

# Ermittlung der optimalen Ladungserhaltungsspannung von Röhrchenbatterien

Autor(en): **Gerber, Theodor**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri**

Band (Jahr): **45 (1967)**

Heft 5

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-874876>

## **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.

# Ermittlung der optimalen Ladungserhaltungsspannung von Röhrenbatterien

Theodor GERBER, Bern

621.355.2.004

*Zusammenfassung. Die Untersuchungen betreffen stationäre Röhrenbatterien, die seit fünf Jahren unter gleichbleibenden äusseren Bedingungen bei konstanten Zellenspannungen von 2,15...2,40 V im Ladungserhaltebetrieb stehen. Die optimale Spannung wird unter Berücksichtigung phänomenologischer Kriterien durch Analyse des zeitlichen Verhaltens der Ladungserhalteströme ermittelt. Es zeigt sich, dass bei dieser Spannung keine Tiefentladungen nötig sind, um die Kapazität dauernd auf dem Höchstwert zu halten.*

## Détermination de la tension optimale de maintien de la charge de batteries à électrodes tubulaires

*Résumé. Les essais concernent des batteries stationnaires à électrodes tubulaires qui ont fonctionné pendant cinq ans sous les mêmes conditions extérieures, en service avec maintien de la charge, avec des tensions d'élément constantes de 2,15...2,40 V. La tension optimale est déterminée compte tenu de critères phénoménologiques, par analyse du comportement des courants de maintien de la charge. On constate qu'avec cette tension aucune décharge poussée n'est nécessaire pour maintenir la capacité à sa valeur supérieure.*

## Determinazione del valore ideale di tensione per il mantenimento della carica nelle batterie a elettrodi tubolari

*Riassunto. Le prove concernono batterie stazionarie a elettrodi tubolari che hanno funzionato durante 5 anni in condizioni esterne costanti, in servizio con mantenimento di carica e con tensioni d'elemento costanti di 2,15...2,40 V. Il valore ideale della tensione viene determinato, tenendo conto dei criteri fenomenologici, per analisi del comportamento nel tempo delle correnti di mantenimento della carica. Si accerta che con questa tensione non è necessario procedere alla scarica della batteria per mantenerne costantemente la capacità al suo valore massimo.*

## 1. Einleitung

Röhrenbatterien sind Bleiakumulatoren, deren positive Platten aus Röhren, die mit aktiver Masse gefüllt sind, bestehen. Die PTT-Betriebe verwenden derartige Batterien seit dem Jahre 1957, zuerst in Hauszentralen, später auch in Amtszentralen und Verstärkerämtern.

Mit dem Einsatz der Röhrenbatterien wurde die Frage nach der günstigsten Batterie- beziehungsweise Zellenspannung beim angewandten Schwebeladebetrieb erneut aktuell. Diese Frage war schon bei den herkömmlichen Grossoberflächen-Batterien eigentlich nie restlos und abschliessend beantwortet worden, trotz vieler diesbezüglicher Untersuchungen [1, 2, 3, 4]. Es wurde deshalb der Abteilung Forschung und Versuche die Aufgabe überbunden, durch systematische Laboratoriumsuntersuchungen die sich einstellenden Erfahrungen der Akkumulatorenbaufirmen und des Betriebes möglichst bald zu vervollständigen. Die Versuche gestatteten bereits, verbindliche Schlüsse zu ziehen [5]. Sie werden weitergeführt, und ein abschliessender Bericht ist für später vorgesehen.

## 2. Bemerkungen zur Terminologie

Die möglichen *Betriebsarten von Zentralenbatterien* sind von E. Müller in den Technischen Mitteilungen PTT eingehend beschrieben und kritisch beurteilt worden. Es sei deshalb auf die entsprechende Veröffentlichung verwiesen [6].

