenswegabschnitte in die Bilanzierung einbezogen.
- Die Bilanzierung folgt den Prinzipien der **vergleichenden Ökobilanz**, indem allein der Unterschied in den Umweltauswirkungen zwischen dem Einsatz von Elektrofahrzeugen und dem Einsatz von Verbrennungskraftfahrzeugen beschrieben werden soll. Folglich kann die Bilanzierung derjenigen Lebenswegabschnitte entfallen, die entlang der Lebenswege der zu vergleichenden Systeme in identischer Form auftreten. Dazu zählt der größte Teil der benötigten Infrastruktur wie z. B. Straßen, Fabrikgebäude und Maschinen. Die Bilanzierung von Produktion und Entsorgung der Fahrzeuge kann sich auf solche Bauteile beschränken, in denen sich beide Systeme unterscheiden. Demzufolge werden Antriebsstrang und Energiespeicher erfaßt, während z.B. die Karosserie unberücksichtigt bleibt.
- Im Rahmen dieser Untersuchung werden Bilanzierung und Vergleich nur für ausgewählte Kriterien unternommen. Dies sind der Ressourcenverbrauch, Klimawirksamkeit, Stickstoffeintrag und Versauerung von Gewässern und Böden, Ozonbildungspotential, Sachgüterschäden und Humantoxizität sowie die Lärmbelastung.

Tab. 13.1 Kriterien für bewertete Umweltwirkungen und deren Indikatoren

Kriterium	Indikator	Symbol, Bezeichnung
Klimawirkung	Kohlendioxid und Methan	CO ₂ , CH ₄ (GWP: 24,5 x CO ₂)
Sommersmog	Stickoxide, Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe	NO _x , NMHC
Versauerung	Stickoxide, Schwefeldioxid	NO _x , SO ₂
Stickstoffeintrag	Stickoxide	NO _x
Sachgüterschäden (Gebäude, Material)	Stickoxide, Schwefeldioxid	NO _x , SO ₂
Humantoxizität	Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (PAH), Dieselpartikel *, Benzol, Stickstoffdioxid	NMHC, Partikel *, Benzol, NO ₂
Ressourcenverbrauch	Primärenergieverbrauch	
Lärmbelastung	Schalldruckpegel bei verschiedenen Fahrsituationen	db(A)

* unbeschadet der wissenschaftlichen Kontroverse um ihre Kanzerogenität

- Anders als im Falle der klimawirksamen Gase ist für die Wirkung der Luftschadstoffe der Ort der Freisetzung von Bedeutung. Die Emissionen werden daher drei Emissionsortsklassen („EOK“) zugeordnet: EOK I: Ballungsraum (innerorts); EOK II: Umland (außerorts); EOK III: unbesiedeltes Gebiet. Um den Bezug zur Wirkung herstellen zu können, werden die Emissionen je nach Wirkungsspektrum und dem Ort ihrer Freisetzung in die Kategorien „lokal wirksame Emissionen“, „regional wirksame Emissionen“ und „global wirksame Emissionen“ eingeordnet.
- Neben den stofflichen Emissionen geht besonders auch von der **Schallemission** eine Belastung für den Menschen aus. Die Unterschiede im Niveau der Geräuschentwicklung durch den Betrieb von Elektro- und Verbrennungskraftfahrzeugen wurden während des Rügenversuchs im Rahmen eines eigenen Meßprogramms festgestellt und in die „Vergleichende Ökobilanz“ integriert.

Schäden, die durch andere luftgetragene Schadstoffe, über andere Pfade oder Umwelt-einwirkungen entstehen können, werden nicht betrachtet. Hiermit sind beispielsweise radioaktive Emissionen gemeint bzw. die **Risiken**, die mit der nuklearen Stromerzeugung verbunden sind und somit anteilig der Elektrotraktion zuzurechnen wären. Ebensowenig werden die Risiken untersucht und bewertet, die mit der Förderung und dem Transport von Rohöl einhergehen und damit anteilig der Nutzung von Mineralölprodukten anzurichten wären.

Durch die Abgrenzungen dieser Arbeit sind potentielle, mit der Fahrzeughherstellung verbundene Einträge von Schwermetallen und anderen gefährlichen Stoffen (Dioxin) in die Umwelt nicht grundsätzlich aus der Betrachtung ausgeschlossen. Ihre Verbreitung erfolgt nämlich zum Teil über den Luftpfad. In diesem Kontext haben die Arbeiten eines US-amerikanischen Autorenkreises (z.B.: /LAVE 95 ET AL./ und /LAVE 96 ET AL./) eine weltweite Kontroverse über die mit der Produktion von Traktionsbatterien verursachte Bleibelastung der Umwelt ausgelöst. Eine Berücksichtigung dieser Emissionsquelle kann aber nicht bei Bleiemissionen halt machen, - praktisch der ausschließliche Gegenstand der amerikanischen Untersuchungen -, sondern muß auf eine Belastung durch andere Schwermetalle wie etwa Cadmium und die genannten Dioxine und andere Gefahrstoffe ausgedehnt werden. Dann ist aber nicht mehr allein die Batterieherstellung und Wiederaufbereitung zu untersuchen, sondern auch die Produktion anderer Fahrzeugkomponenten, die energetischen Vorketten und infrastrukturelle Leistungen, die teilweise durch die vergleichende Betrachtungsweise ausgeschlossen wurden. Der Eintrag in die Luft muß vom Eintrag in andere Kompartimente, nämlich Wasser und Boden unterschieden werden. Mit einer entsprechenden Ausweitung der Arbeit würde die ursprüngliche Intention und Schwerpunktsetzung der Arbeit verlassen. Sie kam aus Gründen der Zeit und des Aufwands nicht in Frage, noch sind die Probleme, die sich aus der Datenlage ergeben heute näherungsweise absehbar.

- Für Analyse und Vergleich gelten das **Bezugsjahr 1996** und **der Bezugsraum Deutschland**. Dabei werden den für Rügen entwickelten Elektrofahrzeugen neue Verbrennungskraftfahrzeuge gegenüber gestellt, die der im Bezugsjahr gültigen Gesetzgebung entsprechen. Die Emissionen der stationären Quellen, d. h. der Kraftwerke und der Raffinerien werden für den bundesdeutschen Durchschnitt dieser Quellen im Bezugsjahr ermittelt. Für die vorgelagerten Prozesse sowie für den Abbau und die Weiterverarbeitung von Rohstoffen für die Produktion von Fahrzeugkomponenten gelten - soweit möglich und beschreibbar - die jeweils aktuellen lokalen Randbedingungen. Bei der Diskussion des Potentials für das Jahr 2000 werden technische Verbesserungen u. a. durch Umrüstungen oder in der Auswirkung von zu erwartenden gesetzlichen Maßnahmen berücksichtigt.

- Die vergleichende Bilanzierung des Betriebs der Elektro- bzw. Verbrennungskraftangetriebenen Fahrzeuge wird hauptsächlich über den Verbrauch der jeweiligen Endenergieträger durchgeführt, also Strom bei den Elektrofahrzeugen und Otto- bzw. Diesalkraftstoff bei den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Dabei werden dem Stromverbrauch die mit der Stromproduktion und -bereitstellung verbundenen Emissionen zugerechnet. Das sind nicht allein die unmittelbar beim Betrieb der Kraftwerke entstehenden Emissionen, sondern auch diejenigen vor- und nachgelagerter Bereiche, z. B. die **Förderung der jeweiligen Rohenergieträger, deren Aufbereitung und Transport und die Verteilungsverluste bei Strom**. Bei herkömmlich angetriebenen Fahrzeugen werden einerseits die *direkten* Emissionen, also die mit der Verbrennung der Kraftstoffe verbundenen Abgasemissionen in den jeweiligen Betriebszuständen, andererseits die *indirekten*, mit der Bereitstellung der Kraftstoffe verursachten Emissionen erfaßt. Die Bereitstellung der Kraftstoffe umfaßt die **Förderung, Aufbereitung und den Transport des Rohöls zur Raffinerie, dessen Raffination zu Otto- bzw. Diesalkraftstoff sowie den Transport der Kraftstoffe bis zum Endverbraucher**, einschließlich der damit verbundenen Umfüll- und Verdunstungsverluste.
- Der Aufwand für die Produktion, den Ersatz und die Wiederverwertung der Fahrzeuge und Komponenten ("**Materialbilanzierung**") wird bilanziert, wenn Elektrofahrzeuge und Verbrennungskraftfahrzeuge darin wichtige Unterschiede aufweisen. Das trifft vor allem auf den Energiespeicher zu, also Kraftstofftank einerseits und Batterie andererseits. Die bei der Wiederaufbereitung gebrauchter Fahrzeugkomponenten gewinnbaren Sekundärrohstoffe werden im Rahmen eines geeigneten Ansatzes gut eschrieben.

13.1.3 Fahrzeuge

Gegenstand dieses Kapitels ist die Ermittlung von grundlegenden Fahrzeugdaten, die über die Rügen-Versuchsdaten (siehe Kapitel 13.1.6 „**Betrieb der Elektrofahrzeuge**“) hinaus für einen Vergleich benötigt werden. Darunter sind vor allem die Verbrauchs- und Emissionsfaktorensätze der entsprechenden Verbrennungsfahrzeuge zu verstehen, aber auch einzelne Werte für Elektrofahrzeuge, soweit sie nicht aus Versuchsdaten zugänglich sind. Sie werden im allgemeinen der Literatur entnommen oder von einer gesicherten Datengrundlage ausgehend abgeleitet. Zu diesem Zweck werden zunächst die elektrischen Versuchsfahrzeuge der Rügen-Flotte nach Fahrzeugarten und Batterietypen geordnet. Die entstehenden Klassen bilden den Ausgangspunkt für die Wahl entsprechender, verbrennungsmotorisch angetriebener Vergleichsfahrzeuge.

13.1.3.1 Elektrofahrzeuge

Die Fahrzeug-Flotte auf Rügen bestand aus insgesamt 60 Fahrzeugen, davon 37 Personenkraftwagen (Pkw), 20 Transportern bzw. leichten Nutzfahrzeugen (Nfz) und drei Omnibussen. Pkws, leichte Nutzfahrzeuge und Busse bilden jeweils eigene Klassen, die bei den Pkw und den leichten Nutzfahrzeugen nach dem Gewicht noch einmal in zwei Unterklassen aufgeteilt werden können. Den Pkw-Klassen gehören 12 unterscheidbare Fahrzeugtypen an, die wiederum mit mehreren Exemplaren (bis zu 6 identischen Fahrzeugen) vertreten waren (siehe Tab. 13.6 und Aufstellungen im Berichtsteil der DAUG und HTW). Während die Pkw auf Rügen durch eine ausreichende Zahl von Fahrzeugen unterschiedlicher Bauart verhältnismäßig breit repräsentiert waren, standen bei den Transportern nur zwei Bauartverschiedene Nfz-Typen im Praxistest, nämlich der leichten Transporter vom Typ Volkswagen T4 und der schwere Transporter vom Typ Mercedes MB 100. Beide Transportertypen waren jedoch mit jeweils 10 Fahrzeugen vertreten.

13.1.3.1.1 Batterietyp und Batterienennenergie

Vier verschiedene Batteriesysteme waren auf Rügen im Praxistest, nämlich Pb-Gel (zwei Exemplare), NiCd (23 Exemplare), NaNiCl₂ (31 Exemplare) sowie 3 NaS-Batterien. Die beiden letztgenannten Systeme sind sogenannte *heiße Batterien*, die bei einer Arbeitstemperatur von etwa 300°C betrieben werden. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Eigenverbräuche grundlegend von den wäßrigen Batteriesystemen Pb-Gel und NiCd, die bei Umgebungstemperatur arbeiten.

Die Wahl des *Batterietyps* bedingt viele Verbrauchsgrößen wie den Joulschen Verlust am Innenwiderstand, die Selbstentladung oder den Ladewirkungsgrad. Diese Eigenverbräuche können zum Gesamtwirkungsgrad der jeweiligen Batterie zusammengefaßt werden. Er unterscheidet sich von Batterie zu Batterie nach einzelnen Beiträgen und entsprechend im Endwert. Der Gesamtwirkungsgrad einer Traktionsbatterie ist kein unveränderlicher Kennwert, sondern wird ganz wesentlich von den Einsatzbedingungen eines Fahrzeugs beeinflußt. Das Verhalten des Nutzers wird im allgemeinen dazu führen, daß die Verbräuche gegenüber einem idealen (optimalen) Referenzfall ansteigen. Ein vorgegebenes Nutzungsmuster wiederum wird den Wirkungsgrad unterschiedlicher Batteriesysteme unterschiedlich beeinflussen. Aus diesem Grund muß in der Bilanz zwischen den Batteriesystemen unterschieden werden.

Eine weitere Variable stellt die Speicherenergie einer Batterie dar. Mit zunehmender *Batterienennenergie* steigen die absoluten Beträge der Selbstentladung und des Heizenergiaufwands heißer Batterien, während die Joulschen Verluste infolge geringeren Innenwiderstands im allgemeinen abnehmen. Die Batterie hat außerdem über ihr Gewicht einen Einfluß auf den Antriebsenergieverbrauch. Wegen der aus Einzelzellen weitgehend frei wählbaren Architektur einer Traktionsbatterie war auf Rügen ein breites Spektrum von Batteriegrößen vertreten. Für die Zwecke der Auswertung war deswegen eine Vereinheitlichung der Energieinhalte geboten. Es ergaben sich drei Klassen bei den pauschalen Nennenergien von 15 kWh, 25 kWh und 35 kWh (siehe auch Tab. 13.23), entsprechend einer „kleinen“ und „großen“ Pkw-Batterie und einer Batterie für Transporter (35 kWh).

13.1.3.1.2 Kraftstoffzusattheizung

Bei Konversionsfahrzeugen, also für den Elektroantrieb umgerüsteten konventionellen Serienfahrzeugen, versucht man im allgemeinen die vorhandenen Bauteile der konventionellen Vorläufer zu nutzen. Deshalb werden in Elektrofahrzeuge im allgemeinen Kraftstoff-Heizungen (Otto- oder Dieselkraftstoff) mit Wasser als Wärmeträgermedium eingebaut. Zur Bilanzierung des durch die Zusatzheizung des Elektrofahrzeugs verursachten Energieverbrauchs und der Emissionen wurden Herstellerdaten einer Ottokraftstoff-betriebenen Wasserheizung /EBERSPÄCHER 95/, /WEBASTO 95/ verwendet.

Die jahreszeitlichen Temperaturwerte bzw. Temperaturschwankungen wurden aus monatsmittleren Tagesdaten der Lufttemperatur (Stadt klima) für die alten Bundesländer abgeleitet /TÜV 87/. Die drei kältesten Monate haben - abweichend von den kalendarischen Jahreszeiten - ein Temperaturmittel von 1,5°C, die drei wärmsten Monate ein Temperaturmittel von 17,7°C. Die verbleibenden 6 Monate liegen mit 9,5°C in der Mitte. Für die Jahreszeiten gelten in dieser Studie vereinfachend die folgenden Festlegungen: Winter: 0°C, Sommer 20°C und Frühjahr/Herbst 10°C. Eine weitere Differenzierung der Außentemperatur nach Tageszeiten wurde nicht vorgenommen. Der Sollwert für die Temperatur im Fahrzeuginnenraum wird mit 20 °C angesetzt. Daraus ergibt sich sowohl für Frühjahr/Herbst als auch im Winter ein Heizenergiebedarf.

Zur Abschätzung des Energiebedarfs werden Pkw-Meßdaten eines Automobilherstellers /BMW 96/ zugrunde gelegt. Die Außentemperatur im Winter erfordert danach bei Frischluft-

zufuhr (mittlere Gebläsestufe mit ca. 2 m³ gefördertem Luftvolumen pro min.) eine Heizleistung von 2000 W, um im Fahrzeuginnenraum die erforderliche Temperatur einzuhalten. Die Bedarfskurve verläuft der Quelle zufolge in dem hier benötigten Temperaturbereich linear. Die Steigung beträgt 100 W pro Grad Celsius Temperaturdifferenz zwischen Fahrzeuginnern und Außentemperatur. Somit wird im Frühjahr und Herbst eine Leistung von 1000 W benötigt. Es wird angenommen, daß die Heizung während der gesamten Fahrzeit und mit unveränderter Leistung betrieben wird. Für die Umrechnung auf den fahrleistungsbezogenen Heizenergiebedarf und die entsprechenden Emissionen wird die durchschnittliche Pkw-Geschwindigkeit nach NEFZ-Zyklus mit 31,4 km/h, bei leichten Nutzfahrzeugen nach ECE-Zyklus mit 18,7 km/h angesetzt. Wegen des größeren Kabinenvolumens wird für die leichten Nutzfahrzeuge die doppelte Heizleistung angenommen. Beide Annahmen zusammen bewirken einen 3,5-fach höheren kilometerbezogenen Heizungsenergieverbrauch der leichten Nutzfahrzeuge gegenüber den Pkw.

Wie bei den Verbrennungsmotoren wird auch bei den Kraftstoffheizungen von der vollständigen Verbrennung im Kraftstoff enthaltenen Kohlenstoffs, nämlich 0,866 kg C pro kg Kraftstoff /DGMK 92/ ausgegangen. Mit den zuvor dargelegten Annahmen und den Emissionsfaktoren der Hersteller ergeben sich die Werte der fossil befeuerten Heizung in Tab. 13.2.

Tab. 13.2 Heizleistungsbedarf und Emissionsfaktoren für die Kraftstoffzusatzheizung

	Leistung	CO₂	CO	HC	NO_x (NO₂)	Kraftstoff- verbrauch
	W	g/km	g/km	g/km	g/km	g/km
Pkw Frühj./Herbst	1000	9,93	0,008	0,00029	0,0011	3
Pkw Winter	2000	19,9	0,015	0,00058	0,0023	6
INfz Frühj./Herbst	2000	39,7	0,031	0,00115	0,0045	13
INfz Winter	4000	79,5	0,062	0,00229	0,0090	26

13.1.3.2 Verbrennungskraft-Fahrzeuge

Elektro- und Verbrennungskraft-Fahrzeuge heutiger Technik sind zu unterschiedlich, als daß sie sich in ihren Nutzungseigenschaften genau entsprechen könnten. Obwohl die Elektrofahrzeuge des Rügen-Versuchs aus Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor hervorgegangen sind, erreichen sie bei weitem nicht deren Endgeschwindigkeit und Reichweite. Insbesondere bei Otto-Pkw hat die erreichbare Endgeschwindigkeit bzw. die entsprechende Motorleistung einen großen Einfluß auf den Kraftstoffverbrauch auch in niedrigeren Geschwindigkeitsbereichen. Ein Verzicht auf Motorleistung bedeutet bei den geringeren Leistungsanforderungen im Stadtverkehr keine Einschränkung, spart jedoch Kraftstoff. Demnach sollen die in dieser Untersuchung verwendeten Vergleichsfahrzeuge mit Verbrennungsmotor mit möglichst geringer Motorleistung ausgestattet sein.

Der Vergleich von Elektro- und konventionellen Kraftfahrzeugen wird neben der Wahl der Vergleichsfahrzeuge vor allem durch das jeweils zugrundegelegte Fahrverhalten beeinflußt. Das betrifft u. a. den Beschleunigungs-, den Konstantfahrt- und den Leerlaufanteil sowie die Geschwindigkeitsstufen. Die Unterschiede in den daraus resultierenden Fahrkurven wirken sich vor allem auf die Emissionen der Verbrennungs-Kfz stark aus. Fahrten mit konventionellen Fahrzeugen und entsprechende Emissionsmessungen waren kein Bestandteil

des „Praxistests Rügen“. Viele Gründe sprechen dafür, das den Verbrauchs- und Emissionsberechnungen von Elektro- und Verbrennungs-Kfz zugrundeliegende Fahrverhalten mit denjenigen Fahrkurven abzubilden, die in der europäischen Abgasgesetzgebung zur Einhaltung der Grenzwerte vorgeschrieben sind.

- Der Fahrzyklus nach ECE 15, auch Europatest oder NEFZ-Innenorts genannt, bildet zahlreiche Fahrzustände im Innerortsverkehr, der Fahrzyklus EUDC oder NEFZ-Außenorts den Regionalverkehr ab. Für diese Fahrkurven liegen umfangreiche Meßwerte des TÜV Rheinland aus den Jahren 1987-90 vor /TÜV 94A/, die eine differenzierte Ableitung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen auch für das Bezugsjahr 1996 ermöglichen (siehe dazu Tab. 13.2.)
- Die Zyklenverbräuche der Elektrofahrzeuge im ECE bzw. EUDC wurden ab Batterie gemessen. Ein Energieeigenverbrauch der Batterie wird also nicht erfaßt. Den höheren Beschleunigungen im innerstädtischen Verkehr entspricht jedoch auch ein höherer Innenwiderstandsverlust (Erwärmung der Batterie). Um dieser Abhängigkeit Rechnung zu tragen, wurden auf Rügen für alle Fahrzeuge die Ströme bei hoher (Innenortsverkehr) bzw. niedriger (Außenortsverkehr) Beschleunigung ermittelt. Aus diesen Werten und dem Innenwiderstand der jeweiligen Batterie konnte der Innenwiderstandsverlust im ECE bzw. EUDC näherungsweise angegeben werden.
- Ein typisches Fahrverhalten für den Stadt- und Regionalverkehr gibt es nicht. Die Beschreibung des mittleren Fahrverhaltens der Testteilnehmer auf Rügen führt zu keinem statistisch abgesicherten und auf Deutschland übertragbaren Parametersatz. Etwa die Hälfte der befragten Fahrzeugnutzer auf Rügen gab an, daß ihr Fahrstil durch das Elektrofahrzeug „ruhiger“ geworden sei. Unabhängig vom Rügen-Versuch wird auch von anderen Autoren /KNIE 96 ET AL./ berichtet, daß eine solche Änderung im Fahrverhalten mit dem Elektrofahrzeug in Verbindung gebracht werden kann. Andererseits kann das Elektrofahrzeug im Schnellstraßenverkehr - oder im hier nicht betrachteten Autobahnverkehr - wegen der geringeren Leistungsreserven nicht immer so gefahren werden wie ein „entsprechendes“ Verbrennungskraftfahrzeug. Wenn ein dosierter Umgang mit der Motorleistung „nur“ technisch erzwungen wird, kann er nicht als Änderung im Fahrerverhalten gewertet werden. Wegen der Unsicherheiten, die mit einem Antrieb-spezifischen Fahrerverhalten verbunden wären, soll den Nutzern von Elektro- und Verbrennungs-Kfz in dieser Untersuchung grundsätzlich das gleiche Fahrerverhalten unterstellt werden.

Trotz dieser Gründe für die Verwendung der gesetzlichen Testzyklen als Basis für die Verbrauchs- und Emissionsbestimmung sind damit auch einige Probleme verbunden:

- Die Fahrkurve für den Stadtbereich, der ECE-Zyklus, entspricht vor allem dem Verkehr im Kern der Städte, da sie eine Durchschnittsgeschwindigkeit von nur 19 km/h und einen hohen Leerlaufanteil aufweist. In diesem Fahrbereich haben die konventionell angetriebenen Fahrzeuge, insbesondere diejenigen mit Ottomotor, wegen der bereits angesprochenen Ausrichtung auf hohe Geschwindigkeiten hohen Kraftstoffverbrauch und relativ hohe Emissionen. Bei Wahl eines schnelleren Zyklus würden die Ergebnisse für die konventionellen Kraftfahrzeuge günstiger ausfallen.
- Die ECE-Fahrkurve stammt aus den 60er Jahren. Seither sind die durchschnittlichen Motorleistungen der Pkw erheblich angestiegen. Was an Beschleunigung technisch möglich ist, kann sich auch im realen Beschleunigungsverhalten niederschlagen. Somit dürften die Beschleunigungswerte der Stadtfahrkurve heute zu niedrig liegen und damit zu einer Unterschätzung des Endenergieverbrauchs der Fahrzeuge führen /PETERSEN 96 ET AL./.

Zur Beschreibung der Außerortsfahrten dient der EUDC (Extra Urban Driving Cycle), dessen Spitzengeschwindigkeit bei 120 km/h liegt. Schwach motorisierte Fahrzeuge (mit einer Höchstgeschwindigkeit unter 130 km/h), wie die im Rügen-Test eingesetzten Elektro-Kfz, fahren im EUDC maximal 90 km/h. Alle anderen Fahrzeuge, also auch die Vergleichsfahrzeuge mit konventionellem Motor, werden im EUDC-Test bis auf 120 km/h beschleunigt. Daraus ergibt sich bei der Verbrauchs- bzw. Emissionsbestimmung für den Außerortsverkehr eine leichte Verzerrung zu Lasten der konventionellen Fahrzeuge, die mit dem vorhandenen Datenmaterial nicht korrigiert werden konnte.

Tab. 13.3 Wichtige Kenndaten der Pkw-Testzyklen ECE R15 (=Europatest) und EUDC (zusammengefaßt als NEFZ) und des US-amerikanischen FTP 75

Testzyklen	ECE R 15 = NEFZ-Innenorts	EUDC *= NEFZ-Außenorts	FTP 75
Testlänge (km)	4,05	6,96 (6,59*)	ca. 17,4
Testdauer (min)	13,7	6,7	41,5
Geschwindigkeit (km/h): durchschnittlich maximal	18,7 50	62,6 (59,3*) 120 (90*)	31,7 91,2
Leerlaufanteil	31 %	10 %	18 %
Motorstart bei	ca. 20 °C	betriebswarm	ca. 20 °C
Beginn der Messung	40 s nach Motorstart	bei laufendem, betriebswarmem Motor	mit dem Motorstart

* in der Version für schwach motorisierte Fahrzeuge (Höchstgeschwindigkeit kleiner als 130 km/h)

Quelle: Verschiedene Meßwertvorschriften; Meßdaten nach TÜV Rheinland/TÜV 94A/

Die Abgasgesetze enthalten keine eindeutigen Vorschriften für den Betrieb elektrischer Verbraucher während der Meßfahrt. Solange jedoch keine Klimaanlagen oder Verbraucher mit ähnlich hohem Leistungsbedarf zum Einsatz kommen, ist ein höherer Kraftstoffverbrauch durch den elektrischen Verbrauch im Bordnetz kaum nachweisbar.¹

Für diese beiden Fahrzyklen werden nachfolgend die Ableitungen der Emissionsfaktoren und des Kraftstoffverbrauchs der Vergleichsfahrzeuge beschrieben. Die Trennung der Faktoren in „warme Emissionen“ und den Kaltstartzuschlag wird bei den Fahrzeugen mit Ottomotor behandelt, ebenso wie die Verdunstungsemissionen. Grundsätzlich werden die Emissionen von Verbrennungsmotoren auch vom Grad der Längsneigung entlang der Fahrtstrecke und der Höhe über NN beeinflußt. Für die betrachteten Fahrzeugarten und den Bezugsraum dieser Studie kann auf eine Korrektur verzichtet werden.

¹ Der Stromverbrauch des Bordnetzes ist bei Verbrennungs-Kfz im allgemeinen geringer als bei Elektro-Kfz, da Hilfsaggregate und Servopumpen hier direkt vom Verbrennungsmotor angetrieben werden können.

13.1.3.2.1 Pkw mit Ottomotor

Die Emissionsfaktoren für die Pkw müssen somit die Vorgaben „Bezugsjahr 1996“, „Fahrzeug mit schwacher Motorisierung“ und „Bezug auf den europäischen Testzyklus“ erfüllen. Hinzu kommt, daß die ermittelten Emissionsfaktoren die gesonderte Berücksichtigung der Kaltstartzuschläge ermöglichen müssen. Diese werden zu den „warmen Emissionen“ zusätzlich emittiert, wenn Motor bzw. Katalysator noch nicht betriebswarm sind. Solche Kalt-emissionen sind bei den aktuellen Katalysatorsystemen mit ihren sehr hohen Wirkungsgraden im Warmbetrieb von besonderer Bedeutung für die Emissionsermittlung.

Im Bezugsjahr 1996 sind praktisch alle neuen Fahrzeugtypen nach der Grenzwertstufe EURO II zertifiziert, die ab 1. 1. 1997 obligatorisch ist. Allerdings liegen für derartige Pkw noch keine repräsentativen Emissionsmessungen vor. Somit mußten die Emissionsfaktoren nach folgendem Verfahren abgeleitet werden /IFEU 95B/:

- Als Basis dienen die Emissionsdaten für Otto-Pkw mit geregeltem Katalysator (alle Hubraumklassen) nach TÜV Rheinland /TÜV 94A/. Aus den Daten für den Europatest-kalt werden mit Hilfe des Berechnungsverfahrens für den Kaltstartzuschlag und der entsprechenden Faktoren die Emissionsfaktoren für den Europatest-warm zurückgerechnet.
- Durch eine Simulation von Änderungsfaktoren, die sich schadstoffspezifisch und für die Warm- und Kaltemission getrennt auf die realen Basisfaktoren beziehen und eine Unterschreitung des zukünftigen Grenzwertes garantieren sollen, werden die Emissionsfaktoren für EURO II abgeschätzt. Zusätzlich wird ein Korrekturfaktor für die Berechnung des Kaltstartzuschlags berechnet.
- Die Freiheitsgrade dieser Abschätzung werden durch eine Diskussion der technischen Möglichkeiten zur Erfüllung der vorgegebenen Minderungsziele und Gespräche mit Experten eingeschränkt.

Mit diesem Verfahren² wurden die Emissionsfaktoren für die **limitierten Schadstoffe** NO_x, HC und CO im Innerorts- und Außerortsverkehr abgeleitet (siehe Tab. 13.4). Sie beziehen sich auf eine mittlere Laufleistung von 50.000 km. Da die EURO II-Grenzwerte für Otto-Pkw aller Größenklassen gleich sind, kann die Unterscheidung kleiner und großer Fahrzeuge entfallen.

Bei Otto-Pkw resultieren NMHC-Emissionen in zum Teil nennenswertem Umfang aus der Kraftstoffverdunstung infolge der **Tankatmung** und infolge des **Heiß- oder Warmabstellen** des Motors. Die Berechnung dieser Effekte basiert auf den Werten des /HANDBUCH EMISSIONSFÄKTOREN 95/ bzw. auf dem Daten- und Rechenmodell /DRM 96/. Da diese Daten noch auf die erste Generation von Otto-Pkw mit geregeltem Katalysator zurückgehen, können sie für heutige EURO II-Pkw niedriger ausfallen. Eine Korrektur war im Rahmen dieser Untersuchung nicht möglich. Der Einfluß auf das Endergebnis ist jedoch gering, da Tankatmung und Warmabstellen beim Nutzungsmuster A (siehe Tab. 13.27) nur zu rund 10 % zur NMHC-Gesamtemission beitragen.

Die darüber hinaus infolge einer Tankwanddiffusion sowie als „Running losses“ auftretenden Kraftstoffemissionen werden wegen ihrer Geringfügigkeit bei heutigen Neufahrzeugen vernachlässigt. Die Verdunstungsemissionen während der Betankung der Fahrzeuge bzw. aus dem sonstigen Tankstellenbereich werden im Rahmen der Raffinerie-bedingten Emissionen erfaßt.

² Dieses Verfahren entspricht dem neuen Emissionsberechnungssystem, das im Auftrag des Umweltbundesamtes u. a. vom TÜV Rheinland konzipiert wurde. Die Umsetzung erfolgte im „Handbuch für Emissionsfaktoren“ von INFRAS Bern /HANDBUCH EMISSIONSFÄKTOREN 95/ und im „Daten- und Rechenmodell: Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland 1980 bis 2010“, IFEU Heidelberg /DRM 96/.

Die Emissionsfaktoren der **nicht limitierten Schadstoffe** Methan und Benzol werden als feste Anteile an den Faktoren der Kohlenwasserstoffe abgeleitet, jedoch mit einem eigenen Wert für Warmbetrieb und Kaltstartzuschlag /IFEU 95A/.

Die Emission von CO₂ und SO₂ wird über den **Kraftstoffverbrauch** unter der Annahme vollständiger Umsetzung direkt aus dem Kohlenstoff- bzw. Schwefelinventar der Kraftstoffe abgeleitet. Der Kohlenstoffgehalt von Otto- und Diesekraftstoff beträgt 86,6 % C /DGMK 92/. Bei Schwefel wurde mit einem mittleren Wert von 0,025 Gew.-% S für Ottokraftstoff bzw. 0,045 Gew.-% S für Diesekraftstoff gerechnet.

Tab. 13.4 Abschätzung der EURO II-Emissionsfaktoren für Otto-Pkw

	CO	HC	NO _x	HC+NO _x
NEFZ-Faktoren für Otto-Pkw EZ 1987 - 1990 nach TÜV				
Gesamt-NEFZ (g/km)	2,39	0,303	0,383	0,685
ETK (g/km)	5,23	0,699	0,525	1,225
ETW (g/km) (berechnet)	1,27	0,140	0,257	0,397
EUDC (g/km)	0,76	0,074	0,301	0,375
EURO II-Seriengrenzwerte (ab 1996/97 in g/km) [NEFZ]	2,20			0,50
geschätzte Absenkungsraten zum Erreichen von EURO II				
Warmbetrieb Kaltstartzuschlag	- 70 % - 50 %	- 70 % - 50 %	- 20 % - 50 %	
geschätzte EURO II-Emissionsfaktoren im NEFZ				
Gesamt-NEFZ (g/km)	1,01	0,132	0,28	0,41
ETW (g/km)	0,38	0,042	0,21	
EUDC (g/km)	0,23	0,022	0,24	
Anmerkungen: die Werte sind hier lediglich wegen der besseren Nachvollziehbarkeit mit großer Zahlengenauigkeit dargestellt.				
Quellen: TÜV Rheinland, Verfahren und Schätzungen durch IFEU				IFEU 1996

Zur Bestimmung des spezifischen **Kraftstoffverbrauchs** der Vergleichs-Pkw wurden entsprechend der Einteilung der Elektro-Pkw in leichte und schwere Pkw auch bei den Otto-Pkw zwei Klassen gebildet, die sich jeweils aus den typgleichen konventionellen Fahrzeugen mit niedriger Motorleistung und niedriger Hubraumgröße zusammensetzen:

- Die kleine Klasse der Otto-Pkw setzt sich aus dem VW Golf und dem Opel Astra zusammen. Der Golf weist bei einer Motorisierung mit 44 kW/1,6 l Hubraum einen ETK-Verbrauch von 8,9 l/100 km (Herstellerangabe) auf. Ein VW-Golf mit dem nur im Polo angebotenen Motor 37 kW/1,0 l hätte einen ETK-Verbrauch bei 8,1 l/100 km. Die ETK-Verbräuche des Opel Astra liegen deutlich höher. Der entsprechende Wert beträgt ca. 9,0 l/100 km, wenn man die Ausstattung mit dem 33 kW/1,2 l-Motor des Opel Corsa unterstellt. Als „mittlere“ Verbrauchswerte setzen wir 8,9 l/100 km (ETK), 7,4 (ETW) und 5,4

(EUDC) an. Der ETW-Wert wurde mit dem TÜV-Kaltstartfaktorensystem aus dem Kaltwert berechnet, um eine konsistente Berechnung von Kalt- und Kühlstartemissionen zu gewährleisten (siehe Tab. 13.6).

- Die obengenannten Vergleichs-Pkw haben eine Motorleistung, die rund doppelt so hoch wie die Dauerleistung der Elektro-Pkw und um ca. 25 % über als ihrer Spitzenleistung liegt. Es gibt keinen eindeutigen Maßstab für den Vergleich elektrischer und konventioneller Motorleistung. Deshalb wird an dieser Stelle auf die Simulation noch geringerer Motorleistungen und vor allem Hubräume verzichtet, die in der Gegenüberstellung mit Elektrofahrzeugen zu einem geringeren Verbrauch und damit zu einer günstigeren Kohlendioxidemission führen würde.
- Die angenommenen Verbräuche der kleinen Klasse stimmen mit den Meßwerten des TÜV Rheinland an repräsentativen Kollektiven der Hubraumklasse < 1,4 l überein, wenn man seit den Baujahren 1987-1989 eine Kraftstoffersparnis um 5 % zuläßt. Diese Pkw hatten eine relativ hohe mittlere Motorisierung von 46 kW und ein niedriges mittleres Gewicht von 840 kg im Vergleich mit den auf Rügen eingesetzten Pkws Golf und Astra.
- Der Kraftstoffverbrauch für die Otto-Pkw der großen Klasse werden analog zu denen der kleinen Klasse aus Herstellerangaben für den Mercedes Benz C 180 und den BMW 316i ermittelt. Die Realwerte werden auf einen entsprechenden Pkw mit einer hypothetischen Motorleistung von 60 kW, bei 1,4 l Hubvolumen extrapoliert. Mit dieser Annahme liegt die Motorleistung noch mehr als doppelt so hoch wie die Dauer-, fast doppelt so hoch wie die Spitzenleistung der entsprechenden Elektro-Pkw auf Rügen (siehe Tab. 13.6). Auch hier wäre eine weitere Absenkung von Motorleistung und Hubvolumen zu rechtfertigen und hätte dann einen geringeren Kraftstoffverbrauch der Vergleichs-Pkw zur Folge.

Annahmen zum Kaltstart

Um den Kaltstarteinfluß in der Emissionsberechnung, vor allem bei der Variation der Nutzungsmuster, möglichst realitätsnah zu berücksichtigen, werden folgende Festlegungen getroffen:

- Da ein Fahrzeug bei kaltem Start nach etwa 4 - 6 km seine Betriebstemperatur erreicht hat, ist der Anteil der Kaltstartphase um so größer, je kürzer die Fahrt ist.
- Ein Motor kann 6 - 8 h, nachdem er betriebswarm abgestellt wurde, wieder als „kalt“ bezeichnet werden. Ein Kaltstart liegt also immer vor, wenn die Standzeit vor Fahrtantritt 8 Stunden oder länger betragen hat. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer 8-stündigen Standphase ist zunächst von der Anzahl der Fahrten pro Tag abhängig. Geht man vereinfachend von einer Gleichverteilung aller Fahrten eines Nutzungsmusters auf einen 16 h-Tag aus, so kann wegen der 8-stündigen Nachtzeit von mindestens einem Kaltstart pro Einsatztag ausgegangen werden. Werden 2, 3, 4 oder mehr Fahrten pro Tag durchgeführt, so beträgt das durchschnittliche Stillstandsintervall (ohne Berücksichtigung der Fahrzeit) 16 h, 8 h, 5,3 h, 4 h und geringer. In den ersten beiden Fällen beginnt also auch die nächste Fahrt mit einem Kaltstart. In allen anderen Fällen wird bei Antritt der Fahrt kein voller Kaltstartzuschlag veranschlagt, sondern ein geringerer Wert, der sich für die jeweilige Standzeit aus der Abkühlkurve des Motors /BUWAL 95/ zwischen dem betriebswarmen Zustand und der Umgebungstemperatur ergibt.
- Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Kaltstarts kann also mit der durchschnittlichen Standzeit zwischen zwei Fahrten bzw. der Fahrthäufigkeit korreliert werden. Vereinfachend nehmen wir eine umgekehrte Proportionalität von Fahrthäufigkeit und Kaltstartwahrscheinlichkeit an. Unter den oben getroffenen Annahmen beträgt das durchschnittliche Stillstandsintervall bei 3 Fahrten pro Tag 8 h und somit die Kaltstartwahr-

scheinlichkeit 100 %. Um eine mögliche Ungleichverteilung der Fahrten auf den 16 h-Tag zu berücksichtigen, normieren wir die Kaltstartwahrscheinlichkeit bei 2 Fahrten pro Tag zu 100 %.

