Leistungsanforderungen an moderne Antriebsbatterien für elektrische Strassenfahrzeuge

Autor(en): **Rusch, W.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **77 (1986)**

Heft 16

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904250

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Leistungsanforderungen an moderne Antriebsbatterien für elektrische Strassenfahrzeuge

W. Rusch

Die modernen Bleibatterien weisen zwar eine relativ geringe Energiedichte auf, haben aber in bezug auf das Betriebsverhalten einen beachtlichen Entwicklungsstand erreicht. Am Beispiel des Energiespeichers des CitySTROMers werden die an solche Batterien gestellten Anforderungen und die heute erreichten Eigenschaften dargestellt.

Les nouvelles batteries d'accumulateurs au plomb, bien que présentant à vrai dire une densité énergétique relativement faible, ont toutefois atteint un niveau de développement appréciable quant aux conditions de fonctionnement. L'exemple de l'accumulateur d'énergie du CitySTROMer permet de montrer quelles sont les exigences posées à ces batteries et quelles sont leurs propriétés actuelles.

1. Die Energie- und Leistungsdichte

Auf dem 1. Grand Prix der Formel E (E = Elektromobile) am 1. Juni 1986 in Veltheim (Schweiz) konnte sich der CitySTROMer, ein von der RWE, Essen, «elektrifizierter» VW-Golf in der Kategorie B (Serienfahrzeuge) hervorragend plazieren: Die Plätze 2, 3 und 4 belegten CitySTROMer mit Serien-Bleibatterien der HAGEN Batterie AG (Fig. 1). 70 CitySTROMer sind im regelmässigen Einsatz in der Bundesrepublik Deutschland und in der Schweiz.

Der Energiespeicher EP 5 des CitySTROMers besteht aus einer Bleibatterie mit 16 Modulen 6 V 175 Ah in einem GFK-Trog einschliesslich der übrigen Peripherie. Figur 2 zeigt den Energiespeicher EP 5 fertig zum Einbau in den Golf und Figur 3 einen Schnitt des Moduls 6 V 175 Ah. Die Einrichtung der Säureumwälzung der Zelle – bestehend aus dem Blas- und Steigrohr – ist in der Eckzelle zu sehen. In der benachbarten Zelle erkennt man die PE-Schläuche des Wärmetauschers. Oben rechts ist der optoelektronische Füllstandssensor im nicht-montierten Zustand abgebildet. Der Wassernachfüllstopfen mit zentraler Entgasung HAGEN BFS ist komplett verschlaucht gezeigt.

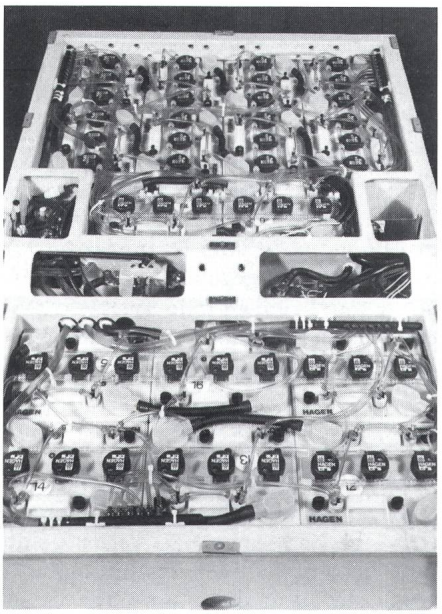


Fig. 2 Energiespeicher EP 5, einbaufertig montiert

Der Energiespeicher EP 5 wiegt komplett 530 kg und nimmt ein Volumen von 306 dm³ ein. Die Dichte beträgt 1,72 kg/dm³. Das Arbeitsvermö-

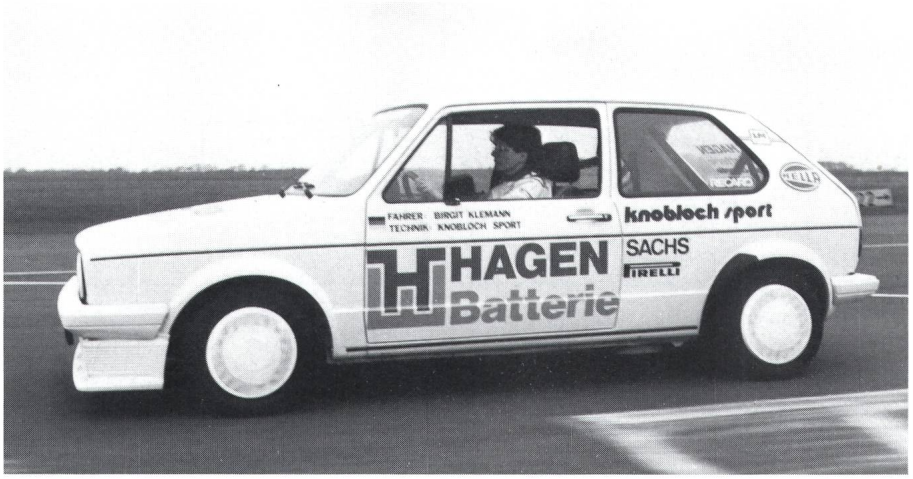


Fig. 1 CitySTROMer, eingesetzt beim 1. Grand Prix Formel E in Veltheim (Schweiz)

Vortrag, gehalten anlässlich der 7. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für elektrische Strassenfahrzeuge e.V. (DGES) am 25. April 1986 in Berlin.