Wenn im folgenden von *Ladungserhaltebetrieb*, von *Ladungserhaltungsspannung* und *-strom* die Rede ist, so werden diese Begriffe im Bewusstsein verwendet, dass sie im allgemeinen nicht zutreffend sind. Sie dürften eigentlich nur für den Spezialfall verwendet werden, bei dem die Selbstentladung im Gleichgewicht mit der zur Ladungserhaltung notwendigen schwachen Aufladung steht. Wie aus den nachfolgend beschriebenen Versuchsbedingungen hervorgeht, handelt es sich dabei eigentlich um den *Konstantspannungsbetrieb* von Batterien, wobei Elektrolysen bei konstanten Spannungen stattfinden. Dementsprechend müssten etwa die Begriffe *Elektrolysespannung* statt Ladungserhaltungsspannung und *Spannungserhaltestrom* statt Ladungserhaltestrom verwendet werden. Nachdem nun feststeht, was gemeint ist, werden an Stelle der exakten, aber ungewohnten Wortzusammensetzungen die eingeführten Ausdrücke verwendet.

## 3. Aufgabestellung und Versuchsbedingungen

Die Versuche sollen folgende Fragen beantworten:

- Welches ist bei Röhrenbatterien die optimale Ladungserhaltungsspannung?
- Welcher Spannungsbereich kann dabei toleriert werden?
- Ist ein reiner Ladungserhaltebetrieb (ohne Tiefentladungen) ohne nachteilige Folgen statthaft?
- Welche Lebensdauer kann bei idealem Ladungserhaltebetrieb erwartet werden?

Die Versuche sollen ferner der vergleichenden Prüfung verschiedener Fabrikate dienen; aus naheliegenden Gründen wird hier nicht darauf eingegangen.

Insgesamt wurden 24 Röhrenbatterien mit antimonglegierten Gittern zu 6 V, somit 72 Zellen von je 20 Ah Nennkapazität eingesetzt, dazu noch 6 Einzelzellen von je 600 Ah, die aber nicht in diese Auswertungen einbezogen sind. Eine permanente Versuchsanlage (Fig. 1) gestattet, die gewünschten Bedingungen dauernd einzuhalten. Die Batterien sind einzeln an konstant gehaltene



Fig. 1 Versuchsanlage für den Betrieb von Akkumulatoren bei konstanten Zellenspannungen

Spannungen angeschlossen, wobei folgende Zellenspannungen gewählt wurden:

2,15 V    2,20 V    2,25 V    2,30 V    2,35 V    2,40 V  
Die Raumtemperatur wird auf 20° C gehalten.

Als einziger störender Eingriff muss die Erhöhung der Säuredichten von 2,20...2,21 g/cm<sup>3</sup> (anfängliche Vorschriften der Akkumulatorenfabriken) auf 2,24 g/cm<sup>3</sup> (maximal zulässiger Wert gemäss PTT-Pflichtenheft [7]) erwähnt werden. Diese Erhöhung wurde aber glücklicherweise schon ein Jahr nach Versuchsbeginn vorgenommen.

Periodisch werden folgende Daten festgehalten: Ladungserhaltungstrom, Wasserverbrauch, Kapazität (jährlich im allgemeinen eine Bestimmung), Säuredichte, -temperatur, -verunreinigung sowie das Plattenwachstum, soweit dies von aussen her messtechnisch erfassbar ist. Zellen, die nur noch die halbe Nennkapazität besitzen, werden demontiert.

Bei Niederschrift dieser Veröffentlichung liefen die Versuche fünf Jahre (Versuchsbeginn Sommer 1961).

#### 4. Versuchsergebnisse

##### 4.1 Vorbemerkung

Die hier mitgeteilten Ergebnisse stellen Mittelwerte mehrerer Fabrikate dar. Sie liefern somit nur allgemeine Angaben über das Verhalten von handelsüblichen Batterien beim Ladungserhaltungsbetrieb. Es wäre deshalb fehl am Platz, diese Ergebnisse ohne weiteres auf ein bestimmtes Fabrikat übertragen zu wollen.

Ursachen und Bedeutung der festgestellten Erscheinungen können im Rahmen dieser Abhandlung nur am Rande gestreift werden. Es ist deshalb jeweils auf die Fachliteratur verwiesen.

