



Stefan Nöhmer, BSc

Untersuchung des Verhaltens von Lithium-Knopfzellen in Ultra-Low-Power Anwendungen

MASTER'S THESIS

to achieve the university degree of
Diplom-Ingenieur

Master's degree programme: Telematics

submitted to

Graz University of Technology

Supervisor

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Söser

Institute of Electronics
Graz University of Technology

Dipl.-Ing. Markus Kienesberger
SES-imagotag GmbH

Graz, May 2018

AFFIDAVIT

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis dissertation.

Date

Signature

Kurzfassung

In einer batteriebetriebenen Ultra-Low-Power Anwendung mit Funkkommunikation soll die erwartete Batterielebensdauer bestimmt werden. Charakteristisch für solche Ultra-Low-Power Anwendungen ist eine sehr niedrige Energieaufnahme während dem Großteil der Betriebszeit, unterbrochen von kurzen aber vergleichsweise hohen Strompulsen. Dabei werden handelsübliche Lithium-Knopfzellen als Energiespeicher verwendet. Da weder in Datenblättern dieser Knopfzellen, noch durch direkte Nachfrage beim Hersteller Angaben über das Verhalten dieser Batterien unter den entsprechenden Betriebsbedingungen gefunden werden können, muss dieses Verhalten messtechnisch erfasst und bewertet werden. Dabei ist insbesondere die nutzbare Kapazität der Batterien in dieser Anwendung von Interesse.

Dazu werden entsprechende Messmethoden definiert, die in Form von unterschiedlichen Messsystemen implementiert werden. Der Aufbau dieser Messsysteme in Hardware und in Software wird dabei detailliert beschrieben. Dabei wird zwischen einer Konstantentladung der Batterien mit kontinuierlichem konstanten Strom, sowie einer Pulsentladung mit pulsformigen Stromprofilen unterschieden. Besonders durch die Pulsentladung lassen sich wertvolle Ergebnisse über das Verhalten der Batterien unter anwendungsspezifischen Stromprofilen bestimmen, und daraus Aussagen und Abschätzungen über das tatsächliche Verhalten in der Anwendung sowie die nutzbare Kapazität ableiten.

Die Ergebnisse der konstruierten Testsysteme werden dargestellt, und die daraus erworbenen Kenntnisse präsentiert und diskutiert. Dabei wird auch auf die Faktoren eingegangen, die einen signifikanten Einfluss auf diese Ergebnisse haben, sowie auf die Schwankungen zwischen den Batterien und die Unterschiede verschiedener Batterietypen und Chargen. Die Auswirkungen von Umgebungseinflüssen wie der Temperatur werden ebenfalls untersucht und präsentiert.

Das Ergebnis dieser Untersuchungen sind Aussagen über die in der Anwendung nutzbare Kapazität der Batterien, die zu einer realitätsnahen Abschätzung der erwarteten Batterielaufzeit benutzt werden können. Zusätzlich wird die deutliche Streuung der Ergebnisse statistisch erfasst, um Aussagen über die Verteilung dieser nutzbaren Kapazität und damit der erwarteten Batterielaufzeit treffen zu können.

Abstract

The expected runtime of batteries used in a battery-powered ultra-low-power application using RF communication should be estimated. Such ultra-low-power applications are characterized by a very low power consumption during most of its operation, only interrupted by short but relatively high current peaks. This application uses off-the-shelf Lithium coin cells as energy source. Since no detailed data about the behavior of these coin cells under such conditions can be obtained from the manufacturer's datasheets or from direct requests to the manufacturer, the characteristics of these batteries should be analyzed by measurements and evaluated. Most important, the useable capacity of these batteries in this application should be investigated.

To achieve this, appropriate measurement methods are defined and implemented in different measurement and test systems. The design and construction of these test systems in hardware and in software is discussed thoroughly in this thesis. This includes a constant discharge system, that can apply a constant current load to the batteries, and a pulsed discharge system that can apply various pulse current profiles to the batteries. Especially the pulsed discharge system can provide meaningful results about the battery behavior under these application specific current profiles, which can be used to obtain predictions and estimations about the expected behavior of these batteries in this application, and their expected useable capacity.

In this thesis, the results of these measurement systems are presented, and the derived findings from these results are shown and discussed. The factors which have significant influences on these results and their variations are defined. Also, the differences in behavior for different battery types and batches, as well as the impact of temperature and other conditions are discussed.

The results of this research are evaluations of the expected behavior and the useable capacity for the tested battery types in this application, leading to a realistic estimation of the expected battery lifetime in the application. Additionally, the distinct variations are statistically analyzed to allow an estimation of the distribution of the useable capacity and therefore the expected battery lifetime.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die durch ihre fachliche sowie persönliche Unterstützung und Motivation zum Gelingen dieser Masterarbeit beigetragen haben.

Zuerst gebührt mein Dank Prof. Peter Söser, der meine Masterarbeit betreut und begutachtet hat. Für die Beratung und die hilfreichen Anregungen bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken.

Ebenfalls möchte ich meinen Arbeitskollegen und Vorgesetzten danken, ohne die einerseits die Durchführung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre, und die mir andererseits jederzeit mit Rat und Tat zur Seite standen. Bedanken möchte ich mich auch für die zahlreichen interessanten Ideen und Diskussionen, die maßgeblich dazu beigetragen haben, dass diese Masterarbeit in dieser Form vorliegt.

Weiters danke ich all jenen, die sich die Zeit für das Korrekturlesen dieser Arbeit genommen haben, und mit wertvollen Verbesserungsvorschlägen zum Feinschliff dieser Arbeit beigetragen haben.

Meinen Studienkollegen und Freunden aus Seewalchen, Oberösterreich, Salzburg, der Steiermark und dem Rest der Welt danke ich für die Unterstützung und die vielen schönen und lustigen Momente über die Dauer meines gesamten Studiums in Graz.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, allen voran meinen Eltern, die mich geprägt haben um der Mensch zu sein, der ich heute bin, mir mein Studium ermöglicht und mich in all meinen Entscheidungen bekräftigt haben. Herzlichen Dank für die Unterstützung in allen Lebenslagen und für alles, was ihr mir in meinem bisherigen Leben gelernt und gelehrt habt. Ich hoffe, diese Fürsorge und dieses Wissen später auch einmal nur annähernd so gut weitergeben zu können.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Überblick	1
1.2	Motivation und Hintergrund	2
1.3	Überblick über die Technologie von ESLs	2
1.3.1	Bestimmung der Lebensdauer von ESLs	6
1.3.2	Erfassung des Energieverbrauchs von ESLs	7
1.3.3	Berechnung der erwarteten Lebensdauer	11
1.3.4	Gegenprüfung/Verifikation der errechneten Lebensdauer	12
1.4	Einführung zu Batterien für ESLs	13
1.4.1	Anforderungen an Batterien im ESL-System	14
1.4.2	Auswahl der geeigneten Batterietechnologie für ESLs	15
1.4.3	Auswahl der geeigneten Batterietype für ESLs	16
1.4.4	Ermittlung der nutzbaren Kapazität von Batterien	17
1.4.5	Historische Entwicklung der Batteriequalifizierung bei SES-imagotag	18
2	Theorie	22
2.1	Begriffserklärung und Kenngrößen von Batterien	22
2.2	Auswahl von Batterietypen	26
2.2.1	Alkalische Primärzellen	26
2.2.2	Lithium-Primärzellen	28
2.2.3	Lithium-Schwefeldioxid-Zellen (LiSO ₂)	29
2.2.4	Lithium-Thionylchlorid-Zellen (LiSOCl ₂)	31
2.2.5	Lithium-Mangandioxid-Zellen (LiMnO ₂)	33
2.2.6	Lithium-Kohlenstoffmonofluorid-Zellen (Li(CF) _n)	38
3	Methoden	40
3.1	Messmethoden für elementare Batterieeigenschaften	40
3.1.1	Messung der Leerlaufspannung einer Zelle/Batterie	41
3.1.2	Messung der Lastspannung einer Zelle/Batterie	41
3.1.3	Messung des Kurzschlussstromes einer Zelle/Batterie	42
3.1.4	Messung des (ohmschen) Innenwiderstandes einer Zelle/Batterie	43
3.2	Messmethoden für Batterieeigenschaften über deren Lebensdauer	44
3.2.1	Bestimmung der Nominalkapazität bzw. Restkapazität einer Zelle/Batterie	45
3.2.2	Bestimmung des Verlaufs von Leerlaufspannung, Lastspannung und Innenwiderstand über die Lebensdauer	46
3.2.3	Bestimmung der nutzbaren Kapazität einer Zelle/Batterie bei beliebigem Stromprofil	47
3.3	Messmethoden für künstliche Alterung und Selbstentladung	49
3.3.1	Beschleunigte künstliche Alterung einer Zelle/Batterie	49
3.3.2	Abschätzung der Selbstentladung einer Zelle/Batterie	50

3.4	Messmethoden für die Gegenprüfung und Verifikation	50
3.5	Historische Methoden der Batterieevaluierung bei SES-imagotag	53
3.5.1	Entladung über konstanten Widerstand und Mitprotokollieren der Batteriespannung	53
3.5.2	Pulsförmige Belastung und Mitprotokollieren der Batteriespannung	55
3.5.3	Arbiträre Belastung und Messung der Batteriespannung	55
3.5.4	Bildung eines mathematischen Batteriemodells anhand der Messdaten	57
3.5.5	Erste Version der Konstantentladestation	59
3.5.6	Erste Version der Pulsentladestation	61
4	Implementierung	63
4.1	Hardware	63
4.1.1	Datenerfassungsgerät NI USB-6211	63
4.1.2	Systemarchitektur der Konstantentladestation	66
4.1.3	Systemarchitektur der Pulsentladestation	69
4.1.4	Belastung der Batterien	73
4.1.5	Multiplex der Messkanäle	79
4.1.6	Steuerung des Multiplex	82
4.1.7	Batterieindikator	84
4.1.8	Spannungsversorgung	85
4.2	Software	86
4.2.1	Anforderungen an die Software	86
4.2.2	Funktionalität	88
4.2.3	Konfiguration	90
4.2.4	Erfassung und Darstellung der Informationen und Ergebnisse	90
4.2.5	Protokollierung der Ergebnisse	91
5	Ergebnisse	92
5.1	Messsysteme	92
5.1.1	Messhardware	92
5.1.2	Steuersoftware	96
5.2	Messergebnisse Konstantentladesystem	103
5.2.1	Format der Messergebnisse	103
5.2.2	Bestimmung der Nominalkapazität und Batteriestreuung	106
5.2.3	Selbstentladung	109
5.3	Messergebnisse Pulsentladesystem	110
5.3.1	Format der Messergebnisse	111
5.3.2	Bestimmung eines Test-Stromprofils	113
5.3.3	Bestimmung der nutzbaren Kapazität und Batteriestreuung	120
5.3.4	Abhängigkeit Temperatur	126
6	Conclusio	129
6.1	Zusammenfassung	129
6.1.1	Konstantentladesystem	130
6.1.2	Pulsentladesystem	131
6.1.3	Kombinierte Nutzung von Konstant- und Pulsentladesystem	132
6.1.4	Kommerzielle Lösungen	133
6.2	Ergebnisse und Erkenntnisse	133
6.2.1	Ergebnisse der Konstantentladung	133
6.2.2	Ergebnisse der Pulsentladung	135
6.2.3	Verifikation der Ergebnisse	143
6.2.4	Batteriesimulation	144

6.2.5	Selbstentladung	145
6.3	Anwendungen der Erkenntnisse	145
6.3.1	Detaillierte Qualitätsüberprüfung beim Hersteller	145
6.3.2	Wareneingangskontrolle und Qualitätssicherung	146
6.3.3	Online-Batteriebewertung	146
6.4	Herausforderungen und Probleme	147
6.4.1	Probleme historischer Messmethoden	147
6.4.2	Herausforderungen bei Konstant- und Pulsentladesystem	149
6.4.3	Streuung	151
6.4.4	Batteriekontakte	151
6.5	Ausblick	152
6.5.1	Weitere Charakterisierung und Grundlagenforschung	152
6.5.2	Evaluierung weiterer Batterietypen	152
6.5.3	Qualifizierung weiterer Batteriehersteller	153
6.5.4	Mögliche Verbesserungen der Messsysteme	153