Adresse des Autors
Dr. rer. nat. *Wieland Rusch*, HAGEN Batterie AG, Coesterweg 45, D-4770 Soest

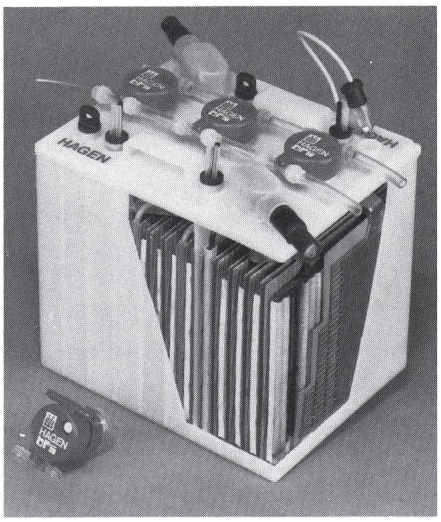


Fig. 3 Batterie mit Säureumwälzung und Wärmetauscher (3×5 PzS 175 mit HAGEN BFS)

gen des Energiespeichers ist in Figur 4 dargestellt, jeweils bezogen auf eine 80%-Entladung der 0,3-h- bis 5-h-Ströme bei 30 °C. Damit kann der City-STROMer bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h 78,6 km fahren (spezifischer Verbrauch 0,14 kWh/km). Im Stadtverkehr beträgt der Verbrauch 0,17 kWh/km, die Reichweite 56 km. Bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h liegt die Reichweite bei 39 km, jedoch führt die thermische Motorbegrenzung etwa nach der Hälfte dieser Strecke zur Herabsetzung der Geschwindigkeit. Diese Daten gelten für einen Fahrschritt. Durch Zwischenladungen tagsüber können Tagesreichweiten von 100 km erreicht werden.

Die volle Leistung von 24 kW ist beim Stadtverkehr auf etwa ⅔ der Reichweite bis zur Entnahme von etwa 6 kWh verfügbar, wie im Abschnitt 4 erläutert wird.

In Figur 5 ist die Energie- und Leistungsdichte dargestellt. Im Stadtverkehr wird eine mittlere Leistungsdichte von 17 W/kg gefordert und eine Energiedichte von 18 Wh/kg zur Verfügung gestellt. Das Fahrzeug beansprucht als Spitzenleistung eine Leistungsdichte von 44 W/kg. Die maximale Leistungsdichte des Energiespeichers beträgt 111 W/kg (59 kW):

$$P_{max} = \frac{1}{4} \frac{U_o^2}{R_i}$$

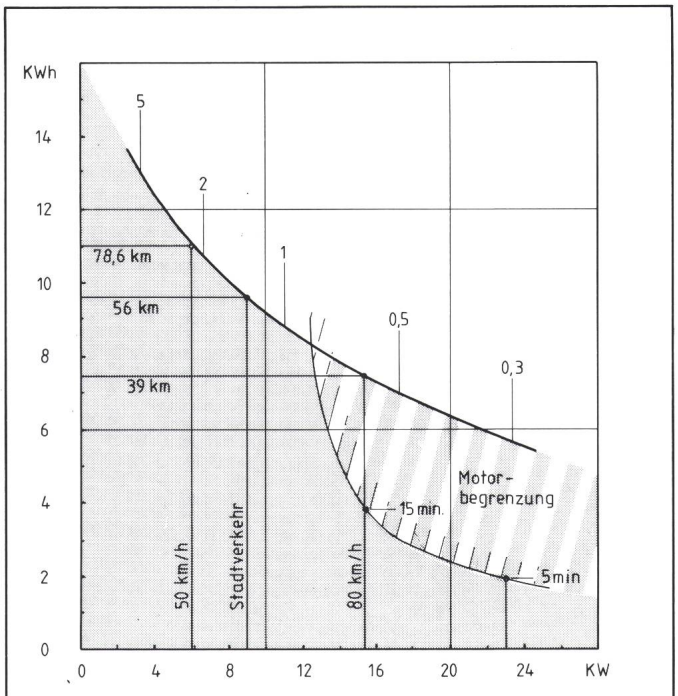
Diese Leistung zu nutzen würde aber bedeuten, einen 4fach höheren Strom (1170 A statt 280 A) im Fahrzeug verarbeiten zu müssen, und das nur für 2 min Entladung.