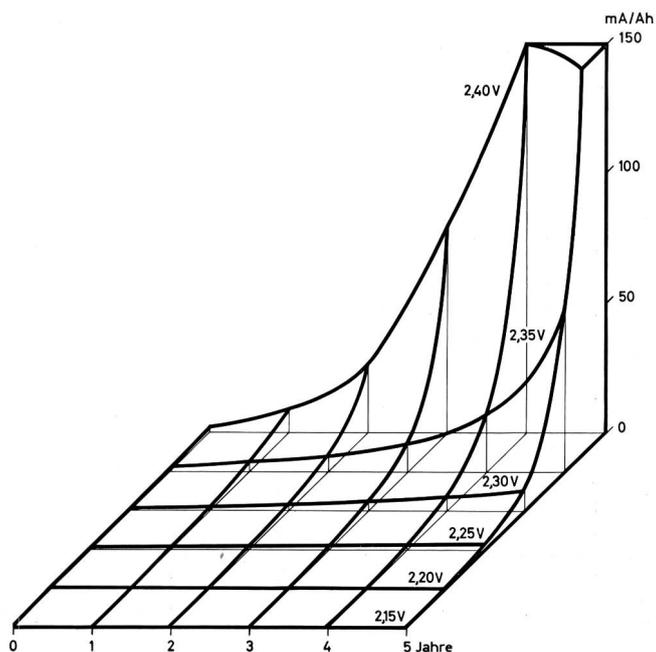


Fig. 2 Verlauf der Ladungserhaltungströme in Abhängigkeit von Zellenspannung und Batteriealter

##### 4.2 Ladungserhaltungströme

In Fig. 2 ist der Verlauf der Ladungserhaltungströme in Abhängigkeit von Zellenspannung und Batteriealter dargestellt. Die Ströme sind auf den Kapazitätswert von 1 Ah bezogen, wobei nicht die Nennkapazitäten, sondern die jeweils gemessenen effektiven Kapazitäten herangezogen wurden.

Die Zunahme des Stromes mit der Spannung und dem Alter (als Folge der sogenannten Antimonvergiftung [8, 9]) manifestiert sich deutlich im dargestellten «Stromberg». Nicht ersichtlich ist, dass sich die Ströme im Verlauf des ersten halben Jahres gewissermassen einstellten, wobei der Neustrom meistens auf ein Minimum sank und erst dann endgültig zunahm. Es verdient festgehalten zu werden, dass bei Zellenspannungen von 2,30 V und mehr die Ströme im Verlauf von fünf Jahren besonders stark zunehmen. In der Tabelle I sind die wichtigsten Werte zusammengestellt.

Tabelle I. Ladungserhaltungströme

Zellenspannung V	Ladungserhaltungströme in mA/Ah nach Ablauf von				
	1 Jahr	2 Jahren	3 Jahren	4 Jahren	5 Jahren
2,15	0,27	0,48	0,72	0,77	—
2,20	0,50	0,70	0,80	0,88	0,95
2,25	1,0	1,5	1,7	1,9	2,0
2,30	2,2	3,5	4,3	5,9	7,9
2,35	4,5	8,1	11	18	65
2,40	9,5	25	80	150	—

Bereits eine nicht sehr eingehende Beurteilung dieser Stromwerte zeigt, dass offenbar eine Ladungserhaltungsspannung von 2,25 V nicht wesentlich überschritten werden sollte, damit ein schonender Betrieb der Batterien gewährleistet ist.

##### 4.3 Wasserverbrauch

Der Wasserverbrauch, der wegen der stattfindenden Elektrolyse fast nur vom Ladungserhaltungstrom abhängt, zeigt praktisch denselben Verlauf wie in Figur 2 dargestellt: an Stelle des höchsten Ordinatenwertes 150 mA/Ah muss nur der Wert 250 cm<sup>3</sup>/Ah eingesetzt werden, damit aus der Figur der ungefähre jährliche Wasserverbrauch je Zelle herausgelesen werden kann. Genauere Werte können der Tabelle II entnommen werden (im ersten Jahr keine Messungen).

Die Folgerungen bezüglich der nicht zu überschreitenden Spannung sind dieselben wie bei den Ladungserhaltungströmen.

