Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 77 (1986)

Heft: 16

Artikel: Nickel-Eisen-Traktionsbatterien für elektrische Strassenfahrzeuge

Autor: Warthmann, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904251

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Nickel-Eisen-Traktionsbatterien für elektrische Strassenfahrzeuge

W. Warthmann

Nickel-Eisen-Batterien zeichnen sich gegenüber Bleiakkus durch eine höhere Energie- und Leistungsdichte aus. Die spezifischen Daten einer solchen Batterie werden vorgestellt und die damit in einem Elektro-Polo erzielbaren praktischen Fahrleistungen aufgezeigt.

Les batteries au ferronickel se distinguent des accumulateurs au plomb par une densité d'énergie et de puissance plus élevée. Sur la base d'une «Polo» électrique, les données spécifiques de ce genre de batterie sont présentées de même que les résultats pratiques obtenus au niveau de l'utilisation.

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. *Wolfgang Warthmann*, DAUG
Deutsche Automobilgesellschaft mbH,
Emil-Kessler-Strasse 5, D-7300 Esslingen

1. Einleitung

Aus der Flottenerprobung der vergangenen Jahre konnten wertvolle Erfahrungen über die Anwendung von elektrischen Strassenfahrzeugen im Alltagsbetrieb gesammelt werden [1]. Es hat sich herauskristallisiert, dass der Einsatz der Fahrzeuge mit Schwerpunkt im Nahverkehrsbereich liegen wird. Der Grund ist in der gegenüber flüssigem Kraftstoff geringen Speicherkapazität der Traktionsbatterien und deren Eigenschaft, elektrische Energie nur langsam und mit begrenzter Leistung aus dem Versorgungsnetz aufzunehmen, zu suchen.

Im wesentlichen können drei Fahrzeuggruppen unterschieden werden:
- leichte Fahrzeuge, 1–2 t Gesamtgewicht (z. B. Personenwagen)
- mittelschwere Fahrzeuge, 2–5 t Gesamtgewicht (z. B. Transporter)
- schwere Fahrzeuge bis etwa 20 t Gesamtgewicht (z. B. Linienbusse)

Die notwendigen Anforderungen an elektrische Strassenfahrzeuge und insbesondere an deren Energiespeicher, die eine reibungslose Eingliederung in den Verkehrsfluss ermöglichen, sind in Tabelle I zusammengefasst [2].

Anforderungen an die Energiespeicher von elektrischen Strassenfahrzeugen — Tabelle I

		Leichte Fahrzeuge (Personenwagen)	Mittelschwere Fahrzeuge (Transporter)	Schwere Fahrzeuge (Linienbus)
Gesamtgewicht	t	1–2	2–5	bis 20
Maximale Geschwindigkeit	km/h	≦ 90	~ 80	≦ 70
Beschleunigung 0–50 km/h	s	12	15	, 20
Speicheranteil am Gesamtgewicht	%	20–25	~ 25	25–30
Maximale spezifische Antriebsleistung des Energiespeichers unter Berücksichtigung seines Gewichtsanteils sowie des Antriebswirkungsgrades (65–70%)	W/kg	60–90	50–60	40–58
Mittlere spezifische Antriebsleistung	W/kg	20–30	18–20	13–19
Mittlerer Energieverbrauch (batterieseitig, Stadtverkehr) pro km Fahrstrecke	Wh/km	170	350	1600
bei einem Fahrzeuggesamtgewicht von	t	1,5	3,0	24
Mittlere spez. Energiedichte des Energiespeichers unter Berücksichtigung seines Gewichtsanteils bei einer Reichweite von — 50 km	Wh/kg	28–23	~ 23	13–11
75 km	Wh/kg	43–34	~ 35	20–17
100 km	Wh/kg	57–45	~ 47	27–22

Bei 70–80 km maximaler Reichweite im Nahverkehr [1; 3] werden an die Energiedichte der Energiespeicher spezifische Anforderungen von 20–45 Wh/kg gestellt. Insbesondere den höheren Energiebedarf kleiner und leichter bis mittelschwerer Fahrzeuge können Nickel-Eisen-Traktionszellen aufgrund ihrer spezifischen Energie- und Leistungsdaten abdecken (Fig. 1).