Abbildungsverzeichnis

1.1	SES-imagotag GmbH	2
1.2	E-Paper Arbeitsprinzip	3
1.3	SES-imagotag G1 ESLs	4
1.4	SES-imagotag Funk-Infrastruktur	5
1.5	SES-imagotag G2 ESLs	6
1.6	Mit Strom-Messverstärker und Oszilloskop aufgenommene Kurve des Stromverbrauchs in einem Betriebszustand	9
1.7	Automatisiertes Messsystem zur Erfassung des Energieverbrauchs von ESLs [4] . .	10
1.8	Ergebnisse eines Messdurchlaufs für ein ESL (Ausschnitt)	10
1.9	Auflistung der möglichen Betriebszustände und deren erwartete Häufigkeit bei bestimmungsgemäßem Betrieb, Berechnung des Ladungsverbrauchs pro Tag	11
1.10	Berechnung der erwarteten Lebensdauer einer Batterie bei bekannter nutzbarer Kapazität, inklusive Lagerung und Selbstentladung	12
1.11	Aufschlüsselung des Ladungsverbrauchs einer Batterie nach Lagerung (grün, rot), Betrieb (blau), und Selbstentladung (dunkle Farbtöne)	13
1.12	Tabelle geläufiger Batterietypen [5]	16
1.13	Typische Entladekurven geläufiger Batterietypen [5]	16
1.14	Typische Selbstentladungsraten für unterschiedliche Batterietypen bei unterschiedlichen Temperaturen [5]	16
2.1	Prinzipieller Aufbau einer galvanischen Zelle [5]	23
2.2	Schematischer Aufbau einer Lithium-Mangandioxid-Knopfzelle [6]	23
2.3	Typische Bauformen für zylindrische Alkali-Batterien [7]	27
2.4	Typische Entladekurve (Zellspannung sowie Innenwiderstand) von Alkali-Mangan-Zellen [5]	27
2.5	Typische Werte für die Selbstentladung von Alkali-Mangan-Zellen bei unterschiedlichen Temperaturen [5]	27
2.6	Typische Entladekurven für unterschiedliche Lithium-Zellen [5]	29
2.7	Typische Energiedichten für unterschiedliche Primärzellen bei unterschiedlichen Temperaturen [5]	29
2.8	Typische Entladekurven für Lithium-Schwefeldioxid-Zellen bei unterschiedlichen Lasten [5]	30
2.9	Typische nutzbare Kapazität für Lithium-Schwefeldioxid-Zellen bei unterschiedlichen Lasten und Temperaturen [5]	30
2.10	Typische Entladekurven für Lithium-Thionylchlorid-Zellen bei unterschiedlichen Lasten (in <i>Bobbin</i> Bauform) [5]	31
2.11	Typische nutzbare Kapazität für Lithium-Thionylchlorid-Zellen bei unterschiedlichen Lasten und Temperaturen (in <i>Bobbin</i> Bauform) [5]	31
2.12	Schematischer Aufbau einer Lithium-Thionylchlorid-Zelle als <i>Bobbin type</i> [5]	32
2.13	Schematischer Aufbau einer Lithium-Thionylchlorid-Zelle als <i>Wound type</i> [5]	32

2.14	Schematischer Aufbau einer Lithium-Mangandioxid-Zelle als <i>Bobbin type</i> [6]	35
2.15	Schematischer Aufbau einer Lithium-Mangandioxid-Zelle als <i>Wound type</i> [6]	35
2.16	Schematischer Aufbau einer Lithium-Mangandioxid-Knopfzelle [6]	35
2.17	Schematischer Aufbau einer Lithium-Mangandioxid-Pouchzelle [9]	35
2.18	Typische Entladekurve einer Lithium-Mangandioxid-Knopfzelle (CR2430) bei unterschiedlichen Lasten bei 20°C [6]	36
2.19	Typische Entladekurve einer Lithium-Mangandioxid-Knopfzelle bei unterschiedlichen Temperaturen [10]	36
2.20	Spannungsverlauf einer 2CR5 LiMnO ₂ Fotobatterie bei pulsformiger Belastung [10]	36
2.21	Typische Bereiche für die Selbstentladung von Lithium-Mangandioxid-Zellen bei unterschiedlichen Temperaturen [10]	36
2.22	Verhalten der Ausgangsspannung einer Lithium-Mangandioxid-Knopfzelle bei pulsformiger Belastung [5]	37
2.23	Typischer Verlauf des Innenwiderstands einer Lithium-Mangandioxid-Knopfzelle [5]	37
2.24	Typische Entladekurven einer Lithium-Kohlenstoffmonofluorid-Knopfzelle bei unterschiedlichen Lasten [5]	39
2.25	Verhalten der Ausgangsspannung einer Lithium-Kohlenstoffmonofluorid-Knopfzelle mit 165 mAh Nominalkapazität bei pulsformiger Belastung [5]	39
3.1	Messung der Leerlaufspannung V_{oc} einer Zelle/Batterie	41
3.2	Spannungsrichtige Messung der Lastspannung V_{load} bei Belastung mit I_{load} einer Zelle/Batterie	41
3.3	Messung des Kurzschlussstromes I_{sc} einer Zelle/Batterie mit einem Amperemeter .	43
3.4	Typischer zeitlicher Verlauf der Ausgangsspannung einer Zelle bei pulsformiger Belastung [5]	44
3.5	Gemessener Verlauf der Leerlaufspannung, Lastspannung und des Innenwiderstandes eines CR2450 1S2P Batteriepacks bei pulsformiger Belastung entsprechend der Anwendung	47
3.6	Nutzbare Kapazität des zuvor gemessenen CR2450 1S2P Batteriepacks für eine Anwendung mit 2.1 V Minimalspannung	48
3.7	Vorausberechnung und tatsächliches Ergebnis der <i>Continuous Acquiring</i> Verifikationsmethode	51
3.8	Vorausberechnung und tatsächliches Ergebnis der <i>Endurance Test</i> Verifikationsmethode	52
3.9	Erstes 16-Kanal Konstantentladesystem mit Spannungslogger	53
3.10	Konstantentladekurven für qualitativ hochwertige CR2450 1S2P Packs (Nominalkapazität 1100 mAh) bei einer Belastung mit 820 Ω	54
3.11	2-Kanal Arbitrarentladesystem	55
3.12	Pulsentladekurve für qualitativ hochwertige CR2450 1S2P Packs (Nominalkapazität 1100 mAh) bei einer Belastung mit 24 mA (Duty Cycle 20 %, Pulsdauer 16 s) . . .	56
3.13	Mathematisches Modell (<i>Ersatzschaltbild</i>) einer allgemeinen galvanischen Zelle [11]	58
3.14	Entladekurve einer tatsächlichen Batterie (blau) im Vergleich zum Simulationsergebnis (grün)	59
3.15	Schematischer Aufbau der ersten Konstantentladestation	60
3.16	Foto der ersten Konstantentladestation im Betrieb	60
3.17	Schematischer Aufbau der ersten Pulsentladestation	62
4.1	National Instruments NI USB-6211 Datenerfassungsgerät [12]	64
4.2	Blockschaltbild der analogen Eingänge des NI USB-6211 [14]	65
4.3	Pinbelegung des NI USB-6211 [14]	66
4.4	Schematischer Aufbau der überarbeiteten Konstantentladestation	67
4.5	Schematischer Aufbau der überarbeiteten Pulsentladestation	69

4.6	Arbeitsweise der Analogschalter bei der Pulsentladestation	73
4.7	Schaltplanausschnitt mit den konstanten Entladewiderständen für 8 Kanäle der Konstantentladestation	74
4.8	Schaltplanausschnitt mit Präzisions-Stromsenke für ≤ 32.5 mA für einen Kanal . . .	75
4.9	Schaltplanausschnitt mit Präzisions-Stromsenke für ≤ 275 mA für einen Kanal . . .	76
4.10	Schaltplanausschnitt mit Analogschalter für VBAT/ISENSE-Messsignalauswahl für zwei Kanäle	77
4.11	Schaltplanausschnitt mit Lastschalter zwischen Batterieanschluss und Konstant-/Pulslast für zwei Kanäle	78
4.12	Schaltplanausschnitt mit einem 8:1 Multiplexer für eine Halb-Bank der Konstantentladestation	80
4.13	Schaltplanausschnitt mit Analogschaltern für die Bank-Auswahl bei der Pulsentladestation	81
4.14	Blockschaltbild eines Schieberegisters vom Typ 74HC595 [16]	83
4.15	Timing-Diagramm (Beispiel) eines Schieberegisters vom Typ 74HC595 [16]	83
4.16	Schaltplanausschnitt mit Fast Shift Register (FSR)	84
4.17	Schaltplanausschnitt mit Slow Shift Registern (SSR)	84
4.18	Schaltplanausschnitt mit Komparator für die Batterieindikatoren	85
4.19	Schaltplanausschnitt mit Spannungsversorgung für die Messhardware	86
4.20	Vereinfachter Überblick über die Struktur der Steuersoftware für Konstant- und Pulsentladesysteme	88
5.1	3D-Modell der voll bestückten PCB für Konstant- und Pulsentladesysteme	93
5.2	Oberster Layer <i>Top</i> (1) der Messhardware (Gerberdaten)	94
5.3	Zweiter Layer <i>GND</i> (2) der Messhardware (Gerberdaten)	94
5.4	Dritter Layer <i>VCC</i> (3) der Messhardware (Gerberdaten)	94
5.5	Untester Layer <i>Bot</i> (4) der Messhardware (Gerberdaten)	94
5.6	Darstellung aller kombinierter Layer der Messhardware	95
5.7	Darstellung der Bauteile auf der Oberseite	95
5.8	Darstellung der Bauteile auf der Unterseite (gespiegelt)	95
5.9	Konstantentladestation im Betrieb mit CR2450 1S2P Packs (alle Kanäle durchgelaufen)	96
5.10	Konstantentladestation mit NI USB-6211 und Steuerrechner	96
5.11	Pulsentladestation im Betrieb mit CR2450-Einzelfixtures	96
5.12	CR2450-Testadapter für Einzelzellen, an die Pulsentladestation angeschlossen . . .	96
5.13	<i>Overview</i> -Tab mit Überblick aller 128 Messkanäle des voll ausgebauten Konstantentladesystems (hier: alle Kanäle unkonfiguriert und angehalten)	97
5.14	<i>Channel View</i> -Tab mit allen Informationen und aktuellem Zustand eines abgeschlossenen Kanals, bei dem die zu entnehmende Ladung von 400 mAh erreicht wurde . . .	98
5.15	<i>Multi Channel</i> -Tab mit Konfiguration und Kanalauswahl für Bank 0 (hier: alle Kanäle bereits in Betrieb)	99
5.16	<i>Hardware Configuration</i> -Tab mit grundlegenden Einstellungen für die Messhardware)100	
5.17	<i>Channel View</i> -Tab des ersten Konstantentladesystems, bei der Kanalkonfiguration gibt es im Vergleich zu Abb. 5.14 deutlich weniger Einstellmöglichkeiten.	101
5.18	<i>Overview</i> -Tab mit Überblick aller 32 Messkanäle des Pulsentladesystems (hier: Kanäle in Betrieb, einige bereits abgeschlossen)	102
5.19	<i>Channel View</i> -Tab mit allen Informationen und aktuellem Zustand eines aktiven Kanals für eine Lithium-Mangandioxid-Pouchzelle bei -25°C , die die Spannungsschwelle von 2.2 V bei etwa 400 mAh + 150 mAh = 550 mAh erreicht hat	103
5.20	<i>Multi Channel</i> -Tab mit Konfiguration und Kanalauswahl für Bank 0 (hier: einige Kanäle bereits abgeschlossen)	104
5.21	<i>Current Profile Editor</i> -Tab zur Einstellung der Stromprofile)	105