Tabelle II. Wasserverbrauch

Zellenspannung V	Wasserverbrauch in cm <sup>3</sup> /Ah je Zelle und Jahr			
	2. Jahr	3. Jahr	4. Jahr	5. Jahr
2,15	3	3,5	4,0	—
2,20	4	4	4,5	4,5
2,25	5	5	5,5	6
2,30	8	10	15	20
2,35	15	30	50	140
2,40	50	120	250	—

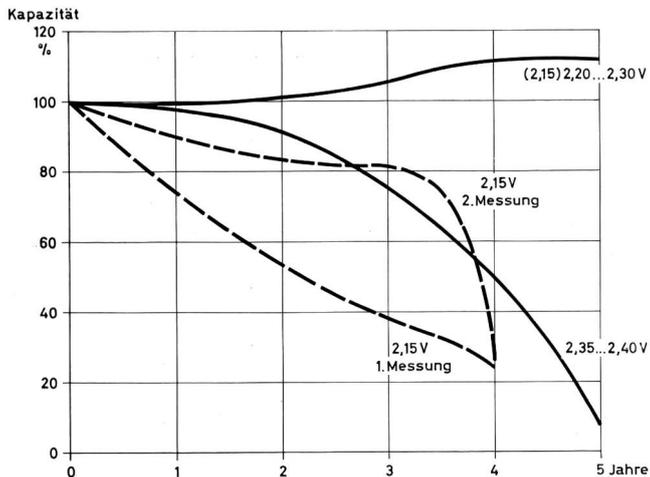


Fig. 3  
Kapazitätsverlauf bei verschiedenen Zellenspannungen

#### 4.4 Kapazitätsverlauf

Die jährlichen Kapazitätsproben wurden mit dem 10stündigen Nennentladestrom durchgeführt. Die Kapazitäten sind auf eine Säuretemperatur von 20° C bezogen. Wie aus Fig. 3 ersichtlich ist, ergeben sich drei Fälle:

**Zellenspannung 2,15 V:** Die Kapazitäten nehmen bei den meisten Batterien stark ab (untere gestrichelte Kurve, 1. Messung). In diesen Fällen wurden, selbstverständlich nach vollständiger Wiederaufladung der betreffenden Batterien, die Kapazitätsproben wiederholt. Die dabei erhaltenen Werte liegen während dreier Jahre noch oberhalb 80% des Neuwertes (obere gestrichelte Kurve, 2. Messung). Die durch die erste Kapazitätsprobe erfolgte Tiefentladung bewirkt somit eine vorübergehende Gesundung dieser Batterien. Andere Exemplare zeigten allerdings auch bei 2,15 V keine Kapazitätseinbußen (s. eingeklammerte Spannung 2,15 V bei der obersten ausgezogenen Kurve). Man könnte für derartige Batterien die Bezeichnung «Tiefspannungsbatterien» prägen.

**Zellenspannung 2,20...2,30 V:** Die Batterien sind bezüglich Kapazität völlig in Ordnung (oberste Kurve der Figur 3). Nach fünf Jahren scheint nun das Kapazitätsmaximum erreicht zu sein.

**Zellenspannung 2,35...2,40 V:** Schon bald tritt Kapazitätsabfall ein. Nach 4...5 Jahren sind die Batterien unbrauchbar (ausgezogene abfallende Kurve.)

Der günstigste Spannungsbereich liegt auf Grund dieser Feststellungen eindeutig zwischen 2,20...2,30 V.

#### 4.5 Batterieinnenwiderstände

Die Innenwiderstände nehmen im Laufe der Zeit etwas ab, und zwar innerhalb von fünf Jahren höchstens um 5% bei Zellenspannungen von 2,15...2,20 V, höchstens um 15% bei 2,25...2,30 V und höchstens um 25% bei 2,35...2,40 V. Allzu grosse Abnahme ist ein Zeichen der Alterung (zunehmende Porosität der negativen Platten, Aufspaltung von positiven Masseteilchen, Durchformation usw).

#### 4.6 Plattenwachstum

Interessehalber wurde vom vierten Versuchsjahr an das Aufstossen der positiven Anschlusszapfen durch Messungen erfasst. Die für das vierte und fünfte Jahr zusammengezogenen Werte betragen:

- bei 2,15...2,20 V: 0,2...0,4 mm
- bei 2,25...2,30 V: 0,5...1,0 mm
- bei 2,35...2,40 V: 1,6 mm und mehr.

Bei der Zellenspannung von 2,25 V kann das Plattenwachstum noch als mässig beurteilt werden.

