

FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK EV

FAT

ISSN 0933-050X

SCHRIFTEN REIHE NR.88

**Fahrzeugerprobung
eines wartungsarmen
Batterieaggregates**

Batterieaggregates eines wartungsarmen Fahrzeuggerätes

Aufgaben:

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)
Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMT)

Forschungsinstitut:

Gesamthochschule Kassel, Fachbereich Elektrotechnik
Fachgebiet Elektrische Energieversorgungssysteme

Verfasser:

Richard Bärmann
Dieter Bopp
Dr.-Ing. Bernd Willer

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers
für Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 03Z5790 A und der
Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) gefördert.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Postanschrift:
Postfach 17 05 63 · 6000 Frankfurt/M. 17
Telefon (069) 75 70-1
Drahtanschrift: Autoverband
Telex 4 11 293

Druckerei Henrich GmbH
Schwanheimer Straße 110
6000 Frankfurt am Main 71

Vervielfältigung, auch auszugsweise nur
mit ausdrücklicher Genehmigung der FAT

Vorwort

Die Bleibatterie ist nach wie vor ein wichtiger Energiespeicher für den Einsatz in Elektro-Straßenfahrzeugen. Ein vom BMFT geförderter Flottenversuch mit über 50 Elektro-Transportern in Berlin zeigte auch gewisse Nachteile: Die Batterien hatten einen hohen Wasserverbrauch. Um den erforderlichen Wasserstand zu erhalten, war ein häufigeres Nachfüllen erforderlich, was einen erheblichen Wartungsaufwand erforderte. Ein Weg, dieses Problem zu lösen, besteht in der Verwendung von Bleibatterien mit festgelegtem Elektroylten, was dann allerdings eine erhöhte Ladezeit erfordert. Zur Überwindung dieser Probleme wurde versucht, mit Hilfe eines genau gesteuerten Ladevorgangs den Ladefaktor und damit den Wasser- und den Energieverbrauch herabzusetzen. Das erforderte die genaue Kenntnis des Ladezustands der Batterie. In früheren FAT-Forschungsvorhaben ist gezeigt worden, daß mit Hilfe einer mit speziellen Meßfühlern ausgerüsteten Einzelzelle innerhalb eines Batterieverbandes (Pilotzelle) repräsentative Meßgrößen für die gesamte Batterie ermittelt werden können und daß durch Einrichtungen einer entsprechenden Pilotzelle wartungsarme, sich selbst überwachende Batterieaggregate gebaut werden können.

Ein entsprechendes Aggregat wurde in ein Elektro-Straßenfahrzeug eingebaut und im praktischen Fahrbetrieb getestet. Die dabei erzielten Ergebnisse werden im vorliegenden Bericht beschrieben.

Das Projekt wurde im Auftrag der FAT von der Uni GH Kassel (Fachbereich Elektrotechnik, Fachgebiet Elektrische Energieversorgungssysteme) durchgeführt und je zur Hälfte vom BMFT und der FAT finanziert. Der FAT-Arbeitskreis 18 mit seinen im Anhang namentlich genannten Mitgliedern hat das Projekt betreut.

FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E. V. (FAT)

Frankfurt am Main, im November 1990

Kurzfassung

Im vorliegenden Forschungsbericht werden, aufbauend auf zwei bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben /1//2/, erste Erfahrungen über den Einsatz eines neuentwickelten geschlossenen Bleibatterieaggregates in einem Elektrofahrzeug vorgestellt. Zur Verbesserung des Batterieverhaltens wurden die einzelnen Zellen mit einer Elektrolytumwälzung, einer Klimatisierung, mit Rekombinatoren und einer Rekombinatorüberwachung ausgerüstet. Mit einer Befeuchterzelle und einer Membranpumpe wurden sie zu einem geschlossenen Gaskreislauf zusammengeführt. Spezielle Meßfühler zur Erfassung der Säuredichte, der Gasung und Gaszusammensetzung dienten zur Optimierung der Batteriebetriebsführung, zur Realisierung einer verbesserten Laderegelung, zur Erfassung des Ladezustandes und zum Schutz des Aggregates vor Über- und Tiefentladungen.

3.1.4 Potentialanbindung

Das Batterieaggregat wurde während des Fahrbetriebes auf seine Tauglichkeit im realen Straßenverkehr getestet und die erreichten bzw. erreichbaren Verbesserungen mit herkömmlichen Techniken verglichen. Durch eine gesteuerte Elektrolytumwälzung und eine verbesserte Erfassung des Ladezustandes mit Hilfe einer neuartigen Meßtechnik konnte der zur Vollladung notwendige Ladefaktor deutlich verringert werden. Während des Fahrbetriebes wurden Ladefaktoren von 1,05, gegenüber 1,25 bei kontinuierlichem Batteriebetrieb, erreicht, was einem hohen Energiewirkungsgrad der Batterie von 77 % entspricht. Der Wartungsaufwand wurde deutlich verringert, so daß Wartungsintervalle von über 12 Monaten möglich erscheinen. Eine langzeitstabile Ladezustandserfassung wurde erprobt, die dem Fahrer verlässliche Informationen über den Zustand der Batterie liefert. Die Funktionstüchtigkeit der eingesetzten Zusatzkomponenten war zufriedenstellend.

3.1.5 Spannungsversorgung

Die Ergebnisse zeigen, daß der Einsatz einer angepaßten Peripherie und Sensorik ein optimales Betreiben einer Bleisäurebatterie ermöglichen. Gegenüber herkömmlichen Bleibatteriesystemen bedeutet das eine deutliche Verbesserung des Wirkungsgrades, Verringerung des Wartungsaufwandes und Verlängerung der Lebensdauer.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Einleitung	1
2	Der "CitySTROMer"	3
3	Das Batterieaggregat	8
3.1	Komponenten zur Verbesserung des Batterieverhaltens	9
3.1.1	Elektrolytumwälzung	9
3.1.2	Gasrekombination	9
3.1.3	Gemeinsame Gaszuführungen	10
3.1.4	Potentialanbindung	11
3.1.5	Befeuchterzelle	12
3.1.6	Klimatisierung	14
3.2	Erfassung batterierelevanter Größen in einer Pilotzelle	15
3.3	Einzelzellenüberwachung	16
3.3.1	Blockspannungsvergleich	17
3.3.2	Einzelrekombinator-Überwachung	17
4	Bordrechnersystem	19
4.1	Rechnerstruktur	21
4.2	Meßsignalerfassung und -aufbereitung	25
4.3	Schnittstellen	25
4.4	Spannungsversorgung	26
5	Batteriebetriebsführung	27
5.1	Überwachungsfunktionen	27
5.2	Laderegelung	29

5.2.1	Regelung des Ladestromes in Abhängigkeit des Gasungs-	30
	stromes	
5.2.2	Ladeschlußkriterium	30
5.2.3	Sicherheitsvorkehrungen	31
5.3	Ladezustandserfassung	33
5.3.1	Äußerer Ladezustand	33
5.3.2	Mittlerer Ladezustand	34
5.3.3	Innerer Ladezustand	36
5.4	Steuerung der Elektrolytumwälzung und der Klimatisierung	37
5.5	Eckdatenberechnung und -sicherung	37
5.6	Kontinuierliche Datenerfassung	39
6	Inbetriebnahme der Antriebsbatterie	41
7	Fahrbetrieb	43
7.1	Allgemeine Fahrdaten	43
7.2	Strom- und Spannungsverlauf im Fahrbetrieb	45
7.3	Ladefaktor	47
7.4	Wirkungsgradvergleich	51
7.5	Ladezustandserfassung	52
7.6	Zusammenfassung	55
8	Fahrsimulationen	57
8.1	Prüfplatzaufbau	57
8.1.1	Umkehrstromrichter	58
8.1.2	Prüfplatzrechner	59
8.2	Prüfzyklus	60
8.3	Batterieverhalten während einer Fahrsimulation	62
8.4	Simulation mehrerer Fahrten	64
8.4.1	Geringer Ladungsdurchsatz zwischen zwei Vollandungen	64
8.4.2	Großer Ladungsdurchsatz zwischen zwei Vollandungen	70
8.5	Zusammenfassung	74

9	Einflüsse auf den Wasserhaushalt	76
9.1	Durchführung einer Wartung	77
9.2	Wasseraustrag	80
9.3	Rekombinatorverhalten	84
9.4	Einfluß der Elektrolytumwälzung	86
9.5	Wasseraustrag im Vergleich	89
9.6	Wartungsintervalle im Vergleich	92
9.7	Zusammenfassung	94
10	Kapazitätsverhalten	95
10.1	Kapazitätsänderungen	95
10.2	Änderungen im Einzelzellenverhalten	96
11	Schlußbetrachtung und Ausblick	99
12	Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen	103
13	Literaturverzeichnis	106
	Anhang	108



Bild 1: Cystromer im Straßenverkehr

1 Einleitung

Elektrofahrzeuge haben den Vorteil, daß sie im Straßenverkehr keine Schadstoffe verursachen, leise sind und daß ihre Antriebsenergie "Strom" zur Substitution von Erdöl aus Kohle, Kernkraft, Wasserkraft oder Solar-Energie gewonnen werden kann /3/. Das wesentliche Problem für einen großtechnischen Einsatz stellt nach wie vor die Antriebsbatterie dar. Trotz des hohen Entwicklungsstandes der Bleibatterie erfüllen konventionell aufgebaut und betriebene Batterien nicht zufriedenstellend die Anforderungen hinsichtlich Zyklfestigkeit, Wartungsaufwand, Betriebssicherheit, Lade- und Entladeverhalten, Überlade- und Tiefentladeschutz, Wirkungsgrad, Ladezustandserfassung und eines gleichmäßigen Verhaltens aller Zellen. Die Lebensdauer der Batterie ist zu gering, ihr Wartungsaufwand zu groß und ihr Wirkungsgrad verbesserungswürdig. Wie eigene Voruntersuchungen zeigten ist eine Verbesserung des Batterieverhaltens durch den Einsatz spezieller peripherer Elemente, einer angepaßten Ladetechnik und einer langzeitstabilen Ladezustandserfassung möglich. Ziel des durchgeführten Vorhabens war es, ein Bleibatterieaggregat mit speziellen Zusatzkomponenten zu entwickeln, in ein Elektrofahrzeug (CitySTROMer, Bild 1)



Bild 1: CitySTROMer im Stadtverkehr

zu integrieren und, ausgerüstet mit einer angepaßten Batteriebetriebsführung, im praktischen Fahrbetrieb auf seine Tauglichkeit als Antriebsbatterie für ein Elektrostraßenfahrzeug zu testen und erreichbare Verbesserungen zu ermitteln.

verursachen, keine sind und daß ihre Anwesenheit Strom zur Substitution von Erdöl aus Kohle, Kernkraft, Wasserkraft oder Solar-Energie gewonnen werden kann (3). Das wesentliche Problem für einen großtechnischen Einsatz stellt nicht wie vor die Antriebsbatterie dar. Trotz des hohen Entwicklungsstandes der Bleibatterie erfüllen konventionell aufgebaut und betriebene Batterien nicht zureichend die Anforderungen hinsichtlich Zyklentzähigkeit, Wartungsaufwand, Betriebssicherheit, Lade- und Entladeverhalten, Überlade- und Tiefentladenschutz, Wirkungsgrad, Ladestandsüberwachung und eines gleichmäßigen Verhaltens aller Zellen. Die Lebensdauer der Batterie ist zu gering, ihr Wartungsaufwand zu groß und ihr Wirkungsgrad verbesserungswürdig. Wie eigene Voruntersuchungen zeigen ist eine Verbesserung der Batterieverfahren durch den Einsatz spezieller peripherer Elemente, einer angepaßten Ladetechnik und einer langzeitstabilen Ladestandsüberwachung möglich. Ziel des durchgeführten Vorgehens war es, ein Bleibatteriesystem mit speziellen Zusatzkomponenten zu entwickeln, in ein Elektrofahrzeug (CISTROMER, Bild 1)



Bild 1. CISTROMER im Stadtbetrieb

2 Der "CitySTROMer"

Als Versuchsfahrzeug für die Untersuchungen diente ein vom RWE zur Verfügung gestellter CitySTROMer. Der CitySTROMer, ein umgebauter VW Golf CL mit verstärkter Hinterachse, ist ein Elektro-PKW für den Straßenverkehr, der nach den Richtlinien des Fachausschusses Kraftfahrzeugtechnik zugelassen ist. Unter der Leitung der Gesellschaft für elektrischen Straßenverkehr mbH (GES) wurden die ersten CitySTROMer 1983 fertiggestellt. Im Schnittbild des CitySTROMers (Bild 2.1) sind die wichtigsten Komponenten

- ▶ Antrieb
- ▶ Fahrsteuerung
- ▶ Bordladegerät
- ▶ Bordnetz
- ▶ Antriebsbatterie

hervorgehoben. Sie werden nachfolgend erläutert.

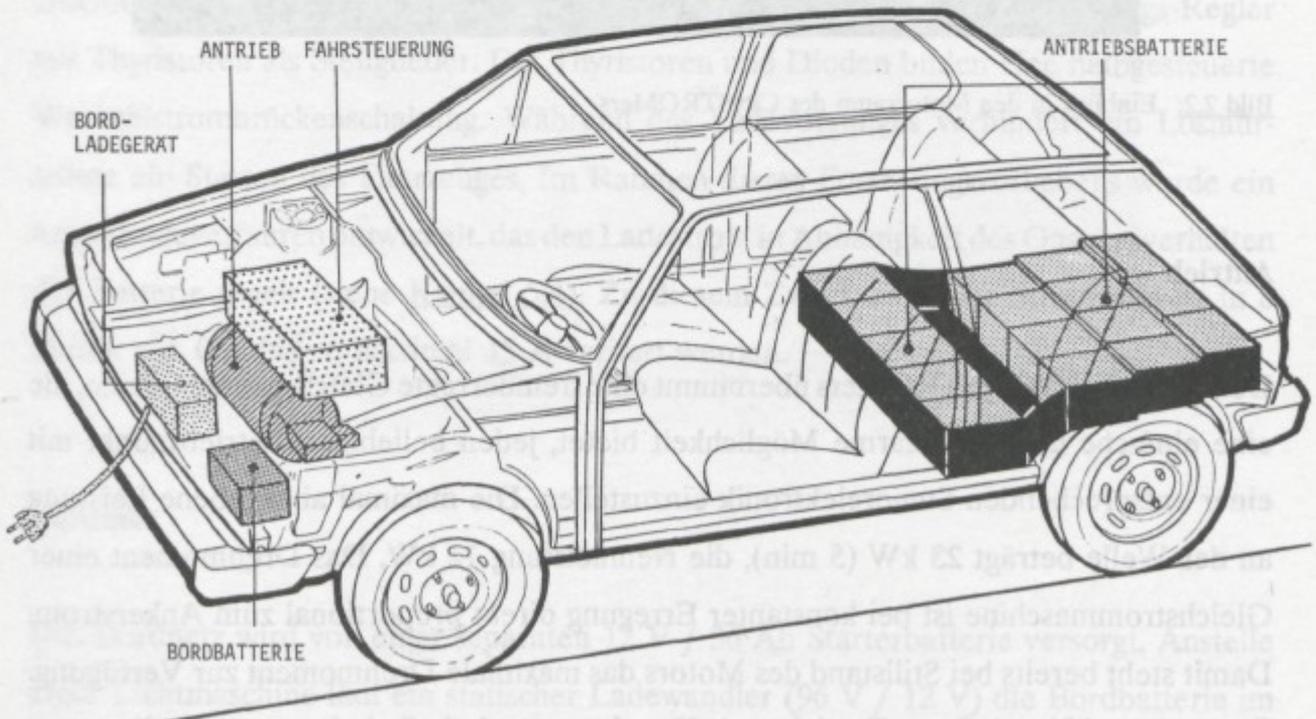


Bild 2.1: Schnittbild des CitySTROMers /4/

Den Motorraum des CitySTROMers zeigt Bild 2.2 in dem die Fahrsteuerung mit geöffnetem Deckel, das Ladegerät vor Kopf und die Bordnetzbatteie auf der rechten Seite des Motorraumes zu sehen sind. Der Antrieb befindet sich unter der Fahrsteuerung.

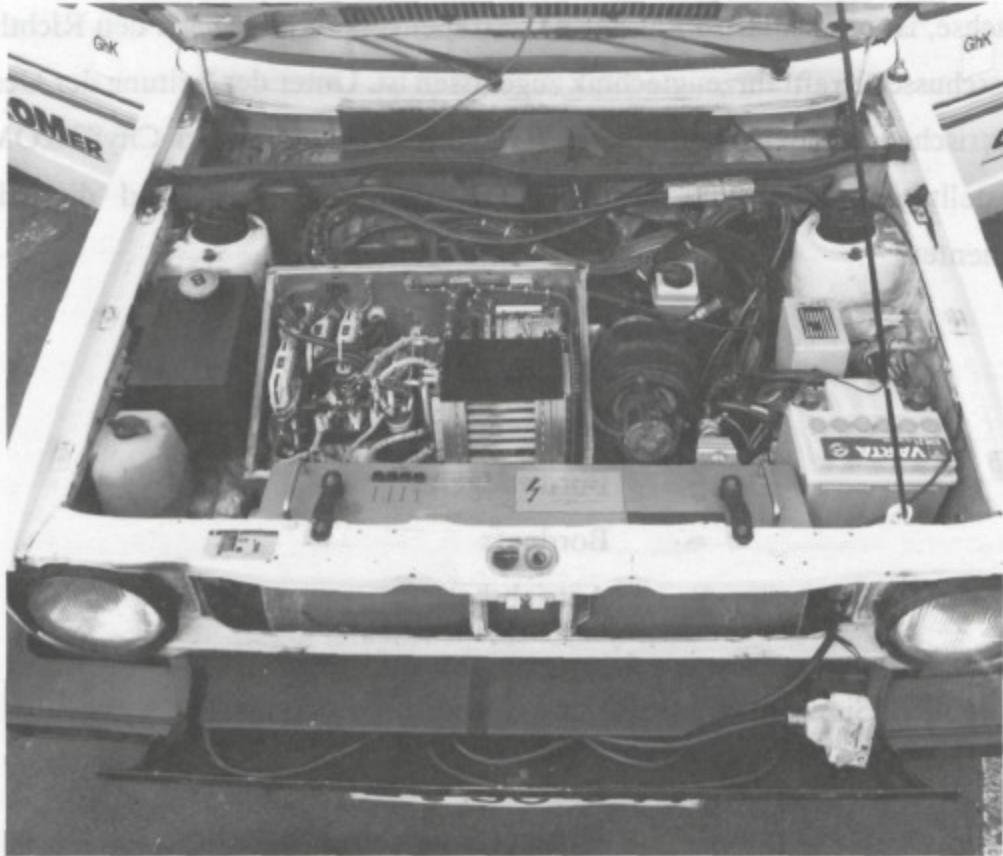


Bild 2.2: Einblick in den Motorraum des CitySTROMers

Antrieb

Den Antrieb des CitySTROMers übernimmt eine fremderregte Gleichstrommaschine, die eine einfache und verlustarme Möglichkeit bietet, jeden beliebigen Betriebspunkt mit einer entsprechenden Steuerelektronik einzustellen. Die maximal abgegebene Leistung an der Welle beträgt 23 kW (5 min), die Nennleistung 12 kW. Das Drehmoment einer Gleichstrommaschine ist bei konstanter Erregung direkt proportional zum Ankerstrom. Damit steht bereits bei Stillstand des Motors das maximale Drehmoment zur Verfügung. Das serienmäßige 4-Gang-Getriebe mit Kupplung wurde beibehalten, um die für einen Personenkraftwagen erforderlichen höheren Geschwindigkeiten zu erreichen /4/.

Fahrsteuerung

Die Regelung des Gleichstrommotors übernimmt unterhalb einer Eckdrehzahl ein elektronischer Ankersteller, bei höheren Drehzahlen setzt eine elektronische Feldschwächung ein. Die Bremsenergie kann in 2 Stufen (30 A und 100 A) durch einen Generatorbetrieb des Antriebmotors in die Batterie zurückgespeist werden. Ein elektronisch geregelter Hochlauf des Gleichstrommotors verhindert ein Durchdrehen der Antriebsräder. Zur Schonung der Antriebsbatterie ist ein serienmäßiger Tiefentladeschutz eingebaut, der den Fahrstrom nach einer gestaffelten Spannungsgrenze abregelt. Diese Spannungsgrenzen sind fest vorgegeben und lassen sich nicht ohne weiteres an verschiedene Batterietypen anpassen /4/. Aufgrund des relativ hohen Innenwiderstandes der in diesem Vorhaben eingesetzten Batterie kommt es zu einer frühen Abregelung der Fahrleistung.

Bordladegerät

Ein mitgeführtes Bordladegerät ermöglicht die Aufladung der Antriebsbatterie an jeder 220 V / 16 A Steckdose. Die Ladung erfolgte ursprünglich nach einer WU-Kennlinie mit anschließender getakteter UI-Kennlinie. Zur Regelung dient ein Strom-Spannungs-Regler mit Thyristoren als Stellglieder. Die Thyristoren und Dioden bilden eine halbgesteuerte Wechselstrombrückenschaltung. Während des Ladevorganges verhindert ein Losfahrerschutz ein Starten des Fahrzeuges. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde ein neues Ladeverfahren entwickelt, das den Ladestrom in Abhängigkeit des Gasungsverhalten der Batterie regelt (siehe [Kapitel 5.4](#)). Zu diesem Zweck kann der Stromsollwert in 8 Stufen von 0 A bis zu maximal 15 A variiert werden.

Bordnetz

Das Bordnetz wird von einer separaten 12 V / 36 Ah Starterbatterie versorgt. Anstelle einer Lichtmaschine lädt ein statischer Ladewandler (96 V / 12 V) die Bordbatterie im Fahrbetrieb auf. Während der Aufladung der Antriebsbatterie wird die Starterbatterie von einem zusätzlichen Netzladegerät geladen. Während der Fahrversuche kam es bei längeren Standzeiten, während denen die Bordbatterie nicht geladen wird, zu gelegent-

lichen Ausfällen des Bordnetzes.

Antriebsbatterie

Die Antriebsbatterie besteht aus 48 Blei-Säure-Traktionszellen der Firma Varta (Bild 2.3)



Bild 2.3: Antriebsbatterie des CitySTROMers

mit der Normbezeichnung 4 PzS 172 H. Die Nennkapazität beträgt 172 Ah (Q_5) und die Nennspannung 96 V. Zur Verbesserung des Batterieverbandes wurden im Rahmen dieses Vorhabens zusätzliche Einrichtungen installiert, die im 3. Kapitel ausführlich beschrieben werden. Eine serienmäßige Traktionsbatterie-Überwachungskarte wurde mit in die Batteriebetriebsführung eingebunden, die folgende Funktionen überwacht:

3 Batterieaggregat

Zur Verbesserung des Batterieverhaltens wurde die eingesetzte Bleibatterie mit zusätzlichen peripheren Komponenten und speziellen Sensoren ausgerüstet und zu einem Aggregat zusammengefaßt. Das Batterieaggregat besteht aus 48 Traktionszellen, die zu einem 96 V Block zusammengeschaltet sind. Jede Zelle wurde mit einem Rekombinator, einem Temperaturfühler zur Erfassung der Rekombinatortemperatur und einer Elektrolythebepumpe bestückt. Die einzelnen Pumpen wurden mit einer Befeuchterzelle und einer Membranpumpe zu einem Gaskreislauf zusammengefaßt. Die Restgasaustrittsöffnungen der Rekombinatoren wurden über eine Sammelleitung verbunden und in den Kreislauf integriert (Bild 3.1).

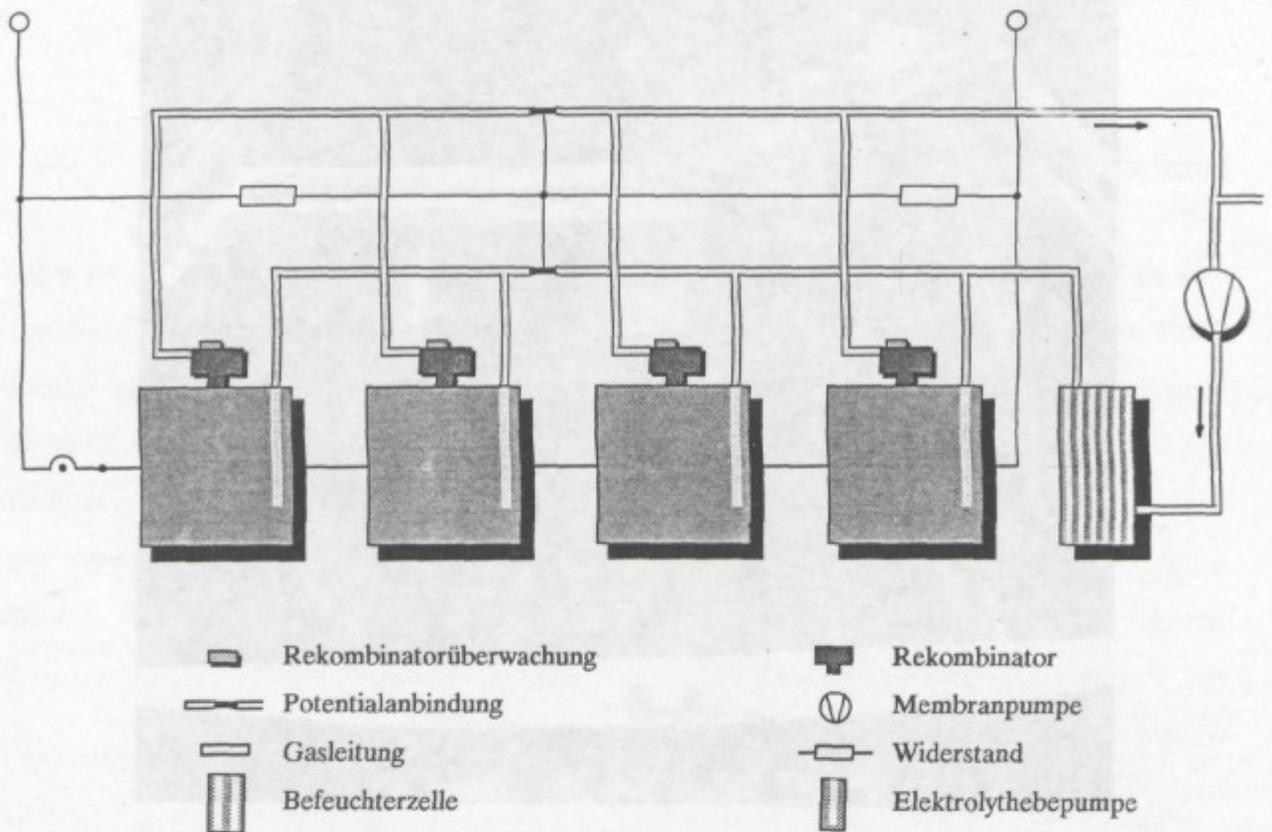


Bild 3.1: Prinzipieller Aufbau des Batterieaggregates ohne Pilotzelle

Eine Zelle (Pilotzelle) besitzt spezielle Sensoren zur Erfassung batterierelevanter Größen /1/.

3.1 Komponenten zur Verbesserung des Batterieverhaltens

Die einzelnen Komponenten zur Verbesserung des Batterieverhaltens werden nun eingehend erklärt.

3.1.1 Elektrolytumwälzung

Während der Aufladung einer nicht umgewälzten Batterie kommt es zu einer Säureschichtung in jeder Zelle, indem sich dichtere Säure, aus den Poren austretend, am Boden anlagert. Zur Vermeidung der negativen Folgeerscheinungen einer Säureschichtung, wurde jede Zelle mit einer mechanischen Elektrolytumwälzung ausgerüstet /1/. In einer Elektrolythebepumpe, bestehend aus einem Doppelrohr, wird durch Einblasen von Luft in die erste Rohrhälfte nach dem Verdrängungsprinzip Säure größerer Dichte vom Boden der Zelle durch das zweite Rohr in den oberen Elektrolytraum gefördert. Die Umwälzluft wird von einer Membranpumpe über eine Sammelleitung in die einzelnen Pumpen geleitet. Jedes Anschlußstück besitzt eine Querschnittsreduzierung, damit vor jeder Pumpe der gleiche Druck aufgebaut wird. So wird gewährleistet, daß alle Zellen gleichzeitig und gleichmäßig umgewälzt werden. Bei den eingesetzten Elektrolythebepumpen handelt es sich um eine Entwicklung des RWE. Die Pumpen sind aufgrund ihrer kleinen Baugröße speziell für den Einsatz in kompakten Traktionszellen geeignet.

3.1.2 Gasrekombination

Durch den Einsatz einer Elektrolytumwälzung entfällt die sonst notwendige starke Überladung der Zellen. Dieses reduziert die entstehende Knallgasmenge und senkt den Wasserverbrauch. Aufgrund einer unterschiedlichen Selbstentladung der Elektroden tritt beim Laden eine geringe ladezustandsabhängige Gasung unterschiedlicher Zusammensetzung auf /1/, die entsorgt werden muß. Der Rekombinator setzt den stöchiometrischen Anteil dieses Gasgemisches in Wasser um und führt ihn wieder der Zelle zu. So wird der größte Teil des entstehenden Knallgases vernichtet und der Wasseraustrag aus den Zellen verringert. Der unstöchiometrische Gasanteil entweicht aus der Rekombinatoröffnung in den Gaskreislauf. Im Rahmen des Vorhabens wurden handelsübliche Rekombinatoren

(8 ATK, VARTA) mit einem maximalen Rekombinationsstrom von 8 A eingesetzt.

3.1.3 Gemeinsame Gaszuführungen

Eine Membranpumpe versorgt alle Elektrolythebepumpen über eine gemeinsame Gasleitung mit Luft (Kap. 3.1.1). Trotz der eingesetzten Rekombinatoren wird, wie in Kap. 3.1.2 beschrieben, ein unstöchiometrischer Gasanteil durch die Austrittsöffnung nach Außen abgegeben. Um eine gezielte Gasentsorgung zu gewährleisten, sind alle Rekombinatoren entsprechend dem Bild 3.1 ebenfalls über eine Sammelleitung miteinander verbunden. Beide Sammelleitungen sind zu einem Gaskreislauf zusammengeschlossen, wodurch überschüssiges Gas über die Umwälzung den Rekombinatoren teilweise wieder zugeführt wird. Da aber während des Betriebes unterschiedliche Gasvolumen an Sauerstoff und Wasserstoff entstehen, die nicht vollständig rekombiniert werden können, darf der gesamte Kreislauf nicht geschlossen werden. Über eine Öffnung kommuniziert der Kreislauf mit der Umluft.

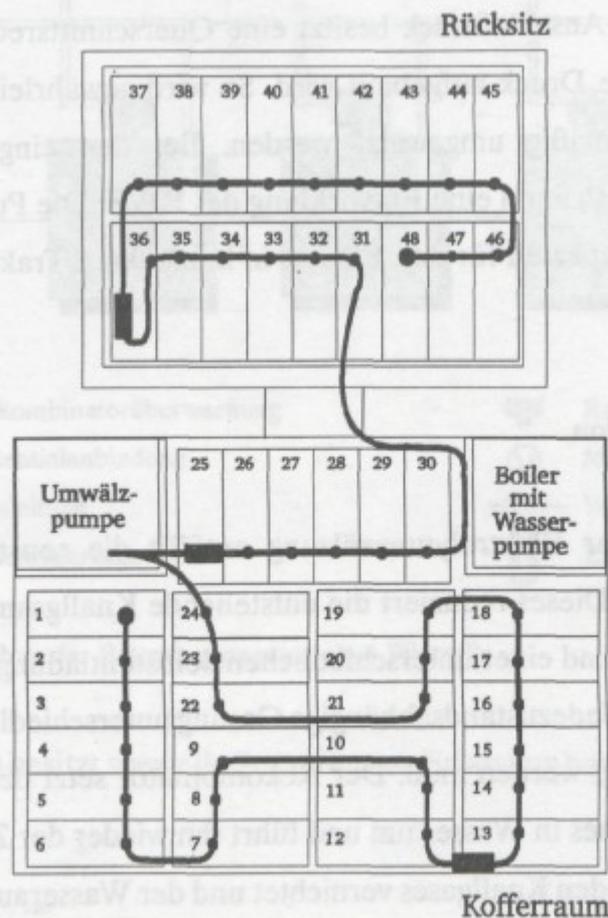


Bild 3.2: Anordnung der Sammelleitungen

Beide Sammelleitungen verlaufen parallel zu den einzelnen Zellen (siehe [Bild 3.3](#)). Aus sicherheitstechnischen Gründen (vergleiche [Kap. 3.1.4](#)) sind beide Sammelleitungen in 2 Sektoren aufgeteilt. Die Umwälzluft wird in der Mitte des Verbandes ([Bild 3.2](#)) eingeleitet. In dem ersten Sektor verlaufen die Leitungen entgegen dem Potentialverlauf von Zelle 24 zur Zelle 1 und in dem zweiten Sektor folgen sie dem Potential von Zelle 25 zur Zelle 48. Durch diese Anordnung wird vermieden, daß auf den Gasleitungen höhere Spannungspotentiale auftreten, wodurch die Gefahr einer Knallgasentzündung reduziert wird.

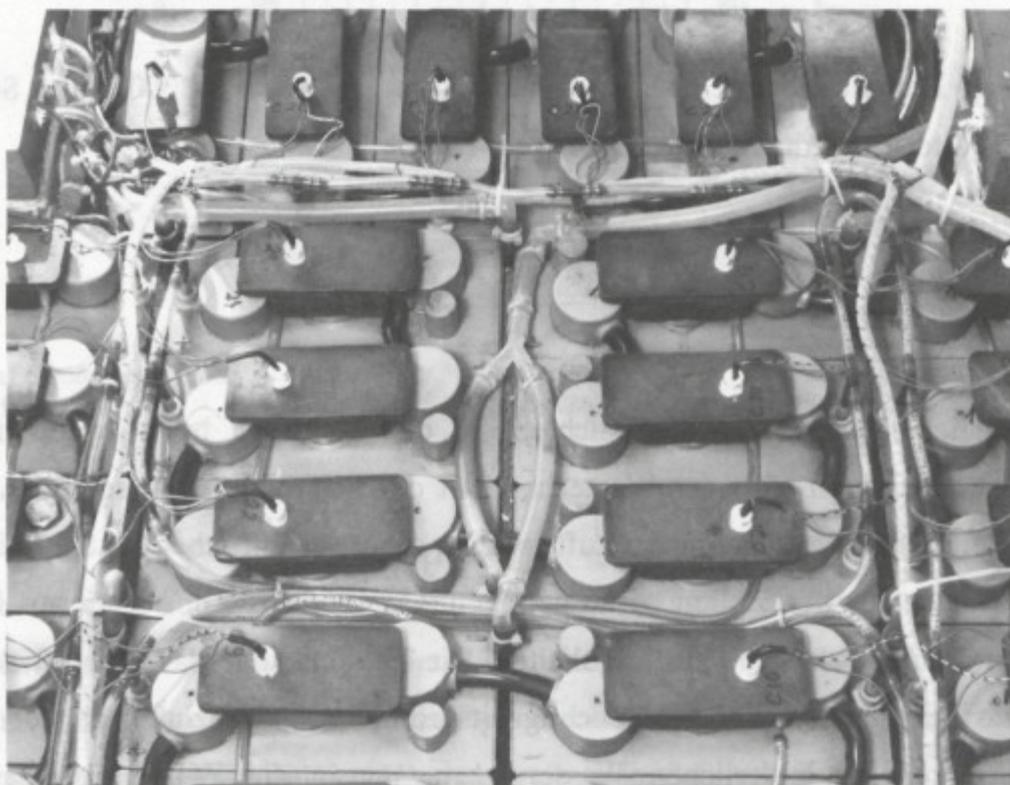


Bild 3.3: Teilansicht des Batterieverbandes im CitySTROMer

3.1.4 Potentialanbindung

Das überschüssige Gas wird über eine gemeinsame Leitung abgeführt. Schwefelsäurepartikel, die durch das Gas mitgeschleppt werden, lagern sich in der Leitung ab und bilden einen Elektrolytfilm. Die Gasleitungen bilden so einen elektrischen Nebenschluß über den parasitäre Ströme fließen können. Beim Abriß des Filmes besteht, wie Voruntersuchungen zeigten, die Gefahr, daß durch eine hohe Feldstärke ein Zündfunken entsteht, der in den Leitungen vorhandenes Knallgas zünden und dadurch das Aggregat teilweise

zerstören kann. Aus diesem Grund wurde bei jeder 12. Zelle ($\Delta U = 24 \text{ V}$) ein Metallröhrchen in die Gasleitungen eingesetzt (Bild 3.2). Über eine Widerstandskette ($4 \times 1000 \text{ Ohm}$) wird eine Potentialanbindung realisiert, die die maximale Spannung in den einzelnen Gasleitungsabschnitten auf 24 V begrenzt. Hierdurch wird eine Zündfunkenbildung verhindert. Über die Widerstandskette fließt ein konstanter Strom von

$$I_P = \frac{96 \text{ V}}{4000 \text{ } \Omega} = 24 \text{ mA} \quad (3.1)$$

Der geringe Entladestrom belastet die Traktionsbatterie. Nach ca. 300 Tagen Stillstand wäre die Batterie hierdurch entladen.

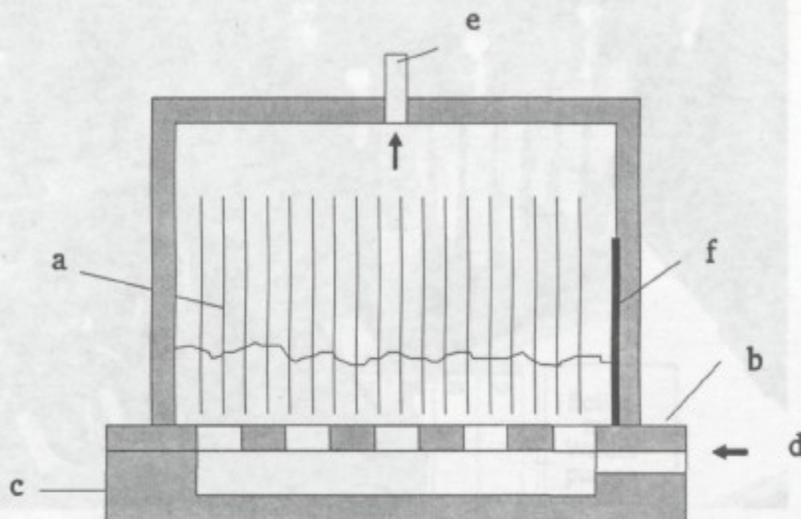
3.1.5 Befeuchterzelle

Zur Vergleichmäßigung der Säuredichte wird der Elektrolyt beim Laden mit Luft umgewälzt. Hierdurch wird der Wasserhaushalt der Schwefelsäure beeinflusst. Ist der Feuchtigkeitsgehalt der zugeführten Luft geringer als in der Luft über der Schwefelsäure, so wird Wasser aus den Zellen herausgetragen. Umgekehrt wird Wasser aus feuchter Umluft in der Schwefelsäure zurückgehalten. Die Tatsache, daß das Elektrolytvolumen durch eine Einflußnahme auf den Feuchtigkeitsgehalt der Umwälzluft verändert werden kann, wird zur kontinuierlichen Wassereinbringung in die Zellen und damit zur Reduzierung des Wasserverlustes ausgenutzt. Hierzu wurde eine spezielle Befeuchterzelle (Bild 3.4) entwickelt und in den Gaskreislauf integriert. Die Luft wird durch einen Einlaßstutzen (d) in die Verteilerkammer (c) geleitet. Von dort tritt sie durch eine Lochplatte (b) in ein Strömungsregister, welches aus einem Paket von porösen Separatoren (a) besteht, die in destilliertes Wasser eintauchen. Sie saugen sich mit Flüssigkeit voll und sind so angeordnet, daß sie Luft von unten durchströmen und sich mit Feuchtigkeit sättigen kann.