5.22	Entladekurve eines CR2450 1S2P Packs mit $820\ \Omega$ Konstantwiderstand, gemessene Nominalkapazität etwa $1100 - 1200\ \text{mAh}$	106
5.23	Entladekurve eines CR2450 1S2P Packs mit $2.2\ \text{k}\Omega$ Konstantwiderstand, gemessene Nominalkapazität etwa $1150 - 1200\ \text{mAh}$	106
5.24	Konstantentladung einer CR2450 Einzelzelle mit $820\ \Omega$ bei Raumtemperatur, gemessene Nominalkapazität $570 - 590\ \text{mAh}$ (Datenblatt: $550\ \text{mAh}$) \Rightarrow Angabe im Datenblatt erfüllt und übertroffen	107
5.25	Konstantentladung einer CR2450 Einzelzelle eines anderen Herstellers mit $820\ \Omega$ bei Raumtemperatur, gemessene Nominalkapazität $490 - 530\ \text{mAh}$ (Datenblatt: $550\ \text{mAh}$) \Rightarrow Angabe im Datenblatt nicht erreicht	107
5.26	Konstantentladung eines CR2450 1S2P Packs mit $820\ \Omega$ bei Raumtemperatur, gemessene Nominalkapazität $1100 - 1200\ \text{mAh}$ (Datenblatt: $1100\ \text{mAh}$) \Rightarrow Angabe im Datenblatt erfüllt und übertroffen	107
5.27	Konstantentladung eines CR2450 1S2P Packs mit $820\ \Omega$ bei Raumtemperatur nach 4 Jahren künstlicher Alterung, gemessene Nominalkapazität $1050 - 1150\ \text{mAh}$ \Rightarrow $\Delta Q \approx 50\ \text{mAh} \hat{=} -5\%$ in 4 Jahren (Datenblatt: $1100\ \text{mAh}$, $< 2\%$ Selbstentladung pro Jahr) \Rightarrow Angaben im Datenblatt erfüllt	108
5.28	Konstantentladung eines CR2450 1S2P Packs eines anderen Herstellers mit $820\ \Omega$ bei Raumtemperatur, gemessene Nominalkapazität $1030 - 1160\ \text{mAh}$ (Datenblatt: $1100\ \text{mAh}$) \Rightarrow Angabe im Datenblatt großteils erfüllt, ein Ausreisser mit $420\ \text{mAh}$ \rightarrow verursacht durch fehlerhafte Verschweißung des Packs (die Schwankungen in den Kurven wurden durch Temperaturschwankungen verursacht)	108
5.29	Konstantentladung eines CR2477 1S3P Packs mit $820\ \Omega$ bei Raumtemperatur, gemessene Nominalkapazität $2300 - 2850\ \text{mAh}$ (Datenblatt: $3000\ \text{mAh}$) \Rightarrow Angabe im Datenblatt deutlich nicht erreicht, ungewöhnliches Verhalten gegen Ende der Entladung	108
5.30	Konstantentladung einer CP502440 Pouchzelle mit $820\ \Omega$ bei Raumtemperatur, gemessene Nominalkapazität $950 - 1000\ \text{mAh}$ (Datenblatt: $1200\ \text{mAh}$) \Rightarrow Angabe im Datenblatt deutlich nicht erreicht	109
5.31	Abschätzung der Selbstentladung eines CR2450 1S2P Packs bei künstlicher Alterung über 4 Jahre	110
5.32	Einfaches pulsförmiges Stromprofil, definiert durch I_{pk} , t_{on} und t_{off}	113
5.33	CR2450 1S2P: Pulsstromprofil mit $24\ \text{mA}$, 50% Duty Cycle, 1% SOC-Schrittweite	115
5.34	CR2450 1S2P: Pulsstromprofil mit $16\ \text{mA}$, 50% Duty Cycle, 1% SOC-Schrittweite	115
5.35	CR2450 1S2P: Pulsstromprofil mit $8\ \text{mA}$, 50% Duty Cycle, 1% SOC-Schrittweite .	116
5.36	CR2450 1S2P: Pulsstromprofil mit $3.5\ \text{mA}$, 50% Duty Cycle, 1% SOC-Schrittweite	116
5.37	Zusammenhang zwischen nutzbarer Kapazität und Pulsstrom	117
5.38	CR2450 1S2P: Pulsstromprofil mit $24\ \text{mA}$, 20% Duty Cycle, 0.4% SOC-Schrittweite	118
5.39	CR2450 1S2P: Pulsstromprofil mit $24\ \text{mA}$, 20% Duty Cycle, 0.04% SOC-Schrittweite	118
5.40	CR2450 1S2P: Pulsstromprofil mit $24\ \text{mA}$, 20% Duty Cycle, 0.01% SOC-Schrittweite	119
5.41	Vollständige Pulsentladung eines CR2450 1S2P Packs, $Q_{use} \approx 820\ \text{mAh}$	121
5.42	Pulsentladung eines CR2450 1S2P Packs nach $600\ \text{mAh}$ Vorentladung, $Q_{use} \approx 800\ \text{mAh}$	121
5.43	Pulsentladung eines CR2450 1S2P Packs nach $780\ \text{mAh}$ Vorentladung, $Q_{use} \approx 840\ \text{mAh}$	122
5.44	Kurvenscharen für Leerlaufspannung, Lastspannung, Innenwiderstand bei fallender Last und Innenwiderstand bei steigender Last für 16 CR2450 1S2P Packs bei Raumtemperatur, $Q_{use} \approx 820 - 960\ \text{mAh}$	124
5.45	Kurvenscharen für Leerlaufspannung, Lastspannung, Innenwiderstand bei fallender Last und Innenwiderstand bei steigender Last für 16 CR2450 1S2P Packs eines anderen Herstellers bei Raumtemperatur, $Q_{use} \approx 770 - 1020\ \text{mAh}$	125
5.46	Kurvenschar für die Lastspannung von 32 CR2450 Einzelzellen bei Raumtemperatur, $Q_{use} \approx 380 - 480\ \text{mAh}$	126

5.47	Kurvenschar für die Lastspannung von 16 Standard-CR2450 1S2P Packs bei -25°C , keine korrekte Funktion möglich	128
5.48	Kurvenschar für die Lastspannung von 16 CP502440 Pouchzellen bei -25°C , $Q_{use} \approx 650 - 820 \text{ mAh}$	128
5.49	Kurvenschar für die Lastspannung von 16 “Low-Temperature” CR2450 1S2P Packs bei -25°C , Operation bei Betriebsspannungen bis 1.8 V möglich	128
6.1	Konstantentladung eines CR2450 1S2P Packs, gemessene Nominalkapazität 1100 – 1200 mAh (Datenblatt: 1100 mAh)	134
6.2	Ausschnitt der Ergebnisse der Konstantentladungen, rein qualitative Darstellung	135
6.3	Feststellung der nutzbaren Kapazität durch Pulsentladung eines CR2450 1S2P Packs bis 2.1 V, gemessene nutzbare Kapazität 840 mAh (Nominalkapazität: 1100 mAh)	136
6.4	Kurvenscharen für Leerlaufspannung, Lastspannung und Innenwiderstand von 16 CR2450 1S2P Packs, $Q_{use} \approx 770 - 1020 \text{ mAh}$ (bis 2.2 V), auffällige Verteilung	137
6.5	Ähnliche Ergebnisse der nutzbaren Kapazität als Prozentsatz der Nominalkapazität bei pulsförmiger Belastung einer CR2032, aus [17]	138
6.6	Anschauungsbeispiel: rein qualitative Betrachtung einiger Ergebnisse der Pulsentladungen	141
6.7	Sprünge in den Entladekurven, verursacht durch rasche Umgebungstemperaturänderungen	142
6.8	Entladekurven mit deutlichen Stufen und Plateaus	143
6.9	Entladekurve bei Veränderung des Reaktionsmechanismus in Zellen (2) [5]	143
6.10	Entladekurven mit deutlichem “Rauschen” bei einem verschweißten 1S2P Batteriepack mit Steckverbinder	144

Tabellenverzeichnis

5.1	Standard-Teststromprofil für zukünftige Messungen mit dem Pulsentladesystem . .	120
-----	---	-----

Kapitel 1

Einführung

1.1 Überblick

Dieser Abschnitt gibt einen kurzen Überblick darüber, wie es zu der Notwendigkeit dieser Untersuchungen des Verhaltens von primären Lithiumbatterien unter Ultra-Low-Power Bedingungen kam, und für welche speziellen Anwendungsgebiete und unter welchen Rahmenbedingungen diese Untersuchungen und Charakterisierungen durchgeführt werden sollen. Dazu wird auch kurz die vorgesehene Anwendung in elektronischen Displays (*Electronic Shelf Labels*, “*ESLs*”) beschrieben, inklusive deren Eigenheiten und speziellen Anforderungen an die Batterien. Neben einer genaueren Definition zum Begriff *Ultra-Low Power* ist auch die schrittweise Entwicklung der aktuell verwendeten Messmethoden und Testsysteme angeführt, inklusive deren praktischen Nutzen, sowie Vor- und Nachteilen.

Details über die Funktionsweise und theoretischen Hintergründe von Batterien, und insbesondere zu primären Lithium-Batterien, sowie ein theoretischer Überblick über die interessanten Kenngrößen von Batterien finden sich im Kapitel 2. Unterschiedliche Batterietechnologien und deren Eignung speziell für diese Anwendung werden ebenfalls in diesem Kapitel behandelt.

Im Kapitel 3 ist beschrieben, wie man gewisse Eigenschaften der Batterien tatsächlich messtechnisch erfassen kann. Neben der tatsächlichen Messung der Batterien sind auch weitere Messverfahren beschrieben die parallel ausgeführt werden, um die hier diskutierten Batteriemessungen gegenzuprüfen und zu bestätigen. Weitere verwendete Verfahren wie die beschleunigte Alterung und die Abschätzung der erwarteten Batterielaufzeit in der Anwendung sind ebenfalls beschrieben. Abschließend wird die schrittweise Entwicklung der historischen Messmethoden bis hin zu den in den aktuellen Testsystemen verwendeten Methoden aufgelistet.

Kapitel 4 beschreibt die tatsächliche Implementierung der Messsysteme als eigenständige Insellösung, in Form von Hardware und Software. Dazu ist die gesamte Architektur der Messsysteme angegeben, auf der die entstehenden Testsysteme basieren. Dazu sind die zuvor theoretisch dargestellten Messverfahren als mögliche Realisierungen in Form von elektronischen Schaltungen beschrieben, so wie sie in diesen Testsystemen verwendet werden. Ebenfalls sind weitere Verfahren beschrieben, die bei der Implementierung des Messsystems verwendet werden, um beispielsweise eine größere Anzahl an Kanälen zu ermöglichen.

Die Ergebnisse der Messungen sind im Kapitel 5 dargestellt. Hier wird beschrieben, welche Resultate die unterschiedlichen Messsysteme liefern, und welche daraus abgeleiteten Angaben für die Abschätzung der Batterielaufzeit in der Anwendung, sowie das Verhalten der Batterien, gewonnen

wurden. Ebenfalls werden die aktuellen Messsysteme als Resultate dieser Arbeit betrachtet. Dazu werden die entstandenen Testsysteme und deren Hardware sowie Software präsentiert.

Im Kapitel 6 werden die Ergebnisse und Aussagen der Messungen verglichen und diskutiert, sowie die momentanen Erkenntnisse daraus beschrieben. Zusätzlich werden die dabei entstandenen Probleme und deren Lösungen beschrieben, sowie der zukünftige Ausblick für diese Untersuchungen. Ebenfalls wird erklärt, wie die Ergebnisse dieser Untersuchungen für die Qualifizierung neuer Batterietypen, die laufende Qualitätskontrolle der Batterien in der Fertigung, sowie die Abschätzung der verbleibenden Kapazität in der Anwendung vom ESL selbst durchgeführt werden kann.

1.2 Motivation und Hintergrund

Diese Arbeit ist im Zuge der Entwicklung von elektronischen Preisschildern (*Electronic Shelf Labels*, "ESLs") bei der Firma **SES-imagotag**¹ entstanden.

The logo for SES-imagotag features the word "ses" in a bold, lowercase, sans-serif font, followed by "imagotag" in a regular weight of the same font. The letters are black and set against a plain white background.

Abbildung 1.1: SES-imagotag GmbH

SES-imagotag spezialisiert sich auf die Entwicklung von batteriebetriebenen elektronischen Displays, die unter anderem zur elektronischen Preisauszeichnung verwendet werden, sowie die dafür benötigte Infrastruktur. Seit der Gründung im Jahr 2010 werden ESLs hauptsächlich auf Basis von grafikfähigen elektrophoretischen Displays², für Spezialanwendungen aber auch auf Basis von Flüssigkristalldisplays entwickelt. Die Displays werden mit handelsüblichen Knopfzellen betrieben, der angezeigte Inhalt lässt sich per Funk verändern.

Durch den Batteriebetrieb ist es notwendig, die ESLs möglichst energiesparend aufzubauen, trotzdem muss die Energiezufuhr für das Display, dessen Ansteuerung und die Funkübertragung gewährleistet werden. Dadurch kommt es zwingend zur Frage, wie hoch die erwartete Batterielebensdauer eines ESLs bei dessen bestimmungsgemäßer Benutzung ausfallen wird. Dazu muss einerseits der genaue Energieverbrauch des ESLs bekannt sein, andererseits muss das Verhalten der verwendeten Batterie und deren nutzbare Kapazität bekannt sein.

Die Frage nach dem Verhalten und der nutzbaren Kapazität der verwendeten Batterien in dieser Anwendung für ein ESL unter den üblichen Betriebsbedingungen, die als *ultra-low power* Anwendung klassifiziert werden kann, soll in dieser Arbeit geklärt werden.

1.3 Überblick über die Technologie von ESLs

Prinzipiell besteht ein ESL nur aus einer geringen Anzahl an Komponenten:

- ein Mikrocontroller, der die Steuerung des ESLs übernimmt
- eine Funkschnittstelle, die die Kommunikation mit der Infrastruktur übernimmt
- ein Display, welches die anzuzeigenden Informationen darstellt
- eine Stromversorgung, die die benötigte Energie zur Verfügung stellt, in diesem Fall eine Batterie

¹SES-imagotag GmbH, <http://www.ses-imagotag.com>

²besser bekannt als *E-Paper Displays*

- weitere Beschaltung die für den Betrieb notwendig sind (externer Speicher, Taktgeber, etc.)
- weitere optionale Komponenten, die Zusatzfunktionen ermöglichen (NFC-Schnittstelle, LEDs, etc.)