#### 4.7 Säureuntersuchung

Vorläufig wird nur der Gehalt an Perchlorsäure ( $\text{HClO}_4$ ) regelmässig bestimmt. Diese bildet sich, wenn der bei der Elektrolyse entstehende naszierende Sauerstoff das Polyvinylchlorid der Röhren und Separatoren angreifen kann. Fig. 4 zeigt die Perchlorsäurezunahme im Laufe der Zeit. Oberhalb 2,20 V verläuft sie vorerst ziemlich rasch. Das asymptotische Auslaufen der Kurven zeigt, dass mit der Zeit alles umsetzbare Chlor oxydiert wird. Da die Perchlorsäure wie jede andere Verunreinigung die Korrosionsvorgänge an den Platten beschleunigt, dürfte es zweckmässig sein, die Akkumulatorensäure von im Betrieb stehenden Batterien zu ersetzen, wenn der Perchlorsäuregehalt eine gewisse Grenze überschritten hat.

#### 4.8 Feststellungen an demontierten Zellen

Negative Platten aus Batterien, die bei 2,15 V betrieben wurden und nach vier Jahren nur noch einen kleinen Bruchteil der Anfangskapazität besaßen, sind sulfatiert. Bei Spannungen von 2,30 V und mehr korrodieren die Bleiseelen der positiven Platten bereits merklich, ferner treten die ersten Schäden an den Röhren auf. Bei noch höheren Spannungen sind die Zerstörungen schon nach drei bis vier Jahren so stark, dass die Batterien ausfallen. Parallel zu den mechanischen Schäden nimmt die Schlammablagerung zu; sie erreicht dabei eine Höhe von 10 bis 20 mm.

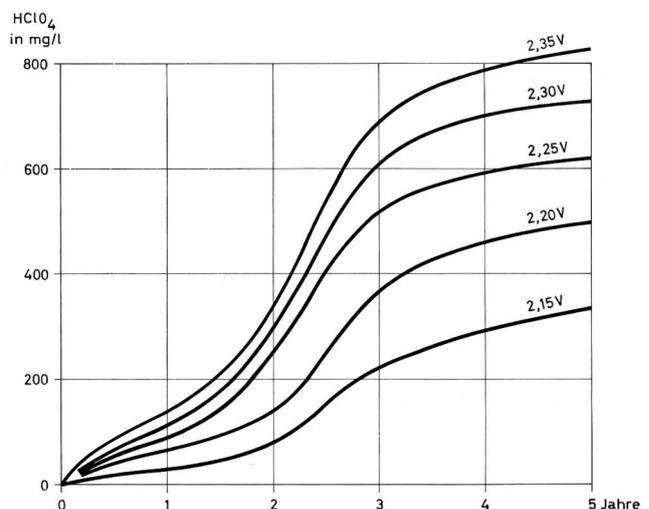


Fig. 4  
Bildung von Perchlorsäure in Abhängigkeit von Zellenspannung und Batteriealter

## 5. Ermittlung der optimalen Ladungserhaltungsspannung

### 5.1 Phänomenologische Kriterien

Die im Abschnitt 4 zusammengestellten Versuchsergebnisse liefern grundsätzlich die Kriterien, nach denen der optimale Wert der Ladungserhaltungsspannung sowie ihr zulässiger Bereich festgelegt werden müssen. In der *Tabelle III* sind diese Kriterien zu-

**Tabelle III. Phänomenologische Kriterien zur Ermittlung des günstigsten Bereichs der Ladungserhaltungsspannung**

Kriterium	Günstiger Spannungsbereich	
	Minimum	Maximum
Ladungserhalteströme (Abschnitt 4.2)	—	2,25 V
Wasserverbrauch (Abschnitt 4.3)	—	2,25 V
Kapazitätsverlauf (Abschnitt 4.4)	2,20 V	2,30 V
Batterieinnenwiderstände (Abschnitt 4.5)	—	2,25 V
Plattenwachstum (Abschnitt 4.6)	—	2,25 V
Perchlorsäure-Bildung (Abschnitt 4.7)	—	2,20 V
Zustand der Platten (Abschnitt 4.8)	2,20 V	2,25 V

sammengefasst, wobei gleichzeitig die Spannungsgrenzen angegeben sind, bei denen noch keine nachteiligen Erscheinungen festgestellt werden können. Es geht daraus hervor, dass nur der Bereich 2,20...2,25 V in Frage kommt. Da alle Versuchsbatterien, das heisst auch alle Fabrikate, bei 2,20 V nicht die geringsten Unzulänglichkeiten aufweisen, dürfte die optimale Ladungserhaltungsspannung näher bei 2,20 V als bei 2,25 V liegen. Dies wird durch die nachfolgenden Auswerteverfahren bestätigt.