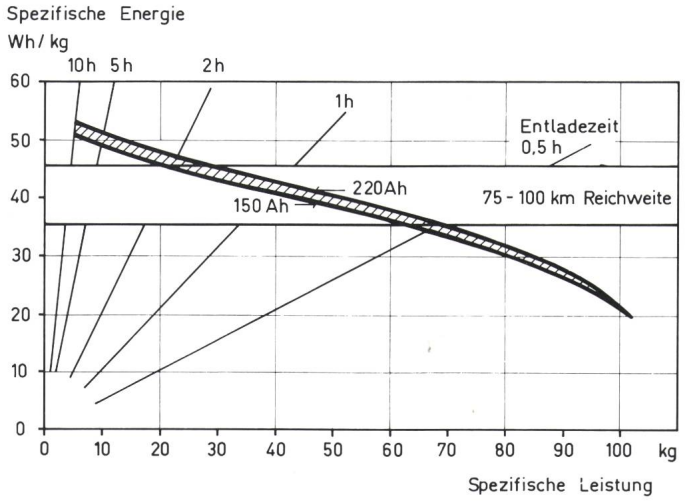


Fig. 1
Energie-Leistungs-Diagramm von Nickel-Eisen-Traktionszellen

2. Elektrochemisches Verhalten von Nickel-Eisen-Zellen

Der stromliefernde chemische Prozess wird durch die nachfolgenden Gleichungen und Beziehungen beschrieben.

Stromliefernde Reaktion

$$Fe + 2\,NiOOH + 2\,H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2\,Ni(OH)_2$$

Entropieänderung

$$T\Delta S = -500{,}3\ J/Ah$$

Gesamtverlustleistung

$$P = 0{,}1390\,i_e + R_i\,i_e^2\ (W)$$

i_e = Entladestrom (A)
R_i = Zellwiderstand (Ohm)

Temperaturerhöhung

$$\Delta T = \frac{t_e \cdot P}{C_p} = \frac{C(0{,}1390 + R_i \cdot i_e)}{C_p}$$

t_e = Entladezeit (h)
C_e = Kapazität der Zelle mit i_e (Ah)
C_p = spezifische Wärme (p = const) (Wh/°K)

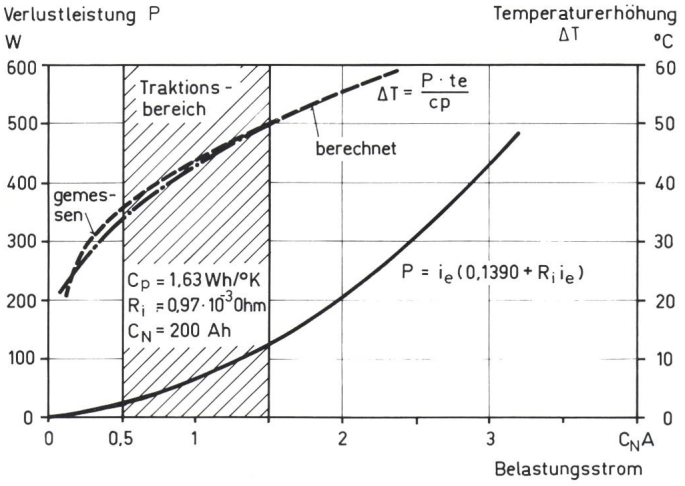


Fig. 2
Verlustleistung und Temperaturerhöhung einer 200-Ah-Nickel-Eisen-Zelle

Die Entropieänderung der Reaktion ist negativ [4; 5; 6; 7], d.h. die Zellen erwärmen sich während der Entladung. Weitere Wärmequellen stellen Polarisationsvorgänge und ohmsche Widerstände dar, so dass die stromabhängige Gesamtverlustleistung und der Temperaturanstieg während der Belastung bestimmt werden können.

Im Traktionsbereich 0,5–1,5 $C_N A$-Belastung nimmt die Temperatur einer 200 Ah-Zelle um 35–50 °C zu (Fig. 2), d.h. im Fahrbetrieb können Elektrolyttemperaturen bis 80 °C auftreten.

Hohe Betriebstemperaturen schädigen die Aktivmasse der positiven Elektroden [8; 9; 10] und verkürzen die Lebensdauer der Zellen drastisch. Nach 1000 Zyklen sind bei Zellen, die bei Raumtemperatur (25 ± 3 °C) betrieben worden sind, noch 70% der Nennkapazität verfügbar, während bei 40 °C-Umgebungstemperatur schon nach 300 Zyklen der Abfall auf 70% C_N beobachtet wird (Fig. 3). Hinzu kommen stabilitätsmindernde Langzeitauswirkungen auf Separatoren und Zellgehäuse auf Kunststoffbasis.