Die aktuellen ESLs von SES-imagotag benutzen als Mikrocontroller und Funkschnittstelle eine Komponente, die beide Funktionalitäten integriert - ein **MCU/RF-SoC** (*System-on-Chip*). Dadurch können diese beiden Komponenten sehr energieeffizient gestaltet werden. Dieses SoC tauscht Daten über die Funkschnittstelle mit der Infrastruktur aus, nimmt Befehle entgegen und verwaltet sämtliche Funktionen des ESLs. Für die korrekte Funktion werden einige externe Komponenten wie Taktgeber und passive Komponenten benötigt. Die benötigte Energie vom SoC wird direkt aus einer Batterie bezogen. Zum Speichern einer größeren Menge von Daten, wie beispielsweise die Bildinformationen, ist das SoC mit einem externen Flash-Speicher ausgestattet. Bei der Änderung des Displayinhaltes werden diese Daten an das ebenfalls mit dem SoC verbundene intelligente Display übertragen, welches die Ansteuerung für die korrekte Darstellung der Inhalte bereits enthält.

Als Anzeige werden sogenannte elektrophoretische Displays verwendet, entwickelt von der Firma E-Ink (<http://www.eink.com/>), deren großer Vorteil in der Bistabilität des Displays liegt - solange das Display nicht verändert wird, d.h. der angezeigte Inhalt gleich bleibt, benötigt das Display auch keinen Strom³. Durch die Verwendung zur Preisauszeichnung werden ausschließlich quasi-statische Inhalte am Display angezeigt, Preisänderungen sind auf die Laufzeit gesehen sehr selten⁴. Dadurch können durch die Verwendung dieser Technologie ESLs gebaut werden, die mit sehr wenig Energie auskommen, und dadurch auch von kleinen Batterien über Jahre versorgt werden können. Im Vergleich zu anderen gängigen Displaytypen wird die papierähnliche Lesbarkeit und der hohe Kontrast und Ablesewinkel der E-Paper Displays ebenfalls angenehmer empfunden. Diese Displays sind in unterschiedlichen Größen erhältlich, SES-imagotag bietet ESLs mit Displaydiagonalen von 1.6 Zoll bis 12.2 Zoll an (siehe Abbildung 1.3). Die Entwicklung dieser Displays schreitet ständig voran, aus anfänglich schwarz-weißen Displays sind inzwischen 3-farbige Modelle mit unterschiedlichen Farben entstanden (rot/weiß/schwarz, gelb/weiß/schwarz), Displays mit mehreren Farben oder Vollfarben sind momentan Gegenstand der Forschung.

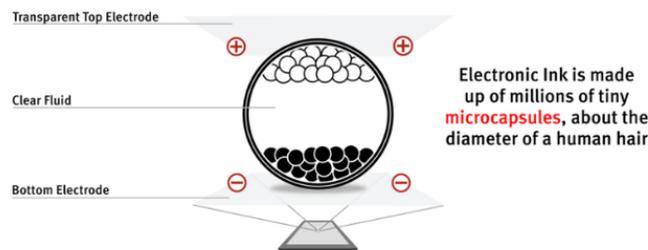


Abbildung 1.2: Arbeitsprinzip von elektrophoretischen Displays, mit in einer Flüssigkeit gelagerten polarisierten Partikeln [1]

Prinzipiell beruhen diese Displays auf einer Flüssigkeit, in der farbige, elektrisch polarisierte Partikel eingelagert sind, dargestellt in Abbildung 1.2. Durch diese Polarisation können die Partikel über ein elektrisches Feld beeinflusst werden, um je nach Technologie die Position oder die Ausrichtung dieser Partikel zu verändern. Dazu sind vergleichsweise hohe positive und negative *Panelspannungen* in der Größenordnung von bis zu ± 25 V erforderlich, die für das Display generiert werden müssen. Werden diese Spannungen nun in einer exakten Abfolge pulsartig an einzelne Pixel ange-

³in der Realität verbraucht die Elektronik im Display im statischen Zustand einen geringen Strom im unteren μ A-Bereich, dieser kann jedoch durch Trennen der Versorgungsspannung auf Null reduziert werden

⁴um die angegebene Batterielebensdauer zu erreichen, darf die Anzahl an Displayänderungen pro Tag eine gewisse Anzahl nicht überschreiten (beispielsweise 2 pro Tag)

legt, können die Partikel so bewegt werden, dass dieses Pixel die gewünschte Farbe darstellt. Dazu muss zuerst der alte Inhalt des Pixels “gelöscht” werden, und dann die neue Farbe zugewiesen werden. Bei mehreren verfügbaren Farben verkompliziert sich dieser Ablauf weiter. Diese Prozesse laufen relativ langsam ab, deswegen dauert die Darstellung eines neuen Bildes am elektrophoretischen Display auch mehrere Sekunden⁵. Abhängig von der Temperatur des Displays und damit der Viskosität der Flüssigkeit im Display muss die Ansteuerung der Pixel unterschiedlich erfolgen, dadurch steigt die benötigte Zeit und der Energieverbrauch zum Ändern des Displays mit sinkender Temperatur.

Die Ansteuerung dieser Displays ist prinzipbedingt sehr komplex, wird aber zu großen Teilen von integrierten *Display-Controllern* übernommen, die die einzelnen Pixel mit den entsprechenden *Waveforms* ansteuern. Diese Controller können auch die Temperatur berücksichtigen und verfügen in modernen Versionen auch über die Komponenten die zur Erzeugung der Panelspannungen notwendig sind. Das Display wird dazu ebenfalls direkt mit der Batteriespannung versorgt, und erzeugt über einen diskreten Schaltregler der vom Displaycontroller gesteuert wird die benötigten Panelspannungen. Insbesondere bei großen Displays und detailreichen Displayinhalten benötigt das Bewegen der Partikel im Display viel Energie, die über den Schaltregler von der Batterie bezogen wird. Speziell bei großen Displays kommt es dabei neben dem hohen Ladungsverbrauch auch zu hohen Stromspitzen, die von der Batterie geliefert werden müssen.

Neben elektrophoretischen Displays werden für spezielle Anwendungsfälle auch Flüssigkristalldisplays angeboten, die aufgrund ihrer Technologie einen deutlich geringeren, aber dafür konstanten Energieverbrauch aufweisen und deswegen bis auf die verfügbare Kapazität kaum Ansprüche an die Stromversorgung stellen (aus diesem Grund werden in dieser Arbeit hauptsächlich elektrophoretische Displays behandelt).



Abbildung 1.3: Auszug verfügbarer Generation 1 SES-imagotag ESLs [2]

Die Kommunikation mit den ESLs erfolgt über ein proprietäres bidirektionales Funkprotokoll im lizenzfreien 2.4 GHz ISM-Band, wobei das Protokoll ebenfalls als möglichst energiesparend entworfen wurde. Den Großteil der Zeit befinden sich die ESLs in einem *Deep Sleep* Modus, in dem die Stromaufnahme des Gesamtsystems unter $1 \mu A$ bleibt. In einem definierten Wakeup-Intervall wacht das SoC auf, aktiviert die Funkschnittstelle und wartet auf Instruktionen von einem *Access Point*, der die Steuerbefehle von einem zentralen Server an die ESLs weiterleitet (siehe Abbildung 1.4). Die Access Points können auf verschiedenen Kanälen (= verschiedenen Frequenzen) arbeiten, um mehrere Funknetzwerke oder Funkzellen parallel betreiben zu können. Die Access Points und Labels sind exakt synchronisiert, so dass dem entsprechenden Access Point genau bekannt ist, zu welchem Zeitpunkt welches ESL aufwacht und die Funkschnittstelle aktiviert - genau in diesem

⁵der Prozess kann auch schneller ablaufen, benötigt dazu aber deutlich mehr Energie

Timeslot muss der Access Point die Steuerbefehle an das ESL übertragen. Dadurch können die Phasen, in denen das ESL aktiv ist und dadurch Strom verbraucht, möglichst kurz gehalten werden. Neben dem bistabilen Display und der stromsparenden Hardware sorgt dieses Protokoll dafür, dass der Energieverbrauch der ESLs möglichst gering ist, um einen dauerhaften Batteriebetrieb zu ermöglichen.



Abbildung 1.4: Auszug verfügbarer SES-imagotag Funk-Infrastruktur [3]

Neuere Generationen von ESLs bieten zusätzliche Funktionalität über das einfache Darstellen von Grafiken hinaus an, wie beispielsweise das Abrufen von zusätzlichen Produktinformationen über NFC auf das Smartphone des Kunden. Während dazu anfangs passive NFC-Tags verwendet wurden, in die statische Informationen wie eine URL auf eine Produktseite geschrieben und gelesen werden konnten, werden inzwischen aktive NFC-Tags verwendet, die mit dem SoC kommunizieren können, um neben dem Abrufen von Zusatzinformationen auch eine Steuerung des ESLs zu erlauben⁶, um beispielsweise dem Shop-Mitarbeiter weitere Informationen auf einem Handgerät anzuzeigen, oder das ESL dazu zu bringen, sich im System neu anzumelden, oder etwa interne Informationen wie den verbleibenden Lagerstand am Display anzuzeigen. Durch eine bidirektionale Kommunikation mit dem Server sind die Möglichkeiten hier sehr groß. Da passive NFC-Tags nicht elektrisch mit dem ESL verbunden sind und ausschließlich aus dem erzeugten elektromagnetischen Feld des Lesegerätes (z.B. Smartphone) versorgt werden, tragen diese nicht zum Energieverbrauch bei. Bei aktiven NFC-Tags ist der Energieverbrauch gegenüber den restlichen Komponenten im aktiven Betrieb gering, und tritt nur während der Kommunikation mit dem Lesegerät auf - der Energieverbrauch durch die NFC-Funktionalität ist gegenüber dem Energieverbrauch des Gesamtsystems vernachlässigbar.

Ein weiteres Zusatzfeature neuerer Generationen ist die Signalisierung per LED, um beispielsweise *Customer Guidance* Systeme zu ermöglichen, die den Kunden anhand entsprechender Blinkmuster und -farben zum gewünschten Produkt führen, oder auch einen Shop-Mitarbeiter beim Auffinden der Produkte helfen können, wenn beispielsweise sämtliche Produkte vom Regal genommen wurden und Nachschub aus dem Lager einsortiert werden soll⁷. Die aktuelle Produktgeneration hat für diese Zwecke eine RGB- und eine weiße LED eingebaut (siehe Abbildung 1.5). Der Nachteil dieser Signalisierung per LED liegt darin, dass deren Stromverbrauch verhältnismäßig hoch ist. Da die Batteriespannung niedriger ist als die Vorwärtsspannung der LEDs, muss mit einem Schaltregler eine LED-Betriebsspannung erzeugt werden. Um die Leuchtsignale bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen auch aus gewisser Entfernung erkennen zu können, muss außerdem die Lichtintensität ausreichend hoch sein, was zu einem entsprechenden Stromverbrauch und einer reduzierten Batterielaufzeit führt.

Alle diese ESLs werden momentan mit handelsüblichen Lithium-Knopfzellen betrieben, wobei die

⁶ natürlich mit entsprechender Verschlüsselung

⁷ unterstützt von einem Kamerasystem, welches leere Regalfächer erkennt und an das ESL-System meldet



Abbildung 1.5: Auszug verfügbarer Generation 2 SES-imagotag ESLs [3]

älteren Generationen Battery-Packs verwenden, bei denen mehrere Einzelzellen zu einer Einheit parallel verschweißt und mit einem standardisierten Steckverbinder versehen werden. Bei neueren Generationen wird auf solche Battery-Packs verzichtet, stattdessen werden Einzelzellen mit Hilfe von metallischen Federkontakten direkt mit der PCB verbunden und durch das Gehäuse an ihrer Position gehalten. So können Knopfzellen direkt von den Herstellern bezogen werden, weitere Verarbeitungsschritte sind nicht notwendig. Dadurch können auch die Kosten für die Batterien minimiert werden.

Natürlich spielt die Lebensdauer solcher batteriebetriebener Produkte eine gewichtige Rolle, in Verträgen wird meistens eine minimale oder nominale Batterielaufzeit garantiert. Da ein Batteriewechsel vom Kunden üblicherweise nicht vorgesehen ist, muss dafür gesorgt werden dass die ESLs die versprochene Lebensdauer mit der verbauten Batterie erreichen. Deswegen ist es wichtig, die erwartete Batterie-Lebensdauer der angebotenen ESLs so gut wie möglich abschätzen zu können, um einerseits Reklamationen durch hohe Ausfallraten im Feld ausschließen zu können, und andererseits realistische Werte für die Produktspezifikation und die zukünftige Entwicklung neuer Produkte zu erhalten. So macht es keinen Sinn 3 Knopfzellen zu verbauen, wenn auch 2 für die verlangte Lebensdauer ausreichen. Anders herum ist es nicht sinnvoll 5 Jahre Lebensdauer anzugeben, wenn eine verlässliche Abschätzung 8 Jahre ergibt.