13.1.3.2.2 Pkw mit Dieselmotor

Für die Ableitung der Emissions- und Verbrauchsfaktoren der Diesel-Pkw wird das gleiche Verfahren angewendet wie bei den Otto-Pkw. Allerdings sind die Emissionsfaktoren der Basis-Pkw („Pkw nach Anlage 23“) den EURO II-Grenzwerten für Diesel-Pkw bereits so nahe, daß nur minimale Absenkungsraten zu formulieren sind. Die Summengrenzwerte für NO_x und HC liegen bei den Diesel-Pkw um 40 % höher als bei den Otto-Pkw (siehe Tab. 13.5). Alle weiteren Emissionsfaktoren werden analog zu den Otto-Pkw ermittelt.

Tab. 13.5 Abschätzung der EURO II-Emissionsfaktoren für Pkw mit Dieselmotor

	CO	HC	NO _x	HC+NO _x	Partikel
EURO II-Seriengrenzwerte (ab 1996/97 in g/km)	1,00			0,70	0,08
Gesamt-NEFZ (g/km)	0,50	0,08	0,52	0,61	0,07
ETW (g/km) EUDC (g/km)	0,67 0,24	0,085 0,043	0,68 0,42		0,04 0,06
Anmerkung: die Werte sind hier lediglich der besseren Nachvollziehbarkeit wegen mit höherer Stellenzahl angegeben.					
Quellen: TÜV Rheinland, EU-Vorschriften; Verfahren und Schätzungen durch IFEU/FEU 1996					

Der Kraftstoffverbrauch richtet sich ebenfalls nach dem Verbrauch der realen Vergleichsfahrzeuge. Dieser wird bei der kleinen Klasse als Mittelwert von Golf und Astra verschiedener Motorausstattungen angesetzt. Damit liegen die Motorleistungen der Diesel-Pkw wiederum beträchtlich über denjenigen der Elektro-Pkw (siehe Tab. 13.6). Ein ausschließlich mit den leistungsfähigeren und sparsameren TDI-Motoren (z. B. mit dem 66 kW/1,9-Motor von VW) ausgestatteter Vergleichs-Pkw hätte geringere Verbräuche und wäre im Kohlendioxidvergleich günstiger.

Auch hier stimmt der angenommene Kraftstoffverbrauch mit den vom TÜV Rheinland für „Pkw nach Anlage 23“ gemessenen und zur Berücksichtigung von Einsparungen um 5 % reduzierten Werten überein.

Das breite Motorenangebot bei den großen Pkw mit Dieselmotor führt zu den geschätzten mittleren Kraftstoffverbrauchs- und Fahrzeugdaten in Tab. 13.6.

Das System zur Berechnung des Kaltstartzuschlags wird mit eigenen Faktoren und analog zu den Otto-Pkw angewandt. Verdunstungsemissionen werden bei Diesel-Pkw grundsätzlich vernachlässigt. Die Emissionsfaktoren der nicht limitierten Schadstoffe werden mit einem eigenen Wert für Warmbetrieb und Kaltstartzuschlag nach /IFEU 95A/ abgeleitet.

Tab. 13.6 Übersicht über die Rügen-Elektrofahrzeuge und konventionelle Vergleichsfahrzeuge

	Elektro-Kfz	Otto-Kfz	Diesel-Kfz
leichte Pkw	leichte Elektro-Pkw „Rügen“	Vergleichs-Pkw; Hubraum ca. 1400 cm ³	Vergleichs-Pkw; Hubraum ca. 1800 cm ³
Motorleistung ¹⁾	21/32 kW	ca. 40 kW	ca. 50 kW
Fahrzeug-Masse	1.300 kg	ca. 1.000 kg	ca. 1.100 kg
Europatest kalt ²⁾ Europatest warm ³⁾ EUDC ⁴⁾	0,138 kWh/km 0,138 kWh/km 0,135 kWh/km	8,9 l/100 km 7,4 l/100 km 5,4 l/100 km	6,9 l/100 km 5,8 l/100 km 4,2 l/100 km
schwere Pkw	schwere Elektro-Pkw „Rügen“	Vergleichs-Pkw; Hubraum ca. 1600 cm ³	Vergleichs-Pkw; Hubraum ca. 1800 cm ³
Motorleistung ¹⁾	25/33 kW	ca. 60 kW	ca. 60 kW
Fahrzeug-Masse	1.400 kg	ca. 1.250 kg	ca. 1.250 kg
Europatest kalt ²⁾ Europatest warm ³⁾ EUDC ⁴⁾	0,170 kWh/km 0,170 kWh/km 0,166 kWh/km	10,6 l/100 km 8,8 l/100 km 6,3 l/100 km	9,0 l/100 km 7,6 l/100 km 5,0 l/100 km
INfz-VW T4	Elektrotransporter „Rügen“	Ottomotor mit g. Kat.; Hubraum 2000 cm ³	
Motorleistung ¹⁾	22/30 kW	62 kW	
Fahrzeug-Masse	ca. 2.250 kg	ca. 1.750 kg	
Europatest kalt ²⁾ Europatest warm ³⁾ EUDC ₉₀	0,227 kWh/km 0,227 kWh/km 0,227 kWh/km ⁵⁾	15,9 l/100 km 13,3 l/100 km 9,0 l/100 km	
INfz-MB 100	Elektrotransporter „Rügen“		Dieselmotor; Hubraum 2400 cm ³
Motorleistung ¹⁾	30/37 kW		55 kW
Fahrzeug-Masse	ca. 2.500 kg		ca. 1.800 kg
Europatest kalt ²⁾ Europatest warm ³⁾ EUDC ₉₀	0,323 kWh/km 0,323 kWh/km 0,323 kWh/km ⁵⁾		15,2 l/100 km 12,8 l/100 km 10,0 l/100 km
technischer Stand	Prototyp „Rügen“	Schadstoffe nach EURO II bei 50.000 km	
Herkunft der Basisdaten	Rügen-Versuch; Herstellerangaben	Emissionen: Abschätzung durch IFEU auf Basis TÜV Rhld. 1987-1990; Kraftstoff: Herstellerangaben für entsprechende Kfz, Baujahr 96	

¹⁾ bei Elektro-Pkw: Dauer-/Spitzenleistung; ²⁾ Europatest (= NEFZ innerorts; = ECE 15-Test) mit Start bei kaltem Motor (20 °C); ³⁾ Start bei betriebswarmem Motor; ⁴⁾ bei Elektro-Pkw EUDC-Wert nur bis 90 km/h ⁵⁾ bei Elektro-Transportern wurde für den EUDC der ECE-Wert übernommen.

Anmerkung: Die Fahrzeugmassen der Elektro-Kfz ergeben sich als die Mittelwerte der auf Rügen vorhandenen Fahrzeuggewichte. Das Realgewicht wird wesentlich von der Batterieart und deren Nennenergieklasse bestimmt (siehe Tab. 13.23). Erreicht ein leichtes Fahrzeug mit seiner Batterie das mittlere Gewicht der schweren Pkw (1.400 kg), so wird es als schwer klassifiziert.
IFEU 1996

13.1.3.2.3 Leichte Nutzfahrzeuge

Die erst Ende 1995 beschlossenen EURO II-Grenzwerte für leichte Nutzfahrzeuge unterscheiden drei Bezugsmassenklassen (das Leergewicht zuzüglich 110 kg Ladung). In der Klasse der Pkw-ähnlichen leichten Nutzfahrzeuge (<1250 kg) sind die neuen Grenzwerte mit den Pkw-Vorschriften identisch. In den beiden oberen Bezugsmassenklassen, die für den hier geführten Vergleich von Bedeutung sind, nähern sie sich den ab 1996 gültigen EURO II-Werten für Pkw an. Allerdings werden diese Grenzwerte erst ab Januar 1998 gültig, später als nach früheren Vorstellungen, dafür aber in strengerer Form (siehe Tab. 13.7).

Obwohl das Datum ihres Inkrafttretens später liegt als das Bezugsjahr des Vergleiches, verwenden wir in Absprache mit dem Projektsteuerkreis auch bei leichten Nutzfahrzeugen die EURO II-Grenzwerte. Da bereits im Jahr 1996 zahlreiche Fahrzeuge mit der EURO II-Spezifikation ausgeliefert wurden, erscheint ein Verzicht auf die neue Norm problematischer als die Vorwegnahme.

Auf Rügen wurden zwei Typen von elektrisch betriebenen leichten Nutzfahrzeugen eingesetzt, der T4-Transporter von Volkswagen und der MB 100-Transporter von Mercedes-Benz. Wir stellen dem VW T4 das typgleiche Fahrzeug mit Ottomotor und geregeltem Katalysator, dem MB 100 das typgleiche Fahrzeug MB 100 mit Dieselmotor gegenüber (siehe Tab. 13.6). Das konventionelle Vergleichsfahrzeug erhält von den verfügbaren Motoren jeweils denjenigen mit geringster Leistung.

Leichte Nutzfahrzeuge mit Ottomotor

Der VW-Transporter T4 hat eine Bezugsmasse von ca. 1725 kg. Bestandsrepräsentative Emissionsfaktoren unter EURO II-Bedingungen liegen für dieses Fahrzeug nicht vor. Deshalb werden die Emissionsfaktoren für die benötigten Standardfahrkurven nach dem gleichen Verfahren wie zuvor bei den Otto-Pkw abgeleitet. Die Bezugsschicht wird von den leichten Nutzfahrzeugen mit Ottomotor und mit geregeltem Katalysator nach den Untersuchungen des TÜV Rheinland gebildet. Das Verfahren, den Kaltstartzuschlag von Otto-Pkw mit geregeltem Katalysator abzuleiten, wird entsprechend der Empfehlung des TÜV Rheinland auch auf die leichten Nutzfahrzeuge angewendet. Als Zielwert dienen die Grenzwerte der Bezugsmassenklasse > 1700 kg. Die gegenüber der Bezugsschicht angesetzten Änderungsfaktoren sowie die resultierenden Emissionsfaktoren sind in Tab. 13.7 zusammengestellt. Eine Korrektur der Emissionsfaktoren auf den EUDC-Testzyklus mit der Spitzengeschwindigkeit vom 90 km/h, wie er von den Elektro-Kfz absolviert wird, kann auf der vorhandenen Datenbasis nicht vorgenommen werden.

Der Kraftstoffverbrauch des Fahrzeugtyps T4 (bei der Leistung des kleinsten Motors mit 62 kW und 1970 cm³) im Europatest (warm) wird nach VW-Angaben angesetzt. Der Wert für den EUDC des T4 ist uns nicht bekannt. Bei der Bezugsschicht des TÜV Rheinland lag er bei 10,0 l/100 km. Da der Verbrauchsanstieg zwischen 90 und 120 km/h beim T4 sehr steil ist und der EUDC-Vergleichswert des T4 mit Elektroantrieb sich wie bei allen Elektro-Kfz des „Rügen-Tests“ sich nur auf die Maximalgeschwindigkeit von 90 km/h bezieht, verwenden wir für den T4 mit Ottomotor ebenfalls den EUDC₉₀-Verbrauch und schätzen ihn auf 9 l/100km ab (siehe Tab. 13.6). Die Verdunstungsemissionen und die nicht limitierten Emissionen werden analog zu den Otto-Pkw abgeleitet.

Leichte Nutzfahrzeuge mit Dieselmotor

Auch für den MB 100 mit Dieselmotor der Stufe II stehen uns keine Emissionsfaktoren zur Verfügung. Somit benutzen wir in Analogie zu dem Vorgehen bei den Otto-Fahrzeugen die Emissionsfaktoren für leichte Nutzfahrzeuge mit Dieselmotor ab Zulassungsjahr 1986 aus

den Untersuchungen des TÜV Rheinland /TÜV 94A/. Wiederum setzen sich die Faktoren dieser Schicht aus gemittelten Werten von Fahrzeugen aller drei Bezugsmassenklassen zusammen, das mittlere Gewicht der Stichprobe liegt bei 1670 kg.

Tab. 13.7 Abschätzung der Fahrzykluswerte für leichte Nutzfahrzeuge mit Ottomotor (EURO II)

	CO	HC	NO _x	HC+NO _x
EURO II-Seriengrenzwerte				
Bezugsmasse < 1250 kg ¹⁾	2,20			0,50
1250 - 1700 kg ²⁾	4,00			0,60
> 1700 kg ²⁾	5,00			0,70
Verwendete Emissionsfaktoren der EURO II-Fahrzeuge				
Gesamt-NEFZ (g/km)	2,6	0,15	0,48	0,63
Europatest - warm (g/km)	1,1	0,09	0,41	0,50
EUDC (g/km)	2,3	0,06	0,38	0,44
Anmerkungen: ¹⁾ gültig für neue Fahrzeugtypen ab 1. 1. 1997, für alle Neufahrzeuge ab 1. 10. 1997;				
²⁾ gültig für neue Fahrzeugtypen ab 1. 1. 1998, für alle Neufahrzeuge ab 1. 10. 1998;				
Die berechneten Werte sind hier lediglich der besseren Nachvollziehbarkeit wegen mit höherer Stellenzahl angegeben.				
Quellen: TÜV Rheinland, EU-Vorschriften; Verfahren und Schätzungen durch IFEU/FEU 1996				

Die Daten für die Bezugsschicht werden in Warmwert und Kaltstartzuschlag des Europa-tests aufgeteilt. Zielwert für die Ableitung der Änderungsfaktoren für die Warmphase bzw. den Kaltstartzuschlag ist der EURO II-Seriengrenzwert der Bezugsmassenklasse > 1700 kg. Für die Berechnung des Kaltstartzuschlags wird entsprechend der TÜV-Empfehlung das Verfahren der Diesel-Pkw angewandt (siehe Tab. 13.8). Die Abschätzung der nicht limitierten Emissionen erfolgt analog zu den Diesel-Pkw.

Der Kraftstoffverbrauch für den ETW wurde vom Hersteller zur Verfügung gestellt. Der Kaltstartzuschlag wurde nach TÜV berechnet. Der EUDC₉₀-Verbrauch wurde von uns unter Anlehnung an die Werte der Bezugsschicht auf 10 l/100 km geschätzt (siehe Tab. 13.6).

Tab. 13.8 Abschätzung der Fahrzykluswerte für leichte Nutzfahrzeuge mit Dieselmotor (EURO II)

	CO	HC	NO _x	HC+NO _x	Partikel
EURO II-Seriengrenzwerte					
Bezugsmasse > 1700 kg ¹⁾	1,50			1,20	0,17
Verwendete Emissionsfaktoren der EURO II-Fahrzeuge					
Gesamt-NEFZ(g/km)	0,86	0,17	0,85	1,03	0,14
ETW (g/km)	0,94	0,16	1,0	1,2	0,08
EUDC (g/km)	0,58	0,10	0,75	0,85	0,13
Anmerkungen: ¹⁾ gültig für neue Fahrzeugtypen ab 1. 1. 1998, für alle Neufahrzeuge ab 1. 10. 1998					
Quellen: TÜV Rheinland, EU-Vorschriften; Verfahren und Schätzungen durch IFEU/FEU 1996					

13.1.4 Endenergiebereitstellung

In fast allen Abschnitten der Lebenswege von E-Kfz und konventionellen Kfz werden fossile Energieträger oder Strom eingesetzt. Besonderes Gewicht kommt den für den Fahrzeugantrieb genutzten Endenergiträgern Strom bzw. Otto- und Dieselkraftstoff zu. Die Ableitung der mit der Bereitstellung von Strom in Deutschland verbundenen Energieaufwendungen und Emissionen wird im folgenden etwas ausführlicher beschrieben. Zur Bilanzierung der Bereitstellung von Otto- und Dieselkraftstoff wird eine zusammenfassende Darstellung gegeben, für die übrigen Energieträger, z. B. Gase, sei auf /IFEU 96/ verwiesen.

13.1.4.1 Strom

Der spezifische Energieeinsatz und die Emissionen der Strombereitstellung werden - wie im Grundsatz bereits in Kapitel 13.1.2 dargestellt - für den Bezugsraum Deutschland und das Bezugsjahr 1996 abgeleitet. Da für 1996 noch keine statistischen Daten vorliegen, sind Zusatzannahmen erforderlich. Ferner weichen wir bei zwei Parameter-Gruppen vom Bezugsraum Deutschland ab. Dies sind die **Kraftwerkswirkungsgrade, Umspann- und Übertragungsverluste** und die **Brennstoff-bezogenen Emissionsfaktoren**, für die wir jeweils Daten mit Bezug auf die aktuelle Situation in Westdeutschland zugrunde legen.

Der Grund dafür ist die *noch nicht vollständig realisierte, aber absehbare* Angleichung der ostdeutschen Stromproduktion an westdeutsche Standards. Für die erste Parameter-Gruppe wird diese Angleichung aus wirtschaftlichen Gründen angestrebt. Für die Emissionen sind die zu erreichenden Standards im wesentlichen durch die Großfeuerungsanlagenverordnung (GFAVO) festgeschrieben. In Westdeutschland ist die GFAVO umgesetzt, in Ostdeutschland ist damit möglicherweise bis zum Jahr 1998, spätestens bis 2000 zu rechnen; solange sind Ausnahmeregelungen in Kraft.

Die Vorwegnahme von Verhältnissen, die spätestens vier Jahre nach dem Bezugsjahr Realität sein werden, ist angesichts der Vorlaufzeiten in der politischen, wirtschaftlichen und technischen Planung sinnvoll. Bereits bis zum Abschluß des vorliegenden Berichts im Jahr 1996 wurden erhebliche Fortschritte bei der Steigerung der Effizienz und Minderung der Emissionen ostdeutscher Kraftwerke erzielt. Entsprechend wurde auch bei der Bilanzierung der konventionell angetriebenen Vergleichsfahrzeuge aktuellen Entwicklungen Rechnung getragen, indem beispielsweise für die leichten Nutzfahrzeuge die erst im Laufe des Jahres 1998 obligatorischen, allerdings bei einzelnen Fahrzeugen bereits schon heute realisierten Grenzwerte als im Bezugsjahr 1996 gültig angenommen wurden.

Aufgrund der Ausrichtung der vergleichenden Umweltbilanz auf das gesamte Bundesgebiet wurde auf eine regionalisierte, vom bundesdeutschen Mittel abweichende Betrachtung verzichtet. Diese würde - wenn sie denn angesichts der starken Netzverflechtung der Stromerzeuger überhaupt korrekt durchzuführen wäre - zu höheren spezifischen Kohlendioxid- und Schwefeldioxidemissionen der in Rügen betriebenen Elektrofahrzeuge führen.

Über die Analyse des jahresdurchschnittlichen Stroms hinaus werden Faktoren für **Tag- und Nacht-Strom** abgeschätzt. Die dabei resultierenden Abweichungen vom Durchschnitt sind so gering, daß auf eine eigene Sensitivitätsbetrachtung (siehe Kap. 13.3) verzichtet wird.

In einem Szenario wird außerdem die Strombereitstellung im Jahr 2000 bilanziert. Für die Bereitstellung von fossilen Endenergiträgern und Werkstoffen spielen darüber hinaus die Bahnstromproduktion in Deutschland und die Stromproduktion in Kanada eine Rolle. Die Ableitung erfolgt ähnlich der nachfolgend diskutierten EVU-Stromproduktion, enthält allerdings weitere, hier nicht detailliert dargestellte Zusatzannahmen.

13.1.4.1.1 Energieeinsatz der Stromproduktion

Für den Betrieb der Elektrofahrzeuge wird die Stromproduktion in den Kraftwerken der öffentlichen Energieversorgungsunternehmen (EVU) in Deutschland in Ansatz gebracht. Die Ableitung des mittleren spezifischen Energieeinsatzes der EVU-Stromproduktion basiert im wesentlichen auf Daten für 1994 in /BMW1 96/ und für 2000 in /PROGNOS 95/, die für Ost- und Westdeutschland getrennt ausgewiesen werden. Dort finden sich nach Energieträgern differenzierte Angaben zu Energieeinsatz, Brutto- und Netto-Stromproduktion des gesamten Kraftwerksparks (/PROGNOS 95/ ohne Netto-Produktion). Aus diesen Daten werden die entsprechenden Größen für das Jahr 1996 durch Interpolation abgeleitet (Tab. 13.9). Dabei wird der bundesdeutsche Brennstoffmix angesetzt. Für die Wirkungsgrade werden - wie in den Vorbemerkungen erläutert - westdeutsche Verhältnisse zugrunde glegt.

Der spezifische Energieeinsatz frei Abnehmer in MJ/kWh ergibt sich aus Brennstoffeinsatz und Netto-Erzeugung unter Berücksichtigung der Umspann- und Übertragungsverluste. Für letztere ist eine Interpolation nicht möglich. Deshalb wurde hier mit 4,5% der Wert des Jahres 1994 für Westdeutschland nach /BMW1 96/ angesetzt. Darin ist nicht berücksichtigt, daß bis zur Stromabnahme durch die Haushalte weitere Verluste in Höhe von mindestens 2% anfallen dürften. /BIALONSKI 90 ET AL./ beziffern den gesamten, zwischen Kraftwerken und Haushalten auftretenden Umspann- und Verteilungsverlust sogar auf 10%.

Abweichend von /BMW1 96/ und früheren Ausgaben ordnen wir den aus dem Großkraftwerk Neckarwestheim II direkt über Umformer in das Bahnnetz eingespeisten Strom dem Kraftwerkspark der Bahn zu. In Ermangelung anderer Daten erfolgt die Zuordnung auf der Basis der Stromproduktion 1990. Der Einfluß dieser Zuordnung auf die Stromerzeugung der EVU ist sehr gering, auf die der Bahn erheblich.

Die hier vorgenommene Differenzierung in Tag- und Nacht-Strom basiert auf dem Tagesgang beim höchsten Tagesverbrauch, der ebenfalls in /BMW1 96/ dokumentiert ist. Um maximale Effekte sichtbar zu machen, wurde lediglich die Stunde des höchsten bzw. niedrigsten Verbrauchs betrachtet. Die Brennstoff-differenzierten Daten zu diesen Zeiten setzen wir zu den Tagesmittelwerten in Relation. Die so erhaltenen Faktoren wenden wir auf den Brennstoffmix der gesamten Stromerzeugung an.

Für das Szenario 2000 (Tab. 13.9) übernehmen wir Brennstoffmix und Wirkungsgrade aus /PROGNOS 95/ sowie die Umspann- und Übertragungsverluste für Westdeutschland 1994.

13.1.4.1.2 Emissionen der Stromproduktion

Die spezifischen Emissionen der Stromerzeugung ergeben sich durch Verknüpfung des Brennstoffeinsatzes, differenziert nach Energieträgern, mit Brennstoff-bezogenen Emissionsfaktoren für Kraftwerke. Die in der amtlichen Elektrizitätsstatistik als „sonstige gasförmige“ und „übrige Brennstoffe“ bezeichneten Energieträger werden hier unter „andere Energieträger“ gefaßt. Ihnen werden hilfsweise die Faktoren für Erdgas bzw. Schweröl zugeordnet. Die Basis der Ableitungen stellen Daten mit Bezug auf Westdeutschland und verschiedene Bezugsjahre dar. Wie bereits diskutiert, werden damit Emissionsfaktoren abgeleitet, die für das gesamte Bundesgebiet erst nach 1996 realistisch sein werden und die demnach weder für die Ableitung konkreter lokaler Immissionen des Jahres 1996, noch einer Emissionszeitreihe verwendet werden dürfen (Tab. 13.9).

Für CO und die Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMHC) werden Faktoren des Umweltbundesamtes mit Bezug auf Westdeutschland 1991 unverändert übernommen /UBA 94/. Die SO₂-, NO_x- und Staub-Faktoren nach /UBA 94/ für Westdeutschland 1991 werden auf die vorläufige Emissionsbilanz der EVU in Westdeutschland 1995 nach /VDEW 96/ angeglichen. Dieses Vorgehen ist sinnvoll, da durch den Bezug aktueller Daten auf West-

deutschland 1991 die Umsetzung der GFAVO nur unzureichend abgebildet würde. Dementsprechend werden die Daten nach /UBA 94/ nach Auskunft des UBA zur Zeit überarbeitet. Die damit erfolgende Fortschreibung über 1991 hinaus wird erst im Laufe des Jahres beendet sein. Für CO und NMHC spielen diese Aspekte eine geringere Rolle, da die Emissionen der Kraftwerke - relativ zu anderen Sektoren - gering sind und keine ausgeprägte zeitliche Entwicklung zeigen, wie im Falle von SO₂, NO_x und Staub. Die Benzol-Emissionen werden anhand von /UBA 95/ und /SEIER 95/ abgeschätzt.

Im Szenario 2000 werden die gleichen Emissionsfaktoren wie für das Bezugsjahr 1996 verwendet, da diese Faktoren bereits Verhältnisse widerspiegeln, die in Ostdeutschland tatsächlich erst zwischen 1998 und 2000 eintreten werden. Darüber hinaus werden dem jetzigen Kenntnisstand entsprechend keine relevanten Minderungen der spezifischen brennstoffbezogenen Emissionen stattfinden.

Es sei nochmals betont, daß infolge der Schwerpunktsetzung dieser Arbeit auf bestimmte luftgetragene Emissionen und Lärm Risiken anderer Art, die beispielsweise in der Kernenergienutzung, der Rohstoffförderung und dem Rohstofftransport liegen, nicht bilanziert und somit im Vergleich der unterschiedlich angetriebenen Kfz nicht berücksichtigt werden.

Tab. 13.9 Energieeinsatz und Emissionen der Strombereitstellung frei Abnehmer in MJ/kWh bzw. g/kWh ohne Brennstoffbereitstellung: EVU in Deutschland 1996 (nach der hier vorgenommenen Definition) und 2000 (Jahresmittel)

Strombereitstellung		1996	2000
Energie			
Erdöl	MJ/kWh	0,12	0,14
Erdgas	MJ/kWh	0,56	0,68
Steinkohle	MJ/kWh	2,65	2,71
Braunkohle	MJ/kWh	3,27	2,99
Uran	MJ/kWh	3,40	3,34
Wasser	MJ/kWh	0,42	0,41
andere Energieträger	MJ/kWh	0,11	0,11
Summe	MJ/kWh	10,53	10,37
Emissionen			
		Global	Global
CO ₂	g/kWh	653	636
CH ₄	g/kWh	0,01	0,01
		EOK II	EOK II
SO ₂	g/kWh	0,35	0,34
CO	g/kWh	0,15	0,16
NO _x	g/kWh	0,45	0,45
NMHC	g/kWh	0,01	0,01
Partikel/Staub	g/kWh	0,02	0,02
Benzol	g/kWh	0,0002	0,0002

13.1.4.1.3 Strombereitstellung einschließlich Brennstoffbereitstellung

Die Strombereitstellung umfaßt neben der eigentlichen Stromproduktion die Bereitstellung der zu verstomenden Energieträger, d. h. Exploration, Förderung, Aufbereitung und Transportprozesse. Die hier verwendeten Daten zur Bereitstellung von Braunkohle, Steinkohle, Erdgas, Schweröl und Uran sind in /IFEU 96/ ausführlich dokumentiert und erläutert. We sentliche Quellen sind GEMIS sowie amtliche und Verbandsstatistiken.

Die für die Bilanzierungen angesetzten spezifischen Energieverbräuche und Emissionsfaktoren ergeben sich als Summe beider Prozeßschritte (siehe Tab. 13.10). Für die Bereitstellungsprozesse im Szenario 2000 werden die Emissionsfaktoren des Jahres 1996 übernommen. Die nicht klimarelevanten Emissionen sind ihrem überwiegendem Auftreten entsprechend in den Emissionsortsklassen II (schwach besiedeltes Gebiet) und III (unbesiedeltes Gebiet) unterschieden.

Tab. 13.10 Energieeinsatz und Emissionen der Strombereitstellung frei Abnehmer in MJ/kWh bzw. g/kWh einschließlich Brennstoffbereitstellung: EVU in Deutschland 1996 nach der hier vorgenommenen Definition (Jahresmittel, Tag, Nacht) und 2000 (Jahresmittel)

Strombereitstellung	EVU Strom		EVU Strom		Tag-Strom		Nacht-Strom	
	1996	2000	1996	2000	1996	1996	1996	1996
Energieträger in MJ/kWh								
Erdöl	0,19	0,21	0,27	0,27	0,12	0,12	0,12	0,12
Erdgas	0,61	0,74	0,78	0,78	0,39	0,39	0,39	0,39
Steinkohle	2,79	2,85	2,85	2,85	2,51	2,51	2,51	2,51
Braunkohle	3,45	3,16	3,26	3,26	3,58	3,58	3,58	3,58
Uran	3,45	3,38	3,17	3,17	3,98	3,98	3,98	3,98
Wasser	0,42	0,41	0,50	0,50	0,32	0,32	0,32	0,32
and. Energieträger	0,12	0,12	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10
Summe	11,02	10,86	10,93	10,93	10,99	10,99	10,99	10,99
Emissionen in g/kWh								
	Global		Global		Global		Global	
CO ₂	695		677		695		664	
CH ₄	1,44		1,49		1,49		1,27	
	EOK II	EOK III						
SO ₂	0,40	0,056	0,39	0,057	0,41	0,057	0,37	0,050
CO	0,17	0,0064	0,17	0,0066	0,18	0,0066	0,15	0,0057
NO _x	0,52	0,059	0,52	0,061	0,53	0,061	0,48	0,053
NMHC	0,016	0,0017	0,016	0,0018	0,018	0,0018	0,015	0,0015
Partikel/Staub	0,025	0,0056	0,025	0,0057	0,025	0,0057	0,023	0,0050
Benzol	0,0003	0,0000	0,0003	0,0000	0,0003	0,0000	0,0003	0,0000

13.1.4.2 Otto- und Dieselkraftstoff

Der überwiegende Teil des Energieaufwandes zur Bereitstellung von Mineralölprodukten fällt in den Raffinerien an. Das Rohöl stellt den Hauptteil des sogenannten Produkt- oder Umwandlungseinsatzes dar. Daneben wird eine Reihe in Raffinerien selbst erzeugter, grundsätzlich absatzfähiger Endprodukte zu anderen Produkten umgesetzt. Der Energie-Eigenverbrauch wird im wesentlichen durch Raffinerieprodukte wie Schweröl und Raffineriegas sowie durch eigenen und in öffentlichen Kraftwerken erzeugten Strom gedeckt.

Der mittlere spezifische Energieeinsatz zur Produktion von Mineralölprodukten ergibt sich vereinfacht als Verhältnis von Output zu Input einer oder mehrerer Raffinerien, jeweils angegeben in Energieeinheiten und korrigiert um Wiedereinsatzprodukte. Die entsprechenden Basisdaten für die Raffinerieproduktion in Deutschland sind in der bundesdeutschen Energiebilanz enthalten /AGE 95/. Tatsächlich sind jedoch unterschiedliche Mineralölprodukte mit unterschiedlichen Energieeinsätzen verbunden /JESS 94 ET AL./.

Die hier durchgeführte Ableitung der Energieaufwendungen zur Produktion von Otto- und Dieselkraftstoff basiert auf Daten der aktuellen Energiebilanz /AGE 95/ (Bezugsjahr 1992) für Gesamtdeutschland, entsprechenden Daten für 2000 nach /PROGNOS 95/ und auf /JESS 94 ET AL./. Aus den Angaben nach /AGE 95/ und /PROGNOS 95/ wird durch Interpolation die Energiebilanz der Raffinerien in Deutschland 1996 abgeschätzt.

Die Differenzierung des mittleren spezifischen Energieeinsatzes für die gesamte Raffinerieproduktion nach einzelnen Produkten erfolgt mit Gewichtungsfaktoren, die aus den Absolutwerten für 1992 nach /JESS 94 ET AL./ abgeleitet werden. Danach liegt der spezifische Energieaufwand für die Bereiche „Raffinerie“ und die ihr „vorgelagerte Kette“ bei Ottokraftstoff um knapp 50 % höher als bei Dieselkraftstoff. Der damit festgestellte und in den vorliegenden Berechnungen verwendete Unterschied zwischen Otto- und Dieselkraftstoff (Tab. 13.11) gilt selbstverständlich - wie beispielsweise in /IFEU 89/ diskutiert wurde - nur für die aktuell bestehende Produkt- und Qualitätsstruktur in bundesdeutschen Raffinerien. In dem Maße, in dem die Anforderungen an die Menge bzw. bestimmte Eigenschaften von Dieselkraftstoff steigen, steigen auch die dafür notwendigen energetischen Aufwendungen und verringern damit die heutigen Vorteile von Diesel- gegenüber Ottokraftstoff im Raffineriebereich.

Die **spezifischen Emissionen** der Produktion von Otto- und Dieselkraftstoff ergeben sich durch Verknüpfung des Brennstoffeinsatzes, differenziert nach Energieträgern mit Brennstoff-bezogenen Emissionsfaktoren für Kesselfeuерungen sowie den Emissionen der Erzeugung des von außen bezogenen Stroms. Die Brennstoff-bezogenen Faktoren basieren auf /UBA 94/ und werden für SO₂ und NO_x mit Angaben in /GOETHEL 93 ET AL./ abgeglichen. Die SO₂-Emissionen bei der Entschwefelung werden mit Faktoren nach /UBA 96/ für das Jahr 1995 erfaßt und für 1996 verwendet. Für die Methan- und NMHC-Verdunstungsemissionen werden die Faktoren nach /GOETHEL 93 ET AL./ angesetzt.

Für die NMHC-Emissionen der Verteilung von Ottokraftstoff, darunter auch diejenigen für Umfüllen und Kfz-Betankung, übernehmen wir die Faktoren nach /UBA 96/ für das Jahr 2000. Diese Annahme begründet sich dadurch, daß die Anforderungen der Vorschriften „Stage I und II“ mittlerweile weitestgehend realisiert sind. Das Vorgehen stellt eine Analogie zur Modellierung der Kraftwerksemissionen dar, wo wir für das Bezugsjahr 1996 die kurz bevorstehenden Emissionsminderungen in den Kraftwerken Ostdeutschlands angenommen hatten.

Während die meisten Emissionen der Raffinerie in der Emissionsortsklasse II und ein Teil der vorgelagerten Kette in Emissionsortsklasse III anfallen, ordnen wir die Hälfte der Ver-

dunstungsemissionen von Ottokraftstoff aus dem Bereich der Tankstelle und der Betankung dem Innerortsbereich und somit der Emissionsortsklasse I zu.

Die gesamte Bereitstellung von Otto- und Dieselkraftstoff umfaßt neben den Raffinerieprozessen Förderung, Aufbereitung und Transport von Rohöl auch den Transport der Produkte. Tab. 13.11 faßt die Daten der Bereitstellung zusammen. Daten und Erläuterungen zu den Schritten, die der Raffinerie vorgelagert sind, finden sich in /IFEU 96/.

Tab. 13.11 Energiedaten und Emissionen der Bereitstellung von Kraftstoff in Deutschland 1996 einschließlich der Aufwendungen in der der Raffinerie vorgelagerten Kette

	Ottokraftstoff	Dieselkraftstoff			
Energieträger in MJ/MJ Kraftstoffbereitstellung					
Erdöl	1,13	1,09140			
Erdgas	0,0138	0,0104			
Steinkohle	0,0064	0,0039			
Braunkohle	0,0052	0,0030			
Uran	0,0052	0,0030			
Wasser	0,0006	0,0004			
andere Energieträger	0,0002	0,0001			
Summe	1,163	1,112			
Emissionen in g/MJ Kraftstoffbereitstellung					
	Global	Global			
CO ₂	11,8	8,3			
CH ₄	0,015	0,012			
	EOK I	EOK II	EOK III	EOK II	EOK III
SO ₂		0,0354	0,0164	0,0281	0,0158
CO		0,0049	0,0021	0,0043	0,0020
NO _x		0,0220	0,0176	0,0182	0,0170
NMHC	0,0045	0,0330	0,0008	0,0087	0,0008
Partikel		0,0003	0,0016	0,0003	0,0015
Staub		0,0012	0,0000	0,0010	0,0000
Benzol	0,00005	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000

13.1.5 Energie- und Emissionsbilanzen von Energiespeicher und Antriebsstrang

Zur Beschreibung der Umweltauswirkungen von Elektro-Kfz im Vergleich zu konventionellen Kfz reicht es nicht aus, allein den Lebenswegabschnitt der Nutzung der Fahrzeuge zu betrachten. Auch die Produktion der Fahrzeuge sowie ihre Entsorgung bzw. Wiederverwertung am Ende der Nutzungsphase sind zu erfassen. Die damit verbundenen Energieaufwendungen und Emissionen werden über die Nutzungsphase abgeschrieben.

Die Versuchsfahrzeuge auf Rügen sind hinsichtlich Karosserie, Fahrwerk und Innenausstattung im wesentlichen identisch mit den konventionellen Vergleichsfahrzeugen. Die Bilanzierung kann sich daher auf die Baugruppen Antriebsstrang, Motormanagement und Energiespeicher beschränken, in denen sie sich von konventionellen Kfz unterscheiden. Im Rahmen des Rügen-Projektes konnten allerdings keine detaillierten Energie- und Emissionsbilanzen für diese Baugruppen erstellt werden. Es handelt sich hier vielmehr um Grob-Bilanzen, die für die einzelnen Bilanzgrößen und Lebenswegabschnitte unterschiedliche Qualität aufweisen. Vereinfachungen waren vor allem im Zusammenhang mit den Lebenswegabschnitten Endfertigung und Entsorgung/Recycling erforderlich. Die Bereitstellung der Materialien wurde dagegen sehr detailliert behandelt. Da alle betrachteten Baugruppen unter den gleichen Bedingungen bilanziert wurden, können die Bilanzergebnisse - insbesondere im Kontext einer vergleichenden Untersuchung - als sehr gut belastbar gelten.