Die Verluste während der Entladung haben einen Anteil von 5 bis 20% am Arbeitsvermögen, im Stadtverkehr etwa 9%. Die Verluste bei der Ladung betragen etwa 30% des Arbeitsvermögens, wobei die Gasladung (Überladung) etwa 9/10 der Ladeverluste ausmacht.

Die Temperaturabhängigkeit der entnehmbaren Kapazität ist in Figur 6 dargestellt. Bei 10 °C ergibt sich bei der 1-h-Entladung ein Rückgang der Kapazität auf 77%.

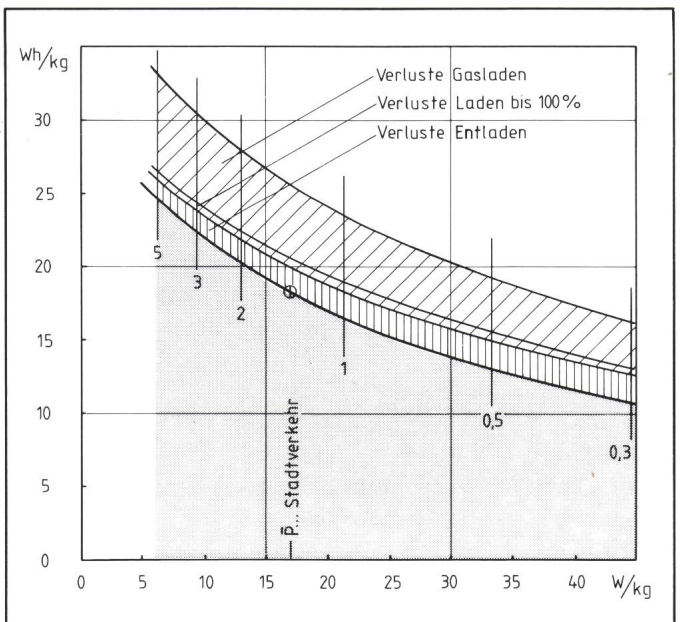
2. Spannungen und Widerstand während der Entladung

Das Kennlinienfeld der Entladespannungen für verschiedene Ströme bis 80% der Entladung ist in Figur 7 aufgetragen. Die Kurve U_o ist die Ru-



Gewicht 530 kg	t	5	2	1	0,5	0,3	h
Volumen: 306 dm³	P	3,3	6,7	11	17,3	23,4	KW
50 km/h 0,14 KWh/km	E	13,0	10,7	8,8	6,9	5,6	KWh
Stadt 0,17 KWh/km	E	100	82	68	53	43	%
80 km/h 0,19 KWh/km							

Fig. 4 Energiespeicher EP 5 – Arbeitsvermögen/Leistung



	t	5	2	1	0,5	0,3	h
Gewicht: 530 kg	P/G	6,2	12,6	20,8	32,7	44,1	W/kg
80% Entladung	E/G	24,6	20,2	16,7	13,1	10,6	Wh/kg
Dichte: 1,72 kg dm³	E/V	42,6	35,0	28,9	22,7	18,3	Wh/l
Verluste Entladen	$\frac{\Delta E}{G}$	1,3	1,6	1,8	2,0	2,1	Wh/kg
	$\frac{\Delta E}{E}$	5,3	7,9	10,8	15,3	19,9	%
Verluste Laden	$\frac{\Delta E}{G}$	7,3	6,1	5,1	4,2	3,5	Wh/kg
	$\frac{\Delta E}{E}$	29,6	30,2	30,8	31,9	33	%