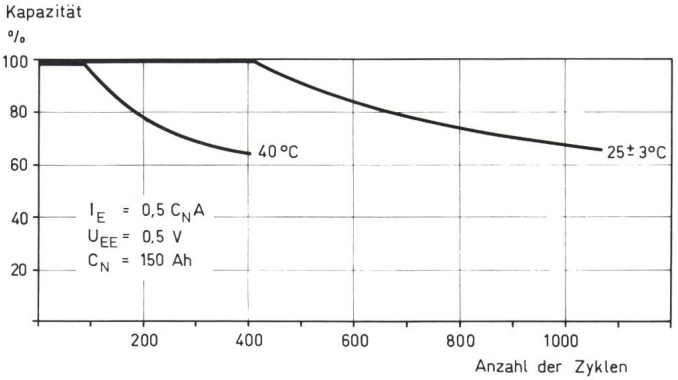


Fig. 3
Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Lebensdauer von Nickel-Eisen-Zellen

In der praktischen Anwendung muss der Energiespeicher über einen weiten Temperaturbereich einsatzfähig sein. Die optimalen Betriebstemperaturen von Ni/Fe-Zellen mit Faser-

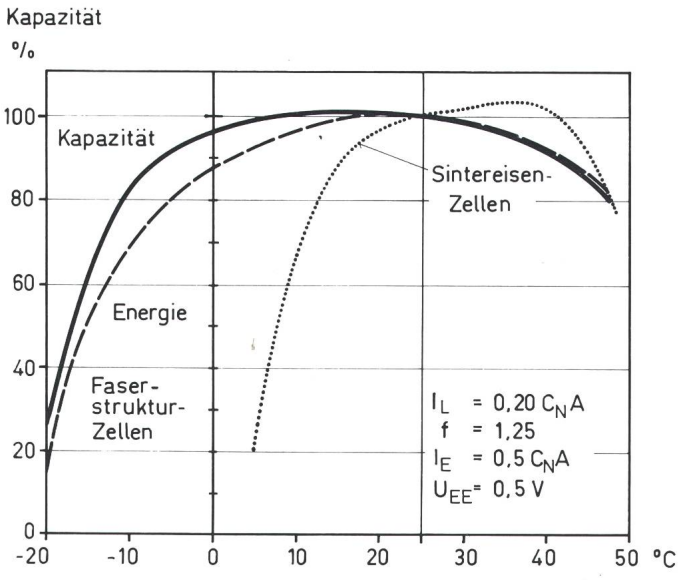


Fig. 4
Einfluss der Elektrolyttemperatur auf die entnehmbare Kapazität

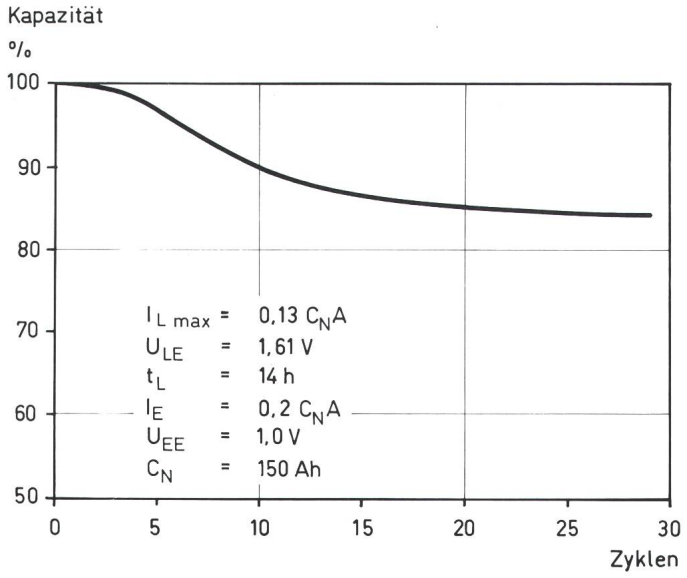


Fig. 5
Einfluss der IU-Ladung auf die Kapazität von Nickel-Eisen-Zellen

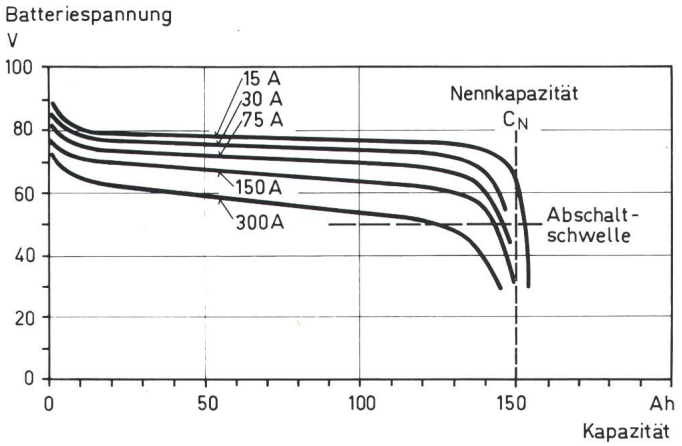


Fig. 6
Einfluss des Entladestroms auf Spannung und Kapazität der Nickel-Eisen-Traktionsbatterie für den Elektro-Polo

strukturelektroden liegen zwischen +10 und +30 °C (Fig. 4).

Der Energiespeicher ist auch im Winter bei in unseren Breitengraden mittleren Temperaturen von 0 bis -10 °C selbst nach längeren Standzeiten ohne Aufwärmen betriebsbereit. Gegenüber älteren Zellen mit Sintereisenelektroden liefern Faserstrukturelektroden bei -10 °C noch 70% der Energie und 85% der Kapazität bei 25 °C.

Das Tieftemperaturverhalten von Ni/Fe-Zellen wird weitgehend von der über die Lösungsphase arbeitenden Eisenelektrode bestimmt. Im Temperaturbereich um -20 °C beginnt der Elektrolyt (6 M NaOH) bereits dickflüssig zu werden.

Als Folge der verminderten Ladungsannahme der positiven Elektrode im hohen Temperaturbereich (>40 °C) nimmt die verfügbare Kapazität der Zellen durch Herabsetzen der Sauerstoffüberspannung ab [11]. Dadurch wird zudem der Ladewirkungsgrad der Zellen verschlechtert.