### 5.2 Vorbemerkungen zu den analytischen Auswerteverfahren

Letztlich manifestiert sich eine nicht optimale Ladungserhaltungsspannung im Kapazitätsverhalten und somit in der Lebensdauer einer Batterie. Bei diesbezüglichen Versuchen sind jedoch möglichst frühzeitige Ergebnisse erwünscht, ohne den endgültigen Kapazitätsabfall abwarten zu müssen. Nachfolgend wird gezeigt, dass dies durch Analyse des Verhaltens der Ladungserhalteströme möglich ist. Diese liefert bereits nach 1- bis 2jähriger Versuchsdauer genaue und objektive Werte der optimalen Ladungserhaltungsspannung.

### 5.3 Verlauf der relativen Ladungserhalteströme

Der in *Figur 2* dargestellte «Stromberg» veranschaulicht, wie die Absolutwerte der Ladungserhalteströme mit zunehmender Spannung – je nach Alter der Batterie – verschieden rasch ansteigen. Interessanterweise verhalten sich aber die im folgenden definierten *relativen Ladungserhalteströme* anders. Es sei

$$I_{r,0} = \frac{I_n}{I_0}$$

Dabei bedeuten:

$I_{r,0}$  = relativer Ladungserhaltestrom (für eine bestimmte Zellenspannung)

$I_n$  = Ladungserhaltestrom im n-ten Jahr, bei einer bestimmten Zellenspannung gemessen

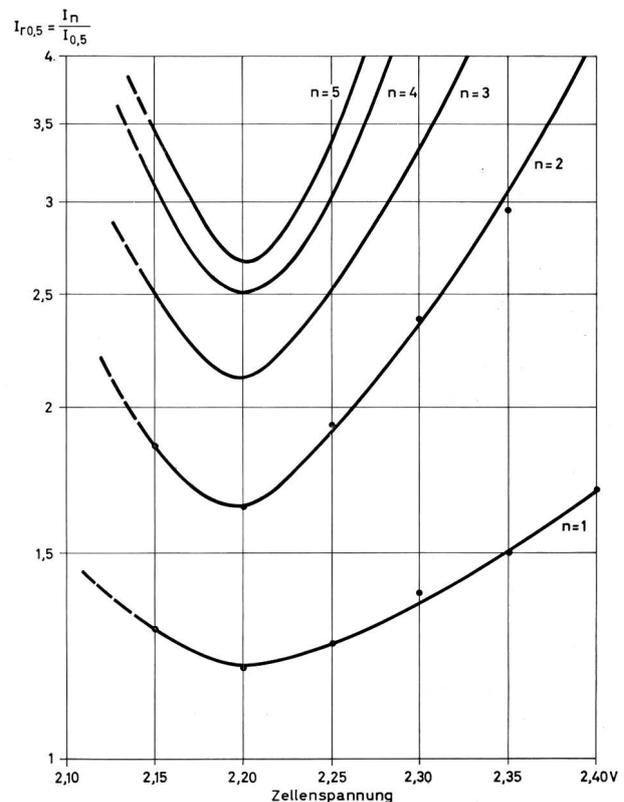
$I_0$  = Anfangswert des Ladungserhaltestromes im Jahre 0, das heisst bei Versuchsbeginn, bei derselben Zellenspannung wie  $I_n$  gemessen.

Aus der *Figur 5* geht deutlich hervor, dass diese relativen Ströme einer parabelähnlichen Kurvenschar mit dem Batteriealter als Parameter folgen. Sie weisen ausgeprägte Minima auf, die ziemlich genau bei der Zellenspannung 2,20 V liegen. Bei dieser Spannung verlaufen offensichtlich die Korrosion der positiven Platten und die Antimonabscheidung auf den negativen Platten am langsamsten. Diese Minimalspannung ist, wie im Abschnitt 5.5 noch kurz begründet wird, zugleich die optimale Ladungserhaltungsspannung.