Hinsichtlich der erfaßten Wirkungskategorien bzw. Parameter und der untersuchten Baugruppen gehen die hier erstellten Bilanzen deutlich über bisherige Arbeiten hinaus. Nachfolgend werden zunächst spezielle Bilanzierungsprobleme und die gewählten Ansätze erläutert. Daran schließt sich die Dokumentation einiger wichtiger Annahmen und Festlegungen an. Den Abschluß bildet die Ergebnisdarstellung und einige Anmerkungen dazu.

In Tab. 13.12 sind die Baugruppen zusammengestellt, in denen Elektrofahrzeuge und Verbrennungsfahrzeuge grundlegend differieren. Nach Art und Menge der eingesetzten Materialien sind vor allem die Unterschiede bei den Energiespeichern Batterie bzw. Tank gravierend. Sie bilden daher den Schwerpunkt der folgenden Darstellung.

Tab. 13.12 Analoge Baugruppen von Elektrofahrzeugen und Verbrennungskraftfahrzeugen

Elektrofahrzeug	Verbrennungskraftfahrzeug
Batterie (hier: NaNiCl ₂ , NiCd, NaS, Pb-Gel)	Kraftstofftank
Elektromotor (hier: asynchron)	Verbrennungsmotor
Getriebe (hier: einstufige Übersetzung)	Mehrstufiges Getriebe
Elektronische Lade-und Regelungstechnik	Elektronische Einspritzung / Zündung

13.1.5.1 Methodische Probleme, Datenqualität und -verfügbarkeit

Die Bilanzierung von Energiespeicher und Antriebsstrang bringt Probleme methodischer Art und hinsichtlich Qualität und Verfügbarkeit von Basisdaten mit sich. An zwei Beispielen, nämlich der „Endfertigung“ und der „Entsorgung“ soll dies nachfolgend aufgezeigt werden. Für Bilanzierungsprobleme, die im Bereich der Produktion und Bereitstellung der Werk-

stoffe auftreten wie etwa die Behandlung von Kuppelprodukten, sei auf die Darstellung in /PATYK 96 ET AL./ verwiesen.

Endfertigung

Während es für die zur Produktion der Baugruppen eingesetzten Werkstoffe zumindest zum Energieeinsatz eine Reihe von Literaturdaten gibt, stellt sich für die Endfertigung die Datenlage deutlich ungünstiger dar. Für die Komponenten des Antriebsstranges liegen uns keine Informationen zur Endfertigung vor. Zur Endfertigung der Batterien liegen nur für ein System einige konkrete Daten vor (siehe unten), für zwei weitere Systeme einige Anhaltswerte und Hintergrundinformationen. Hilfsweise werden hier Schätzwerte für den Primärenergieeinsatz angesetzt, die mit den Projektbeteiligten abgestimmt wurden. Über weitere Annahmen zu den eingesetzten Endenergieträgern werden daraus die Emissionen abgeleitet.

Dieses Vorgehen ist offensichtlich nur eine Näherung, die jedoch durch die Mitwirkung der Projektpartner bei der Quantifizierung als belastbar gelten kann. Der Vorzug dieses Verfahrens besteht in seiner Transparenz: Da keine exakte und prozeß-differenzierte Datenerhebung erfolgt, können die verwendeten Daten offen dokumentiert werden (Tab. 13.13).

Tab. 13.13 Primärenergieeinsatz der Endfertigung von Antriebssträngen und Energiespeichern

Bauteil	Bezug	Primärenergie
		[MJ]
Blei-Batterie	kWh Speicher	500
NiCd-Batterie	kWh Speicher	1500
NaNiCl-Batterie	kWh Speicher	800
NaS-Batterie	kWh Speicher	1000 (537*)
Polypropylen(PP)-Tank	Bauteil	0
E-Fahrzeug-Elektronik	Bauteil	2500
Elektromotor	Bauteil	1500
E-Fahrzeug-Getriebe	Bauteil	750
Otto-/Diesel-Elektronik	Bauteil	830
Otto-/Diesel-Motor	Bauteil	2500
Otto-/Diesel-Getriebe	Bauteil	1200
* Herstellerwert von ABB unter Verwendung detaillierter Daten für einzelne Prozeßschritte in der Endfertigung (siehe auch Kapitel 13.1.5.2)		

Anders als im Falle der übrigen Baugruppen liegen für einige Schritte der Endfertigung der NaS-Batterie konkrete Energieangaben vor. Für dieses System wurden daher zwei Bilanzen erstellt: Die erste basiert vollständig auf dem Ansatz des IFEU und wurde konsistent mit den Bilanzen der anderen betrachteten Systeme berechnet. Die zweite Bilanz basiert auf Her-

stellerangaben für einzelne Prozesse sowie einer Abschätzung des Herstellers für die nicht im Detail erfaßten Fertigungsschritte.

Recycling und Monetarisierung

An die Nutzung der Batterien schließt sich der Lebenswegabschnitt Entsorgung/Recycling an. Der einfachste Fall besteht in der Deponierung der gesamten Batterie, ist aber ohne praktische Bedeutung. Eine realitätsnahe Beschreibung dieses Lebenswegabschnitts in einzelnen Prozeßschritten ist jedoch im Rahmen dieses Projekts nicht durchführbar. Dies hat zwei Gründe: Zum einen ist der Lebenswegabschnitt Entsorgung/Recycling für komplexe Produkte mit weitentwickeltem Recycling nur bei großem Aufwand zu bilanzieren. Zweitens sind dem geringen Etablierungsgrad der einzelnen Batterietypen entsprechend noch gar nicht für alle Batterien Entsorgungs- bzw. Recyclingpfade mit minimierten Umweltauswirkungen entwickelt.

Vor diesem Hintergrund bietet die Monetarisierung eine praktikable Möglichkeit, das Recycling näherungsweise zu beschreiben. Dazu werden die Marktpreise von Schrott bzw. Abfällen eines Materials zu denen von Halbzeugen aus dem gleichen Material in Relation gesetzt. Energieeinsatz und Emissionen zur Bereitstellung der Primärmaterialien werden um die Anteile der Schrottopreise an den Halbzeugpreisen vermindert (Tab. 13.14). In den zugrunde liegenden Statistiken sind Waren aus Cadmium und Cadmiumschrott in einer Rubrik zusammengefaßt. Für Cadmium wird daher, orientiert an anderen Metallen, eine konservative Abschätzung (Annahme eines relativ niedrigen Schrottopreises) vorgenommen.

Tab. 13.14 Relative Preise von Schrott bzw. Abfall und Halbzeugen verschiedener Materialien

Material	Relativer Preis
Edelstahl	0,49
Kupfer	0,80
Nickel	0,75
Aluminium	0,54
Blei	0,45
Zink	0,58
Cadmium	0,25
Kunststoff (PP)	0,32

Wie im Falle der Endfertigung hat auch das hier gewählte Verfahren den Vorzug der Transparenz. Sein Manko besteht darin, daß die Marktpreise von Produkten nicht durch die mit ihrer Bereitstellung verbundenen Umweltauswirkungen bestimmt werden. Trotzdem ist mit der Monetarisierung zumindest eine "Beteiligung von Sekundärnutzern" an der Bereitstellung von Primärmaterialien beschreibbar.

Im Vergleich mit einer Analyse konkreter Recyclingprozesse - für einzelne Werkstoffe und gestützt auf weitere Zusatzannahmen - ergeben sich für die hier betrachteten Batterien nach /PATYK 96 ET AL./ folgende Ergebnisse: Für Schadstoffe, die in großen Mengen prozeßspezifisch bzw. für verschiedene fossile Energieträger in sehr unterschiedlichen Mengen anfallen, weichen die Ergebnisse der Monetarisierung und des Recyclings deutlich

voneinander ab. Für den Primärenergieeinsatz und die meist eng daran gekoppelten CO₂-Emissionen ergibt sich eine recht gute Übereinstimmung.

13.1.5.2 Annahmen und Festlegungen

Neben den wesentlichen Annahmen und Festlegungen - z. B. räumlicher und zeitlicher Bezug, Bilanzierungsparameter (siehe Kapitel 13.1.2) - sind einige zusätzliche Punkte mit speziellem Bezug auf Energiespeicher und Antriebsstrang zu klären, beispielsweise:

Bilanzgegenstand und Bezugsgröße: Gegenstand sind

- Blei-Gel-, NiCd-, NaNiCl₂- und NaS-Traktionsbatterien typischer Zusammensetzung und Spezifikation sowie ein 50 l-Kraftstofftank aus Polypropylen (Tab. 13.15). Die Bilanzen beziehen sich auf einen Nennenergieinhalt der Batterien von 1 kWh elektrischer Energie und den Tank als Baugruppe. Im Rahmen der Gesamtauswertung werden diese unterschiedlichen Bezüge berücksichtigt.
- Elektrik, Motor und Getriebe typischer Zusammensetzung und Spezifikation von Elektro- und konventionellen Fahrzeugen (Tab. 13.16). Den Bezug bildet das jeweilige Bauteil.

Tab. 13.15 Speicherdichte und Materialzusammensetzung von Batteriesystemen

Batteriesysteme	Blei	NiCd	NaNiCl	NaS
Energiegewicht [kg/kWh]	33	21,5	11,2	9,6
Anteile der Materialien				
Aluminium				26%
Al ₂ O ₃ -Keramik			11%	10%
Blei	21%			
PbO	33%			
Cadmium		4,6%		
CdO		20%		
Edelstahl		14%	32%	21%
Glasfasern			3,2%	6,5%
KOH		6,7%		
Kohlefilz				1,6%
Kunststoffe	15%	6,1%	3,3%	1,3%
Kupfer		3,1%		
Natrium				7,0%
NaAlCl ₄			15%	
NaCl			15%	
Nickel		20%	20%	
Ni(OH) ₂		15%		
Schwefel				14%
H ₂ SO ₄ konz.	20%			
Quarzsand				12%
Wasser entsalzt (Ionenaustausch)	12%	10%		

Bilanzierungsumfang und -tiefe: Die Bilanzen orientieren sich methodisch am aktuellen Stand der Ökobilanzdiskussion /DIN 96/, /VDI 96/. Dementsprechend erstreckt sich die Bilanzierung über den gesamten Lebensweg der Baugruppen („von der Wiege bis zur Bahre“) beginnend mit dem Abbau der Rohstoffe zur Werkstoffherstellung bis zur Entsorgung ausschließlich der eigentlichen Nutzungsphase sowie die damit verbundenen Transporte und die Bereitstellung der eingesetzten Endenergie. Hilfsstoffe werden erfaßt, soweit sie nach unserem gegenwärtigen Kenntnisstand in relevanten Mengen eingesetzt werden. Für die Endfertigung der Baugruppen aus den eingesetzten Materialien werden Abschätzungen vorgenommen (Tab. 13.13), im Falle der NaS-Batterie in zwei Varianten. Die Wiederverwendung der Werkstoffe nach Ende der Nutzungsphase wird durch die Aufteilung der Umweltauswirkungen der Produktion zwischen den Baugruppen selbst und Folgeprodukten durch Monetarisierung erfaßt (Tab. 13.14).

Tab. 13.16 Massen und Materialzusammensetzung der Komponenten der Antriebsstränge

	E-Kfz: Elektrik	E-Kfz: Motor + Getriebe	Otto/Diesel: Elektrik	Otto/Diesel: Motor + Getriebe
Masse [kg]	8,8	56,6	2,9	130
Anteile der Materialien				
Aluminium	40%	20%	40%	27%
Edelmetalle (Ann.: Ni)	2%		2%	
Eisen+Stahl	0%	72%	0%	64%
Kunststoff	16%	1%	16%	6%
Kupfer	40%	7%	40%	3%
Silizium	2%		2%	

13.1.5.3 Zusammenfassung und Ergebnisse

In dieser Studie werden für die Lebenswege von vier unterschiedlichen Batteriesystemen, einem Kraftstofftank sowie die Elektrik und die Antriebsstränge von Elektro- und konventionellen Fahrzeugen der Primärenergieeinsatz, differenziert nach Energieträgern und Emissionen - neben CO₂ und den limitierten Schadstoffen auch Methan und Benzol - bilanziert. In der Kombination aus der Anzahl betrachteter Baugruppen, erfaßter Parameter und Lebenswegabschnitte geht diese Arbeit deutlich über bisherige Untersuchungen hinaus.

Tab. 13.17 bis Tab. 13.19 fassen die primärenergiebezogenen Energieaufwendungen und Emissionen der Bereitstellung der Antriebsstränge und Energiespeicher von E-Mobilen und konventionellen Kfz zusammen. Diese Daten berücksichtigen die Fertigung (siehe Tab. 13.13) und die Gutschrift für das Recycling der Batterien (siehe Tab. 13.14). Sie beziehen sich auf die Nennspeicherenergie in kWh (Batterien) bzw. auf Baugruppen (Tank, Antriebsstrang). Die Abschreibung über die Lebensdauer (Batterien: Anzahl der Vollzyklen, Antriebsstrang:150.000km) liefert die Basis für die Diskussion des entsprechenden Anteils am gesamten Lebensweg einschließlich der Nutzungsphase im Ergebnisteil dieser Untersuchung.

Tab. 13.17 Primärenergieeinsatz und Emissionen der Bereitstellung von Batterien (Bezug: 1 kWh Speicherenergie) und Kraftstofftanks (Bezug: Baugruppe)

	NaS IFEU	NaS ABB		
Energie in MJ/kWh Speicherenergie				
Erdöl	113	108		
Erdgas	309	153		
Steinkohle	321	238		
Braunkohle	347	244		
Uran	348	247		
Wasser	49,5	37,2		
andere Energieträger	11,6	8,2		
Summe	1499	1036		
Emissionen in g/kWh Speicherenergie				
	Global	Global		
CO ₂	94072	66020		
CH ₄	193	135		
	EOK II	EOK III	EOK II	EOK III
SO ₂	129	36,0	117	34,3
CO	235	4,14	227	3,92
NO _x	92,6	38,1	71,6	36,2
NMHC	5,24	1,13	4,32	1,08
Partikel	0,74	3,59	0,71	3,43
Staub	8,36	0,007	7,61	0,005
Benzol	0,084	0,022	0,067	0,021

Wichtige Ergebnisse sind, zum Teil im Vorgriff auf die Abschreibung der hier behandelten Lebenswegabschnitte auf die gesamten Lebenswege (Kapitel 13.2):

- Für die betrachteten Wirkungskategorien hat die Bereitstellung und Entsorgung der Traktionsbatterien im Rahmen des Gesamtlebensweges von Elektrofahrzeugen zwar keine dominierende, jedoch auch eine keineswegs zu vernachlässigende Bedeutung. Der konkrete Anteil hängt von der zugrunde gelegten Nutzungsweise ab und steigt mit der energetischen Effizienz des eigentlichen Betriebs. Der Tank spielt für konventionelle Fahrzeuge praktisch keine Rolle. Die Anteile von Elektrik und Antriebsstrang von Elektrofahrzeugen an den Umweltauswirkungen der Gesamtlebenswege sind etwa halb so groß wie die der Batterien. Für konventionelle Fahrzeuge ergeben sich Anteile um 2 %.
- Im Vergleich zu einer früheren Studie /BLANDOW 1991/ liegen die von uns für die Blei-Gel- bzw. NaS-Batterie ermittelten Primärenergieaufwendungen um den Faktor 2,2 bis 3,4 bzw. 1,3 bis 1,8 höher (jeweils ohne und mit Recycling/Einsatz von Sekundärmaterial). Die Ursache liegt in einigen Vereinfachungen und Vernachlässigungen in /BLANDOW

1991/ bzw. in anderen Annahmen, als sie von uns zugrunde gelegt werden, etwa hinsichtlich der Produktion von Kunststoffen und Aluminium.

- Die Erfassung des Lebenswegabschnitts Entsorgung/Recycling durch Monetarisierung führt für die untersuchten Baugruppen zu Minderungen der Bilanzsalden gegenüber der reinen Bereitstellung um 20 bis 40 %. Die konkreten Werte hängen von den Anteilen der einzelnen Werkstoffe ab und sind für verschiedene Parameter ähnlich, jedoch nicht identisch. Für die Batterien ergeben sich im Falle des Primärenergieeinsatzes und der CO₂-Emissionen gute Übereinstimmungen mit den Ergebnissen der Beschreibung des Recyclings durch definierte Einzelprozesse. Zumindest für die Wirkungskategorien Ressourcenverbrauch (energetisch) und Treibhauseffekt, der bei den betrachteten Lebenswegen durch CO₂ dominiert wird, stellt die Monetarisierung der Wiederverwertung ein taugliches Bilanzierungsverfahren dar.

Tab. 13.18 Primärenergieeinsatz und Emissionen der Bereitstellung von Batterien (Bezug: 1 kWh Speicherenergie) und Kraftstofftanks (Bezug: Baugruppe)

Batterien	Blei	NiCd	NaNiCl ₂	NaS	PP-Tank
Energie	in MJ pro kWh Speicherenergie				in MJ/Bauteil
Erdöl	237	134	88	113	196
Erdgas	290	498	275	309	4,9
Steinkohle	220	679	285	321	15,5
Braunkohle	114	577	225	347	19,0
Uran	181	654	252	348	18,6
Wasser	258	339	118	50	2,3
andere ET	6,0	21,8	8,4	11,6	0,6
Summe	1302	2903	1251	1499	257
Emissionen	in g pro kWh Speicherenergie				in g/Bauteil
	Global	Global	Global	Global	Global
CO ₂	55925	162747	72769	94072	8086
CH ₄	122	368	164	193	10
	EOK II	EOK III	EOK II	EOK III	EOK II
SO ₂	94,7	15,1	1926	43,9	763
CO	29,5	1,8	101,3	5,1	80,6
NO _x	65,6	16,2	152,5	46,6	77,5
NMHC	6,01	0,53	7,60	1,38	4,57
Partikel	0,56	1,50	0,71	4,39	0,65
Staub	4,27	0,01	8,06	0,01	4,06
Benzol	0,07	0,01	0,12	0,03	0,07
					0,02
					0,00

Tab. 13.19 Primärenergieeinsatz und Emissionen der Bereitstellung der Komponenten des Antriebsstrangs (Bezug: Baugruppe)

	E-Kfz: Elektrik	E-Kfz: Motor + Getriebe	Otto/Diesel: Elektrik	Otto/Diesel: Motor + Getriebe
Energieträger in MJ je Bauteil				
Erdöl	180	384	60	1278
Erdgas	645	640	215	1154
Steinkohle	654	1233	218	2649
Braunkohle	748	892	249	1897
Uran	749	891	250	1895
Wasser	97	108	32	230
andere Energieträger	25	30	8,3	6,3
Summe	3098	4178	1033	9167
Emissionen in g je Bauteil				
	Global	Global	Global	Global
CO ₂	191.000	275.000	63.580	597.000
CH ₄	396	679	132	1439
	EOK II	EOK III	EOK II	EOK III
SO ₂	190	46	303	187
CO	299	5,4	1329	21,2
NO _x	166	49,4	319	197
NMHC	8,5	1,5	17,6	5,8
Partikel	0,79	4,6	3,0	18,6
Benzol	0,14	0,03	0,29	0,11

13.1.6 Betrieb der Elektrofahrzeuge

Die Energieverbraucher des Elektrofahrzeugs lassen sich den Bereichen **Antrieb**, **Nebenverbraucher**, **Batterie** und **Ladegerät (Ladewandler)** zurechnen. Diese Zuordnung wurde zu Beginn der Praxisphase mit den anderen Projektpartnern abgestimmt und bei der Verschaltung der Meßwerterfassung festgelegt. Es hat sich gezeigt, daß die gewählte Zuordnung auch gut geeignet ist, um Nutzungseinflüsse abzubilden.³ Daher soll sich auch im weiteren Verlauf die Diskussion des Energieverbrauchs an dieser Einteilung orientieren. Mit Ausnahme der mit flüssigem Kraftstoff betriebenen Zusatzheizung, deren Energieverbrauch separat ausgewiesen wird, erfordert der Betrieb der Elektrofahrzeuge ausschließlich elektrischen Strom als Endenergieträger. Die in diesem Abschnitt abgeleiteten spezifischen Energieverbräuche werden daher in Kilowattstunden pro Kilometer angegeben. Die Unterscheidung der Anteile, die dem Fahrbetrieb (in kWh/km) einerseits und dem Standbetrieb (in kWh/24h) andererseits zuzurechnen sind, ist wichtige Voraussetzung für die Berechnung der Auswirkungen verschiedener Nutzungsmuster.

13.1.6.1 Antriebsenergie

Die von einem Kraftfahrzeug auf einer bestimmten Wegstrecke verbrauchte Antriebsenergie ist von fahrzeugspezifischen und von nutzungsspezifischen (fahrverhaltens-spezifischen) Faktoren abhängig.

- **Fahrzeugspezifische Faktoren** sind die Auslegung des Antriebs, der Roll- und Luftwiderstand und die Fahrzeugmasse. Auf ebener Strecke und bei konstanter Fahrgeschwindigkeit hängt der Beitrag dieser Größen zum Antriebsenergiebedarf vor allem von der Geschwindigkeit ab.⁴ Auf Rügen wird jedoch keine gute Korrelation von Geschwindigkeit und Antriebsenergie gefunden. Der wichtigste Grund hierfür liegt in der typischen Nutzungscharakteristik der Fahrzeuge auf der Insel. Die fahrzeugspezifischen Faktoren werden erst bei höheren Geschwindigkeiten zum dominierenden Anteil der Antriebsenergie.
- **Nutzungsspezifische Faktoren** sind die Fahrgeschwindigkeit und die Beschleunigung. Die Auswertung von Antriebsenergiendaten ergab eine höhere Korrelation mit der Beschleunigung als mit der Geschwindigkeit. Bei den geringeren, für den Innerortsverkehr typischen Geschwindigkeiten ist die Beschleunigung somit ein besseres Maß für die erforderliche Antriebsenergie als die Geschwindigkeit. Fahrzeug- und nutzungsspezifische Faktoren wechselwirken allerdings in vielfältiger Weise. Mit der Beschleunigung steigt auch der Einfluß der Fahrzeugmasse auf den Antriebsenergiebedarf.⁵ Die unterschiedliche Beladung von Versuchsfahrzeugen führt zu unterschiedlichen Fahrzeuggewichten und hat damit auch eine Streubreite bei den Antriebsenergien zur Folge. In Abb. 13.1 sind die Antriebsenergien aller Rügen-Pkw ohne Rückspeisung von Bremsenergie in Abhängigkeit vom Fahrzeugebergewicht mit Fahrer dargestellt. Obwohl nur Meßdaten für

³ siehe auch die entsprechende Einteilung der HTW Dresden

⁴ eingesetzte Motorleistung: $P_{FF} = f \cdot m \cdot g \cdot v + 0,5 \cdot \rho \cdot c_w \cdot A \cdot v^3$

mit f : Rollreibungskoeffizient m : Fahrzeugmasse g : Erdbeschleunigung ρ : Luftdichte
 v : Geschwindigkeit c_w : Luftwiderstandsbeiwert A : Fahrzeugquerschnittsfläche

⁵ eingesetzte Motorleistung $P_{NF} = m \cdot b \cdot v$

mit m : Fahrzeugmasse b : Beschleunigung v : Geschwindigkeit

einen Wert der tagesmittleren Beschleunigung aufgetragen wurden⁶, läßt die Streuung erkennen, daß die Meßwerte außer dem Gewicht noch anderen Praxiseinflüssen unterliegen. Der Zusammenhang von Fahrzeugmasse und Antriebsenergie ist jedoch physikalisch gesichert und bietet damit das am besten belastbare Kriterium zur Einteilung der Pkw im Hinblick auf den Antriebsenergiebedarf. Weitergehende Versuche, die Streubreite der Antriebsenergie mit fahrzeugspezifischen Größen (z.B. der Leistung des Antriebs) zu korrelieren, führten zu keinem eindeutigen Ergebnis. Auch die Wind- und Wetterverhältnisse, die Fahrbahnbeschaffenheit, die Längsneigung und Kurvigkeit von Straßen leisten einen Beitrag zum Antriebsenergiebedarf. Diese Praxiseinflüsse bleiben in ihrer jeweiligen Höhe unbekannt und können somit auch nicht einzeln analysiert werden.

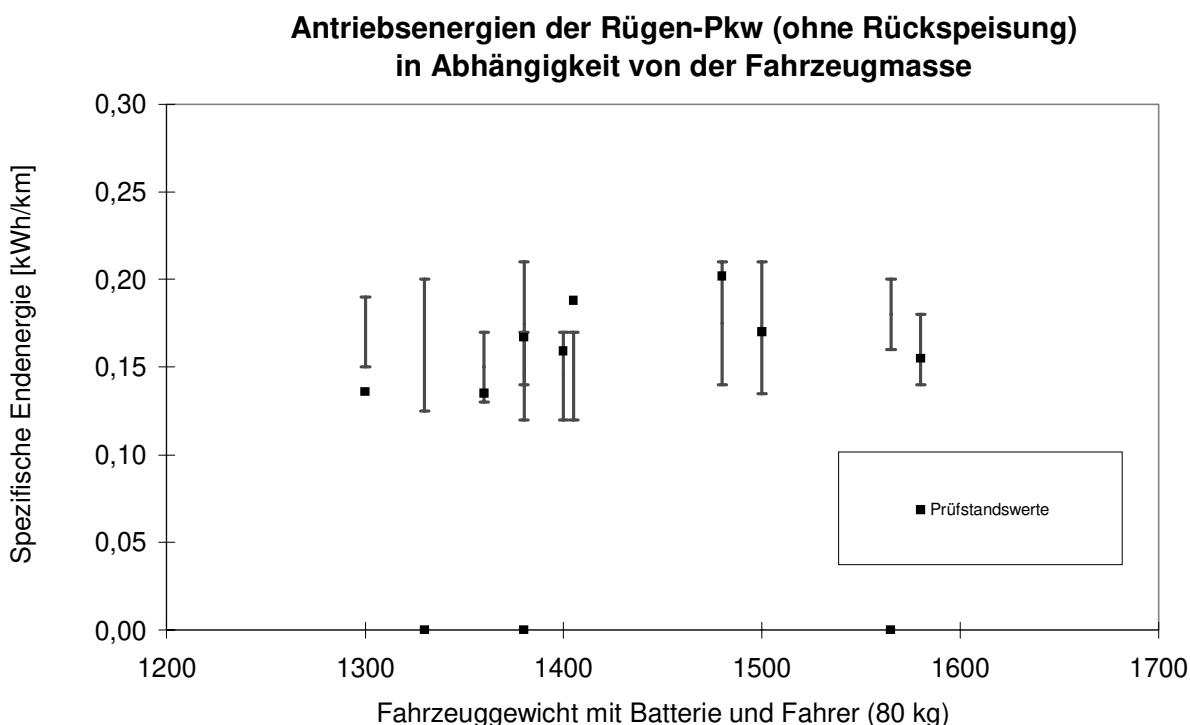


Abb. 13.1 Bandbreite der Rügen-Werte der Antriebsenergie bei der tagesmittleren Beschleunigung von 1,0 km/h/s sowie die Prüfstandswerte im NEFZ (■) in Abhängigkeit vom Fahrzeuggewicht (Leergewicht + Batteriegewicht + 80 kg Fahrergewicht)

Die Verhältnisse werden durch eine Berücksichtigung der beim regenerativen Bremsen zurückgewonnenen Antriebsenergie noch komplexer. Hohe Werte der mittleren Beschleunigung erhöhen im allgemeinen auch den Anteil rekuperierbarer Energie (siehe Abb. 13.2).

⁶ Die Abhängigkeit der Antriebsenergie von Geschwindigkeit (v) und Beschleunigung (b) ist über die Momentanwerte des Produktes $v(t)*b(t)$ gegeben. Zu beachten ist, daß auf Rügen nur Tages-Mittelwerte der Beschleunigung gemessen wurden, so daß das Produkt $v(t)*b(t)$ nicht zugänglich ist. Ein Nutzer, der viel beschleunigt (und bremst), braucht (bei gleicher mittlerer Geschwindigkeit) mehr Energie als ein Fahrer, der mit konstanter Geschwindigkeit fährt. Zudem wird für die gleiche Beschleunigung bei hohen Geschwindigkeiten mehr Leistung benötigt als bei niedrigen Geschwindigkeiten.

Der Bremsweg mit Rückspeisung ist jedoch stark vom Nutzer einerseits und der Auslegung der Bremsanlage andererseits abhängig.

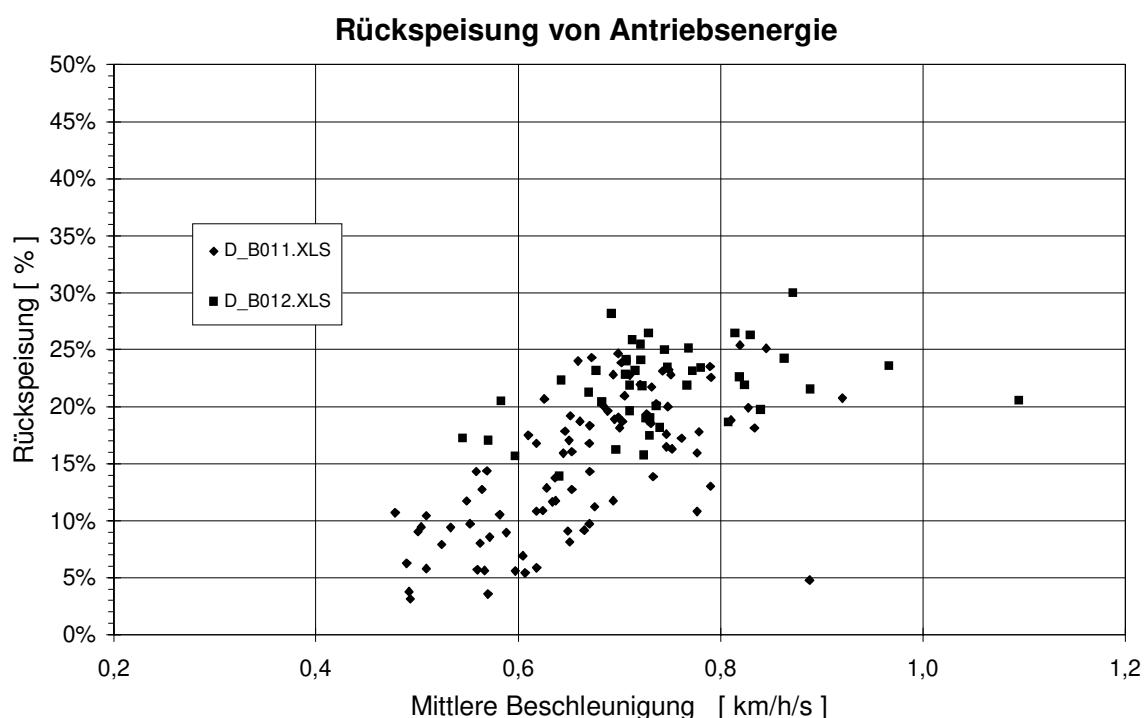


Abb. 13.2 Anteil der Rückspeisung an der Antriebsenergie für zwei gleiche Rügen-Fahrzeuge (BMW3er). Jeder Meßpunkt zeigt einen Tagesmittelwert für Beschleunigung und Rückspeisung (Rekuperation).

Die Bremsenergie wurde für alle Fahrzeuge auf Rügen bei mehreren Werten der mittleren Beschleunigung untersucht. Die Werte wiesen dabei von Fahrzeug zu Fahrzeug, aber auch für einzelne Fahrzeuge erhebliche Streuungen auf. Die mittleren Werte bei den Beschleunigungen von 0,6 km/h/s und 1,0 km/h/s wurden in Tab. 13.20 den entsprechenden Messungen auf dem Prüfstand gegenübergestellt. Auch die Werte vom Rollenprüfstand zeigen untereinander große Abweichungen. Ihr Mittelwert stimmt jedoch befriedigend mit den Rügen-Praxisdaten überein.

Tab. 13.20 Bremsenergie-Rückspeisung im Praxisversuch und auf dem Rollenprüfstand

Rückspeisung von Bremsenergie	Rolle ECE	Rügen bei 1,0 [km/h/s]	Rolle EUDC	Rügen bei 0,6 [km/h/s]
Leichte Pkw	15%	9%	11%	7%
Schwere Pkw	10%	11%	5%	10%
MB 100	16%	14%	*	8%

* Bei den Transportern wurden keine Prüfstandsmessungen im EUDC-Teilzyklus vorgenommen.

Um bei den Antriebsenergien von gleichen Bedingungen für Elektro- und Verbrennungskraft-Kfz auszugehen, müssen bei der Vergleichsfahrt alle maßgeblichen Parameter übereinstimmen. Wesentliche verbrauchsbestimmende Größen können jedoch oft nicht ermittelt werden. Bei der „Vergleichenden Ökobilanz“ müssen solche Einflüsse ausgeschlossen werden, um ein möglichst einfaches und nachvollziehbares Verfahren zur Ermittlung des Antriebsenergieverbrauchs von Elektro-Kfz anzuwenden. Dies kann bei der angestrebten Differenzierung in Innerorts- und Außerorts-Fahrtanteile nur durch geeignete Rollenprüfstandswerte erreicht werden. Dieses Vorgehen wird auch dadurch gerechtfertigt, daß von dem Vergleich der Fahrzeugsysteme nicht die Beschreibung des durchschnittlichen Antriebsenergieverbrauchs im Rügentest erwartet wird, sondern daß das im Versuch gewonnene umfangreiche Datenmaterial Basis für eine plausible Verallgemeinerung sein soll.

Wie bei den konventionellen Fahrzeugen soll deshalb auch bei den Elektrofahrzeugen der Neue Europäische Fahrzyklus zur Verbrauchsmessung dienen. Die entsprechenden Werte in den beiden Teilzyklen wurden von den Herstellern der Elektro-Kfz erhoben. Bei den Pkw wurden aus den Einzelmessungen „leichter“ und „schwerer“ Pkw die klassenmittleren Werte gebildet. Wie in Kapitel 13.1.3.2 bereits erläutert, werden Fahrten in der Stadt mit dem ECE-Teilzyklus (=Europatest), Fahrten im außerstädtischen Regionalverkehr mit dem EUDC-Teilzyklus abgebildet.

Bei den Verbrauchsdaten für die leichten Nutzfahrzeuge fehlten die EUDC-Werte. Sie wurden den Verbrauchswerten aus dem ECE-Zyklus gleichgesetzt. Für den Transporter VW T4 lag zudem kein ECE-Prüfstandswert vor, so daß - in Übereinstimmung mit den Auswertungen der HTW Dresden - der Mittelwert der 10 auf Rügen gemessenen Fahrzeuge angesetzt wurde. Dieses Vorgehen erscheint möglich, weil wegen der größeren Zahl der Fahrzeuge und Meßfahrten zufällige Effekte besser ausgeschlossen werden können. Dementsprechend korrikt der Prüfstandswert des MB 100 sehr gut mit dem Mittelwert aller Rügen-Messungen an diesem Fahrzeugtyp.

Einer Klasse von Fahrzeugen wird jeweils der mittlere Prüfstandswert aller Fahrzeuge dieser Klasse zugeordnet. Diese Werte sind für Pkw in Tab. 13.21 zusammen mit den klassenmittleren Rügen-Werten des Antriebsenergieverbrauchs angeführt. Es wird deutlich, daß die Rügen-Meßwerte und die Prüfstandsergebnisse eine übereinstimmende Tendenz zeigen.

Tab. 13.21 Rechenwerte für den Antriebsenergieverbrauch (einschl. Bremsenergie)

Ökobilanz-Rechenwerte	E-Mobil ETK/W [kWh/km]	E-Mobil EUDC [kWh/km]	Rügen Mittel. [kWh/km]	Otto ETK [l/100km]	Otto EUDC [l/100km]	Diesel ETK [l/100km]	Diesel EUDC [l/100km]
Leichte Pkw	0,138	0,135	0,149	8,9	5,4	6,9	4,2
Pb-Gel Golf	0,146	0,154	0,138	8,9	5,4	6,9	4,2
Schwere Pkw	0,170	0,166	0,153	10,6	6,3	9,0	5,0
T4	0,227	0,227 *	0,208	15,9	9,0		
MB 100	0,323	0,323 *	0,320			15,2	10,0
Für die Transporter liegen keine Prüfstandsmessungen im EUDC-Zylusteil vor. Daher wurden die Messungen des ECE auf den EUDC übertragen.							

13.1.6.2 Nebenverbraucher

Der Gruppe der Nebenverbraucher gehören alle Aggregate an, die aus dem Niedervolt-Bordnetz gespeist werden und nicht direkt dem Antrieb oder der Traktionsbatterie zugeordnet werden können. Dazu zählen die Fahrzeugbeleuchtung, Scheibenwischer, Gebläse und Heckscheibenheizung ebenso wie der Eigenverbrauch der Bordbatterie. Einige Fahrzeuge verfügen darüber hinaus über Hilfsaggregate für Bremse und Lenkung, die auch aus dem Bordnetz mit Strom versorgt werden. Da sie einen relativ hohen Verbrauch aufweisen, ist auch ihr Anteil am Nebenenergieverbrauch entsprechend hoch.⁷ Der im Vergleich deutlich geringere Nebenverbrauch der „leichten“ Pkw ist deshalb überwiegend auf die sparsamere Ausstattung mit Hilfsaggregaten zurückzuführen.