Da die Ladeendspannung unter Konstantstromladung temperaturabhängig ist, hat die Elektrolyttemperatur Einfluss auf die aus praktischen Gründen bevorzugte *IU*-Lademethode – verringerte Gasentwicklung, Vermeidung von starken Überladungen und damit verbundener Wartungsfreundlichkeit. Bei für Nickel-Eisen vorteilhaften Regelspannungen von 1,60–1,65 V pro Zelle stellen sich im oberen Temperaturfeld (40–60 °C) 20–35 A hohe Restladeströme ein, die den Vorteil des Ladeverfahrens wieder aufheben.

Ähnlich wie bei Bleizellen sind nach *IU*-Ladung alle 15 Zyklen Ausgleichsladungen mit Wassernachfüllen empfehlenswert. Ohne Ausgleichsladung stellt sich ein Ladezustand von etwa 85% ein (Fig. 5). Die Wartung der Zellen kann mit Hilfe von 15 A-Rekombinatorstopfen auf 40–50 Zyklen ausgedehnt werden.

3. 10-kWh-Nickel-Eisen-Traktionsbatterie

Praktische Erfahrungen wurden in einem VW-Elektro-Polo mit 8,5-kW-Reihenschlussmotor gesammelt. Die Batterie besteht aus 60 Einzelzellen mit 150 Ah Nennkapazität. Der Entladestrom hat nur wenig Einfluss auf die entnehmbare Kapazität (Fig. 6). Unter 2 $C_N A$-Belastung (300 A = maximaler

Beschleunigungsstrom) wird eine mittlere Entladespannung von 1,0 V pro Zelle oder 18 kW Leistung ermittelt. Bei einer Abschaltschwelle von 50 V kann noch mit 15 kW beschleunigt werden. Zu diesem Zeitpunkt sind erst 85% der zweistündigen Kapazität entladen.

Die spezifischen Energie- und Leistungsdaten der Batterie weichen nur unwesentlich von denen der Einzelzelle ab (Fig. 7). Die Unterschiede beruhen hauptsächlich auf fertigungsbedingten Herstellungstoleranzen der Zellkapazität. Erwähnenswert ist, dass sich der Kapazitätsunterschied zwischen Einzelzelle und Batterie unter milden Entladebedingungen stärker auswirkt und mit steigender Entladerate kleiner wird (Fig. 8).