Für die Berechnung der in *Figur 5* dargestellten Kurvenschar wurden nicht die Anfangswerte  $I_0$ , sondern die Werte  $I_{0,5}$  benützt, da sich die Ladungserhalteströme erst nach einem halben Jahr normal verhielten (s. Abschnitt 4.2). Selbstverständlich ändern sich der Charakter der Kurvenschar und die Lage ihrer Extremwerte grundsätzlich nicht, wenn für diese Berechnung als Divisor nicht  $I_0$  (oder  $I_{0,5}$  wie hier), sondern ganz allgemein  $I_x$  mit  $0 \leq x \leq n$  verwendet wird. (Die Kurvenschar verläuft bei  $x = n$  spiegelbildlich mit Maxima an Stelle der Minima.) Ferner bleibt der charakteristische Kurvenverlauf auch erhalten, wenn an Stelle der logarithmischen Ordinaten die lineare gewählt wird.

### 5.4 Zuwachsraten der Ladungserhalteströme

Ebenfalls interessante und eindeutige Ergebnisse liefert das folgende Auswerteverfahren, das sich der sogenannten Zuwachs-



**Fig. 5** Verlauf der relativen Ladungserhalteströme  $I_r$  für verschiedene Batteriealter  $n$  in Jahren

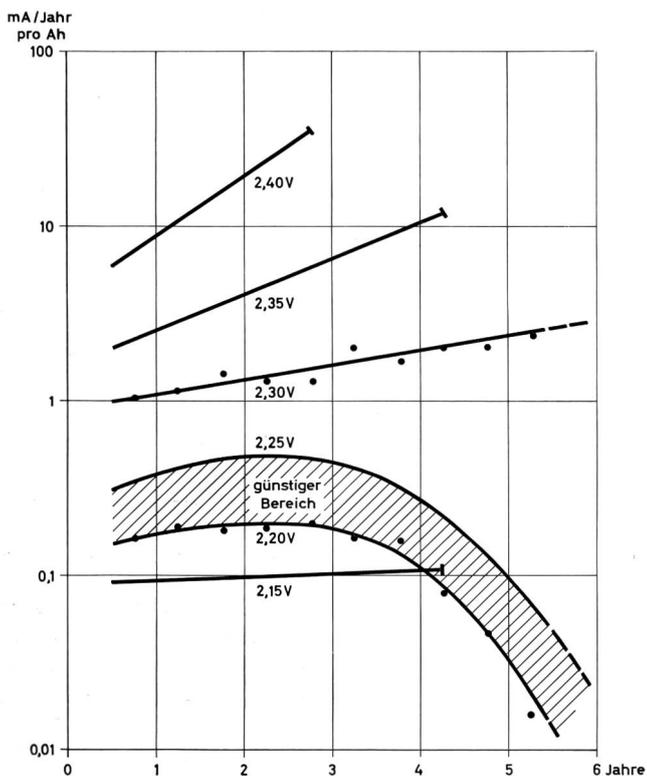


Fig. 6  
Jährliche Zuwachsraten  $I'$  der Ladungserhaltströme für verschiedene Zellenspannungen (mA je Jahr und Ah)

raten der Ladungserhaltströme bedient. Als Zuwachsrate wird der partielle Differentialquotient der Ströme nach der Zeit definiert:

$$I' = \frac{\partial I}{\partial t}$$

Dabei bedeuten:

$I'$  = zeitliche Stromänderung («Zuwachsrate») bei gleich bleibender Ladungserhaltungsspannung

$I$  = Ladungserhaltstrom in Abhängigkeit des Batteriealters

$t$  = Zeit (Batteriealter beziehungsweise Versuchsdauer).

Figur 6 veranschaulicht den Verlauf der Zuwachsraten. Die Ordinatenwerte  $I'$  geben die Stromänderung in mA je Jahr an, bezogen auf die Anfangskapazität von 1 Ah. Die Berechnung wurde mittels den Differenzenquotienten  $\Delta I / \Delta t$  mit  $\Delta t = 0,5$  Jahre durchgeführt.

In dieser Darstellung bedeuten ansteigende Geraden exponentiell zunehmende Zuwachsraten, horizontale Geraden konstante Zuwachsraten und abfallende Geraden dementsprechend exponentiell abnehmende Zuwachsraten. Bei  $I' = 0$  würden die Ladeerhaltströme konstant bleiben, was hier jedoch nicht eintritt.