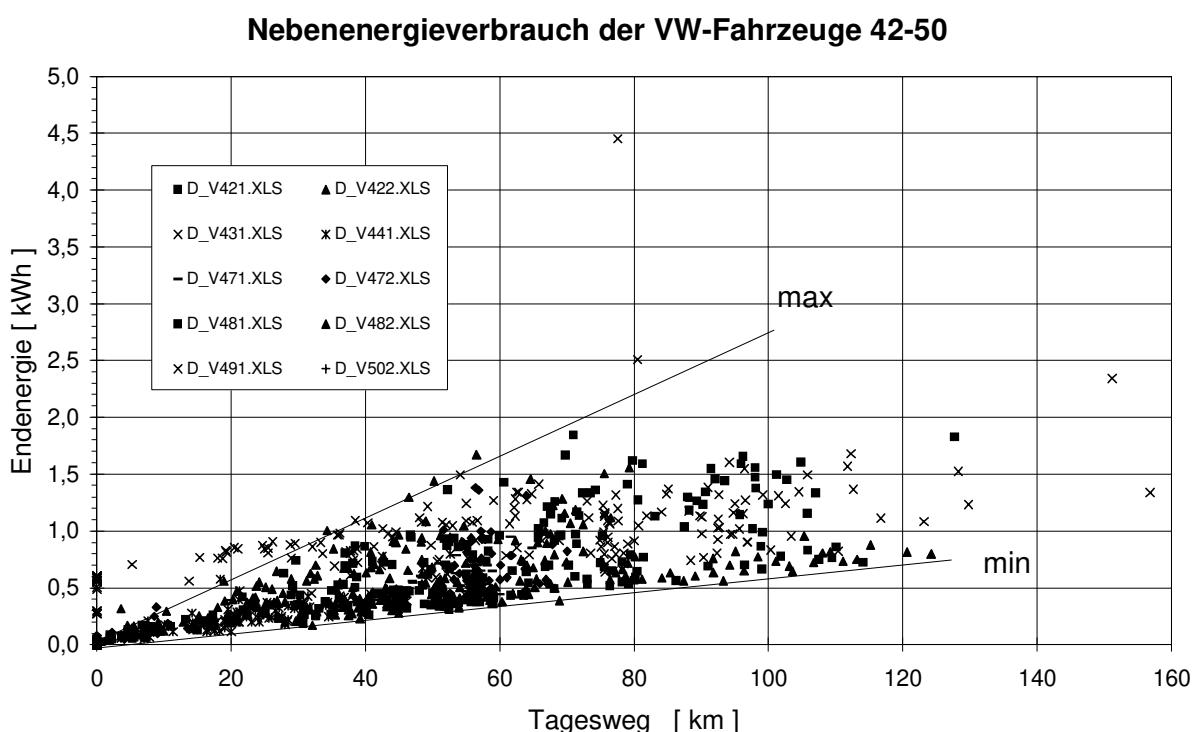


Abb. 13.3 Nebenenergieverbrauch (Bordnetz) in Abhängigkeit vom Weg für eine Fahrzeuggruppe. Ermittlung des fahrstreckenabhängigen Anteils aus der Steigung.

Viele Verbraucher im Bordnetz werden bei bestimmten Witterungsbedingungen (z.B. bei Regen, Kälte, hoher Luftfeuchte u.ä.) oder zu bestimmten Tageszeiten (Licht) eingeschaltet. Ihr Energieverbrauch ist weitgehend von der installierten Leistung und den äußeren Bedingungen, dagegen kaum vom jeweiligen Nutzungsmuster abhängig. Da die Einschaltdauer der Nebenverbraucher im allgemeinen mit der Fahrzeit korreliert, kann der Nebenenergieverbrauch auch proportional zur Fahrstrecke angenommen werden. Er kann damit

⁷ Der Energieverbrauch der Hilfsaggregate wird im Bordnetz erfaßt, obwohl er von der Systematik her dem Antrieb zuzurechnen ist. Dies ist jedoch unbedenklich, da der gesamte Verbrauch richtig ermittelt wird und lediglich die Abgrenzung zwischen Antrieb und Nebenenergie nicht ganz exakt erfolgt. Die Antriebsenergiwerte vom Rollenprüfstand enthalten keinen maßgeblichen Beitrag der Hilfsaggregate, da auf der Rolle rekuperierend gebremst und nicht gelenkt wird. Eine Doppelzählung wird somit vermieden.

als Steigung einer Auftragung des Bordenergieverbrauchs gegen den Weg ermittelt werden (siehe Abb. 13.3).⁸ Der bei einigen Fahrzeugen im Stand auftretende Grundverbrauch (Ordinatenabschnitt) kann mit der in den Fahrzeugen installierten Meßtechnik in Zusammenhang gebracht werden und wurde deshalb bei den Auswertungen nicht berücksichtigt.⁹

Bei einigen Fahrzeugen auf Rügen wurde auch der Innenraum elektrisch beheizt. Die hierfür benötigte Energie ist nach der gewählten Systematik auch dem Nebenenergieverbrauch zuzurechnen. Die meisten Fahrzeuge waren jedoch mit kraftstoffbefeuerten Zusatzheizungen ausgerüstet waren. Das Heizwertäquivalent dieser Kraftstoffe kann nicht einfach dem elektrischen Energieverbrauch zugeschlagen werden, da auf ihn eine andere Energiebereitstellungskette angewendet werden muß. Deshalb wurde der Nebenenergieverbrauch aller Fahrzeuge grundsätzlich ohne Berücksichtigung einer Innenraum-Heizung berechnet. Der Energieverbrauch und die Emissionen der Fahrzeugheizung gehen als separate Beiträge in die Endbilanz ein.

Tab. 13.22 Nebenenergieverbrauch der Rügen-Versuchsfahrzeuge

Nebenenergie	Bandbreite [kWh/km]	Rechenwert [kWh/km]
Leichte Pkw	0,002 - 0,031	0,013
Schwere Pkw	0,006 - 0,088	0,034
Transporter „VW T4“	0,006 - 0,061	0,034
Transporter „MB 100“	0,010 - 0,145	0,096

Die Bandbreite gibt die Minimum- und Maximumwerte der Fahrzeuge einer Klasse wieder.
Der Rechenwert entsteht durch Mittelung über die Mittelwerte aller Fahrzeuge einer Klasse.

13.1.6.3 Batterie

Dem Verbrauch der Batterie sind alle Energien zuzurechnen, die bei der Energieumwandlung und -speicherung in der Batterie als Verluste anfallen (Ladefaktor, Selbstentladung, Joulscher Verlust) oder die zur Erhaltung der Betriebsbereitschaft aufgewendet werden müssen (Heizung, Lüfter). Dieser Eigenverbrauch resultiert in komplexer Weise aus den jeweiligen Systemeigenschaften der elektrischen Speicher. Die nachfolgende Einteilung bildet einen gemeinsamen Nenner für die untersuchten Batteriesysteme (siehe Tab. 13.23). Da sie den Zusammenhang von Energieumsatz an der Batterie mit den Parametern der Nutzung begründen soll, wurden hier einige Kenngrößen anders abgegrenzt, als dies in der

⁸ Hier wird davon ausgegangen, daß der kilometerabhängige Verbrauch im Winter witterungs- und klimabedingt und wegen der längeren Dunkelzeit 20% über, im Sommer dafür 20% unter dem jahresmittleren Wert liegt. Die gemessenen Tagesschwankungen im Nebenverbrauch sind allerdings nicht allein jahreszeitbedingt.

⁹ In Einzelfällen konnte auch der Ladevorgang der Bordbatterie länger dauern kann als derjenige der Traktionsbatterie. In solchen Fällen erfassen Ladeendebilanzen, die sich an der Traktionsbatterie orientieren, nicht den vollen Energiebetrag zur Wiederaufladung der Bordbatterie.

Batterietechnik im allgemeinen üblich ist. Die Einzelbeiträge zum Eigenverbrauch der Batterien sollen deshalb hier kurz zusammengestellt werden.

- **Innenwiderstandsverbrauch (E_I):** Der Stromfluß im Innern der Traktionsbatterie führt zu einer Erwärmung der Batterie am Innenwiderstand der. Diese Innenwiderstandswärme ist bei NaNiCl₂-Batterien am höchsten. Sie kann dort jedoch zur Aufrechterhaltung der Betriebstemperatur genutzt werden und vermindert somit den Energiebedarf der Batterieheizung. Ein Innenwiderstandsverbrauch tritt sowohl beim Laden als auch beim Entladen der Batterie auf. Da der Innenwiderstandsverbrauch beim Laden sehr konstant ist, kann er in den Ladewirkungsgrad der Batterie eingerechnet werden. Dagegen führt der höhere Stromfluß beim Entladen (Fahren) zu einem stark schwankenden Innenwiderstandsverbrauch und kann überdies gut mit der Beschleunigung (Antriebsleistung) und damit auch dem Fahrverhalten korreliert werden..
- **Batterieheizung (E_B):** NaS- und NaNiCl₂-Batterien arbeiten bei einer Temperatur von ca. 300°C und müssen deshalb immer beheizt werden. Der Heizenergiebedarf hängt vor allem von der Oberfläche des Batteriegehäuses und somit auch von der Größe (Nennenergie) einer Batterie ab. Der Wert für die Heizenergie der 25 kWh NaNiCl₂-Batterie ist mit Bezug auf den Nennenergieinhalt etwas höher als bei den Werten von 15 bzw. 35 kWh. Diese Batterien mußten nämlich aus Gründen der besseren Raumausnutzung geteilt werden und weisen damit ein für die Isolierung ungünstigeres Oberfläche/Volumen-Verhältnis auf.
Die Heizenergie für die Batterie wird aus dem elektrischen Leitungsnetz entnommen, solange das Fahrzeug angeschlossen ist. Andernfalls muß die Heizenergie der Batterie selbst entnommen werden. Hier wurde davon ausgegangen, daß **der Anteil (n) aus dem Netz bezogener Heizenergie**^{2/3} beträgt.
Der Heizenergiebedarf wird um den Betrag des Innenwiderstandsverbrauchs gekürzt. Bei sehr hohen Fahrleistungen kann der Innenwiderstandsverbrauch den Heizenergiebedarf auch übersteigen und wird dann als Verlust gewertet.
- **Selbstentladung(E_S):** Mit diesem Sammelbegriff wird der allmähliche, mit der Zeit eintretende Speicherverlust elektrischer Energie bezeichnet. Er leistet bei NiCd- und Pb-Systemen einen geringen Beitrag zum Batterieeigenverbrauch.
- **Nachladeenergie (E_N):** NiCd-Batterien werden zur Erhaltung ihrer Ladung täglich mit ca. 0,5 kWh nachgeladen. Aus Wartungsgründen werden diese Batterien in größeren Zeitabständen mit 10% der Batterie-Nennenergie überladen. Die Frequenz dieser Überladevorgänge hängt von der Einsatzhäufigkeit und dem Verhalten des Nutzers ab. Um ökonomisches und unökonomisches Überladen zu unterscheiden, wurde für das Nachladeverhalten ein eigener Parameter eingeführt.
- **Heizenergiebedarf (E_H)** bei kalten Außentemperaturen: Die Bleibatterie arbeitet zwar bei Umgebungstemperatur, muß jedoch bei kalten Außentemperaturen unter 10°C zur Erhaltung ihrer vollen Einsatzbereitschaft und Lebensdauer beheizt werden. Der Heizenergiebedarf hängt von der Außentemperatur ab und erreicht ihren Maximalwert bei etwa -5°C, da die Batterieheizung hier dauernd mit voller Leistung arbeitet.¹⁰

¹⁰ Für die Ermittlung des Heizenergiebedarfs der Bleibatterie wurden Garagenstellplätze und Stellplätze im Freien in einem Verhältnis angenommen, das auf Rügen vorgefunden wurde. Wegen der zu erwartenden technischen Optimierung ihrer Bauart wurde der Beitrag der Blei-Batterieheizung bei der Darstellung einiger Ergebnisse besonders gekennzeichnet.

- **Ladefaktor oder Lade-Wirkungsgrad (L_F):** Dieser Kennwert entspricht dem in Wattstunden angegebenen Wirkungsgrad der Batterien, jedoch ohne den Beitrag des Innenwiderstandsverbrauchs beim Entladen. Die Zuordnung wurde so gewählt, weil sie eine Berücksichtigung unterschiedlicher Leistungsanforderungen im Fahrbetrieb erlaubt. Hohe Anforderungen verursachen auch hohen Innenwiderstandsverbrauch.

Der Endwert des Batterieverbrauchs E_{Batterie} wurde aus den obengenannten Eigenverbrauchsgrößen nach folgender Formel errechnet:

$$\text{Fall 1: } E_I \leq E_B: \quad E_{\text{Batterie}} = [E_I + (1-n) \times (E_B - E_I) + E_S + E_N] / L_F + n \times (E_B - E_I) + E_H$$

$$\text{Fall 2: } E_I > E_B: \quad E_{\text{Batterie}} = [E_I + E_S + E_N] / L_F + E_H$$

Tab. 13.23 Zuordnung auf Rügen eingesetzter Batterien zu den Nennenergieklassen 15, 25 und 35 kWh mit den angegebenen mittleren Kennwerten

Batterien						
	15 kWh			25 kWh		35 kWh
	NaNiCl ₂	NiCd	Pb	NaNiCl ₂	NiCd	NaNiCl ₂
Gewicht [kg]	180	360	630	300	600	420
Innenwiderstand [Ω]	0,33	0,21	0,10	0,31	0,18	0,42
Selbstentladung [% NE/24h]	0	1 - 10	1	0	1 - 10	0
Heizenergie [kWh/24h]	2,6	-	-	4,4	-	5,8
Heizenergie [W/kW]	7,12	-	-	7,33	-	6,88
Nachladeenergie [kWh/24h]	-	0,5	-	-	0,5	-
Ladefaktor [%]	97	85	80	97	85	97
durchschnittliche Zyklenzahl	1000	1750	700	1000	1750	1000

Batterien wurden entsprechend ihrem Nennenergiwert der jeweils nächstliegenden Nennenergieklasse zugeordnet. Zusätzlich sind die Innenwiderstände der auf Standardwerte normierten Batterien angeführt. Alle Angaben beruhen auf Mitteilungen der Hersteller. Die Heizenergien der NaNiCl₂-Batterien konnten durch Messungen bestätigt werden. Der Wert für die Heizenergie der 25 kWh NaNiCl₂-Batterie ist mit Bezug auf den Nennenergiegehalt etwas höher als bei den Klassen mit 15 bzw. 35 kWh. Die 25 kWh-Batterien mußten aus Gründen der besseren Raumausnutzung geteilt werden und weisen damit ein für die Isolierung ungünstigeres Oberfläche/Volumen-Verhältnis auf.

13.1.6.4 Ladewandler

Der Ladewandler transformiert die Spannung des elektrischen Leitungsnetzes zur Batterieladespannung und richtet den Wechselstrom. Wenn der Batterie bei langen Ladezeiten nur geringe Ladeenergien zugeführt werden, so können die Verluste des Wandlers stärker ins Gewicht fallen, mithin sinkt der Wirkungsgrad (siehe Abb. 13.4).

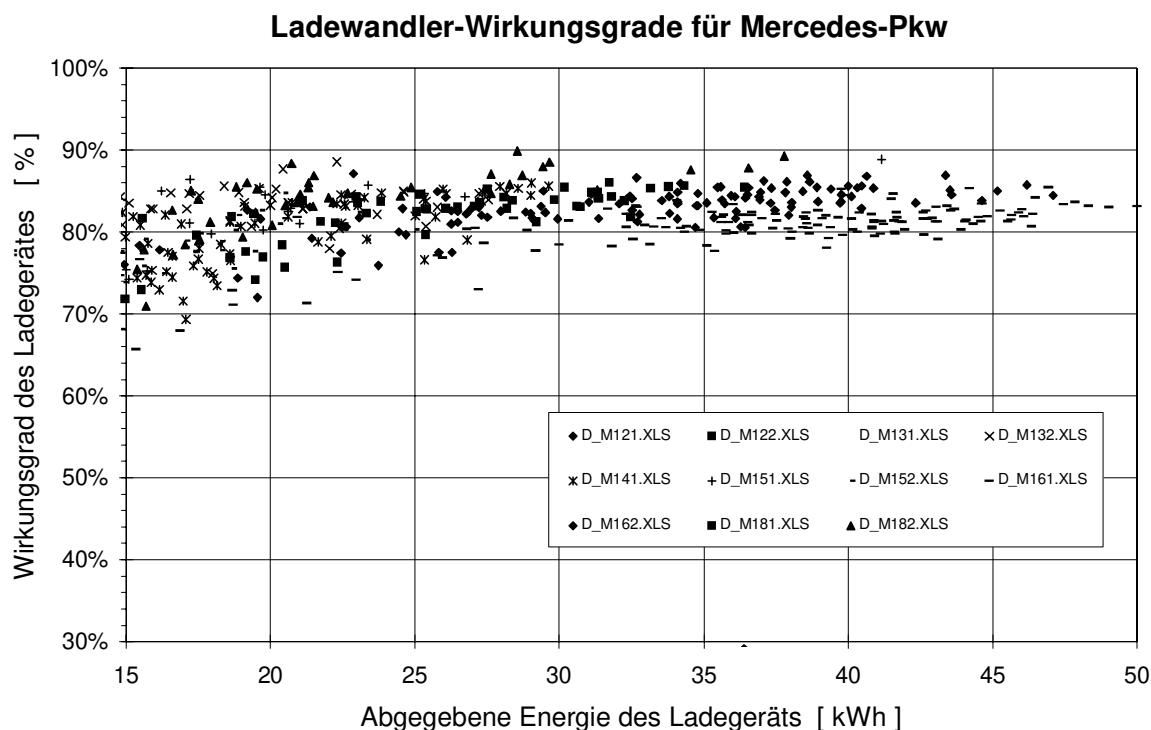


Abb. 13.4 Ladewandler-Wirkungsgrade für Mercedes Pkw

Wir ermitteln den Ladewandler-Wirkungsgrad für jede Fahrzeuggruppe auf Rügen grafisch aus einer Auftragung des Wirkungsgrades gegen die abgegebene Ladeenergie des Ladewandlers (siehe Abb. 13.4). Der entsprechende Wert wird durch die Häufung von Meßwerten bei Ladeenergien größer 20 kWh/d meist wohl definiert und kann dort mit einem Fehler von ca. $\pm 10\%$ abgelesen werden.¹¹ Die Werte aller Fahrzeuge mit NaNiCl_2 - und NiCd - Batterie ergeben einen mittleren Wert für den Ladewandler-Wirkungsgrad von 85%. Lediglich das Ladegerät der Bleibatterie weist aufgrund des besonderen Strom-/Spannungs-Konstantladeverfahrens für Bleibatterien einen etwas geringeren Wirkungsgrad von 82% auf.

Tab. 13.24 Ermittelte und im Rechenprogramm verwendete Ladewandler-Wirkungsgrade

Pb (Gel)	NiCd / NaNiCl_2
82 %	85%

¹¹ siehe jedoch die einschränkenden Bemerkungen zur Genauigkeit der Ladewandler-Bilanzen im Berichtsteil der HTW Dresden

13.1.7 Nutzungsmuster

Bei der Erprobung von Elektrofahrzeugen auf Rügen handelte es sich ausdrücklich um einen Praxisversuch. Elektrofahrzeuge wurden anstelle von Verbrennungsfahrzeugen für beliebige und vielseitige Zwecke des täglichen Bedarfs, auf unterschiedlichen Straßen und bei wechselnden Wetter- und Klimabedingungen gefahren. Sowohl bei Verbrennungskraftfahrzeugen als auch bei Elektrofahrzeugen haben derart wechselnde Einsatzbedingungen erheblichen Einfluß auf Energieverbrauch und Emissionen und müssen daher bei einer Gegenüberstellung beider Systeme Berücksichtigung finden. In diesem Abschnitt werden anhand beider Fahrzeugsysteme die Einflüsse der Einsatzbedingungen auf Energieverbrauchs und Emissionen diskutiert. Neben den Parametern, die im wesentlichen die Nutzungsmuster beschreiben, sind weitere Bedingungen für den Einsatz zu beachten, wie z. B. die Jahreszeit und das Ladeverhalten.

Die Einflüsse der Fahrzeugnutzung auf den Energie-/Kraftstoffverbrauch und die Emissionen sind für Elektro- und Verbrennungskraftfahrzeuge sehr unterschiedlich. Das Ergebnis eines ökologischen Vergleiches kann daher nicht von den Einsatzbedingungen unabhängig formuliert werden. Die maßgeblichen Parameter, mit denen unterschiedliches Nutzerverhalten beschrieben werden kann, wurden anhand von Sensitivitätsanalysen aus Rügendaaten abgeleitet. Da Elektrofahrzeuge und konventionelle Fahrzeuge bei Energieverbrauch und Emissionen unterschiedliche Abhängigkeiten vom Nutzungsmuster aufweisen, werden die Einflüsse zunächst getrennt diskutiert. Anschließend werden sie in einem allgemeinen Modell zur Beschreibung von Nutzungsmustern zusammengeführt.

Elektrofahrzeug:

- Ein Elektrofahrzeug verbraucht auch im Stand Energie, im wesentlichen bedingt durch die Eigenverbräuche der Batterie. Auch diese Stillstandsanteile müssen zur Ermittlung der fahrleistungsbezogenen Verbräuche herangezogen werden. Einige **Stillstandsverluste** (NaNiCl_2 -Heizung und Überladeenergie bei NiCd) der Batterie können in gewissem Umfang auch von der Verteilung der Stillstandszeiten an Einsatztagen abhängen.
- Wegen der fehlenden Abwärme von Elektromotoren ist eine Zusatzheizung bei kalten Außentemperaturen erforderlich. Auf Rügen waren außer **Kraftstoff-Heizungen** auch elektrische Heizungen im Einsatz.
- Zur Aufrechterhaltung ihrer Einsatzbereitschaft wird die Bleibatterie im Winter (0°C) mit $10,8 \text{ kWh}/24\text{h}$ beheizt. In der Übergangsjahreszeit Frühjahr und Herbst (10°C), bei der die Unterschreitung der Mindest-Betriebstemperatur nur periodisch auftritt, wird von einem **Heizenergiebedarf der Bleibatterie** von $4 \text{ kWh}/24\text{h}$ ausgegangen. Im Jahresdurchschnitt ergibt sich aus der Temperaturverteilung auf Rügen ein Wert von $3,2 \text{ kWh}/\text{Tag}$ (siehe Berichtsteil der HTW). Wenn das Fahrzeug mit Bleibatterie immer im Freien abgestellt wird, dann beträgt der Wert für die Batterieheizung und Lüftung im Winter ca. $15 \text{ kWh}/\text{Tag}$ und liegt entsprechend auch im Jahresmittel höher. Alle nachfolgenden Berechnungen verwenden die Werte der auf Rügen ermittelten Heizenergien.
- In regelmäßigen Abständen ist eine **Überladung der NiCd-Batterie** zu Wartungszwecken erforderlich. Dies führt zu einem erhöhten Batterieeigenverbrauch in Höhe von 10% der Nennenergie. Daher muß die Häufigkeit der Überladungsvorgänge mit einem besonderen Parameter beschrieben werden.

Verbrennungsfahrzeug:

- Auf den ersten 5 km jeder Fahrt, nämlich so lange bis Motor und Katalysator ihre Betriebstemperatur erreicht haben, weisen Verbrennungsmotoren erhöhte Energieverbräuche und Emissionen bei CO, NO_x und HC auf. Diese **Kaltstartzuschläge** werden geringer, wenn sich Motor und Katalysator bei mehreren Fahrten pro Tag noch nicht vollständig abgekühlt haben. Der Kaltstartzuschlag wird daher in Abhängigkeit von den Stillstandszeiten mit Kühlstartfaktoren korrigiert /BUWAL 95/ (siehe Kapitel 13.1.3.2.1). Zusätzlich werden bei der Ermittlung der Kaltstartzuschläge die im Winter bzw. Frühjahr/Herbst gegenüber dem Sommer niedrigeren Außen- und somit Motor-Starttemperaturen berücksichtigt. Die ersten 5 km einer Fahrt werden im Rahmen des Modells immer innerorts erbracht, so daß der Kaltstartzuschlag der Emissionsortsklasse I(dichte Besiedelung) zugeordnet wird.
- Nach dem Abstellen eines betriebswarmen Verbrennungsfahrzeugs verdampfen aus dem kraftstoffführenden System flüchtige Kohlenwasserstoffe. Die sogenannte **Heißabstellemission** hängt von der Stillstandszeit mit warmen Motor und damit indirekt von der Anzahl der Fahrten ab /TÜV 87/ (siehe Kapitel 13.1.3.2.1). Da Fahrzeuge im Rahmen unseres Modells immer innerorts abgestellt werden, wird diese Emission der Ortsklasse I zugeordnet.
- Aus den Kraftstoffbehältern von Verbrennungsfahrzeugen entweichen flüchtige Kohlenwasserstoffe, wenn der Dampf über dem flüssigen Kraftstoff mit steigender Temperatur expandiert. Die wesentliche Einflußgröße für die sogenannte **Tankatmung** bildet daher die Schwankung der Außentemperatur, die in den Übergangsjahreszeiten Frühjahr und Herbst am größten ist /TÜV 87/ (siehe Kapitel 13.1.3.2.1). Tankatmung tritt unabhängig von einer Fahrt auf. In Analogie zu den Heißabstellemissionen wird die Tankatmung der Emissionsortsklasse I zugerechnet.

Elektro- und Verbrennungsfahrzeug:

- Fahrten auf Innerorts-Straßen und auf Außerorts-Straßen unterscheiden sich im Lastverhalten und der Fahrdynamik. Im allgemeinen erfordert der Innerortsverkehr bei beiden Fahrzeugsystemen eine höhere spezifische Antriebsenergie. Dies bedingt auch einen Anstieg des Innenwiderstandsverbrauchs durch die Batterie des Elektrofahrzeugs. Die notwendige Unterscheidung der Fahrleistung nach **innerorts** und **außerorts** dient zugleich der Aufteilung der direkten (während der Fahrt freigesetzten) Emissionen des Verbrennungs-Kfz auf die Emissionsortsklasse mit dichter bzw. schwacher Besiedlung.

Tab. 13.25 Ableitung der Nutzungsmuster-Parameter aus den beeinflußten Verbrauchsgrößen des Verbrennungsfahrzeugs

Abhängige Größe	Zusammenhang	Parameter
IO/AO-Kraftstoffv./Emission	→ Fahrtanteil IO bzw. AO	→ Fahrlänge
Kaltstartzuschlag	→ Abstellzeit zw. Fahrten → Außentemperatur	→ Fahrtenzahl → Jahreszeit
Warmabstellemissionen	→ Abstellzeit zw. Fahrten	→ Fahrtenzahl
Tankatmung	→ Außentemperaturschwankung	→ Jahreszeit

Aus Tab. 13.25 und Tab. 13.26 lassen sich die Parameter ableiten, die zur Beschreibung der verbrauchs- und emissionsrelevanten Variablen eines Fahrzeugeinsatzes erforderlich sind. Ein vollständiger Parametersatz spezifiziert demnach alle maßgeblichen Einflüsse des Nutzerverhaltens und wird mit dem Begriff „Nutzungsmuster“ bezeichnet. Nicht jedes beliebige, in der Realität stattfindende Nutzungsmuster kann auf diese Weise exakt modelliert werden. Vielmehr geht mit der Parametrisierung notwendigerweise eine gewisse Vereinfachung der Realität einher. Diesem geringfügigen Informationsverzicht steht jedoch ein Modell gegenüber, mit dem die komplexen und schwer überschaubaren Randbedingungen eines Fahrzeugeinsatzes in guter Näherung berechenbar werden. Die Bedeutung der einzelnen Nutzungsmuster-Parameter wird im folgenden kurz erläutert.

Tab. 13.26 Ableitung der Nutzungsmuster-Parameter aus den beeinflußten Verbrauchsgrößen des Elektrofahrzeugs

Abhängige Größe	Zusammenhang	Parameter
IO/AO-Energieverbrauch	→ Fahrtanteil IO bzw. AO	→ Fahrlänge
Standverbrauch	→ Standzeit	→ Standtage
Kraftstoff-Zusattheizung	→ Außentemperatur	→ Jahreszeit
Bleibatterie-Heizung	→ Außentemperatur	→ Jahreszeit
Nachladeenergie	→ Ökonomie des Ladeverhaltens	→ Ladeverhalten

13.1.7.1 Fahrlänge

Die ersten 5 km einer Fahrt werden definitionsgemäß auf Innerorts-Straßen erbracht. Damit werden gleichzeitig die Kaltstartemissionen des Verbrennungsfahrzeugs immer dem Emissionsort mit dichter Besiedlung zugerechnet. Die anschließende Fahrtstrecke wird mit den Daten des EUDC-Zyklus beschrieben. Der Einfachheit halber wird angenommen, daß jede Fahrt innerorts endet, so daß der nächste Start wieder im Ort erfolgt.

13.1.7.2 Fahrtenzahl

Die Zahl der Fahrten (eines Tages) multipliziert mit der Fahrlänge ergibt die Tagesfahrleistung. Es gilt die folgende Annahme: die erste Fahrt eines Tages beginnt um 8.00 Uhr morgens, alle weiteren Fahrten erfolgen gleichverteilt über den Tag, und die letzte Fahrt endet um 24.00 Uhr. Daraus leitet sich eine einfache Methode zur Ermittlung der mittleren Standzeit zwischen den Fahrten ab (siehe Kapitel 13.1.3.2.1). Dieser Wert liegt der Berechnung der Kaltstart- und der Heißabstellemissionen des Verbrenners z ugrunde.

13.1.7.3 Standtage

Da ein Fahrzeug an einzelnen, im Extremfall an 7 Tagen in der Woche steht, wird zwischen sogenannten Fahr- und Standtagen unterschieden. An Standtagen fallen nur die Eigenverbräuche elektrischer Komponenten bzw. beim Verbrennungs-Kfz die Tankatmung an. Da ein Nutzungsmuster auf einen Tag und nicht auf die Woche bezogen ist, ergeben sich die einem Nutzungsmuster entsprechenden Tageskilometer und Verbräuche zu 1/7 der Wochenwerte.

13.1.7.4 Jahreszeit

Die vier Jahreszeiten werden durch drei unterschiedliche Durchschnittstemperaturen gekennzeichnet. Das mittlere Monatsmittel der drei kältesten Monate in Deutschland /TÜV 87/ ergibt den Winterwert ($1,5^{\circ}\text{C}$ abgerundet zu 0°C), die drei wärmsten Monate den Sommerwert ($17,7^{\circ}\text{C}$ aufgerundet zu 20°C), der Mittelwert aus den Monatsmitteln der verbleibenden 6 Monate definiert die Übergangsjahreszeiten Frühjahr/Herbst ($9,5^{\circ}\text{C}$ aufgerundet zu 10°C) (siehe auch 13.1.3.1.2 Kraftstoffzusatzheizung).

13.1.7.5 Ladeverhalten

Es wird zwischen ökonomischem und unökonomischem Ladeverhalten unterschieden. Die Verluste durch Überladung der NiCd-Batterie hängen von der Häufigkeit ab, mit der vollgeladen wird. Für unökonomisches Ladeverhalten wird unterstellt, daß eine Überladung erfolgt, sobald der Energieinhalt der Batterie auf $\frac{3}{4}$ der Nennenergie abgefallen ist, während bei ökonomischem Ladeverhalten erst vollgeladen wird, wenn die Restkapazität 50% der Nennenergie erreicht.¹² Die Anzahl der Überladungen hat im allgemeinen einen gebrochenen Wert und wird - wie die Tagesfahrleistung - als Wochenwert ermittelt und auf den Tag umgerechnet.

¹² damit wird die Nachladeenergie proportional zum gesamten Energieumsatz an der Batterie angenommen. Die Rügendaten zeigen, daß diese Annahme nur näherungsweise erfüllt ist. Ein genaueres Modell der realen Verhältnisse erscheint jedoch verzichtbar.

13.1.8 Modell zur Ermittlung des Gesamtenergieverbrauches

Die Summe der Einzelverbräuche aller Fahrzeugkomponenten muß bei einer sogenannten Ladeende-Bilanz mit der Netzenergieaufnahme übereinstimmen. Dieses Kriterium kann zur Kontrolle der Einzelverbrauchsdaten herangezogen werden. Andrerseits ist bei der großen Zahl der verschiedenen Baugruppen in den Elektrofahrzeugen eine Vereinheitlichung und Mittelwertbildung von Einzeldaten geboten. Nur so kann man im Rahmen eines Systemvergleichs zu überschaubaren Ergebnissen gelangen. Die Daten der Gruppen bzw. Klassen können zu Kontrollzwecken immer den konkreten Meßwerten einzelner Fahrzeuge gegenübergestellt werden.

Die Auswertung von Meßergebnissen der gesamten Flotte führt zu den folgenden Datensätzen (siehe Abb. 13.5):

- Die **Meßpunkte** in Abb. 13.5 geben für **Einzelfahrzeuge** eines Fahrzeugtyps die Gesamtenergieaufnahme elektrischer Energie aus dem Netz an. Die Messungen erfolgten zwischen zwei gleichen Batterieladezuständen („Batterie voll“) und sind auf die im jeweiligen Zeitraum (nicht notwendigerweise 24h) gefahrenen Kilometer bezogen.
- Die **Fehlerbalken** in Abb. 13.5 geben die Bandbreite des aus Komponentenverbräuchen **berechneten** Gesamtenergieverbrauchs für eine **Fahrzeuggruppe** wieder. Die Auswertung erfolgt hier also über die Komponentenverbräuche technisch gleicher Einzelfahrzeuge (in diesem Fall: alle Opel Astra mit NaNiCl₂-Batterie). Die Endenergieverbräuche Werte der Gesamtenergie wurden bei einem Rügen-mittleren Nutzungsmuster unter Variation der täglichen Fahrleistung berechnet.
- Die **durchgezogene Kurve** in Abb. 13.5 entspricht den mit unserem Modell berechneten Endenergieverbräuchen einer **Fahrzeugklasse**. Der Kurvenzug kommt analog zur Fahrzeuggruppe zustande, jedoch liegen der Mittelwertbildung nicht mehr nur die mittleren Komponentenverbräuche einer Fahrzeuggruppe, sondern alle einer Klasse angehörenden Fahrzeuge (in diesem Fall: die leichten Pkw mit 25 kWh-NaNiCl₂-Batterie) zugrunde.

Meßwerte - Gruppenwerte - Klassenwerte
Opel 32-36 26 kWh-NaNiCl₂-Batterie

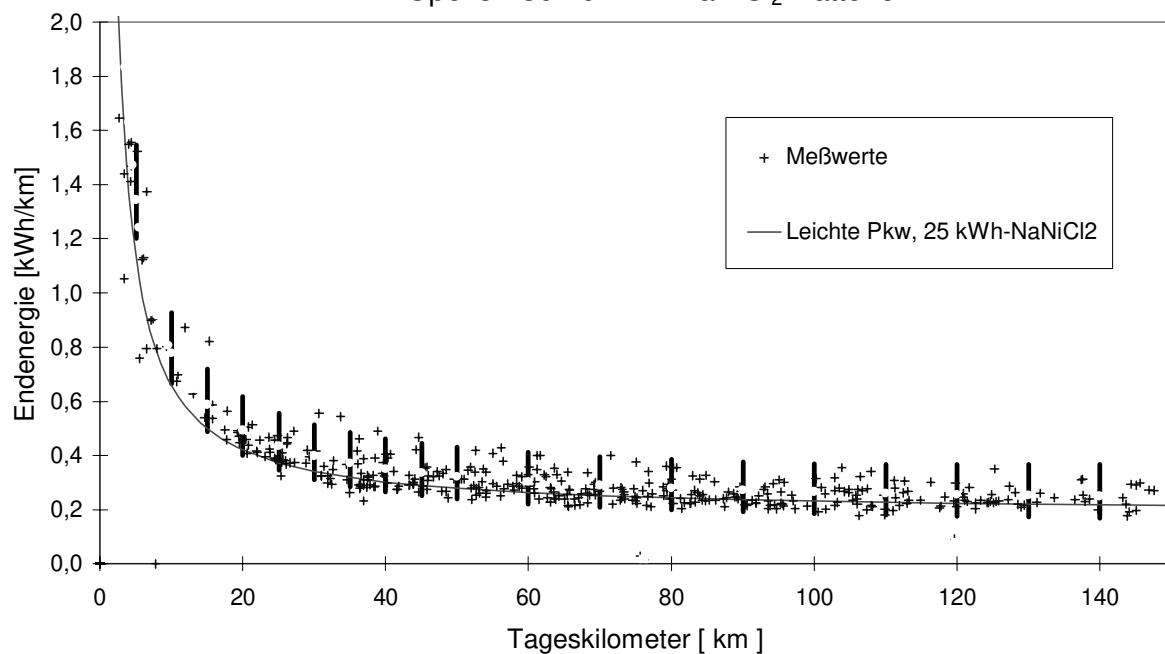


Abb. 13.5 Auftragung der gemessenen bzw. mit unserem Modell berechneten kilometerspezifischen Verbrauchswerte für einen Elektrofahrzeugtyp am Beispiel des Opel Astra mit 26 kWh NaNiCl₂-Batterie:

- (+): Meßergebnisse der 5 Fahrzeuge auf Rügen
- (**Fehlerbalken**): Bandbreite für die aus maximalen und minimalen Komponentenverbrächen berechneten Gruppendaten aller Opel Astra mit 26 kWh-NaNiCl₂-Batterie
- (—): berechnete Klassendaten für leichte Pkw mit großer Batterie (25 kWh).

Wenn die Meßpunkte nicht zu sehr streuen und ihr Durchschnittswert gut durch die Gruppendaten wiedergegeben wird, dann wird dadurch die Aufteilung des Gesamtenergieverbrauchs auf die Komponenten bestätigt. Sind außerdem die Kurvenverläufe für Fahrzeuggruppen und Fahrzeugklassen einander ähnlich, so kann die betrachtete Fahrzeuggruppe als typisch für die Fahrzeugklasse gelten. Die Fahrzeuggruppe der Opel Astra in Abb. 13.5 liegt im allgemeinen etwas über dem Wert der zugehörigen Klasse (leichte Fahrzeuge mit 25 kWh-NaNiCl₂-Batterie).

In Abb. 13.5 treten aber auch größere Abweichungen der berechneten von den gemessenen Daten auf, die folgendermaßen begründet werden können:

- Unsicherheit der Messungen, vor allem bei geringer Kilometerleistung
- Mit der Klasseneinteilung einhergehende Pauschalierungen
- Diskrepanz von gewähltem und realem Nutzungsmuster (z. B. deckt sich der Bilanzzeitraum der Ladeende-Bilanz nicht mit dem 24h-Wert des Nutzungsmusters).

13.1.9 Lärm

*Eine gesondert durchgeführte Untersuchung sollte die Lärmemission konventionell angetriebener **und typgleicher** elektrischer Konversionsfahrzeuge vergleichen. Ein elektrisch angetriebener Pkw wurde einem typgleichen Verbrennungsfahrzeug gegenübergestellt. Das jeweils am schwächsten motorisierte Verbrennungsfahrzeug (des gleichen Typs) wurde zum Vergleich gewählt.*

13.1.9.1 Ergebnisse

Die Untersuchung zeigt, daß der Unterschied in der Geräuschentwicklung zwischen Elektro-Pkw und Verbrennungs-Pkw bei beschleunigter Vorbeifahrt und kleinen Geschwindigkeiten am größten ist. Bei niedrigen Geschwindigkeiten ist das Rollgeräusch gering, das Motorgeräusche somit die wesentliche Schallquelle. Die Unterschiede variieren bei den drei untersuchten Fabrikaten im Bereich von etwa 3 bis 7 dB(A). Ähnliche Differenzen kann man auch für die Anfahrt aus dem Stand erwarten. Die Schallpegeldifferenz zwischen Elektro- und konventionellem Pkw nimmt bei der beschleunigten Vorbeifahrt mit höheren Geschwindigkeiten ab. Der Grund hierfür liegt in den mit der Geschwindigkeit zunehmenden Rollgeräuschen. Aber selbst bei einer beschleunigten Vorbeifahrt mit 50 km/h liegt der Pegel bei den untersuchten konventionellen Pkws noch etwa um 1-2 dB(A) höher als bei den entsprechenden Elektrofahrzeugen.