Die 150 Ah-Batterie mit 45 Wh/kg bzw. 72 Wh/l spezifischer Energie und Spitzenleistung von 110 W/kg (30 s Puls) verleiht dem Fahrzeug, abhängig von Fahrstrecke und Fahrbedingungen, eine Reichweite von 60–90 km (Tab. II). Zwei 12-V-Lüfter sorgen automatisch ab 40 °C Elektrolyttemperatur für Kühlluft, um den Temperaturanstieg in den Zellen in Grenzen (≦ 50 °C) zu halten. Im allgemeinen konnte nach 1½–2½ Stunden Abkühlzeit wieder geladen werden.

Bevorzugt wurde die *IU*-Lademethode (Fig. 9), deren Restladeströme die Verwendung von Rekombinator-Stopfen zuliessen. Die Erfahrung hat gezeigt, dass der Ladefaktor nicht unter 1,33 (LWG ~ 75%) liegen sollte, um die Volladung aller Zellen zu erreichen. Der Energiewirkungsgrad beträgt unter den angegebenen Bedingungen etwa 57% batterieseitig und ab Steckdose 48–50%.

Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades betragen die reinen Stromkosten pro Zyklus im Nahverkehr 3,37 DM (≙ 0,06 DM/km). Der Anschaffungspreis einer Nickel-Eisen-Batterie beträgt 400–500 DM/kWh (5000 Batterien pro Jahr vorausgesetzt). Nur unter Einbeziehung der Strom- und Anschaffungskosten muss der Energiespeicher 1500–2000 Vollzyklen durchlaufen bzw. 90 000–120 000 km ermöglichen, um mit den heutigen Benzinpreisen gleichzuziehen (Fig. 10). Voraussetzung dazu ist, dass die fahrzeugspezifischen Kosten (Anschaffung, Wartung, Pflege usw.) des elektrisch betriebenen Fahrzeuges (ohne Energiespeicher) dem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor gleichzusetzen sind.

Fig. 7
Energie-Leistungs-Diagramm der Nickel-Eisen-Einzelzelle und der Nickel-Eisen-Traktionsbatterie für den Elektro-Polo

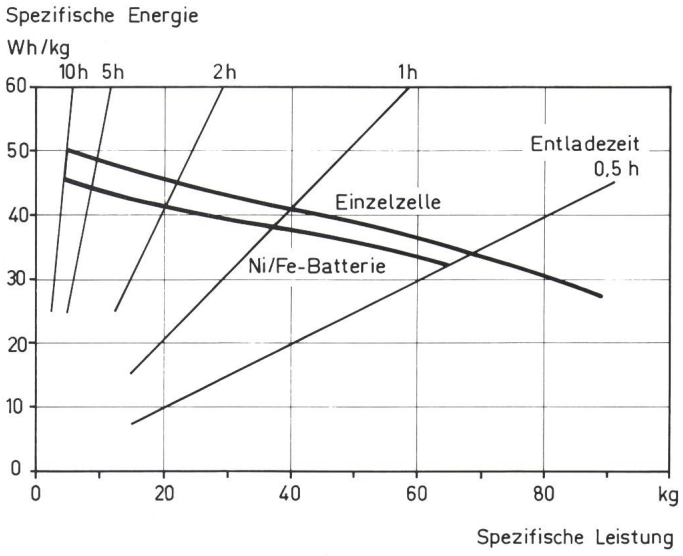


Fig. 8
Belastungsverhalten der Nickel-Eisen-Einzelzelle und der Nickel-Eisen-Traktionsbatterie für den Elektro-Polo