Die maximal mögliche Befeuchtungsmenge Δf_{\max} ergibt sich aus der Differenz der Sättigungsmenge über der Schwefelsäure und der feuchten Luft aus der Befeuchterzelle.

Für 20° C Raumtemperatur gilt:

$$\begin{aligned}\Delta f_{\max} &= f_{(H_2O)} - f_{(H_2SO_4)} \\ &= 17,3 \text{ g/m}^3 - 13,0 \text{ g/m}^3 \\ &= 4,3 \text{ g/m}^3\end{aligned}\quad (3.2)$$



- | | | |
|----------------------|------------------|----------------------|
| a) Strömungsregister | b) Lochplatte | c) Verteilerkammer |
| d) Einlaßstutzen | e) Auslaßstutzen | f) Füllstandsanzeige |

Bild 3.4: Aufbau der Befeuchterzelle

Über das Volumen und die Feuchtigkeit der Umwälzluft kann der Füllstand der Zellen beeinflusst werden. Vorversuche ergaben, daß beim Einsatz der verwendeten Membranpumpe ein Verhältnis der Umwälzzeit zu Pausenzeiten von 1 : 5 eine ausreichende Elektrolytdurchmischung gewährleistet. Hieraus ergibt sich, daß jede Zelle mit $V_{\max} = 1 \text{ l/h}$ Umwälzluft durchströmt wird. Der Elektrolyt jeder Zelle wird dann bei laufender Umwälzung mit folgender Wassermenge angereichert:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{m} &= \Delta f_{\max} \cdot V_{\max} \\ &= 4,3 \text{ g/m}^3 \cdot 1 \text{ l/h} \\ &= 0,0043 \text{ g/h}\end{aligned}\quad (3.3)$$

Welchen quantitativen Einfluß die Befeuchtung auf den Wasserhaushalt der Zelle und auf eine Verringerung der Wassernachfüllzeiten hat, zeigen die durchgeführten Fahrversuche.

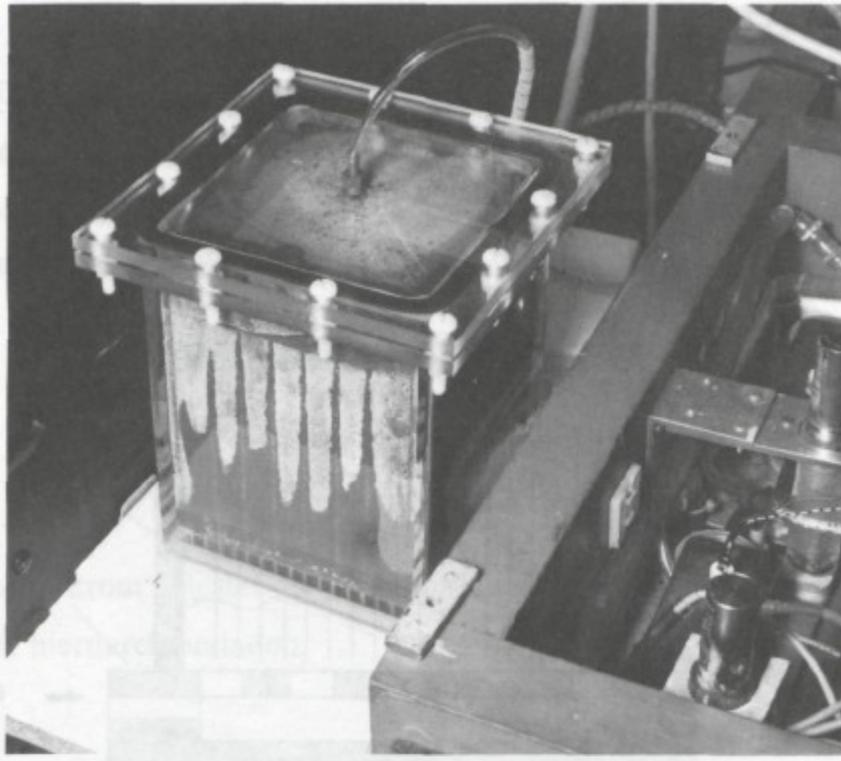


Bild 3.5: Befeuchterzelle

3.1.6 Klimatisierung

Die verfügbare Kapazität einer Bleibatterie wird unter anderem durch die Temperatur des Elektrolyten beeinflusst. Diese ist abhängig von der Umgebungstemperatur und der Eigenerwärmung während des Betriebes. Niedrige Temperaturen verringern die Diffusionsgeschwindigkeit der Ionen und führen zu einer geringeren entnehmbaren Ladungsmenge. Während des Zyklensbetriebes erwärmen sich die Zellen, so daß durch den Wärmestau im Aggregat ein Temperaturgefälle von den inneren zu den äußeren Zellen entsteht. Um diese Einflüsse zu reduzieren wurden in Zusammenarbeit mit dem RWE zur Klimatisierung spezielle Wärmetaschen an den Stirnseiten der Zellen (siehe [Bild 3.6](#)) montiert. Als Wärme- bzw. Kühlmedium wird Wasser mit Frostschutzmittel verwendet, welches das Einfrieren des Mediums bei tiefen Temperaturen verhindert. Mit einer Wasserpumpe wird das Wasser/Frostschutzgemisch durch die Leitungen transportiert. In den Kreislauf ist ein 220V - Boiler installiert, der während des Ladens der Batterie eine Aufwärmung auf 24°C gewährleistet. Eine temperaturbedingte Volumenänderung des Kühlmediums wird durch ein Ausdehnungsgefäß abgefangen. Das Gefäß ist über dem Trogniveau so angeordnet, daß Luftblasen aus dem Klimatisierungskreislauf entweichen

können. Während des Fahrbetriebes wird durch die Umwälzung des Mediums, ohne dessen Aufheizung, eine Vergleichmäßigung der Einzelzellentemperaturen erreicht.

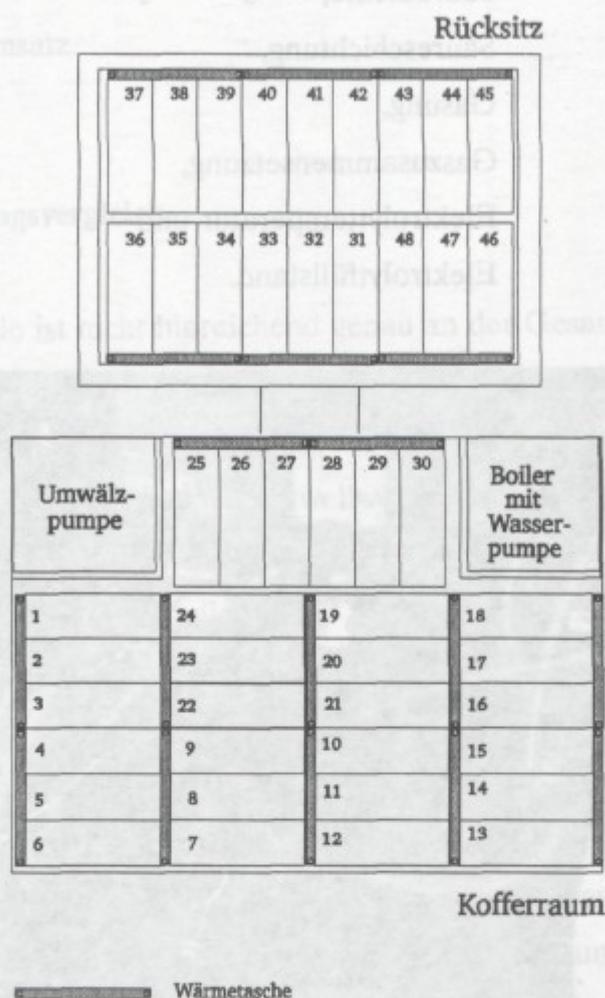


Bild 3.6: Anordnung der Wärmetaschen

3.2 Erfassung batterierelevanter Größen in einer Pilotzelle

Der Zusammenschluß aller Zellen zu einem Aggregat, der gemeinsame Betrieb und eine Einzelzellenüberwachung lassen eine gleichmäßige Entwicklung der einzelnen Zellen erwarten. Damit ist die Voraussetzung geschaffen, repräsentative Meßgrößen über das gesamte Aggregat in nur einer Zelle, einer Pilotzelle, zu erfassen. Es wurde eine Pilotzelle mit speziellen Meßfühlern (siehe Bild 3.7) ausgerüstet, die Daten zur Betriebsführung, zur Erfassung des Ladezustandes, zur Überwachung des Energieflusses und zum Schutz des Aggregates liefert.

Im einzelnen enthält die Pilotzelle Meßfühler zur Erfassung folgender Größen:

- Säuredichte,
- Säureschichtung,
- Gasung,
- Gaszusammensetzung,
- Elektrolyttemperatur und
- Elektrolytfüllstand.



Bild 3.7: Differentialrekombinator und Säuresensoren

Die einzelnen Meßfühler wurden in vorausgegangenen Forschungsvorhaben entwickelt /1/,/2/ und in den Abschlußberichten ausführlich dokumentiert.

3.3 Einzelzellenüberwachung

Die Aggregatbildung des Batteriespeichers vergleichmäßig das Verhalten der einzelnen Zellen. Dieses ist von Bedeutung, da ein abweichendes Verhalten einzelner Zellen einen großen Einfluß auf das Verhalten des gesamten Batterieverbandes z.B. auf die

entnehmbare Ladungsmenge hat. Um auftretende Abweichungen einzelner Zellen, wie die Änderung der Entladeschlussspannung oder des Ladezustandes rechtzeitig erfassen zu können, kommt eine Blockspannungs-Überwachung und eine Einzelrekombinator-Überwachung zum Einsatz.

3.3.1 Blockspannungsvergleich

Der Ausfall einer Zelle ist nicht hinreichend genau an der Gesamtspannung erkennbar. In dem Aggregat wird daher die Spannungsdifferenz von 2 Blöcken (à 24 Zellen) gemessen und mit einem Schwellwert verglichen /5/. Auf diese Weise ist der Ausfall einer Einzelzelle registrierbar. Tritt eine Schwellwertüberschreitung auf, so erhält der Bordrechner ein Signal. Die Lokalisierung der defekten Zelle ist dann über eine manuelle Einzelzellenmessung möglich.

3.3.2 Einzelrekombinator-Überwachung

Mit dem Differential-Rekombinator der Pilotzelle wird das Gasungsverhalten während der Vollladung erfaßt welches zur Laderegelung und zur Erfassung des Vollladezustandes herangezogen wird. Darüber hinaus wird mit einer einfachen Einzelrekombinator-Überwachung das Einsetzen der Gasung jeder Zelle registriert. Die Temperaturerfassung der Einzelrekombinatoren übernimmt ein NTC-Meßfühler (siehe Bild 3.8) /6/. Auftretende Abweichungen der Rekombinatortemperaturen deuten auf unterschiedliche Ladegrade, Zellenundichtigkeiten oder verminderte Leistungsfähigkeit einzelner Rekombinatoren hin. Unterschiedliche Ladegrade am Ende einer Ladung können durch eine unterschiedliche Selbstentladung einzelner Zellen bedingt sein. Hier ist gegebenenfalls eine Nachladung erforderlich. Diese könnte mit Hilfe der Informationen der Einzelrekombinator-Überwachung automatisch eingeleitet werden. Die entwickelte Überwachungseinheit wurde im Rahmen dieses Vorhabens lediglich zur Beobachtung und Analyse des Einzelzellenverhaltens eingesetzt.

Bild 3.1: Blockschaltbild Bordrechnerystem

Das Bordrechnerystem ist zum größten Teil in einem 19" Baugruppenträger unter-

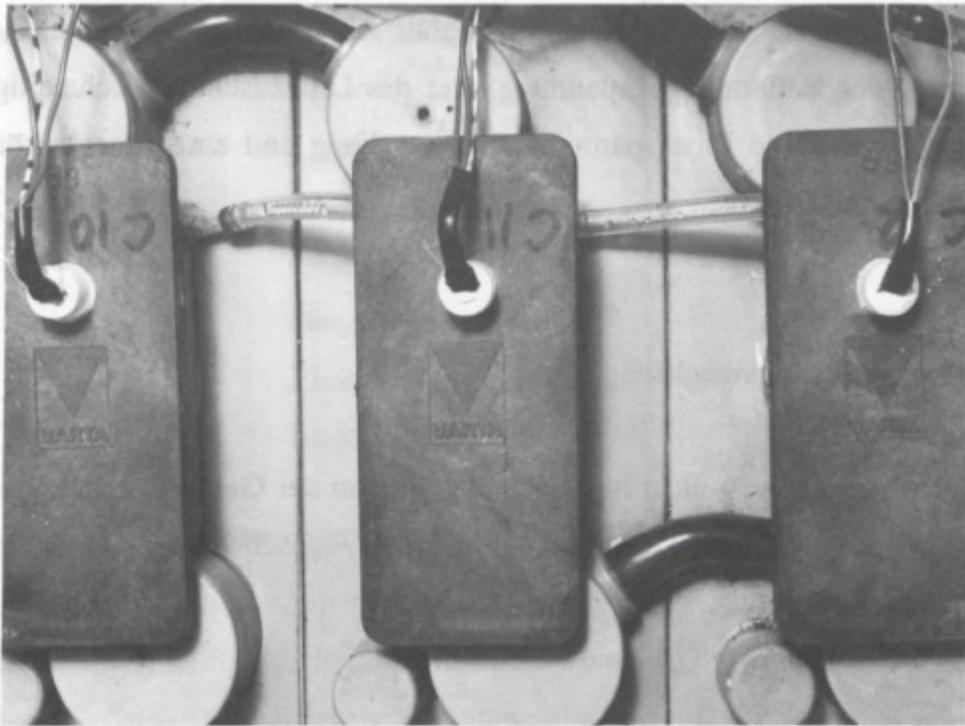


Bild 3.8: Rekombinatoren mit Meßfühlern

4 Bordrechnersystem

Zur Datenverarbeitung und Durchführung einer angepaßten Betriebsführung der Antriebsbatterie dient ein spezielles Bordrechnersystem. Das Bordrechnersystem wurde nicht unter dem Gesichtspunkt einer späteren serienmäßigen Ausstattung für Elektrofahrzeuge, sondern im Rahmen dieses Vorhabens aufgrund seiner flexiblen Programmierbarkeit und umfangreichen Möglichkeiten der Datenerfassung ausgewählt. Den prinzipiellen Aufbau des Rechnersystems zeigt das Blockschaltbild Bild 4.1.

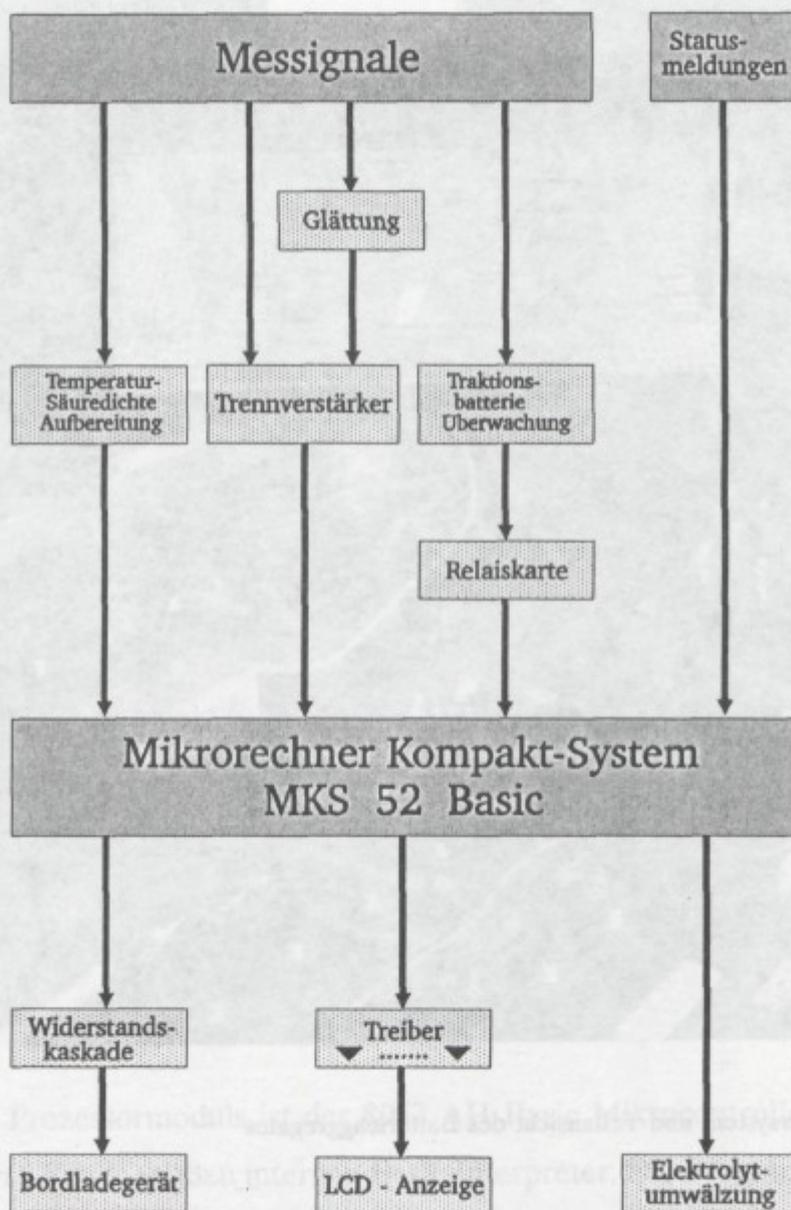


Bild 4.1: Blockschaltbild Bordrechnersystem

Das Bordrechnersystem ist zum größten Teil in einem 19" Baugruppenträger unter-

gebracht, der auf einer Halterung über dem Batterietrog befestigt ist (siehe [Bild 4.2](#)). Das System enthält folgende Komponenten:

- Mikroprozessor Kompakt-System MKS 52 Basic
- Meßwertaufbereitung der analogen Meßsignale
- Traktionsbatterie-Überwachung
- Rekombinatoren-Einzelüberwachung
- Spannungsversorgung

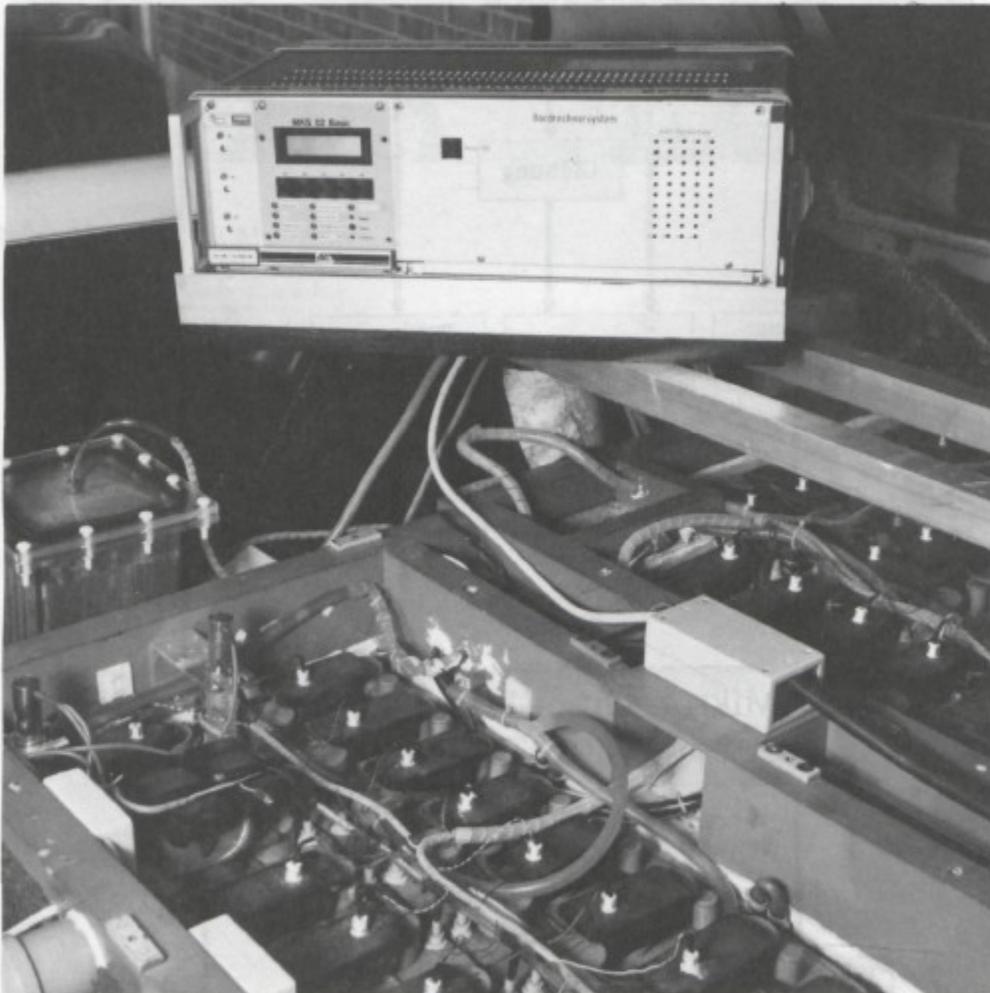


Bild 4.2: Bordrechnersystem und Teilansicht des Batterieaggregates

Eine Ladezustands / Temperatur-Anzeige ist in der Mittelkonsole im Blickfeld des Fahrers installiert (siehe [Bild 4.3](#)).

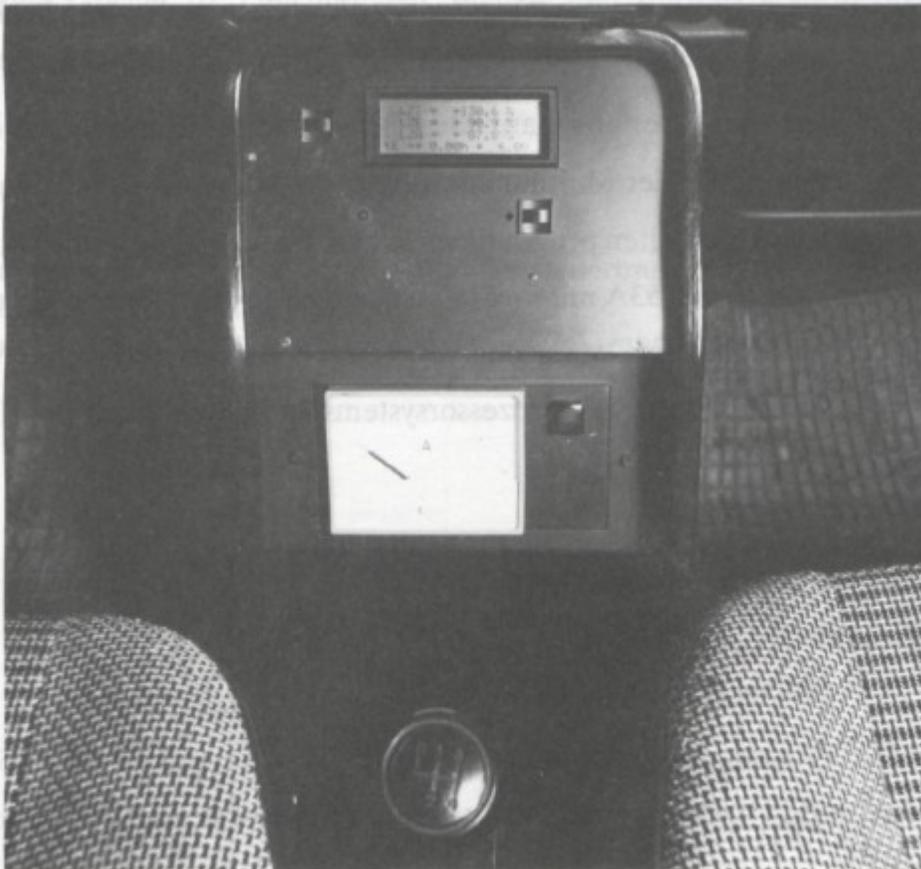


Bild 4.3: Anzeigedisplay in der Mittelkonsole

4.1 Rechnerstruktur

Das Mikroprozessor-Kompakt-System MKS 52 Basic ist ein in sich geschlossenes System für die Bearbeitung von dezentralen Meß-, Steuerungs- und Regelungsaufgaben /7/. Es ist aus den nachfolgend beschriebenen drei Modulen aufgebaut.

Prozessormodul

Kernstück des Prozessormoduls ist der 8052 AH Basic Mikrocontroller von der Firma Intel mit einem 8 KByte großen internen Basic-Interpreter. Die Programmierung ist über eine serielle Schnittstelle von einem Personal Computer aus möglich. Das im 32 KByte großen RAM befindliche Programm kann mit Hilfe eines Piggy Back Moduls direkt im System in einem EPROM gespeichert werden. Dies ermöglicht unkomplizierte Änderungen der Software vor Ort. Assembler-Routinen zur Unterstützung der Peripheriekom-

ponenten können vom Basic aus eingebunden werden. Sie werden auf herkömmliche Weise extern auf einem weiteren EPROM programmiert. Für häufig benötigte Peripheriefunktionen wie serielle/parallele Schnittstelle, Zähler/Zeitgeber und Unterbrechungssteuerung ist der Multifunktionsbaustein MUART 8256 vorgesehen, der in seinem funktionellen Verhalten programmierbar ist. Gleiches gilt für den zusätzlichen Zähler/Zeitgeber-Baustein 8253A mit drei unabhängigen 16-Bit Zählern. Eine Echtzeituhr, die jederzeit das aktuelle Datum und die Uhrzeit liefert, sowie eine Watchdog-Schaltung für die Überwachung des Prozessorsystems ist ebenfalls auf dem Prozessor-modul integriert /7/.

Frontplattenmodul

Eingriffe in den Programmablauf können über die Funktionstasten F1-F5 auf der Frontplatte (siehe Bild 4.4) vorgenommen werden. Eine zweizeilige alphanumerische



Bild 4.4: Display und Bedienungselemente des Bordrechnersystems

LCD-Anzeige, sowie 10 Leuchtdioden dienen der Informationsausgabe /7/. Die Tastenbelegung und die Bedeutung der Leuchtdioden für die Batteriebetriebsführung sind in Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 dargestellt.

Hauptmenue
F1-F5

F1 - Pumpensteuerung

F1 = Elektrolyt-Umwälzpumpe An/Aus
F2 = Wasser-Umwälzpumpe An/Aus

F2 - Fahrzyklen-Ausgabe

F1 = Fahrzyklus drucken
F2 = Nächster Fahrzyklus

F3 - Fahrprotokoll

F1 = Start
F2 = Ende
F3 = Ausgabe an PC

F4 - Ladeprotokoll

F1 = Datenreihe an PC

F5 - Reset Rekoüberwachung

Tabelle 4.1: Bedeutung der Funktionstasten

Kontrolleuchte	aus	an	blinkend
Ladegerät	außer Betrieb	in Betrieb	Abbruchladung
Volladesignal	keine Vollladung	VLS Diff.-Reko.	VLS Ladefaktor
Elektrolytumwälzung	außer Betrieb	in Betrieb	
Füllstand	in Ordnung	nicht in Ordnung	
Blockspannung	in Ordnung	nicht in Ordnung	
Isolation	in Ordnung	nicht in Ordnung	
Rekoüberwachung	Ladegerät an: Temp. erreicht	Temperatur nicht erreicht	
Daten nach PC	Speicherplatz vor- handen	Fahrzyklenspeicher voll	
Wasserpumpe	außer Betrieb	in Betrieb	
LED (rot) Konsole	keine Störung	Sammelstörung	Übertemperatur

Tabelle 4.2: Bedeutung der Leuchtdioden

Interfacemodule

Das Interfacemodul ermöglicht die Verarbeitung von analogen und digitalen Signalen und die Ansteuerung von externen Stellgliedern. Für diese Aufgabe sind nachstehend aufgeführte Ein- und Ausgänge vorhanden /7/:

- ▶ 8 analoge Eingänge mit 12 Bit Auflösung,
- ▶ 2 analoge Ausgänge mit 12 Bit Auflösung,
- ▶ 8 digitale Ein-/Ausgänge, welche über Optokoppler galvanisch vom Mikroprozessorsystem getrennt sind,
- ▶ 8 digitale Ein-/Ausgänge mit TTL-Pegel,
- ▶ serielle Schnittstelle mit RS232-Pegelumsetzer oder passiver 20 mA Stromschleife.

4.2 Meßsignalerfassung und -aufbereitung

Alle Meßsignale wurden auf den Eingangsspannungsbereich der analogen Eingänge von $\pm 10V$ angepaßt. Tabelle 4.3 zeigt die Meßsignale und ihre Aufbereitung. Zusätzlich werden hochfrequente Störungen, die durch die Thyristorsteuerungen des Antriebsstellers bzw. des Ladegerätes verursacht werden, mit Hilfe von aktiven Tiefpaßfiltern herausgefiltert [8]. Die Meßsignale der Traktionsbatterie-Überwachungskarte und der Rekombinatoren-Einzelüberwachung werden als digitales Signal an den Bordrechner weitergegeben (siehe Tabelle 4.2).

Analoge Meßgrößen	Meßfühler	Aufbereitung
Batteriespannung	-	Trennverstärker
Batteriestrom Fahrbetrieb: $\pm 300 A$ Ladung: $0-18 A$	Shunt 250 A/60 mV 15 A/60 mV	Trennverstärker Relaisumschaltung zwischen beiden Shunts
mittlere Säuredichte	IAM 500 0-5 V	Verstärker
obere Säuredichte	IAM 30 0-5 V	Verstärker
Batterietemperatur $\pm 200 ^\circ C$	Pt 100	Wheatstone'sche Meßbrücke, Elektrometersubtrahierer, Verstärker
Umgebungstemperatur $\pm 200 ^\circ C$	Pt 100	Wheatstone'sche Meßbrücke, Elektrometersubtrahierer, Verstärker
Reko1-Temperatur $\pm 200 ^\circ C$	Pt 100	Wheatstone'sche Meßbrücke, Elektrometersubtrahierer, Verstärker
Reko2-Temperatur $\pm 200 ^\circ C$	Pt 100	Wheatstone'sche Meßbrücke, Elektrometersubtrahierer, Verstärker

Tabelle 4.3: Analoge Meßgrößen

4.3 Schnittstellen

Als Verbindung zwischen dem Rechner und seiner Umwelt ist eine Anzahl verschiedener Schnittstellen erforderlich, um Eingriffe in das Programm zu ermöglichen oder

Informationen aus dem Rechner auszugeben. In Tabelle 4.4 sind die verwendeten Schnittstellen aufgelistet.

Schnittstelle	Funktion
serielle Schnittstelle	Programmänderungen, Wertänderungen von Konstanten bei laufendem Programm, Datenausgabe
externe LCD-Display Mittelkonsole	Ladezustandsanzeige, Fahrzeitangabe, Temperaturanzeige (siehe <u>Bild 4.3</u>)
interne LCD-Display Frontplattenmodul	Menüführung der Funktionstasten Säuredichtenanzeige zur Abgleichzwecken der Ladezustandsanzeige (siehe <u>Bild 4.4</u>)
Funktionstasten Frontplattenmodul	Menügeführte Steuerung der Pumpen, der Eckdatenausgabe, der Fahrprotokolle und der Ladeprotokolle vor Ort (siehe <u>Bild 4.4</u> und <u>Tabelle 4.1</u>)
Leuchtdioden Frontplattenmodul	Statusanzeigen, Störungsmeldungen (siehe <u>Bild 4.4</u> und <u>Tabelle 4.2</u>)

Tabelle 4.4: Schnittstellen des Bordrechnersystem

4.4 Spannungsversorgung

Die für die elektronischen Bauteile notwendigen Versorgungsspannungen von ± 15 V und $+5$ V werden von einem Spannungs-Wandler aus dem 12 V Bordnetz erzeugt. Dabei wird die Bordnetzatterie mit einem Strom von ca. 1.5 A ständig belastet. Es entfallen 800 mA auf das MKS-52 Mikrorechnersystem /7/ und 700 mA auf die Stromversorgung der Meßwerterfassungseinheiten. Bei längeren Standzeiten ohne Fahr- oder Ladebetrieb bestand die Gefahr einer Entladung der Bordnetzatterie und damit ein Ausfall des Rechnersystems.

5 Batteriebetriebsführung

Zum optimalen Betreiben des Batterieaggregates wurde neben der Installation peripherer Komponenten und Sensoren eine übergeordnete Batteriebetriebsführung konzipiert. Die Betriebsführung übernimmt die Funktionen der Batterieüberwachung, der Laderegelung, der Ladezustandserfassung, der Ansteuerung der Elektrolytumwälzung und Klimatisierung und im Rahmen dieses Vorhabens der ausführlichen Datenerfassung und Dokumentation. Sie wurde mit dem in Kap.4 beschriebenen Bordrechnersystem realisiert. Ihre Aufgaben werden im folgenden erläutert.

Eine direkte Einflußnahme auf die Batterie haben

- ▶ Antriebssteuerung,
- ▶ Bordladegerät,
- ▶ Bordrechner und
- ▶ Fahrer,

die sich gegenseitig beeinflussen. Entsprechend Blockschaltbild Bild 5.1 wirkt das Bordrechnersystem direkt über die Steuerung der Elektrolytumwälzung und die Klimatisierung auf die Antriebsbatterie ein. Im Fahrbetrieb wird der Fahrer über den aktuellen Zustand der Antriebsbatterie informiert. Das Fahrverhalten des Fahrers beeinflusst über die Antriebssteuerung die Entladung der Batterie. Ein direkter Eingriff des Rechners in die Antriebssteuerung z.B. in Form einer Leistungsreduzierung in Abhängigkeit des Ladezustandes war vorerst nicht vorgesehen. Bei der Ladung steuert der Rechner über das Bordladegerät die Nachladephase und beendet nach Erreichen des Vollladezustandes die Ladung.

5.1 Überwachungsfunktionen

Die Batteriebetriebsführung nimmt eine Reihe von Überwachungsfunktionen war. Neben den üblicherweise im CitySTROMer vorhandenen Überwachungsfunktionen, wie Blockspannungsvergleich, Elektrolytfüllstandskontrolle und Isolationsüberwachung (siehe Kap. 2 und Kap. 3.3.1) wird im Rahmen dieses Vorhabens eine zusätzliche Überwachung der

Batterietemperatur und der Rekombinatoren jeder Einzelzelle (Kap.3.3.2) durchgeführt. Für den Fahrbetrieb ist in der Antriebssteuerung eine zusätzliche Temperaturabschaltung eingebaut.

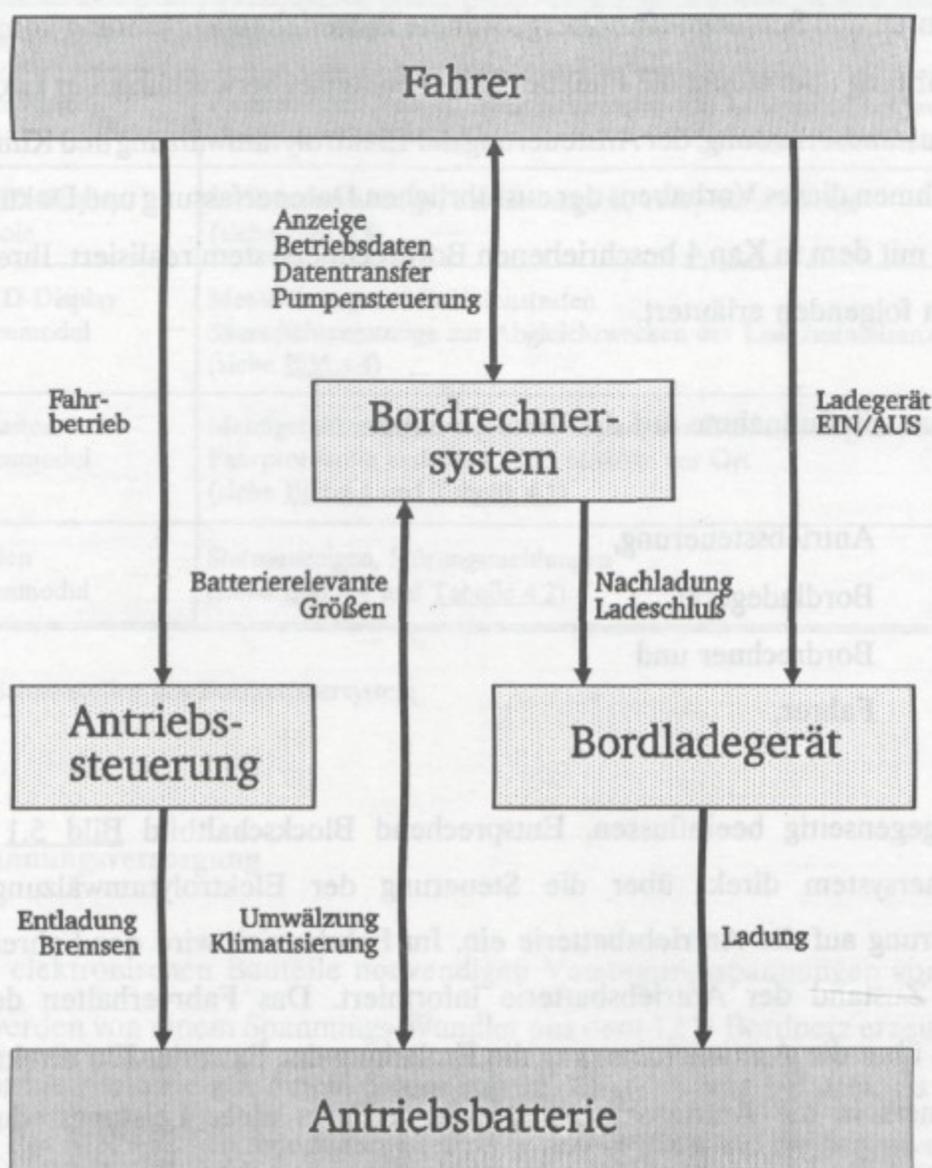


Bild 5.1: Blockschaltbild der Betriebsführungsstruktur

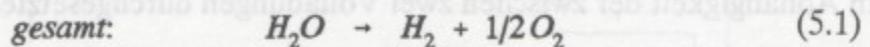
Werden vorgegebene Grenzwerte erreicht, so wird dieses entsprechend Tabelle 4.2 über Leuchtdioden angezeigt (siehe Bild 4.4). Die Überwachung der Einzelrekombinatoren wird zur Reduzierung des eigenen Energieverbrauchs zu Beginn einer Ladung eingeschaltet und bei Beginn einer Entladung wieder ausgeschaltet. Die Überwachung der Batterietemperatur hat direkten Einfluß auf den Ladevorgang. Bei erhöhter Batterietemperatur wird der Ladevorgang, falls der Ladefaktor kleiner 1 ist, unterbrochen. Erst nachdem die Batterie auf einen unteren Grenzwert abgekühlt ist, wird der Ladevorgang fortgesetzt. Ist der Ladefaktor größer 1, führt eine Übertemperatur zum Abbruch der Ladung. Dieses

schützt die Batterie vor einer Überladung z.B. bei einem fehlerhaften Ladevorgang.