1.3.1 Bestimmung der Lebensdauer von ESLs

Die erwartete Lebensdauer eines ESLs hängt von 2 Hauptfaktoren ab, die wiederum von weiteren Faktoren abhängen:

- *wie hoch ist der Energieverbrauch des ESL?*
- *welche Kombination an Batterien ist verbaut, und welche nutzbare Kapazität bietet diese?*

Der **Energieverbrauch** hängt von unterschiedlichen Eigenschaften des ESLs ab, unter anderem

- der verwendeten Displaytechnologie
- die verwendete Displaygröße, die neben der Displaytechnologie maßgeblich den Energieverbrauch des Displays bestimmt
- die verwendete Funktechnologie, die neben Reichweite auch den Energieverbrauch der Datenübertragung bestimmt
- die Betriebsparameter des ESLs, wie

- die Reaktionszeit des ESLs, also die Intervalle in denen das ESL mit dem Access Point kommunizieren muss
- die Anzahl an Displayänderungen pro Tag
- den Temperaturbereich, der den Energieverbrauch des Displays stark beeinflusst
- weitere Zusatzfunktionen des ESLs, wie NFC, LED-Signalisierung, etc.

Die **nutzbare Kapazität** der verbauten Batteriekonfiguration wird bestimmt durch

- den verwendeten Batterietyp
- die Batteriekonfiguration als mögliche Verschaltung mehrerer Einzelzellen
- die Umgebungsbedingungen, wie der vorgesehene Temperaturbereich
- das erwartete Stromprofil

Um die erwartete Lebensdauer eines ESLs abzuschätzen, muss nun einerseits der exakte Energieverbrauch des ESLs bekannt sein. Dazu wird der Energieverbrauch jedes Betriebszustandes messtechnisch erfasst, in dem sich das ESL befinden kann, wie beispielsweise eine Displayänderung, eine Datenübertragung, oder der Deep Sleep Ruhezustand. Wie sich der Energieverbrauch zusammensetzt, und wie der Energieverbrauch der einzelnen Betriebszustände gemessen werden kann, ist im folgenden Abschnitt 1.3.2 kurz beschrieben.

Aus definierten Normalbedingungen sowie Worst Case Bedingungen ist bekannt, wie lange sich das ESL in welchem Betriebszustand befinden kann. Aus dem Energieverbrauch pro Betriebszustand und dieser Information kann ein erwarteter Energieverbrauch bzw. Ladungsverbrauch pro Tag berechnet werden.

Andererseits muss die von der Batterie zur Verfügung gestellte Kapazität möglichst genau bekannt sein, um daraus die erwartete Lebensdauer als Quotient aus der verfügbaren Kapazität und dem Ladungsverbrauch pro Tag zu berechnen. Für die Batterie können ebenfalls Normalbedingungen und Worst Case Bedingungen verwendet werden, um Werte für eine *gute* bzw. normale Batterie und Werte für eine *schlechte* Batterie zu erhalten, und damit den erwarteten Bereich der Lebensdauer abschätzen zu können. Das ist wegen der großen Streuung zwischen den Batterien notwendig.

Nähere Informationen zu der Berechnung des Ladungsverbrauches pro Tag und der resultierenden Batterielebensdauer sind im folgenden Abschnitt 1.3.3 angegeben.

1.3.2 Erfassung des Energieverbrauchs von ESLs

Zur genauen Berechnung des Energieverbrauchs des ESLs wird dessen Energieaufnahme in allen möglichen Betriebszuständen vermessen, aufgezeichnet und so ausgewertet, dass ein erwarteter Ladungsverbrauch pro Tag bei bestimmten Bedingungen festgelegt werden kann. Über diesen erwarteten Ladungsverbrauch pro Tag und der im Rahmen dieser Arbeit zu ermittelnden nutzbaren Kapazität der unterschiedlichen Batteriekonfigurationen kann dann die erwartete Laufzeit errechnet werden. Für eine genaue Abschätzung muss der Energieverbrauch jedes einzelnen Betriebszustandes möglichst genau bekannt sein.

Dabei wird zwischen folgenden Betriebszuständen unterschieden:

Sleep: die Stromaufnahme während der Ruhephase des ESLs. In diesem Zustand verbringt das ESL den Großteil der Lebensdauer. Durch Deaktivieren sämtlicher Komponenten kann die Stromaufnahme auf typischerweise $<1 \mu\text{A}$ in diesem Zustand reduziert werden⁸. Diese Größe bestimmt maßgeblich den Gesamtenergieverbrauch des ESLs.

⁸Anmerkung: bei Flüssigkristalldisplays kommt zusätzlich der konstante Stromverbrauch des LC-Displays hinzu

Wakeup: die Energieaufnahme bei der periodischen kurzen Kommunikation mit der Infrastruktur.

Je nach gewünschter Reaktionszeit tritt diese Kommunikation mit einer gewissen Frequenz auf, in typischen Systemen werden 15 s gewählt, was ein guter Kompromiss zwischen Reaktionszeit und Energieverbrauch ist. Während dieser Kommunikation muss die Funkschnittstelle aktiviert werden, was bei der aktuell am häufigsten verwendeten Funktechnologie eine Stromaufnahme von etwa 26 mA bedeutet. Durch die Häufigkeit und die signifikante Stromaufnahme in diesem Zustand beeinflusst der Wakeup ebenfalls maßgeblich die Energieaufnahme des ESLs. Wird während diesem Wakeup von der Infrastruktur eine anstehende Aufgabe übermittelt, beispielsweise eine anstehende Bildübertragung, so wird der entsprechende Betriebszustand aktiviert und in einem weiteren Timeslot abgearbeitet.

Image Transmission: die Energieaufnahme bei der Bildübertragung über die Funkschnittstelle.

Je nach verwendetem Display, dessen Auflösung und Beschaffenheit kann die Übertragung des Bildes unterschiedlich lange dauern, dabei wird das in der Form von Paketen empfangene komprimierte Bild entschlüsselt, dekomprimiert und in einem externen Flash-Speicher abgelegt. Durch diese Abarbeitung ergibt sich ebenfalls eine Stromaufnahme von etwa 26 mA, jedoch mit unterschiedlicher Dauer. Im Falle einer schlechten Funkverbindung kann es auch zum Verlust und der Wiederübertragung einzelner Pakete kommen, die die Übertragungsdauer und damit die Energieaufnahme weiter erhöhen. Je nach verwendetem Display kann sich dabei die Übertragungsdauer zwischen weniger als einer Sekunde und bis zu über 30 Sekunden ergeben. Besonders bei größeren Displays und schlecht komprimierbaren (detaillierten) Bildern hat diese Bildübertragung einen signifikanten Einfluss auf die Energieaufnahme des ESLs. Die Häufigkeit dieser Bildübertragung geht aus der Spezifikation der Betriebsbedingungen hervor. Dabei muss das übermittelte Bild nicht unmittelbar am Display angezeigt werden, sondern kann für die spätere Verwendung auch nur im externen Speicher abgelegt werden.

Display Update: die Energieaufnahme bei der Darstellung eines Bildes am Display. Bei Flüssigkristalldisplays verschwindend gering, bei elektrophoretischen Displays maßgeblich am Energieverbrauch des ESLs beteiligt. Hier müssen höhere positive und negative Spannungen generiert werden, um die polarisierten Partikel im elektrophoretischen Display entsprechend bewegen zu können. Um das gewünschte Bild anzuzeigen, müssen diese Spannungen pulsformig in einer exakt kontrollierten Abfolge an die einzelnen Pixel angelegt werden, um vorher das alte Bild zu "löschen" und anschließend das neue Bild darzustellen. Dabei ist die exakte Abfolge stark von der Temperatur, der Anzahl an dargestellten Farben, und weiteren Eigenschaften des Displays abhängig. Durch diesen komplexen Ablauf dauert die Bilddarstellung je nach Displaymodell und Temperatur von einigen Sekunden bis zu über 30 Sekunden. Die Stromaufnahme ist dabei stark von der Displaygröße und dem dargestellten Bild abhängig.

Blink Pattern: die Energieaufnahme des ESLs bei der Signalisierung eines Blinkmusters über LEDs, die von neueren ESL-Generationen angeboten werden. Dabei kann unter unterschiedlichen Farben und Blinkmustern ausgewählt werden, die Helligkeit und damit der Stromverbrauch der LEDs ist momentan fest vorgegeben. Durch die vielen Möglichkeiten wird die Auswirkung der Blinkmuster und deren Häufigkeit üblicherweise als "Standard-Blinkverhalten", beispielsweise 2 definierte Blinkmuster pro Tag mit einer RGB-Farbe oder weiß, in die Energieberechnung mit aufgenommen. Projektspezifische Anforderungen an die Blinkmuster und die dadurch entstehenden Auswirkungen auf die Lebensdauer werden gesondert betrachtet.

Protokollspezifische Übertragungen: neben Bilddaten werden auch noch weitere Daten oder Kommandos über die Funkschnittstelle übertragen. Auf diese soll hier nicht näher eingegangen werden, im Allgemeinen handelt es sich dabei um einen Datenblock fixer Größe. Damit kann sich das ESL im System anmelden, neu mit dem System synchronisieren, Status- oder Messdaten an den Server übertragen, oder spezielle Steuerbefehle vom Server entgegennehmen. Diese Übertragungen werden in der Lebensdauerberechnung ebenfalls berücksichtigt,

fallen aber beim Energieverbrauch unter Normalbedingungen weniger ins Gewicht als die zuvor aufgeführten Betriebszustände.

Die getrennte Erfassung der einzelnen Betriebszustände ist notwendig, weil in der tatsächlichen Anwendung die Häufigkeit dieser Zustände von den in Abschnitt 1.3.1 angegebenen Eigenschaften des ESLs bestimmt wird, und so eine dynamische Berechnung der Lebensdauer je nach Betriebsbedingungen möglich ist. Zusätzlich verwenden die ESLs der gleichen Generation üblicherweise die gleiche Systemarchitektur und Plattform, daher werden alle ESLs die auf der gleichen Architektur basieren den gleichen Energieverbrauch des Prozessors und der Funkschnittstelle aufweisen, während ESLs, die die gleiche Displaytechnologie und Displaygröße verwenden den gleichen Energieverbrauch einer Displayänderung aufweisen werden. Dadurch kann eine mehrfache detaillierte Messung der gleichen Größe vermieden werden, bei neuen Modellen wird üblicherweise der betreffende Betriebszustand nur unter Randbedingungen vermessen und mit den bekannten Daten gegengeprüft, um das richtige Verhalten zu verifizieren.

Die Vermessung des Energieverbrauchs der ESLs wird einerseits manuell durchgeführt, mit Hilfe eines Strom-Messverstärkers, Oszilloskops und weiteren Werkzeugen. Dazu wird das zu testende Gerät (DUT) über Kommandos in die entsprechenden Betriebszustände gebracht und im realen Betrieb “live” vermessen. Dazu werden mit dem Oszilloskop die Kurven des Stromverbrauchs der einzelnen Betriebszustände über die unterschiedlichen Betriebsparameter (Versorgungsspannung, Temperatur, etc.) dargestellt und als Messwertetabelle exportiert. Abbildung 1.6 zeigt ein Beispiel für eine so aufgenommene Stromkurve. Mithilfe von Software kann dann am Rechner der interessante Teil der erfassten Stromkurve maskiert werden und dessen Ladungsverbrauch durch Aufintegrieren des Stroms berechnet werden. Diese Messungen werden mehrmals wiederholt, um eine statistische Aussage über den Ladungsverbrauch der einzelnen Betriebszustände zu erhalten. So kann abgeschätzt werden, in welchem Bereich sich die Ladungsaufnahme bewegen kann.

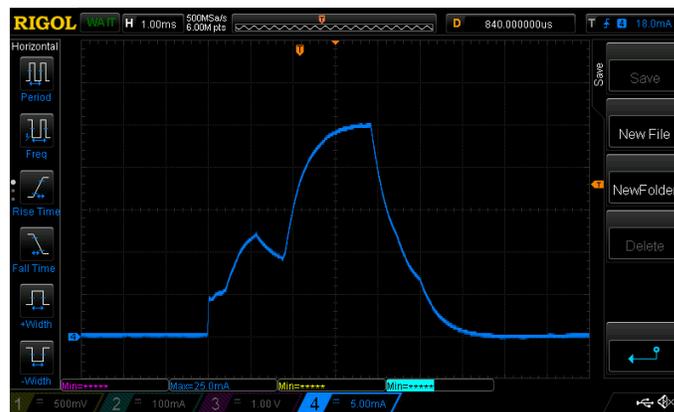


Abbildung 1.6: Mit Strom-Messverstärker und Oszilloskop aufgenommene Kurve des Stromverbrauchs in einem Betriebszustand

Durch die rasant wachsende Anzahl von unterschiedlichen ESL-Typen, vielen unterschiedlichen Betriebsbedingungen, und ständigen Optimierungen in der Firmware um den Energieverbrauch zu verbessern wurde diese aufwändige Vermessung des Energieverbrauchs automatisiert [4]. Dazu wurde ein Messsystem entwickelt, das selbstständig das ESL in unterschiedliche Betriebszustände bringen kann, die Stromaufnahme der Betriebszustände beliebig oft automatisiert erfassen und die relevanten Werte in ein Protokoll abspeichern kann, welches dann als Basis für die Berechnung der Lebensdauer dient. Dieses Messsystem kann über standardisierte Steckverbinder beliebige ESLs über Nadeladapter kontaktieren und so universell eingesetzt werden, und ist in Abbildung 1.7 dargestellt. Das Messsystem kann mit der Infrastruktur (ESL Server, Access Point) kommunizieren, um realistische Anwendungsfälle wie das Übertragen von Bildern über unterschiedliche Access

Points zu Vermessen. Über eine einfache Skriptsprache kann das Messsystem so gesteuert werden, dass beispielsweise unterschiedliche Versorgungsspannungen eingestellt werden, unterschiedliche Umgebungstemperaturen simuliert werden, oder unterschiedliche Firmware-Versionen automatisiert eingespielt werden können. Dadurch kann das Messsystem selbstständig eine Vermessung des ESLs beispielsweise über Nacht durchführen.