Fig. 5 Energiespeicher EP 5 – Energie- und Leistungsdichte

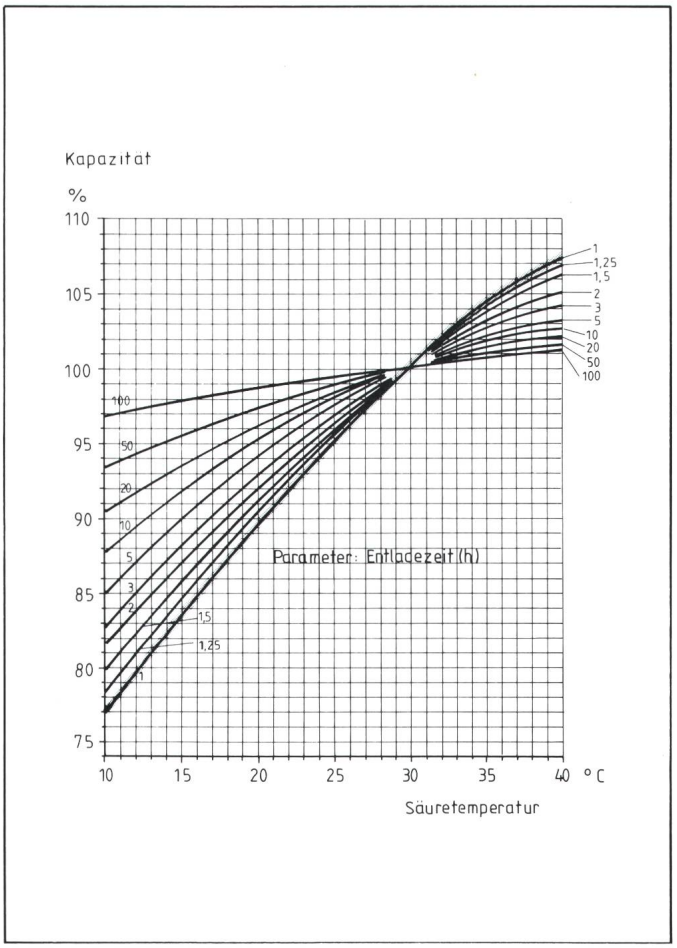


Fig. 6 **Temperaturabhängigkeit der Kapazität**

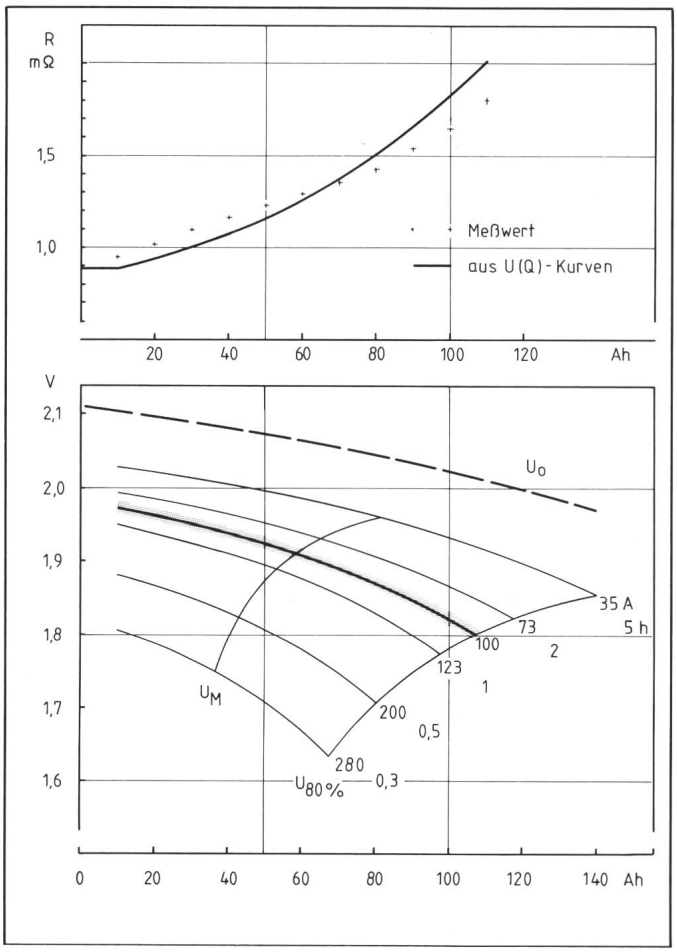


Fig. 7 **Entladespannungen und Innenwiderstand (Batterie 3×5 PzS 175)**

hespannung, die bei der Entladung mit abnehmender Säuredichte absinkt. Der Innenwiderstand gemäss der Definition

$$R_i = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

beträgt anfangs (bis 10 Ah Entnahme) 0,88 mΩ pro Zelle. Mit fortschreitender Entladung steigt er an, wie aus der stärkeren Abnahme der Entladespannung bei höheren Entladeströmen ablesbar ist. Die durchgezogene Linie im Widerstandsdiagramm ist dem Kennlinienfeld entnommen. Die Messwerte sind aus pulsförmigen Entladungen (Abschnitt 4) gewonnen. Im Mittel beträgt der Innenwiderstand etwa 1,25 mΩ.

Der Innenwiderstand charakterisiert die folgenden Überspannungen:

- Widerstandsüberspannung
  - Elektrolyt
  - metallische Stromleiter
  - Pb/PbO-Massen (PbO unter PbO_2)
- Konzentrationsüberspannung (überwiegt am Entladeende)
- Kristallisationsüberspannung (Spannungssack)
- Durchtrittsüberspannung (Aktivierung bei Durchtritt von Ladungsträgern durch Phasengrenzen, klein).