5.2 Laderegelung

Während der Ladung einer Batterie erhöhen sich mit zunehmendem Ladegrad die Potentiale der Elektroden. Noch bevor die Umwandlung der Elektrode abgeschlossen ist setzt die Nebenreaktion der Wasserzersetzung verstärkt ein. Dies geschieht nach folgenden Reaktionsgleichungen:

Nebenreaktion:



An der positiven Elektrode entsteht Sauerstoffgas, an der negativen Wasserstoffgas. Die Reaktionen setzen aufgrund der unterschiedlichen Selbstentladung der Platten nicht gleichzeitig ein. Die Gasung ist Anfangs nicht stöchiometrisch [1]. Über die Temperaturen des Differentialrekombinators (T_{R1} , T_{R2}) und der Umgebung (T_U) werden die stöchiometrische und die überschüssige Wasserstoffgasung erfaßt und auf einen Gasungsstrom umgerechnet:

$$I_{H_2O} = k (T_{R1} - T_U) \quad (5.4)$$

$$I_{H_2} = k (T_{R2} - T_U) \quad (5.5)$$

$$k = 0,088 \text{ A/K}$$

Mit der Kenntnis der Gasungsströme I_{H_2} und I_{H_2O} ist eine direkte Begrenzung und Regelung des Ladestromes und eine genaue Bestimmung des Ladeschlusses möglich.

5.2.1 Regelung des Ladestromes in Abhängigkeit des Gasungsstromes

Sobald die Summe der Gasungsströme ($I_{H_2O} + I_{H_2}$) den Wert 0,8 A erreicht haben, wird der Ladestrom reduziert. Das installierte Ladegerät arbeitet nach einer W-Kennlinie und bei Gasungsbeginn ist der Ladestrom auf ca. 8 A zurückgegangen. Es wird dann auf einen Nachladestrom von 4 A umgeschaltet. Der konstante Nachladestrom garantiert eine schonende Vollladung der Batterie und ermöglicht im Gasungsbereich über die Auswertung der Gasungsströme eine genaue Erfassung des Vollladezustandes.

5.2.2 Ladeschlußkriterium

In Abhängigkeit der zwischen zwei Vollladungen durchgesetzten Ladungsmenge Q_E wird vor Beginn der Ladung entschieden, ob eine Abbruchladung ($Q_E < Q_Z$) oder eine Vollladung ($Q_E > Q_Z$) durchgeführt wird. Q_Z ist eine festgelegte minimale Entlademenge, nach der eine Vollladung durchgeführt wird. Eine Abbruchladung endet, sobald die Gasung der Batterie einsetzt (siehe Bild 5.2), d.h. die negative Elektrode vollständig

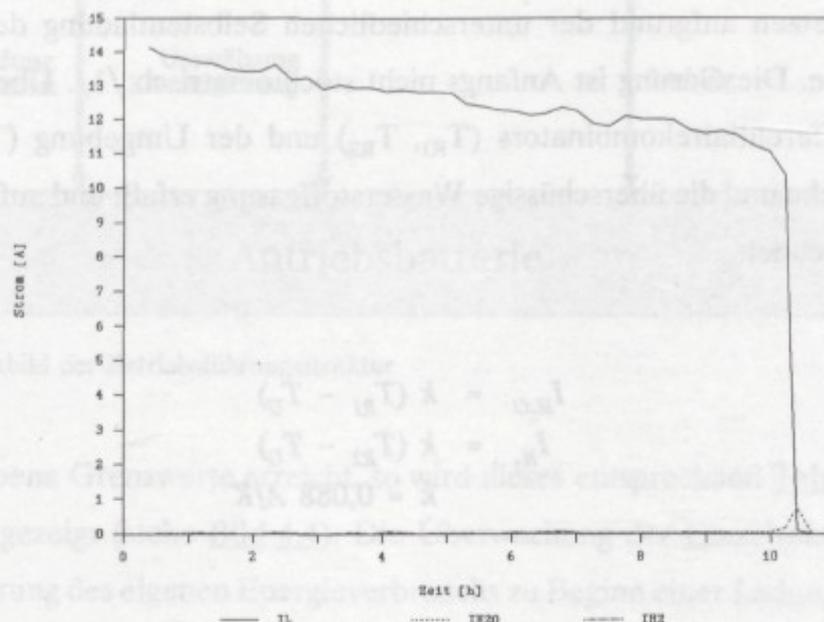


Bild 5.2: Verlauf des Ladestromes I_L und der Gasungsströme I_{H_2} und I_{H_2O} bei einer Abbruchladung

umgewandelt ist. Die Methode, eine Vollladung erst nach Erreichen einer größeren Entladungsmenge durchzuführen, hat den Vorteil, daß bei geringen Entladetiefen (kurze

Fahrstrecken) nicht jedesmal eine Vollladung durchgeführt wird, die mit einer längeren Gasungsphase verbunden ist. Hierdurch verringert sich der Wasseraustrag aus den Zellen. Eine Vollladung beinhaltet die Nachladephase mit konstantem Nachladestrom. Die Ladung wird bei annähernd stöchiometrischer Gasentwicklung beendet /1/ (siehe Bild 5.3).

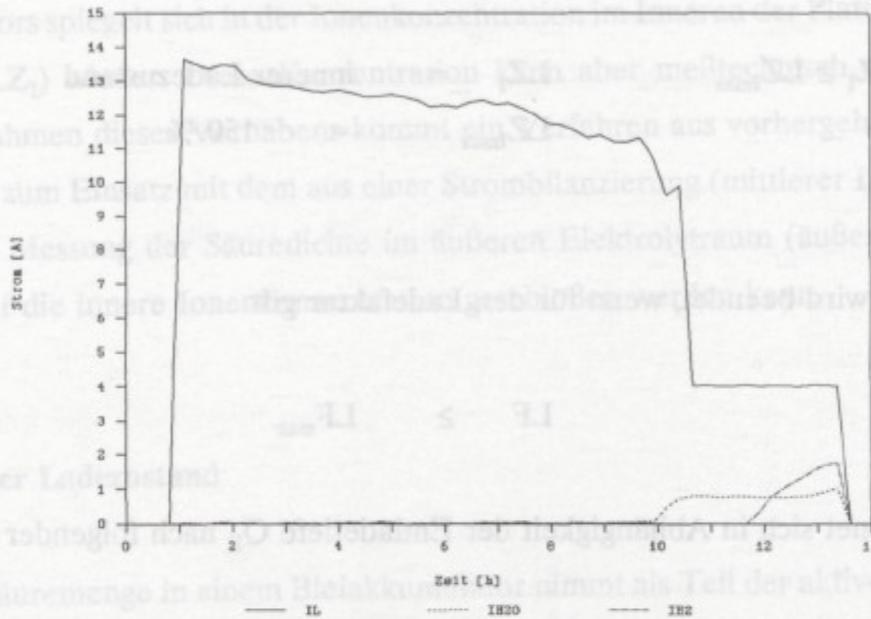


Bild 5.3: Verlauf des Ladestromes I_L und der Gasungsströme I_{H_2} und I_{H_2O} bei einer Vollladung

Bei Voruntersuchungen /1/ wurde festgestellt, daß der optimale Ladeschluß, d. h. vollständige Umwandlung beider Elektroden bei minimalem Ladefaktor ohne Kapazitätseinbußen erreicht ist, wenn die Wasserstoffgasung nach dem Erreichen ihres Maximums auf ca. 25 % des maximalen Wertes abgefallen ist. In Bild 5.3 ist eine Vollladung dargestellt, bei der nach diesem Kriterium die Ladung beendet wurde.

5.2.3 Sicherheitsvorkehrungen

Während der ersten Versuchsfahrten kam es aufgrund eines Defektes in der Temperaturerfassung des Differentialrekombinators zu einer unkontrollierten Überladung der Batterie. Aus sicherheitstechnischen Gründen wurden deshalb übergeordnete Strombegrenzungen eingeführt.

Der Ladestrom wird reduziert, wenn

$$1. \quad U_B \geq U_{\max} \quad \begin{array}{l} U_B = \text{Batteriespannung} \\ U_{\max} = 129,6 \text{ V} = 2,7 \text{ V pro Zelle} \end{array}$$

oder

$$2. \quad LZ_1 \geq LZ_{\max} \quad \begin{array}{l} LZ_1 = \text{innerer Ladezustand} \\ LZ_{\max} = 150 \% \end{array}$$

Die Ladung wird beendet, wenn für den Ladefaktor gilt

$$LF \geq LF_{\max}$$

LF_{\max} errechnet sich in Abhängigkeit der Entladetiefe Q_E nach folgender Formel:

$$LF_{\max} = \frac{Q_E + Q_0}{Q_E} \quad (5.6)$$

mit

$$\begin{aligned} Q_0 &= Q_0 + Q_E \cdot k = \text{maximale Überlademenge} \\ Q_0 &= 6 \text{ Ah} = \text{minimale Überlademenge} \\ k &= 0.065 \end{aligned} \quad (5.7)$$

Die Grenzwerte für die Spannung und den inneren Ladezustand wurden so festgelegt, daß sie nur bei einer unkontrollierten Ladung erreicht werden können. Der maximale Ladefaktor wurde aus Voruntersuchungen ermittelt. Er ist so festgelegt, daß im Normalfall eine Beendigung der Ladung durch die Signale des Differentialrekombinators erfolgt.

5.3 Ladezustandserfassung

Beim Elektrofahrzeug ist eine genaue Information über den Ladezustand der Antriebsbatterie wichtig, um das dynamische Verhalten der Batterie und die Reichweite abschätzen zu können. Auch lassen sich Tiefentladungen vermeiden, die die Lebensdauer der Antriebsbatterie beeinträchtigen. Die aktuelle dynamische Entladbarkeit eines Bleiakкумуляtors spiegelt sich in der Ionenkonzentration im Inneren der Platten (innerer Ladezustand LZ_I) wieder. Diese Konzentration kann aber meßtechnisch nicht erfaßt werden. Im Rahmen dieses Vorhabens kommt ein Verfahren aus vorhergehenden Vorhaben /1/,/2/ zum Einsatz mit dem aus einer Strombilanzierung (mittlerer Ladezustand LZ_M) und der Messung der Säuredichte im äußeren Elektrolytraum (äußerer Ladezustand LZ_A) auf die innere Ionenkonzentration geschlossen werden kann.

5.3.1 Äußerer Ladezustand

Die Schwefelsäuremenge in einem Bleiakкумуляtor nimmt als Teil der aktiven Masse an der Umwandlungsreaktion der Elektroden beim Laden und Entladen teil. Unter der Voraussetzung, daß die Elektrolytmenge konstant ist, läßt sich die Säuredichte als ein Maß für den Ladezustand ansehen. Die mittlere Säuredichte im äußeren Elektrolytraum wird mit einer Ionenaustauschmembrane (IAM 500) /1/ aufgenommen, die ihre Länge umgekehrt proportional zur Säuredichte ändert. Die Längenänderung wird in ein elektrisches Signal umgewandelt. Aus dem IAM-Signal (U_{IAM}) wird die mittlere äußere auf 20 °C bezogene Säuredichte δ_{Am} bestimmt. Sie ergibt sich entsprechend:

$$\delta_{Am} = \delta_{Amax} - (U_{IAM} - U_{IAMvoll}) \cdot v_{IAM} + b \cdot (T_B - T_0) \quad (5.8)$$

mit δ_{Am} = mittlere äußere Säuredichte [kg/l]

δ_{Amax} = maximale äußere Säuredichte [kg/l] = 1,29 kg/l

$U_{IAMvoll}$ = IAM-Ausgangsspannung im geladenen Zustand [V]

v_{IAM} = Verstärkungsfaktor der IAM [kg/l·V] = 0,0781 kg/l·V

b = 0,0007 kg/l·K

T_0 = 20°C

Bei jeder Vollladung wird $U_{IAMvoll}$ neu ermittelt, so daß eine kontinuierliche Berücksichtigung einer durch Alterung bedingten Veränderung der Ionen-Austausch-Membrane erreicht wird. Durch die Anpassung von $U_{IAMvoll}$ wird der LZ_A nach jeder Vollladung auf 100 % gesetzt (LZ_A -Abgleich).

Ausgehend von der maximalen äußeren Säuredichte (δ_{Amax}) und der minimalen inneren Säuredichte δ_{Imin} wird der äußere Ladezustand LZ_A auf den maximalen inneren Säuredichtenhub $\Delta\delta_{Imax}$ normiert.

$$LZ_A = \frac{\delta_{Amax} - \delta_{Imin}}{\Delta\delta_{Imax}} \cdot 100 [\%] \quad (5.9)$$

mit

$$\begin{aligned} \delta_{Imin} &= \delta_{Imax} - \Delta\delta_{Imax} \\ \delta_{Imax} &= \delta_{Amax} \\ \Delta\delta_{Imax} &= 0,0195 \text{ kg/l} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Durch die Normierung auf den maximalen inneren Säuredichtehub $\Delta\delta_{Imax}$ wird erreicht, daß LZ_A nach Abklingen sämtlicher Diffusionsvorgänge den gleichen Wert wie LZ_M und LZ_I erreicht.

5.3.2 Mittlerer Ladezustand

Der mittlere Ladezustand gibt Auskunft über den Umwandlungsgrad der Elektroden. Er entspricht einer mittleren Gesamtelektrolytdichte nach dem Abklingen der Diffusionsvorgänge. Zu seiner Berechnung dient eine Ladungsbilanzierung unter Berücksichtigung der Selbstentladung und der Verluste durch die Potentialanbindung (Q_{VS}). Zusätzlich ist bei längeren Standzeiten ($t_s > 12h$) eine Anpassung an den äußeren Ladezustand LZA mit Hilfe einer "Korrekturladungsmenge" Q_{VK} vorgesehen. Dieses garantiert eine Langzeitstabilität der Anzeige bei längeren Standzeiten.

Die Bilanzgleichung lautet:

$$(5.11) \quad Q = Q_L - Q_E - Q_{VS} - Q_{VG} + Q_{VK} \quad [Ah] \quad (5.11)$$

mit	Q	=	Ladungsbilanz
	Q_L	=	hinzugeführte Ladungsmenge
	Q_E	=	entnommene Ladungsmenge
	Q_{VS}	=	Verlustladungsmenge der Selbstentladung und Potentialanbindung
	Q_{VG}	=	Verlustladungsmenge der Gasungsströme I_{H_2O} und I_{H_2}
	Q_{VK}	=	Korrekturladungsmenge aus LZ_M/LZ_A -Anpassung

Die Verlustladungsmenge Q_{VS} ergibt sich zu

$$(5.12) \quad Q_{VS} = \int (I_S + I_P) dt \quad [Ah] \quad (5.12)$$

mit dem konstant angesetzten Selbstentladestrom

$$(5.13) \quad I_S = 56 \text{ mA}$$

und dem über die Widerstandskette der Potentialanbindung abfließende Strom von

$$I_P = 24 \text{ mA.}$$

Wird nun die Ladungsbilanz Q auf das Produkt von Nennkapazität Q_N mal Faktor K_I bezogen, so ergibt sich der mittlere Ladezustand:

$$(5.13) \quad LZ_M = \left(1 + \frac{Q}{Q_N \cdot K_I}\right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.13)$$

$$K_I = \frac{\Delta \delta_{I_{max}}}{\Delta \delta_{IN}} \quad (5.14)$$

mit $K_I = 1,146$
 $\Delta \delta_{IN} =$ mittlere innere Säuredichteänderung bei
 Nennentladung = 0,17 kg/l

Mit dem Faktor K_I wird LZ_M auf die maximale innere Säuredichtenänderung $\Delta \delta_{I_{max}}$ normiert. Nach jeder Vollaftung werden alle Ladungsmengen auf null gesetzt, damit der mittlere Ladezustand nach Gl. 5.13 100% erreicht.

Nach längeren Standzeiten, wenn der Batterie keine Ladungsmenge entnommen oder zugeführt wurde, entspricht der äußere Ladezustand der normierten Gesamtelektrolytdichte. Unter dieser Voraussetzung ist eine Anpassung des LZ_M an LZ_A möglich. Formal geschieht dieses durch eine Anpassung von Q_{VK} . Wird Q in Gl. 5.13 durch Gl. 5.11 ersetzt und LZ_M durch LZ_A ersetzt, so ergibt sich die Korrekturladungsmenge:

$$Q_{VK} = Q_N \cdot K_I \left(\frac{LZ_A}{100} - 1 \right) + Q_E + Q_{VS} + Q_{VG} - Q_L [Ah] \quad (5.15)$$

5.3.3 Innerer Ladezustand

Der innere Ladezustand gibt Auskunft über die Schwefelionenkonzentration in den Poren. Er ist ein Maß für die Ladungsmenge, die der Batterie ohne Leistungsreduzierung entnommen werden kann. Nach einem einfachen Modell kann man den inneren Ladezustand durch die Subtraktion der gewichteten Differenz von LZ_M und LZ_A von LZ_M ermitteln [9//10]. Der Faktor, mit dem die Differenz zu multiplizieren ist, berechnet sich aus dem Volumenverhältnis des äußeren Elektrolytraumes zum Porenraum.

$$LZ_I = LZ_M - (LZ_A - LZ_M) \cdot V_A/V_I \quad [\%] \quad (5.16)$$

mit	V_A	=	äußeres Volumen (Elektrolytraum)
	V_I	=	inneres Volumen (Porenraum)
	V_A/V_I	=	3,35

Der innere Ladezustand wird kontinuierlich während der Fahrt ermittelt und dem Fahrer angezeigt.

5.4 Steuerung der Elektrolytumwälzung und der Klimatisierung

Die Elektrolythebepumpen werden so angesteuert, daß sie während der Ladung bis zum Beginn der Gasung den Elektrolyten in einem Intervallbetrieb umwälzen. Die aktive Phase ist 6 sec lang, die Pause 36 sec. Kurz vor dem LZ_A -Abgleich nach einer Vollladung sind die Pumpen nochmals eine halbe Stunde lang kontinuierlich in Betrieb, um beim Abgleich eine Schichtung des Elektrolyten auszuschließen (siehe [Kap.3.1.1](#)). Die Elektrolythebepumpe kann auch manuell ein- und ausgeschaltet werden (siehe [Tabelle 4.1](#)).

Die Wasserpumpe der Klimatisierung startet automatisch, sobald das Bordladegerät an das Netz angeschlossen und der Heizboiler betriebsbereit ist (siehe Kapitel 3.1.6). Zusätzlich wird die Pumpe eingeschaltet, sobald der Fahrstrom über 10A ansteigt. Damit wird eine Vergleichmäßigung der Einzelzellentemperaturen erreicht. Wie bei der Elektrolytumwälzung wurde auch hier eine manuelle Einschaltmöglichkeit vorgesehen.

5.5 Eckdatenberechnung und -sicherung

Zur Langzeitüberwachung und Auswertung sämtlicher Fahrversuche wurden pro Fahrzyklus eine Anzahl von Daten ermittelt und im Betriebsführungsrechner zwischengespeichert. Ein Fahrzyklus beginnt in dem Augenblick, in dem eine Ladung beendet wird. Das heißt, ein Fahrzyklus beinhaltet gegebenenfalls mehrere Entladungen und eine Ladung

der Antriebsbatterie. Tabelle 5.1 zeigt die abgespeicherten Eckdaten pro Fahrzyklus.

Nr.	Eckwert	Bedeutungen
1	Teilzyklus	Anzahl der Ladungen
2	Zyklus	durchsetzte Nennkapazität
3	Q_L [Ah]	zugeführte Ladungsmenge
4	Q_E [Ah]	entnommene Ladungsmenge
5	Q_B [Ah]	zugeführte Ladungsmenge d. Bremsen
6	Q_{V1} [Ah]	Verlustladungsmenge d. Gasung, Selbstentladung und Potentialanbindung
7	Q_{VK} [Ah]	Korrekturladungsmenge aus LZM/LZA-Anpassung
8	E_L [KWh]	zugeführte Energie
9	E_E [KWh]	entnommene Energie
10	t_L [h]	Ladezeit
11	t_E [h]	Entladezeit
12	t_S [h]	Standzeit
13	-	-
14	T_{Bmax}	maximale Batterietemperatur
15	T_{Bmin}	minimale Batterietemperatur
16	LZ_{Amin}	minimaler äußerer Ladezustand
17	LZ_{Mmin}	minimaler mittlerer Ladezustand
18	LZ_{Tmin}	minimaler innerer Ladezustand
19	$\Delta LZ_A / LZ_{Mmax}$	maximale LZ_M / LZ_A - Differenz
20	LF	Ladefaktor
21	$\Delta LZ_A / 100\%$	Differenz LZ_A zu 100% beim Abgleich
22	$\Delta LZ_M / 100\%$	Differenz LZ_M zu 100% beim Abgleich
23-25	h:min:sec	Uhrzeit der Abspeicherung
26-28	Mon/Tag/Jahr	Datum der Abspeicherung

Tabelle 5.1: Abgespeicherte Werte pro Teilzyklus

Die Eckdaten werden auf einem 8 KByte großen gepufferten RAM-Bereich geschrieben, der für ca. 35 Fahrzyklen ausreicht. Die Daten werden in regelmäßigen Abständen mit Hilfe der Menüsteuerung auf einen PC überspielt (siehe Tabelle 4.1). Eine Leuchtdiode

(siehe Bild 4.3 und Tabelle 4.2) zeigt an, wenn dies erforderlich ist. Die wichtigsten Eckwerte, wie z. B. Ladungsmengen, Energiemengen und Zeiten (Tabelle 5.1 Nr. 1-12) werden ständig auf einen gesonderten gepufferten RAM-Bereich geschrieben, so daß bei Ausfall der Spannungsversorgung die Werte gesichert sind.

5.6 Kontinuierliche Datenerfassung

Zur Überprüfung der entwickelten Ladeverfahren und der Ladezustandserfassung wurden Möglichkeiten der kontinuierlichen Datenerfassung geschaffen.

Kontinuierliche Ausgabe eines Meßprotokolls während des Ladevorganges

Während eines Ladevorganges können folgende Meßwerte kontinuierlich in Intervallen (≥ 3 sec) ausgegeben werden:

I_B	:	Batteriestrom [A]
U_B	:	Batteriespannung [V]
LZ_{AO}	:	oberer äußerer Ladezustand [%]
LZ_{Am}	:	mittlerer äußerer Ladezustand [%]
LZ_M	:	mittlerer Ladezustand [%]
LZ_I	:	innerer Ladezustand [%]
I_{H_2O}	:	stöchiometrischer Gasungsstrom [A]
I_{H_2}	:	Wasserstoff Gasungsstrom [A]
T_B	:	Batterietemperatur [$^{\circ}C$]
T_U	:	Umgebungstemperatur [$^{\circ}C$]
t	:	Protokollzeit [h]

Tabelle 5.2: Protokollierte Meßwerte während eines Ladevorganges

Abspeicherung eines Meßprotokolls während der Fahrt

Während der Fahrt können über mehrere Minuten verschiedene Meßwerte kontinuierlich für eine spätere Auswertung abgespeichert werden. Das Meßprotokoll wird in einen gepufferten RAM-Bereich gespeichert und kann später (siehe Tabelle 4.1) ausgegeben werden. Zur Reduzierung des Speicherplatzes erfolgt die Abspeicherung immer dann, wenn eine Änderung der Meßgrößen vorliegt. Von den in Tabelle 5.5 aufgezählten Werten können

- ▶ Batteriespannung [V],
- ▶ Batteriestrom [A],
- ▶ Ladezustände [%] und
- ▶ Protokollzeit [t]

abgespeichert werden (siehe Kap.7.2).

Protokollzeit [t]	Werte
1	Batteriespannung [V]
2	Batteriestrom [A]
3	Ladezustand [%]
4	Protokollzeit [t]
5	Batteriespannung [V]
6	Batteriestrom [A]
7	Ladezustand [%]
8	Protokollzeit [t]
9	Batteriespannung [V]
10	Batteriestrom [A]
11	Ladezustand [%]
12	Protokollzeit [t]
13	Batteriespannung [V]
14	Batteriestrom [A]
15	Ladezustand [%]
16	Protokollzeit [t]
17	Batteriespannung [V]
18	Batteriestrom [A]
19	Ladezustand [%]
20	Protokollzeit [t]
21	Batteriespannung [V]
22	Batteriestrom [A]
23	Ladezustand [%]
24	Protokollzeit [t]
25	Batteriespannung [V]
26	Batteriestrom [A]
27	Ladezustand [%]
28	Protokollzeit [t]
29	Batteriespannung [V]
30	Batteriestrom [A]
31	Ladezustand [%]
32	Protokollzeit [t]
33	Batteriespannung [V]
34	Batteriestrom [A]
35	Ladezustand [%]
36	Protokollzeit [t]
37	Batteriespannung [V]
38	Batteriestrom [A]
39	Ladezustand [%]
40	Protokollzeit [t]

Tabelle 5.5: Protokollwerte während einer Ladung

Tabelle 5.6: Abspeicherte Werte pro Tabelle

Die Eckdaten werden auf einem 8 KByte großen gepufferten RAM-Bereich geschrieben, der für ca. 35 Fahrzyklen ausreicht. Die Daten werden in regelmäßigen Abständen mit Hilfe der Menüsteuerung auf einen PC überspielt (siehe Tabelle 4.1). Eine Leuchtdiode

6 Inbetriebnahme der Antriebsbatterie

Vor Beginn der Fahrversuche wurde die neue Antriebsbatterie in Betrieb genommen. Alle Zellen wurden mit Schwefelsäure aufgefüllt und einer mehrstündigen Ladung unterzogen. Nach einer Nennentladung des Verbandes folgte eine erneute Vollladung. Während der Inbetriebnahme werden die Elektroden aktiviert und die Porenräume füllen sich mit Schwefelsäure. Eine erste Kontrolle der einzelnen Säuredichten ergab die in Bild 6.1 dargestellte Verteilung. Es fallen einige Zellen mit einer erhöhten Dichte auf. Dieses ist auf Herstellungstoleranzen zurückzuführen. Um eine Beeinträchtigung der Fahrergebnisse durch einen zu großen Streubereich der Säuredichten von vornherein auszuschließen, wurde in einzelnen Zellen - sie sind in Bild 6.1 gekennzeichnet - ein Säureausgleich durchgeführt.

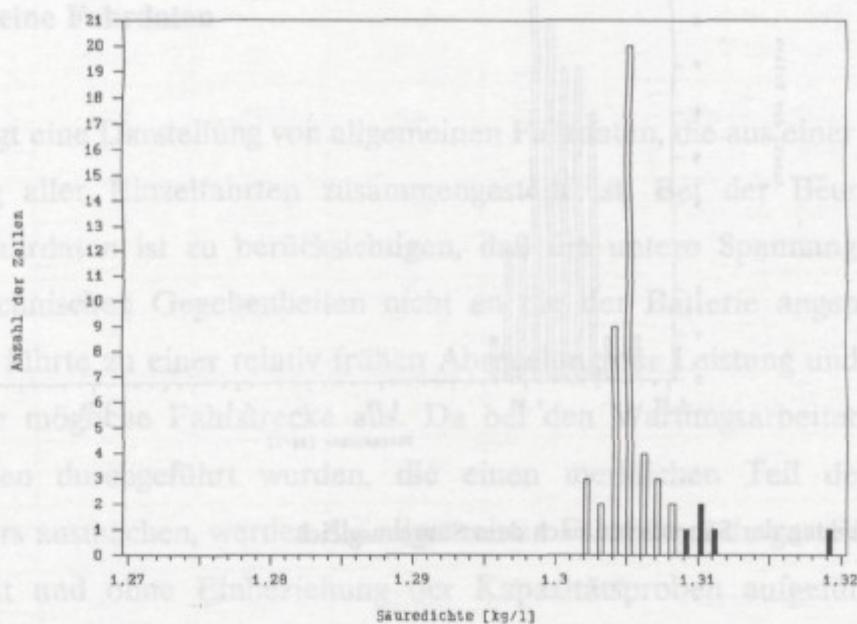


Bild 6.1: Verteilung der Säuredichte vor dem Säureausgleich

Der Ausgleich erfolgte durch Absaugen von Elektrolyt und Nachfüllen einer gleichen Menge destillierten Wassers. Die abzusaugende bzw. wieder nachzufüllende Flüssigkeitsmenge betrug:

$$x = (p/d) \cdot (d_1 - d) / (d_1 - 1) \quad (6.1)$$

p	Säuregewicht der Zelle
d	Sollwert der Säuredichte im geladenen Zustand
d_1	Gemessene Säuredichte
x	Abzusaugende Säure- bzw. einzufüllende Wassermenge

Nach dem Säureausgleich und dem Auffüllen des Elektrolyten auf seinen Maximalstand ergab sich die in Bild 6.2 dargestellte Säureverteilung. Die Streuung der Säuredichten wurde verringert. Die Dichten aller Zellen sind im Mittel geringer als bei der ersten Messung (siehe Bild 6.1). Im Mittel wurden 220 cm^3 Wasser/Zelle aufgefüllt.

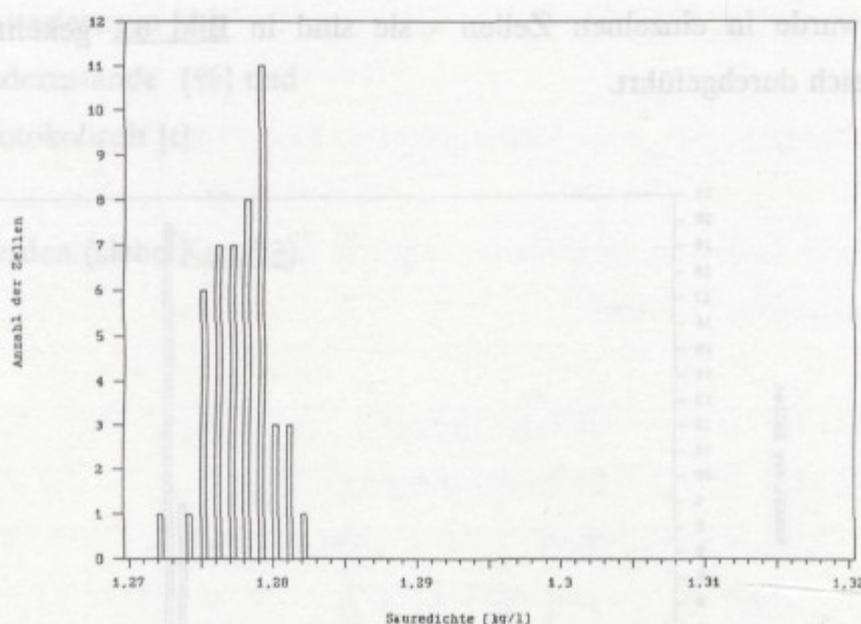


Bild 6.2: Verteilung der Säuredichte nach dem Säureausgleich

7 Fahrbetrieb

Nach der Inbetriebnahme des Batterieaggregates und ersten Tests der Batteriebetriebsführung am Prüfplatz wurde der Fahrbetrieb im Juli 1988 aufgenommen. Die letzte Fahrt des ersten Feldversuches endete im Juli 1989. Das Ladeverfahren wurde im Verlauf der Feldversuche zum Teil modifiziert und optimiert. Die Ladezustandserfassung wurde dem Batterieverhalten angepaßt und bei unterschiedlichen Belastungsfällen getestet. Die Auswertung der Eckdaten jeder Fahrt, sowie eine teilweise kontinuierliche Erfassung einzelner Meßwerte lieferte Informationen über das Batterieverhalten und ihre Betriebsführung. Regelmäßig durchgeführte Wartungen gaben Auskunft über Wartungsaufwand und Veränderungen des Batterieverbandes.

7.1 Allgemeine Fahrdaten

Als erstes erfolgt eine Darstellung von allgemeinen Fahrdaten, die aus einer reduzierten Datenerfassung aller Einzelfahrten zusammengestellt ist. Bei der Beurteilung der allgemeinen Fahrdaten ist zu berücksichtigen, daß die untere Spannungsgrenze des Stellers aus technischen Gegebenheiten nicht an die der Batterie angepaßt werden konnte. Dieses führte zu einer relativ frühen Abregelung der Leistung und wirkte sich negativ auf die mögliche Fahrstrecke aus. Da bei den Wartungsarbeiten zahlreiche Kapazitätsproben durchgeführt wurden, die einen merklichen Teil des gesamten Ladungstransfers ausmachen, werden die allgemeinen Fahrdaten, dargestellt in Tabelle 7.1, jeweils mit und ohne Einbeziehung der Kapazitätsproben aufgeführt. In dem betrachteten Zeitraum wurden bei 177 Fahrten

4257 km

zurückgelegt. Hierbei wurde 51 mal die Ladungsmenge von $Q_N = 172 \text{ Ah}$ entnommen. Die mittlere entnommene Energiemenge pro km betrug

180 Wh/km,

die mittlere der Batterie zugeführten Energiemenge 250 Wh/km. Der mittlere Ladefaktor

beim Aufladen des Aggregates betrug

1,11.

Größe	ohne Kap-Proben		mit Kap-Proben	
Anzahl der Fahrten (Entladungen / Ladungen)	177		189	
Anzahl der Nennzyklen (Durchsatz von QN)	51,74		56,88	
Zurückgelegte Kilometer	4297	km	4297	km
Entnommene Ladungsmenge pro Kilometer	2,07	Ah/km	2,28	Ah/km
Zugeführte Ladungsmenge pro Kilometer	2,3	Ah/km	2,54	Ah/km
Ladefaktor ohne Pot.-Anb.-Verluste	1,111		1,117	
mit Pot.-Anb.-Verluste	1,089		1,093	
Zugeführte Ladung durch Nutz- bremsung	4,12	%Q _E	3,73	%Q _E
Zugeführte Energie pro Kilometer	250	Wh/km	280	Wh/km
Entnommene Energie pro Kilometer	179	Wh/km	198	Wh/km
Energie-Wirkungsgrad	72	%	71	%
Mittlerer Entladestrom	58,27	A	58,05	A
Mittlere Entladungsmenge	50,28	Ah	51,74	Ah
Mittlere Fahrstrecke	24,27	km	22,74	km
Maximale Entladungsmenge	145	Ah	145	Ah
Maximale Fahrstrecke	107	km	107	km

Tabelle 7.1: Allgemeine Fahrdaten

Die Laderegelung wurde im Verlauf der Versuche mehrere Male verbessert und der Fahrsituation angepaßt. Hierdurch ergaben sich, wie in Kap. 7.3 dargestellt, geringere Ladefaktoren und damit bessere Batteriewirkungsgrade, als es die Mittelwerte anzeigen. Während des Versuchsfahrten wurde der Batterieverband zweimal gewartet, worauf in Kap. 9 näher eingegangen wird.

7.2 Strom- und Spannungsverläufe im Fahrbetrieb

Während einzelner Fahrten wurde eine kontinuierliche Erfassung einiger Batteriedaten (vergleiche Kap. 5.7) durchgeführt. Die Versuche dienten der Überprüfung eines an späterer Stelle festgelegten Prüfzyklus für Fahrsimulationen. Auch sollte der Einfluß des hohen Innenwiderstandes auf die einsetzende Leistungsbegrenzung näher quantifiziert werden. Bild 7.1 und Bild 7.2 zeigen das Strom- und Spannungsverhalten während eines Zeitausschnittes einer Stadtfahrt. Bei kurzen Beschleunigungsphasen beträgt, wie in Bild 7.1 zu sehen, der maximale Entladestrom 300 A.

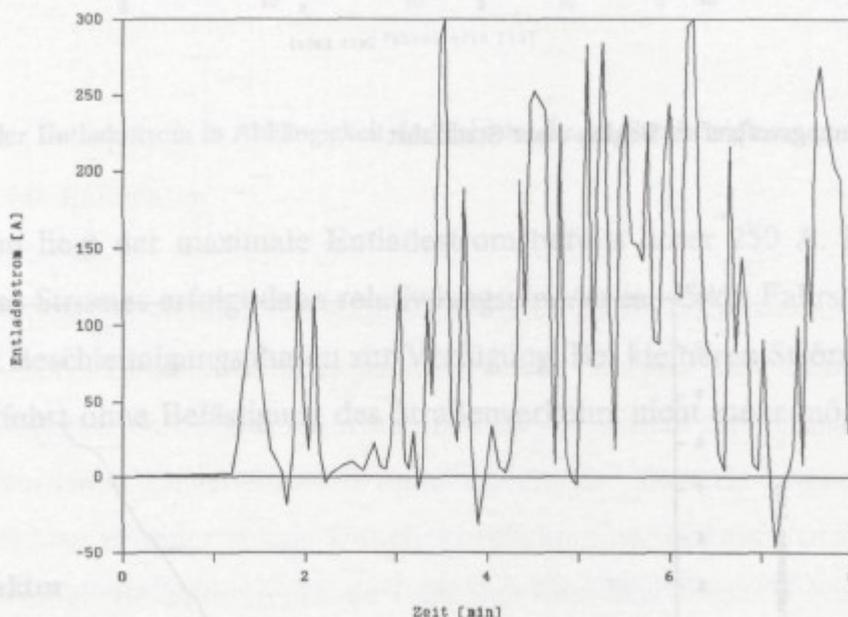


Bild 7.1: Stromverlauf zu Beginn einer Stadtfahrt

Der große Spannungseinbruch der Batterie, der in Bild 7.2 zu erkennen ist, wird durch den relativ großen Gesamtinnenwiderstand der Zellen verursacht. Hierdurch kommt es im Fahrbetrieb zu einer frühen Reduzierung der Abgabeleistung. Zusätzlich zu dem Strom/Spannungsverlauf wurde die entnommene Ladungsmenge Q_E aufgezeichnet, deren Verlauf in Bild 7.3 dargestellt ist. Im Verlauf der 8-minütigen Fahrt wurden 10,5 Ah entnommen.