Abbildung 1.7: Automatisiertes Messsystem zur Erfassung des Energieverbrauchs von ESLs [4]

Sowohl die manuelle Vermessung als auch die automatisierte Vermessung eines ESLs führen zu Messwertetabellen inklusive statistischer Auswertung, die dann als Grundlage für die Abschätzung der Lebensdauer dieses ESLs führen. Ein Ausschnitt aus einer solchen Wertetabelle ist in Abbildung 1.8 gezeigt.

	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
6	Environmental conditions:											
7	room temperature											
8	Supply Voltage: power supply unit, 3 V (nominal battery voltage)											
9												
10	Procedure: use Automatic Measurement to calculate sleep current and charge consumption for display refresh at different temperatures											
11	Test Setup: use an oscilloscope and classification using Excel for the remaining measurements											
12												
13	Measurements using Automatic Measurement System:											
14	use script "01_sleep_image-receive_display-update_20inch_27inch_v1.0.txt" or "02_sleep_image-n											
15	use the current_consumption_Automatic_Measurement_template_v1.0.xlsx as temporary storage -											
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												
26												
27												
28												
29												
30												
31												
32												
33												
34												
35												
36												
37												
38												
39												
40												
41												
42												
43												
44												
45												
46												
47												
48												
49												
50												
51												
52												
53												
54												
55												
56												
57												
58												
59												
60												

Abbildung 1.8: Ergebnisse eines Messdurchlaufs für ein ESL (Ausschnitt)

1.3.3 Berechnung der erwarteten Lebensdauer

Ist der genaue Energieverbrauch des ESLs über sämtliche möglichen Betriebszustände und Betriebsbedingungen bekannt, und sind die vorgesehenen Betriebsbedingungen und deren Auftretswahrscheinlichkeit bekannt, so kann daraus der erwartete Ladungsverbrauch des ESLs pro Tag berechnet werden, indem die entsprechenden Betriebszustände mit ihrer Häufigkeit multipliziert werden. Dabei werden jeweils Kombinationen aus erwartungsgemäßen (*realistic*), schlechten (*worst case*), sowie guten (*best case*) Annahmen und Bedingungen verwendet und berechnet, um den möglichen Bereich des tatsächlichen Gesamtladungsverbrauchs bei unterschiedlichen Bedingungen abschätzen zu können. Dazu dienen die definierten Bedingungen, theoretische Berechnungen sowie Erfahrungswerte.

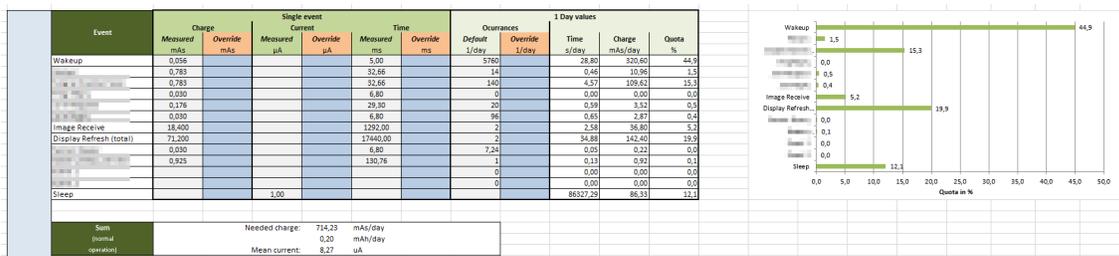


Abbildung 1.9: Aufistung der möglichen Betriebszustände und deren erwartete Häufigkeit bei bestimmungsgemäsem Betrieb, Berechnung des Ladungsverbrauchs pro Tag

Abbildung 1.9 zeigt eine solche Berechnung des Gesamtladungsverbrauchs pro Tag für ein ESL unter erwartungsgemäßen Bedingungen. Dabei werden alle auftretenden Betriebszustände und deren Häufigkeiten im bestimmungsgemäßen Betrieb berücksichtigt, inklusive einer grafischen Aufschlüsselung über die Beteiligung der Betriebszustände am Gesamtverbrauch. Der so errechnete Gesamt-ladungsverbrauch pro Tag kann im nächsten Schritt dazu verwendet werden, um die Lebensdauer bei einer bekannten nutzbaren Batteriekapazität zu berechnen.

Abbildung 1.10 stellt die Berechnung der erwarteten Lebensdauer dar. Dazu wird ausgehend von der Nominalkapazität der Batterie deren **nutzbare Kapazität** angegeben. Dieser Wert soll im Zuge dieser Arbeit für unterschiedliche Batterietypen ermittelt werden.

Von der nutzbaren Kapazität wird zunächst ein definierter Sicherheitsfaktor abgezogen, um etwaige Fehler in der Abschätzung oder Ausreißer betreffend der nutzbaren Batteriekapazität zu berücksichtigen, sowie bei der Berechnung noch etwas Sicherheitsabstand zum verlangten Minimalwert zu schaffen. Langfristiges Ziel ist es, diesen Sicherheitsfaktor möglichst weit reduzieren zu können, dazu sind aber Erfahrungen und Rückmeldungen aus dem Feld über das tatsächliche langfristige Verhalten der ESLs notwendig. Bis diese Rückmeldungen tatsächlich vorliegen muss aber der Großteil der ersten ausgelieferten ESLs das Ende der Lebensdauer erreicht haben, um die Korrektheit der Berechnung gegenzuprüfen. Nachdem die ersten Labels in größeren Stückzahlen erst seit 4 Jahren im Feld sind und die Rücklaufquote sehr gering ist, gibt es jedoch noch keine Rückmeldungen dazu. Das bedeutet auf der anderen Seite, dass die Berechnung der Lebensdauer dieser Labels nicht zu optimistisch war.

Im nächsten Schritt wird die voraussichtliche Lagerung der ESLs bis zur Auslieferung berechnet (*Hibernation*). In diesem Zustand erkennen die ESLs ein nicht vorhandenes Funknetzwerk und reduzieren die meisten Operationen, bis ein Funknetzwerk erkannt wird. Der Ladungsverbrauch während dieser Phase wird zusätzlich von der nutzbaren Kapazität abgezogen, um dem Kunden bei Auslieferung die volle Lebensdauer garantieren zu können.

Im letzten Schritt wird die Selbstentladung der Batterie berücksichtigt, die vom aktuellen Ladungs-

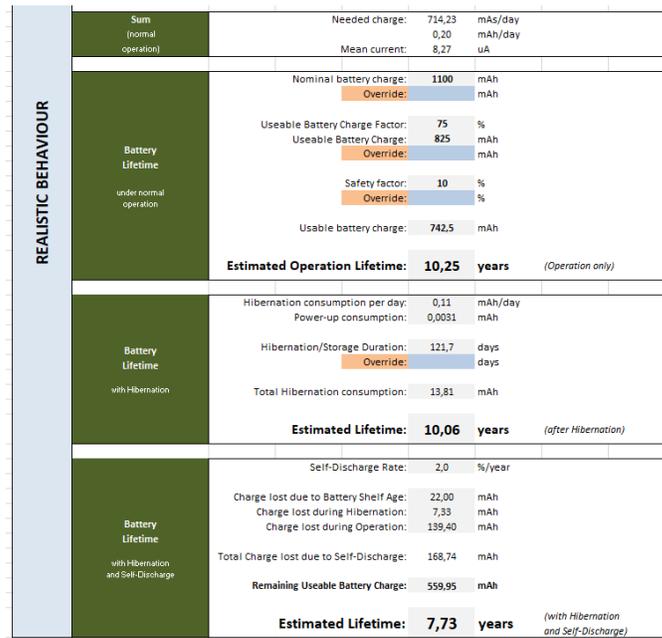


Abbildung 1.10: Berechnung der erwarteten Lebensdauer einer Batterie bei bekannter nutzbarer Kapazität, inklusive Lagerung und Selbstentladung

zustand abhängt. Dazu wird die Selbstentladung getrennt für die Lagerung der Batterie selbst, für die Lagerung der fertig assemblierten ESLs inklusive Batterie, sowie für den laufenden Betrieb ermittelt und ebenfalls von der nutzbaren Kapazität abgezogen. Als Endergebnis kann daraus die erwartete Lebensdauer im Feld berechnet werden, die die Lagerung sowie die Selbstentladung der Batterie berücksichtigt⁹. In Abbildung 1.11 ist die Verteilung des Ladungsverbrauches über diese unterschiedlichen Abschnitte in dunklen Farbtönen sowie in grün angegeben. Hier fällt auf, welchen großen Anteil die Selbstentladung der Batterie über derart lange Laufzeiten darstellt¹⁰.

Wie sich herausgestellt hat, stellt die Bestimmung der nutzbaren Kapazität der verwendeten Batterien eine deutlich größere Herausforderung und mehr Aufwand dar als die Vermessung des Energieverbrauchs der unterschiedlichen ESL-Typen. Die Abschätzung und Modellierung des Verhaltens der Batterien mit dem dazu benötigten Know-How und den verwendeten Messsystemen wurde über Jahre hinweg aufgebaut und verfeinert, und wird in dieser Arbeit präsentiert. Dazu wurden Verfahren entwickelt, um unterschiedliche Batterietypen oder Hersteller miteinander zu vergleichen und deren Eignung für das ESL-System zu evaluieren. Eine kurze Übersicht über die historische Entwicklung dieser Messverfahren ist im Abschnitt 1.4.5 aufgeführt.

Die momentan verwendeten Messmethoden und Messsysteme, sowie deren Funktionsweise, Aufbau und die daraus resultierenden Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.

1.3.4 Gegenprüfung/Verifikation der errechneten Lebensdauer

Um die Korrektheit der durchgeführten Abschätzungen und Berechnungen gegenzuprüfen, ohne dabei auf die Ergebnisse aus dem Feld warten zu müssen, wurden weitere Messungen durchgeführt,

⁹Anmerkung: diese Berechnung gilt für ein ESL der neuen Generation, wobei kein Blinken gewünscht wurde, dadurch entsteht die hohe Lebensdauer

¹⁰wobei eine Selbstentladung von 2% pro Jahr eher pessimistisch gewählt wurde

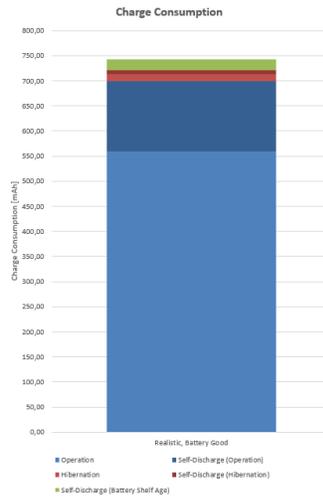


Abbildung 1.11: Aufschlüsselung des Ladungsverbrauchs einer Batterie nach Lagerung (grün, rot), Betrieb (blau), und Selbstentladung (dunkle Farbtöne)

um das Verhalten von ESLs und Batterien im Betrieb zu bestimmen. Dazu wurden unterschiedliche Methoden verwendet, die im Kapitel 3, Abschnitt 3.4 genauer beschrieben sind.

- **Continuous Acquiring:** Betrieb des ESLs für einen eingeschränkten Zeitraum an einer Konstantspannungsquelle entsprechend den normalen Betriebsbedingungen, dabei wird die Stromaufnahme erfasst und daraus die Ladungsaufnahme pro Tag hochgerechnet und mit den Ergebnissen der ESL-Vermessung verglichen, um diese gegenzuprüfen.
- **Endurance Tests:** Dauertests, bei denen mit Hilfe einer speziellen Firmware ESLs dazu benutzt werden, um kontinuierlich definierte Operationen in einer vorgegebenen Abfolge durchzuführen, bis die Batterie dadurch entleert wurde. Über interne Zähler kann anhand des Energieverbrauchs des ESLs die von der Batterie entnommene Ladung bis zum Ausfall der Batterie berechnet werden, und damit die nutzbare Kapazität gegengeprüft werden.
- **Real Time Tests:** Dauertests, die unter realistischen Betriebsbedingungen mit einer größeren Anzahl ESLs über Jahre hinweg in einem isolierten Setup durchgeführt werden. Während der Laufzeit werden kontinuierlich Diagnosedaten von den Labels an den Server übertragen und ausgewertet. Zusätzlich werden regelmäßig Labels entnommen und im Labor überprüft. Dabei wird auch die Restkapazität der Batterien festgestellt und mit berechneten Werten verglichen.
- **Weitere Tests:** weitere unterschiedlichen Teststellungen, bei denen ESLs im realen oder beschleunigten Betrieb sind und Diagnosedaten ausgewertet oder beim Batteriewechsel die entnommene Kapazität bestimmt wird.