Der Anfangswiderstand R_i = 0,88 mΩ kann nach Einführung eines Widerstandskoeffizienten mit anderen Bleibatterien verglichen werden:

$$k_v = R_i K_5$$

Dabei ist

k_v = 0,154 Vh für den Energiespeicher EP 5

bzw.

k_v = 0,20...0,33 Vh für PzS-Batterien

Das günstige Widerstandsverhalten der CitySTROmer-Batterie ist auf die geringere Bauhöhe und die relativ höhere Zahl von Elektroden gegenüber PzS-Batterien zurückzuführen. Die Widerstandsüberspannung (Elektrolyt) und die Konzentrationsüberspannung (dünnere Platten) ist geringer.

3. Wirkungsgrad, Erwärmung

In Figur 8 ist für eine Entladung von 107 Ah mit 100 A (entsprechend der mittleren Stromstärke im Stadtverkehr) der Verlauf der Entladespannung (U_M = 1,91 V) im Vergleich zur Ruhespannung (U_o = 2,07) dargestellt. Bei der Ladung bis 100% ergibt sich eine mittlere Spannung von 2,21 V. Die Gasladung (20% Überladung) erfolgt bei 2,65 V.

Der Wirkungsgrad = Entladeenergie/Ladeenergie beträgt 70%. ⅔ der Gesamtverluste entfallen auf die Gasladung. Reduzierung der Überladung durch die Einführung der Elektrolytumwälzung und Zwischenladungen verbessern den Wirkungsgrad. Unter Einbeziehung des Ladegerätes beträgt der Wirkungsgrad 60%.

Die Erwärmung der Batterie kann mit Hilfe der Wärmekapazität der Bleibatterie – zunächst ohne Wärmeabfuhr betrachtet – berechnet werden. Die Wärmekapazität der Batterie (überwiegend vom wässrigen Elektrolyten herrührend) beträgt 0,3 Wh/kgK