Auch bei der Konstantfahrt nimmt das Rollgeräusch mit der Geschwindigkeit zu. Die Unterschiede im Motorengeräusch verlieren an Einfluß. Da die elektrisch angetriebenen Pkws schwerer sind als konventionelle Fahrzeuge, wird die Schallpegeldifferenz ab 50 km/h bei zwei Versuchsfahrzeugen negativ. Das heißt, daß elektrogetriebene Pkws (mit Serienreifen) bei Geschwindigkeiten zwischen 50 und 90 km/h auch um etwa 1-2 dB(A) lauter sein können als konventionelle Fahrzeuge. Es zeigen sich jedoch Unterschiede bei verschiedenen Herstellern.¹³ Für ein Fahrzeug im Meßprogramm war z.B. die Schallpegeldifferenz zwischen der elektro- und konventionell getriebenen Variante auch noch bei einer Geschwindigkeit von 70 km/h positiv, entsprechend einem - wenn auch nur geringfügig - leiseren Elektrofahrzeug.

Für einen Fahrzeugtyp wurden Messungen sowohl mit Serien- als auch mit rollwiderstands-optimierten Reifen durchgeführt, um den Einfluß der Bereifung zu untersuchen. Aufgrund des Beitrages der Rollreibung nimmt die Pegeldifferenz unterschiedlich bereifter Fahrzeuge mit steigender Geschwindigkeit zu (siehe Abb. 13.6). Bei einer Geschwindigkeit von 70 km/h beträgt die Pegeldifferenz etwa 3 dB(A).

Elektrogetriebene Pkw mit rollwiderstandsoptimierten Reifen sind auch bei höheren Geschwindigkeiten bis 70 km/h um 1,5 bis 3,5 dB(A) leiser als entsprechende verbrennungsmotorgetriebene Vergleichsfahrzeuge mit Serienreifen, wie die Pegeldifferenzen in Abb. 13.7 verdeutlichen. Dies ist jedoch, wie ein Vergleich mit Abb. 13.6 zeigt, vornehmlich auf den Reifeneinfluß zurückzuführen.

¹³ Ein Reifen stellt hinsichtlich seiner Leichtlaufeigenschaften, der Griffigkeit, der Geräuschemission und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit einen Kompromiß dar. Werden die Ansprüche in einzelnen Punkten gelockert, so eröffnen sich Verbesserungspotentiale bei den übrigen Eigenschaften. Ein spezieller Reifen für den Geschwindigkeitsbereich der Elektrofahrzeuge könnte somit die Geräuschemission gegenüber heute üblichen Serienreifen weiter absenken.

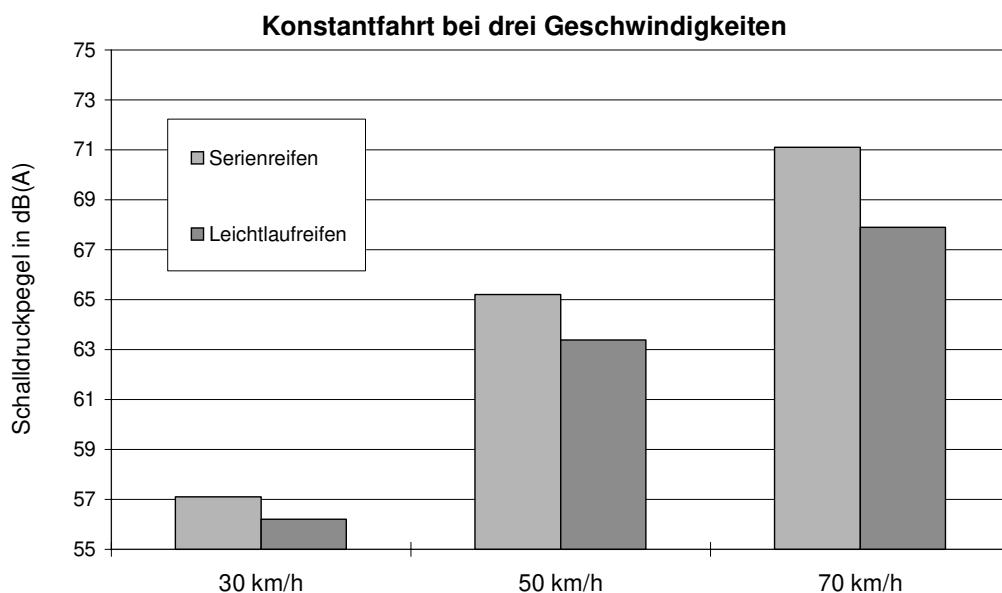


Abb. 13.6 Schallpegel eines Elektrofahrzeugs mit unterschiedlicher Bereifung bei verschiedenen Geschwindigkeiten

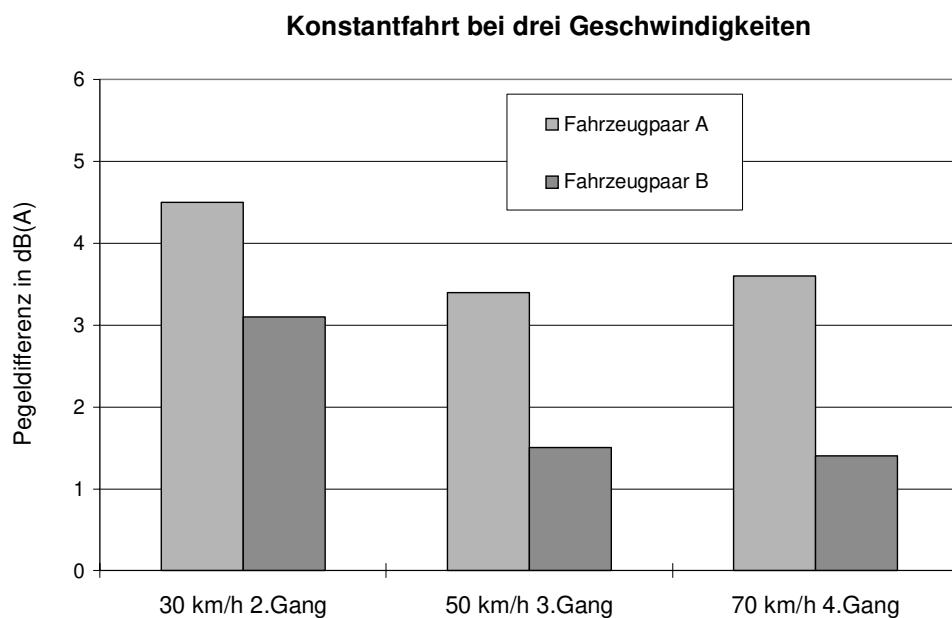


Abb. 13.7 Pegeldifferenz zwischen elektrogetriebenen Pkw mit rollwiderstandsoptimierten Reifen und entsprechendem konventionellen Pkw mit Serienreifen an zwei verschiedenen Fahrzeugpaaren A und B. (positive Pegeldifferenz: Elektrofahrzeug ist leiser)

13.1.9.2 Abschätzung der Lärmreduktion durch Elektrofahrzeuge

Die hier dargestellten Ergebnisse zeigen, daß elektrogetriebene Konversionsfahrzeuge bei niedrigen Geschwindigkeiten und beschleunigter Vorbeifahrt gegenüber typgleichen verbrennungsgetriebenen Pkws um 2-7 dB(A) geringere Lärmpegel verursachen. Dort, wo einzelne Fahrzeuge für den Schallpegel maßgeblich sind, wie z.B. in reinen Wohn- oder Kurgebieten, ist die Lärmentlastung durch eine Substitution von konventionell getriebenen Fahrzeugen direkt erkennbar. In Stadtgebieten, in denen wahrscheinlich nur ein begrenzter Anteil konventioneller Fahrzeuge durch Elektrofahrzeuge ersetzt werden kann, ist der Effekt geringer ausgeprägt.

13.2 Ergebnisteil I - Analyse und Vergleich

13.2.1 Methodik

Die Umweltauswirkungen einer Fahrt mit Elektrofahrzeugen oder vergleichbaren Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor werden von einer Vielzahl von Einzelfaktoren bestimmt. Der Vergleich beider Fahrzeugsysteme stützt sich im wesentlichen auf **Schadstoffemissionen**. In Ergänzung hierzu wurden der Primärenergieverbrauch und die Lärmemission bilanziert. Schadstoffe können an **drei Orten** auftreten, nämlich innerorts, außerorts und auf unbesiedeltem Gebiet, wobei sie auf unterschiedliche Natur- und Zivilisationsräume einwirken. Ebenso können sie jedoch über Raumgrenzen hinweg verfrachtet werden und so je nach Schadstoff, Verdünnung oder Folgereaktion in veränderter Weise auch auf Nachbarräume einwirken. Die freigesetzten Stoffmengen sind von den gewählten **Fahrzeugen**, bei den Elektrofahrzeugen zusätzlich von den **Batteriesystemen** abhängig. Schließlich stellen auch die besonderen Einsatzbedingungen, die **Nutzungsmuster** der Fahrzeuge, ein wesentliches Kriterium dar. Bei der Vielzahl von Einflüssen muß sich der hier geführte Systemvergleich auf die wesentlichen Elemente konzentrieren.

- **Fahrzeuge, Batterien**

Antrieb und Fahrwerk auf der einen, die Batterie der Rügen-Elektrofahrzeuge auf der anderen Seite sind eng aufeinander abgestimmt und bilden gemeinsam die fahrzeugtechnischen Parameter des Vergleichs. Die Pkw werden in leichte und schwere Fahrzeuge unterschieden und können jeweils mit 15 kWh- oder 25 kWh-Energiespeicher vom Typ NaNiCl₂, NiCd oder Blei ausgerüstet werden. Beim Otto- bzw. Diesel-Vergleichsfahrzeug sind die direkten Emissionen jeweils gleich; der einzige Unterschied zwischen kleinen und großen Pkw liegt im Kraftstoffverbrauch. Für den Vergleich der leichten Nutzfahrzeuge werden die auf Rügen untersuchten Typen VW T4 und MB 100 herangezogen, beide ausgerüstet mit 25 kWh NiCd-Batterie, der MB 100 zusätzlich mit 35 kWh NaNiCl₂-Batterie. Ihnen entsprechen jeweils die typgleichen Nutzfahrzeuge in ihrer schwächstmotorisierten, nach EURO II zertifizierten Version. Im Falle des VW T4 handelt es sich dabei um ein Otto-Nutzfahrzeug mit geregelter Katalysator, beim MB 100 hingegen um ein Dieselfahrzeug.

- **Nutzungsmuster**

Für beide Fahrzeugsysteme des Vergleichs sind die besonderen Bedingungen des Einsatzes (Fahrhäufigkeit, Fahrtweite, Standzeiten etc.) von großer Bedeutung. Dieser Aspekt soll durch die Definition von zwei gängigen und zwei extremen Nutzungsmustern hervorgehoben werden. Die Tagesfahrleistung der Nutzung A ist an der mittleren Fahrlänge aller Pkw-Fahrten von 16,6 km /HAUTZINGER 91 ET AL./orientiert, während die Tagesfahrleistung beim Nutzungsmuster B dem jahresmittleren statistischen Wert aller Pkw angenähert ist. /DRM 96/. Die zusätzliche Ausweisung sehr geringer und sehr hoher Fahrleistungen soll die Richtung und Größe der Effekte anzeigen, die bei Abweichungen von den gängigen Nutzungsmustern eintreten.

Die Ergebnisse des Vergleichs sind bei 80 Tageskilometern praktisch nicht mehr von der Tagesfahrleistung abhängig und können somit auch auf alle höheren Werte der Tagesfahrleistung übertragen werden.¹⁴ Für Nutzfahrzeuge wurden dieselben Fahrleistungswerte

¹⁴ Insbesondere die durch eine Schnellladung erreichbaren Tagesfahrleistungen über 150 km führen kaum mehr zu veränderten Wirkungsgraden und sind daher durch den Wert bei 80 Tageskilometern in guter Näherung zu beschreiben (siehe dazu den entsprechenden Berichtsteil der HTW Dresden).

wie für Pkw angenommen. Lediglich die hohe Nfz-Fahrleistung von 80 km wird mit 8 Fahrten bei jeweils 10 km Fahrtlänge angesetzt, um damit einen höheren Innerortsanteil im Transporterverkehr zu berücksichtigen. In allen Fällen wurde ein jahresmittlerer Wert für temperaturabhängige Größen und ökonomisches Batterie-Ladeverhalten angenommen.

Nutzung A:	4 Fahrten	5 km Fahrtlänge	100 % Innerorts	ein Standtag pro Woche	17,1 Tageskilometer
Nutzung B:	9 Fahrten	5 km Fahrtlänge	100 % Innerorts	ein Standtag pro Woche	38,6 Tageskilometer
geringe Pkw-Fahrleistung:	1 Fahrt	5 km Fahrtlänge	100 % Innerorts	keine Standtage	5 Tageskilometer
hohe Pkw-Fahrleistung:	4 Fahrten	20 km Fahrtlänge	25 % Innerorts	keine Standtage	80 Tageskilometer
geringe Nfz-Fahrleistung:	1 Fahrt	10 km Fahrtlänge	50 % Innerorts	keine Standtage	10 Tageskilometer
hohe Nfz-Fahrleistung:	8 Fahrten	10 km Fahrtlänge	50 % Innerorts	keine Standtage	80 Tageskilometer

Tab. 13.27 Standardisierung einiger Nutzungsmuster für den Emissionvergleich anhand der Parameter Fahrtenzahl, Fahrtlänge und Standtag. Bei den nachfolgenden Berechnungen wurden außerdem für die Außentemperaturen jahresmittlere Bedingungen und ökonomisches Batterie-Ladeverhalten angenommen.

• Emissionsorte und Wirkungskategorien

Schadstoffemissionen und Lärmemission treten in allen Ortsklassen auf, aber ihre Wirkungen sind dort sehr unterschiedlich. Wenn sie in hoher Konzentration emittiert werden, dann sind die direkten Wirkungen auf Mensch und Natur besonders gravierend. Trifft eine hohe Emissionsbelastung mit einer dichten Besiedlung zusammen, so sind Humantoxizität, Sachgüterschäden und Lärmbelastung die wichtigsten Kriterien der Umweltbelastung (siehe Tab. 13.28). Sie werden zur Wirkungskategorie der lokal wirksamen Emissionen zusammengefaßt. In schwächer besiedeltem Gebiet außerhalb von geschlossenen Ortschaften treten hohe Konzentrationen von Luftschatdstoffen seltener auf. Ihre Wirkungen beruhen dort eher auf einer allmählichen Anreicherung und Folgereaktionen, die zu einer großräumigen Belastung der Ökosphäre durch Sommersmog, Versauerung der Niederschläge und Eutrophierung von Böden und Gewässern führen. Wegen ihrer hohen Verdünnung werden bei den Emissionen auf unbesiedeltem Gebiet nur deren globale Umweltwirkungen betrachtet.

Alle Schadstoffe werden daraufhin untersucht, ob sie zu Umweltkriterien der **lokalen, regionalen** und/oder **globalen Wirkungskategorie** beitragen und dementsprechend einer oder mehreren Kategorien zugeordnet. Neben der Zuordnung der Schadstoffe ist auch eine Zuordnung der Emissionsorte zu Wirkungskategorien erforderlich. Lokale Umwelteffekte in Ballungsräumen werden ausschließlich durch Innerorts-Emission, regionale dagegen von der Summe der Innerorts- und Außerorts-Emissionen hervorgerufen. Zur Beschreibung von globalen Wirkungen, die vom Emissionsort unabhängig sind, wird die gesamte Emission von CO₂ und CO₂-Äquivalenten, also die Gesamtemission aus allen drei Emissionsortsklassen, betrachtet. Der wichtigste Beitrag CO₂-fremder Emissionen zum Klimaeffekt kommt von Methan mit einem CO₂-Äquivalentwert von 24,5 (bei einem Zeithorizont von 100 Jahren) /IPCC 94/

Emissionsort:

		Ballungsraum	schwach besiedelter Raum	unbesiedelter Raum
		Global wirksame Emissionen		
		Regional wirksame Emissionen		
		Lokal wirksame Emissionen		
NO _x		<ul style="list-style-type: none"> • Humantoxizität • Sachgüterschäden 	<ul style="list-style-type: none"> • Eutrophierung • Versauerung • Sommersmog 	
Benzol		<ul style="list-style-type: none"> • Humantoxizität 		
NMHC		<ul style="list-style-type: none"> • Humantoxizität 	<ul style="list-style-type: none"> • Sommersmog 	
Partikel		<ul style="list-style-type: none"> • Humantoxizität* • Sachgüterschäden 		
SO ₂		<ul style="list-style-type: none"> • Sachgüterschäden 	<ul style="list-style-type: none"> • Versauerung 	
CO		<ul style="list-style-type: none"> • limitiert 		
Lärm		<ul style="list-style-type: none"> • Belastung 	<ul style="list-style-type: none"> • (Belastung) 	
CO ₂		<ul style="list-style-type: none"> • Klimawirkung 	<ul style="list-style-type: none"> • Klimawirkung 	<ul style="list-style-type: none"> • Klimawirkung
CH ₄		<ul style="list-style-type: none"> • Klimawirkung 	<ul style="list-style-type: none"> • Klimawirkung 	<ul style="list-style-type: none"> • Klimawirkung
Primärenergie		<ul style="list-style-type: none"> • Ressourcenverbrauch 	<ul style="list-style-type: none"> • Ressourcenverbrauch 	<ul style="list-style-type: none"> • Ressourcenverbrauch

Tab. 13.28 Emissionen als Indikatoren für bestimmte Umweltwirkungen (Umweltkriterien) und ihre Zusammenfassung zu Wirkungskategorien nach dem Ort der Wirkung. Es sind die Kategorien der lokal, regional und global wirksamen Emissionen zu unterscheiden. Bei Diesel-Partikeln besteht eine Kontroverse über ihre Cancerogenität (*). Der Kategorie der „global wirksamen Emissionen“ wurde hier aus systematischen Gründen auch der Primärenergieverbrauch zugeordnet, obwohl es sich nicht um eine Emission handelt. In der Grafik wurde angenommen, daß die Fahrleistung **innerorts** erbracht wird, die lokale Wirkung also im Ballungsraum (s.o.) auftritt.

Lokal wirksame Emissionen:	NO _x	Benzol	NMHC	Partikel	SO ₂	CO	Lärm
Regional wirksame Emissionen:	NO _x		NMHC	SO ₂	Lärm		
Global wirksame Emissionen/ Energieverbrauch:	CO ₂		CO ₂ -eq	Primär-energie			

Tab. 13.29 Aufbau der vergleichenden Bilanzen und Anordnung der Indikatoren für die jeweils betrachteten Umweltwirkungen in den Grafiken für lokal, regional und global wirksame Emissionen.

13.2.2 Beiträge zur Primärenergie- und NO_x-Bilanz

Um das Zustandekommen der nachfolgenden Darstellungen besser verständlich zu machen, soll zunächst die Zusammensetzung der Balken aus Einzelbeiträgen erläutert werden. Dies geschieht in Abb. 13.8 für Primärenergie, in Abb. 13.9 für die NO_x-Emission und lässt sich sinngemäß auf alle anderen Emissionen übertragen. In späteren Darstellungen wird nur noch ein Gesamtwert wiedergeben.

Die wesentlichen Resultate der Abb. 13.8 und Abb. 13.9 lassen sich - unter Bezugnahme auf die Nutzung A (siehe Tab. 13.27) - folgendermaßen zusammenfassen:

- Die Energiebereitstellung („Vorkette“) hat bei den Elektrofahrzeugen einen Anteil von mehr als 50% am gesamten Primärenergieverbrauch, bei den NO_x-Emissionen ist das entsprechende Verhältnis größer als 90%. Die hohen Energie-Umwandlungsverluste bzw. umwandlungsbedingten Emissionen unterstreichen den Stellenwert der Stromerzeugung für die Umweltbilanz des Elektrofahrzeugs. Bei Otto- und Dieselfahrzeugen beträgt der Anteil der Energiebereitstellung am Primärenergieverbrauch etwa 10%, an der Gesamtemission von NO_x etwa 15%. Somit treten ca. 85% der NO_x-Emission der Verbrennungsfahrzeuge als direkte Emissionen auf, werden also während der Fahrt freigesetzt.
- Bei Berücksichtigung aller Wirkungsgradverluste haben Elektrofahrzeuge im direkten Betrieb insgesamt einen geringeren Endenergieverbrauch. Anders ausgedrückt: die Effizienz von elektrischem Energiespeicher und Motor zusammengenommen ist höher als bei Dieselmotoren.
- Der Dieselmotor ist dem Ottomotor in seinem primärenergetischen Wirkungsgrad stets etwas überlegen. Bei der NO_x-Emission zeigen sich Unterschiede im Konzept der Verbrennungsmotoren. Sie liegt bei Dieselfahrzeugen höher als bei Ottomotoren und ist ungefähr gleichverteilt zwischen Warm- und Kaltbetrieb. Die wirksame Schadstoffminde rung durch Katalysatoren in der Warmphase der Ottomotoren führt zu einem überproportionalen NO_x-Anteil der kalten Betriebsphase ohne Katalysatorunterstützung (Kaltstartzuschlag).
- Der Bereich der zwischen den Systemen differierenden Bauteile wie Batterie, Tank, Motor, Getriebe und Elektrik verursacht bei den Elektrofahrzeugen etwa 10% des gesamten Primärenergieaufwands und annähernd 15% der gesamten NO_x-Emission. Die entsprechenden Anteile der Verbrennungsfahrzeuge liegen bei 1% bzw. 2%.

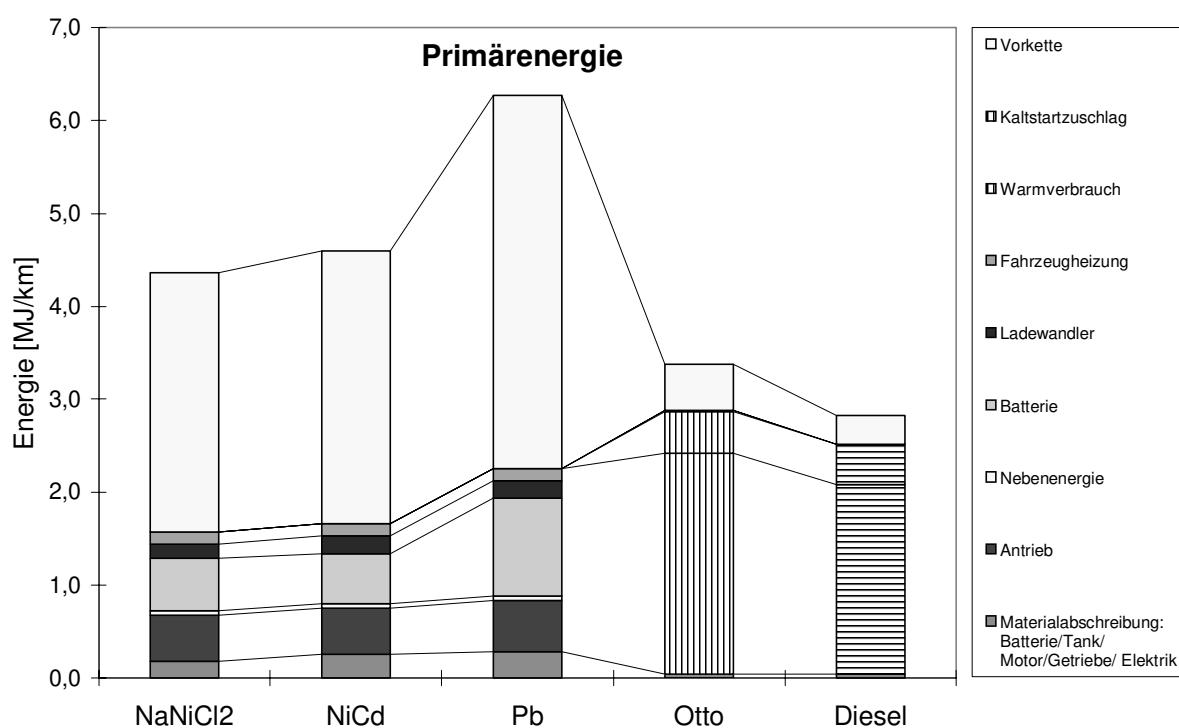


Abb. 13.8 Aufteilung des gesamten Primärenergieverbrauchs leichter Pkw mit 15 kWh-Batterie, nach Lebensweg-Bereichen bei Nutzungsmuster A: 4 Fahrten mit 5 km Fahrtlänge, ein Standtag, Jahresmittel.

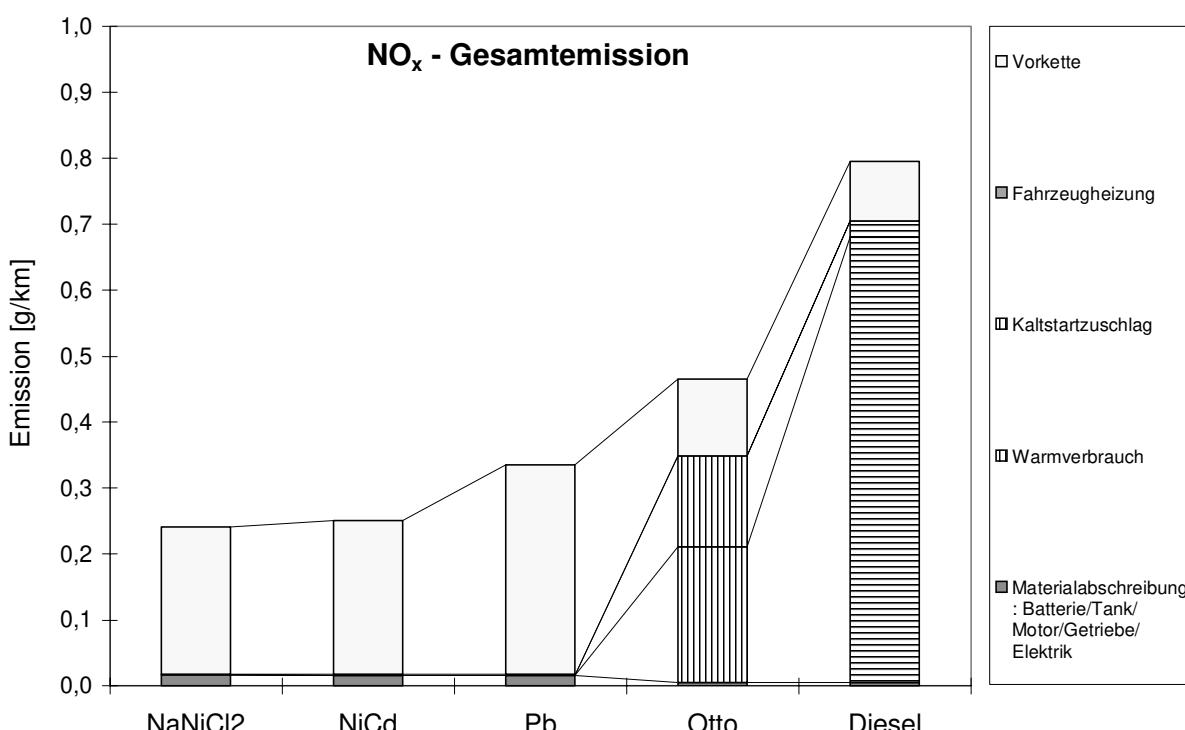


Abb. 13.9 Aufteilung der NO_x-Gesamtemission leichter Pkw mit 15 kWh-Batterie (in Ballungsräumen, schwach besiedeltem und unbesiedeltem Gebiet) nach Lebensweg-Bereichen bei Nutzungsmuster A: 4 Fahrten mit je 5 km Fahrtlänge, ein Standtag, Jahresmittel

13.2.3 Analyse und Vergleich von Pkw

Dem Emissionsvergleich elektrisch und verbrennungsmotorisch angetriebener Kraftfahrzeuge in Abb. 13.10 bis Abb. 13.13 liegen die folgenden Annahmen zugrunde:

	1. Balken	2. Balken	3. Balken	4. Balken	5. Balken
Vergleichsfahrzeuge: Pkw:	leichtes Fahrzeug 15 kWh NaNiCl ₂	leichtes Fahrzeug 15 kWh NiCd	leichtes Fahrzeug 15 kWh Pb	Otto-Pkw g-Kat EURO II	Diesel-Pkw lt. Anlage 23 EURO II
Nutzungsmuster:	Nutzung A	Nutzung B	geringe Pkw-Fahrleistung	hohe Pkw-Fahrleistung	

Sie wurden bei zwei gängigen und zwei extremen Nutzungsmustern untersucht:

	Abb. 13.10	Abb. 13.11	Abb. 13.12	Abb. 13.13
Nutzungsmuster:	Nutzung A	Nutzung B	geringe Pkw-Fahrleistung	hohe Pkw-Fahrleistung

Die Emissionen wurden dem Ort der Freisetzung und ihren Wirkungen entsprechend zu den Kategorien „lokal“ wirksame, „regional“ wirksame und „global“ wirksame Emissionen zusammengefaßt:

Abb. 13.10	Abb. 13.10	Abb. 13.10	
Abb. 13.11	Abb. 13.11	Abb. 13.11	
Abb. 13.12	Abb. 13.12	Abb. 13.12	
Abb. 13.13	Abb. 13.13	Abb. 13.13	
jeweils oben	jeweils Mitte	jeweils unten	
Wirkungskategorie:	lokal wirksame Emissionen	regional wirksame Emissionen	global wirksame Emissionen

Emissionsvergleich von Elektro- und Verbrennungs-Pkw

Nutzung: 4 Fahrten täglich zu je 5 km, ein Standtag pro Woche, Jahresmittel

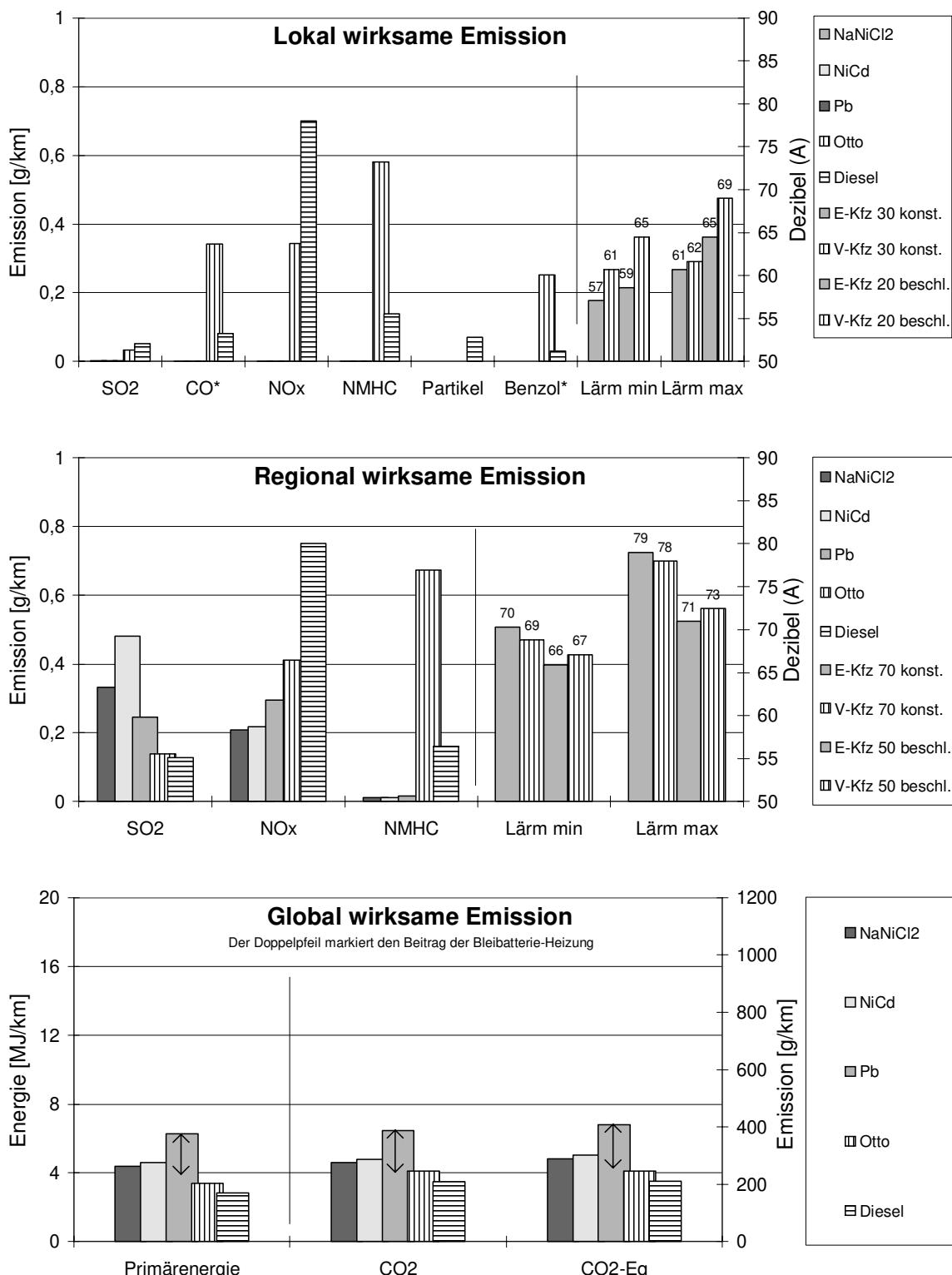


Abb. 13.10

Lokal, regional und global wirksame Emissionen bei Nutzungsmuster A:
„beschl.“ bedeutet beschleunigte Fahrt; „konst.“ bedeutet Konstantfahrt
* Benzol wird mit 10fachem Wert, CO mit 1/10 seines Wertes angezeigt

IFEU
Heidelberg
1996

Emissionsvergleich von Elektro- und Verbrennungs-Pkw

Nutzung: 9 Fahrten täglich zu je 5 km, ein Standtag pro Woche, Jahresmittel

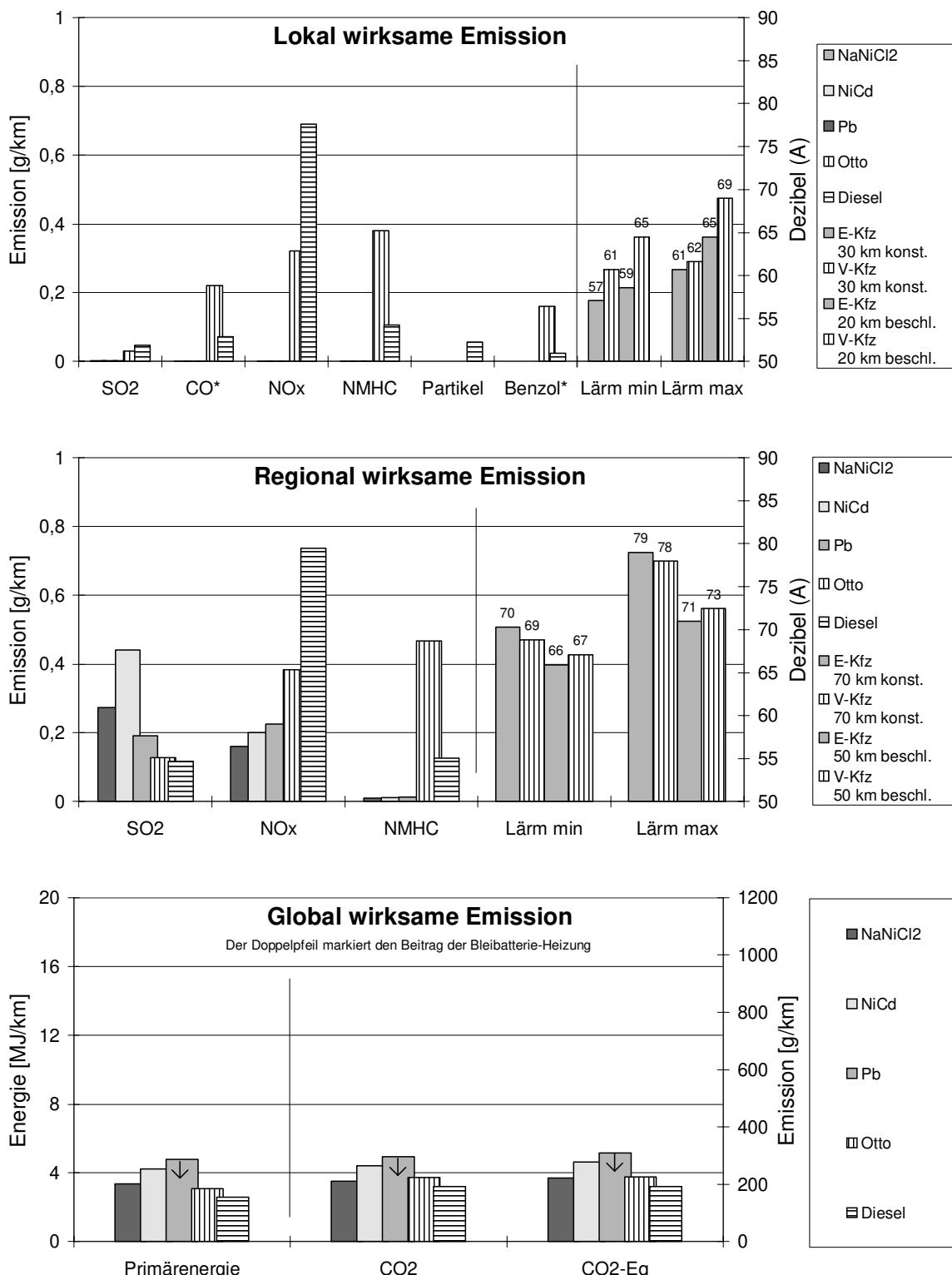


Abb. 13.11

Lokal, regional und global wirksame Emissionen bei Nutzungsmuster B:
„beschl.“ bedeutet beschleunigte Fahrt; „konst.“ bedeutet Konstantfahrt
* Benzol wird mit 10fachem Wert, CO mit 1/10 seines Wertes angezeigt