1.4 Einführung zu Batterien für ESLs

Im folgenden Abschnitt sind grundlegende Informationen zu Batterien dargestellt, die speziell für die Anwendung in ESLs von Bedeutung sind. Nach einer kurzen Übersicht über die Anforderungen, die das ESL-System an die Batterien stellt, wird kurz erklärt welche Technologie und Batterietype für diese Anwendung ausgewählt wurde, und warum. Als Abschluss dieser Einführung, und als Startpunkt für die restliche Arbeit, wird zuletzt erklärt, warum die nutzbare Kapazität der Batterie

eine entscheidende Größe für diese Anwendung darstellt, wie diese beeinflusst wird, und wie diese bestimmt werden kann. Abschließend ist noch ein kurzer Überblick über die historische Entwicklung der Batterie-Testmethoden bei SES-imagotag aufgelistet.

Die gebräuchliche Nomenklatur, übliche Kenngrößen, sowie Details zu den Eigenschaften der verwendeten Batterietechnologien können im Kapitel 2 nachgeschlagen werden.

1.4.1 Anforderungen an Batterien im ESL-System

Um eine möglichst hohe Flexibilität und einfaches Handling durch das Personal zu erreichen, sollten die ESLs von Batterien versorgt werden. Da der Markt eine sehr große Auswahl an verfügbaren Batterietypen bietet, muss die passende Technologie und Ausführung anhand der Einsatzbedingungen ausgewählt werden:

Ausgangsspannung: Ziel ist es, das ESL direkt von einer Batterie oder einer Verschaltung mehrerer Batterien zu betreiben, d.h. es sollte kein zusätzlicher Spannungsregler zwischen Batterie und ESL verwendet werden, der zusätzliche Energie verbraucht und damit die nutzbare Kapazität der Batterie weiter reduziert, wenn nicht unbedingt nötig. Das ESL arbeitet im Bereich 2.3 V bis 3.6 V, die Batterie sollte also diese Spannung zur Verfügung stellen. Möglich wäre auch eine Verschaltung mehrerer Batterien in Serie, um die Spannung zu erhöhen.

Bauform: um das ESL so kompakt wie möglich zu gestalten, sollte die Batterie eine günstige Bauform haben, d.h. die Energiedichte soll hoch sein, und die mechanischen Abmessungen gering, um ein kompaktes Gehäuse zu ermöglichen. Insbesondere bei der Verschaltung mehrerer Batterien sollten diese günstig angeordnet werden können.

Kapazität/Energiedichte: die Kapazität der Batterie muss ausreichen, um die gewünschte Batterielaufzeit zu erreichen (üblicherweise 5 Jahre). Wenn es die Mechanik und die Batteriechemie zulässt, kann die Kapazität durch Parallelschaltung mehrerer Einzelzellen zu einem Batteriepack erhöht werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die tatsächlich nutzbare Kapazität je nach Batterietyp und Betriebsbedingungen stark von der angegebenen Nominalkapazität abweichen kann.

Belastbarkeit/Innenwiderstand: durch die Funkschnittstelle und das E-Paper-Display sowie weitere Verbraucher können kurze, aber hohe Stromimpulse auftreten, die je nach Modell und Displaygröße zwischen 30 mA und 150 mA liegen. Diese müssen von der Batterie bzw. dem Batteriepack geliefert werden können, ohne dass die Klemmenspannung aus dem Betriebsspannungsbereich des ESLs fällt. Zusätzlich dürfen wiederholte Stromimpulse der Batterie nicht schaden, da diese regelmäßig auftreten werden.

Entladekurve: die Entladekurve der Batterie sollte möglichst flach sein, d.h. es sollte möglichst viel Energie entnommen werden können bis die Ausgangsspannung der Batterie unter Last aus dem Betriebsspannungsbereich des ESLs fällt und somit das Ende der Lebensdauer erreicht ist.

Preis und Verfügbarkeit: durch den hohen Preisdruck im ESL-Markt muss die Batterie kostengünstig verfügbar sein um die Kosten des Gesamtprodukts gering zu halten. Außerdem muss die Batterie auch in großen Stückzahlen leicht verfügbar zu sein, um dadurch bei der Produktion keinen Flaschenhals zu schaffen.

Temperaturbereich: die Batterie muss je nach Einsatzzweck in unterschiedlichen Temperaturbereichen funktionieren (10°C bis 50°C, 0°C bis 50°C, -30°C bis 50°C).

Haltbarkeit: abgesehen von einer ausreichenden verfügbaren Kapazität muss auch die Haltbarkeit der Batterie einen Betrieb über Jahre hinweg ermöglichen. Diese Haltbarkeit umfasst mehrere Einflüsse und wird üblicherweise von den Herstellern als *Shelf Life* angegeben.

Chemische Stabilität: das Innenleben der Batterie muss chemisch so stabil sein, dass es zu keinen unerwünschten internen Reaktionen kommt, die die nutzbare Kapazität über Jahre hinweg verringern oder die Batterie vorzeitig zerstören. Beispielsweise läuft bei Zink-Luft-Batterien ab der Aktivierung ständig eine chemische Reaktion ab, die das aktive Material verbraucht. Dadurch ist die Zink-Luft-Batterie auch innerhalb weniger Monate “leer”, selbst wenn keine Energie extern entnommen wird.

Selbstentladung: abgesehen von der chemischen Stabilität wird es bei Batterien immer zu einer Selbstentladung kommen. Die Reduktion der nutzbaren Kapazität durch die Selbstentladung gewinnt über mehrere Jahre an Signifikanz und muss in der Lebensdauerberechnung berücksichtigt werden.

Mechanische Stabilität: neben der internen chemischen Stabilität ist auch die mechanische Stabilität der Batterie von Bedeutung. Über Jahre können Materialien spröde oder brüchig werden, ermüden oder sich deformieren (insbesondere bei Temperaturschwankungen), was zu einem veränderten Verhalten oder zu Problemen mit der Dichtigkeit der Batterien führen kann. Dabei ist nicht nur die mechanische Stabilität der äußeren Komponenten von Bedeutung, auch die internen Komponenten müssen berücksichtigt werden.

Sicherheit: nachdem die ESLs in unterschiedlichen Einsatzgebieten verwendet werden, unter anderem dem Lebensmittelmarkt, müssen die Batterien unbedenklich sein, aus chemischer und elektrischer Sicht. D.h. bei vorgesehener Benutzung darf es zu keinem Austreten von schädlichen Chemikalien kommen, und auch in einem möglichen absehbaren Fehlerfall darf es zu keiner Gefährdung durch die verwendeten Batterien kommen.

1.4.2 Auswahl der geeigneten Batterietechnologie für ESLs

Vergleicht man gebräuchliche Batterietypen anhand der oben aufgeführten Kriterien, schränkt sich die Auswahl passender Typen schnell ein. Insbesondere die gute Verfügbarkeit in sehr großen Volumen und die niedrigen Kosten sind ein sehr hartes Kriterium. Sortiert und filtert man die verfügbaren Technologien anhand Verfügbarkeit und Preis, scheiden die meisten “Exoten” bereits aus, übrig bleiben hauptsächlich Alkali-Mangan-Batterien sowie lithiumbasierte Batterien. Das spiegelt sich auch in der Tatsache wider, dass die meisten (ebenfalls preissensitiven) Consumer-Produkte auf genau diesen Batterietypen basieren. Auch die Literatur empfiehlt diese Typen aufgrund deren Eigenschaften und Verbreitung, siehe beispielsweise Abbildung 1.12 für eine kurze Auflistung von verbreiteten Batterietypen aus [5]. Diese sind auch in gebräuchlichen und geeigneten kompakten Bauformen verfügbar. Aus diesen Gründen wurde die Auswahl auf Alkali-Mangan-Batterien und Lithium-Batterien eingeschränkt.

Abbildung 1.13 zeigt typische Entladekurven gebräuchlicher Batterietypen. Besonders die Kurven der lithiumbasierten Primärbatterien (LiMnO_2 und LiSO_2) zeigen die gewünschten Entladekurven, mit einem flachen Verlauf und dem Großteil der abgegebenen Energie im Bereich 3.6 V bis 2.3 V. Abbildung 1.14 zeigt typische Werte für die Selbstentladung bei unterschieden Batterietypen. Wieder stehen die Lithiumbatterien mit den geringsten Selbstentladungsraten heraus.

Anmerkung zu Sekundärbatterien Sekundäre Batterien (wiederaufladbare Akkumulatoren) wurden durch den Mehraufwand den das regelmäßige Aufladen erfordert (Handling, Ladeelektronik, etc.), sowie die erhöhten Kosten und die deutlich höhere Selbstentladung für diesen Einsatzzweck ausgeschlossen.

TABLE 6.3 Characteristics of Batteries for Portable Equipment

	Primary batteries			Secondary batteries			
	Zn/alkaline/MnO ₂	Li/MnO ₂	Li/SO ₂	Nickel-cadmium	Lead-acid	Nickel-metal hydride	Lithium-ion
Nominal cell voltage, V	1.5	3.0	3.0	1.2	2.0	1.2	4.1
Specific energy (Wh/kg)	145	230	260	35	35	75	150
Energy density (Wh/L)	400	535	415	100	70	240	400
Charge retention at 20°C (shelf life)	3–5 years	5–10 years	5–10 years	3–6 months	6–9 months	3–6 months	9–12 months
Calendar life, years	—	—	—	4–6	3–8	4–6	5+ yrs
Cycle life, cycles	—	—	—	400–500	200–250	400–500	1000
Operating temperature, °C	–20 to 45	–20 to 70	–40 to 70	–20 to 45	–40 to 60	–20 to 45	–20 to 60
Relative cost per watthour (initial unit cost to consumer)	1	6	5	15	10	25	45

Abbildung 1.12: Tabelle geläufiger Batterietypen [5]

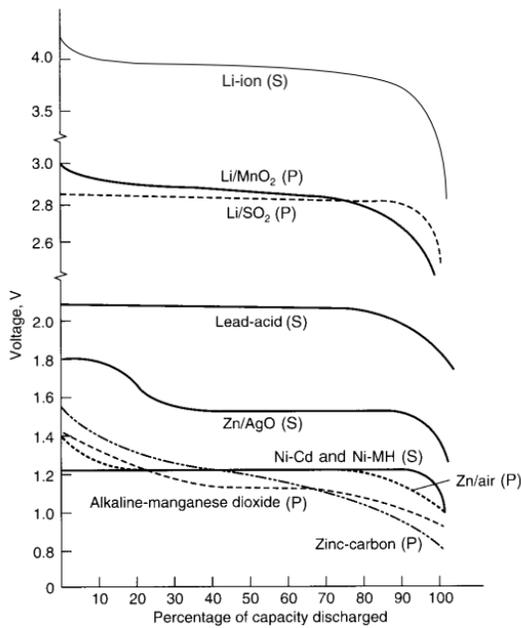


Abbildung 1.13: Typische Entladekurven geläufiger Batterietypen [5]

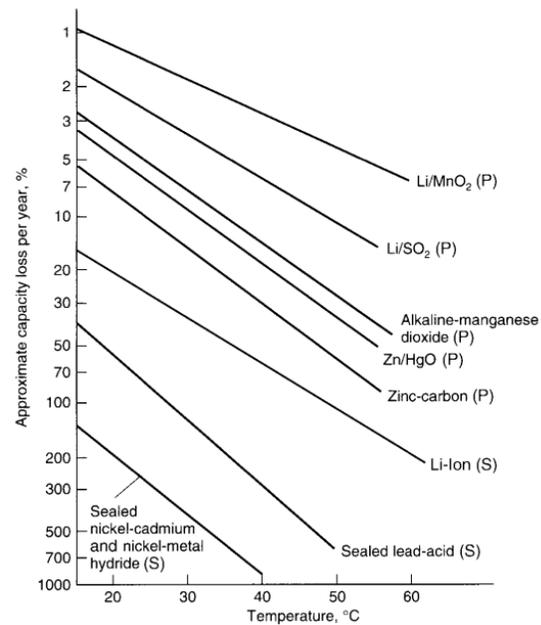


Abbildung 1.14: Typische Selbstentladungsraten für unterschiedliche Batterietypen bei unterschiedlichen Temperaturen [5]

1.4.3 Auswahl der geeigneten Batterietype für ESLs

Aufgrund des geeigneteren Verhaltens der Lithiumbatterien wurde für diesen Einsatzzweck die gebräuchliche Lithium-Mangandioxid-Knopfzelle vom Typ CR2450 und CR2477 gewählt. Die Bezeichnung *CR* beschreibt den verwendeten Aufbau aus Lithium und Mangandioxid, der Zahlencode steht für die mechanischen Dimensionen der Type. *CR2450* bedeutet 24 mm Durchmesser und 5,0 mm Höhe, *CR2477* steht infolgedessen für 7,7 mm Höhe. Pro Zelle wird eine Nominalkapazität von 550 mAh (CR2450) bzw. 1000 mAh (CR2477) bei einer Nennspannung von 3,0 V erreicht, als maximale Pulsströme sind 15 mA angegeben.