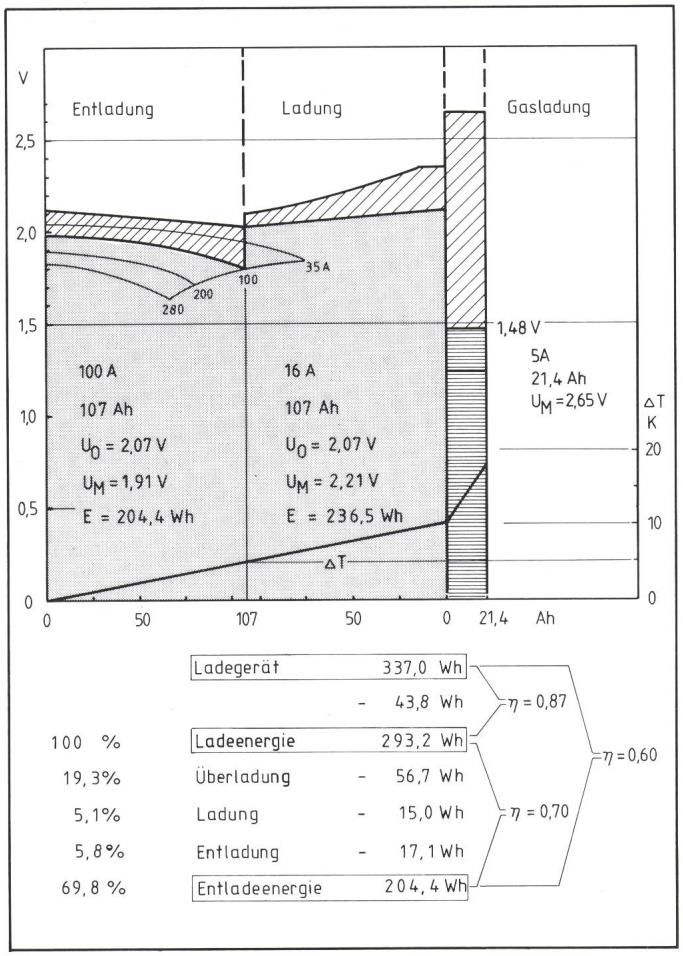


Fig. 8 **Verluste und Erwärmung pro Zyklus (Batterie 3×5 PzS 175)**

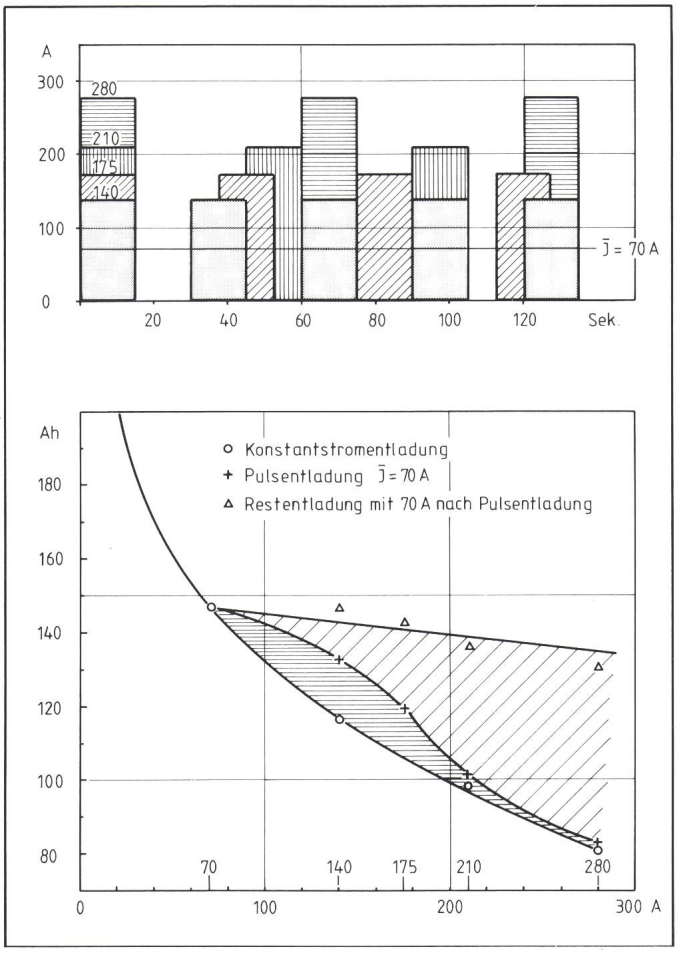


Fig. 9 **Pulsentladungen (Batterie 3×5 PzS 175)**

bzw. bei 10 kg Zellengewicht 3 Wh/K. Während der Entladung ergibt sich eine Erwärmung von 5,7 K, während der Ladung bis 100% 5 K. Während der Gasladung ist nur die Spannungsdifferenz von 2,65 V zur effektiven Wasserzersetzungsspannung von 1,48 V wirksam. Es ergibt sich eine Erhöhung von 8,3 K.

Insgesamt steigt die Temperatur bei einem Zyklus um 19 K an (ohne Wärmeabfuhr gerechnet). Innerhalb von 24 Stunden müssen im stationären Zustand 114 W abgeführt werden. Das ist mit Speichertemperaturen von etwa 5–10 K über Umgebungstemperatur je nach Isolierung leicht möglich.

4. Pulsförmige Entladung

Um den Einfluss von Entladestromspitzen auf die Batterie im Vergleich zu Konstantstromentladungen zu untersuchen, wurden bei VW von Dr. Kalberlah pulsförmige Entladungen jeweils mit einem mittleren Strom von 70 A durchgeführt (Fig. 9).

Pulsförmige Entladungen mit dem zweifachen (140 A) und dem 2,5fachen (175 A) Strom ergeben deutlich höhere Kapazitäten als Konstantstromentladungen mit diesen Strömen. Dieser Effekt wird mit der Vorstellung, dass Säure während der Entladepulse in die Poren der Masse eindringen kann, verstanden. Bei Pulsentladungen mit dem 3- bzw. 4fachen Strom (30- bzw. 20-min-Strom) wird keine Kapazitätsvergrösserung, trotz Ruhepausen von 30 bzw. 45 s, beobachtet. Dies entspricht auch der Beobachtung, dass im letzten Drittel der Reichweite der Maximalstrom von 280 A nicht mehr zur Verfügung steht.

Es ist ein Hinweis darauf, dass bei Hochstromentladung ein anderer Reaktionsmechanismus vorliegt (siehe F. Beck und K.-J. Euler, Elektrochemische Energiespeicher, Band 1, Bild 3.39). Bei niedriger Stromdichte ($t > 0{,}5$ h) reagieren die H^+-Ionen mit freiliegenden PbO_2-Kristallen, die gebildeten Pb^{2+}-Ionen reagieren mit Schwefelsäure, Bleisulfat kristallisiert aus der Lösung. Die Kapazität hängt von der Schwefelsäurekonzentration in den Poren ab.

Bei hoher Stromdichte ($t < 0{,}5$ h) liegen nicht genügend PbO_2-Kristalle frei, so dass unter der erhöhten Feldstärke die H^+-Ionen durch $PbSO_4$-Schichten diffundieren (Fig. 10). Diese Festkörperreaktion ist von der Oberfläche der aktiven Masse begrenzt, Entladepausen vergrössern die Kapazität nicht. Diese Reaktion bei Hochstromentladungen ($t < 0{,}5$ h) könnte für irreversible Strukturveränderungen in der positiven Masse, die lebensdauer- bzw. zyklenverkürzend wirken, verantwortlich sein.