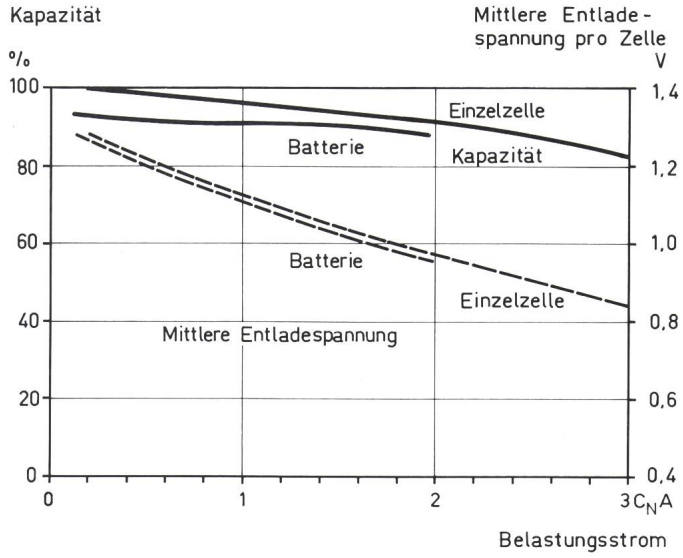
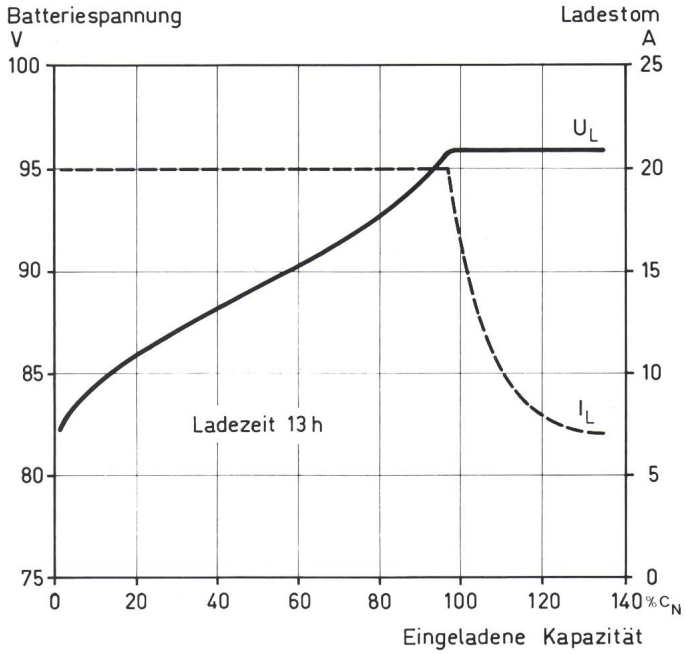


Fig. 9
IU-Ladekurve der Nickel-Eisen-Traktionsbatterie für den Elektro-Polo



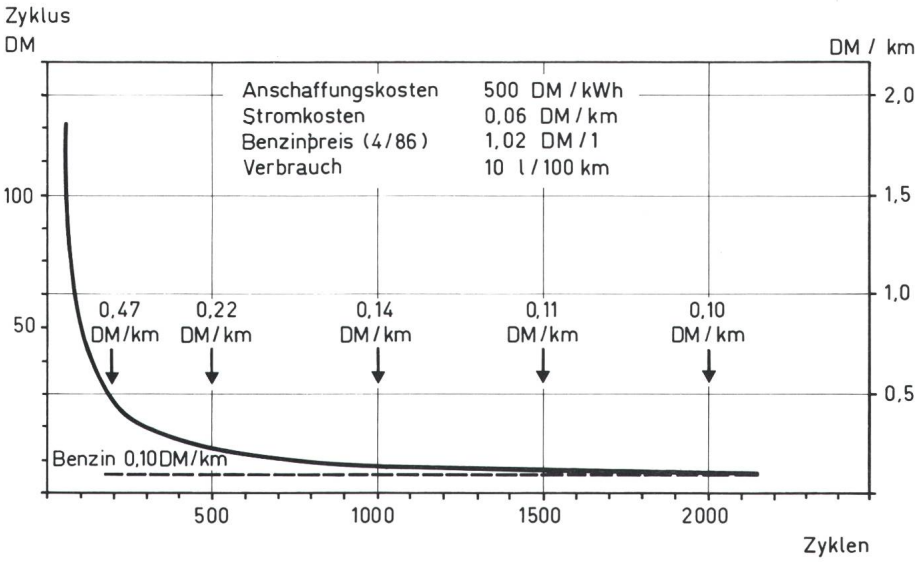


Fig. 10 Einfluss der Batterielebensdauer auf die Energiekosten (Anschaffungs-, Stromkosten)

Verbrauchsdaten der Nickel-Eisen-Traktionsbatterien für den Elektro-Polo Tabelle II

Fahrbedingungen	Reichweite	Energieverbrauch	
50 km/h konstant	90 km	1,57 Ah/km	107 Wh/km
70 km/h konstant	85 km	1,70 Ah/km	114 Wh/km
SAE J 227a/C-Zyklus	70 km	2,11 Ah/km	140 Wh/km
Stadtverkehr und Umgebung (hügelig) (Stuttgart)	60 km	2,37 Ah/km	164 Wh/km