IFEU
Heidelberg
1996

Emissionsvergleich von Elektro- und Verbrennungs-Pkw

geringe Nutzung: 1 Fahrt täglich zu je 5 km, kein Standtag, Jahresmittel

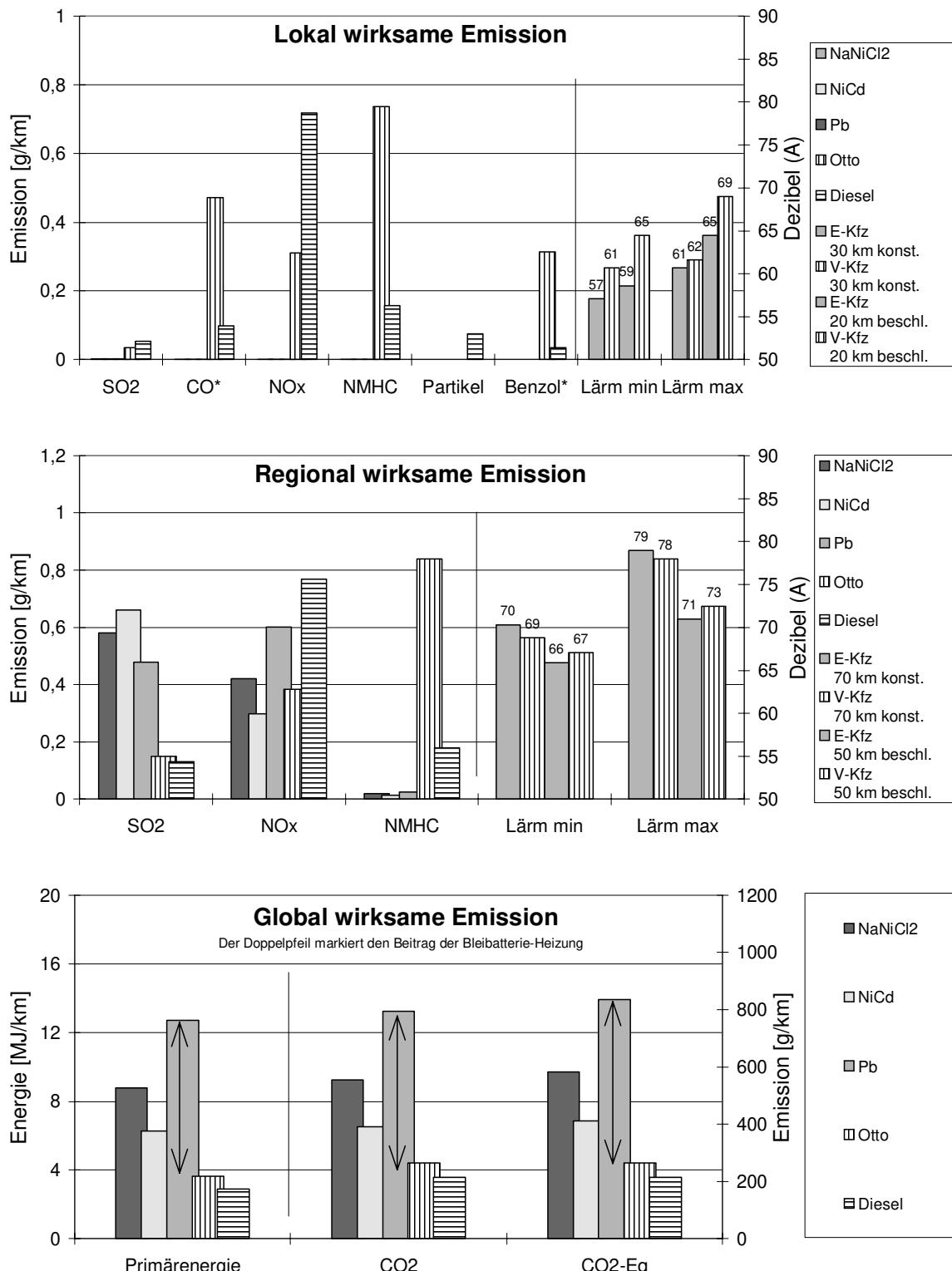


Abb. 13.12 Lokal, regional und global wirksame Emissionen bei geringer Nutzung:
„beschl.“ bedeutet beschleunigte Fahrt; „konst.“ bedeutet Konstantfahrt
* Benzol wird mit 10fachem Wert, CO mit 1/10 seines Wertes angezeigt

IFEU
Heidelberg
1996

Emissionsvergleich von Elektro- und Verbrennungs-Pkw

häufige Nutzung: 4 Fahrten täglich zu je 20 km, kein Standtag, Jahresmittel

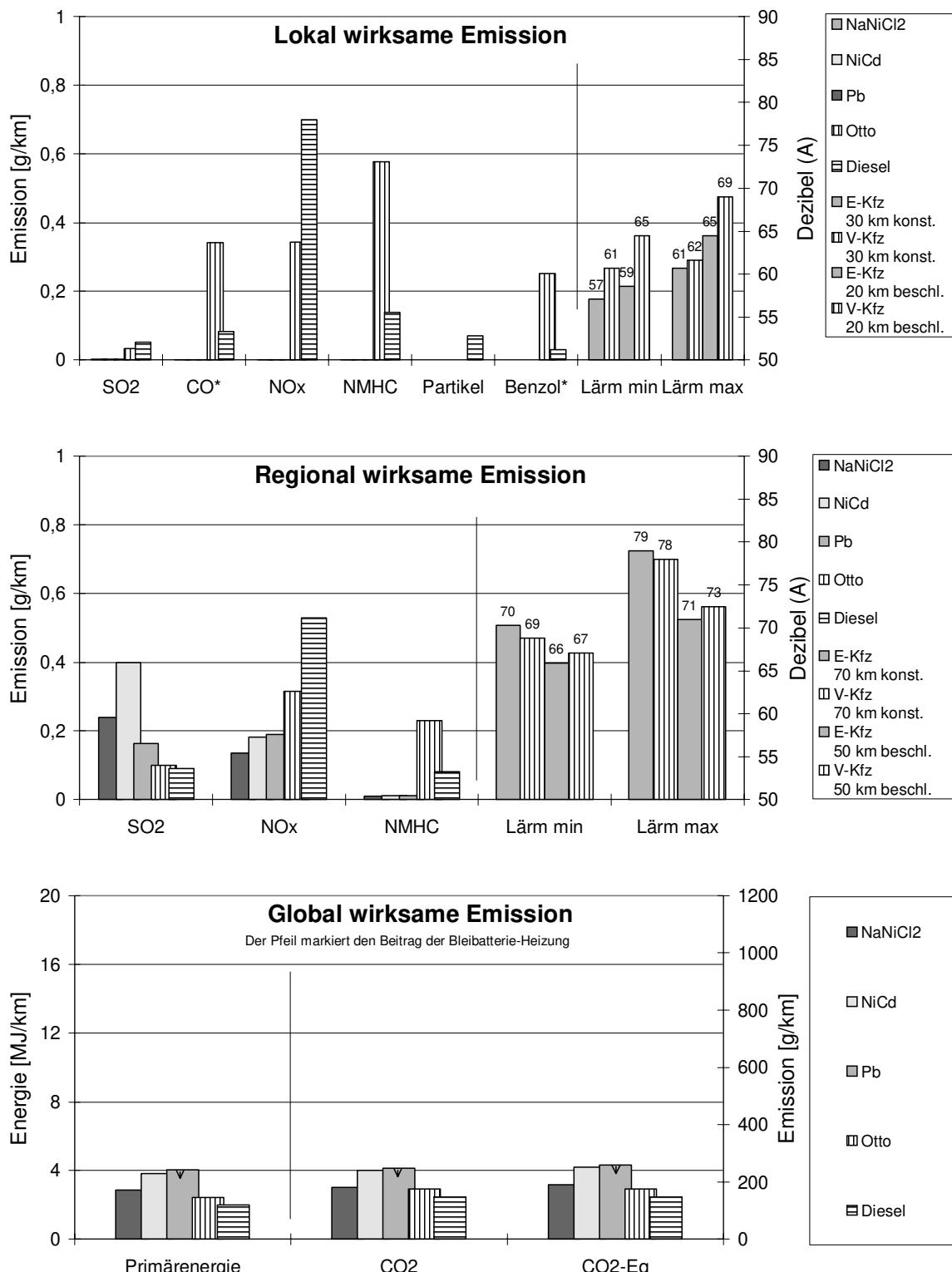


Abb. 13.13

Lokal, regional und global wirksame Emissionen bei häufiger Nutzung:
„beschl.“ bedeutet beschleunigte Fahrt; „konst.“ bedeutet Konstantfahrt

* Benzol wird mit 10fachem Wert, CO mit 1/10 seines Wertes angezeigt

IFEU
Heidelberg
1996

13.2.3.1 Lokale Wirkungen

- Grundsätzlich und unabhängig vom Nutzungsmuster weisen Elektrofahrzeuge am Ort des Einsatzes Nullemission auf, wobei von dem geringen Beitrag der Fahrzeugheizung abgesehen wird.
- Die Rügen-Elektro-Pkw haben gegenüber schwach motorisierten, jedoch typgleichen konventionellen Fahrzeugen eine um 1-7 dB(A) geringere Lärmemission bei 30 km/h Konstantfahrt und eine um 4-6 dB(A) geringere Lärmemission bei beschleunigter Fahrt mit 20 km/h.
- Wegen des Kaltstartzuschlags bei NMHC, CO und NO_x erreicht die spezifische Emission des Verbrennungsfahrzeugs bei etwa 4 Fahrten täglich (Basis: gleichbleibende Tagesfahrleistung) und kalten Außentemperaturen ein Maximum. Bei höherer Fahrtenzahl fällt sie wegen des abnehmen Kaltstartbeitrags allmählich wieder ab (siehe auch Sensitivität Jahreszeit). Dieser Effekt ist beim Ottomotor stärker ausgeprägt als beim Dieselmotor.

13.2.3.2 Regionale Wirkungen

- Die SO₂-Emission der Rügen-Elektro-Pkw ist durch die Beiträge der Stromerzeugung und der Batterieproduktion höher als beim Verbrennungs-Pkw. Der Unterschied nimmt bei geringerer Nutzung zu.
- Die Rügen-Elektrofahrzeuge haben leichte Vorteile bei NO_x, die jedoch stark vom Nutzungsmuster abhängig sind.
- Die NMHC-Emissionen der Rügen-Elektrofahrzeuge sind bei allen Nutzungsmustern deutlich niedriger als bei Otto- bzw. Diesel-Pkw.
- Bei der SO₂- und NO_x-Emission ist die Reihenfolge der Elektrofahrzeuge mit unterschiedlichen Batteriesystemen vom Nutzungsmuster abhängig. Eine geringere Nutzung begünstigt Pb und NiCd, intensive Nutzung dagegen begünstigt NaNiCl₂.
- In der Lärmemission bei den Fahrsituationen 70 km/h Konstantfahrt und beschleunigte Fahrt mit 50 km/h weisen weder die Rügen-Elektro-Pkw noch die typgleichen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor deutliche Vorteile auf.

13.2.3.3 Globale Wirkungen

- Der Primärenergieverbrauch des Rügen-Elektro-Pkws ist deutlich höher als bei konventionellen Pkws. Der Unterschied ist stark vom Nutzungsmuster beeinflusst und reicht vom 1,2 fachen bei hoher Fahrleistung bis zum dreifachen bei geringer Fahrlistung.
- Parallel zum Primärenergieverbrauch ist auch die CO₂-Emission des Elektrofahrzeugs höher als beim Verbrennungs-Kfz. Der Unterschiedsbetrag ist jedoch um etwa 20 % geringer als beim Primärenergieverbrauch, bedingt durch den CO₂-freien Anteil der Stromerzeugung.
- Die CO₂-Äquivalente liegen beim Elektrofahrzeug höher als die CO₂-Emission. Dies ist vor allem eine Folge der CH₄-Emissionen bei der Förderung (Grubenbewetterung) der für die Stromerzeugung eingesetzten Kohle sowie der Leckagen bei Erdgasförderung und Transport.

13.2.4 Analyse und Vergleich von leichten Nutzfahrzeugen

Das Vergleichs-Procedere für leichte Nutzfahrzeuge in Abb 13.14 bis Abb. 13.17 entspricht weitgehend der Darstellung bei den Pkw. Es wurden folgende leichte Nutzfahrzeuge zu grunde gelegt:

	1. Balken	2. Balken	3. Balken	4. Balken	5. Balken
Vergleichsfahrzeuge: leichte Nfz:	T4 25 kWh NiCd	MB 100 25 kWh NiCd	MB 100 35 kWh NaNiCl ₂	Otto-Transporter EURO II	Diesel-Transporter EURO II

Leichte Nutzfahrzeuge wurden wie die Pkw bei insgesamt vier verschiedenen Nutzungsmustern untersucht, die nur für geringe und hohe Fahrleistungen geringfügig von der Definition bei den Pkw (siehe Tab. 13.27) abweichen.

	Abb. 13.14	Abb. 13.15	Abb. 13.16	Abb. 13.17
Nutzungsmuster:	Nutzung A	Nutzung B	geringe Nfz-Fahrleistung	hohe Nfz-Fahrleistung

Die Emissionen wurden dem Ort der Freisetzung und ihren Wirkungen entsprechend zu den Kategorien „lokal“ wirksame, „regional“ wirksame und „global“ wirksame Emissionen zusammengefaßt:

Abb. 13.14 Abb. 13.15 Abb. 13.16 Abb. 13.17 jeweils oben	Abb. 13.14 Abb. 13.15 Abb. 13.16 Abb. 13.17 jeweils Mitte	Abb. 13.14 Abb. 13.15 Abb. 13.16 Abb. 13.17 jeweils unten
Wirkungskategorie: lokal wirksame Emissionen	regional wirksame Emissionen	global wirksame Emissionen

Emissionsvergleich von Elektro- und Verbrennungs-Nfz

Nutzung: 4 Fahrten täglich zu je 5 km, ein Standtag pro Woche, Jahresmittel

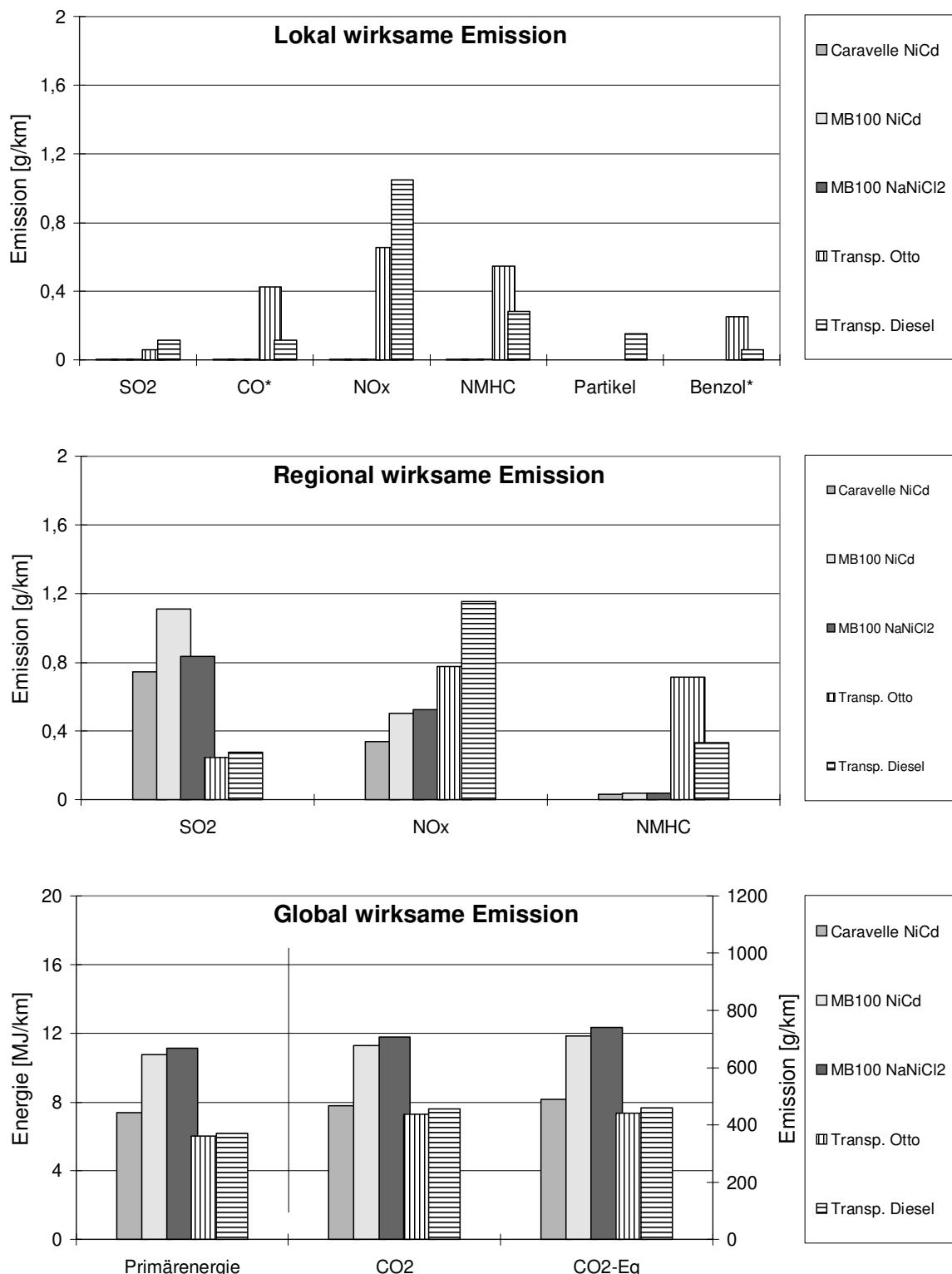


Abb. 13.14

Lokal, regional und global wirksame Emissionen bei Nutzungsmuster A:

* Benzol wird mit 10fachem Wert, CO mit 1/10 seines Wertes angezeigt

IFEU
Heidelberg
1996

Emissionsvergleich von Elektro- und Verbrennungs-Nfz

Nutzung: 9 Fahrten täglich zu je 5 km, ein Standtag pro Woche, Jahresmittel

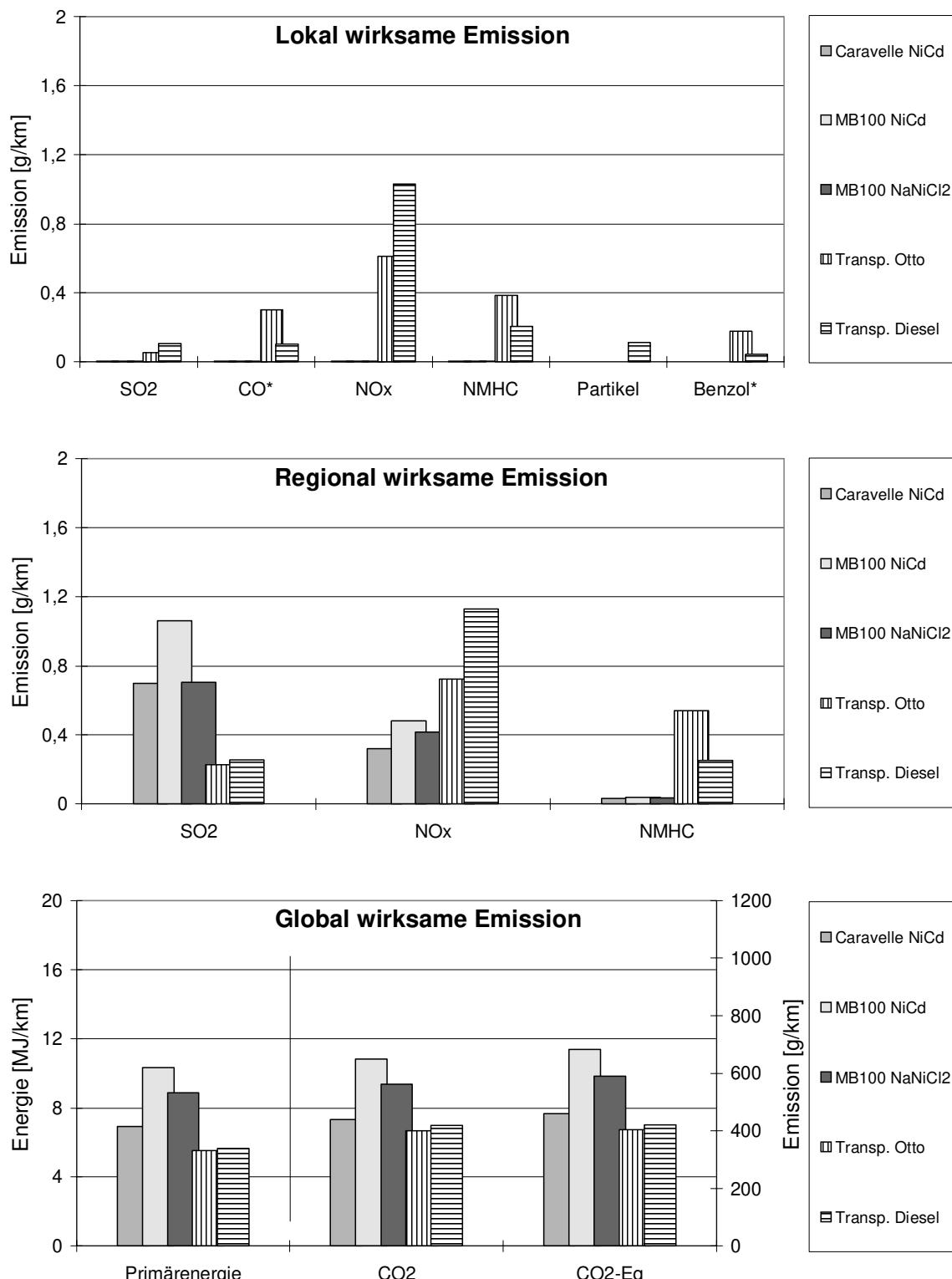


Abb. 13.15

Lokal, regional und global wirksame Emissionen bei Nutzungsmuster B:

* Benzol wird mit 10fachem Wert, CO mit 1/10 seines Wertes angezeigt

IFEU
Heidelberg
1996

Emissionsvergleich von Elektro- und Verbrennungs-Nfz

geringe Nutzung: 1 Fahrten täglich zu je 10 km, kein Standtag, Jahresmittel

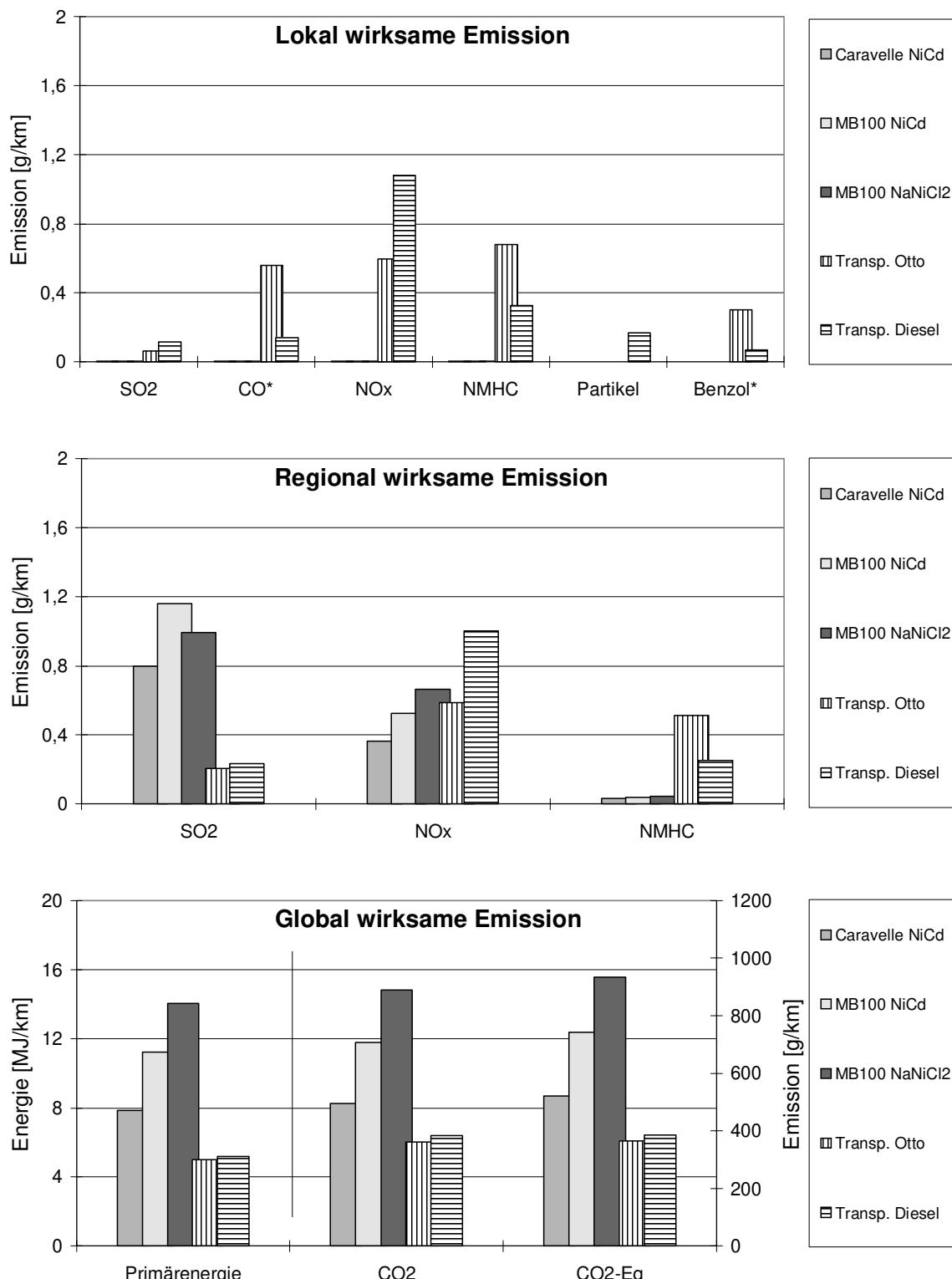


Abb. 13.16

Lokal, regional und global wirksame Emissionen bei geringer Nutzung:
 * Benzol wird mit 10fachem Wert, CO mit 1/10 seines Wertes angezeigt

IFEU
Heidelberg
1996

Emissionsvergleich von Elektro- und Verbrennungs-Nfz
häufige Nutzung: 8 Fahrten täglich zu je 10 km, kein Standtag, Jahresmittel

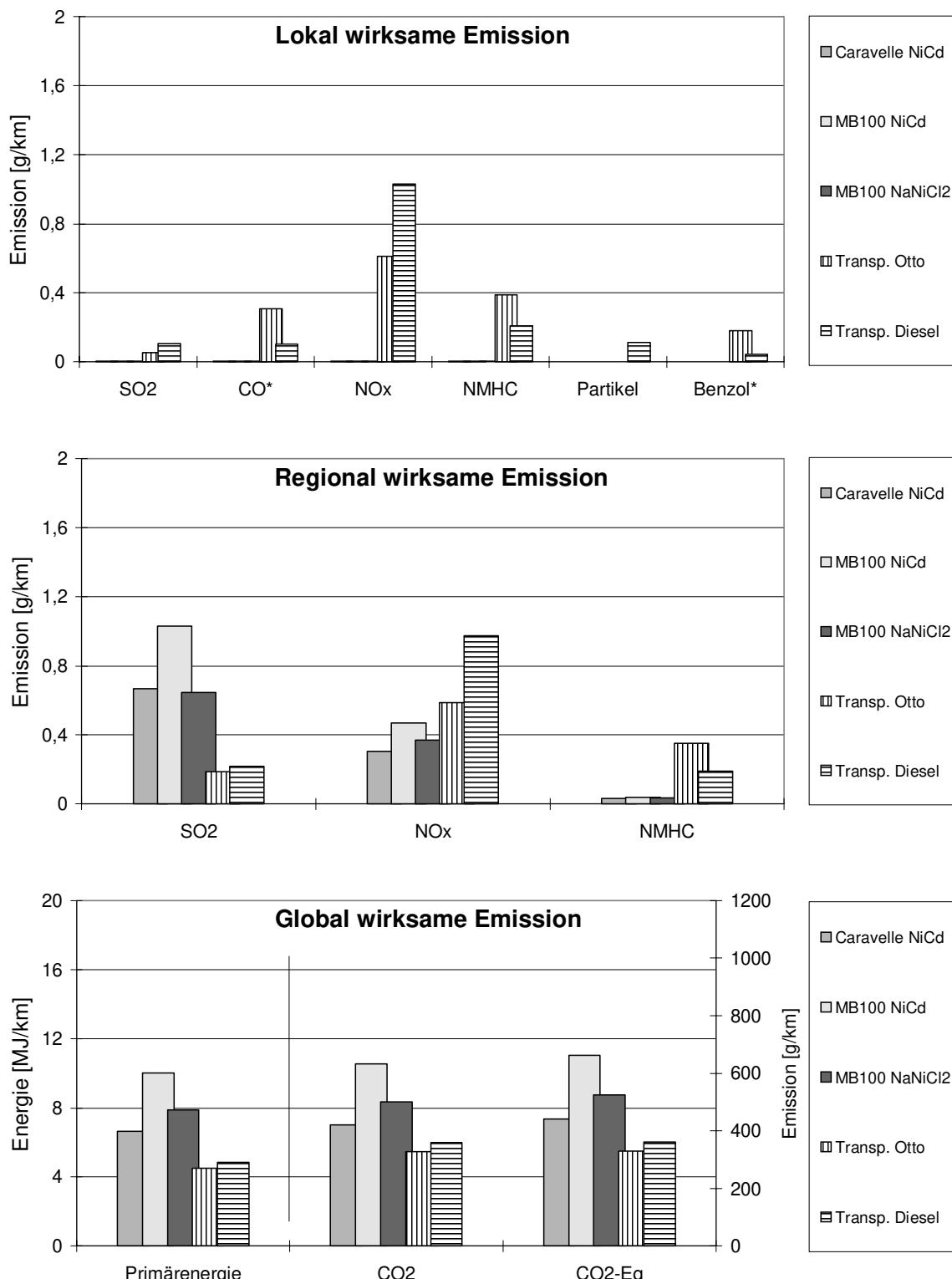


Abb. 13.17	Lokal, regional und global wirksame Emissionen bei häufiger Nutzung: * Benzol wird mit 10fachem Wert, CO mit 1/10 seines Wertes angezeigt	IFEU Heidelberg 1996
------------	--	----------------------------

13.2.4.1 Lokale Wirkungen

- Auch die Rügen-Elektrotransporter weisen unabhängig vom Nutzungsmuster am Ort ihres Einsatzes Nullemission auf. Dies gilt auch hier nur unter Vernachlässigung des geringen, gegenüber dem Pkw etwas erhöhten Beitrag der Fahrzeugheizung.
- Messungen der Lärmemission wurden bei leichten Nutzfahrzeugen nicht vorgenommen.
- Die Kaltstartemissionen von NMHC, CO und NO_x der konventionellen Nutzfahrzeuge verhalten sich ähnlich wie bei den Pkw. Sie steigen bis zu einer Zahl von vier Fahrten bei täglich, bei gleichbleibender Tagesfahrleistung, an und sinken dann allmählich wieder ab. Sie sind im allgemeinen höher bei kalten Außentemperaturen.

13.2.4.2 Regionale Wirkungen

- Die SO₂-Emission der Elektro-Transporter ist gegenüber den leichten Nutzfahrzeugen mit Verbrennungsmotor erhöht.
- Die Rügen-Elektrotransporter haben gegenüber den Transporten mit Verbrennungsmotor leichte Vorteile bei NO_x, sehr deutliche Vorteile bei den NMHC-Emissionen. Beide Vorteile hängen im Ausmaß stark vom Nutzungsmuster ab.
- Die Reihenfolge der Rügen-Elektrotransporter mit unterschiedlichen Batteriesystemen ist wie bei den Pkw abhängig vom Nutzungsmuster. Eine geringere Nutzung begünstigt NiCd, intensive Nutzung dagegen begünstigt NaNiCl₂.

13.2.4.3 Globale Wirkungen

- Der Primärenergieverbrauch der Rügen-Elektrotransporter ist deutlich höher als bei konventionellen Transportern. Der Unterschied ist stark vom Nutzungsmuster beeinflusst und reicht vom eineinhalbachen bei hoher Fahrleistung bis zum dreifachen bei geringer Fahrleistung mit NaNiCl₂-Batterie.
- Parallel zum Primärenergieverbrauch ist auch die CO₂-Emission der Elektrotransporter höher als bei Transportern mit Otto- bzw. Dieselmotor. Der Unterschiedsbetrag ist entsprechend des Anteils CO₂-freier Stromerzeugung geringer, während die CO₂-Äquivalente gegenüber der CO₂-Emission als Folge der CH₄-Emissionen beim Abbau der Primärenergieträger für die Stromerzeugung noch einmal um etwa 5% erhöht sind.

13.3 Ergebnisteil II - Sensitivitätsanalyse

In diesem Abschnitt werden einzelne, in ihrer Auswirkung auf das Ergebnis des Vergleichs bisher nicht untersuchte Parameter behandelt. Dadurch soll es möglich werden, Plausibilität und Bedeutung bestimmter Annahmen in der vorangegangenen Darstellung zu überprüfen. Einerseits handelt es sich um Variable der Systeme oder des Nutzungsmusters, die bisher konstant gehalten wurden (Fahrzeuge, Fahrtenzahl, Standtage, Ladeverhalten) oder die durch die Wahl anderer Parameter mitbestimmt werden (IO/AO-Fahrtanteile). Andererseits wird der Einfluß bestimmter technischer Kenngrößen (Zyklenzahl der Batterie) anhand der resultierenden Werte des Primärenergieverbrauchs wiedergegeben.

13.3.1 Fahrzeuggewicht, Batterie-Nennenergie

Die Pkw auf Rügen konnten hinsichtlich ihres Gewichts und des Ausrüstungsstands ihrer Nebenaggregate zwei unterschiedlichen Klassen zugeordnet werden. Die Nennenergieinhalte der Pkw-Batterien führten zu einer Unterscheidung von kleinen Batterien mit 15 kWh und großen Batterien mit 25 kWh Nennenergie (Pb-Gel Batterien waren auf Rügen nur in der 15 kWh-Nennenergieklasse vertreten). Daraus ergeben sich für jeden Batterietyp vier mögliche Kombinationen von Fahrzeugen und Batterien. Es sind im Rahmen des Modells jedoch nicht alle Kombinationen möglich, da ein Fahrzeug mit 25 kWh-NiCd oder Bleibatterie aufgrund des Batteriegewichts zwangsläufig der schweren Klasse angehört. Der Primärenergieverbrauch für die mit den Versuchsfahrzeugen tatsächlich realisierten Fahrzeug/Batterie-Kombinationen ist in Abb. 13.18 gegenübergestellt.

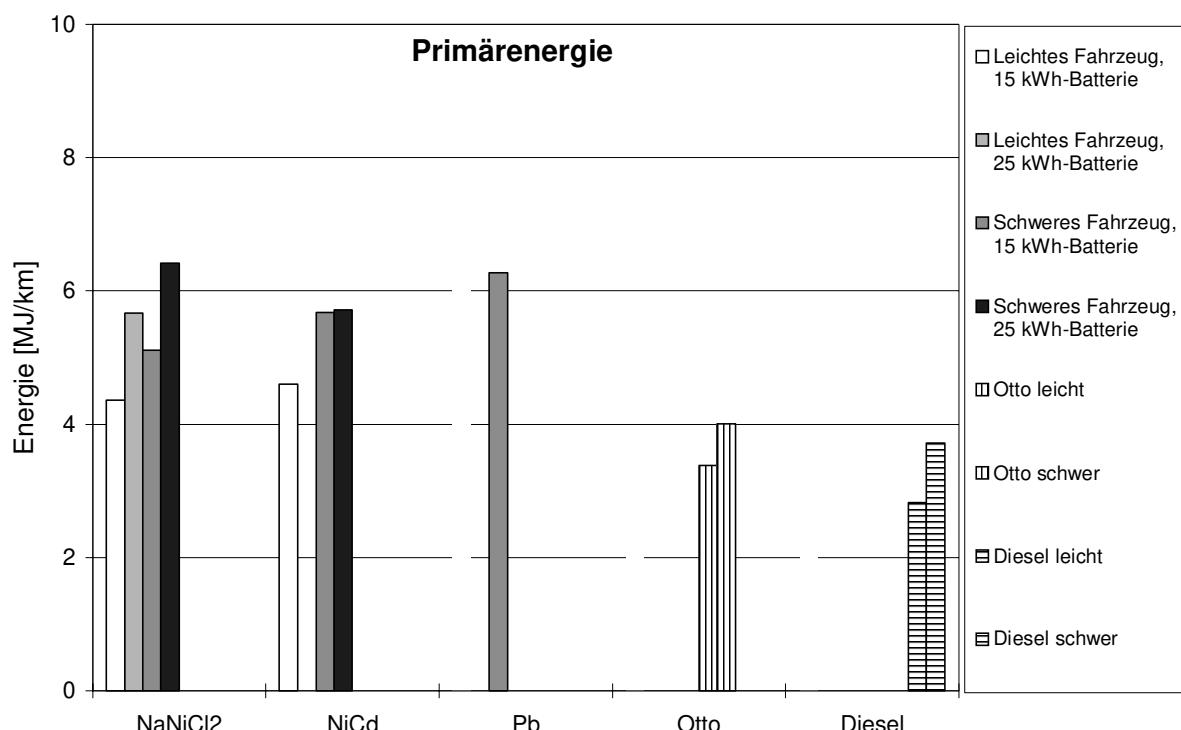


Abb. 13.18 Primärenergieverbrauch für leichte bzw. schwere Pkw mit kleiner bzw. großer Batterie beim Nutzungsmuster A

Der um etwa 15% höhere Primärenergiebedarf schwerer Fahrzeuge - hier bei der Nutzung A - ist im allgemeinen eine Folge des höheren Antriebsenergiebedarfes und des steigenden Nebenverbraucheranteils durch Hilfsaggregate. Der Mehraufwand bei der Produktion der Fahrzeuge ist dafür nicht ausschlaggebend (siehe Abb. 13.23). Bei den Batterien ist die Situation für die jeweiligen Systeme grundlegend verschieden. Der Schritt zur größeren Batterie kann durch die Änderung im Innenwiderstand zu einem geringeren spezifischen Verlust führen, während bei größeren Batterien mehr Energie durch Selbstentladung verloren wird (im Fall von NiCd in Abb. 13.18 heben sich diese Wirkungen praktisch auf).

Im Vergleich hierzu ist der höhere Heizenergiebedarf der größeren NaNiCl₂-Batterie ein wesentlich stärkerer Effekt und bewirkt - mit Bezug auf die Nutzung A - den Anstieg des Primärenergiebedarfes um ca. 20%. Bei den Vergleichsfahrzeugen wurde der Zyklusverbrauch der nächsthöheren Hubraumklasse herangezogen. Der Einfluß veränderten Kraftstoffverbrauchs bei konventionellen Fahrzeugen kann leicht abgeschätzt werden: Ein Mehr- bzw. Minderverbrauch von Otto- oder Dieselmotor erhöht bzw. erniedrigt den Balken für das Verbrennungsfahrzeug im Verhältnis der relativen Verbrauchsänderung.