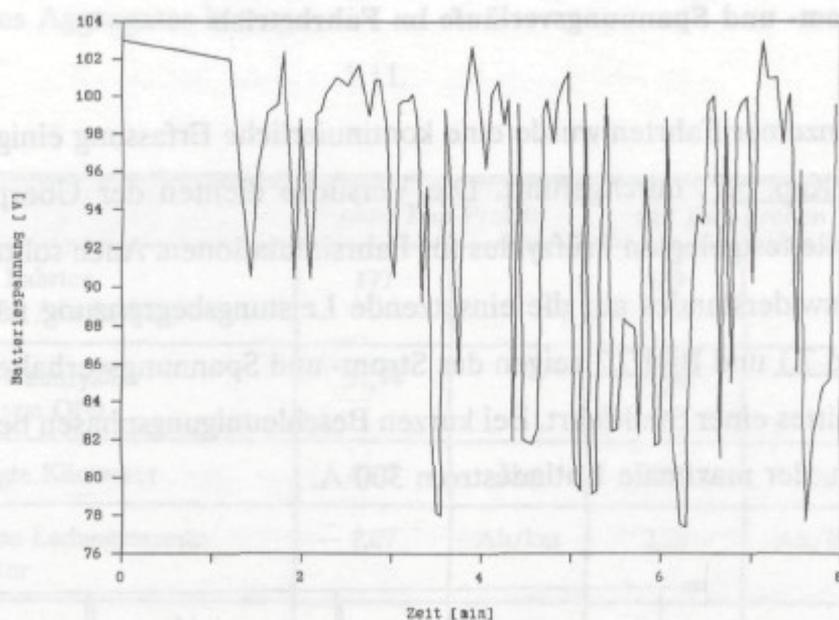


Bild 7.2: Spannungsverlauf zu Beginn einer Stadtfahrt

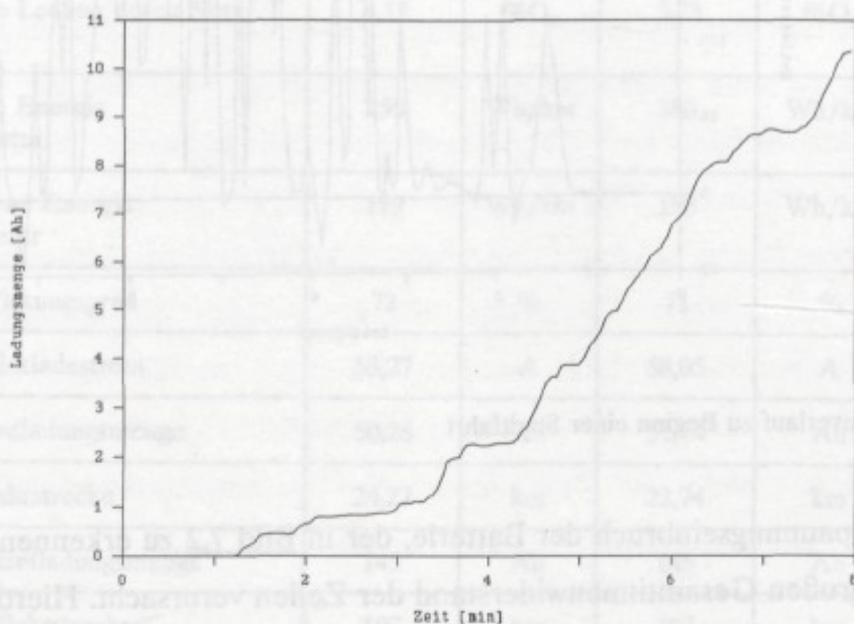


Bild 7.3: Verlauf der entnommenen Ladungsmenge zu Beginn einer Stadtfahrt

Einen Eindruck, welche Auswirkungen die relativ frühe Abregelung des Stromes im Fahrbetrieb hat, vermittelt **Bild 7.4**. Hier ist der maximale Fahrstrom, den die Antriebssteuerung zuläßt, in Abhängigkeit der Fahrstrecke aufgetragen. Die Meßwerte wurden von einem Beifahrer während der Fahrt abgelesen und dokumentiert.

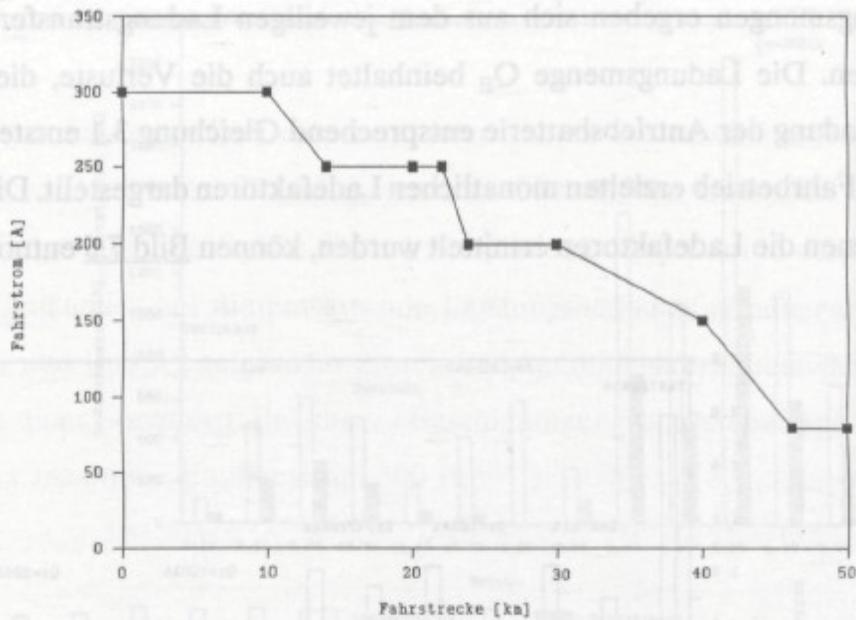


Bild 7.4: Maximaler Entladestrom in Abhängigkeit der Fahrstrecke im Fahrbetrieb

Nach ca. 20 km liegt der maximale Entladestrom bereits unter 250 A. Eine weitere Reduzierung des Stromes erfolgt dann relativ langsam. Ab ca. 45 km Fahrstrecke stehen noch 100 A für Beschleunigungsphasen zur Verfügung. Bei kleineren Strömen als 100 A ist eine Weiterfahrt ohne Belästigung des Straßenverkehrs nicht mehr möglich.

7.3 Ladefaktor

Ein Teilziel des Vorhabens war es, durch eine schonende Ladetechnik und den Einsatz peripherer Komponenten, z.B. einer Elektrolytumwälzung, den Ladefaktor zu reduzieren.

Er ist definiert als:

$$LF = \frac{Q_L}{Q_E} \tag{7.1}$$

mit Q_L = zugeführte Ladungsmenge
 Q_E = entnommene Ladungsmenge

Die Ladungsmengen ergeben sich aus dem jeweiligen Ladungstransfer zwischen zwei Vollladungen. Die Ladungsmenge Q_E beinhaltet auch die Verluste, die durch die Potentialanbindung der Antriebsbatterie entsprechend Gleichung 3.1 entstehen. In Bild 7.5 sind die im Fahrbetrieb erzielten monatlichen Ladefaktoren dargestellt. Die Ladungsmengen, aus denen die Ladefaktoren ermittelt wurden, können Bild 7.6 entnommen werden.

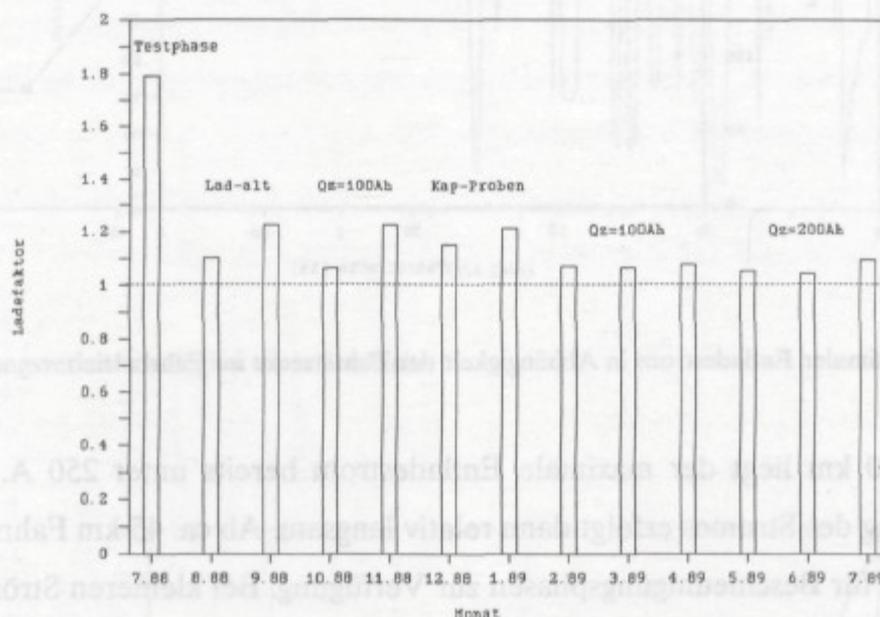


Bild 7.5: Monatliche Ladefaktoren während des Fahrbetriebes

Die Darstellung veranschaulicht die Anzahl der gefahrenen Kilometer und die Größe der entnommenen Ladungsmenge pro Monat. Je größer der Ladungsdurchsatz pro Monat, umso höher ist die Genauigkeit des errechneten Ladefaktors. Die monatliche Einteilung erlaubt es, den Ladefaktor unter den verschiedenen Betriebsbedingungen zu betrachten, die im folgenden näher diskutiert werden.

Testphase: Ende Juli 1988 wurden die ersten vier Fahrten mit dem CitySTROMer unternommen. Sie dienten dem ersten Test des entwickelten Ladeverfahrens. Die geringe Anzahl der Fahrten und die noch nicht gesicherte Funktionstüchtigkeit des Ladeverfahrens erklären den sehr hohen Ladefaktor.

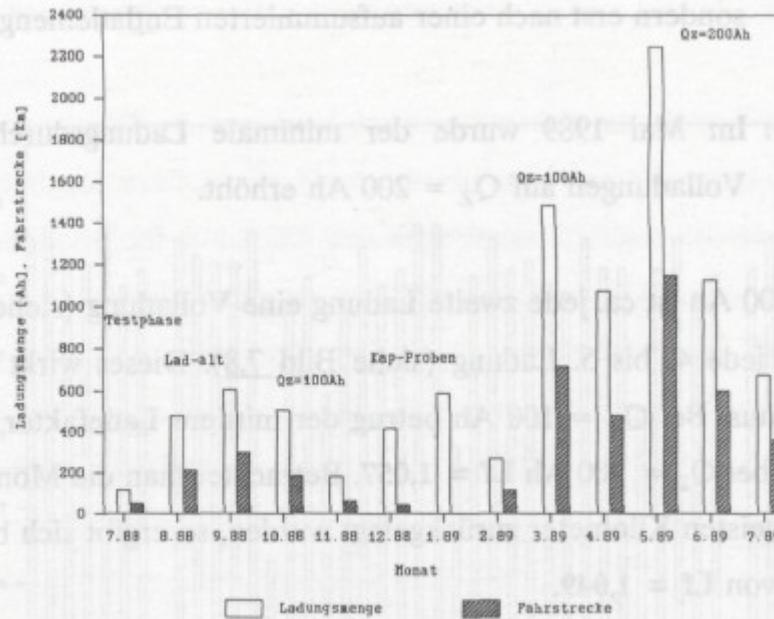


Bild 7.6: Monatliche Fahrstrecke und entnommene Ladungsmenge Q_E während des Fahrbetriebes

Lad-alt: Während dieses Zeitraumes (August 88 und September 88) wurde eine Ladetechnik verwendet, die nach jeder Fahrt eine mit dem Differentialrekombinator überwachte und gesteuerte Vollladung durchführte. Im vorhergegangenen Forschungsvorhaben /2/ hatte es sich gezeigt, daß bei einer Nennentladung der Batterie Ladefaktoren von 1,05 erreichbar sind, sie sich aber bei geringeren Entladetiefen erhöhen. Die während der Fahrversuche erzielten Ladefaktoren liegen im Bereich von $L_f = 1,10 - 1,20$. Sie sind relativ groß, was auf die überwiegend kurzen Fahrstrecken zurückzuführen wird. Die Laderegulierung wurde daraufhin in der Weise modifiziert, daß nur von Zeit zu Zeit eine Vollladung erfolgte.

Kap-Probe: In den Zeitraum Dez. 88 - Jan. 89 fiel eine Wartung des Batterieaggregates mit zahlreichen Kapazitätsproben. Um bei den Kapazitätsproben vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wurde die Batterie vor den Kapazitätsproben jeweils mit einem Ladefaktor von 1.2 geladen. Dieses bedingt den hohen Gesamtladefaktor.

$Q_Z = 100$ Ah: Zur Reduzierung des Ladefaktors kam in den Monaten Feb.- April 1989 ein Ladeverfahren nach der in Kap. 5.4.2 beschriebenen Methode zum Einsatz. Nicht bei jeder Ladung wurde eine Vollladung durchgeführt,

sondern erst nach einer aufsummierten Entlademenge von $Q_Z = 100$ Ah.

$Q_Z = 200$ Ah: Im Mai 1989 wurde der minimale Ladungsdurchsatz zwischen zwei Vollladungen auf $Q_Z = 200$ Ah erhöht.

Bei $Q_Z = 100$ Ah ist ca. jede zweite Ladung eine Vollladung (siehe Bild 7.7), bei $Q_Z = 200$ Ah ca. jede 4. bis 5. Ladung (siehe Bild 7.8). Dieses wirkt sich positiv auf den Ladefaktor aus. Bei $Q_Z = 100$ Ah betrug der mittlere Ladefaktor bei einer Vollladung $Lf = 1,069$, bei $Q_Z = 200$ Ah $Lf = 1,057$. Betrachtet man die Monate Mai und Juni, in denen am meisten Kilometer zurückgelegt wurden, so ergibt sich bei $Q_Z = 200$ Ah ein Ladefaktor von $Lf = 1,049$.

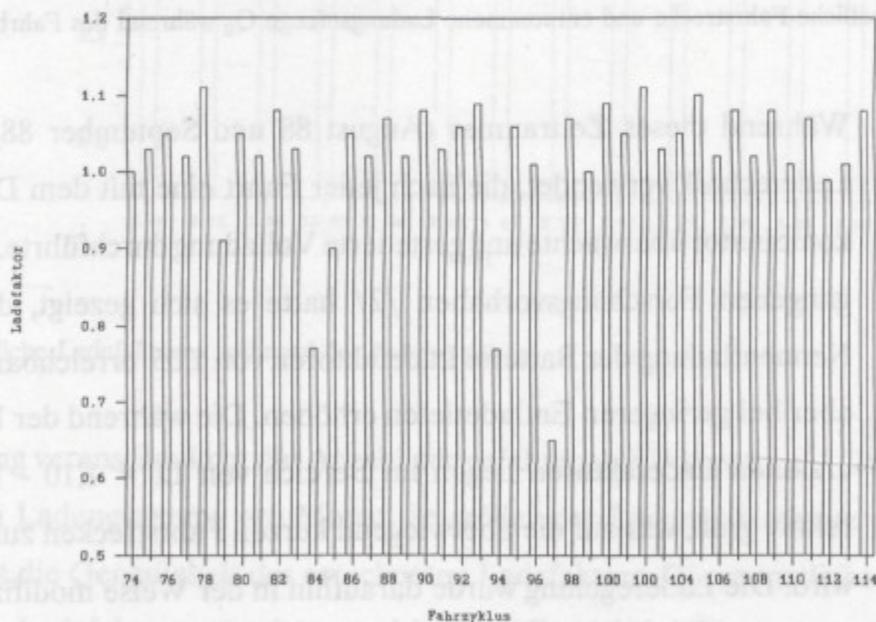


Bild 7.7: Ladefaktoren pro Fahrt bei einem Ladungsdurchsatz zwischen zwei Vollladungen von mindestens $Q_Z = 100$ Ah

Die Funktionssicherheit, der über den Differentialrekombinator gesteuerten Ladetechnik, war in beiden Fällen gewährleistet. Für einen Fahrbetrieb wird die Ladetechnik mit $Q_Z = 200$ Ah empfohlen. Dieses bestätigten auch später durchgeführte Fahrsimulationen, bei denen der minimale Ladungsdurchsatz versuchsweise auf $Q_Z = 700$ Ah (Kap. 8.4.2) heraufgesetzt wurde, was keine nennenswerte Verbesserung des Ladefaktors, wohl aber eine Verringerung der entnehmbaren Ladungsmenge ergab. Das entwickelte und erprobte Ladeverfahren gewährleistet eine sichere und schonende Vollladung des Batterieer-

bandes.

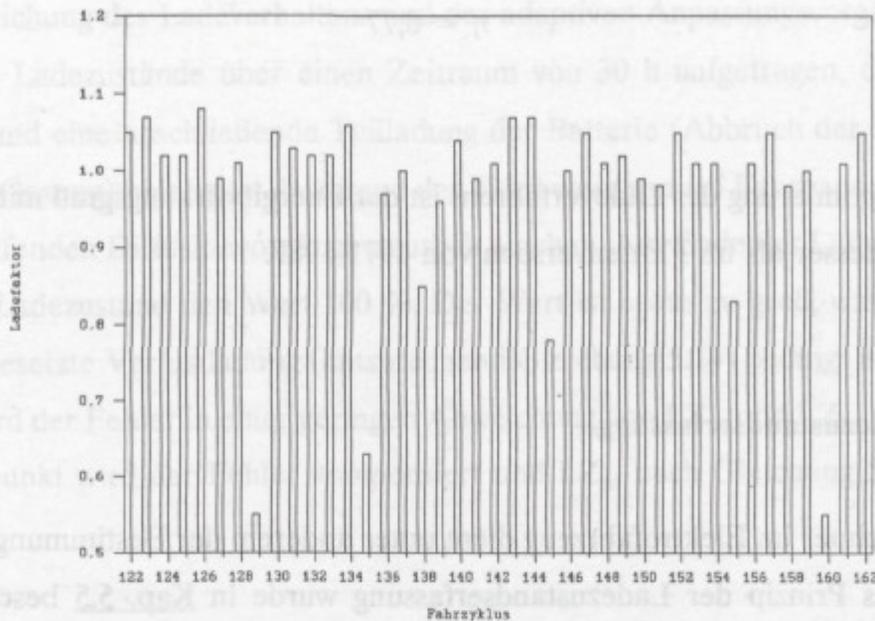


Bild 7.8: Ladefaktoren pro Fahrt bei einem minimalen Ladungsdurchsatz zwischen zwei Vollladungen von $Q_z=200 \text{ Ah}$

7.4 Wirkungsgradvergleich

Das angewandte Ladeverfahren führt zu einer Reduzierung des notwendigen Ladefaktors und damit zu einer Verbesserung des Energiewirkungsgrades der Batterie. Ein Vergleich des Batteriewirkungsgrades mit Ergebnissen aus dem BMFT-Flottenversuch von 1971-87 verdeutlicht den positiven Einfluß der angewandten Ladetechnik.

BMFT-Flottenversuch (1971-1987)

$$\eta = 0,66$$

CityStROMer (7.88 - 7.89)

$$\eta = 0,72$$

CitySTROMer (5.89 - 6.89)

$$\eta = 0,77$$

Nach der Optimierung des Ladeverfahrens ist der Energiewirkungsgrad mit $\eta = 0,77$ um über 10 % besser als im Flottenversuch von 1971-1987.

7.5 Ladezustandserfassung

Der Bordrechner im Elektrofahrzeug dient unter anderem der Bestimmung des Ladezustandes. Das Prinzip der Ladezustandserfassung wurde in [Kap. 5.5](#) beschrieben. Die Parameter der Ladezustandserfassung wurden in der zweiten Hälfte des Jahres 1988 ermittelt und optimiert. [Bild 7.9](#) zeigt den äußeren Ladezustand LZ_A , den mittleren Ladezustand LZ_M und den inneren Ladezustand LZ_I während einer Stadtfahrt.

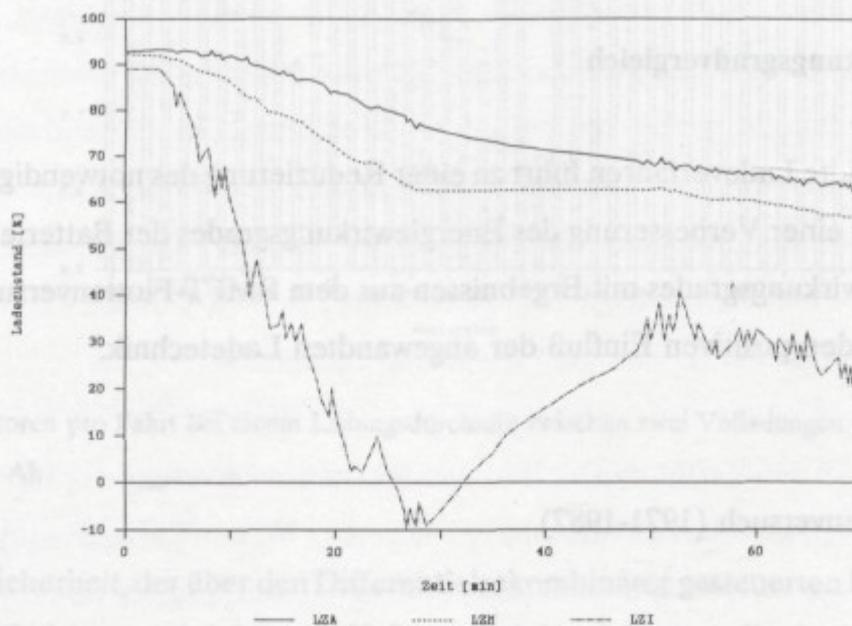


Bild 7.9: Ladezustände im Fahrbetrieb

Die Ladezustandsbestimmung wurde an die realen Leistungsgrenzen angepaßt und so eingestellt, daß LZ_I bei einer Begrenzung des Entladestromes auf unter 100 A ca. 0 % anzeigt. Während des Fahrbetriebes erwies sich die Ladezustandesanzeige als eine

sinnvolle und verlässliche Information für den Fahrer.

Zur Verdeutlichung des Ladeverhaltens und der adaptiven Anpassungsvorgänge sind in **Bild 7.10** die Ladezustände über einen Zeitraum von 30 h aufgetragen, der mehrere Fahrphasen und eine anschließende Teilladung der Batterie (Abbruch der Ladung bei einsetzender Gasung) beinhaltet. Während der Fahrt wurden zwei Fahrpausen eingelegt, was die ablaufenden Diffusionvorgänge deutlich machen. Am Ende der Ladung erreicht der mittlere Ladezustand den Wert 100 %. Der Wert ist etwas zu groß, was durch eine zu gering angesetzte Verlustladung (entsprechend Gleichung 5.14) bedingt ist. 12 h nach Ladeende wird der Fehler in einer geringen Abweichung von LZ_M und LZ_A deutlich. Zu diesem Zeitpunkt wird der Fehler kompensiert und LZ_M nach Gleichung 5.10 an LZ_A angepaßt.

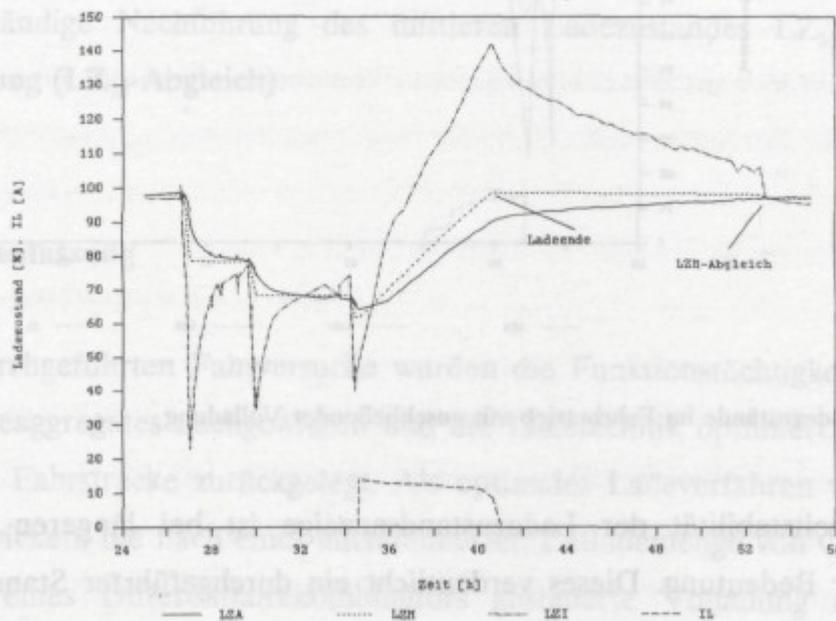


Bild 7.10: Ladezustände im Fahrbetrieb mit anschließender Teilladung

Die Abgleich- und Anpassungsvorgänge, die bei einer Vollladung durchgeführt werden, sind in **Bild 7.11** hervorgehoben. LZ_M wird direkt nach Beendigung der Vollladung auf 100% gesetzt. Drei Stunden nach diesem Abgleich (Abklingen der Diffusionsvorgänge) wird der LZ_A - Abgleich durchgeführt, indem LZ_A auf 100 % gesetzt wird. Alle 12 Stunden, unter der Voraussetzung, daß der Batterie keine Ladung entnommen wird, wird LZ_M an LZ_A angepaßt, indem LZ_M gleich LZ_A gesetzt wird.

Durch die automatischen Abgleichvorgänge wurde eine Langzeitstabilität der Anzeige erreicht, indem die Selbstentladung, die sich direkt in einem Abfall der äußeren Säuredichte (LZ_A) widerspiegelt, auch für LZ_M Berücksichtigung findet (siehe Kap. 5.5). Die relativ großen Abgleichwerte beim LZ_A -Abgleich und beim ersten LZ_M -Abgleich sind durch eine vorzeichenfalsche Temperaturkompensation bei der Säuredichteberechnung bedingt. Die notwendigen Abgleichwerte fallen bei richtiger Temperaturkompensation deutlich geringer aus.

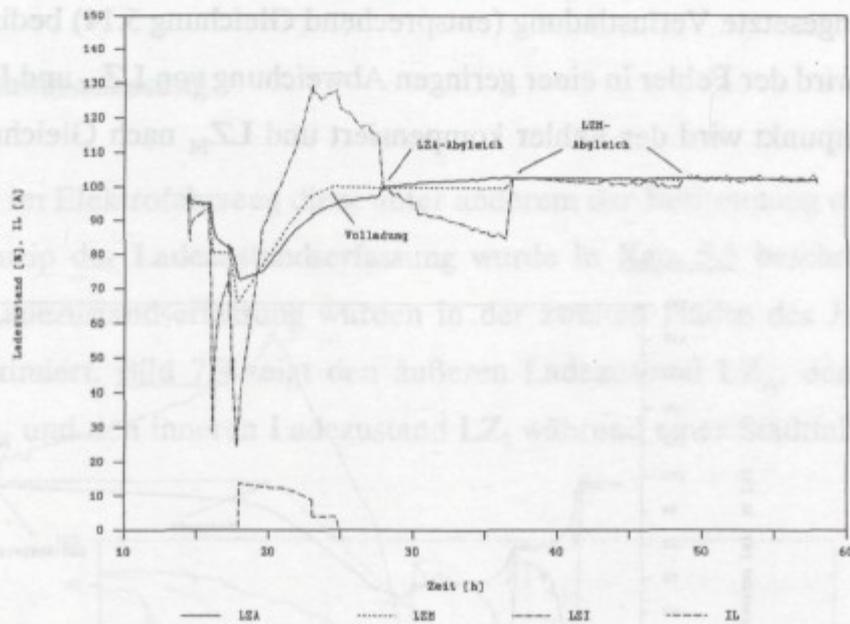


Bild 7.11: Ladestände im Fahrbetrieb mit anschließender Vollaftung

Die Langzeitstabilität der Ladestandsanzeige ist bei längeren Standzeiten von besonderer Bedeutung. Dieses verdeutlicht ein durchgeführter Standversuch über 29 Tage. Die Verlustladung durch einen mit 56 mA angenommenen Selbstentladestrom und durch einen mit 24 mA abgeschätzten Verluststrom der Potentialanbindung betrug:

$$Q_{VI} = Q_{VS} + Q_{VP} = 55,7 \text{ Ah} \quad (7.2)$$

mit

$$Q_{VS} = 39,0 \text{ Ah}$$

$$Q_{VP} = 16,7 \text{ Ah}$$

Die bei den LZ_M - Abgleichen aufsummierte Kompensationsladungsmenge ergab sich zu:

$$Q_{VK} = 21 \text{ Ah.}$$

Durch die Kompensation wurde eine Langzeitstabilität der Anzeige erreicht. Der im Mittel mit 56 mA angesetzte Selbstentladestrom ist über 29 Tage gesehen zu groß angenommen. Rechnerisch ergibt sich unter Berücksichtigung der Korrekturladung Q_{VK} ein mittlerer Selbstentladestrom über 29 Tage von 25 mA, was einer Selbstentladung von 0,35 % entspricht. Zum Vergleich ergab sich bei Prüfplatzuntersuchungen über 4 Tage (siehe Kap. 8.4.2) ein Selbstentladestrom von 94 mA, was einer Selbstentladung von 1,3% entspricht. Die Einführung eines zeitabhängigen Selbstentladestromes würde die Genauigkeit der LZ_M -Berechnung erhöhen. Einfacher und genauer ist die im Fahrbetrieb durchgeführte ständige Nachführung des mittleren Ladezustandes LZ_M über die Säuredichtemessung (LZ_M -Abgleich).

7.6 Zusammenfassung

Während der durchgeführten Fahrversuche wurden die Funktionstüchtigkeit des entwickelten Batterieaggregates nachgewiesen und die Ladetechnik optimiert. Insgesamt wurden 4257 km Fahrstrecke zurückgelegt. Als optimales Ladeverfahren wurde eine Ladetechnik entwickelt, die nach einer aufsummierten Entlademenge von $Q_Z=200$ Ah eine mit Hilfe eines Differentialrekombinators gesteuerte Vollladung durchführt. Zwischenladungen werden bei einsetzender Gasung, die ebenfalls mit Hilfe eines Differentialrekombinators ermittelt wird, beendet. Die erreichbaren Ladefaktoren liegen zwischen $L_f = 1,05 - 1,06$, was einem Energiewirkungsgrad von ca. 77 % entspricht. Der Wirkungsgrad konnte gegenüber konventionell betriebenen Batterien um über 10 % erhöht werden.

Als problematisch erwies sich die frühe Abregelung der Entladeleistung durch den Fahrzeugsteller. Hier ist unbedingt eine bessere Anpassung von Steller und Antriebsbatterie erforderlich.

Die Ladezustandsanzeige lieferte zuverlässige Aussagen über die Leistungsreserven der Batterie. Durch automatische Abgleichvorgänge von LZ_A und LZ_M wurde eine erhöhte Genauigkeit und Langzeitstabilität der Ladezustandserfassung erreicht.

Die relativ große Abgleichleistung LZ_A und LZ_M wird durch eine automatische Temperaturkompensation erreicht. Durch die Kompensation wurde eine Langzeitstabilität der Anzeige erreicht. Der im Mittel mit 20 mA angelegte Selbstentladestrom ist über 29 Tage konstant geblieben. Nach einer Berechnung ergibt sich unter Berücksichtigung der Konzentration Q_{VK} ein mittlerer Selbstentladestrom über 29 Tage von 25 mA, was einer Selbstentladung von 0,35 % entspricht. Zum Vergleich ergab sich bei 70 °C Selbstentladestromen über 4 Tage (siehe Kap. 4.4.3) ein Selbstentladestrom von 94 mA, was einer Selbstentladung von 1,36 % entspricht. Die Erhöhung eines zeitabhängigen Selbstentladestromes würde die Genauigkeit der LZ_A -Berechnung erhöhen. Ein Nachteil und Gefahr ist die im Fahrbetrieb durchgeführte ständige Neubildung des mittleren Ladezustandes LZ_M über die Sinterstrommessung (LZ_A -Abgleich).

7.6. Zusammenfassung

Während der durchgeführten Fahrversuche wurden die Funktionseigenschaften des entwickelten Batteriesystems getestet und die Abschätzung der Leistungsfähigkeit bestätigt. Als optimales Ladeverfahren wurde eine 4257 km Fahrstrecke zurückgelegt. Als optimales Ladeverfahren wurde eine Ladeleistung ermittelt, die nach einer minimalen Entladung von $Q_{VK} = 200 \text{ Ah}$ eine im Mittel eines Differenzstrommessers konstante Vollladung durchläuft. Zwischenmengen werden bei einer mittleren Ladung der Batterie im Falle eines Differenzstrommessers ermittelt und bestimmt. Die ermittelten Ladeleistungen liegen zwischen $I_L = 1,05 - 1,10$, was einem Energiewirkungsgrad von ca. 77 % entspricht. Der Wirkungsgrad konnte gegenüber konventionell betriebenen Batterien um über 10 % erhöht werden.

Als problematisch erwies sich die frühe Abregung der Entladeleistung durch den Fahrzeugsteller. Hier ist unbedingt eine bessere Anpassung von Steuert und Antriebsleistung erforderlich.

8 Fahrsimulationen

Neben der Erprobung des Aggregates in Fahrversuchen wurden Fahrsimulationen an einem speziellen Prüfplatz durchgeführt. Die Fahrleistungen wurden mit Hilfe eines Umkehrstromrichters nachgebildet, während die Aufladung der Batterie vom bordeigenen Ladegerät übernommen wurde. Ziel der Fahrsimulationen war es, das Verhalten des Batterieaggregates unter batteriebestimmenden Randbedingungen bei unterschiedlichen Ladeverfahren zu testen und Aussagen über erforderliche Ladefaktoren, den notwendigen Wartungsaufwand, die Funktionstüchtigkeit des Differentialrekombinators und der Ladezustandsanzeige zu erlangen. Die batterie-spezifischen Randbedingungen wurden durch eine Anpassung der Entladespannung an den verwendeten Batterietyp eingestellt. Im Fahrbetrieb kommt es aufgrund technischer Gegebenheiten des Stellers zu einer frühen Abregelung der Entladeleistung. Es wurden Fahrsimulationen mit unterschiedlichen Ladeverfahren durchgeführt. Das Fahrverhalten wurde mit einem speziellen Entladezyklus nachgebildet, welcher sich am realen Fahrprofil orientierte. Dieses beinhaltet eine Entladung der Batterie mit hohen Stromspitzen, wie sie im realen Fahrbetrieb auftreten.

8.1 Prüfplatzaufbau

Zur Durchführung der Fahrsimulationen wurde ein Prüfplatz entsprechend Bild 8.1 aufgebaut. Während der Fahrsimulation wird die Fahrleistung mit Hilfe eines Umkehrstromrichters nachgebildet, der von einem Leitreechner Strom- und Spannungsvorgaben erhält. Das Bordrechnersystem übernimmt - wie im realen Fahrbetrieb - die Datenerfassung und übermittelt wichtige Größen an den Leitreechner. Hier werden sie zur weiteren Auswertung abgespeichert. Zur Aufladung der Batterie dient ebenfalls wie im Fahrbetrieb das Bordladegerät, welches nach Beendigung einer Fahrsimulation automatisch zugeschaltet wird. Die Überwachung und Beendigung der Ladephase übernimmt der Bordrechner. Die einzelnen Komponenten und deren Zusammenschluß werden im folgenden näher beschrieben.

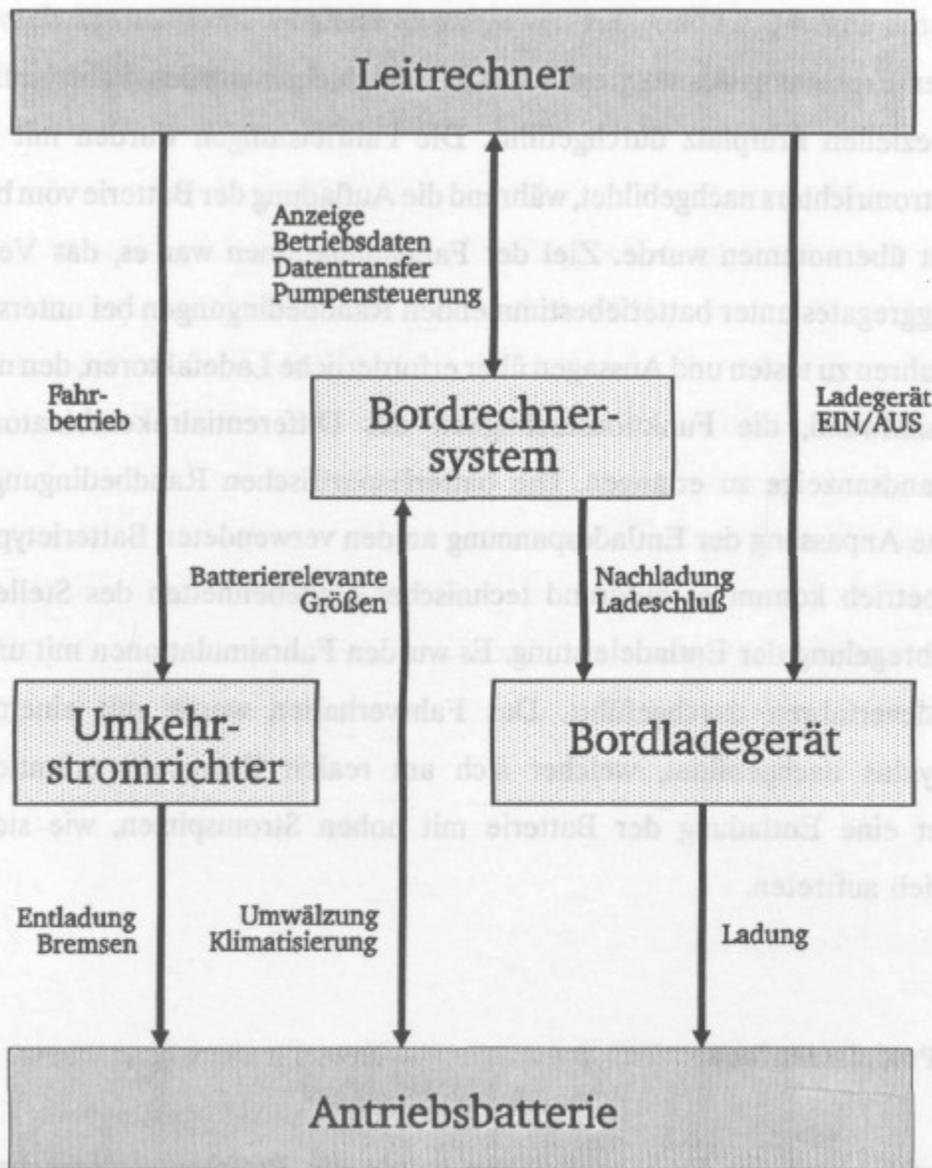


Bild 8.1: Blockschaltbild des Simulationsprüfplatzes

8.1.1 Umkehrstromrichter

Der verwendete Umkehrstromrichter hat die Leistungsdaten

- ▶ AC 380 V / 89,6 A / 50 Hz
- ▶ DC 13-130 V / 3-300 A

und zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- schnelle Stromanstiegszeit,
- schneller Wechsel der Stromrichtung,
- kurze Einschwingzeit auch bei hohen Stromänderungen,
- externe Ansteuerbarkeit,
- manuelle Einstellbarkeit von oberen und unteren Spannungsgrenzen,
- manuelle Vorgabe von I_{SOLL} und U_{SOLL} .