Aus Figur 6 ist ersichtlich, dass bei Zellenspannungen oberhalb 2,30 V sowie, was besonders vermerkt sei, auch bei 2,15 V, die Batterien in einem kritischen Zustand sind (exponentielle Stromzunahmen, wobei bei den höheren Spannungen die Zuwachsraten an und für sich schon sehr gross sind). Die Lebensdauern sind

dementsprechend kurz, was durch die abgebrochenen Geraden bei den erwähnten Zellenspannungen verdeutlicht wird. Es ist mit grosser Wahrscheinlichkeit zu erwarten, dass als nächste die 2,30-V-Gerade abbrechen wird, das heisst, die mit 2,30 V betriebenen Batterien ausfallen werden.

Der Bereich zwischen 2,20 V und 2,25 V nimmt eindeutig eine Sonderstellung ein. Der Stromzuwachs steigt zwar in den ersten zwei Jahren ebenfalls nahezu exponentiell an, wird später aber sehr viel kleiner, so dass sich die entsprechenden Ladungserhaltströme ihren Grenzwerten nähern. Diese sich anbahnende Stabilisierung der Ströme darf als zuverlässiges Indiz für eine lange Lebensdauer der so betriebenen Batterien betrachtet werden.

Hier nicht besprochene individuelle Auswertungen für die einzelnen Batteriefabrikate führen zu interessanten Ergebnissen, die den Aussagewert dieser Methode in eindeutiger Weise bestätigen. So steigt zum Beispiel die Kurve bei der im Abschnitt 4.4 erwähnten «Tiefspannungsbatterie» bei 2,15 V nicht an, wie dies in Figur 6 für den Mittelwert aller Fabrikate der Fall ist, sondern fällt bereits nach einem Jahr ab, gleich wie die Hüllkurven des allgemein günstigen Bereichs.

### 5.5 Kommentar zu den analytischen Auswerteverfahren

Die Analysen des Verhaltens der Ladungserhaltströme führen zu Ergebnissen, die die phänomenologischen Befunde nicht nur bestätigen, sondern an Aussagewert übertreffen. Abgesehen davon, dass sie frei sind von subjektiven Beurteilungen, liefern sie schon nach verhältnismässig kurzer Versuchszeit verbindliche Ergebnisse. Als weitere Perspektive eröffnet sich die Möglichkeit, analoge Untersuchungen auch an im Betrieb stehenden Batterien zur Beurteilung ihres Zustandes durchzuführen. Allerdings müsste dabei vorausgesetzt werden, dass gewisse Mindestforderungen bezüglich Spannungs- und Temperaturkonstanz erfüllt sind.

Untersuchungen über die anodische Oxydation von Blei in Schwefelsäure zeigen, dass bei konstantem Potential der zeitliche Verlauf des Korrosionsstromes in charakteristischer Weise von den Korrosionsvorgängen abhängt. Es bilden sich Korrosionsschichten verschiedener chemischer Zusammensetzung. Bei einem bestimmten Potential wird der Korrosionsstrom minimal, somit ebenfalls die Korrosionsvorgänge [10, 11, 12]. Der Verlauf der relativen Ladungserhaltströme gemäss Figur 5 von Batterien, die im Konstantspannungsbetrieb stehen, ist eine dazu analoge Erscheinung. Bei minimaler Antimonvergiftung ist der relative Ladungserhaltstrom am kleinsten; die zugehörige entsprechende Spannung ist die optimale Ladungserhaltungsspannung.

### 6. Schlussfolgerungen

Die im Abschnitt 3 aufgeworfenen Fragen können auf Grund der Laboratoriumsversuche, die einen Zeitraum von fünf Jahren umfassen, wie folgt beantwortet werden:

- Die *theoretisch optimale Ladungserhaltungsspannung*, die gleichbedeutend mit der *Minimalspannung* des zulässigen Spannungsbereiches ist, beträgt im Durchschnitt für die untersuchten Batteriefabrikate ziemlich genau 2,20 V. Obschon individuelle Unterschiede zwischen den Fabrikaten bestehen, erweist sich diese Spannung in keinem Fall als zu tief.

Schluss siehe Seite 293