13.3.2 Wegabhängiger Verbrauch (Bezug: Primärenergie)

Der spezifische Energiebedarf des Elektrofahrzeugs ist, wie es Abb. 13.19 und Abb. 13.20 unterstreichen, in hohem Maße abhängig von der Fahrtstrecke, die im Rahmen der Nutzungsmuster durch Fahrtenzahl und Fahrlänge modelliert wird. Bei geringer Fahrtstrecke verursachen die wegunabhängigen Batterieeigenverbräuche den Hauptanteil am Energieverbrauch. Hierin unterscheiden sich die Systeme deutlich. Abb. 13.19 enthält durch den Bezug zur Primärenergie - anders als Abb. 13.20 - die Beiträge der Fahrzeugheizung, Produktion und Energieumwandlung.

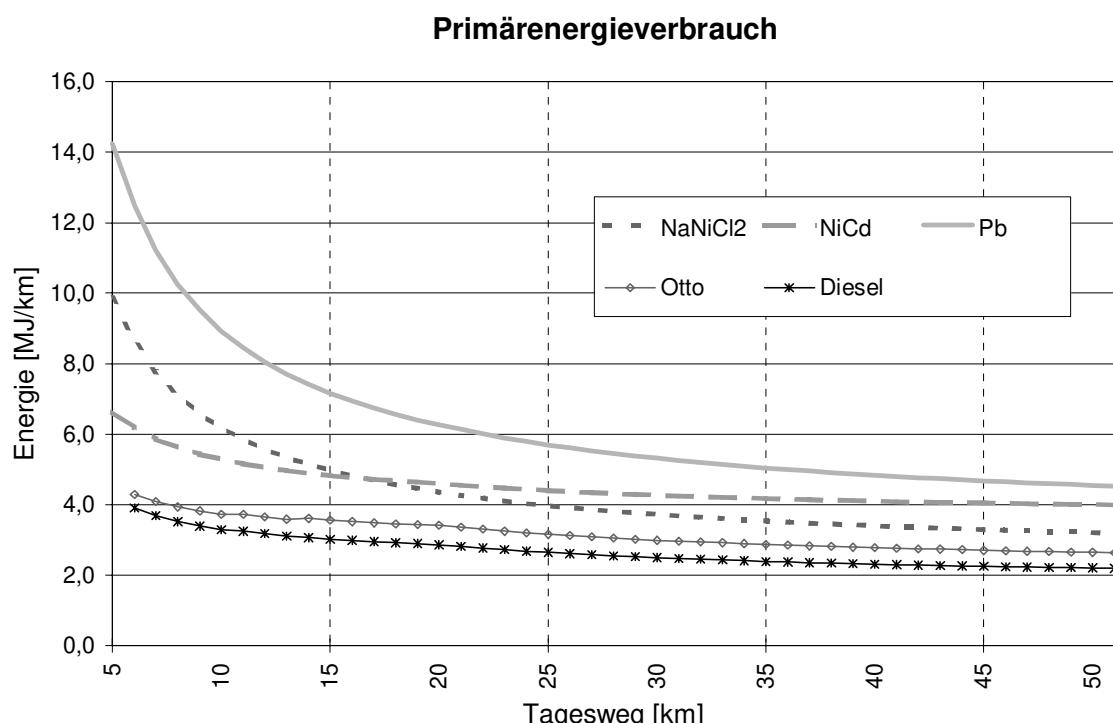


Abb. 13.19 Primärenergieverbrauch über den gesamten Lebensweg in Abhängigkeit von der Fahrtstrecke für leichte Pkw mit 15 kWh-NaNiCl₂-, NiCd- und Pb-Batterie, bei 4 Fahrten täglich, 1 Standtag pro Woche, jahresmittleren Temperaturen und ökonomischem Ladeverhalten.

13.3.3 Wegabhängiger Verbrauch (Bezug: Endenergie)

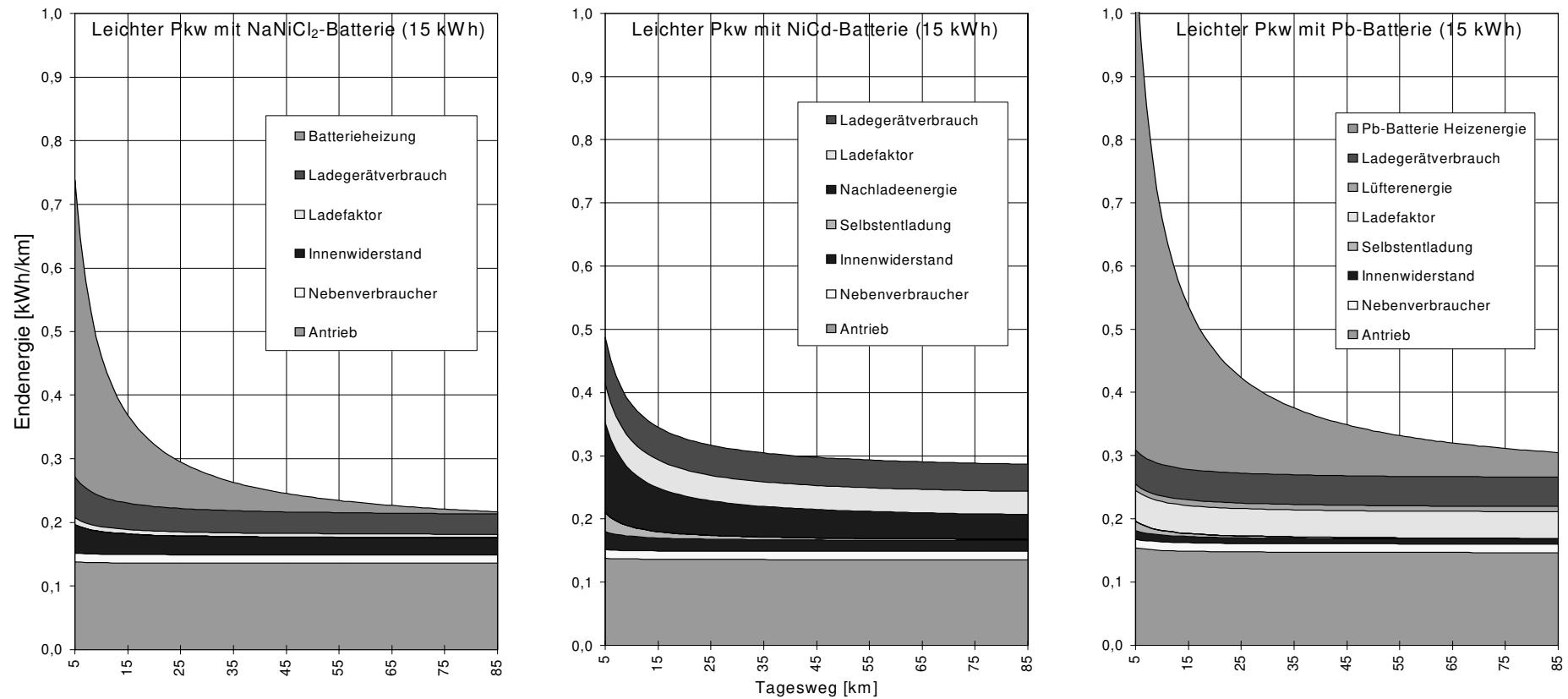


Abb. 13.20 Spezifische Verbräuche des leichten Pkw in Abhängigkeit von der Nutzungsintensität ohne Standtage im Jahresmittel bei Ausrüstung mit 15 kWh elektrischem Speicher der Systeme NaNiCl_2 , NiCd (ökonomisches Ladeverhalten), Blei. (Die Daten zur Berechnung der Kurven sind die - hier als Klassenwerte bezeichneten - mittleren Werte für eine Gruppe vergleichbarer Fahrzeuge. Unterhalb von 5 Kilometer Tagesfahrleistung wurden keine Berechnungen durchgeführt).

13.3.4 Fahrtenzahl

Mit der Fahrtenzahl als Parameter werden eine Reihe von abhängigen Größen festlegt. Zum einen ergibt sich aus der unterschiedlichen Zahl von Fahrten bei gleicher Tagesfahrleistung eine unterschiedliche Fahrtlänge und dementsprechend ein anderer Innerortsanteil. Innerorts- und Außerorts-Antriebsenergien bzw. Kraftstoffverbräuche sind für Elektrofahrzeuge (außer bei den Elektrotransportern) und Verbrennungskraftfahrzeuge verschieden.

Beim Verbrennungsfahrzeug findet aufgrund des erhöhten Kaltstartanteils und - in geringem Maße - auch der Warmabstellemissionen zunächst ein stärkerer Anstieg des spezifischen Kraftstoffverbrauchs statt. Bei weiterem Anstieg der Fahrtenzahl sinkt der Kaltstarteinfluß wieder ab, da sich der Motor in den kürzeren Standzeiten bis zum Beginn der nächsten Fahrt nicht mehr auf Umgebungstemperatur abkühlt.

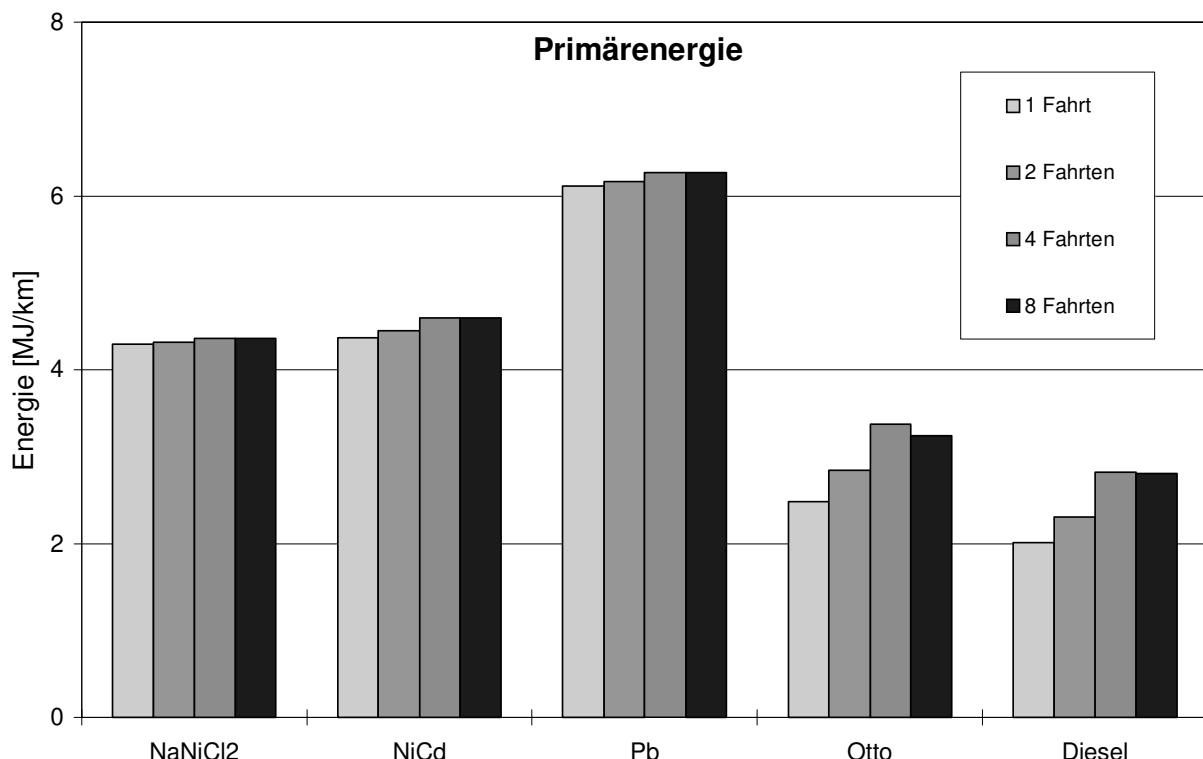


Abb. 13.21 Primärenergieverbrauch in Abhängigkeit von der Zahl der Fahrten bei einem leichten Pkw mit 15 kWh-Batterie, einer Tagesfahrleistung von 20 km (1x20 km, 2x10km, 4x5km, 8x2,5km), einem Standtag pro Woche, jahresmittlerer Temperatur und ökonomischem NiCd-Ladeverhalten.

13.3.5 Jahreszeit - Primärenergie

Der Anstieg des Primärenergieverbrauches in der kalten Jahreszeit ist beim Elektrofahrzeug durch die Kraftstoffzusatzheizung, beim Verbrennungsfahrzeug durch den größeren Kaltstarteinfluß bei niedrigen Außentemperaturen und in geringem Umfang durch die Tankatmung bedingt. Der deutlich erhöhte Energiebedarf für das Fahrzeug mit Pb-Batterie muß für die Temperierung der Batterie in der kalten Jahreszeit aufgewendet werden. Dieser Wert kann durch eine gegenüber den Rügen-Fahrzeugen veränderten Bauform der Heizung wahrscheinlich sehr wesentlich verringert werden.

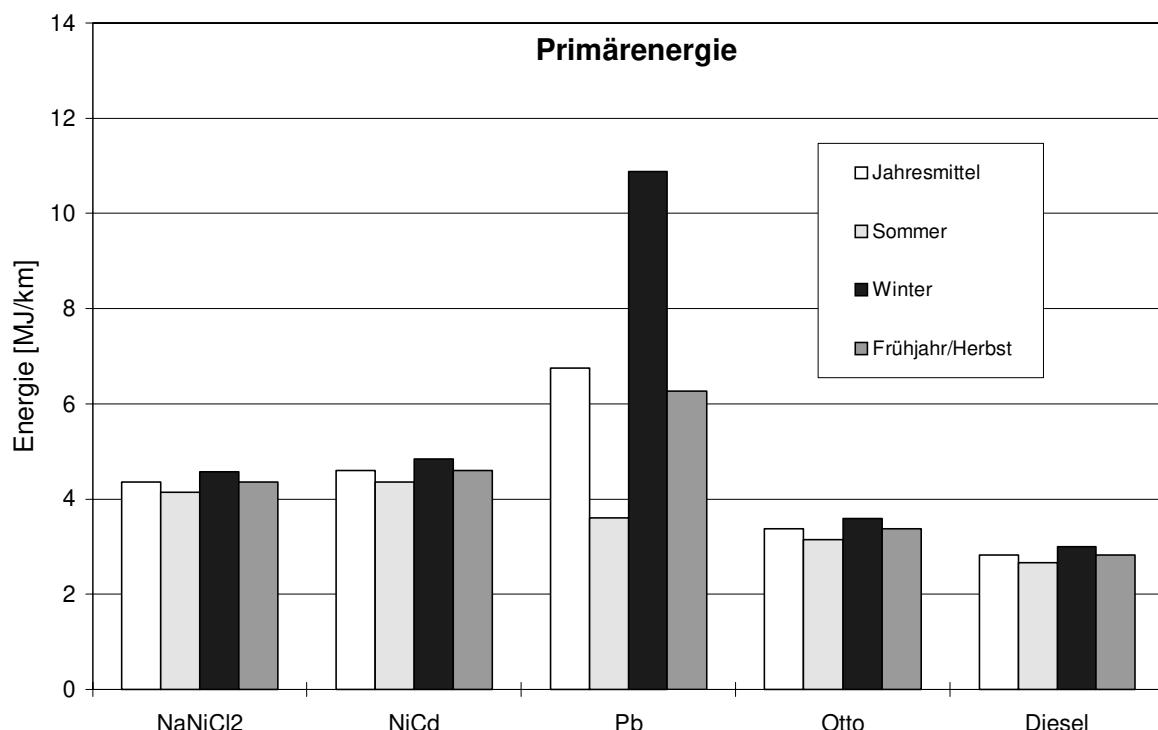


Abb. 13.22 Einfluß der jahreszeitlichen Temperatur auf den Primärenergieverbrauch des leichten Pkw beim Nutzungsmuster A

13.3.6 Material und Produktion/Batterielebensdauer

Der Primärenergiebedarf setzt sich für den leichten Elektro-Pkw zu 5-15% aus dem Bereich Material und Produktion zusammen (siehe in Abb. 13.23). Für das Verbrennungskraftfahrzeug ist der Anteil noch deutlich geringer. Es ist jedoch zu beachten, daß hier nur die Fahrzeugkomponenten bilanziert wurden, in denen beide Fahrzeugsysteme differieren, so daß es sich nicht um eine absolute Angabe des Produktionsanteils handeln kann. Beim Elektrofahrzeug liegt der Primärenergieaufwand zu etwa 90% beim Betrieb der Fahrzeuge, beim Verbrennungskraftfahrzeug liegt der Anteil noch höher. Auf die Kraftstoffzusatzheizung der Elektrofahrzeuge fällt nur ein geringer Anteil.

Der Einfluß der Batterielebensdauer, ausgedrückt durch die Vollzyklen eines Batterielebens, wirkt sich, dem Anteil der Batterie am gesamten Primärenergiebedarf entsprechend am deutlichsten für das Fahrzeug mit NiCd-Batterie und mit Blei-Batterie aus.

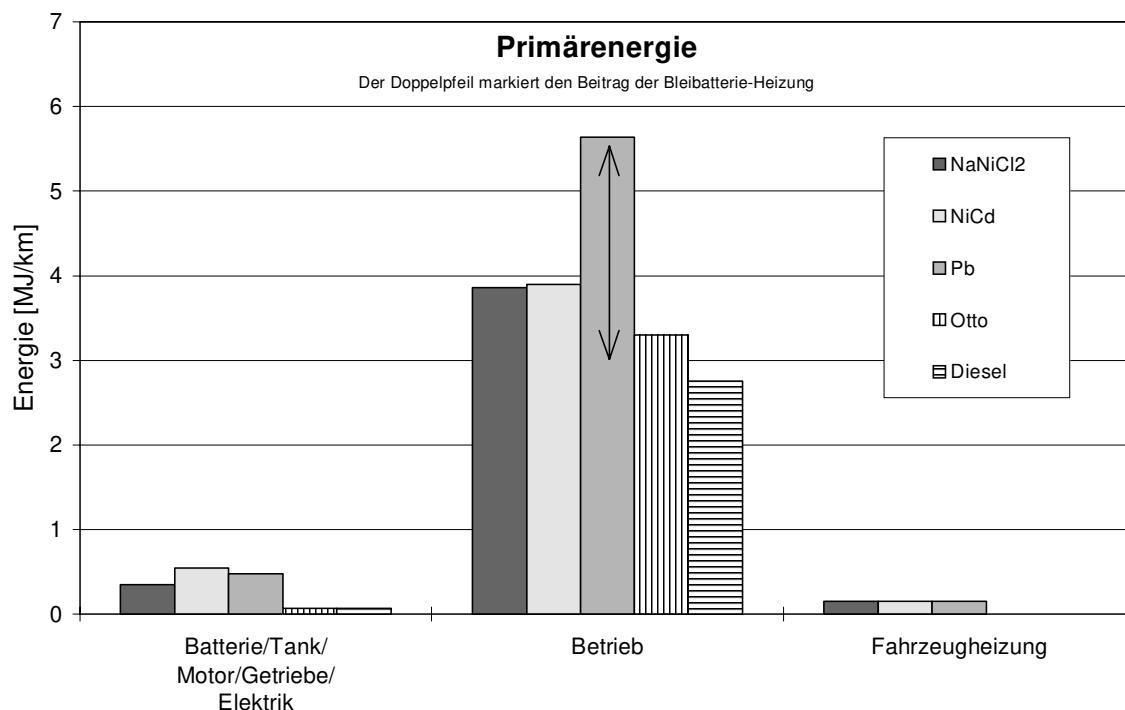


Abb. 13.23 Beiträge zum Primärenergieverbrauch aus den Bereichen Material, Betrieb und Fahrzeugheizung für einen leichten Pkw mit 15 kWh-Batterie beim Nutzungsmuster A.

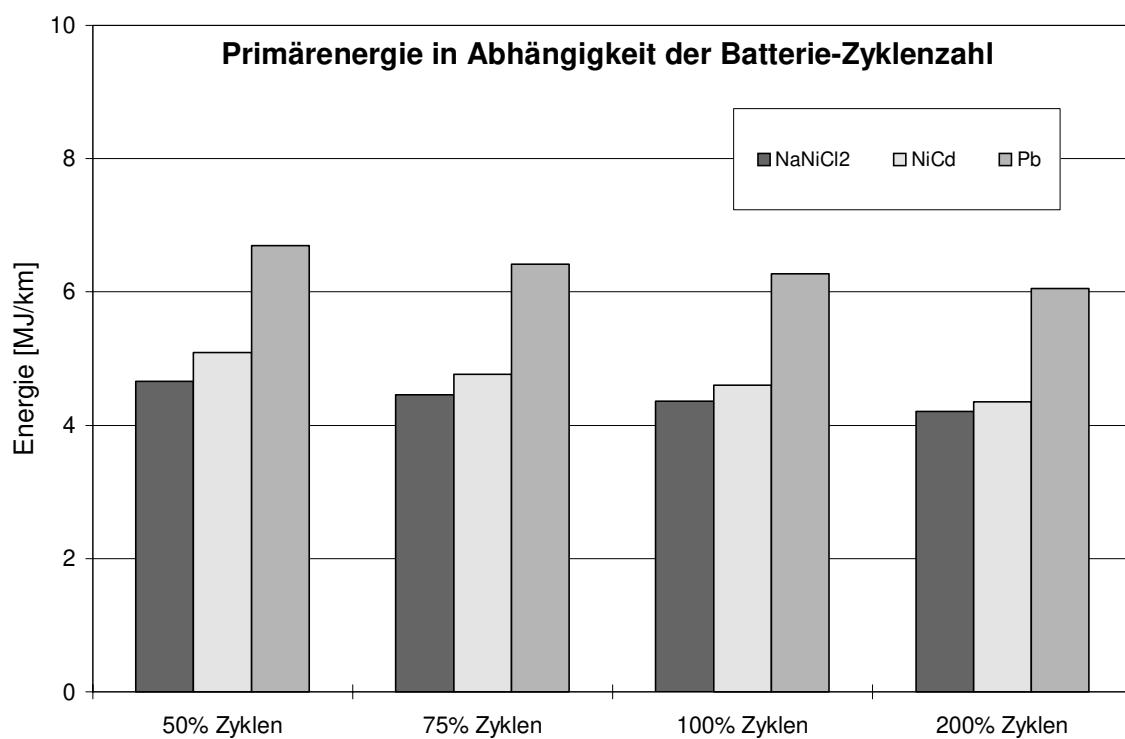


Abb. 13.24 Einfluß der Batterielebensdauer auf den Energiebedarf des leichten Pkw mit 15 kWh-Batterie beim Nutzungsmuster A. Die Angabe der Prozentwerte bezieht sich auf die Herstellerangabe für die Zyklenlebensdauer (100% Zyklen entspricht 1000 Vollzyklen für Na-NiCl₂, 1750 für NiCd, 700 für Pb).

13.3.7 Stromerzeugung

Die Emissionen der Elektro-Pkw sind stark von den zur Stromerzeugung eingesetzten Primärenergieträgern abhängig. Sehr entscheidend ist also der Anteil fossiler, nuklearer oder regenerativer Energiequellen an der gesamten Stromversorgung des Bezugsraumes. Besonders die Emission von Luftschatdstoffen wird aber in erheblichem Ausmaß von der jeweiligen Kraftwerkstechnologie und den Maßnahmen zur Abgasreinigung mitbestimmt. In der Europäischen Union gibt es derzeit keine einheitlichen Grenzwerte für Kraftwerksemisionen. Schließlich können unterschiedliche Qualitäten der Rohenergieträger, etwa im Schwefel- oder Kohlenstoffgehalt, zu unterschiedlichen Emissionen beitragen. Alle Faktoren gemeinsam haben zur Folge, daß die spezifischen Emissionen der Stromerzeugung im nationalen Maßstab erheblich schwanken. Diese Situation wird auch durch Strom-Im- und Exporte im europäischen Verbundnetz nur geringfügig abgeschwächt.

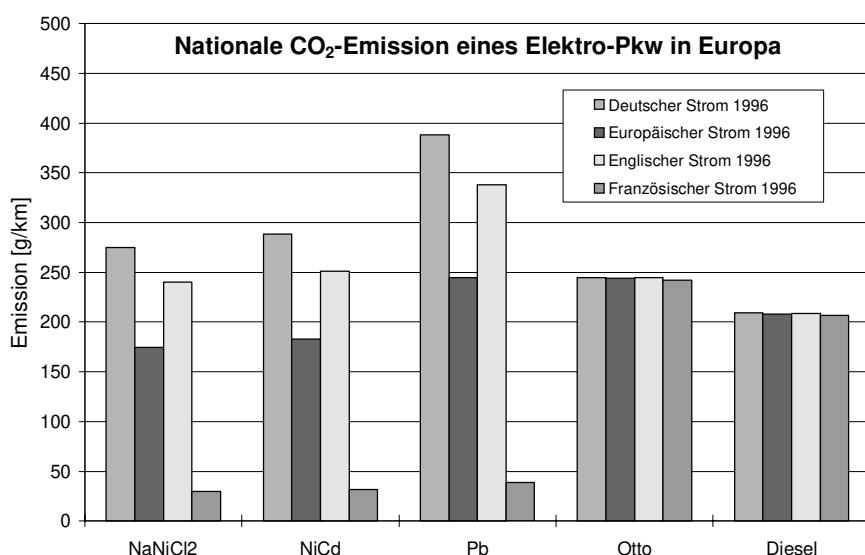


Abb. 13.25 Einfluß der Stromerzeugung auf die CO₂-Emission des leichten Pkws und 15 kWh Energiespeicher bei Nutzung A, jahresmittlerer Temperatur. Betrachtet werden die Zusammensetzung und der technologische Stand des Kraftwerksparks in Deutschland, Europa, England und Frankreich 1996. Der geringe Einfluß auf die Otto- und Dieselwerte ergibt sich aus dem Stromeinsatz bei Produktion und Rohstoffgewinnung.

Der hier unternommene Vergleich der Antriebssysteme ist somit in hohem Maße von den spezifischen Emissionen des für Elektro-Pkw eingesetzten Stroms abhängig. In Abb. 13.25 wird anhand der CO₂-Emission pro Fahrzeugkilometer die Stromproduktion Deutschlands, Frankreichs, Englands und der europäische Mittelwert im Bezugsjahr 1996 gegenübergestellt. Die deutsche Stromproduktion weist bei einem hohen fossilen Primärenergieanteils die höchste spezifische CO₂-Emission auf. Das sehr fortschrittliche technologische Niveau der Abgasreinigung ist hierauf ohne Einfluß. Bei Betrachtung einzelner Schadstoffe (Deutschland: 0,58g NO_x/kWh; 0,46g SO₂/kWh) wird jedoch erkennbar, daß die deutsche Stromerzeugung trotz ihres hohen fossilen Energieeinsatzes im europäischen Vergleich (Europa: 0,93g NO_x/kWh; 1,99g SO₂/kWh) sehr geringe spezifische Schadstoffemissionen aufweist. Bei der englischen Stromerzeugung, hier mit der zweithöchsten CO₂-Emission nach Deutschland, dominieren zwar mit Steinkohle und Erdgas auch fossile Energieträger /UNIPEDE 94/, die jedoch im Vergleich mit der deutschen Braunkohle günstigere CO₂-Emission aufweisen. Die spezifische CO₂-Emission eines mit französischem Strom betriebenen Elektro-Kfz ist aufgrund des etwa 80%igen Kernenergieanteils auf sehr niedrigem Niveau. Die europäische Stromerzeugung basiert neben einem nuklearen Anteil von etwa 37% zusätzlich auf etwa 18% regenerativen Primärenergiequellen /UNIPEDE 94/, so daß mehr als die Hälfte des europäischen Stroms „CO₂-frei“ erzeugt werden.

13.3.8 Ausblick zum Jahr 2000

Eine vergleichende Untersuchung der Umweltauswirkungen von Elektrofahrzeugen und Verbrennungskraft-angetriebenen Fahrzeugen ist eine Momentaufnahme der aktuellen Verhältnisse bei der Energiebereitstellung und der Technik des Automobils. Für die Elektrotraktion sind insbesondere Änderungen im Bereich der Kraftwerke bedeutsam, da sie die Umweltbilanz viel wirksamer verändern, als etwa die Raffinerien bei Verbrennungskraftfahrzeugen. Andrerseits wurde schon betont, daß auch der Rügen-Praxistest nur eine Etappe in der Entwicklung serienreifer Elektrofahrzeug-Technologie darstellt. Bei der nächsten Generation von Elektrofahrzeugen kann hier mit Verbesserungen gerechnet werden. Als Beispiele können ein geringerer Wärmeverlust durch verbesserte Isolierung und kompaktere Bauweise heißer Batterien, die Rückgewinnung von Bremsenergie, das zuletzt auf Rügen realisierte Laderegime für NiCd-Batterien und eine höhere Effizienz einzelner Bauteile (z.B. des Ladegerätes) gelten. Dieser Beitrag der Elektrofahrzeug-Technologie zur Verbrauchs- und Emissionsminderung wurde durch Befragung der am Rügen-Versuch beteiligten Fahrzeug- und Batteriehersteller ermittelt (siehe Tab. 13.30).

Auf Seiten der konventionellen Fahrzeuge sind im Zuge der Diskussion um das Drei-Liter-Auto Gewichts- und Verbrauchseinsparung gefordert. Dies kann sich auf Fahrzeuge aller Antriebstechnologien auswirken. Die nächste europäische Abgasnorm (EURO III) wird wahrscheinlich dazu beitragen, Fortschritte im Kaltverhalten oder bei den Konversionsraten moderner Katalysatoren zu initiieren, so daß die spezifischen Emissionen von Verbrennungskraftfahrzeugen über EURO II hinaus weiter absinken werden. Die Lärmemission aller Fahrzeuge kann, wie bereits im Kapitel 13.1.9 Lärm angedeutet, durch Leichtlaufreifen weiter abgesenkt werden, wenn das vorhandene Optimierungspotential genutzt wird. Da sich dieses Potential vor allem durch Absenkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit eines Reifens eröffnet, können Elektrofahrzeuge mit ihrer geringeren Endgeschwindigkeit hiervon möglicherweise stärker profitieren.

Gelingt eine zuverlässige Abschätzung zukünftiger Emissionen und Wirkungsgrade für Kraftwerke, Raffinerien und den Betrieb der Fahrzeuge, so ist auch zukünftige Elektrofahrzeug-Mobilität in ihren Auswirkungen abschätzbar. Für einen kleinen Elektro-Pkw mit 15 kWh-Energiespeicher wird im Jahr 2000 beim Nutzungsmuster A auf der Basis der Annahmen in Tab. 13.30 eine Absenkung des Primärenergieverbrauchs und der Emissionen um etwa ein Drittel erwartet.

Tab. 13.30 Annahmen zu Fortschritten der Elektro-Fahrzeugtechnologie im Jahr 2000 gegenüber 1996

	E-Pkw 2000	Rügen 1996	Relation
ECE bei Rückspeisung	80 Wh/tkm	102 Wh/tkm	-21%
Rückspeisung im ECE	22%	6%	263%
EUDC bei Rückspeisung	91 Wh/tkm	100 Wh/tkm	-16%
Rückspeisung im EUDC	14%	11%	22%
Fahrzeuggewicht mit Batterie und Fahrer	1110 kg	1350 kg	-18%
ECE	89 Wh/km	138 Wh/km	-36%
Wärmeverlust 15 kWh-NaNiCl ₂	87,5 W	107 W	-18%
Ladewandler-Wirkungsgrad	94%	85%	11%
Kraftwerke	10,86 MJ/kWh	11,02 MJ/kWh	-1,5%

13.4 Rügen-Ergebnisse im Vergleich mit anderen Arbeiten

Gegenüber anderen Arbeiten, die den Vergleich des Energieverbrauchs und der Emissionen von Elektro- mit Verbrennungs-Kfz zum Inhalt haben, hat die hier vorgelegte Untersuchung in zahlreichen Punkten Neuland betreten. Somit sind die Ergebnisse dieser Untersuchung nur begrenzt mit denjenigen früherer Arbeiten vergleichbar.

Dennoch sollen in einer kurzen Übersicht **ausschließlich unter dem Aspekt „klimarelevante Emissionen“** die wesentlichen Unterschiede zu einigen anderen Veröffentlichungen dargestellt werden. Denn abgesehen von den allseits anerkannten lokalen Vorteilen wurde hier gezeigt, daß Rügen-Elektro-Pkw in der Gegenüberstellung zu vergleichbaren konventionellen Pkw bei Verwendung bundesdeutschen Stroms in der Regel eine nachteilige Bilanz klimarelevanter Emissionen aufweisen. Einige Publikationen (z. B. /VDEW 96/) zeigen demgegenüber ein auch in den klimarelevanten Emissionen günstiges Bild der Elektro-Kfz in Deutschland.

Die wesentlichen unterschiedlichen Annahmen zwischen den Untersuchungen, die den Elektro-Pkw einen geringeren Klimaeffekt zuweisen,¹⁵ und der hier vorgelegten Arbeit sind:

- In der Vorkette der Stromproduktion werden relevante Mengen an **Methan** freigesetzt. Deren Quantifizierung ist schwierig und somit nicht unumstritten. Einige Autoren berufen sich auf diese Probleme und bilanzieren die klimarelevanten Methanemissionen überhaupt nicht. In dieser Untersuchung werden sie berücksichtigt und tragen dann zum gesamten Klimaeffekt zu ungefähr 5 % bei Elektro-Pkw, zu 1 % bei Otto-Pkw bei.
- Im Gegensatz zu fast allen uns bekannten Arbeiten werden hier diejenigen **Komponenten** der Fahrzeuge in ihrem energetischen und emissionsbezogenen Beitrag untersucht, die sich bei Elektro- und Verbrennungs-Kfz wesentlich unterscheiden. Diese Beiträge werden auf die Fahrzeugnutzung umgelegt. Hierbei schneiden Elektro-Kfz vor allem wegen der hohen Aufwendungen für die Produktion der Batterien schlechter ab als konventionelle Fahrzeuge. Die Berücksichtigung bedeutet eine Erhöhung der klimarelevanten Emissionen der Elektro-Pkw zwischen 5 und 15 % gegenüber der Nichtberücksichtigung.
- Bei den konventionellen Fahrzeugen wird die Beheizung des **Fahrzeuggasträumes** fast immer ohne relevanten Mehrverbrauch aus der Motorabwärme gespeist. Bei Elektro-Kfz wird sie zusätzlich zugeführt. Ein derartiger Energieverbrauch belastet die Energiebilanz des Elektro-Pkw im Jahresdurchschnitt mit zusätzlich ca. 3 - 4 % der klimarelevanten Emissionen, was in nur wenigen Veröffentlichungen eingerechnet wird.
- Weiterhin wird in dieser Arbeit das gesamte Bundesgebiet als **Bilanzraum der Stromerzeugung** verwendet. Hingegen beziehen sich manche, auch aktuell publizierte Arbeiten auf die Stromerzeugung in Westdeutschland, die in den vergangenen Jahren eine rund 10 % geringere spezifische Kohlendioxidemission aufwies als gesamter deutscher Strom.
- Der entscheidende Unterschied liegt in den Annahmen zum spezifischen Verbrauch an Strom bzw. Kraftstoff. Hierfür verwenden alle uns bekannten Arbeiten einen festen Pauschalwert. In dieser Untersuchung werden hingegen zahlreiche Nutzungsmuster beschrieben und berechnet, was letztlich zu einer Vielzahl von jeweils Nutzungsmusterspezifischen Vergleichswerten für Elektro- und konventionelle Pkw führt. Bei der Analyse der Unterschiede zeigt sich:
- Einem in einigen Arbeiten verwendeten pauschalen Verbrauchswert der Elektro-Pkw von z. B. 25 kWh/100 km /VDEW 96/ wird ein ebenfalls konstanter Kraftstoffverbrauch der

¹⁵ Gegenüber Arbeiten z.B. /FfE 92/, die ebenfalls höhere klimarelevante Emissionen der in Deutschland betriebenen Elektro-Pkw ableiten, ist eine solche Gegenüberstellung verzichtbar.

Otto-Pkw im Stadtzyklus gegenüber gestellt. Auch mit den leichten Rügen-Elektro-Pkw kann ein solcher Verbrauch realisiert werden, wenn sie eine sehr hohe Tagesfahrleistung aufweisen und ohne Standtag betrieben werden. Diesem Nutzungsmuster entsprechend wird in unserer Arbeit ein konventioneller Pkw mit ebenfalls sehr hoher Tagesfahrleistung gegenüber gestellt. Dann wird er nicht mehr ausschließlich im ungünstigen Stadtzyklus, sondern zunehmend im günstigeren Außerortszyklus mit einem Kraftstoffverbrauchs vorteil von 25 bis 40 % genutzt. Somit korrelieren die günstigen Effekte bei den Elektro-Pkw in etwa mit denen bei den Verbrennungs-Pkw und gleichen sich weitestgehend aus (siehe Abb. 13.26).

- Sinkt hingegen die Höhe der täglichen Fahrleistung auf unter rund 20 km, verschlechtert sich die Energiebilanz des Elektro-Pkw zunehmend und stärker als beim konventionellen Pkw (siehe Abb. 13.26). Solche Effekte werden bei Verwendung von Pauschalverbräuchen meist übersehen.
- Schließlich wurden in bisherigen Arbeiten die Einflüsse von Standzeiten nur selten berücksichtigt. Bereits ein Standtag je Woche macht sich aber bei Elektro-Pkw je nach Batterietyp und Tagesfahrleistung in einer Erhöhung des spezifischen Verbrauch von ca. 2 bis 7 % bemerkbar, hat jedoch auf den Energieverbrauch konventioneller Pkw praktisch keinen Einfluß.

Somit zeigt die Zusammenstellung, daß es viele plausible Gründe gibt, die gegenüber den Ergebnissen einiger Untersuchungen eine Höherbewertung der Bilanz der klimarelevanten Emissionen um mehr als 50 % rechtfertigen können. Diese Gründe liegen zum einen in der Vernachlässigung von aus unserer Sicht wichtigen Einflußfaktoren, zum anderen in der Verwendung von idealisierten Pauschalverbrauchswerten, die nicht auf dem jeweils gleichen Nutzungsmuster von Elektro- und konventionellen Pkw beruhen.