8.1.2 Prüfplatzrechner

Bei dem eingesetzten Prüfplatzrechner handelt es sich um einen IBM-PC-kompatiblen MS-DOS Rechner vom Typ HP Vectra AT-286 mit NEC Multisync Farbmonitor und "Enhanced Graphic Adapter" (EGA)-Karte. Er enthält als Schnittstelle eine spezielle Wandlerkarte (RTI-Karte), mit der die Ein- und Ausgabe von analogen und digitalen Werten möglich ist. Die Wandler-Karte hat eine Auflösung von 12 Bit und besitzt:

- 2 analoge Eingänge,
- 8 digitale Eingänge,
- 2 analoge Ausgänge,
- 8 digitale Ausgänge.

Für die Prozeßsteuerung und Datenaufnahme, sowie die Auswertung der gewonnenen Ergebnisse, wurden handelsübliche Standardprogramme verwendet. "Control EG" ist ein menügesteuertes Prozeßsteuerpaket von "Analog Device", welches zusammen mit der verwendeten Wandler-Karte die Möglichkeit bietet, digitale und analoge Signale im I/O-Betrieb zu verarbeiten. Es bietet folgende Ausstattungsmerkmale:

- High- und Low - Alarm,
- benutzerdefinierte Berechnung der Ein- und Ausgabewerte,
- Bestimmung von Variablen für alle Programmebenen,
- Parallelbetrieb mehrerer Ebenen (Sequenzen im "Multitasking"-Betrieb),
- verschiedene graphische Darstellungsmöglichkeiten,
- Boolesche Funktionen für I/O,
- Datenausgabe an Diskette/Festplatte, Drucker und Monitor während des

- Prozeßbetriebes,
- Änderungen im laufenden Programm,
 - flexible Anpassung an verschiedene Systeme.

Das verwendete Auswertungsprogramm "Lotus 1-2-3" ist ein Tabellenkalkulationsprogramm. Es hat den Vorteil, die mit "Control EG" gespeicherten Daten relativ einfach zu übernehmen und weiterzuverarbeiten. Dabei lassen sich durch Verknüpfung verschiedener Meßwerte mit algebraischen und booleschen Funktionen weitere Berechnungen durchführen. Das Programm ist voll menügesteuert.

8.2 Prüfzyklus

Die Realisierung des Fahrsimulationsprogrammes beinhaltet verschiedene Arbeitsschritte. Es mußten Meßwerte müssen erfaßt, algebraische Operationen in hoher Anzahl durchgeführt, Sollwerte berechnet und die erfaßten und berechneten Meßgrößen einem Speichermedium zugeführt werden. Alle Operationen müssen innerhalb eines kurzen Zeitraumes durchgeführt werden. Für den Prüfzyklus wurde in Anlehnung an statistische Analysen von Geschwindigkeits- und Leistungsverläufen /11/ die in Tabelle 8.1 angegebene Häufigkeitsverteilung zugrunde gelegt. Der maximale Fahrstrom I_{Fmax} wurde auf 250 A festgelegt.

I_F/I_{Fmax} [%]	Fahrstrom I_F [A]	Zeit [s],[%]	Entladungsmenge [Ah]
100	250,0	12	0,83
75	187,5	6	0,31
50	125,0	18	0,63
25	2,5	24	0,42
0	0,0	36	0,00
38	- 93,8	4	0,10
	Summe:	100	2,09

Tabelle 8.1: Häufigkeitsverteilung der Fahrströme

Der festgelegte Prüfzyklus ist in Bild 8.2 zu sehen. Die entnommene Ladung über den 100 sec andauernden Prüfzyklus beträgt ca. 7500 As bzw. 2,08 Ah. Der mittlere

Entladestrom liegt bei 75 A. Durch den Rückspeisestrom von $I_F = -93,8$ A wird eine Nutzbremmung des Fahrzeuges simuliert.

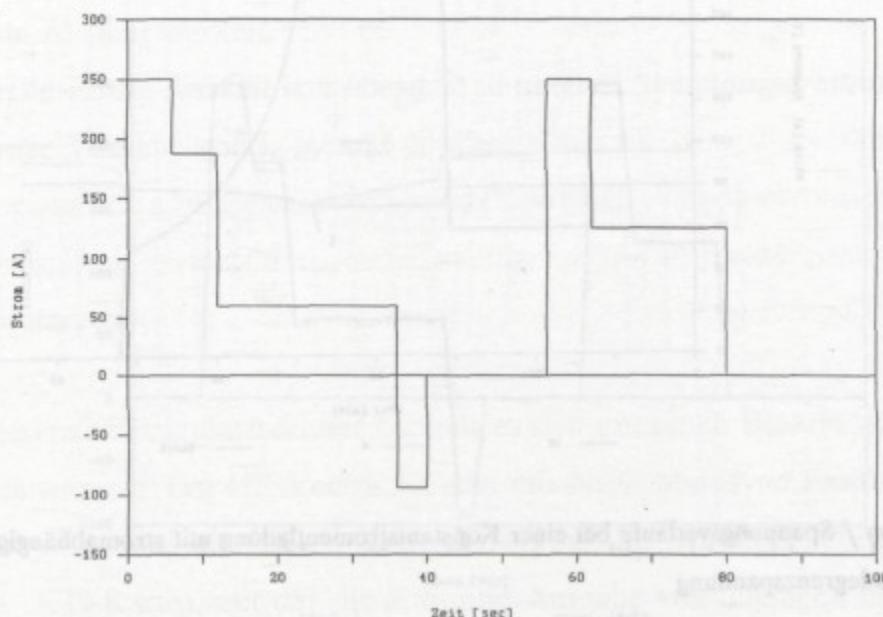


Bild 8.2: Stromsollwertvorgabe des Prüfzyklus

Die eigentliche Simulation einer Fahrt (Fahrzyklus) setzt sich aus ca. 63 nacheinander ablaufenden Prüfzyklen zusammen. Die Abregelgrenze für die Batteriespannung wurde stromabhängig vorgesehen und orientierte sich an den Vorgaben des Batterieherstellers. Ein Fahrzyklus wird beendet, wenn der Entladestrom bei maximaler Stromvorgabe den Wert von 150 A unterschreitet. Danach ist eine akzeptable Beschleunigung des Fahrzeuges nach eigenen Erfahrungen nicht mehr gegeben. Zur Veranschaulichung der Stromabregelung sind in **Bild 8.3** die Strom-/Spannungsverläufe am Ende einer Konstantstromentladung dargestellt. Zu Beginn der Entladung wird die Entladegrenzspannung (U_{Soll}) aus dem maximalen Entladestrom berechnet. Während der fortschreitenden Entladung reduziert sich die Batteriespannung (U) und erreicht schließlich die vorgegebene Grenzspannung (Punkt 1 in **Bild 8.3**). Eine nun einsetzende Abregelung des Stromes ist mit einer stromabhängigen Anhebung der Entladegrenzspannung verbunden.

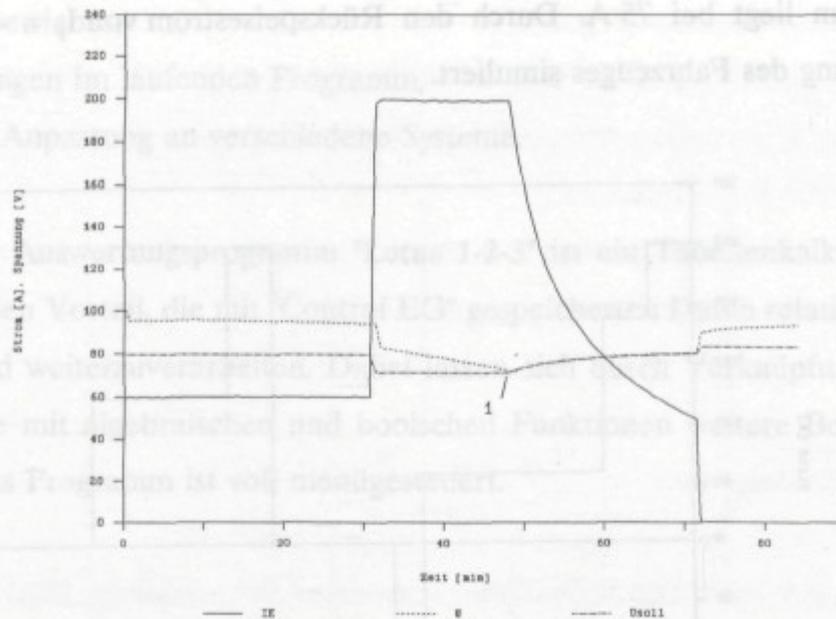


Bild 8.3: Strom / Spannungsverläufe bei einer Konstantstromentladung mit stromabhängiger Entladegrenzspannung

8.3 Batterieverhalten während einer Fahrsimulation

Zur Bestimmung des Batterieverhaltens wurde das Batterieaggregat nach dem festgelegten Fahrzyklus entladen und die Strom- und Spannungswerte in kurzen Zeitabständen (alle 2 Sekunden) abgespeichert. Die Sollwertvorgabe für den Entladestrom und der real fließende Strom zu Beginn der Fahrsimulation sind in [Bild 8.4](#) dargestellt.

Nach dem Erreichen der stromabhängigen Entladespannung wird der Entladestrom reduziert. [Bild 8.5](#) zeigt die Stromverläufe nach einsetzender Abregelung des Stromes am Ende der Fahrsimulation.

In [Bild 8.6](#) ist die Abregelung des Stromes am Ende der Simulation über mehrere Prüfzyklen dargestellt. Nach einer Begrenzung des maximalen Stromes auf 150 A wird die Fahrsimulation beendet, die sich aus ca. 63 Prüfzyklen zusammensetzt. Die Abregelung des Stromes setzt bei einer entnommenen Ladungsmenge von 114 Ah ein. Am Ende der Fahrsimulation betrug die entnommene Ladungsmenge 130 Ah. Legt man die in [Kapitel 7.1](#) dargestellten allgemeinen Fahrdaten zugrunde, so ergeben sich aus den o. g. Ladungsmengen mögliche Fahrstrecken von 55 bzw. 63 km. Dieses deckt sich mit

den Erfahrungen anderer CitySTROMer-Betreiber. Die gewählte Fahrsimulation ist somit geeignet, eine längere Stadtfahrt nachzubilden.

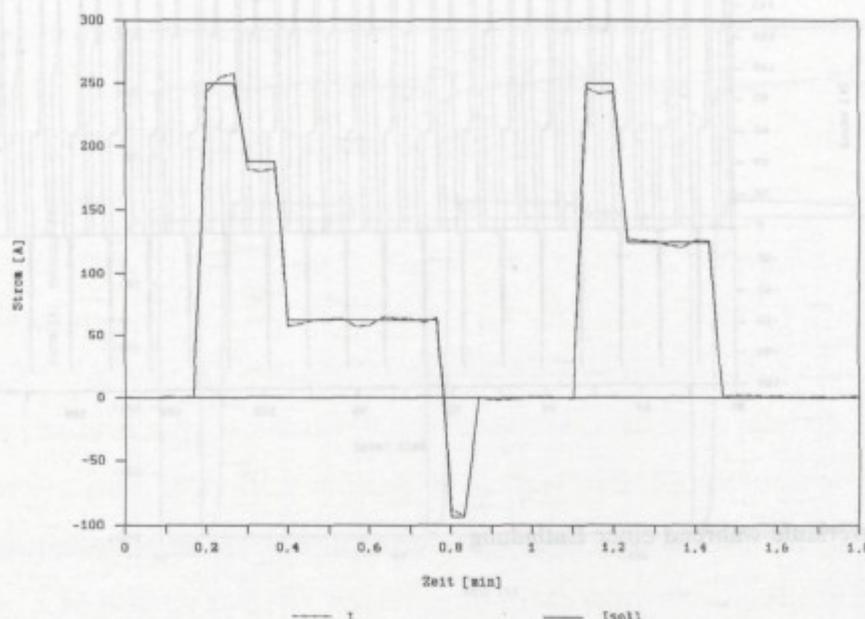


Bild 8.4: Stromverläufe zu Beginn einer Entladung

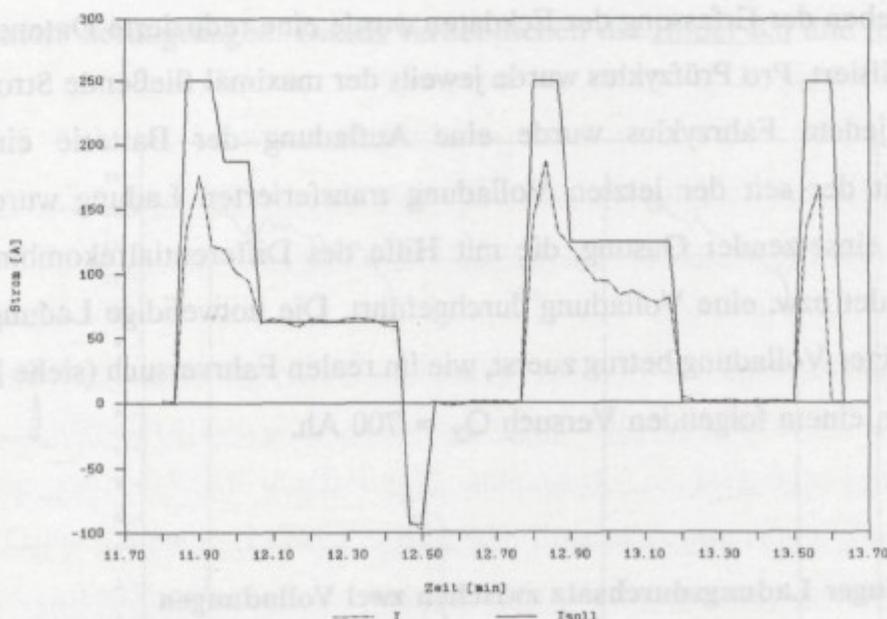


Bild 8.5: Stromverläufe am Ende einer Entladung

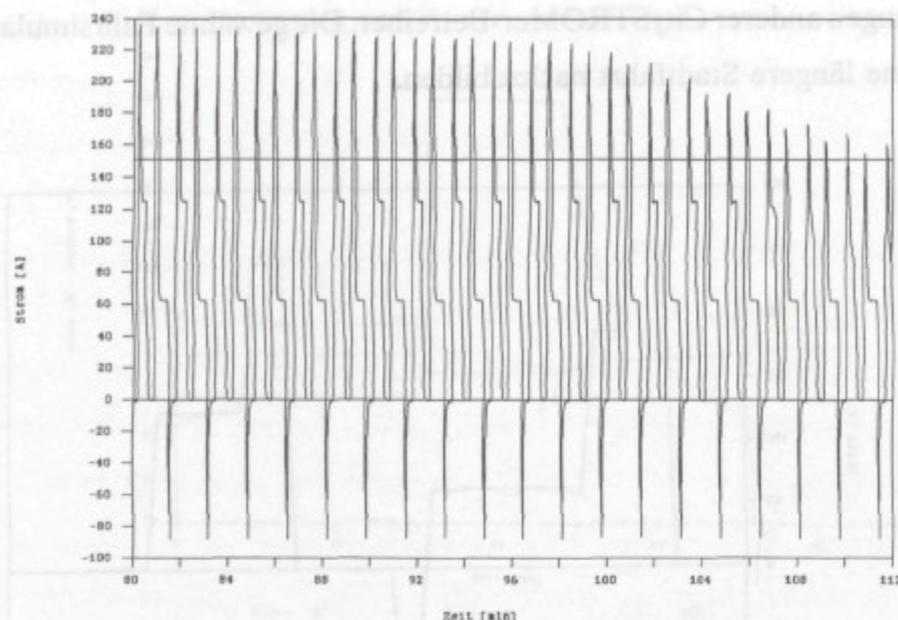


Bild 8.6: Stromverläufe während einer Entladung

8.4 Simulation mehrerer Fahrten

In verschiedenen Versuchen wurden mehrere Fahrten mit anschließender Ladung simuliert. Neben der Erfassung der Eckdaten wurde eine reduzierte Datenerfassung des Stromes realisiert. Pro Prüfzyklus wurde jeweils der maximal fließende Strom festgehalten. Nach jedem Fahrzyklus wurde eine Aufladung der Batterie eingeleitet. In Abhängigkeit der seit der letzten Vollladung transferierten Ladung wurde dann die Ladung bei einsetzender Gasung, die mit Hilfe des Differentialrekombinators erfaßt wurde, beendet bzw. eine Vollladung durchgeführt. Die notwendige Ladungsmenge zur Einleitung einer Vollladung betrug zuerst, wie im realen Fahrversuch (siehe [Kap. 7.3](#)) $Q_Z = 200 \text{ Ah}$, in einem folgenden Versuch $Q_Z = 700 \text{ Ah}$.

8.4.1 Geringer Ladungsdurchsatz zwischen zwei Vollladungen

In Anlehnung an die durchgeführten Fahrversuche wurden als erstes Fahrsimulationen durchgeführt, bei denen nach einer aufsummierten Entlademenge von 200 Ah eine Vollladung eingeleitet wurde. Die dazwischen liegenden Ladungen wurden bei einsetzender Gasung abgebrochen. [Bild 8.7](#) zeigt die Strom- und Spannungsverläufe (reduzierte

Stromerfassung) während drei Entlade- und Ladephasen. Jede zweite Ladung ist eine Vollladung.

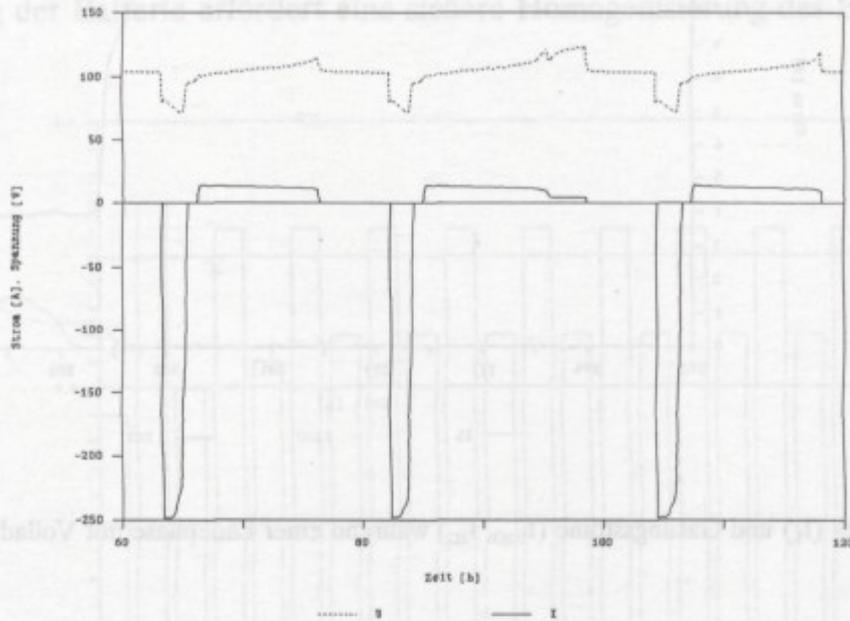


Bild 8.7: Strom-/Spannungsverläufe während mehrerer Prüfzyklen ($Q_Z = 200 \text{ Ah}$)

Zur Steuerung der Ladung wurden, wie bereits erwähnt, die Signale des Differentialrekombinators herangezogen. Dieses verdeutlichen die **Bilder 8.8** und **8.9**.

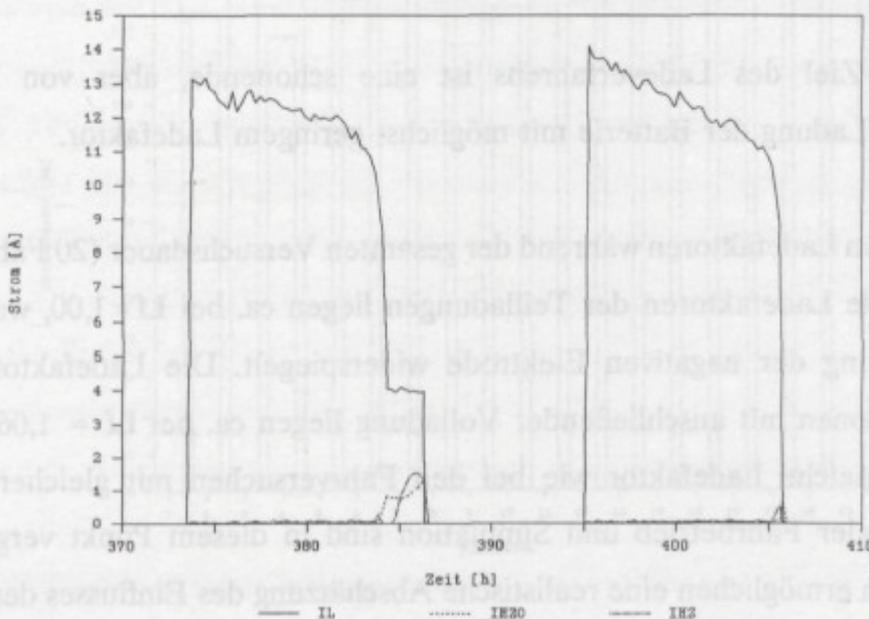


Bild 8.8: Lade- (I_L) und Gasungsströme (I_{H_2O} , I_{H_2}) während zwei verschiedener Ladephasen ($Q_Z = 200 \text{ Ah}$)

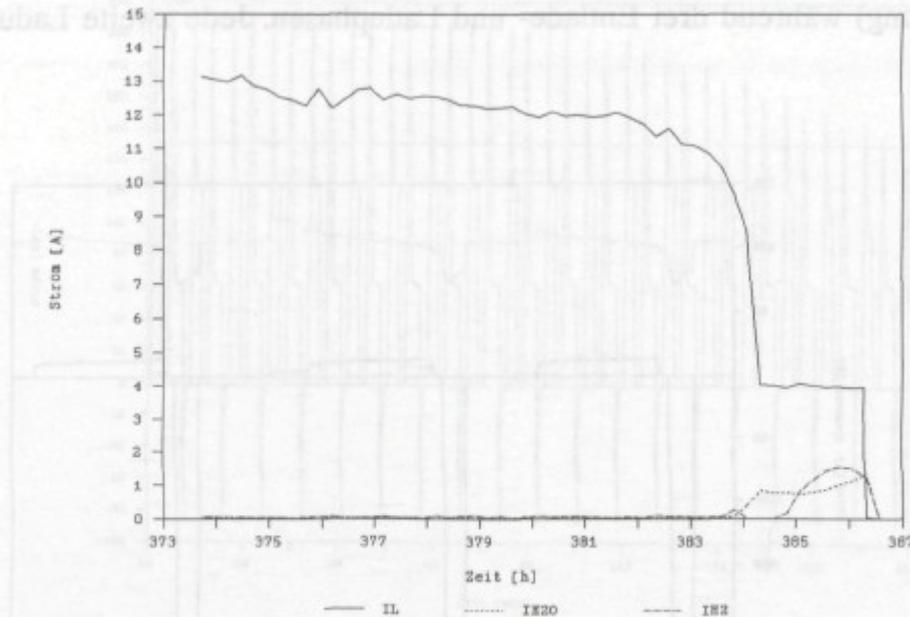


Bild 8.9: Lade- (I_L) und Gasungsströme (I_{H_2O} , I_{H_2}) während einer Ladephase mit Vollladung ($Q_Z = 200$ Ah)

Während einer Vollladung wird der Ladestrom bei einsetzender Wasserstoffgasung (I_{H_2O}) auf 4 A reduziert und die Ladung bei abfallendem Wasserstoffüberschuß (I_{H_2}) beendet. Eine Zwischenladung wird bei einsetzender Wasserstoffgasung (I_{H_2O}) abgebrochen. Jeder Vollladung folgt entsprechend [Bild 8.8](#) eine Zwischenladung. Die Funktionstüchtigkeit des Differentialrekombinators und des angewandten Ladeverfahrens war während der gesamten Versuchszeit gewährleistet.

Wichtigstes Ziel des Ladeverfahrens ist eine schonende, aber von Zeit zu Zeit vollständige Ladung der Batterie mit möglichst geringem Ladefaktor.

Die jeweiligen Ladefaktoren während der gesamten Versuchsdauer (20 Fahrzyklen) zeigt [Bild 8.10](#). Die Ladefaktoren der Teilladungen liegen ca. bei $L_f = 1,00$, was die geringe Selbstentladung der negativen Elektrode widerspiegelt. Die Ladefaktoren von zwei Fahrsimulationen mit anschließender Vollladung liegen ca. bei $L_f = 1,06$. Es wird der annähernd gleiche Ladefaktor wie bei den Fahrversuchen mit gleicher Ladetechnik erreicht. Realer Fahrbetrieb und Simulation sind in diesem Punkt vergleichbar. Die Simulationen ermöglichen eine realistische Abschätzung des Einflusses der Ladetechnik auf die entnehmbare Ladungsmenge. In [Bild 8.11](#) ist der Einfluß der unterschiedlichen Laderegelungen (Abbruch bzw. Vollladung) auf die entnehmbare Ladungsmenge zu sehen. Während die Entladungsmenge nach einer Vollladung im Mittel 132 Ah beträgt,

reduziert sie sich nach einer erfolgten Teilladung auf ca. 128 Ah. Dies bedeutet eine im realen Betrieb durchaus zu akzeptierende Reduzierung der Entlademenge um 3 %.

Eine Vollladung der Batterie erfordert eine sichere Homogenisierung des Elektrolyten.

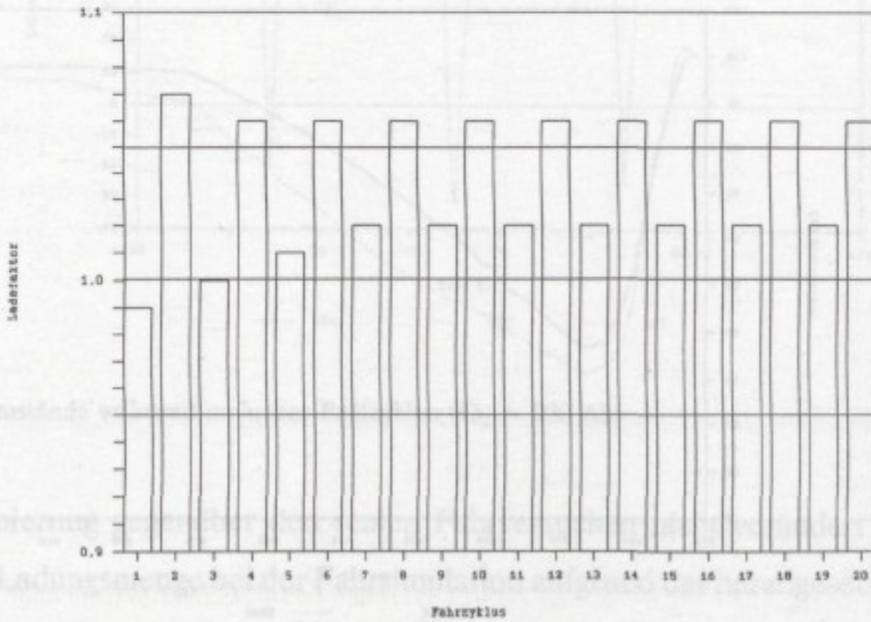


Bild 8.10: Ladefaktoren bei 20 Fahrzyklen ($Q_z = 200 \text{ Ah}$)

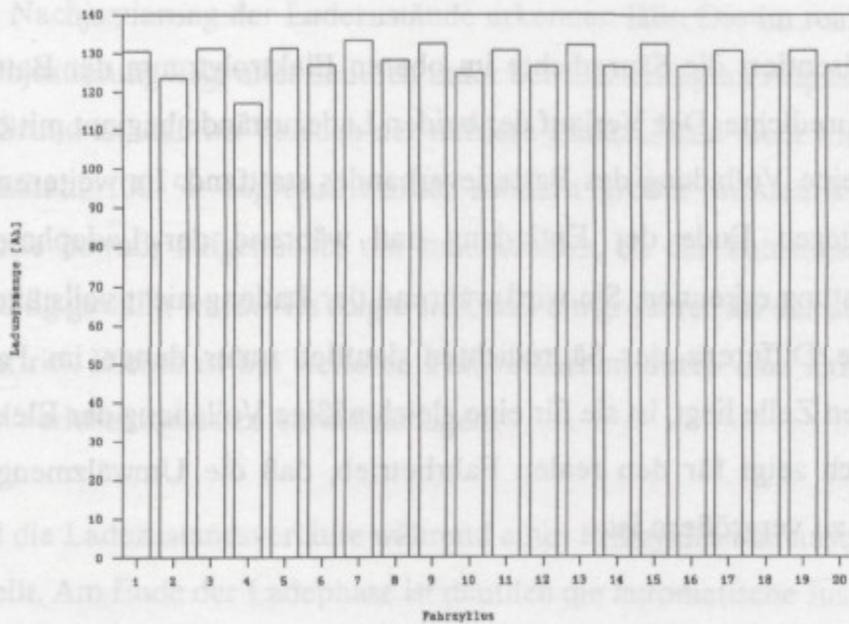


Bild 8.11: Entnommene Ladungsmenge bei 20 Fahrzyklen ($Q_z = 200 \text{ Ah}$)

Zur Beurteilung der Funktionstüchtigkeit und der Einflüsse der verwendeten Elektrolyt-

umwälzung wurden die mittlere und die obere Säuredichte während einer Fahrsimulation beobachtet. In **Bild 8.12** sind die Verläufe der oberen und mittleren Säuredichte im äußeren Elektrolytraum während einer Entladung und anschließenden Zwischenladung zu sehen.

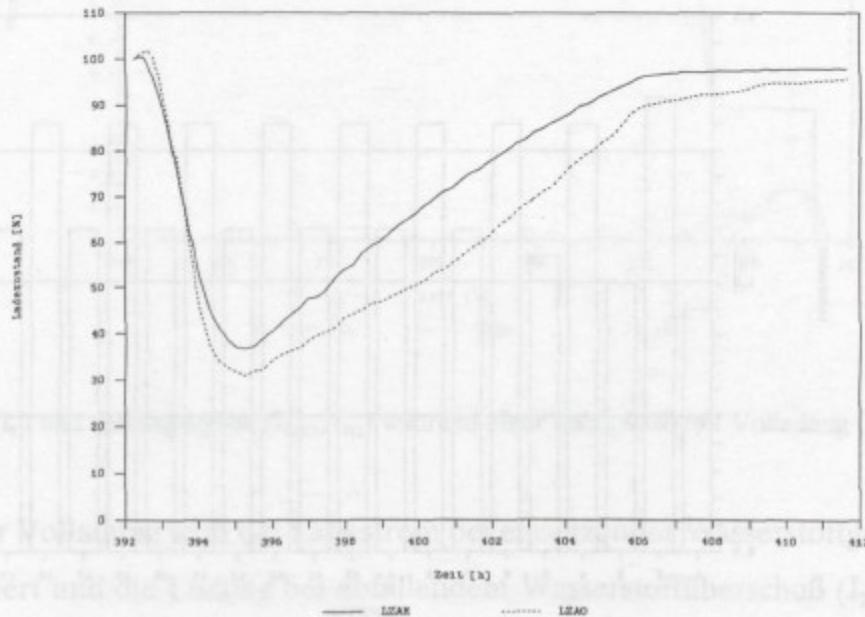


Bild 8.12: Mittlere (LZ_{AM}) und obere Säuredichte (LZ_{AO}) im äußeren Elektrolytraum während eines Prüfzyklus

LZ_{AO} repräsentiert die Säuredichte im oberen Elektrolytraum der Batterie, LZ_{AM} die mittlere Säuredichte. Der Verlauf der beiden Ladezustände beginnt mit einem Abgleich, da vorher eine Vollaadung des Batterieverbandes stattfand. Im weiteren Kurvenverlauf läßt sich gegen Ende der Entladung und während der Ladephase eine geringe Säureschichtung erkennen. Sie wird während der Ladung nicht vollständig aufgehoben. Obwohl die Differenz der Säuredichten deutlich unter denen im Falle einer nicht umgewälzten Zelle liegt, ist sie für eine gleichmäßige Vollaadung der Elektroden zu groß. Der Versuch zeigt für den realen Fahrbetrieb, daß die Umwälzmenge während der Ladephase zu vergrößern ist.

Die Fahrsimulationen erlauben eine genaue Aussage über die Funktionstüchtigkeit der Ladezustandserfassung. Während verschiedener Simulationen wurde die Entwicklung des äußeren, mittleren und inneren Ladezustandes beobachtet. **Bild 8.13** zeigt die Verläufe der Ladezustände während drei Prüfzyklen.

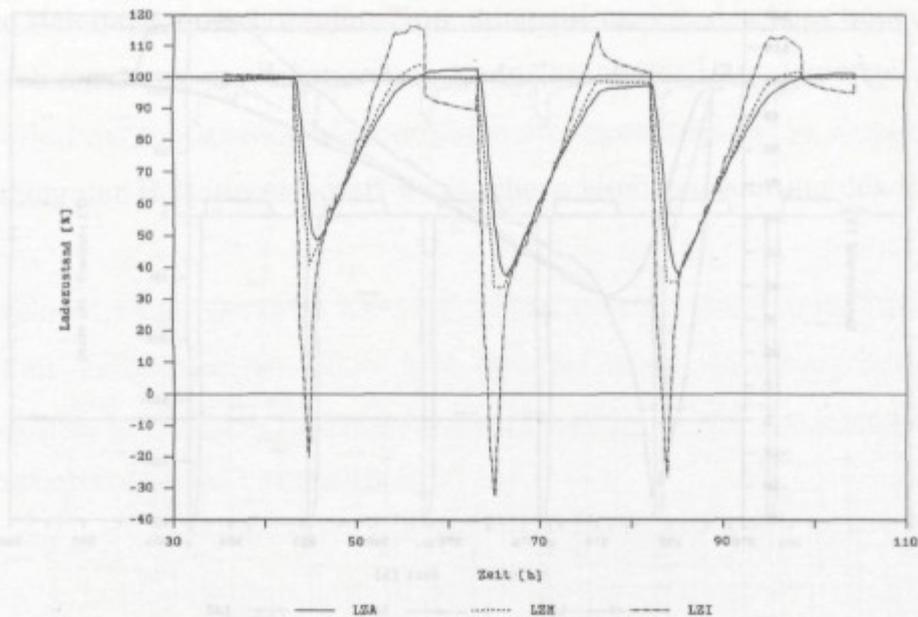


Bild 8.13: Ladezustände während mehrerer Prüfzyklen ($Q_Z = 200 \text{ Ah}$)

Da ihre Normierung gegenüber den realen Fahrversuchen nicht verändert wurde, die entnommene Ladungsmenge bei der Fahrsimulation aufgrund der herabgesetzten Grenzspannung aber größer ist, nimmt LZ_1 beim Entladeschluß erwartungsgemäß kleinere Werte als 0 % an. Auf eine veränderte Anpassung der Ladezustandsbestimmung wurde bewußt verzichtet. Die erste und dritte Ladung in **Bild 8.13** ist jeweils eine Vollladung, wie die erfolgte Nachjustierung der Ladezustände erkennen läßt. Die im realen Betrieb notwendige Nachjustierung liegt aber deutlich unter der hier erfolgten Anpassung (siehe **Kap. 7.5**). Der Grund ist, daß im Versuch der mittlere Ladezustand nicht wie im realen Betrieb auf maximal 100 % begrenzt wurde, sondern größer werden konnte. Die Begrenzung wurde bewußt aufgehoben, um zu erkennen, ob der konstant angesetzte Verluststrom richtig gewählt wurde. Es zeigte sich, daß ein größerer als der abgeschätzte Verluststrom auftritt. Dieses ist bei weiteren Fahrversuchen durch eine Erhöhung des angenommenen Verluststromes zu berücksichtigen.

In **Bild 8.14** sind die Ladezustandsverläufe während eines Prüfzyklus und anschließender Ladung dargestellt. Am Ende der Ladephase ist deutlich die automatische Justierung des mittleren Ladezustandes (LZ_M) und der sich daraus ergebende Einfluß auf LZ_1 zu erkennen. Die Art der adaptiven Nachjustierung wird als günstig beurteilt und sollte in weiteren Fahrversuchen beibehalten werden.

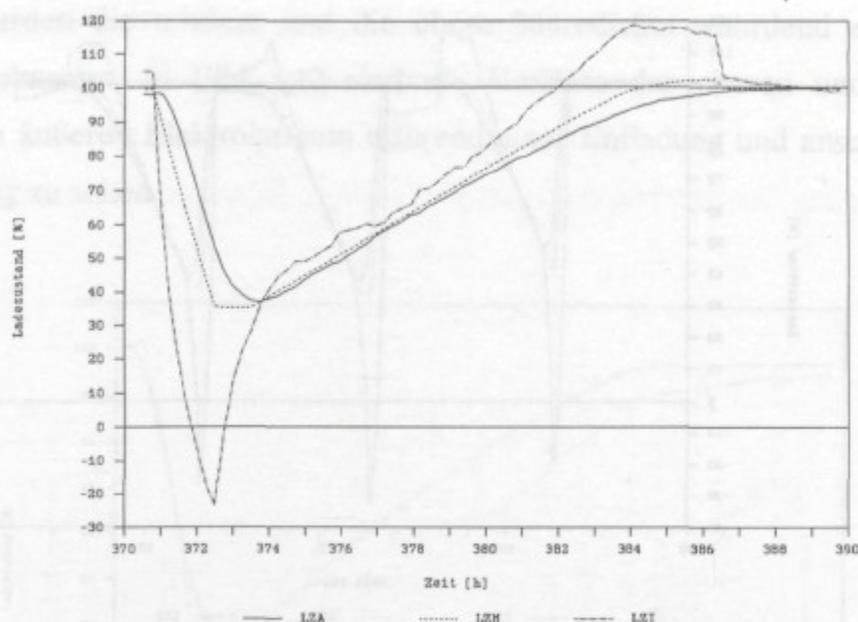


Bild 8.14: Verlauf der Ladezustände während eines Prüfzyklus ($Q_Z = 200 \text{ Ah}$)

8.4.2 Großer Ladungsdurchsatz zwischen zwei Volladungen

Es zeigte sich bereits, daß eine Vollladung der Batterie erst nach einem vorgegebenen Ladungsdurchsatz, der größer ist als der Ladungsdurchsatz pro Fahrt, die Batterie schont und den Ladefaktor verringert. Die folgende Untersuchung galt der Frage, ob ein vorgegebener Ladungsdurchsatz zwischen zwei Volladungen von größer 200 Ah sinnvoll ist. Er wurde auf den sicherlich zu großen Wert von 700 Ah festgelegt. Das Verhalten der Ladezustandsanzeige sollte ferner unter diesen extremen Randbedingungen untersucht werden. Es wurden in diesem Versuch 10 Fahrten simuliert. Aufgrund der hohen Dauerbelastung während des Versuches gab es Temperaturunterschiede von 15 K. Die minimale Elektrolyttemperatur betrug $T_{Bmin} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, die maximale $T_{Bmax} = 42 \text{ }^\circ\text{C}$. **Bild 8.15** zeigt die Strom- und Spannungsverläufe der ersten 6 Fahrsimulationen. Am Verlauf der Gasungsströme in **Bild 8.16** ist zu erkennen, daß nach den ersten 5 Fahrsimulationen die Ladung bei einsetzender Gasung abgebrochen wurde, also eine Teilladung durchgeführt wurde. Nach der 6. Fahrsimulation wurde dagegen der Ladestrom bei einsetzender Gasung auf 4 A verringert und eine Vollladung eingeleitet.