Völlig im Einklang mit der Erfahrung ist auch der Befund, dass die Restentladung mit 70 A nach Abschluss der Pulsentladung annähernd zu immer gleichen Gesamtkapazitäten führt (Fig. 9).

5. Anforderungen und Eigenschaften im Betrieb

Die *Arbeitstemperatur* liegt bei 30 °C ± 10 °C. Unterschreitungen (geladen) bis −60 °C und Überschreitungen (kurzzeitig) bis +55 °C sind ohne Beeinträchtigung möglich.

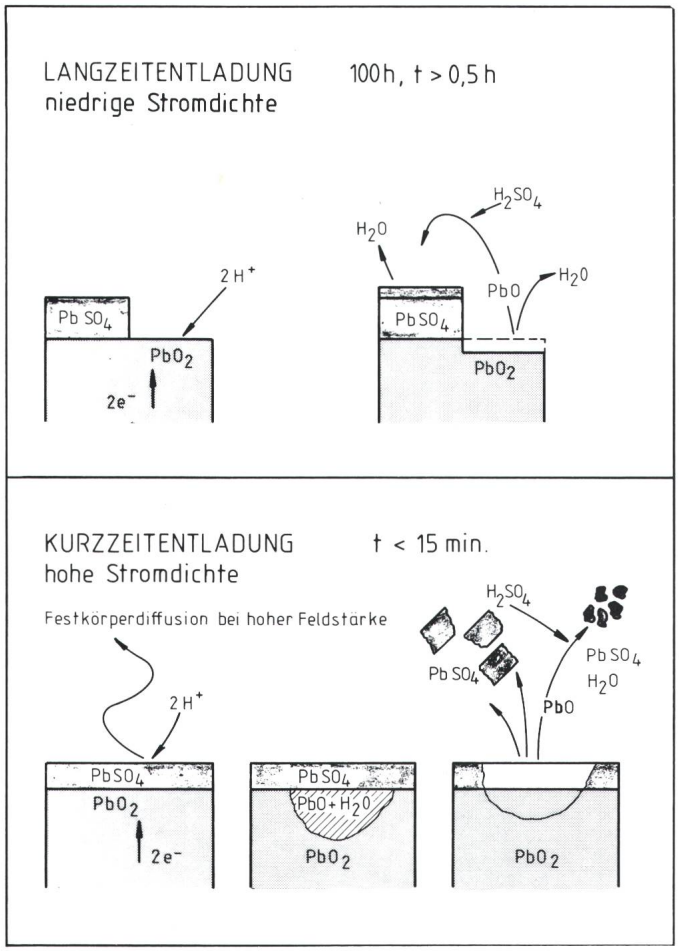


Fig. 10
Reaktion der positiven Masse während der Entladung

6. Peripherie

Zur Peripherie des Energiespeichers EP 5 gehören neben dem Trog und den Endableitern mit dem Sicherungselement folgende Einrichtungen:
- Wassernachfülleinrichtung
- Entgasungsschläuche
- Heizung, Kühlung
- Elektrolytumwälzung
- Säurestandsfernmessung
- Entladezustandsanzeiger
- Blockspannungsüberwachung

Alle diese Einrichtungen sind zum Betrieb einer Bleibatterie nicht zwingend erforderlich. Aus wirtschaftlichen Gründen (Wartungsvereinfachung, Lebensdauerverlängerung und Gebrauchswertsteigerung) werden sie vorgenommen.

7. Wirtschaftlichkeit des CitySTROMer-Energiespeichers

In Tabelle I sind die wichtigsten Daten - bezogen auf das Arbeitsvermögen und den spezifischen Verbrauch im Stadtverkehr - zusammengestellt. Es wurde ein Einsatz über acht Jahre bei Verwendung von zwei Batteriesätzen zugrunde gelegt. Die Kostendegressionen bei grösseren Stückzahlen sind berücksichtigt.

Aufgrund von *Rückwirkungen zwischen Entlade- und Ladevorgang* werden Einflüsse auf die Struktur der aktiven Massen angenommen. Sie sind aber nicht genau bekannt.

Die *Selbstentladung* beträgt bei Batterien mit pos. Gitter 6–9% Sb und bei 20 °C 0,5 bis 2% pro Tag (abhängig vom Alter). Dieser Wert reduziert sich nach etwa 10 Tagen auf den halben Wert. Bei einer Temperatur von 0 °C tritt nur ¼ der obigen Werte auf, bei 40 °C dagegen ist mit 4mal höheren Werten zu rechnen.

Stillstandzeiten im geladenen Zustand (Tage) bewirken keine Störung, im entladenen Zustand können dagegen Ladeschwierigkeiten wegen Kristallvergrösserung auftreten.

