

Dipl.-Ing. Christoph Siedle, Freiburg

**Vergleichende Untersuchung  
von Ladungsausgleichsein-  
richtungen zur Verbesserung  
des Langzeitverhaltens viel-  
zelliger Batteriebanken**

Reihe **21**: Elektrotechnik

Nr. **245**

# Inhaltsverzeichnis

Dank.....	III
Inhaltsverzeichnis .....	V
Formelzeichen, Abkürzungen und Begriffe.....	VIII
Einleitung .....	1
Gliederung.....	3
<b>1 Einzelzellen und Zellverbände.....</b>	<b>4</b>
1.1 Elektrochemische Vorgänge in der Einzelzelle .....	4
1.1.1 Prinzipielle Funktion .....	4
1.1.1.1 Die Hauptreaktionen .....	4
1.1.1.2 Die Nebenreaktionen .....	5
1.1.1.3 Der interne Sauerstoffzyklus bei verschlossenen Akkumulatoren .....	7
1.1.2 Lademethoden.....	10
1.1.2.1 Ladung mit konstantem Strom (I-Kennlinie).....	10
1.1.2.2 Ladung mit konstanter Spannung (U-Kennlinie).....	10
1.1.2.3 Ladung mit fallender Kennlinie (W-Kennlinie) .....	12
1.1.2.4 Zusammengesetzte Ladekennlinien .....	12
1.1.2.5 Besonderheiten beim Betrieb in regenerativen Energiesystemen .....	14
1.1.2.6 Verallgemeinerte Ladekennlinie .....	14
1.1.3 Kriterien für den Entladeschluß.....	16
1.2 Reihenschaltung von Einzelzellen .....	17
1.2.1 Betriebserfahrungen .....	19
1.2.2 Ladezustandsangleichung durch Vollladung aller Zellen .....	20
1.2.2.1 Gasungsladung .....	20
1.2.2.2 Schaltungstechnische Maßnahmen .....	21
1.2.2.2.1 Ladezustandsangleichung mittels Parallelwiderständen.....	21
1.2.2.2.2 Ladezustandsangleichung durch zusätzliche Ladung einzelner Zellen .....	22
1.2.2.2.3 Ladezustandsangleichung durch unabhängiges Laden der einzelnen Zellen .....	24
1.3 Parallelschaltung von Einzelzellen .....	24
1.3.1 Entladevorgang .....	25
1.3.2 Ladevorgang .....	25
1.3.2.1 Ladung mit eingprägter Spannung .....	26
1.3.2.2 Ladung mit eingprägtem Strom .....	29
1.3.2.2.1 Stromaufteilung bei Kapazitätsunterschieden .....	30
1.3.2.2.2 Stromaufteilung bei abweichender Wasserstoffüberspannung ...	31
1.3.2.2.3 Stromaufteilung bei Temperaturdifferenzen.....	33
1.3.2.2.3.1 Stationäre Batterie: Schwache thermische Kopplung bei guter Kühlung .....	35
1.3.2.2.3.2 Traktionsbatterie: Gute thermische Kopplung bei schwacher Kühlung.....	39
1.3.2.3 Konsequenzen für die Ladekennlinien.....	43
1.3.3 Probleme bei Ausfall von Zellen .....	43
1.4 Kapazitätsausnutzung bei Reihen- und Parallelschaltung .....	44

<b>2 Ladungsausgleich als virtuelle Parallelschaltung.....</b>	<b>48</b>
2.1 Prinzip.....	48
2.1.1 Virtuelle Parallelschaltung.....	50
2.1.2 Virtuelle Kettenschaltung .....	51
2.2 Erforderliche Ausgleichströme .....	51
2.2.1 Ladeerhaltungsbetrieb (USV) .....	59
2.2.2 „Solartypischer“ Betrieb .....	60
2.2.3 Traktionsanwendungen .....	61
<b>3 Schaltungstechnische Realisierungsmöglichkeiten .....</b>	<b>62</b>
3.1 Systeme mit Multiplexern.....	62
3.2 Verkopplung durch geschaltete Kondensatoren (C-CHEQ).....	65
3.3 Transformatorische Verkopplung (T-CHEQ).....	68
3.4 Verkopplung mittels DC/DC-Wandlern (L-CHEQ).....	70
<b>4 Betriebserfahrungen .....</b>	<b>74</b>
4.1 Laboruntersuchung an geschlossenen Batterien .....	74
4.2 Langzeituntersuchung an einer verschlossenen Traktionsbatterie im Vergleich zu einem konventionell betriebenen System und einem System mit Einzelzellen- bzw. Einzelblocküberwachung und individueller Nachladung .....	76
4.2.1 Systembeschreibung .....	76
4.2.1.1 Batterie.....	76
4.2.1.2 Lade-/Entladezyklus .....	79
4.2.2 Verhalten einzelner Zellen bzw. Blöcke bei abweichenden Parametern .....	85
4.2.2.1 Ladezustand .....	85
4.2.2.2 Kapazität .....	86
4.2.2.3 Temperatur.....	89
4.2.3 Verhalten einzelner Zellen innerhalb eines Blocks .....	90
4.2.4 Nutzbarkeit der verfügbaren Kapazität.....	91
4.2.5 Ladungs- und Energiebilanz .....	92
4.3 Solartypischer Zyklenbetrieb einer vielzelligen verschlossenen Batterie.....	95
4.4 Photovoltaiksysteme Rotwandhaus und Brunnenbach .....	100
4.5 Weitere Installationen .....	102
<b>5 Konsequenzen für die Betriebsführung .....</b>	<b>104</b>
5.1 Ladung .....	104
5.1.1 Besonderheiten beim Ladungsausgleich zwischen verschlossenen Zellen.....	105
5.2 Entladung .....	107
<b>6 Investitionsrechnung .....</b>	<b>108</b>
6.1 Kapitalwertmodell .....	108
6.2 Anwendungsbeispiele .....	111
6.2.1 Fahrzeugbatterie.....	111
6.2.2 Stationäres Hybridsystem .....	112
6.3 Abschätzung.....	113
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>116</b>

<b>Anhang .....</b>	<b>118</b>
Kurzbeschreibung C-CHEQ Typ A .....	118
Kurzbeschreibung C-CHEQ Typ B .....	119
Kurzbeschreibung T-CHEQ .....	120
Kurzbeschreibung L-CHEQ.....	121
Kurzbeschreibung L-CHEQ mit gemeinsamem Energiebus .....	122
Kurzbeschreibung BADICHEQ.....	123
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>124</b>