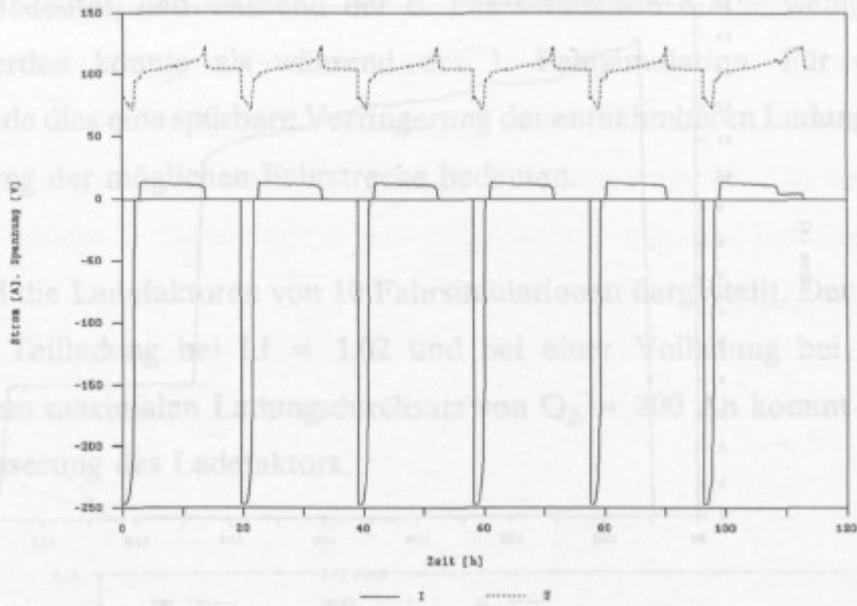


Bild 8.15: Strom-Spannungsverläufe während mehrerer Fahrsimulationen ($Q_Z=700$ Ah)

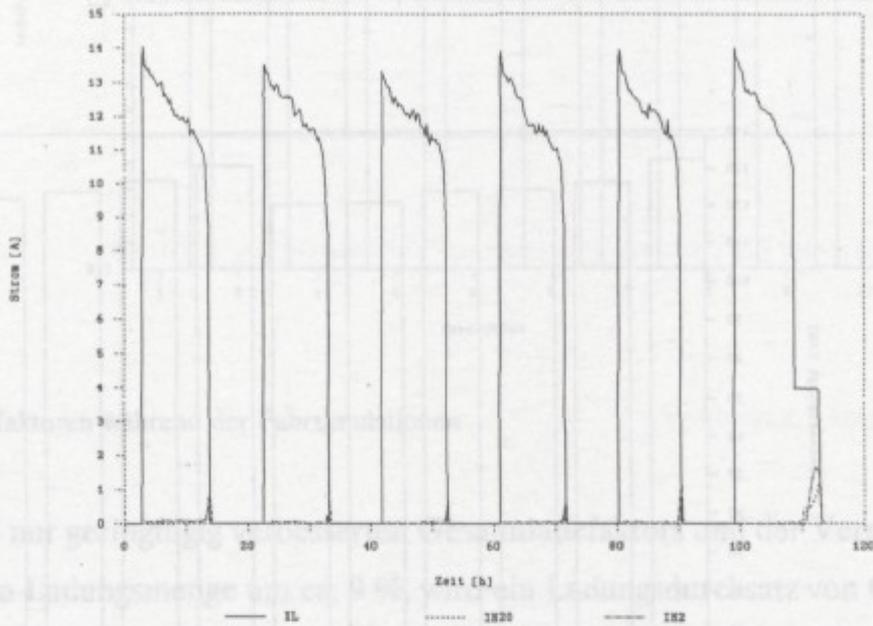


Bild 8.16: Lade- und Gasungsströme während mehrerer Fahrsimulationen ($Q_Z=700$ Ah)

Zur Verdeutlichung der Volladungsphase nach der 6. Fahrsimulation ist diese in **Bild 8.17** getrennt dargestellt.

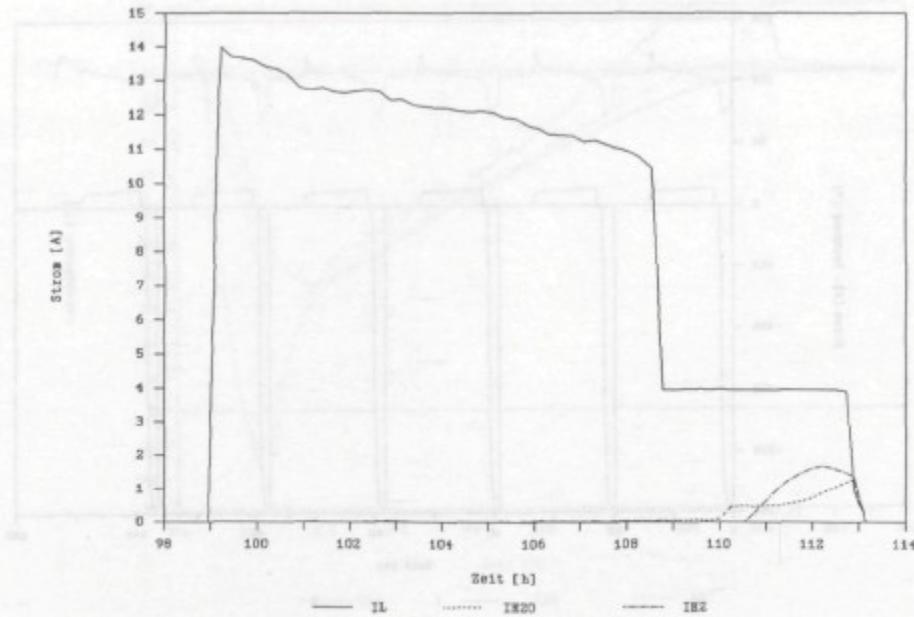


Bild 8.17: Strom-, Gasungsverläufe während der Volladungsphase

In **Bild 8.18** ist die jeweils entnommene Ladungsmenge der 10 Fahrsimulationen dargestellt.

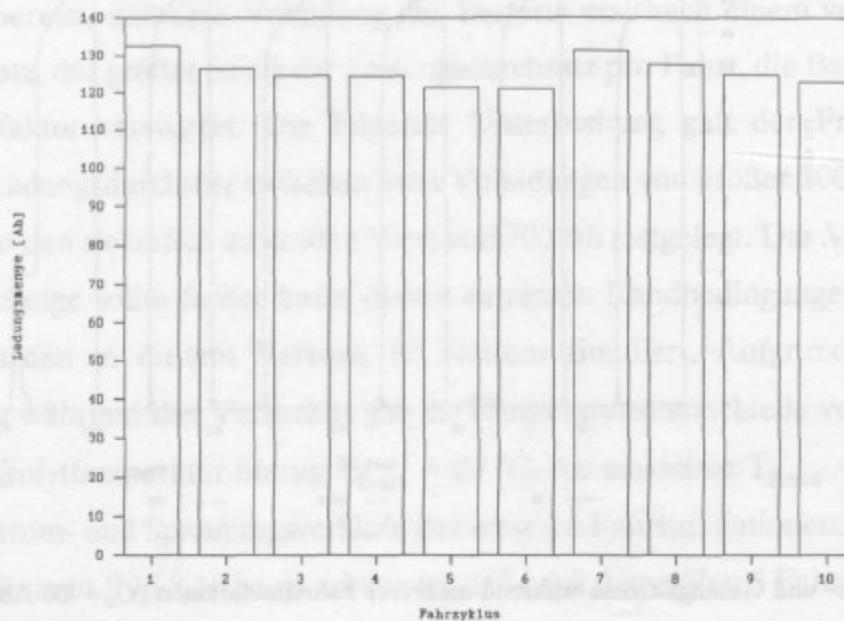


Bild 8.18: Entnommene Ladungsmenge während der Fahrsimulation

Je weiter eine Vollladung zurückliegt desto geringer sind die entnehmbaren Ladungsmengen. Zwischen der Entladung direkt nach einer Vollladung (1. Fahrsimulation) und der letzten Entladung vor einer Vollladung (6. Fahrsimulation) liegt eine Differenz von

10,1 Ah. Das bedeutet, daß während der 6. Fahrsimulation 8,7 % weniger Ladung entnommen werden konnte als während der 1. Fahrsimulation. Für den realen Fahrbetrieb würde dies eine spürbare Verringerung der entnehmbaren Ladung und damit eine Verringerung der möglichen Fahrstrecke bedeuten.

In Bild 8.19 sind die Ladefaktoren von 10 Fahrsimulationen dargestellt. Der Ladefaktor liegt bei einer Teilladung bei $L_f = 1,02$ und bei einer Vollladung bei $L_f = 1,05$. Gegenüber einem maximalen Ladungsdurchsatz von $Q_Z = 200$ Ah kommt es zu einer geringen Verbesserung des Ladefaktors.

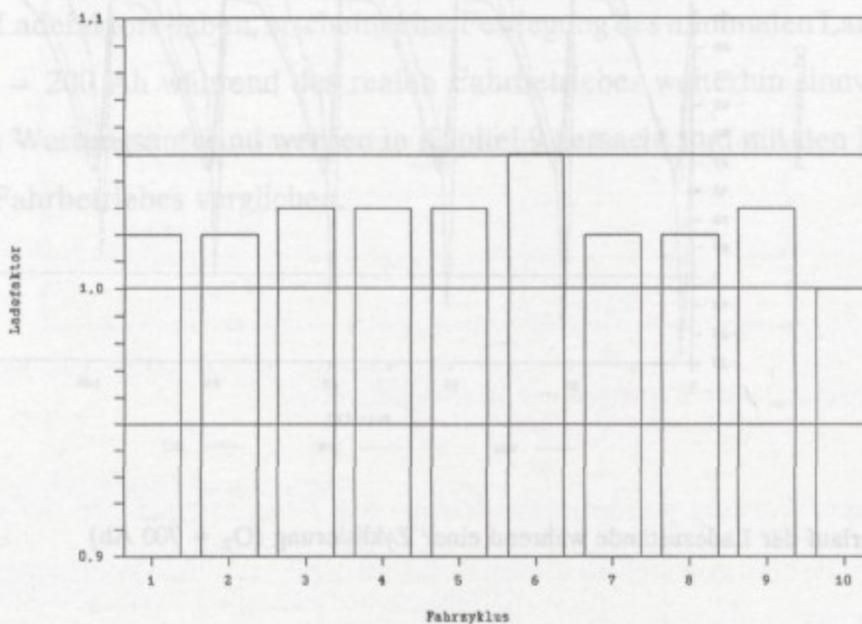


Bild 8.19: Ladefaktoren während der Fahrsimulationen

Aufgrund des nur geringfügig verbesserten Gesamtladefaktors und der Verringerung der entnehmbaren Ladungsmenge um ca. 9 %, wird ein Ladungsdurchsatz von $Q_Z = 700$ Ah zwischen zwei Vollladungen für den realen Fahrbetrieb als zu groß erachtet.

Während der Fahrsimulation wurden erneut die Verläufe der Ladezustände beobachtet. Bild 8.20 zeigt den Verlauf des äußeren, mittleren und inneren Ladezustandes während der ersten 6 Fahrsimulationen. Der angesetzte Verluststrom ist zu gering, so daß sich bei Teilladungen für LZ_M Ladezustände von 100 % und größer ergeben. Eine Erhöhung des Stromes von 54 mA (siehe Kap. 5.2) auf 94 mA würde die Genauigkeit der Berechnung von LZ_M erhöhen. Dieses bringt jedoch Probleme bei längeren Standzeiten, wenn sich

die Selbstentladung der Batterie stark verringert (siehe Kap. 7.5). Der äußere Ladezustand bleibt erwartungsgemäß unter 100 %. Eine im realen Betrieb erfolgende Anpassung von LZ_M und LZ_A findet aufgrund der fehlenden Pausen zwischen der Fahrsimulationen nicht statt. Im realen Fahrbetrieb wird die Anpassung durchgeführt, wodurch auch bei seltenen Vollladungen eine ausreichende Genauigkeit der Ladezustandsbestimmung gewährleistet ist.

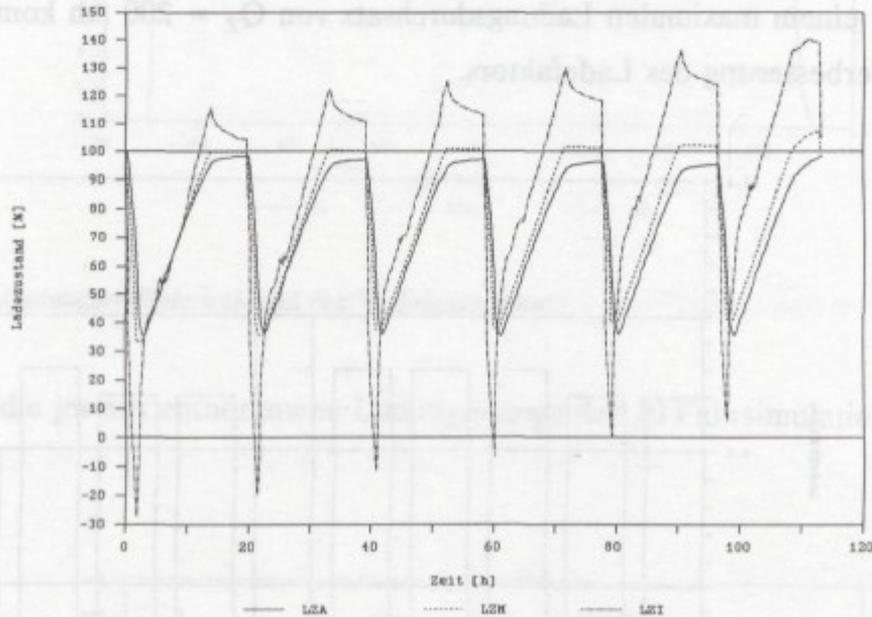


Bild 8.20: Verlauf der Ladezustände während einer Zyklisierung ($Q_Z = 700 \text{ Ah}$)

8.5 Zusammenfassung

An einem speziellen Prüfplatz wurden mit einem sich am realen Betrieb orientierenden Zyklusprofil und mit einer batteriegerechten Entladegrenzspannung Fahrsimulationen durchgeführt. Jeder Fahrsimulation folgte eine Aufladung der Batterie. Eine Vollladung wurde nach einem vorgegebenen minimalen Ladungsdurchsatz eingeleitet. Dieser Ladungsdurchsatz betrug in einem ersten Versuch $Q_Z = 200 \text{ Ah}$, in einem weiteren $Q_Z = 700 \text{ Ah}$. Die Vollladung wurde mit Hilfe eines Differentialrekombinators überwacht und gesteuert. Die Entlademengen entsprechen einer möglichen Fahrstrecke von 55 km ohne Stromabregelung und von 63 km mit einer Stromabregelung auf 150 A. Dieses liegt in der aus anderen Fahrversuchen bekannten Größenordnung. Eine Erhöhung des Ladungsdurchsatzes auf $Q_Z = 700 \text{ Ah}$ führt zu einer geringen Verbesserung des

Ladefaktors von $L_f = 1,06$ auf $L_f = 1,05$. Die entnehmbare Ladungsmenge während einer Fahrsimulation reduziert sich von Ladung zu Ladung geringfügig, wenn keine Vollladung durchgeführt wird. Bei einem Ladungsdurchsatz zwischen zwei Vollladungen von $Q_Z = 200$ Ah reduzierte sich die entnehmbare Ladungsmenge um 3 % bei $Q_Z = 700$ Ah um 8,7 %.

Die Funktionstüchtigkeit des Differentialrekombinators, der Säuresensoren und der Ladezustanderfassung war auch bei diesen extremen Versuchen gewährleistet.

Da seltene Vollladungen ($Q_Z = 700$ Ah) nur einen geringen Einfluß auf eine Verringerung des Ladefaktors haben, erscheint eine Festlegung des minimalen Ladungsdurchsatzes auf $Q_Z = 200$ Ah während des realen Fahrbetriebes weiterhin sinnvoll. Nähere Aussagen zum Wartungsaufwand werden in Kapitel 9 gemacht und mit den Ergebnissen während des Fahrbetriebes verglichen.

Wartungsintervall	0-Intervall	1-Intervall	2-Intervall
1. Intervall	2314	2282	2282
2. Intervall	2314	2282	2282
3. Intervall	2314	2282	2282

Tab. 9.1: Zeitpunkte der Wartungen und Wartungswerte

Vor der ersten Wartung wurde hauptsächlich das Zusammenwirken der einzelnen Systemkomponenten getestet. In dieser Zeit sind die ersten Funktionsmeter (siehe Tabelle 9.2, 1. Intervall) zurückgelegt worden.

Wartungsintervall	0-Intervall	1-Intervall	2-Intervall	3-Intervall
1. Intervall	2314	2282	2282	2282
2. Intervall	2314	2282	2282	2282
3. Intervall	2314	2282	2282	2282

Tab. 9.2: Ladungsmenge und Fahrstrecke zwischen den einzelnen Intervallen

Während der ersten Fahrversuche konnte die Funktionstüchtigkeit der Batterieerfassung des Bordrechners überprüft werden. Der eigentliche Fahrbetrieb begann nach der 1. und 2. Intervalle. Zwischen der 2. und 3. Intervalle wurde eine erneute Wartung durchgeführt. Neben allgemeinen Wartungsarbeiten wurden die Batterieerfassung und die Säuresensoren überprüft.

9 Einflüsse auf den Wasserhaushalt

Der Zustand des Batterieaggregates wurde während der verschiedenen Untersuchungen durch regelmäßige Wartungen kontrolliert. Neben der Funktionsüberprüfung der einzelnen Aggregatkomponenten wurde bei jeder Einzelzelle der Wasserhaushalt und die Funktionstüchtigkeit des Rekombinators überprüft. Der Batterieverband wurde im Februar 1988 in Betrieb genommen. Im Verlauf des Projektes erfolgten insgesamt drei Wartungen. Die Zeitpunkte der Wartungen und der Wartungsintervalle sind in Tabelle 9.1 zu sehen.

Wartung	Zeitpunkt	Wartungsintervalle
Inbetriebnahme	2.88	
1. Wartung	12.88	10 Monate
2. Wartung	7.89	7 Monate
3. Wartung	12.89	5 Monate

Tabelle 9.1: Zeitpunkte der Wartungen und Wartungsintervalle

Vor der ersten Wartung wurde hauptsächlich das Zusammenwirken der einzelnen Systemkomponenten getestet. In dieser Zeit sind die ersten Fahrkilometer (siehe Tabelle 9.2, 1. Intervall) zurückgelegt worden.

Wartungsintervall	Qe [Ah]	Ql [Ah]	Fahrstrecke [km]
1. Intervall	2314	2855	860
2. Intervall	8471	9313	3437
3. Intervall	5554	6148	0

Tabelle 9.2: Ladungsmenge und Fahrstrecke zwischen den einzelnen Wartungen

Während der ersten Fahrversuche konnte die Funktionssicherheit der Betriebssoftware des Bordrechners verbessert werden. Der eigentliche Fahrbetrieb begann nach der 1. Wartung. Nach 3437 km Fahrstrecke folgte eine erneute Wartung. Zwischen der 2. und letzten Wartung wurden Prüfplatzversuche durchgeführt. Neben allgemeinen Wartungs-

arbeiten wurde bei jeder Wartung der Füllstand der Zellen kontrolliert und aufgefüllt, die Rekombinatoren auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft und Kapazitätsproben durchgeführt. Der Wasserverbrauch wird in Kap. 9.5 mit Ergebnissen anderer Elektrofahrzeugbetreiber verglichen.

9.1 Durchführung einer Wartung

Die Durchführung der regelmäßigen Wartungsarbeiten orientierte sich an folgendem Ablaufplan.

Herstellung eines definierten Ausgangszustandes der Fahrzeugbatterie

- Vollladung der Batterie
- Messung der Säuredichten jeder Zelle
- Messung der Einzelspannungen
- Durchführung einer Kapazitätsprobe mit I_5
- Aufladung der Batterie mit Ladefaktor 1.2

Durchführung allgemeiner Wartungsarbeiten

- Überprüfung des Elektolytstandes jeder Zelle, Auffüllen der Zellen mit destilliertem Wasser
- Test der Funktionstüchtigkeit der Umwälzpumpen, optisch durch Beobachtung der Elektrolytenoberfläche und akkustisch mit Hilfe eines Stethoskopes
- optische Überprüfung der Dichtigkeit der Zellen

- Kontrolle der Polverbindungen
- Säuberung und Trocknung der Zellengehäuse
- Kontrolle des Füllstandes der Befeuchterzelle
- Überprüfung der Potentialfestlegung

Test der Funktionstüchtigkeit der Rekombinatoren auf einem Elektrolysestand

- Ermittlung der Rekombinatortemperaturen bei
 - 4 A Gasungsstrom (Nachladestrom) und
 - 9 A Gasungsstrom (maximale Rekombination)

Durchführung von Kapazitätsproben

Der Batterieverband wird mit folgenden Strömen bis zum Erreichen der Entladegrenzspannung U_E entladen und danach mit Ladefaktor 1,2 aufgeladen:

$$I_{1/2} = 176.8 \text{ A bis } U_{E1/2} = 1.52\text{V/Zelle} = 72.96 \text{ V/Verband}$$

$$I_1 = 113.2 \text{ A bis } U_{E1} = 1.6\text{V/Zelle} = 76.80 \text{ V/Verband}$$

$$I_3 = 51.2 \text{ A bis } U_{E3} = 1.675\text{V/Zelle} = 80.40 \text{ V/Verband}$$

$$I_5 = 34.4 \text{ A bis } U_{E5} = 1.7\text{V/Zelle} = 81.60 \text{ V/Verband}$$

$$I_{10} = 19.6 \text{ A bis } U_{E10} = 1.72\text{V/Zelle} = 82.56 \text{ V/Verband}$$

Die Kapazitätsproben werden von einer umfangreichen Meßwerterfassung begleitet.

- Kontinuierliche Messung:
 - ▶ Blockspannung
 - ▶ Batteriestrom

- ▶ Batterietemperatur
 - ▶ Umgebungstemperatur
 - ▶ Zellenspannung ausgewählter Einzelzellen
- Manuelle Messung:
- ▶ Uhrzeit am Anfang und Ende jeder Meßreihe
 - ▶ Anfangsspannung jeder Einzelzelle

Alle Einzelzellenspannungen nach folgendem Muster:	
•	direkt nach Beginn der Entladung
•	3x während der Entladung
•	fortlaufend gegen Ende der Entladung

- ▶ Säuredichten der Einzelzellen nach der Entladung mit I_1 im entladenen Zustand und nach abgeschlossener Diffusion (nach ca 2h)

Bestimmung des Gasungspotentiales

Um die Gasungsspannung in Abhängigkeit der Gasungsströme zu bestimmen und so Veränderungen einzelner Zellen zu erkennen, wird bei unterschiedlich kleinen Ladeströmen die Klemmenspannung jeder Einzelzelle gemessen.

Folgende Ladeströme gelten für die 172 Ah Batterie:

$$I_1 = 0.0172 \text{ A} = (0.01 \text{ A} / 100 \text{ Ah}) \cdot Q_N$$

$$I_{10} = 0.172 \text{ A} = (0.1 \text{ A} / 100 \text{ Ah}) \cdot Q_N$$

$$I_{100} = 1.72 \text{ A} = (1 \text{ A} / 100 \text{ Ah}) \cdot Q_N$$

9.2 Wasseraustrag

Bei jeder Wartung wurde der Elektrolytstand der einzelnen Zellen überprüft und die Zellen mit destilliertem Wasser aufgefüllt. Tabelle 9.3 zeigt neben der im Mittel pro Zelle nachgefüllten Wassermenge die aufsummierten Überlademengen, die sich daraus ergebende Wasserzersetzung und die sich aus der Überlademenge und der Nachfüllmenge ergebende Wasserrückführrate.

Wartungsintervall	Überlademenge [Ah]	Elektrolysierte Wassermenge [ml]	Wassernachfüllmenge [ml]	Wasserrückführ-rate [%]
1.Intervall	541	182	109	40
2.Intervall	841	282	13	96
3.Intervall	597	200	94	53

Tabelle 9.3: Mittelwerte der elektrolysierten und nachgefüllten Wassermengen und die Wasserrückführ-rate bei den einzelnen Wartungen

Während der Wasseraustrag in der Anfangsphase des Fahrbetriebes (1. Wartung) und bei den Prüfplatzversuchen (3. Wartung) relativ groß war, ist er bei den durchgeführten Fahrversuchen (2. Wartung) im Mittel extrem klein. Die Fahrversuche zeichnen sich durch eine sehr hohe Wasserrückführrate aus.

Die Unterschiede lassen sich wie folgt erklären:

Testphase (1. Wartung)

Während des Testbetriebes wurde der Verband durch viele kurze Zyklen stark überladen (Ladefaktor = 1,23). In Bild 9.1 ist die Nachfüllmenge je Zelle bei der ersten Wartung dargestellt. Der verhältnismäßig hohe Wasserverlust (Wasserrückführrate = 40 %) läßt sich durch die Unstöchiometrie der Gase in der Vollladephase erklären. Kurze Entladungen mit folgender vollständiger Aufladung führen zur Produktion von unstöchiometrischem, nicht rekombinierbarem Gas (O_2 oder H_2 -Überschuß), welches

nicht rekombinieren kann.

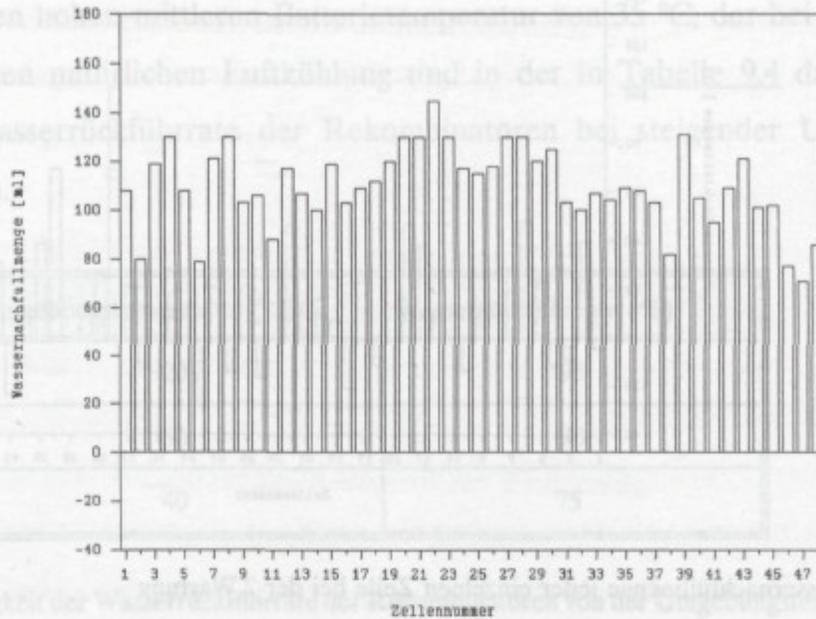


Bild 9.1: Wassernachfüllmenge jeder einzelnen Zelle bei der 1. Wartung

Fahrbetrieb (2. Wartung)

Während der durchgeführten Fahrversuche kam es zu einer deutlichen Verringerung des Wasseraustrages gegenüber der Testphase. Dieses verdeutlicht die Wasserrückführungsmengen (2. Wartung), die in [Bild 9.2](#) dargestellt sind. In dem Zeitraum vom Januar bis Juli 1989 wurde mit dem Fahrzeug in ca. 140 Fahrten eine Strecke von 3437 km zurückgelegt. Die mittlere Entlademenge pro Fahrt betrug 54 Ah bzw. 34 % Q_N und der Gesamtladefaktor in dieser Betriebsphase $L_f = 1,10$. Die geringe mittlere Nachfüllmenge von 24 ml und der gute theoretische Rekombinatorwirkungsgrad von 95 % zeigen, daß der Fahrbetrieb unter optimalen Betriebsbedingungen durchgeführt wurde. Die Aggregatbildung und die angepaßte Ladetechnik sind hierbei hervorzuheben. Die Streuung der einzelnen Wasserausträge ist jedoch relativ groß. Es sollte nach weiteren Maßnahmen gesucht werden, diese zu reduzieren.

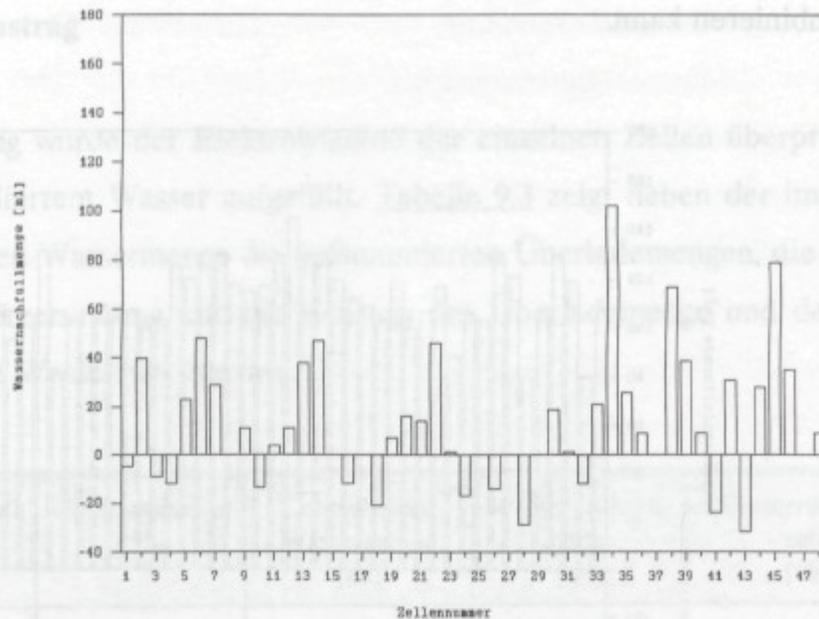


Bild 9.2: Wassernachfüllmenge jeder einzelnen Zelle bei der 2.Wartung

Fahrsimulation (3. Wartung)

Die mittlere Wassernachfüllmenge bei den Fahrsimulationsversuchen am Prüfplatz (siehe [Bild 9.3](#)) betrug 94 ml, daß heißt, der Wasseraustrag ist deutlich höher als während des Fahrbetriebes.

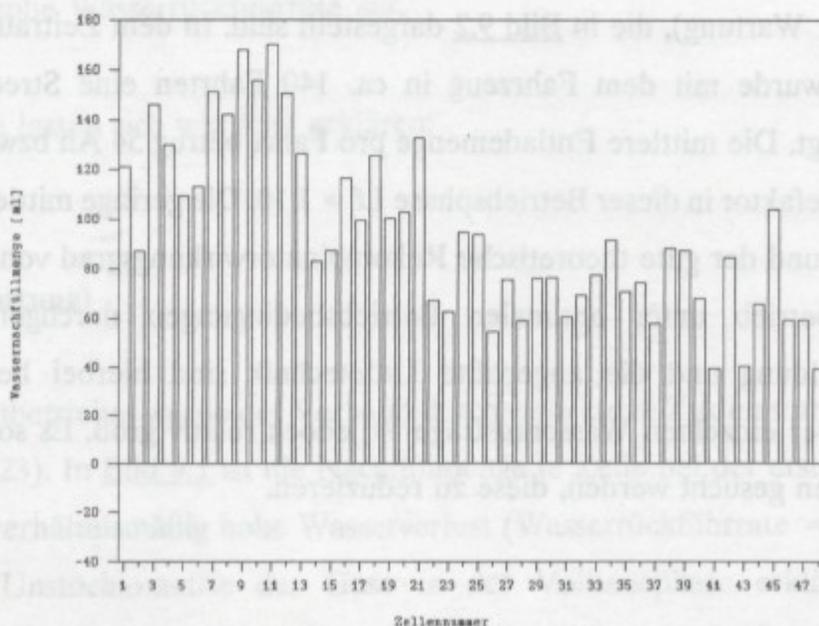


Bild 9.3: Wassernachfüllmenge jeder einzelnen Zelle bei der 3.Wartung

Gründe hierfür könnten in der extrem starken Dauerbelastung der Batterie - die Simulationsversuche entsprechen einer mittleren täglichen Fahrleistung von 85 km -, der damit verbundenen hohen mittleren Batterietemperatur von 35 °C, der bei stehendem Fahrzeug fehlenden natürlichen Luftkühlung und in der in Tabelle 9.4 dargestellten abnehmenden Wasserrückführrate der Rekombinatoren bei steigender Umgebungstemperatur liegen.

Umgebungstemperatur (°C)	Wasserrückführrate (%)
20	95
30	90
40	75

Tabelle 9.4: Abhängigkeit der Wasserrückführrate der Rekombinatoren von der Umgebungstemperatur /12/

Der negative Einfluß der relativ hohen Umgebungstemperatur auf die Wasserrückführrate der Rekombinatoren könnte auch die Tatsache erklären, daß die Zellen des Blockes, die durch die Zwangsbelüftung während der Ladephase zuerst belüftet werden (Zellen 24 - 48 in Bild 9.3), eine geringere Nachfüllmenge benötigen als die des ersten Blockes.

Dieses verdeutlichen die in Tabelle 9.5 dokumentierten Mittelwerte.

Block	Zellen-Nr.	mittl. Nflm.[ml]	Streuung [ml]
I	1 - 24	118,0	29,6
II	25 - 48	69,7	16,8

Tabelle 9.5: Mittelwerte und Streuungen der Wassernachfüllmengen in den zwei Blöcken

Die Anordnung der Zellen wurde in Kapitel 3 gezeigt und ist Bild 3.2 zu entnehmen.

9.3 Rekombinatorverhalten

Die Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der Rekombinatoren erfolgte bei jeder Wartung auf einem speziellen Elektrolysestand. Folgende Testreihen wurden durchgeführt.

- | | | |
|--------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| 1. Testreihe | $t_{\text{Betrieb}} = 20 \text{ min}$ | $I_{\text{Gas}} = 4 \text{ A,}$ |
| 2. Testreihe | $t_{\text{Betrieb}} = 25 \text{ min}$ | $I_{\text{Gas}} = 9 \text{ A.}$ |

Der im realen Fahrbetrieb auftretende Nachladestrom (4 A) und der maximale Rekombinationsstrom (9 A) waren die Bestimmungskriterien zur Auswahl der Gasungsströme. Bild 9.4 zeigt zusammenfassend die Mittelwerte der Rekombinatortemperaturen bei 4 A und 9 A stöchiometrischer Gasung bei den einzelnen Wartungen. Die bei der jeweiligen Wartung aufgefüllten Wassermengen sind ebenfalls in das Bild mit aufgenommen.

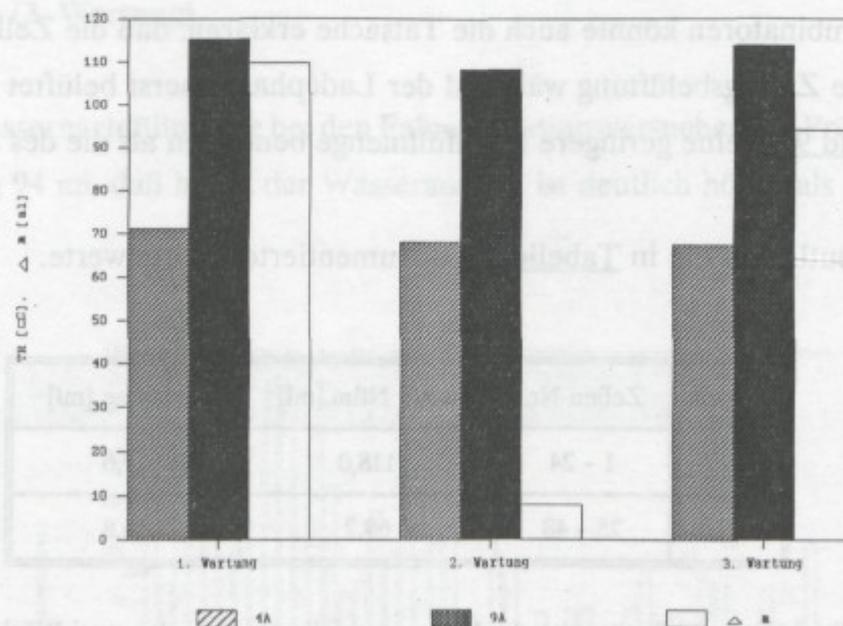


Bild 9.4: Mittelwerte der Rekombinatortemperaturen (T_R) bei 4 A und 9 A stöchiometrischer Gasung und Wassernachfüllmengen pro Zelle (Δm) bei allen drei Wartungen

Es zeigt sich, daß sich die Rekombinationsfähigkeit der Rekombinatoren trotz unterschiedlicher Wassernachfüllmengen nicht merklich verändert haben. Die Bilder 9.5 und 9.6 zeigen die einzelnen Temperaturen der beiden Meßreihen für die 1. und 3. Wartung.

