

# **Photovoltaische Stromversorgungsanlagen mit Bleibatteriespeichern**

**- Analyse der Grundprobleme, Verbesserung der Anlagentechnik,  
Entwicklung eines Simulationsmodells für die Batterie -**

Von der Fakultät Elektrotechnik der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

**Gerhard Saupe**

aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. G. Lehner

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. R. Lauber

Tag der mündlichen Prüfung: 6. Juli 1993

Institut für Theorie der Elektrotechnik  
der Universität Stuttgart

1993

## Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	15
1.1	Bemerkungen zu photovoltaischen Inselanlagen und Abgrenzung des Themas	15
1.2	Speichertechnologien für Inselsysteme	18
1.2.1	Übersicht über die Speichertechnologien für Inselsysteme	19
1.2.2	Elektrochemische Speicher	20
1.3	Praktische Erfahrungen mit den Batterien bestehender PV-Inselanlagen	22
2	Der Bleiakкумуляtor - Aufbau, Wirkungsweise und Betriebsverhalten	23
2.1	Begriffsdefinitionen und Kenndaten zur Bleibatterie	24
2.2	Elektrochemisches Funktionsprinzip	28
2.2.1	Der Aufbau eines Bleiakкумуляtors	28
2.2.2	Die Grundreaktionen	29
2.2.3	Die Nebenreaktionen	31
2.2.4	Physikalische Vorgänge an den Elektroden	34
2.2.5	Der Aufbau der Klemmenspannung	35
2.2.5.1	Die Gleichgewichtsspannung	35
2.2.5.2	Die Überspannungen	36
2.2.5.3	Zur Dynamik der Konzentrationsüberspannung	39
2.2.5.4	Die Asymmetrie des Bleiakкумуляtors beim Laden und Entladen	42
2.3	Nichtideales Verhalten von Bleiakкумуляtoren im praktischen Betrieb	43
2.3.1	Aufbau einer Elektrolytschichtung	43
2.3.2	Reversible Strukturveränderung der aktiven Massen	44
2.3.3	Alterung	45
2.3.3.1	Symptome und Mechanismen	45
2.3.3.2	Alterung aufgrund von Falschbehandlung	46
2.3.3.3	Unvermeidliche Alterung	48
3	Einrichtungen und Methoden der experimentellen Untersuchungen	49
3.1	Batterieuntersuchungen am Laborprüfstand	49
3.2	Praktischer Betrieb photovoltaischer Inselanlagen mit Bleibatteriespeichern	50
3.3	Numerische Simulation	54
4	Einige typische Probleme von Bleibatterien in photovoltaischen Stromversorgungsanlagen	55
4.1	Ungünstiger Ladezustandsverlauf	55
4.2	Die Schwierigkeit der Batterieladung in Solaranlagen	56
4.3	Tiefentladungen	58
4.4	Ungleiches Verhalten von Einzelzellen im Batterieverbund	59
4.5	Energieverluste beim Betrieb der Batterie	60
4.6	Austrag von Wasser und Schwefelsäure	60
4.7	Umweltbelange	62
4.8	Kosten	65

5	Technologische Verbesserung der eingesetzten Batterien	66
5.1	Abgasrekombination	66
5.2	Mechanische Elektrolytumwälzung	68
5.3	Konstruktive und technologische Veränderungen	69
5.4	Reduzierung des Materialaufwandes durch richtige Typauswahl	71
6	Erfassung des inneren Zustandes von Bleibatterien	73
6.1	Möglichkeiten zur Ladezustandsbestimmung aus verschiedenen Meßgrößen	74
6.1.1	Auswertung der Säuredichte im äußeren Elektrolytraum	74
6.1.2	Auswertung der Ruhespannung	76
6.1.3	Auswertung des Abgasstroms und seiner Zusammensetzung	77
6.2	Indirekte Erfassung des Lade- und des Alterungszustands	79
6.2.1	Erkennung des Volladestands aus der Zeitableitung der Klemmengrößen	79
6.2.2	Ladungsbilanzierung auf der Basis integrierender Ladezustandsmodelle	80
6.2.3	Erkennung der Tiefentladung aus den momentanen Klemmengrößen mit Hilfe von Einfachstmodellen	81
6.2.4	Schätzung des Ladegrads auf der Basis der momentanen Klemmengrößen mit Hilfe von weiterentwickelten Modellen	85
6.2.5	Übersicht über verschiedene weitere Verfahren	86
6.3	Ladezustandsbestimmung in Feldanlagen (zusammenfassende Bewertung)	88
7	Die Betriebsführung von Bleibatterien in photovoltaischen Stromversorgungsanlagen	88
7.1	Marktübliche Laderegler	89
7.2	Verbesserte Betriebsführung von Bleibatterien in Solaranlagen	90
7.2.1	Verbesserte Laderegelung	91
7.2.2	Gewährleistung von Volladung, Gasungs- und Ausgleichsladungen durch die sog. "Gasungsfunktion"	92
7.2.3	Verbesserte Entlade- bzw. Lastregelung	93
8	Numerische Simulation photovoltaischer Stromversorgungsanlagen mit Bleibatterie-Speicher	95
8.1	Auslegungsrechnung	95
8.2	Betriebsüberwachung von PV-Inselanlagen einschließlich der Batterien	96
8.3	Mathematische Modellierung von Bleibatterien im Solarbetrieb	97
8.3.1	Teilaufgaben eines Batteriemodells	98
8.3.2	Modelle mit festen Parametern und parameteradaptive Modelle als zwei Typen von Batteriemodellen	99
8.3.3	Schwierigkeiten aufgrund der Batterieeigenschaften	100
8.3.4	Konsequenzen für die Methodik der Modellierung	102
8.3.4.1	Struktur eines Solarbatterie-Modells	102
8.3.4.2	Parametrisierung eines Solarbatterie-Modells	103
8.3.5	Diskussion von Modellen aus der Literatur	104