Primärenergieverbrauch in Relation zu Diesel-Pkw

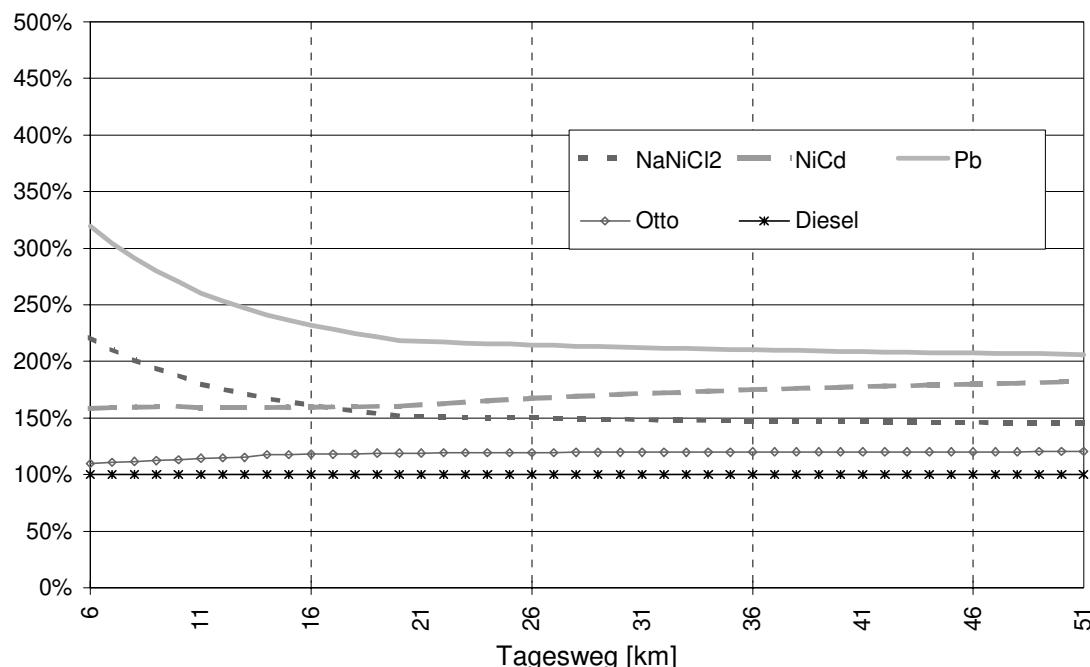


Abb. 13.26 Spezifischer Primärenergieverbrauch der Rügen-Elektro- und der Vergleichs-Pkw in Relation zu dem Diesel-Pkw unter Variation der Tagesfahrleistung (kleine Pkw, 4 Fahrten täglich, ein Standtag je Woche)

13.5 Zusammenfassung

Bisher veröffentlichte Untersuchungen zu den Umweltauswirkungen des Elektrofahrzeugs zeigen in der Gegenüberstellung mit einem konventionell angetriebenen Fahrzeug sehr unterschiedliche und oft widersprüchliche Ergebnisse. Eine Ursache dafür liegt in der lückenhaften Datenbasis für derartige Untersuchungen, so daß häufig pauschale Annahmen notwendig wurden. Mit den Ergebnissen des Forschungsprojekts auf Rügen steht nunmehr ein hinsichtlich der Fülle und dem Detail einzigartiges Untersuchungsmaterial zur Verfügung. Außerdem wurden seitens des Auftraggebers die Rahmenbedingungen für eine eingehende wissenschaftliche Dokumentation und Auswertung geschaffen. Somit können in der hier vorgestellten Untersuchung erstmals zahlreiche, für die Beurteilung der Umweltauswirkungen maßgebliche Einflüsse berücksichtigt werden. Die wichtigsten Merkmale dieser Untersuchung sind:

- Die Lebenswege der für die betrachteten Elektrofahrzeuge und Verbrennungsfahrzeuge unterschiedlichen Komponenten und die Batterien wurden von der Rohstoffgewinnung und Fabrikation bis zur Endverwertung, die Bereitstellungsketten für Energie von der Förderung der Rohenergieträger bis zur Endnutzung verfolgt.
- Der Energieverbrauch der Elektrofahrzeuge und ihrer Baugruppen, besonders der Batterien, wurde im Detail analysiert.
- Der Einfluß der Nutzungsbedingungen bei Elektro- und Verbrennungskraftfahrzeugen auf Energieverbrauch und Emissionen wurde durch ein Modell erfaßt.
- Alle Emissionen wurden nach dem Ort ihrer Entstehung dicht besiedeltem, schwach besiedeltem und unbesiedeltem Gebiet zugerechnet. Damit wurden zugleich die Voraussetzungen geschaffen, um Umweltwirkungen nach Ort und Qualität der Wirkung zu unterscheiden.

Den Elektrofahrzeugen der Rügen-Generation wurden zum Vergleich entsprechende Fahrzeuge mit Otto- und Dieselmotor gegenübergestellt. Allen Energieverbrächen und Emissionen liegen die aktuellen deutschen Verhältnisse z. B. bei der Energiebereitstellung in den Kraftwerken oder der Kraftstoffherstellung in den Raffinerien zugrunde. Die abgeleiteten Daten und somit auch der Vergleich kann sich in anderen Ländern anders darstellen.

Aus den unterschiedlichen Antriebskonzepten ergeben sich weitere wichtige Unterschiede zwischen Elektro- und Verbrennungs-Kfz, die sich auf die Energie- und Emissionsbilanz auswirken und damit den Vergleich maßgeblich beeinflussen:

- Die Rohstoffe und Fertigung der Fahrzeuge tragen mit Energieverbrauch und Emissionen zur gesamten Umweltauswirkung bei. Für den Systemvergleich sind dabei die Baugruppen maßgeblich, in denen sich Elektrofahrzeuge und Verbrennungskraftfahrzeuge unterscheiden. Dieser Anteil wird beim Elektrofahrzeug bei weitem von der Batterie dominiert. Batterie und Elektrofahrzeug-typische Baugruppen zusammen stellen einen Anteil von etwa 5-15% am gesamten Primärenergieaufwand für einen Pkw-Kilometer. Der entsprechende Anteil des Verbrennungsfahrzeuges liegt bei höchstens 3%.
- Bei Elektrofahrzeugen treten auch dann Energieverluste auf, wenn sie nicht betrieben werden. Dieser Verbrauch ohne Fahrt verursacht bei geringen Fahrleistungen einen relativ hohen Energieverbrauch je Fahrkilometer. Mit ansteigender Fahrleistung sinkt dieser spezifische Verbrauch jedoch auf einen geringeren Wert ab. Der Effekt tritt um so deutlicher hervor, je länger die Standzeiten und je höher die meist von der Batterie verursachten Ruheverbräuche des Fahrzeugs sind. Die Wahl des Batteriesystems muß sich deshalb an der Fahrzeugnutzung orientieren. Systeme mit hohem Ruheverbrauch können diesen Nachteil oft erst bei hohen Fahrleistungen ausgleichen.

13.5.1 Ergebnisse des Vergleichs zwischen Elektro- und Verbrennungs-Kfz

Bei der Gegenüberstellung von Elektrofahrzeugen und konventionellen Fahrzeugen sind die Emissionen unter verschiedenem Aspekt gleichzeitig zu betrachten:

- die sogenannten direkten Emissionen, die am Ort der Fahrt freigesetzt werden und dort besondere Wirkungen haben, wenn Sie unmittelbar auf Menschen treffen. Direkte Emissionen tragen in jedem Fall - auch wenn sie an gering besiedelten Orten freigesetzt werden - zu regionalen Umweltwirkungen wie z. B. der Ozonbildung bei.
- die sogenannten indirekten Emissionen, die aus Kraftwerken und Raffinerien abseits von Ansiedlungen oder in so großer Höhe freigesetzt werden, daß sie wegen ihrer Verdünnung überwiegend zu regionalen Wirkungen beitragen, und
- die global wirksamen Emissionen, die weder vor Ort noch regional Bedeutung haben, aber - wie etwa Kohlendioxid - das globale Klima beeinflussen.

Dementsprechend müssen die möglichen Umweltwirkungen von Fahrzeugen immer unter dem Aspekt der lokalen, regionalen und globalen Wirkung gleichzeitig verglichen werden. Bei der nachfolgenden Betrachtung der Situation innerorts wird von einem Fahrzeugeinsatz ausschließlich innerhalb geschlossener Ortschaften ausgegangen, so daß die lokalen Wirkungen auch dort auftreten.

13.5.1.1 Die Situation innerorts

Innerhalb von geschlossenen Ortschaften werden Menschen und Umwelt vor allem durch Stickoxide, Kohlenwasserstoffe (z. B. Benzol), Dieselpartikel und Lärm belastet.

- Elektrofahrzeuge verursachen - abgesehen von sehr geringen Emissionen der kraftstoffbefeuerten Zusatzheizung - keine direkten Emissionen, d. h. sie belasten nicht unmittelbar den Ort, an dem sie fahren. Wenn sie anstelle eines Verbrennungs-Kfz fahren, vermeiden sie dort dessen direkte, den Einsatzort belastende Emissionen und leisten somit einen Beitrag zur Luftreinhaltung. Diese Vermeidung von Emissionen ist um so wirksamer, je mehr Fahrleistung der Verbrennungsfahrzeuge durch Elektrofahrzeuge ersetzt wird. Während eine geringe Nutzung die Relationen bei regionalen und globalen Wirkungen zuungunsten von Elektrofahrzeugen verschieben kann, bleibt der Vorteil bei den lokal wirksamen Emissionen immer erhalten.
- Die Außengeräusch-Emission eines Elektrofahrzeugs ist im Innerortsverkehr deutlich geringer als beim Verbrennungsfahrzeug. Das wurde auch durch Messungen des Schalldruckpegels an drei Fahrzeugpaaren bestätigt. Schallmessungen können aber nur zu einem Teil als Maß für die Lärmbelastung herangezogen werden, da der Unterschied in der Geräuschqualität beider Fahrzeugarten für das subjektive Lärmempfinden mitentscheidet. Eine wirksame Absenkung der Lärmbelastung in Städten wird erst bei einer weitgehenden Substitution von Verbrennungskraftfahrzeugen durch geräuschärmerne Elektrofahrzeuge erreicht. Diese Bedingungen sind bei ohnehin geringem Verkehrsauftreten leichter zu schaffen, z.B. in besonderen Schutzonen (Krankenhäuser) oder zur Nachtzeit in Wohngebieten. Wegen der besonderen Schutzwürdigkeit der Betroffenen kann eine Absenkung des Lärmpegels in Einzelfällen höher zu bewerten sein.

13.5.1.2 Die Situation außerorts

Haupteffekte der regional wirksamen Schadstoffe aus dem Verkehr sind die Versauerung des Regens und damit der Böden und Gewässer (SO_2 und NO_x), der Stickstoffeintrag in Böden und Gewässer (NO_x) sowie die Bildung von Sommersmog und der Anstieg bodennaher Ozonkonzentrationen durch die sogenannten Vorläufersubstanzen (NO_x und bestimmte Kohlenwasserstoffe).

- Elektrofahrzeuge verursachen vergleichsweise sehr geringe Kohlenwasserstoffemissionen. Die spezifische NO_x -Emission liegt rund bei der Hälfte des Wertes von Otto- oder Diesel-Pkw, woraus ein deutlich geringeres Ozonbildungspotential abgeleitet werden kann. Der Vorteil schwindet bei geringerer Nutzung des Elektro-Pkw und zwar um so schneller, je mehr Einfluß den Stickoxiden auf die Ozonbildung zukommt.
- Aus den zumeist niedrigeren NO_x -Emissionen der Elektrofahrzeuge folgt auch ein geringerer Stickstoffeintrag in die Ökosphäre als bei konventionellen Fahrzeugen.
- Umgekehrt weisen Elektrofahrzeuge eine höhere SO_2 -Emission auf als konventionelle Fahrzeuge. Unter Berücksichtigung der Säurebildungspotentiale von SO_2 und NO_x (NO_x entspricht ca. 0,9 SO_2) nimmt im allgemeinen die Versauerung des Regens als Folge des Elektrofahrzeugeinsatzes zu. Der Effekt ist ausgeprägter für bestimmte Batterietypen und eine geringe Nutzung der Fahrzeuge.

Somit senkt eine Substitution der Fahrleistung konventioneller Fahrzeuge durch Elektrofahrzeuge im allgemeinen das Potential der Ozonbildung beträchtlich, verringert die Stickstoffeinträge in die Ökosphäre und verstärkt gleichzeitig die Versauerung von Böden und Gewässern. Das Ausmaß der Effekte ist sehr empfindlich von der Nutzung der Fahrzeuge und dem jeweiligen Batteriesystem abhängig.

13.5.1.3 Die globale Situation

Der Primärenergieverbrauch und die Emission von Treibhausäquivalenten, zu der überwiegend CO_2 und zu etwa 5 % Methan (mit dem 25fachen Gewicht von CO_2) beitragen, liegen bei Elektrofahrzeugen deutlich über dem Niveau der entsprechenden Otto- und Dieselfahrzeuge. Die Unterschiede werden um so größer, je geringer die tägliche Fahrleistung ist.

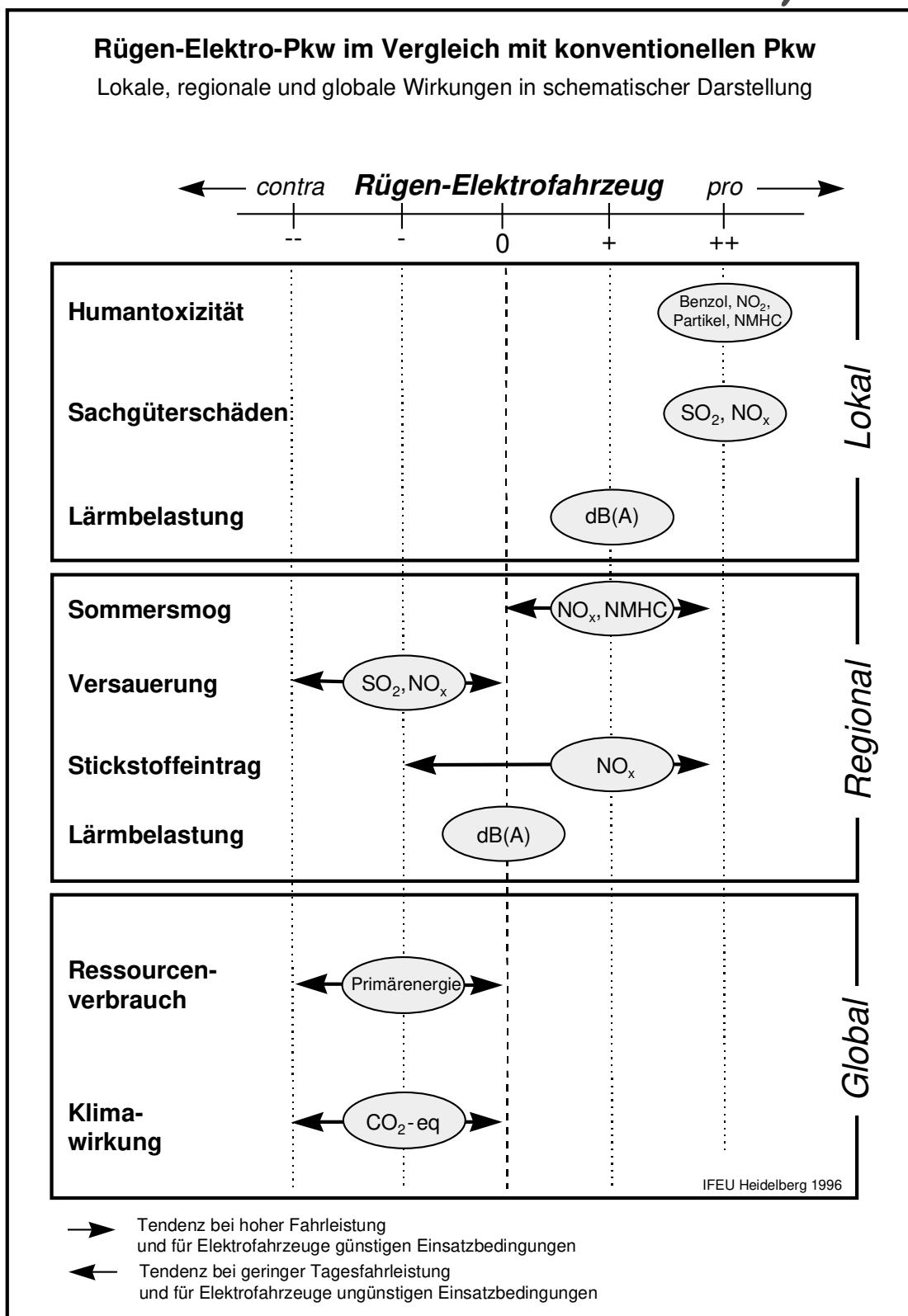


Abb. 13.27 Schematische Zusammenfassung der Umweltwirkungen kleiner Elektro-Pkw mit 15kWh-Batterie im Vergleich mit entsprechenden konventionellen Pkw in Deutschland 1996

13.5.2 Stromerzeugung und nationaler Bezugsraum

Die Emissionen der konventionellen Pkw werden überwiegend von der motorischen Verbrennung bestimmt; sie sind darüber hinaus durch EU-Grenzwerte limitiert. Einheitliche Grenzwerte für Kraftwerksemissionen gibt es EU-weit nicht. Die Emissionen der Elektrofahrzeuge sind jedoch von der Stromerzeugung im Bezugsraum abhängig, also vor allem von der jeweiligen Zusammensetzung der zu verstomenden Primärenergieträger. Primärenergieträger werden in der Regel nach Kriterien der Verfügbarkeit, der Wirtschaftlichkeit und der gesellschaftlichen Akzeptanz eingesetzt und nur in untergeordnetem Ausmaß nach ökologischen Kriterien.

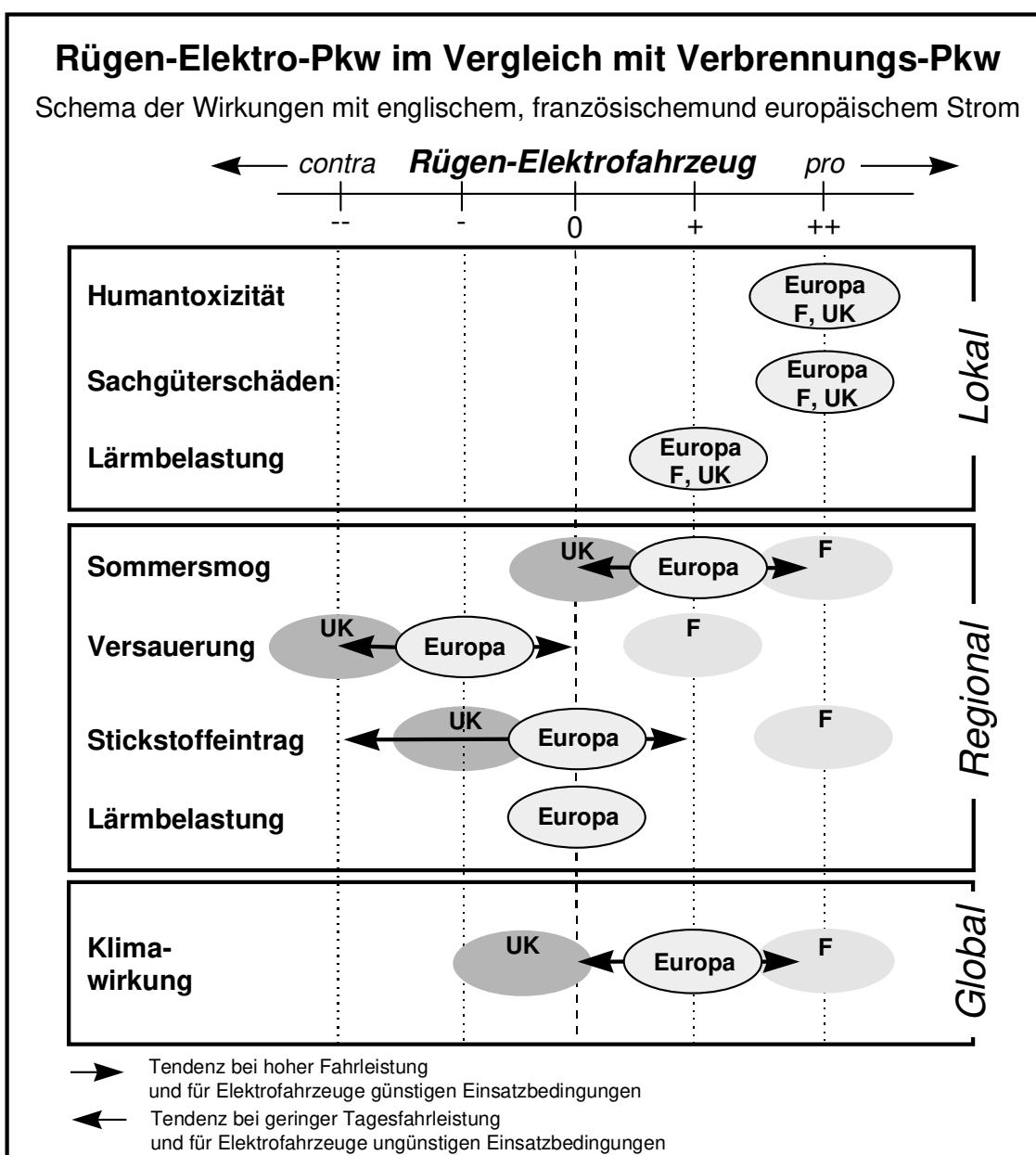


Abb. 13.28 Schematische Zusammenfassung der Umweltwirkungen kleiner Elektro-Pkw mit 15 kWh-Batterie im Vergleich mit entsprechenden konventionellen Pkw in Frankreich (F), England (UK) und Europa 1996

Die Emissionen der Stromerzeugung unterscheiden sich drastisch, je nach Anteil an regenerativen, nuklearen oder fossilen Energieträgern, je nach Schwefel- oder Kohlenstoffgehalt der fossilen Brennstoffe, je nach Kraftwerkstechnologie oder Abgasnachbehandlung. Der in den einzelnen bundesdeutschen Ländern erzeugte Strom weist eine Spannweite des CO₂-Emissionsfaktors von beinahe Faktor 10 auf. Eine Regionalisierung der Emissionsberechnung ist allerdings wegen des deutschen Stromverbundes nicht zu rechtfertigen.

Andrerseits kann der Strom - wie auch bei einigen Fahrzeugen auf Rügen - aus einer Solartankstelle stammen und dann unter Vernachlässigung infrastruktureller Aufwendungen schadstofffrei sein. Schließlich profitieren die Emissionen von den Bestrebungen um eine ökologisch verträglichere Stromerzeugung, die bessere Wirkungsgrade, bessere Abwärmenutzung oder den erhöhten Einsatz regenerativer Energieträger zum Ziel hat.

Der Vergleich der Fahrzeugsysteme wird - abgesehen von den unverändert positiven lokalen Effekten der Elektrofahrzeuge - weitgehend von den spezifischen Emissionen der Stromerzeugung im Bezugsraum bestimmt und ist infolgedessen von geographischen und politischen Zufälligkeiten abhängig. Somit fällt das Ergebnis der Gegenüberstellung von Elektrofahrzeugen mit konventionellen Fahrzeugen je nach Bezugsraum unterschiedlich aus (siehe Abb. 13.28):

- In Ländern wie Norwegen, Schweiz, Frankreich oder Österreich, die zur Stromerzeugung weniger als 30% fossile Energieträger einsetzen, haben Elektro-Pkw sehr große lokale, regionale und globale Vorteile.
- In Ländern mit einem hohen Anteil an fossilen Energieträgern, wie beispielsweise in den Niederlanden, Großbritannien, Italien oder Deutschland, bleiben für den Elektro-Pkw die sehr großen lokalen Vorteile bestehen, sind die regionalen Vorteile - je nach Rauchgasreinigung und Entstickung - geringer oder teilweise nicht vorhanden, bestehen zum Teil - wie in Deutschland - Nachteile bei den klimarelevanten Emissionen.
- In Europa 1996 weichen Primärenergieeinsatz und Abgasreinigung von den deutschen Daten der Stromerzeugung ab. Geringere spezifische Kohlendioxid-, höhere Schwefeldioxid- und Stickoxidemissionen sind die Folge. Bei einer solchen europäischen Stromerzeugung, für die zur Zeit noch kein flächendeckender Stromverbund besteht, ist der Einsatz des Elektro-Pkw im Regionalbereich etwas ungünstiger, im Globalbereich günstiger als in Deutschland 1996 zu beurteilen.

In Abb. 13.28 sind außer dem europäischen Stromerzeugungsmix auch noch die Ergebnisse für England und Frankreich angeführt, die als Beispiel für einen hohen bzw. niedrigen Anteil fossiler Energien bei der Stromerzeugung dienen können. In England liegen die Emissionsfaktoren von NO_x, SO₂ und CO₂ über dem europäischen Durchschnitt. Der Einsatz von Elektrofahrzeugen ist dort unter den betrachteten Umweltkriterien benachteiligt, mit Ausnahme einer geringeren Klimawirkung im direkten Vergleich mit Deutschland.

Demgegenüber führt der hohe Anteil nuklearer Stromerzeugung in Frankreich - ohne eine Bewertung der außerhalb der Systemgrenzen dieser Studie liegenden Risiken der Kernenergienutzung - zu starken Absenkungen in der Emission von CO₂, NO_x und damit im europäischen Vergleich zu markanten Vorteilen bei den Umweltwirkungen (Sommer-smog, Stickstoffeintrag und Klimawirkung), für die diese Stoffe Indikatoren bi Iden.

13.5.3 Abschließende Betrachtung

Der Vergleich von Rügen-Elektro-Pkw mit konventionellen Pkw ergibt für Deutschland 1996 kein einheitliches Bild (siehe Abb. 13.27). Das Elektrofahrzeug hat die Vorteile, direkt am Einsatzort keine humantoxischen und sachgüterschädigenden Emissionen und weniger Lärm zu verursachen sowie weniger zu Sommersmog und zum Stickstoffeintrag in Böden und Gewässer beizutragen. Es hat die Nachteile eines höheren Versauerungspotentials und einer stärkeren Klimawirkung. Diese Nachteile nehmen bei geringerer Tagesfahrlistung zu. Sie können nur unter besonderen Einsatzbedingungen (Stop and Go, sehr häufige Kurzstreckenfahrten) aufgehoben werden.

Der Vergleich kommt zu einem anderen Ergebnis, wenn sich die Emissionen der Stromerzeugung von den zugrunde gelegten durchschnittlichen Werten in Deutschland 1996 unterscheiden. So fällt der Vergleich sehr eindeutig zugunsten des Elektro-Pkw aus, wenn direkt regenerativ erzeugter Strom genutzt oder die Stromerzeugung insgesamt überwiegend auf nicht-fossilen Energieträgern aufbaut, was in Zukunft unvermeidbar zu sein scheint.

Eine abschließende Bewertung der Vor- und Nachteile ist Aufgabe des weiteren wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Prozesses. Dieser muß vor allem die Bedeutung der unterschiedlichen ökologischen Effekte für die heutige, absehbare und angestrebte Umweltsituation berücksichtigen.

Auch ohne eine solche Bewertung zeigen die Ergebnisse dieser Untersuchung, daß Elektrofahrzeuge unter bestimmten Nutzungsbedingungen konventionelle Fahrzeuge mit vielen einzelnen Vorteilen ersetzen können. Diese Vorteile relativieren sich in der aktuellen deutschen Situation in dem Maße, in dem der global wirksamen Kohlendioxidminderung Vorrang eingeräumt wird gegenüber einer lokal und regional wirksamen Schadstoffminderung. Sie bestehen bereits heute uneingeschränkt dort, wo die Stromerzeugung mit hoher Effektivität und geringem Anteil fossiler Energieträger erfolgt.

13.6 Literatur

- /ACEA 94/ European Commission working group; Technical Group 1: Effect of Fuel Qualities and Related Vehicle Technologies on European Vehicle Emissions: An Evaluation of Existing Literature and Proprietary Data. European Commission, 1994
- /AGE 95/ Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland 1992. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. Essen, 1995
- /BIALONSKI 90 ET AL./ Bialonski, W.; Vanck, P.; Schulze, K.; Wakob, H.: Spezifischer Energieeinsatz im Verkehr-Ermittlung und Vergleich der spezifischen Energieverbräuche. Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen. im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Forschungsbericht FE Nr. 90 247/88 Aachen (1990)
- /BLANDOW 91/ Blandow, V., Zittel, W.: Ökologische Bilanzierung von Elektrofahrzeugen im Vergleich mit konventionellen betriebenen Fahrzeugen. Im Auftrag der BMW AG, Ottobrunn 1991
- /BLÜMEL 92/ Blümel, H: Nur noch mit Batterie- oder Hybrid-Antrieb in die Städte? — Eine vergleichende Betrachtung aus Sicht der Luftreinhaltung. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik (Hrsg.): Aspekte alternativer Energieträger für Fahrzeugantriebe. Tagung Wolfsburg, 24.-26. November 1992, VDI Berichte Nr. 1020, VDI-Verlag, Düsseldorf (1992)
- /BMU 94/ Der Bundesminister für Umwelt; Umwelt Nr. 5, , S. 189/90 (1994)
- /BMV 94/ Heusch, H., Boesefeldt, J.: Ermittlung der Pkw-Jahresfahrleistungen 1990 und 1986 auf allen Straßen der in der Bundesrepublik. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr (FE-Nr. 90408/93), Aachen (1994)
- /BMW 96/ persönliche Mitteilung, Hr.Dr. Höppler, BMW
- /BMW 94/ BMWI (Hrsg.): Energie Daten 94 - Nationale und internationale Entwicklung. Bundesministerium für Wirtschaft (BMW), Bonn Oktober (1994)
- /BMW 96/ Die Elektrizitätswirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland im Jahre 1994. Bundesministerium für Wirtschaft, Frankfurt a. M., Elektrizitätsstatistik, 46. Bericht (1996)
- /BUWAL 95/ Keller, M. et. al.: In: BUWAL Bern (Hrsg.): Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950-2010; Schriftenreihe Umwelt Nr.255; Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern 1995
- /CARBOTECH 94/ Schläpfer, K., Zamboni, M. (Carbotech): Emissionsfaktoren nicht limitierter Schadstoffe des Straßenverkehrs. BUWAL, Bern (1994)
- /DGMK 92/ Ansatzpunkte der Potentiale zur Minderung des Treibhauseffektes aus der Sicht der fossilen Energieträger. Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle. DGMK-Forschungsbericht 448-2, Hamburg (1992)
- /DIN 96/ Umweltmanagement - Produkt-Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen - (ISO/DIS 14040). Deutsches Institut für Normung (DIN, Hrsg.). DIN EN ISO 14040 Entwurf vom August 1996, Berlin, Beuth Verlag (1996)
- /DRM 96/ Knörr, W., Höpfner, U.: Daten- und Rechenmodell: Schadstoffemissionen aus dem motorisierten Verkehr in Deutschland 1980-2010. IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg, unter Mitarbeit des IFU – Institut für Umweltinformatik Hamburg, i. A. des Umweltbundesamtes UFOPLAN-Nr. 10.506.057, in Bearbeitung
- /EBERSPÄCHER 95/ Hersteller-Datenblatt (1995)
- /FFE 92/ Burkner, W., Hellriegel, E., Schaefer, H., Wagner, U.: Elektro-Straßenfahrzeuge - eine Technik für umweltschonende Mobilität. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 6, 374-379 (1992)

- /GEMIS 95/ Fritsche, U. et al.: Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 2.1. Erweiterter Endbericht, Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten, Wiesbaden (1995)
- /GOETHEL 93/ Goethel, G. F.; Altmann, B.-R.: Emissionsminderung in deutschen Raffinerien. Erdöl, Erdgas, Kohle 109, **5**, S. 224-227 (1993)
- /HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS/ 64th Edition, 1983-1984
- /HANDBUCH EMISSIONSFAKTOREN 95/ Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs: INFRAS AG Bern, im Auftrag des UBA Berlin und BUWAL Bern, Bern (1995)
- /HAUTZINGER 91 ET AL./ Hautzinger, H., Tassaux, B., Hamacher, R.: Elektroauto und Mobilität - Das Einsatzpotential von Elektroautos. Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung, Heilbronn (1991)
- /HOFFMANN 92/ Hoffmann, C.: Vergleich verschiedener Emissionsrechnungen für Otto-, Diesel- und Elektro-PKW. Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München (1992)
- /IFEU 89/ Höpfner, U. et al.: Emissionsminderung durch rationelle Energienutzung und emissionsmindernde Maßnahmen im Verkehrssektor (Personenverkehr), im Auftrag der Enquête-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages; Oktober (1989)
- /IFEU 95A/ Patyk, A.; Höpfner, U.: Komponenten-differenzierte Kohlenwasserstoffemissionen; im Auftrag des Umweltbundesamtes (1995)
- /IFEU 95B/ Höpfner, U.; Knörr, W.: Abschätzung zukünftiger Emissionsfaktoren für Motorfahrzeuge nach EU- sowie US-Abgasgesetzgebung. BUWAL-Bericht FE/BUWAL/310.94.104 und 310.95.28, im Auftrag des BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft der Schweiz) (1995)
- /IFEU 96/ Patyk, A.: Energiebereitstellung. IFEU-Materialien: Basisdaten zur ökologischen Bilanzierung Teil 1. IFEU, Heidelberg, in Vorbereitung
- /IPCC 94/ Climate Change 1994; Intergovernmental Panel on Climate Change, University Press Cambridge (1995)
- /JESS 94 ET AL./ Jess, A.; Hedden, K.: Die „Modellraffinerie Deutschland“. Ein Instrument für Prognosen des zukünftigen Energieverbrauchs der deutschen Mineralölverarbeitung. In: Erdöl, Erdgas, Kohle 110, **11/12**, S. 454-458 (1994)
- /KNIE 96 ET AL./ Knie, A.; Berthold, O.: Neue verkehrspolitische Optionen? Nutzungsprofile von Elektromobilen. In: Internationales Verkehrswesen 47, **11**, S. 693-697 (1995)
- /KOLKE 95/ Kolke, R.: Elektro-Otto-Diesel-Pkw: Systemvergleich, Interner Bericht des Umweltbundesamtes, Berlin (1995)
- /LAVE 95 ET AL./ Lave, L. B. ; Hendrickson, C.T.; McMichael, F. C.: Environmental implications of electric cars. Science, **268**, S. 993-995 (1995)
- /LAVE 96 ET AL./ Lave, L. B. ; Russel, A.G.; Hendrickson, C.T.; McMichael, F. C.: Battery powered vehicles: Ozone reduction versus lead discharges. In: Environmental Science Technology 30, **9**, S. 402-407 (1996)
- /OEKOINVENTARE 95/ Frischknecht, R. et. al.: Öko inventare für Energiesysteme. 1. Auflage, Teil 1, Erdöl - Erdgas - Kohle, Laboratorium für Energiesysteme, ETH Zürich, März (1994)
- /OEKOINVENTARE 95A/ Baumann, T. et. al.: Öko inventare für Energiesysteme. 1. Auflage, Teil 3, Anhang, Laboratorium für Energiesysteme, ETH Zürich (1995)
- /PATYK 96 ET AL./ Patyk, A.; Reinhardt, G. A.: Düngemittel - Energie- und Stoffstrombilanzen. IFEU Heidelberg, Vieweg-Verlag, Wiesbaden 1996

- /PETERSEN 96 ET AL./ Petersen, R.; Diaz-Bone, H.: Das „Drei-Liter-Auto“, Aktuelle Konzepte und Stand der Realisierung. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, im Auftrag von Greenpeace 1996
- /PROGNOS 95/ Prognos AG: Die Energiemarkte Deutschlands im zusammenwachsenden Europa - Perspektiven bis zum Jahr 2020. Bundesministerium für Wirtschaft, Bonn (1995)
- /RAUSCH 96/ persönliche Mitteilung von Herrn Lothar Rausch, Öko-Institut, Darmstadt (1996)
- /SEIER 95/ Seier, J.: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung Stuttgart, persönliche Mitteilung (1995)
- /SPORCKMANN 90/ Sporckmann, B.: Elektrofahrzeuge als Luftschadstoffbremse? Emissionsvergleich von Verbrennungsmotor- und Elektrofahrzeugen. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 40, 6, 418-423 (1990)
- /TÜV 87/ Heine, P. et al.: Rheinisch-Westfälischer TÜV: Emissionsfaktoren für die Verdampfungsemissionen von Kraftfahrzeugen mit Ottomotoren, Im Auftrag des Umweltbundesamtes (1987)
- /TÜV 93/ Brosthaus, J.; Kober, R.; Quadflieg, H.; Wessels, G.: Electric Vehicles - Chance for Environment and Quality of Life?; by order of Comission of European Communities, DG XVII, TÜV Rheinland-OPET, Köln (1993)
- /TÜV 94A/ Hassel, D. et al.: TÜV Rheinland: Abgas-Emissionsfaktoren von Pkw in der Bundesrepublik Deutschland. Forschungsbericht 10405152 und 10405509 im Auftrag des Umweltbundesamtes (1994)
- /TÜV 94B/ Hassel, D. et al.: TÜV Rheinland: Ermittlung von Abgas-Emissionsfaktoren von Straßenfahrzeugen in der Schweiz, Teil 1: Leichte Motorwagen, im Auftrag des BUWAL (1994)
- /UBA 94/ UBA (Hrsg.): Jahresbericht 1994. Berlin (1994)
- /UBA 95/ Umweltbundesamt Berlin: Jahresbericht 1994 (1995)
- /UBA 96/ Umweltbundesamt, persönliche Mitteilung von Herrn Nöcker, Mai (1996)
- /UNIPEDE 96/ Development of Applications of Electricity and Marketing Study Committee: "Comparison of emissions from combustion-engined and „European“ electric vehicles", vorgetragen beim Internationalen Elektrofahrzeug-Symposion in Florenz Sept. 1992, überarbeitete Fassung November (1994)
- /VDEW 96/ Vereinigung deutscher Elektrizitätswerke, persönliche Mitteilung von Herrn Hildebrandt, Februar (1996)
- /VDEW 96/ Mit Strom mobil. Broschüre des Arbeitskreises „Elektrostraßenfahrzeuge“ der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke-VDEW-e.V. ARGE Prüfgemeinschaft-VDEW-e.V., Frankfurt am Main, VWEW-Verlag (1996)
- /VDI 96/ VDI-Richtlinie 4600 „Kumulierter Energieaufwand“. Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf, aktualisierte Fassung des Gründrucks (1996)
- /VW 88/ Lies, K.-H.: Nichtlimitierte Automobil-Abgaskomponenten. Forschung und Entwicklung, Wolfsburg (1988)
- /WEBASTO 95/ Hersteller-Datenblatt (1995)