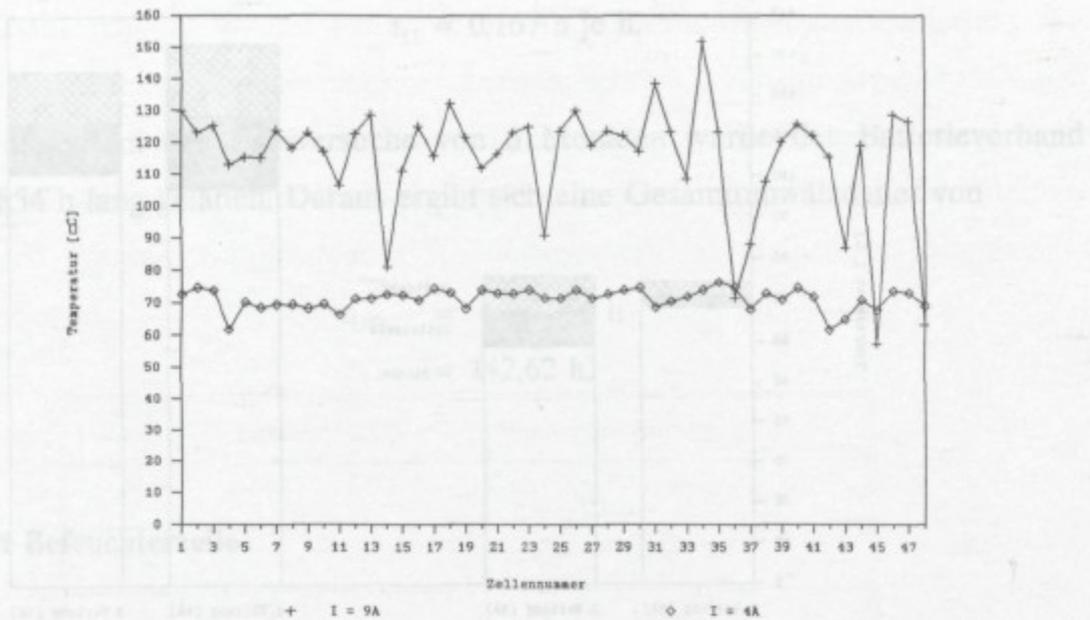


Bild 9.5: Temperaturen der Rekombinatoren bei 4 A und 9 A stöchiometrischer Gasung (1. Wartung)

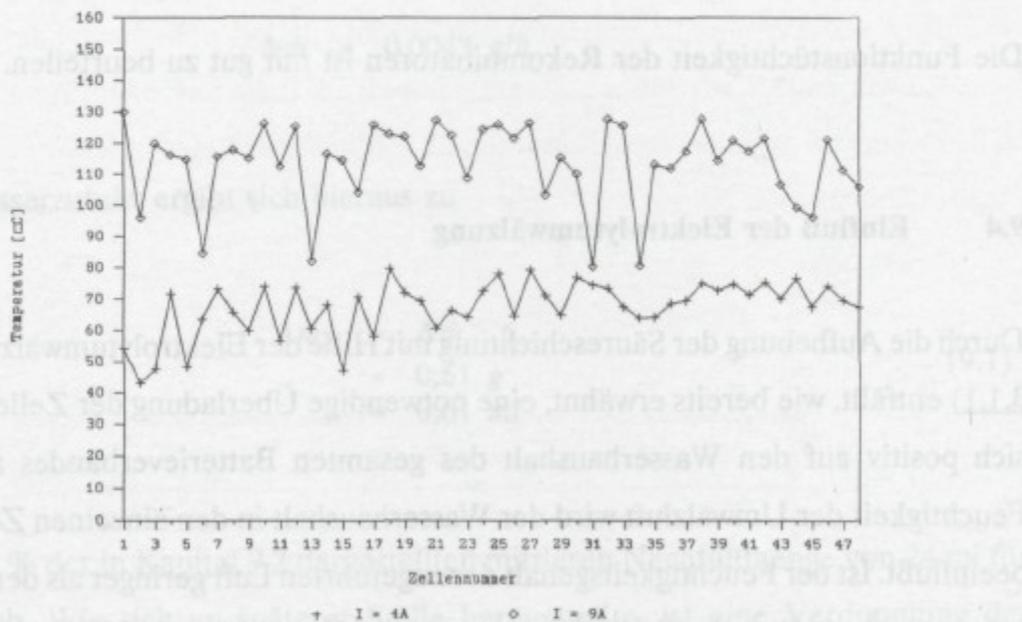


Bild 9.6: Temperaturen der Rekombinatoren bei 4 A und 9 A stöchiometrischer Gasung (3. Wartung)

Sie verdeutlichen den geringen Streubereich der einzelnen Rekombinatoren. Alle Rekombinatoren sind auch bei der 3. Wartung funktionstüchtig und zeigen akzeptable Rekombinationsraten. Eine genaue Analyse des mittleren Temperaturverhaltens ist in [Bild 9.7](#) zu sehen. Hier läßt sich erkennen, daß die mittleren Rekombinatortemperaturen geringfügig kleiner werden. Die Streuung der Temperaturen wird etwas größer.

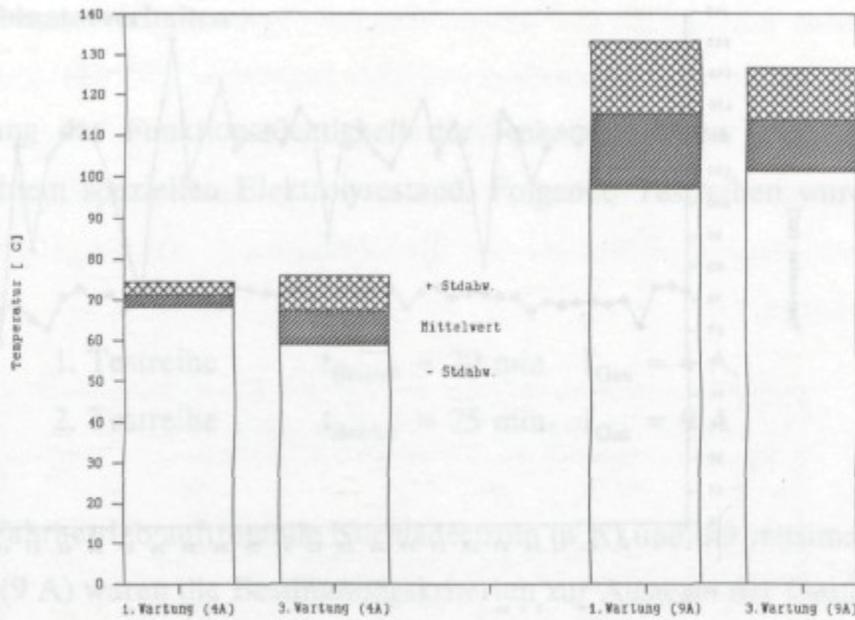


Bild 9.7: Mittelwert und Standardabweichung der Rekombinatortemperaturen bei 4 A und 9 A stöchiometrischer Gasung.

Die Funktionstüchtigkeit der Rekombinatoren ist mit gut zu beurteilen.

9.4 Einfluß der Elektrolytumwälzung

Durch die Aufhebung der Säureschichtung mit Hilfe der Elektrolytumwälzung (siehe [Kap. 3.1.1](#)) entfällt, wie bereits erwähnt, eine notwendige Überladung der Zellen. Dieses wirkt sich positiv auf den Wasserhaushalt des gesamten Batterieverbandes aus. Durch die Feuchtigkeit der Umwälzluft wird der Wasserhaushalt in den einzelnen Zellen zusätzlich beeinflußt. Ist der Feuchtigkeitsgehalt der zugeführten Luft geringer als der Feuchtigkeitsgehalt der Luft über der Schwefelsäure, so wird Wasser aus den Zellen herausgetragen. Umgekehrt wird Wasser aus feuchter Umluft in der Schwefelsäure zurückgehalten. Um den zusätzlichen Austrag von Wasser durch die Umwälzluft zu verhindern und andererseits eine gewisse Menge an Wasser über die Umwälzluft in die Zellen zu transportieren, wurde eine in [Kapitel 3.1.5](#) näher beschriebene Befeuchterzelle in den Gaskreislauf integriert. Die Effektivität der Befeuchterzelle im realen Betrieb wird im folgenden abgeschätzt und mit dem Betrieb ohne Befeuchterzelle verglichen.

Während des Fahrbetriebes betrug die mittlere Umwälzdauer in der Hauptladephase

$$t_U = 0,167 \text{ h je h.}$$

Über den Zeitraum der Fahrversuche von 6 Monaten wurde der Batterieverband insgesamt 854 h lang geladen. Daraus ergibt sich eine Gesamtumwälzdauer von

$$\begin{aligned} t_{UG} &= t_U \cdot 854 \text{ h} \\ &= 142,62 \text{ h.} \end{aligned}$$

Betrieb mit Befeuchterzelle

Nach Gleichung 3.3 beträgt beim Einsatz einer Befeuchterzelle die Wasserzufuhr jeder Einzelzelle

$$\Delta \dot{m} = 0,0043 \text{ g/h .}$$

Die Gesamtwasserzufuhr ergibt sich hieraus zu

$$\begin{aligned} \Delta \dot{m}_G &= \Delta \dot{m} \cdot t_{UG} \\ &= 0,61 \text{ g} \\ &= 0,61 \text{ ml .} \end{aligned} \tag{9.1}$$

Dieses sind 2,6 % der in Kapitel 9.2 dargestellten mittleren Nachfüllmenge von 24 ml für den Fahrbetrieb. Wie sich an späterer Stelle herausstellte, ist eine Verdopplung der Umwälzmenge sinnvoll. Hierdurch würde sich der durch die Befeuchtung kompensierbare Wasseranteil auf 5 % erhöhen. Eine weitere Erhöhung der Wasserzufuhr wäre durch eine Temperaturerhöhung der Befeuchterzelle, wie in Tabelle 9.6 dargestellt, möglich.

Temperatur der Befeuchterzelle [°C]	20	30	40
Wasserzufuhr [%]	5	20	50

Tabelle 9.6: Wasserzufuhr in Abhängigkeit der Befeuchterzellentemperatur

Die hier angestellten Betrachtungen beinhalten nicht die starke Streuung des Wasserhaushaltes der Einzelzellen im Fahrbetrieb und beziehen sich nicht auf den deutlich größeren Wasseraustrag während der Fahrsimulationen.

Betrieb ohne Befeuchterzelle

Bei einem Betrieb ohne Befeuchterzelle kann den einzelnen Zellen durch die Umwälzung Feuchtigkeit entzogen werden. Die Größe des möglichen Wasseraustrages wird abgeschätzt.

Es wird bei der Abschätzung von einem 50 % Feuchtigkeitsgrad der zugeführten Luft und einer Lufttemperatur von 25 °C ausgegangen. Dieses entspricht einer Sättigungsmenge in der Luft von

$$f_{(H_2O)} = 11,5 \text{ g/m}^3 .$$

Nach Gleichung 3.2 und 9.1 ergibt sich hieraus mit dem Ansatz der doppelten Umwälzmenge ein Wasseraustrag von

$$\Delta \dot{m} = 0,4 \text{ ml},$$

was 1,7 % der mittleren Nachfüllmenge ausmacht.

Der Einfluß einer Befeuchterzelle auf den Wasserhaushalt eines Batterieverbandes ist bei Umgebungstemperatur nur gering. Eine Temperaturerhöhung des Befeuchtermediums auf 40 °C kompensiert jedoch bis zu 50 % des Wasseraustrages im Fahrbetrieb und führt somit zu einer weiteren Verdopplung der Wartungszeiten.

Es wird daher vorgeschlagen, Möglichkeiten einer Temperierung der Befeuchterzelle näher zu untersuchen.

9.5 Wasseraustrag im Vergleich

Der Wasseraustrag im Fahrbetrieb wird mit entsprechenden Erfahrungen aus der Flottenerprobung von 1971-1987 (BMFT-Berlin), den Erfahrungen bei VW aus Transporterversuchen und mit Ergebnissen des RWE aus CitySTROMer-Versuchen verglichen. Der Wasseraustrag wurde jeweils auf den CitySTROMer umgerechnet. Neben dem Vergleich des Wasserverbrauches je 100 km Fahrstrecke erfolgt eine Abschätzung der maximalen Wartungsintervalle, d.h. der Zeit bis zum Absinken des Elektrolytstandes auf einen minimalen Wert. Der Wasserverbrauch wird pro 100 km und pro Zelle angegeben. Die Werte werden miteinander verglichen und sind in Bild 9.8 zusammenhängend dargestellt.

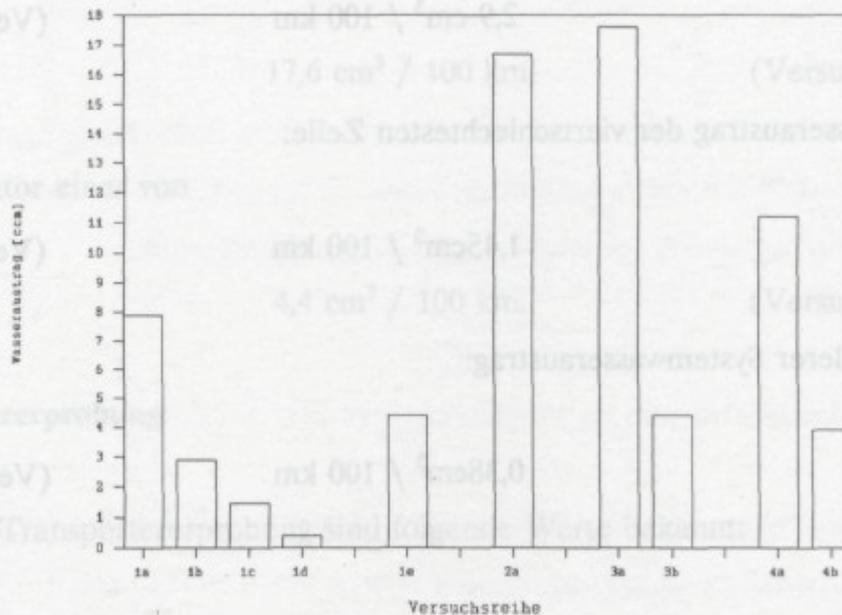


Bild 9.8: Wasseraustrag pro Zelle und 100km - Fahrstrecke im Vergleich

Während der eigenen Fahrversuche (Versuchsreihe 1b, 1c, 1d) war der Wasserverbrauch deutlich geringer, als bei den Vergleichsuntersuchungen. Aufgrund der großen Streuung der einzelnen Zellen erfolgt eine differenziertere Betrachtung des Wasserverbrauches.

Eigene Fahrversuche

Bei den eigenen Fahrversuchen ergaben sich folgende Werte:

- Wasseraustrag bei einem mittleren Ladefaktor von 1,09 (7.88-7.89) ohne Rekombinator:

7,9 cm³ / 100 km (Versuchsreihe 1a)

- Wasseraustrag der schlechtesten Zelle:

2,9 cm³ / 100 km (Versuchsreihe 1b)

- Wasseraustrag der viertschlechtesten Zelle:

1,45 cm³ / 100 km (Versuchsreihe 1c)

- mittlerer Systemwasseraustrag:

0,38 cm³ / 100 km (Versuchsreihe 1d)

- Wasseraustrag bei einem Ladefaktor von 1,05 (5.89-6.89) ohne Rekombinator:

4,4 cm³ / 100 km (Versuchsreihe 1e)

CitySTROMer-Versuche vom RWE

Die Angaben vom RWE beziehen sich auf Fahrerergebnisse, die während 1700 km Fahrstrecke mit einem CitySTROMer erzielt wurden. Im Mittel wurden

18,8 cm³ / 100 km (Versuchsreihe 2a)

nachgefüllt.

Flottenerprobung von 1971-1987 mit E-Transporter

Zum Vergleich werden folgende Angaben zugrunde gelegt und auf die CitySTROMer Verhältnisse umgerechnet:

- ▶ mittlerer Ladefaktor: 1,20
- ▶ Rekombinatorwirkungsgrad: 75%

Ohne Rekombinator ergibt sich hieraus ein Wasseraustrag von

$$17,6 \text{ cm}^3 / 100 \text{ km}, \quad (\text{Versuchsreihe 3a})$$

mit Rekombinator einer von

$$4,4 \text{ cm}^3 / 100 \text{ km}. \quad (\text{Versuchsreihe 3b})$$

VW-Transportererprobung

Aus einer VW-Transportererprobung sind folgende Werte bekannt:

- mittlerer Wasseraustrag pro 100 km ohne Rekombinator:

$$11 / 100 \text{ km}$$

- mittlerer Rekombinatorwirkungsgrad: 65%
- Energieverbrauch: CitySTROMer / Transporter =

$$350 \text{ Wh} / 630 \text{ Wh} = 0,538$$

Aus dem Energievergleich ergibt sich ein mittlerer Wasseraustrag ohne Rekombinatoren

für einen CitySTROMer von

$$(1 \text{ l}/100 \text{ km}) \cdot 0,538 = 0,538 \text{ l} / 100 \text{ km}$$

Bei 48 Zellen entspricht dies einem Wasserverbrauch je Zelle von

$$11,2 \text{ cm}^3 / 100 \text{ km.} \quad (\text{Versuchsreihe 4a})$$

Der sich hieraus abzuleitende Ladefaktor beträgt $L_f = 1,127$. Bei einem Rekombinatorwirkungsgrad von 65 % ergibt sich daraus ein Wasseraustrag von

$$3,9 \text{ cm}^3 / 100 \text{ km.} \quad (\text{Versuchsreihe 4b})$$

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß das entwickelte Batterieaggregat mit geringeren Wasserverlusten als andere Batterieverbände betrieben werden kann. Diese Aussage unterstützt ein Vergleich der notwendigen Wartungsintervalle.

9.6 Wartungsintervalle im Vergleich

Der ermittelte Wasserverbrauch Δm wird unter folgenden Annahmen in notwendige Wartungsintervalle umgerechnet:

durchschnittliche Fahrleistung pro Jahr:

$$15.000 \text{ km}$$

zulässiger Wasseraustrag pro Zelle

$$200 \text{ ml}$$

Der festgelegte maximal zulässige Wasseraustrag garantiert bei den eingesetzten Traktionszellen eine Benetzung der Elektroden und wurde so festgelegt, daß die durch

ihn bedingte Säuredichteerhöhung kleiner $0,03 \text{ kg/l}$ ist. Die Säuredichte liegt so immer unter der vom Hersteller vorgegebenen, maximal zulässigen Säuredichte von

$1,33 \text{ kg/l}$.

Die sich so ergebenden Wartungsintervalle zeigen die Bilder 9.9 und 9.10.

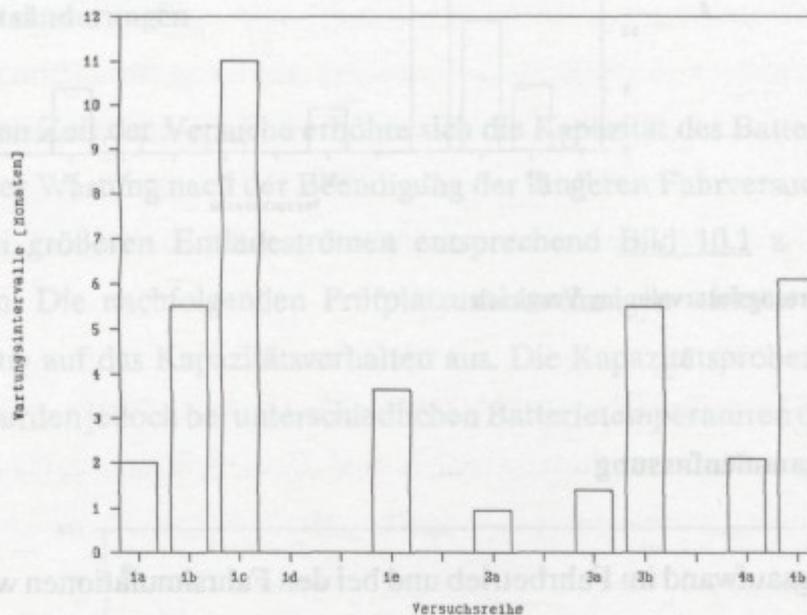


Bild 9.9: Wartungsintervalle im Vergleich ohne Versuchsreihe 1d

Während konventionell mit Rekombinatoren betriebene Batterieverbände Wartungsintervalle von 4 - 6 Wochen erfordern, erscheinen für das Batterieaggregat, worauf Versuchsreihe 1c hindeutet, Wartungsintervalle von über einem Jahr als durchaus realistisch.

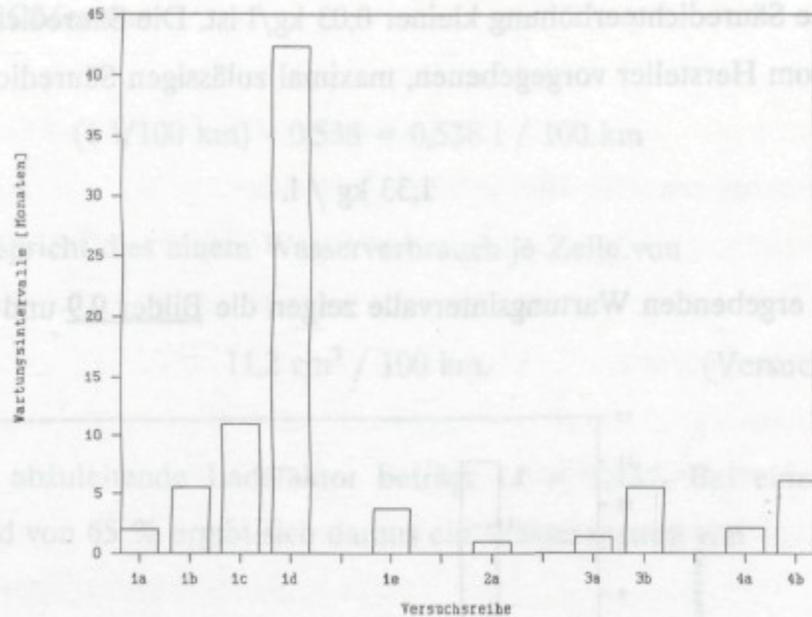


Bild 9.10: Wartungsintervalle im Vergleich

9.7 Zusammenfassung

Der Wartungsaufwand im Fahrbetrieb und bei den Fahrsimulationen wurde ermittelt, mit den Erfahrungen anderer Elektrofahrzeugbetreiber verglichen und die Einflußgrößen auf den Wasserhaushalt näher untersucht. Es zeigte sich, daß der Wartungsaufwand im Fahrbetrieb geringer war, als bei externen Prüfplatzsimulationen, die eine mittlere tägliche Fahrstrecke von 85 km nachbilden. Während sich im Fahrbetrieb ein theoretischer Wirkungsgrad der Rekombinatoren von 95 % ergab, lag dieser bei den Fahrsimulationen bei 53 %. Der im Vergleich geringe Wasseraustrag in den Fahrversuchen verdeutlicht die positiven Einflüsse der vorgenommenen Aggregatbildung und die der angepaßten Ladetechnik. Die Rekombinatoren zeigten keine gravierenden Alterungseffekte. Zur Erhöhung der Wasserzuführung mit Hilfe der Befeuchterzelle bietet sich eine Erhöhung der Befeuchterzellentemperatur an. Ein Vergleich mit dem Wasseraustrag bei anderen Elektrofahrzeugen läßt eine deutliche Verlängerung der Wartungsintervalle erkennen. Weitere Verbesserungen sind durch eine Verringerung der Streuung der Wasserverluste der einzelnen Zellen möglich. Hier könnte eine Umwälzung während der ersten Gasungsphase weiterhelfen, wodurch unstöchiometrischer Wasserstoff mit dem Sauerstoff der Umwälzluft rekombinieren könnte.

10 Kapazitätsverhalten

Zur Überwachung und Quantifizierung von Alterungseffekten wurden bei den einzelnen Wartungsarbeiten regelmäßig Kapazitätsproben durchgeführt. Eine manuelle Messung der Einzelspannungen gab Auskunft über ein sich änderndes Einzelzellenverhalten.

10.1 Kapazitätsänderungen

Während der ersten Zeit der Versuche erhöhte sich die Kapazität des Batterieverbandes geringfügig. Bei der Wartung nach der Beendigung der längeren Fahrversuche (7.89) lag die Kapazität bei größeren Entladeströmen entsprechend Bild 10.1 z. T. über den Herstellerangaben. Die nachfolgenden Prüfplatzuntersuchungen wirkten sich auf den ersten Blick negativ auf das Kapazitätsverhalten aus. Die Kapazitätsproben im Juli und November 1989 wurden jedoch bei unterschiedlichen Batterietemperaturen durchgeführt.

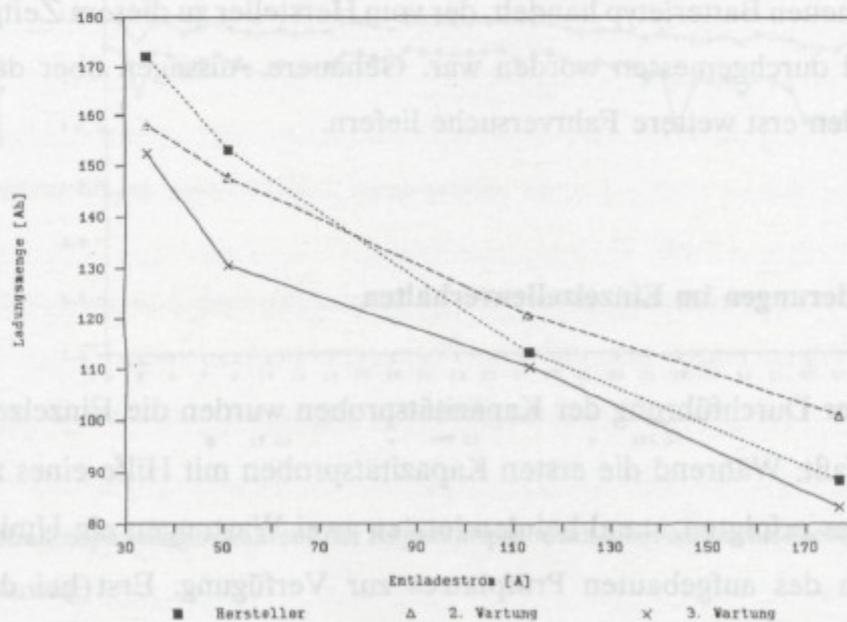


Bild 10.1: Kapazitätsvergleich

Bild 10.2 zeigt daher die auf 30 °C bezogenen Kapazitätsverläufe. Der Umrechnung wurde eine Kapazitätsminderung von 1 % bei 1 K Temperaturabsenkung zugrunde gelegt.

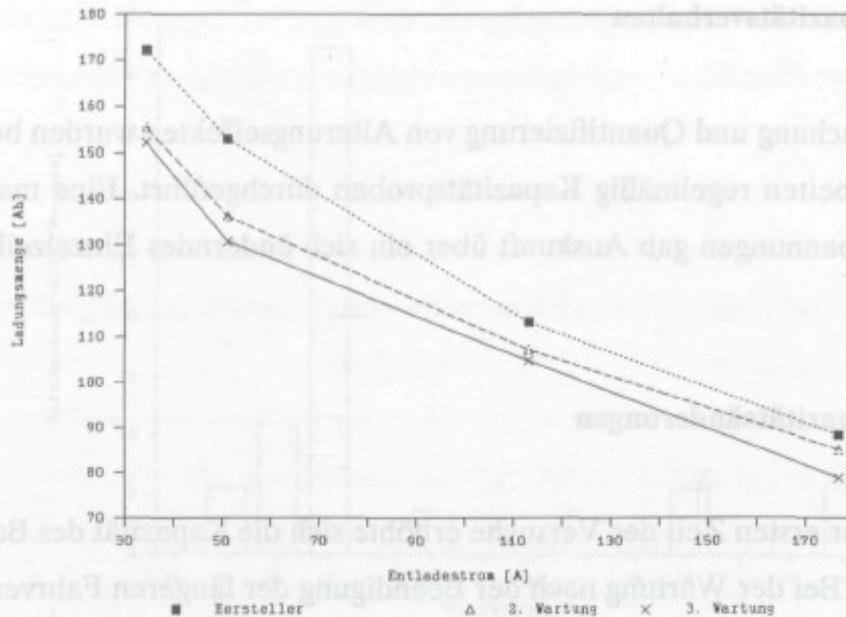


Bild 10.2: Auf 30 °C bezogener Kapazitätsvergleich

Die durchgeführten Kapazitätsproben liegen geringfügig unterhalb der Batterieherstellereangaben. Ungenauigkeiten dieser Angaben sind dabei nicht auszuschließen, da es sich um einen ganz neuen Batterietyp handelt, der vom Hersteller zu diesem Zeitpunkt noch nicht ausreichend durchgemessen worden war. Genauere Aussagen über das Alterungsverhalten werden erst weitere Fahrversuche liefern.

10.2 Änderungen im Einzelzellenverhalten

Während der Durchführung der Kapazitätsproben wurden die Einzelzellenspannungen manuell erfaßt. Während die ersten Kapazitätsproben mit Hilfe eines nicht regelbaren Widerstandes erfolgten, stand bei den letzten zwei Wartungen ein Umkehrstromrichter im Rahmen des aufgebauten Prüfplatzes zur Verfügung. Erst bei dem Einsatz des Umkehrstromrichters konnte mit einem über die Entladezeit konstanten Strom entladen werden, wodurch vergleichbare Betrachtungen möglich wurden. Auftretende Veränderungen des Batterieverhaltens konnten so während der einzelnen Prüfplatzuntersuchungen ermittelt werden. Die erforderliche manuelle Erfassung der Einzelspannungen führte jedoch zu einer zeitliche Differenz von 5 Minuten zwischen der ersten und der letzten Messung.

Dies entspricht einer Ladungsdifferenz

- ▶ bei I_1 $\Delta Q_E = 9,4$ Ah,
- ▶ bei I_3 $\Delta Q_E = 4,3$ Ah und
- ▶ bei I_5 $\Delta Q_E = 2,9$ Ah.

Hierdurch entstehen geringfügige Abweichungen im Spannungsverhalten. Die Bilder 10.3 und 10.4 zeigen die Einzelspannungen bei der Entladung mit I_3 bei unterschiedlichen Entladegraden, angegeben in % Q_3 mit $Q_3 = 154$ Ah. In beiden Versuchen ist auch gegen Ende der Entladung keine starke Streuung der Einzelzellenspannungen zu beobachten. Keine Einzelzelle weist eine deutlich abfallende Kapazität auf.

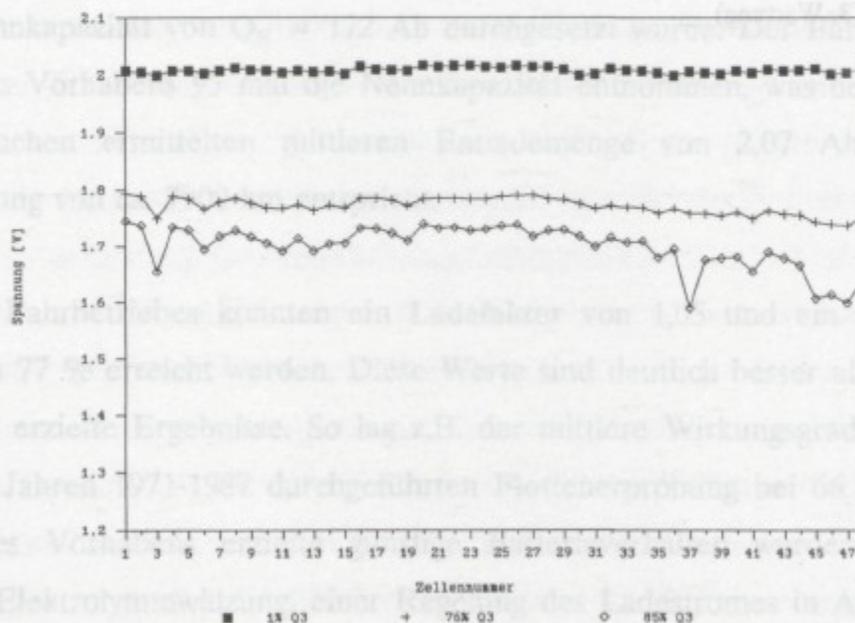


Bild 10.3: Einzelzellenspannungen während der Kapazitätsprobe mit I_3 bei unterschiedlichem Entladegrad (2. Wartung)

Diese ist bei dem in der Summe noch geringen Ladungstransfer auch nicht zu erwarten. Deutliche Änderungen der Kapazität werden erst bei einer Weiterführung der Fahrversuche beobachtbar sein.

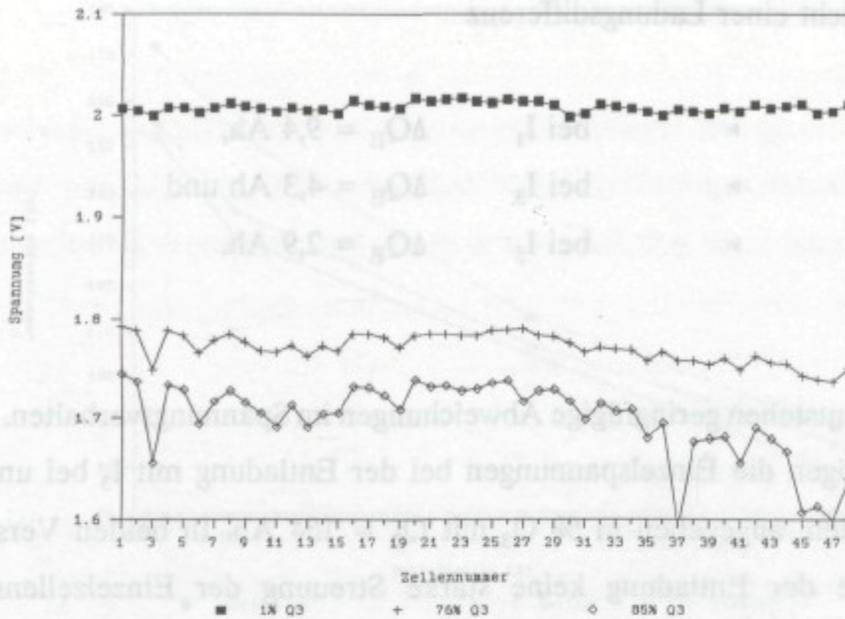


Bild 10.4: Einzelzellenspannungen während der Kapazitätsprobe mit I_3 bei unterschiedlichem Entladegrad (3. Wartung)

10.2 — Änderungen im Einzelzellenverhalten

Während der Durchführung der Kapazitätsprobe wurden die Einzelzellenspannungen manuell erfasst. Während die ersten Kapazitätswerte mit Hilfe einer nicht registrierenden Messung des Ladestroms ermittelt wurden, wurde die zweite Messung im Rahmen des zweiten Zyklus zur Verfügung gestellt. Der Einsatz des Umkehrstromrichters konnte mit einem über die Endstation des Strommesskanals betriebenen Inverter realisiert werden. Die Endstation des Strommesskanals befindet sich in der Nähe des Batteriesystems. Die Messung der Einzelzellenspannungen wurde während der Kapazitätsprobe in 5-minütigen Schritten durchgeführt. Die Einzelzellenspannungen wurden während der Kapazitätsprobe in 5-minütigen Schritten gemessen.

11 Schlußbetrachtung und Ausblick

Ein spezielles Bleibatterieaggregat wurde in ein Elektrofahrzeug integriert und im praktischen Fahrbetrieb getestet. Der Einsatz peripherer Elemente, einer angepaßten Ladetechnik und einer langzeitstabilen Ladezustandsanzeige verbesserte die Leistungsfähigkeit der Antriebsbatterie. Es wurde der Wartungsaufwand deutlich verringert, der Wirkungsgrad der Batterie verbessert und eine sichere langzeitstabile Anzeige der Restkapazität der Batterie ermöglicht. Die schonende Behandlung der Batterie läßt eine erhöhte Lebensdauer und ein gleichmäßigeres Verhalten der Einzelzellen erwarten.

Die Ergebnisse basieren im wesentlichen auf realen Fahrversuchen im Straßenverkehr, bei denen 4257 km zurückgelegt wurden und auf Fahrsimulationen, bei denen 33mal die Nennkapazität von $Q_N = 172 \text{ Ah}$ durchgesetzt wurde. Der Batterie wurde im Verlauf des Vorhabens 95 mal die Nennkapazität entnommen, was bei einer aus den Fahrversuchen ermittelten mittleren Entlademenge von $2,07 \text{ Ah/km}$ einer Kilometerleistung von ca. 7900 km entspricht.

Während des Fahrbetriebes konnten ein **Ladefaktor** von 1,05 und ein **Energiewirkungsgrad** von 77 % erreicht werden. Diese Werte sind deutlich besser als bislang in Fahrversuchen erzielte Ergebnisse. So lag z.B. der mittlere Wirkungsgrad bei der in Berlin in den Jahren 1971-1987 durchgeführten Flottenerprobung bei 66 %. Das im Rahmen dieses Vorhabens erzielte günstige Batterieverhalten wurde durch den Einsatz einer Elektrolytumwälzung, einer Regelung des Ladestromes in Abhängigkeit der einsetzenden Gasung, einen Mindestladungsdurchsatz von 200 Ah zwischen zwei Volladungen und eine Steuerung der Volladung unter Zuhilfenahme von Differentialrekombinatorsignalen erreicht.

Der **Wartungsaufwand** für die Batterie wurde stark reduziert. Die Ergebnisse lassen Wassernachfüllintervalle von 12 und mehr Monaten erwarten. Eine weitere Reduzierung der Wasserverluste einzelner Zellen ist bei einer Verringerung der Streuung möglich.

Aufgrund der relativ kurzen Versuchszeit sind Aussagen über die **Lebensdauer** der

Batterie nur eingeschränkt möglich. Ein deutlicher Kapazitätsverlust wurde bislang nicht beobachtet und das Einzelzellenverhalten bei durchgeführten Kapazitätsproben war sehr gleichmäßig.

Die **Ladezustandserfassung**, basierend auf einer kontinuierlichen Erfassung der Säuredichte, erwies sich während des Fahrbetriebes als eine sinnvolle Information für den Fahrer. Durch automatische Abgleichvorgänge im Vollladezustand und nach längeren Standzeiten wurde eine langzeitstabile Anzeige realisiert.

Die **Funktionstüchtigkeit der einzelnen Zusatzkomponenten** war zufriedenstellend. Der **Säuresensor** war während der gesamten Betriebszeit funktionssicher im Einsatz. Beim **Differentialrekombinator** wurde im Fahrbetrieb einmal der Wasserstoffrekombinator erneuert. Sämtliche **Einzelrekombinatoren** waren am Ende der Versuche voll einsatzfähig. Probleme gab es bei der Dichtigkeit der **Befeuchterzelle**. Sie mußte mehrere Male überholt werden, bis sie zuverlässig eingesetzt werden konnte. Die **Elektrolytumwälzung** war jederzeit funktionstüchtig. Spätere Versuche zeigten jedoch, daß die gewählte Umwälzmenge zu gering angesetzt war. Sie sollte um den Faktor 2 vergrößert werden. Die **Klimatisierung** der Zellen fiel zu Versuchsbeginn aus, da einzelne Taschen abgeklemmt wurden. Dieses konnte durch die Anbringung geeigneter Abstandshalter behoben werden. Die **Potentialanbindung** der Schlauchleitungen bewährte sich, es kam zu keiner Verpuffung von Elektrolysegas. Der ständig über eine Widerstandskette abfließende Strom von ca. 24 mA verschlechtert jedoch den Wirkungsgrad der Batterie. Hier sollte über eine direkte Potentialkopplung ohne Widerstandskette nachgedacht werden. Eine entwickelte **Einzelrekombinatorüberwachung** erwies sich im Fahrbetrieb als funktionstüchtig und sinnvoll. Sie sollte in Zukunft direkt in die Laderegulierung mit einfließen. Das verwendete **Rechnersystem** erfüllte die notwendigen Steuer-, Regelungs-, Überwachungs- und Dokumentationsaufgaben vollständig. Bei einem großtechnischen Einsatz des untersuchten Batteriesystems wäre eine deutliche Reduzierung der notwendigen Hardware möglich. Als problematisch zeigte sich die relativ starke Belastung des **Bordnetzes** durch den Bordrechner und die Meßwerterfassung. Neben einer auch im Standbetrieb möglichen Ladung der Bordbatterie von der Traktionsbatterie aus sollte vor allem eine Reduzierung der Verbraucherleistung der elektrischen Zusatzkomponenten angestrebt werden.