Probleme der Reihenschaltung können durch Erkennen einer schwachen Zelle mittels Blockspannungsvergleich umgangen werden. Im Störungsfall bleibt die Leitfähigkeit erhalten (Gegenspannung der Zelle durch Umpolen).

Die *Ermittlung des Ladezustands* kann durch einen Ah-Zähler mit Strombewertung oder integrierter Spannungsmessung (Hagen Curtis) erfolgen. Damit ist ein gutes Erkennen des Ladezustandes möglich. Auch eine Einzelzellendiagnose durch Säuredichtemessung ist möglich.

Der *Wartungsaufwand* für die Wassernachfüllung beträgt wöchentlich etwa ¼ h, für die Ausgleichsladung vierteljährlich etwa 12 h.

8. Qualitative Bewertung der Bleibatterie

Den *Nachteilen* der Bleibatterie wie
- geringe Energiedichte,
- Abfall der Energiedichte mit hoher Leistung,
- Abfall der Energiedichte bei niedriger Temperatur,

Wirtschaftlichkeitsberechnung für den Energiespeicher EP 5 im CitySTROMer Tabelle I

Installierte Energie	9,52	kWh		
Spezifischer Verbrauch	0,17	kWh/km		
Reichweite	56	km		
Einsatz	8000	km/a		
Batterielebensdauer	4	Jahre		
Peripherielebensdauer	8	Jahre		
Stückzahl	kleiner als 1000		grösser als 50 000	
Energiespeicherkosten	13 952	DM	6 976	DM
Batteriesatz (Ersatz)	6 976	DM	3 488	DM
Kosten pro installierte kWh	1 466	DM/kWh	733	DM/kWh
Kosten pro durchgesetzte kWh	1,92	DM/kWh	0,96	DM/kWh
Kosten pro km (64 000 km, 8 Jahre, 2 Batteriesätze)	0,33	DM/km	0,16	DM/km

- Lebensdauer und Zyklenzahl bei Pkw-Elektro-Strassenfahrzeugen haben noch nicht die bei Traktionsbatterien üblichen Werte (5 Jahre, 1500 Zyklen) erreicht,

stehen verschiedene *Vorteile* gegenüber, die nicht übersehen werden dürfen:

- hohe Zellenspannung, geringere Zellenzahl (durch hohe H_2- und O_2-Überspannung am Blei möglich),
- hohe Zyklenzahl (durch schwerlösliche Reaktionspartner wird die Struktur reproduziert),
- die Stromableiter sind stabil (Blei wird durch Schichten aus $PbSO_4$ bzw. PbO_2 geschützt),
- hoher Wirkungsgrad,
- hohe Leitfähigkeit des Elektrolyten 0,85 $(\Omega\,cm)^{-1}$,
- hohe Wärmekapazität (0,30 Wh/kg K),
- Wärmepumpeneffekt (3,3% des Arbeitsvermögens werden bei der Entladung der Umgebungswärme entzogen),

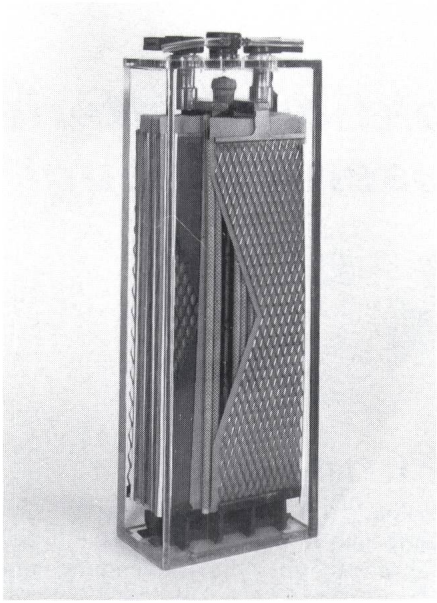


Fig. 11 Schittzelle HAGEN CSM, 5 CSM 600

- Unempfindlichkeit gegenüber Schock und Vibration,
- billige, verfügbare Rohstoffe, leichte Verarbeitbarkeit (niedriger Schmelzpunkt von Blei),
- gute Wiederverwertbarkeit von Blei und Bleiverbindungen.

Es bleibt abzuwarten, ob Systeme mit höherer Energiedichte ähnliche gute Eigenschaften im Betriebsverhalten und in der Wirtschaftlichkeit zeigen.

9. Ausblick

Der jetzt erreichte Stand der Energiespeicher EP 5 muss im Praxiseinsatz erprobt werden. Künftige Leistungssteigerungen sind mit Kupfergittern möglich (Fig. 11). Eine Lebensdauerverlängerung ist durch Reduzierung des Antimongehaltes der Elektroden zu erwarten. Zudem werden wartungsfreie Batterien den Anwendungsbereich von Bleibatterien erweitern.