

INHALTSVERZEICHNIS

KAPITEL 1	EINLEITUNG	1
1.1	MOTIVATION	1
1.2	VORGEHENSWEISE	2
KAPITEL 2	HYBRID- UND ELEKTROFAHRZEUGE.....	5
2.1	HYBRID- UND ELEKTROFAHRZEUGKONZEPTE	5
2.2	SPEICHERSYSTEME FÜR ELEKTRO- UND HYBRIDFAHRZEUGE	9
2.3	NETZINTEGRATION VON ELEKTRO- UND HYBRIDFAHRZEUGEN	12
KAPITEL 3	LITHIUM-IONEN AKKUMULATOREN.....	15
3.1	DEFINITION DER ZUSTANDSGRÖßEN SoC, SoH, SoF, SoA	15
3.1.1	State of Charge (SoC).....	17
3.1.2	State of Health (SoH).....	19
3.1.3	State of Function (SoF).....	22
3.2	FUNKTIONSPRINZIP EINER LITHIUM-IONEN ZELLE	23
3.3	AUFBAU UND KOMPONENTEN EINER LITHIUM-IONEN ZELLE	26
3.3.1	Negative Elektrode	27
3.3.2	Positive Elektrode	29
3.3.3	Stromableiter, Separator und Elektrolyt	31
3.3.4	Der Solid-Elektrolyte-Interface und seine Bedeutung	32
3.4	EXPERIMENTELLE VERSUCHSUMGEBUNG	34
3.5	ELEKTRISCHES VERHALTEN.....	40
3.5.1	Ruhespannung.....	41
3.5.2	Überspannungen	43
3.5.3	Innenwiderstands-, Kapazitäts- und Entladeverhalten.....	46
KAPITEL 4	DEGRADATION	53
4.1	THEORETISCHE BETRACHTUNG DER ALTERUNGSMECHANISMEN IN LITHIUM-IONEN ZELLEN	54
4.1.1	Alterungsmechanismen der negativen Elektrode (Li_yC_6).....	54
4.1.1.1	Lithium-Verlust auf der negativen Elektrode.....	55
4.1.1.2	Volumenänderung der negativen Elektrode	57
4.1.1.3	Weitere Alterungsmechanismen an der negativen Elektrode.....	58
4.1.2	Alterungsmechanismen der positiven Elektrode ($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$).....	59
4.1.2.1	Kontaktverlust an der positiven Elektrode	59
4.1.2.2	Formierung eines Oberflächenfilms	60
4.1.2.3	Weitere Alterungsmechanismen der positiven Elektrode	61

4.1.3	Zusammenfassung der Alterungsmechanismen.....	61
4.2	EXPERIMENTELLE DEGRADATIONSUNTERSUCHUNGEN.....	63
4.2.1	Kalendarische Alterung	63
4.2.2	Zyklische Alterung	72
KAPITEL 5	ZUSTANDSBESTIMMUNG UND MODELLIERUNG VON	
	LITHIUM-IONEN BATTERIEN	79
5.1	ZUSTANDSBESTIMMUNG IM FAHRZEUG.....	81
5.1.1	SoA-Abschätzung	82
5.1.2	SoC-Abschätzung	82
5.1.3	SoH _C -Abschätzung	85
5.1.4	SoH _{IR} -Abschätzung	87
5.1.5	SoH _{CA} - und SoH _{SCC} -Abschätzung	90
5.1.6	Gewichtete Ah-Zählung als alternatives Verfahren.....	91
5.2	MODELLIERUNGSANSÄTZE.....	92
5.2.1	Theoretische Ansätze zur Modellierung.....	93
5.2.2	Mathematisches Modell einer Li-Ionen Batterie	98
5.2.3	Umsetzung des ESB-Modells	103
5.3	DEGRADATIONSABSCHÄTZUNG.....	106
5.3.1	Berechnungsmethode der Innenwiderstands- und Kapazitätsentwicklung	106
5.3.2	Ergebnisbetrachtung auf Basis des ereignisbasierten Alterungsmodells.....	110
KAPITEL 6	LASTKOLLEKTIVANALYSE DER BELASTUNGSPROFILE.....	115
6.1	ZÄHLVERFAHREN ZUR BILDUNG VON KOLLEKTIVEN AUS ZEITFUNKTIONEN	117
6.1.1	Einparametrische Zählverfahren.....	118
6.1.2	Zweiparametrische Zählverfahren	121
6.2	BELASTUNGSPROFILE BEI HYBRIDFAHRZEUGEN.....	124
6.2.1	Fahrprofildaten von Hybridfahrzeugen	124
6.2.2	Ergebnisse der Lastkollektivanalyse für Hybridfahrzeuge.....	128
6.3	BELASTUNGSPROFILE BEI ELEKTROFAHRZEUGEN	132
6.3.1	Energieumsatz unterschiedlicher Fahrscenarien und Fahrzeuge	133
6.3.2	Ergebnisse der Lastkollektivanalyse für Elektrofahrzeuge	139
6.4	ANFORDERUNGEN DURCH SMART CHARGE UND KRAFTWERKSREGLER	144
KAPITEL 7	RESULTIERENDE DEGRADATIONSBEWERTUNG	151
7.1	DEGRADATION IM FAHRBETRIEB.....	151
7.2	AUSBLICK ZUR DEGRADATION IM REGELLEISTUNGSBETRIEB.....	158

KAPITEL 8	BEWERTUNG DER WIRTSCHAFTLICHKEIT DES V2G-ANSATZES	161
8.1	STAND DER FORSCHUNG	161
8.2	MOBILITÄTSANALYSE	163
8.3	ENERGIEMENGEN, LEISTUNGSBEREITSTELLUNG UND SPEICHERBETRACHTUNG.....	166
8.3.1	Ermittlung der verfügbaren Energiemenge und Leistung im Tagesverlauf.....	166
8.3.2	Zyklenbewertung im Regelleistungs- und Fahrbetrieb.....	169
8.4	BEREITSTELLUNG VON REGELLEISTUNG	173
8.4.1	Bereitstellung von Primär- (PRL) und Sekundärregelenergie (SRL).....	174
8.4.2	Bereitstellung von Minutenreserve (MR).....	177
8.5	WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG DER SZENARIEN	178
8.5.1	Erzielbare Gewinne durch die Bereitstellung von MR.....	180
8.5.2	Erzielbare Gewinne durch die Bereitstellung von SRL.....	184
8.5.3	Schlussfolgerung zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	186
KAPITEL 9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	189