In der Summe konnten sehr zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden, die eine Grundlage für einen verbesserten Einsatz von Bleibatterien in Elektrostraßenfahrzeugen liefern. Die notwendige Peripherie wurde als Labormuster entwickelt und erwies sich als funktionstauglich. Der notwendige Wartungsaufwand sollte durch weitere Fahrversuche exakter bestimmt werden, wobei insbesondere Maßnahmen zur weiteren Reduzierung der Streuung einzelner Zellen entwickelt werden sollten. Die Belastung des Bordnetzes ist zu verringern. Die Leistungsreduzierung gegen Ende einer Fahrt sollte besser an das Batterieverhalten angepaßt werden. Hier ist eine Herabsetzung der unteren Spannungsgrenze des Stellers erforderlich oder der Einsatz von Traktionszellen mit kleinerem Innenwiderstand. Sinnvoll erscheint eine Begrenzung der Entladeleistung in Abhängigkeit der inneren Säuredichte.

Parallel zur Weiterentwicklung der o.g. Punkte wird der möglichst schnelle Einsatz und Test des Batterieaggregates in einem Flottenversuch angeregt.

In einem Flottenversuch sollten die einzelnen Zellen der Batterieaggregate mit einer Elektrolytumwälzung, mit Rekombinatoren und mit einer Klimatisierung ausgerüstet und zu einem gemeinsamen Gaskreislauf zusammengefaßt werden. Die Potentialfestlegung der Schlauchleitungen sollte dabei direkt und nicht über eine Widerstandskette erfolgen. Die Einbindung einer Befeuchterzelle erscheint nur in Verbindung mit einer Temperierung des Befeuchtermediums sinnvoll. Aufgrund der guten Funktionstüchtigkeit der entwickelten Sensoren ist es ausreichend nur eine Pilotzelle mit Differentialrekombinator, Säuresensor und Temperaturfühler auszurüsten. Auf eine Erfassung der Säureschichtung mit Hilfe eines zweiten Säuresensors kann verzichtet werden, wenn die zur Aufhebung der Säureschichtung notwendige Umwälzmenge durch Vorversuche bekannt ist. Ob eine Überwachung der Einzelrekombinatoren notwendig ist, muß in weiteren Untersuchungen geklärt werden. Sie wird dann sinnvoll, wenn mit einer unterschiedlichen Entwicklung der Einzelzellen zu rechnen ist, was in der bisherigen kurzen Fahrzeugerprobung nicht festgestellt wurde. Es ist ein kompaktes Bordrechnersystem zu entwickeln, welches die im Rahmen dieser Vorhabens entwickelte Batteriebetriebsführung realisieren kann. Auf eine umfangreiche Datenerfassung kann dabei verzichtet werden. Wesentliche Eckdaten je Fahrzyklus sollten für eine spätere Auswertung erfaßt und gespeichert werden. Es ist zu überlegen, ob die Bordbatterie nicht durch einen DC/DC - Steller ersetzt werden kann,

der direkt von der Antriebsbatterie gespeist wird. Während des Fahrbetriebes sollte jährlich eine Wartung durchgeführt werden. Dabei ist neben den allgemeinen Wartungsarbeiten, die Funktionstüchtigkeit der einzelnen Aggregatskomponenten zu überprüfen. Der Wasseraustrag jeder einzelnen Zelle und die Einzelzellenspannung bei einer Kapazitätsprobe mit I_3 sollte registriert werden.

Zum Schluß sei allen gedankt, die zur erfolgreichen Durchführung des Vorhabens beigetragen haben, der FAT und dem BMFT für die Bereitstellung der Gelder, den Mitgliedern des FAT-AK 18 und den ständigen Mitarbeitern für die Betreuung des Vorhabens, dem RWE für die Bereitstellung des CitySTROMers und der Firma VARTA für die Überlassung der Antriebsbatterie und die vorbereitenden Arbeiten zum Aufbau des verwendeten Batterieaggregates.

12 Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

b	:	Konstante	
d	:	Sollwert der Dichte im geladenen Zustand	[kg/l]
d_1	:	gemessene Dichte	[kg/l]
$f_{(H_2O)}$:	Feuchtigkeit über Wasser	[g/m ³]
$f_{(H_2SO_4)}$:	Feuchtigkeit über dem Elektrolyten	[g/m ³]
Δf_{max}	:	maximale Befeuchtungsmenge	[g/m ³]
I_B	:	Batteriestrom	[A]
I_E	:	Entladestrom	[A]
I_F	:	Fahrstrom	[A]
I_{Fmax}	:	maximaler Fahrstrom	[A]
I_{H_2O}	:	stöchiometrischer Gasungsstrom	[A]
I_{H_2}	:	überschüssiger Wasserstoffgasungsstrom	[A]
I_L	:	Ladestrom	[A]
I_P	:	Strom an der Widerstandskette der Potentialanbindung	[A]
I_{soll}	:	Sollstrom	[A]
$I_{1/2}$:	1/2 stündiger Strom	[A]
I_1	:	1 stündiger Strom	[A]
I_3	:	3 stündiger Strom	[A]
I_5	:	5 stündiger Strom	[A]
I_{10}	:	10 stündiger Strom	[A]
k	:	Konstante	
k_I	:	Konstante	
L_f	:	Ladefaktor	
L_{fmax}	:	maximaler Ladefaktor	
LZ_A	:	äußerer Ladezustand	[%]
$\Delta LZ_A/100\%$:	Differenz LZ _A zu 100% beim Abgleich	
LZ_{Am}	:	mittlere äußerer Ladezustand	[%]

LZ_{Amin}	:	min. äußerer Ladezustand	[%]
LZ_{AO}	:	oberer äußerer Ladezustand	[%]
LZ_I	:	innerer Ladezustand	[%]
LZ_{Imin}	:	min. innerer Ladezustand	[%]
LZ_M	:	mittlerer Ladezustand	[%]
LZ_{Mmin}	:	min. mittlerer Ladezustand	[%]
$\Delta LZ_M/100\%$:	Differenz LZM zu 100% beim Abgleich	
Δm	:	Differenz der Wassermenge	[g/h]
Δm_G	:	Gesamtdifferenz der Wassermenge	[g/h]
p	:	Säuregewicht	[kg]
Q	:	Ladungsbilanz	[Ah]
Q_E	:	Entladungsmenge	[Ah]
Q_L	:	Ladungsmenge	[Ah]
Q_N	:	Nennkapazität	[Ah]
Q_S	:	Selbstentladungsmenge	[Ah]
Q_{VG}	:	Verlustladungsmenge durch Gasung	[Ah]
Q_{VK}	:	Korrekturladungsmenge	[Ah]
Q_{VP}	:	Verlustladungsmenge der Potentialanbindung	[Ah]
Q_{VS}	:	Verlustladungsmenge	[Ah]
Q_Z	:	minimale Entladungsmenge zwischen zwei Vollladungen	[Ah]
$Q_{\bar{U}}$:	Überladungsmenge	[Ah]
Q_0	:	Mindestüberladungsmenge	[Ah]
t	:	Protokollzeit	[sec]
t_E	:	Entladezeit	[h]
t_L	:	Ladezeit	[h]
t_S	:	Standzeit	[h]
t_U	:	Umwälzdauer	[h]
t_{UG}	:	Gesamtumwälzdauer	[h]
T_B	:	Batterietemperatur	[°C]

T_{Bmax}	:	max. Batterietemperatur	[°C]
T_{Bmin}	:	min. Batterietemperatur	[°C]
T_R	:	Rekombinatortemperatur	[°C]
T_{R1}	:	Differentialrekombinatortemperatur (Reko1)	[°C]
T_{R2}	:	Differentialrekombinatortemperatur (Reko2)	[°C]
T_U	:	Umgebungstemperatur	[°C]
T_0	:	Anfangstemperatur	[°C]
U_B	:	gesamte Batterieverbandsspannung	[V]
U_{B1}	:	halbe Batterieverbandsspannung (Zelle 1 - 24)	[V]
U_{B2}	:	halbe Batterieverbandsspannung (Zelle 25 - 48)	[V]
U_D	:	Differenzspannung	[V]
U_{IAM}	:	Ausgangsspannung Säuredichtesensor	[V]
$U_{IAMvoll}$:	Ausgangsspannung Säuredichtesensor bei vollgeladener Batterie	[V]
U_{max}	:	maximaler Spannungswert	[V]
U_{soll}	:	Sollspannung	[V]
U_1	:	Spannungsabfall am NTC	[V]
U_2	:	Vergleichsspannung	[V]
V_a	:	äußeres Volumen (Elektrolytvolumen)	[l]
V_i	:	inneres Volumen (Porenvolumen)	[l]
v_{IAM}	:	Verstärkungsfaktor IAM-Signal	
V_{max}	:	maximales Umwälzvolumen	[l/h]
x	:	Wassermenge	[l]
δ_{Am}	:	mittlere äußere Säuredichte	[kg/l]
δ_{Amax}	:	maximale äußere Säuredichte	[kg/l]
δ_{Amin}	:	minimale äußere Säuredichte	[kg/l]
$\Delta\delta_{IN}$:	innere Säuredichtendifferenz bei Nennentladung	[kg/l]
δ_{Imin}	:	minimale innere Säuredichte	[kg/l]
$\Delta\delta_{Imax}$:	maximale innere Säuredichtenänderung	[kg/l]
$\Delta\delta_{max}$:	maximale Säuredichtendifferenz	[kg/l]
η	:	Wirkungsgrad	

13 Literaturverzeichnis

- 1 Willer, B.
Pilotzelle zur Steuerung von Batterien in Fahrzeugen mit Elektro- und Elektro-Hybrid-Antrieb.
Schriftenreihe des FAT Nr. 56
Frankfurt / Main, 1986
- 2 Bopp, D.; Stockmann, Ch.; Willer, B.
Aufbau und Labortest eines wartungsarmen, sich selbst überwachenden Batterie-aggregates für Elektrofahrzeuge mit Elektro- und Elektro-Hybrid-Antrieb.
Schriftenreihe des FAT Nr. 76
Frankfurt / Main, 1988
- 3 DGES - Info - Dienst.
März 1988.
- 4 Günter, F.
Stand der Entwicklung von Elektrostraßenfahrzeugen in der Bundesrepublik Deutschland.
AVSER Nr. 3, Lausanne, Juni 1985.
- 5 Pflichtenheft "Traktions-Batterie-Überwachungsgerät"
GES mbH, T-G, Essen, 2.84.
- 6 Kirchof, U.
Entwicklung und Aufbau einer Rekombinatorüberwachung für Traktionszellen eines Elektrofahrzeuges.
Projektarbeit I, Gh Kassel, Mai 1989.
- 7 Technische Beschreibung MKS 52 Basic.
SMA-Regelsysteme GmbH, 1987.

- 8 Bärmann, R.
Konzeption und Aufbau einer rechnergestützten Laderegelung und Meßerfassung für ein Elektrofahrzeug.
Diplomarbeit, Gh Kassel, 1988.
- 9 Winsel, A.
Zur Relaxation der Schwefelsäuredichte in Bleiakkumulatoren.
Untersuchungsbericht TC 3/84, VARTA, 1984.
- 10 Winsel, A.
Zur Relaxation der Schwefelsäuredichte in Bleiakkumulatoren.
Untersuchungsbericht TC 5/84, VARTA, 1984.
- 11 Wagner, U.
Prozeßrechnergestütztes Verfahren zur Prüfung der Leistungsergiebigkeit von Traktionsbatterien.
Dissertation, TU München, 1987.
- 12 BMFT-Abschlußbericht FB-T 80-151.
Forschungsvorhaben 03E-8662-A.
Dezember 1980.

Mitglieder des FAT - AK -18 "Elektrostraßenfahrzeuge"

- Herr Dr. A. Kalberlah
- Obmann des AK -
- Volkswagenwerk AG
Forschung / Fahrzeugtechnik
Postfach
3180 Wolfsburg
Tel.: 05361/925 853
- Herr Dr. K.-F. Gütlich
- VARTA Batterie AG
Abt. TF1
Postfach 16 20
6233 Kelkheim
Tel.: 06195/802 329
- Herr F. Werner
- Mercedes Benz AG
Abt. ENG UT
Postfach 60 02 02
7000 Stuttgart 60
Tel.: 0711/1741704
- Herr Dr. K. Harms
- Robert Bosch GmbH
Abt. K9 /EEF
Postfach 30 02 40
7000 Stuttgart 30
Tel.: 0711/8118 508
- Herr R. Zelinka
- MAN Nutzfahrzeuge GmbH
Abt. TKOE
Postfach 50 06 20
8000 München 50
Tel.: 089/1480 3044

Ständige Mitarbeiter

Herr Prof. Dr. A. Winsel

VARTA Batterie AG

Gundelhardstraße 72

6233 Kelkheim

Tel.: 06195/ 802 345

Herr F. Klein

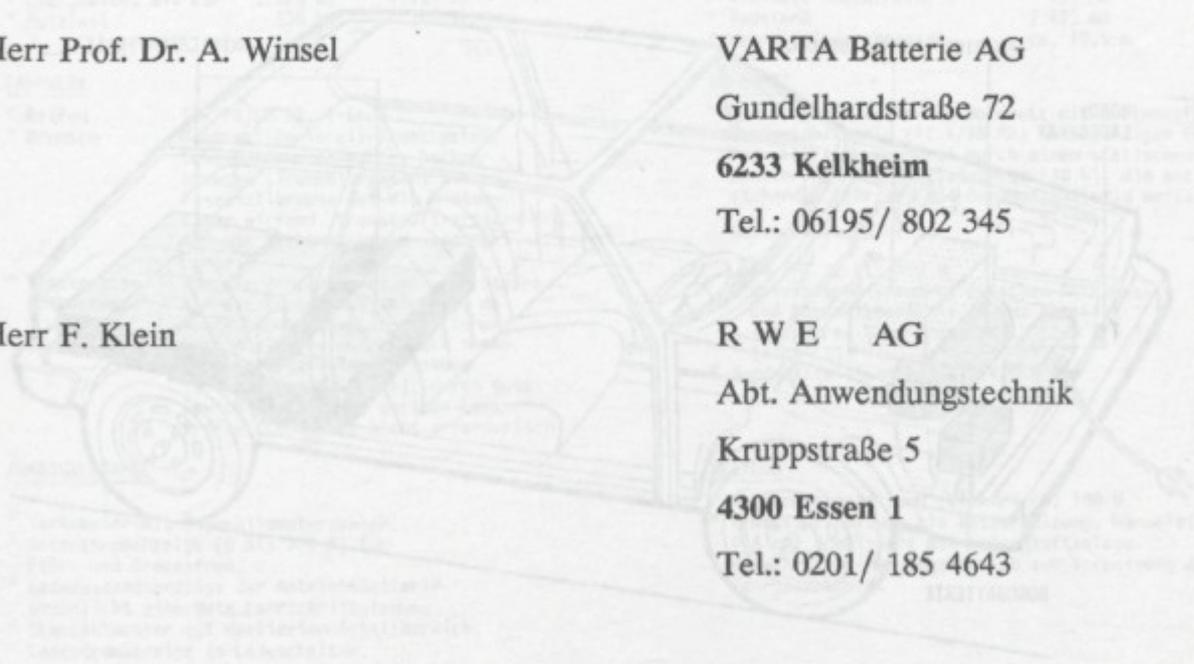
R W E AG

Abt. Anwendungstechnik

Kruppstraße 5

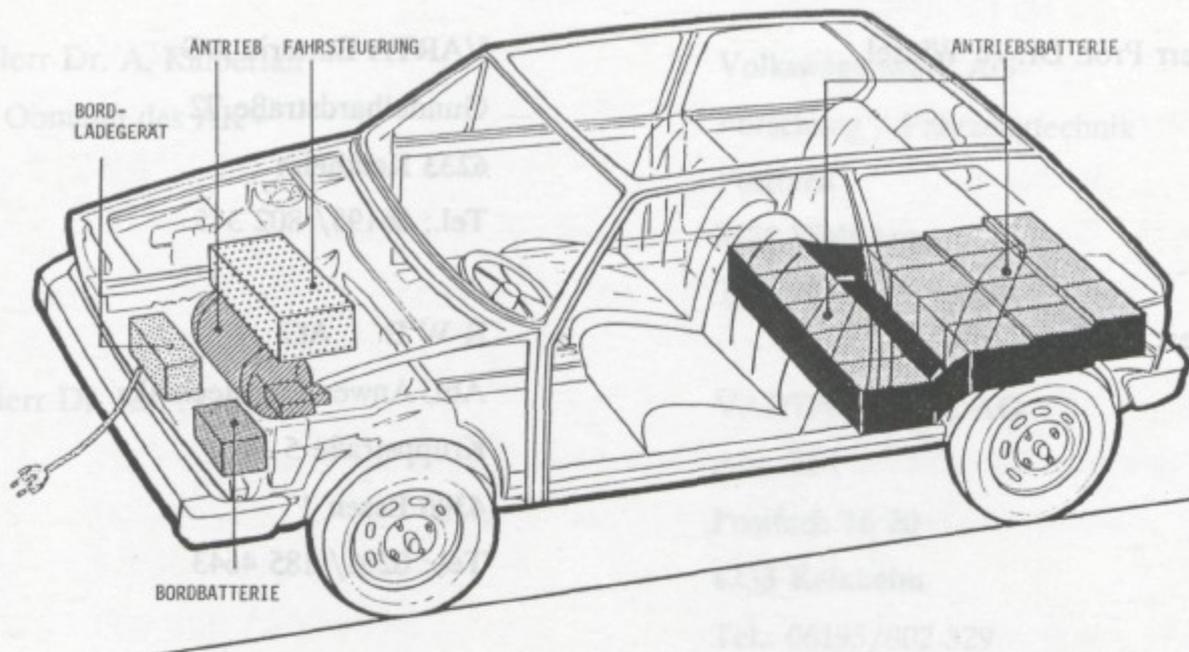
4300 Essen 1

Tel.: 0201/ 185 4643



Technical data table with multiple columns and rows, containing various specifications and measurements. The text is mirrored and difficult to read due to the image quality.

Technische Daten des CitySTROMers (GES 1985)



Technische Daten

Der CitySTROMer ist ein Elektromobil für den Stadtverkehr. Er ist zugelassen nach den Richtlinien des Fachausschusses Kraftfahrzeugtechnik (FKT).

AUSFÜHRUNGEN:

- Basisfahrzeug VW-Golf, Modell C, Bj. 1984
- 2-türig und Heckklappe

- 4 Personen und Kleingepäck (350 l) oder
- 2 Personen und Ladegut (1000 l)

ANTRIEB

- Vorderradantrieb
 - Serienmäßiges Handschaltgetriebe mit Kupplung und Differential, 4 Vorwärts- und 1 Rückwärtsgang (einschließlich 0-Stellung), Eingangsdrehmoment 140 Nm
 - Einscheiben-Trockenkupplung
 - Gleichstrom-Motor, fremdregelt und fremdbelüftet
- | | | |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| . Nennleistung | 12 | kW |
| . Bezugsleistung | 15,4 | kW (15 min) |
| . maximale Leistung | 23 | kW (5 min) |
| . Nennspannung | 90 | V |
| . Nenn-/Eckdrehzahl | 2.170 | min ⁻¹ |
| . maximale Drehzahl | 6.600 | min ⁻¹ |
| . Kühlung | durch Ventilator (in Kombination mit Kühlung der Steuerung) 12 V/120 W | |
| . Abmessungen | 320 mm Ø, Länge 435 mm | |
| . Gewicht | 80 | kg |

FAHRSTEUERUNG

- Nennspannung 96 V
- Abmessungen L x B x H 500 x 310 x 210 mm
- Gewicht ca. 27 kg
- Ankerstellbereich
 - . Thyristorsteller
 - . Fahrstrombereich von 0 A bis ca. 300 A
 - . Bremsstrom zweistufig 40/120 A
- Feldstellbereich
 - . Transistorsteller von 2 A bis 8 A
- Funktionsüberwachungskreise
- Gestaffelte Unterspannungsabregelung als Tiefentladungsschutz mit "Reserve-Tank"-Funktion
- Geschwindigkeitsabhängige Strombegrenzung für energieökonomisches Fahren

ANTRIEBSBATTERIE

- Batterieart Rundröhrenbatterie (Panzerplatten)
- Daten

. 4-Sitzer	. 2-Sitzer
. Nennspannung 96 V	. Nennspannung 96 V
. Nennkapazität 140 Ah	. Nennkapazität 175 Ah
. 16 Stück 6-V-Module	. 16 Stück 6-V-Module
. Betriebsenergie ca. 10 kWh	. Betriebsenergie ca. 13 kWh
- Die temperierbare Blockbatterie mit Temperaturausgleich der Zellen erlaubt gleichbleibend große Fahr-schritte auch bei niedrigen Außentemperaturen.
- Wartungsarme Antriebsbatterie durch Rekombinatoren oder zentrale Wassernachfülleinrichtung.

BORDLADEGERÄT

- Die Ausrüstung mit einem Bordladegerät bedeutet Unabhängigkeit von stationären Ladegeräten und erlaubt eine Aufladung der Antriebsbatterie an jeder normalen 16-A-Haushaltssteckdose.
- Daten
 - . Gewicht 28 kg
 - . 220 V WS, 10 A WS
 - . 96 V GS, 15 A GS
 - . Fahrschritterweiterung durch Zwischenladung pro Stunde ca. 6 km
- Vollaadung der leeren Antriebsbatterie über Nacht.
- Batteriepflege durch gepulste Nachladung und Erhaltungsladetakt.
- Ladefunktionsüberwachung

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen:

GEWICHT

	4-Sitzer	2-Sitzer
° zul. Gesamtgewicht	1.650 kg	1.650 kg
° ESP-Gewicht	400 kg	480 kg
° Leergewicht mit ESP	1.320 kg	1.390 kg
° Nutzlast	330 kg	260 kg

FAHRWERK

- ° Reifen 175/70 SR 13, 4-fach
- ° Bremsen Diagonal-Zweikreis-Bremssystem, Scheibenbremsen vorne, Backenbremsen (Trommelbremsen) hinten, Feststellbremse auf die Hinterräder wirkend. Bremskraftverstärker mit elektrischer Unterdruckpumpe.
- ° Elektrische Nutzbremmung Energierückgewinnung in zwei Stufen auf die Vorderräder wirkend, dadurch Bremsverschleißreduzierung.
- ° Lenkung Wartungsfreie, automatisch nachstellende Zahnstangenlenkung (Sicherheitslenksäule); durch gute Gewichtsverteilung geringe Lenkkräfte, Lenkhilfe nicht erforderlich.

ARMATURENTAFEL

- ° Tachometer mit Tageskilometerzähler.
- ° Motorstromanzeige (0 bis 300 A) für Fahr- und Bremsstrom.
- ° Ladezustandsanzeige der Antriebsbatterie ermöglicht eine gute Fahrstrittplanung.
- ° Drehzahlmesser mit markiertem Schaltbereich.
- ° Ladestromanzeige im Ladeschalter.

ABMESSUNGEN

° Länge	3.985 mm
° Breite	1.665 mm
° Höhe	1.415 mm
° Kleinste Bodenfreiheit	125 mm
° Radstand	2.475 mm
° Wendekreisdurchmesser	ca. 10,5 m

BORDNETZ

- ° Normal dimensioniertes Bordnetz mit wartungsfreier Bordnetz-batterie (12 V/36 Ah) nach gültigen FKT-Vorschriften, versorgt durch einen statischen Ladewandler und ein Netzladegerät (30 W), die auch bei stehendem Fahrzeug die Bordnetz-batterie aufladen.
- ° Daten Ladewandler
 - . 96 V / 12 V / 450 W
 - . galvanische Trennung zwischen Antriebs- und Bordnetz-batterie 16 kHz getaktet
 - . sekundärer Spannungsbereich $13,8 \pm 0,4$ V (nach FKT)
- ° Bordnetzleistung gemäß StVZO § 49a

HEIZUNG

- ° Heckscheibenheizung (elektrisch) 100 W.
- ° Kraftstoffheizung als Wasserheizung, Wärmeleistung 4,6 kW, kombiniert mit Frischluftanlage.
- ° Vorwählbarer Heizungsbetrieb zur Vorheizung des Fahrgastraumes.

FAHRLEISTUNGEN UND ENERGIEVERBRÄUCHE		MESSBEDINGUNGEN	
		4-Sitzer	2-Sitzer
° max. Geschwindigkeit	ca. 100 km/h		
° Anfahrsteigfähigkeit	bis 30 %		
° Beschleunigung 0 - 30 km/h	6 sec		
° 0 - 50 km/h	13 sec		
° 0 - 70 km/h	27 sec		
° Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit 50 km/h "Grüne Welle"	Netzenergieverbrauch	21,5 kWh / 100 km	
	Fahrschritt je Ladung	52 km + (13 km)*	65 km + (16 km)*
° Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit 70 km/h "Stadt-Schnellstraße"	Netzenergieverbrauch	27,6 kWh / 100 km	
	Fahrschritt je Ladung	36 km + (9 km)*	52 km + (13 km)*
° Fahrt im normalen Stadtverkehr	Netzenergieverbrauch	30,0 kWh / 100 km	
	Fahrschritt je Ladung	40 km + (10 km)*	56 km + (14 km)*
° Fahrt im Mischverkehr	Netzenergieverbrauch	27,3 kWh / 100 km	
	Fahrschritt je Ladung	43 km + (11 km)*	62 km + (15 km)*
° Tagesanwendungsbereich im Mischverkehr mit Zwischenladung über Bordladegerät	Summe der Ladezeiten ca. 8 h	maximal 86 km + (11 km)*	maximal 124 km + (15 km)*

*) Die angegebene Fahrstrecke kann in der jeweiligen Betriebsart gelegentlich als Reservefahrstrecke ohne Schaden für die Batterie genutzt werden, wenn die Antriebsbatterie unmittelbar nach der Fahrt wieder aufgeladen wird.

Die Änderung der Daten und der Fahrzeugausrüstung durch Weiterentwicklung behalten wir uns vor.
(Stand: 2/84)

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen:

Nr. 1	Immissionsituation durch den Kraftverkehr in der Bundesrepublik Deutschland	vergriffen
Nr. 2	Systematik der vorgeschlagenen Verkehrslenkungssysteme	DM 20,-
Nr. 3	Literaturstudie über die Beanspruchung der Fahrbahn durch schwere Kraftfahrzeuge	DM 30,-
Nr. 4	Unfallforschung / Westeuropäische Forschungsprogramme und ihre Ergebnisse / Eine Übersicht	vergriffen
Nr. 5	Nutzen/Kosten-Untersuchungen von Verkehrssicherheitsmaßnahmen	DM 60,-
Nr. 6	Belastbarkeitsgrenze und Verletzungsmechanik des angegurteten Fahrzeuginsassen	DM 50,-
Nr. 7	Biomechanik des Fußgängerunfalls	DM 30,-
Nr. 8	Der Mensch als Fahrzeugführer	vergriffen
Nr. 9	Güterfernverkehr auf Bundesautobahnen	DM 50,-
Nr. 10	Recycling im Automobilbau – Literaturstudie	DM 50,-
Nr. 11	Rückführung und Substitution von Kupfer im Kraftfahrzeugbereich	DM 50,-
Nr. 12	Der Mensch als Fahrzeugführer	DM 50,-
Nr. 13	Sicherheitsmaßnahmen im Straßenverkehr Sammlung, Beschreibung und Auswahl für die Anwendung der Nutzen/Kosten-Analyse	DM 60,-
Nr. 14	Tierexperimentelle und epidemiologische Untersuchungen zur biologischen Wirkung von Abgasen aus Verbrennungsmotoren (Otto- und Dieselmotoren) – Literaturstudie	DM 60,-
Nr. 15	Belastbarkeitsgrenzen des angegurteten Fahrzeuginsassen bei der Frontalkollision	DM 50,-
Nr. 16	Güterfernverkehr auf Bundesautobahnen – Ein Systemmodell, 2. Teil	DM 50,-
Nr. 17	Ladezustandsanzeiger für Akkumulatoren	DM 50,-
Nr. 18	Emission, Immission und Wirkungen von Kraftfahrzeugabgasen	DM 30,-
Nr. 19	Sicherheitsmaßnahmen im Straßenverkehr Ergebnisse einer Nutzen/Kosten-Analyse von ausgewählten Maßnahmen	vergriffen
Nr. 20	Aluminiumverwendung im Automobilbau und Recycling	DM 50,-
Nr. 21	Fahrbahnbeanspruchung und Fahrsicherheit ungelenkter Dreiachsaggregate in engen Kurven	DM 50,-
Nr. 22	Umskalierung von Verletzungsdaten nach AIS – 80 (Anhang zu Schrift Nr. 15)	DM 50,-
Nr. 23	Grundlagen und Möglichkeiten der Nutzung sprachlicher Informationssysteme im Kraftfahrzeug	DM 50,-
Nr. 24	Altteilverwendung im Automobilbau	DM 50,-
Nr. 25	Energie für den Verkehr – Eine systemanalytische Untersuchung der langfristigen Perspektiven des Verkehrssektors in der Bundesrepublik Deutschland und dessen Versorgung mit Kraftstoffen im energiewirtschaftlichen Wettbewerb –	vergriffen
Nr. 26	Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Aluminium im Lkw-Bau	vergriffen
Nr. 27	Äußere Sicherheit von Lkw's und Anhängern	DM 60,-
Nr. 28	Dämpfung und Tilgung von Torsionsschwingungen im Triebstrang von Kraftfahrzeugen	DM 50,-
Nr. 29	Wirkungsgradmessung an Getrieben und Getriebeelementen	DM 50,-
Nr. 30	Fahrverhalten von Lastzügen und hierbei insbesondere von Anhängern	DM 50,-
Nr. 31	Entwicklung, Aufbau und Test eines Ladezustandsanzeigergerätes für Bleiakkumulatoren in Elektrostraßenfahrzeugen	DM 50,-
Nr. 32	Rollwiderstand und Lenkwilligkeit von Mehrachsanhängern mit Zwillings- und Einzelbereifung	DM 60,-
Nr. 33	Fußgängerschutz am Pkw – Ergebnisse mathematischer Simulation –	DM 60,-
Nr. 34	Verfahren zur Analyse von Unfallursachen – Definitionen, Erfassung und Bewertung von Datenquellen –	DM 75,-
Nr. 35	Untersuchungen über kraftstoffsparende Investitionsmaßnahmen im Straßenbau	DM 75,-
Nr. 36	Belastbarkeitsgrenzen und Verletzungsmechanik der angegurteten Fahrzeuginsassen beim Seitenaufprall. Phase I: Kinematik und Belastungen im Vergleich Dummy/Leiche	DM 60,-
Nr. 37	Konstruktive Einflüsse auf das Fahrverhalten von Lastzügen	DM 50,-
Nr. 38	Studie über Energieeinspeisungsgeräte zur Mitführung im Kraftfahrzeug (Bordlader)	DM 30,-
Nr. 39	Grundlagen und Möglichkeiten der Nutzung sprachlicher Informationssysteme im Kraftfahrzeug – Hauptstudie –	DM 60,-
Nr. 40	Sprachausgaben im Kraftfahrzeug – Ein Handbuch für Anwender –	vergriffen
Nr. 41	Auswertung von Forschungsberichten über: Die Auswirkung der Nutzfahrzeugkonstruktion auf die Straßenbeanspruchung	DM 30,-
Nr. 42	Fußgängersicherheit – Ergebnisse eines Symposiums über konstruktive Maßnahmen am Auto –	DM 30,-
Nr. 43	Auswirkungen der Nutzfahrzeugkonstruktion auf die Straßenbeanspruchung – Gesamtbericht –	DM 20,-
Nr. 44	Sprachliche Informationssysteme und Anwendungsmöglichkeiten im Kraftfahrzeug – Ergebnisse eines Symposiums –	DM 30,-
Nr. 45	Abgasemissions- und Kraftstoffverbrauchsprognosen für den Pkw-Verkehr in der Bundesrepublik Deutschland im Zeitraum von 1970 bis 2000 auf der Basis verschiedener Grenzwertsituationen	DM 50,-
Nr. 46	Bewertung von Personenverkehrssystemen – Systemanalytische Untersuchungen von Angebots- und Nachfrageelementen einschließlich ihrer Wechselwirkungen –	vergriffen
Nr. 47	Nutzen/Kosten-Analyse für einen Pkw-Frontunterfahrschutz an Nutzfahrzeugen	DM 30,-
Nr. 48	Radlastschwankungen und dynamische Seitenkräfte bei zwillingsbereiften Achsen	DM 40,-
Nr. 49	Studie über die Wirtschaftlichkeit von Verbundwerkstoffen mit Aluminiummatrix im Nutzfahrzeugbau	DM 50,-
Nr. 50	Rechnerische Simulation des dynamischen Verhaltens von nicht stationär betriebenen Antrieben und Antriebselementen	DM 250,-

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen:

DM

Nr. 51	Simulationsmodell – Schwingungsprogramm zur Ermittlung der Beanspruchung von Antriebssträngen –	DM 275,-
Nr. 52	Verwendung von Kunststoff im Automobil und Wiederverwertungsmöglichkeiten	vergriffen
Nr. 53	Entwicklung eines hochgenauen, normfähigen Verfahrens zur Wirkungsgradmessung an Antriebsselementen	DM 160,-
Nr. 54	Erhebung und Auswertung von Straßenverkehrsunfalldaten in der Bundesrepublik Deutschland – Ergebnisse eines VDA/FAT-Fachgesprächs	DM 50,-
Nr. 55	Untersuchungen zur subakuten und chronischen Wirkung von Ottomotorabgasen auf den Säugetierorganismus	DM 75,-
Nr. 56	Pilotzelle zur Steuerung von Batterien in Fahrzeugen mit Elektro- oder Elektro-Hybrid-Antrieb	DM 40,-
Nr. 57	Wirkungen von Automobilabgas und seiner Inhaltsstoffe auf Pflanzen – Literaturstudie –	DM 30,-
Nr. 58	Rekonstruktionen von fünf realen Seitenkollisions-Unfällen – Ergänzende Auswertung der KOB-Daten –	DM 35,-
Nr. 59	Luftqualität in Fahrgasträumen	DM 50,-
Nr. 60	Belastbarkeitsgrenzen und Verletzungsmechanik des angegurteten Pkw-Insassen beim Seitenaufprall Phase II; Ansätze für Verletzungsprädiktionen	DM 95,-
Nr. 61	Erhebung und Analyse von Pkw-Fahrleistungsdaten mit Hilfe eines mobilen Datenerfassungssystems – Methodische und meßtechnische Ansätze für eine Pilotstudie –	DM 35,-
Nr. 62	Technische Erfahrungen und Entwicklungsmöglichkeiten bei Sicherheitsgurten im Fond von Pkw – Ergebnisse eines Symposiums –	DM 60,-
Nr. 63	Untersuchungen über Wirkungen von Automobilabgas auf pflanzliche Bioindikatoren im Umfeld einer verkehrsreichen Straße in einem Waldschadensgebiet	DM 95,-
Nr. 64	Sicherheitsorientierte Bewertung von Anzeige- und Bedienelementen in Kraftfahrzeugen – Grundlagen –	vergriffen
Nr. 65	Quantifizierung der Radlastdynamik bei Einfach-, Doppel- und Dreifachachsen in Abhängigkeit vom Federungs- und Dämpfungssystem des Fahrzeugs	DM 30,-
Nr. 66	Seitenverkleidung am Lkw – Technische Analyse	DM 50,-
Nr. 67	Vorstudie für die Durchführung von Tracermessungen zur Bestimmung von Immissionskonzentrationen durch Automobilabgase	DM 30,-
Nr. 68	Untersuchung fahrdynamischer Eigenschaften kurzgekuppelter Lastzüge bei Kursänderungen	DM 85,-
Nr. 69	Abschlußbericht der Pilotstudie zum Fahrleistungspanel „Autofahren in Deutschland“	DM 85,-
Nr. 70	Herstellung und Analyse charakteristischer Abgaskondensate von Verbrennungsmotoren für die Untersuchung ihrer biologischen Wirkung bei nichtinhalativen Tests	DM 55,-
Nr. 71	Bewertung von Personenverkehrssystemen – Teil II: Auswirkungen aus Angebots- und Nachfrageänderungen im Personenverkehr	DM 65,-
Nr. 72	Untersuchung über das Emissionsverhalten der Leichtmüllfraktion aus Autoschredderanlagen beim Verbrennen	vergriffen
Nr. 73	Verletzungsfolgekosten nach Straßenverkehrsunfällen	DM 95,-
Nr. 74	Sicherheitsorientierte Bewertung von Anzeige- und Bedienelementen in Kraftfahrzeugen – Empirische Ergebnisse –	vergriffen
Nr. 75	Retrospektive Untersuchung über die innere Sicherheit von Lkw-Fahrerhäusern	DM 90,-
Nr. 76	Aufbau und Labortest eines wartungsarmen, sich selbst überwachenden Batterieaggregates für Straßenfahrzeuge mit Elektro- und Elektro-Hybrid-Antrieb – Vorbereitende Untersuchungen –	DM 20,-
Nr. 77	Belastungsgrenze und Verletzungsmechanik des angegurteten Pkw-Insassen beim 90°-Seitenaufprall – Phase III: Vertiefende Analyse der überarbeiteten und zum Teil neu berechneten Heidelberger-Seitenaufprall-Daten	DM 25,-
Nr. 78	Ermittlung von ertragbaren Schnittkräften für die betriebstfeste Bemessung von Punktschweißverbindungen im Automobilbau	DM 85,-
Nr. 79	Verhalten des EUROSID beim 90°-Seitenaufprall im Vergleich zu PMTO sowie US-SID, HYBRID II und APROD	DM 90,-
Nr. 80	Demontagefreundliche Gestaltung von Automobilen Teil I	vergriffen
Nr. 81	Grundlagenuntersuchung zum Einfluß der Sonneneinstrahlung auf die thermische Behaglichkeit in Kraftfahrzeugen	DM 50,-
Nr. 82	Einsatz von Retardern in der Betriebsbremsanlage von Nutzfahrzeugen – Zweilächsiges Fahrzeug – Zwei Bände	DM 110,-
Nr. 83	Belastungen und Verhalten des EUROSID bei unterschiedlichen Prüfverfahren zum Seitenaufprall	DM 85,-
Nr. 84	Kosten einer kontinuierlichen Pkw-Fahrleistungserhebung	DM 45,-
Nr. 85	Auswirkungen der Nutzfahrzeugkonstruktion auf die Straßenbeanspruchung Seitenkräfte an Mehrfachachsen von Sattelanhängern bei Kurvenfahrt und durch Spurrinnen	DM 40,-
Nr. 86	Verfahren zur Umwandlung polymerer Mischabfälle aus der Autositz-Produktion in Polyole	DM 30,-
Nr. 87	Methoden zur Vorausberechnung der Faserorientierung beim Pressen von SMC mit geschnittenen Glasfasern Teil I: Unverrippte Bauelemente Teil II: Verrippte Bauelemente	DM 85,-
Nr. 88	Fahrzeugerprobung eines wartungsarmen Batterieaggregates	DM 45,-
Nr. 89	Grundsatzuntersuchungen zum Festigkeitsverhalten von Durchsetzfugeverbindungen aus Stahl	DM 65,-