* Daten der Batterie: 60 Zellen, Nennkapazität 150 Ah bzw. 11,8 kWh(C_5)
Gewicht 263 kg; Volumen 162 dm³
Energiedichte: 45 Wh/kg bzw. 72 Wh/dm³ (C_5)
40,5 Wh/kg bzw. 66 Wh/dm³ (C_2)
Leistungsdichte (30s Puls): 110 W/kg (vollgeladen)
80 W/kg (50% DOD)

Reichweite des Elektro-Polo mit Blei- und Nickel-Eisen-Traktionsbatterien Tabelle III

		Ni/Fe	Pb/Pb O_2
Nennkapazität		10 kWh	10 kWh
Gewicht		263 kg	310 kg
Spezifische Energie	C_5	45 Wh/kg[1]	26 Wh/kg[2]
	C_2	40 Wh/kg[1]	21 Wh/kg[2]
Reichweite	50 km/h	90 km	51 km
	70 km/h	85 km	49 km
	SAE J227 a/C	70 km	40 km

[1] 100% DOD / [2] 80% DOD
E-Polo (8,5 kW), Juli/August 1985, 2 Personen, ebene Strecke

4. Schlussbetrachtung

Die Nickel-Eisen-Traktionsbatterie erfüllt im praktischen Einsatz die im Nahverkehr gestellten Anforderungen. Gegenüber einer 50 kg schwereren Bleibatterie gleicher Nennkapazität kann die Reichweite bei gleichem Fahrzeug und unter gleichen Bedingungen um den Faktor 1,7–1,8 gesteigert werden (Tab. III).

Die Beherrschung des Temperaturmanagements und die Weiterentwicklung zu wartungsarmen Traktionsbatterien sind Aufgaben, die lösbar sind.

Literatur

[1] Alternative Energien für den Strassenverkehr – Bereich Elektrotraktion, Schlussbericht für das BMFT, 1985.

[2] *E. Zander:* Grundsätzliche Anforderungen an Traktionsbatterien für Elektro-Strassenfahrzeuge, GES Gesellschaft für elektrischen Strassenverkehr mbH, Frankenstrasse 348, D-4300 Essen 1.

[3] *D. Naunin:* Das Elektroauto – Chancen und Grenzen neuer Batterieentwicklungen, Technische Universität Berlin.

[4] *W.M. Latimer:* The Oxydation States of the Elements and their Potentials in Aqueous Solutions, Second Edition, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J. (1952).

[5] *Landolt-Börnstein:* Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik, Technik, II. Band, 4. Teil, 6. Auflage, Kalorische Zustandsgrössen, Springer Verlag Berlin-Göttingen-Heidelberg (1961).

[6] *E. Lax* (Hrsg.): D'Aus-Lax, Taschenbuch für Chemiker und Physiker, Band 1, 3. Auflage, Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York (1967).

[7] *B.J.R. Hodge, R. Bonnaterre* and *F. Pulois:* Fast Charging of Sealed Nickel-Cadmium Batteries: Theory and Practice, in Power Sources 5, Hrsg. D.H. Collins, Proc. 9th International Symposium held at Brighton, Sept. 1974, S. 211...231, Academic Press, London, New York, San Francisco (1975).

[8] *C.P. Milner* and *U.B. Thomas:* The nickel-cadmium cell, Advances in Electrochem. and Electrochemical Enging., Vol. 5 (Edit. Ch.W. Thobias) Intersoc. Publ. John Wiley and Sons Inc. (1967).

[9] *C. Greaves* and *M.A. Thomas:* Structural and Electrochemical Characteristics of Plastic (PTFE) bonded Nickel Hydroxide Electrodes. Journals of Power Sources, Vol. 12, p. 185...204 (1984).

[10] *M.Z.A. Munshi* and *A.C.C. Tseung:* The dissolution of iron from the negative material in pocket plate nickel-cadmium batteries. Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 15, p. 711...717 (1985).

[11] *Masahiko Oshitani, Yuko Sasaki* and *Koichiro Takashima:* Development of a Nickel-Electrode Having stable Performance of various Charge and Discharge Rates over a wide Temperature Range. Journal of Power Sources, Vol. 12, No. 3/4 (1984).