Diese Typen werden in Massen produziert, sind sehr günstig verfügbar, haben eine hohe Energiedichte und erreichen damit die benötigten Kapazitäten, wenn sie in den richtigen Konfigurationen

verbaut werden. Die Lithiumbatterien arbeiten bereits mit einer passenden Ausgangsspannung und können damit direkt zur Versorgung der ESLs verwendet werden, die dazu benötigten Pulsströme lassen sich durch die Parallelschaltung der Einzelzellen ebenfalls erreichen. Die dünne Knopfzellen-Bauform eignet sich gut für schlanke Preisschilder, ist robust und intrinsisch sicher.

Je nach Modell werden pro ESL 1-6 Knopfzellen in Parallelschaltung verbaut, wobei für die meisten Modelle 2 Knopfzellen verwendet werden, gefolgt von 3 Knopfzellen. Neben den Standardvarianten dieser Knopfzellen werden für spezielle Einsatzzwecke wie ESLs für den Tiefkühlbereich auch speziell optimierte Lithium-Mangandioxid-Knopfzellen verwendet, die inzwischen von den Herstellern ebenfalls angeboten werden. Weiters finden neben den üblichen Knopfzellen auch Lithium-Mangandioxid-Pouchzellen Verwendung, die durch deren Aufbau gegenüber Knopfzellen einen deutlich niedrigeren Innenwiderstand aufweisen und sich damit besser für Anwendungen mit hohen Stromspitzen oder niedrigen Betriebstemperaturen eignen.

Im Kapitel 2 finden sich genauere Informationen über das Verhalten dieser Batterien, sowie detaillierte Vergleiche zwischen den verfügbaren Typen und eine ausführlichere Beschreibung der Gründe für die Wahl der Lithium-Mangandioxid-Zelle.

1.4.4 Ermittlung der nutzbaren Kapazität von Batterien

Wie bereits beschrieben kann die *nutzbare Kapazität* einer Batterie in einem gewissen Anwendungsfall deutlich von der im Datenblatt angegebenen *Nominalkapazität* abweichen. Den größten Einfluss auf die tatsächlich nutzbare Kapazität haben einige Faktoren:

Batterietyp und die genaue chemische Zusammensetzung der Zelle: gleiche Batterietypen von unterschiedlichen Herstellern zeigen teilweise deutlich unterschiedliches Verhalten, ebenso können unterschiedliche Generationen der gleichen Type vom gleichen Hersteller deutliche Unterschiede aufweisen.

Konfiguration in der die Einzelzellen verbaut werden: eine Einzelzelle hat im Allgemeinen *nicht* die halbe nutzbare Kapazität eines Packs aus 2 parallelen Zellen - durch die Parallelschaltung teilt sich auch der Laststrom auf, weswegen im Verbund die nutzbare Kapazität pro Zelle üblicherweise höher ist als die nutzbare Kapazität einer Einzelzelle unter den gleichen Bedingungen.

Höhe und das Profil des Laststromes: je höher der Laststrom, desto höher der Spannungseinbruch durch den Innenwiderstand, der zum Unterschreiten der Minimalausgangsspannung führt, wobei jedoch sehr kurze Spitzen für die Batteriechemie "unsichtbar"¹¹ sein können.

Ruhephasen zwischen Phasen mit erhöhtem Laststrom: kann sich die Batterie zwischen Strompulsen nicht erholen, leidet die nutzbare Kapazität darunter.

Umgebungstemperatur: je niedriger die Umgebungstemperatur, desto weiter sinkt die Leerlaufspannung. Zusätzlich steigt der Innenwiderstand, wodurch die Minimalausgangsspannung der Batterie früher erreicht wird.

Vorgeschichte der Batterie: durch lange Lagerung bei hohen Temperaturen oder ungünstige Transportbedingungen bei hohen Temperaturen kann es zu einer übermäßigen Selbstentladung der Batterie kommen, durch lange Ruhephasen mit sehr geringem Strom kann es zu einer Passivierung der Batterie kommen, was sich durch einen temporär erhöhten Innenwiderstand bemerkbar macht, auch weitere Effekte sind möglich.

¹¹sehr kurze Strompulse können aus der *Doppelschichtkapazität* der Batterie entnommen werden, siehe Kapitel 2 für Details

Durch die komplexen Zusammenhänge und Abläufe in der Zelle während der Entladung und Lagerung ist es schwierig, genaue Angaben über das Verhalten der Zellen bei den unterschiedlichen oben angeführten Bedingungen zu machen, insbesondere bei einer intermittierenden Belastung. Das bestätigt sich auch bei Rückfragen an die Hersteller, bei denen diese Fragen meist unbeantwortet bleiben oder nur sehr grob abgeschätzt werden können. Simulationen stellen sich aus den gleichen Gründen ebenfalls als schwierig dar, die genauen Abläufe in der Batterie sind dazu noch zu wenig erforscht¹².

Die aussagekräftigste Lösung, das Verhalten der jeweiligen Batterien in den unterschiedlichen Szenarien zu evaluieren, liegt in ausführlichen Tests mit entsprechendem Stichprobenumfang unter den jeweiligen Testbedingungen. Die entsprechenden Testsysteme vorausgesetzt, lassen sich diese Evaluierungen automatisiert im Hintergrund durchführen. Das ist insofern äußerst wichtig, da Testreihen mit einer entsprechenden Anzahl Samples unter realistischen Bedingungen sehr lange dauern. Das Ziel dieser Arbeit ist es deswegen, ein automatisiertes Testsystem zu entwerfen, welches eine große Anzahl an Samples unter kontrollierten Bedingungen so lange definiert entlädt, bis ein Abbruchkriterium erfüllt wird, um die nutzbare Kapazität der Batterien zu ermitteln.

Durch die geringen Ströme und den niedrigen Ladungsverbrauch in der Anwendung, und durch die entsprechend lange Laufzeit der Produkte, würde es unter realistischen Bedingungen zu jahrelangen Testdurchläufen kommen. Nachdem eine kontrollierte Durchführung so langer Testdurchläufe unrealistisch ist, und Ergebnisse schneller verfügbar sein sollen, müssen beschleunigte Testszenarien definiert werden, die in vertretbarer Zeit zu Ergebnissen führen, jedoch auch realitätsnah sein sollen. Diese beschleunigten Testszenarien sollen in den automatisierten Testsystemen abgearbeitet werden, und deren Ergebnisse innerhalb eines gewissen Rahmens Aussagen über das tatsächliche Verhalten in der Anwendung liefern.

Diese Ergebnisse sollen mit verschiedenen Methoden mit dem tatsächlichen Verhalten der ESLs gegengeprüft werden, um die Aussagen zu verifizieren und die Modelle zu bestätigen.

Aufgabe dieser Arbeit ist es damit, ein automatisiertes Testsystem zu entwerfen das die oben genannten Bedingungen simulieren kann, sowie die Definition beschleunigter Tests, die das Testsystem abarbeiten soll, um in vertretbarer Zeit zu Ergebnissen zu gelangen. Diese Ergebnisse sollen auf unterschiedlichen Wegen mit dem tatsächlichen Verhalten in der Anwendung gegengeprüft werden, um das so ermittelte abgeschätzte Verhalten zu bestätigen.

Die daraus gewonnenen Informationen sollen ebenfalls dazu genutzt werden, um Verfahren und Schranken für eine laufende Qualitätskontrolle der gelieferten Batterien zu ermöglichen, sowie Richtwerte und Schranken für die Qualifizierung von weiteren Batterietypen und -herstellern zu liefern. Weiters soll untersucht werden, ob aus den Erkenntnissen eine zuverlässige Abschätzung des momentanen Ladezustandes der Batterie im ESL selbst anhand der verfügbaren Messwerte möglich ist, oder wie ein solches Verfahren zur zuverlässigen Online-Abschätzung ermöglicht werden könnte.

Um zu diesem Ziel zu kommen wurden in der Vergangenheit bereits einige Messmethoden evaluiert und Messsysteme aufgebaut. Diese sind im Abschnitt 1.4.5 kurz übersichtsartig dargestellt.

1.4.5 Historische Entwicklung der Batteriequalifizierung bei SES-imagotag

Nachdem die nutzbare Batteriekapazität von Anfang an als einer der kritischsten und einflussreichsten Parameter beim Entwurf von ESLs identifiziert wurde, gab es von Anfang an Bemühungen, die verfügbare Kapazität der Knopfzellen festzustellen. In diesem Abschnitt werden diese Messmethoden kurz chronologisch aufgezählt und beschrieben. Die Messmethoden dahinter sind im Abschnitt 3.5 im Detail beschrieben.

¹²wiederholte Aussage von Batterieherstellern

Entladung über konstanten Widerstand und Mitprotokollieren der Batteriespannung

Die erste einfache Methode zur Bestimmung der Batteriekapazität war die Entladung der Batterien über einen konstanten Widerstand mit Protokollierung der Batteriespannung. Dazu kam ein USB-Datenerfassungsgerät zum Einsatz, welches periodisch die Spannung an bis zu 16 Batterien erfasste, die mit Widerständen belastet waren, und diese Messwerte in eine Datei protokollierte. Die so aufgezeichneten Spannungs-Zeit-Kurven konnten bei bekanntem Widerstand in Kurven umgerechnet werden, die den Verlauf der Batteriespannung in Abhängigkeit der entnommenen Kapazität darstellten.

Die Kurven gaben wichtige Informationen über die tatsächliche Nominalkapazität der Batterien, es wurde allerdings schnell klar dass das Verhalten der Batterie bei einer pulsformigen Belastung für diese Anwendung deutlich aussagekräftiger war und genauer untersucht werden sollte. Das gleiche Messprinzip wird allerdings immer noch verwendet, um einfache Qualitätskontrollen der Batterien durchzuführen, sowie die Restkapazität teilweise entladener Batterien oder die Selbstentladung von Batterien zu bestimmen.

Pulsformige Belastung und Mitprotokollieren der Batteriespannung Im nächsten Schritt sollte der bereits bestehende Messaufbau für die Entladung über einen konstanten Widerstand so umgebaut werden, dass die Belastung in einem festen Intervall erhöht werden kann, indem ein zweiter Widerstand parallel geschaltet wird. Diese Belastung sollte vom USB-Datenerfassungsgerät gesteuert werden, um so ein einfaches pulsformiges Stromprofil untersuchen zu können.

Nachdem der bereits bestehende Messaufbau jedoch weiter für Konstantentladungen benutzt werden sollte, wurde diese Idee wieder verworfen und stattdessen eine weitere Entladestation gebaut, die beliebige Stromprofile erzeugen und die resultierende Batteriespannung entsprechend schnell abtasten konnte. Mit dieser Entladestation sollte eine große Bandbreite an Tests möglich sein.

Arbiträre Belastung und Messung der Batteriespannung Um beliebige arbiträre Belastungen erzeugen zu können, wurde ein Mikrocontroller vom Typ MSP430 dazu genutzt, um mithilfe der eingebauten schnellen Digital-Analogwandler Präzisions-Stromsenken anzusteuern. Diese Stromsenken wurden mit den zu testenden Batterien verbunden, die resultierende Batteriespannung wurde über die eingebauten schnellen Analog-Digitalwandler erfasst. Die Stromprofile konnten über eine serielle Schnittstelle in einem großen Bereich definiert werden, die erfassten Messdaten wurden ebenfalls über die serielle Schnittstelle ausgegeben.

Zur Konfiguration der Stromprofile und zum Protokollieren der Messdaten wurde ein modifizierter SES-imagotag Access Point benutzt, der die Messdaten über die serielle Schnittstelle entgegen nimmt und über eine Netzwerkverbindung auf einem entfernten Server ablegt. Die so gespeicherten Spannungs-Zeit-Kurven für arbiträre Belastungen konnten wiederum mit weiteren Werkzeugen in Kurven umgerechnet werden, die den Verlauf der Batteriespannung in Abhängigkeit der entnommenen Kapazität darstellten. Zusätzlich konnten bei pulsformigen Stromprofilen Kurven berechnet werden, die den Verlauf des Innenwiderstandes in Abhängigkeit der entnommenen Kapazität darstellten.

Dieses Messsystem lieferte wertvolle Erkenntnisse über das Verhalten von Batterien bei unterschiedlichen pulsformigen Belastungen. Der große Einfluss des Innenwiderstandes und die starken Abhängigkeiten von vielen Parametern wie Stromprofil, Batteriekonfiguration, Umgebungsbedingungen wie Temperatur, etc. wurden durch diese Messungen deutlich. Schnell wurde jedoch auch klar, dass wegen der hohen Streuungen zwischen den Batterien die verfügbaren zwei Kanäle deutlich zu wenig waren, um statistisch relevante Aussagen zu treffen. Das waren wichtige Inputs für die Konzeptionierung der nächsten Testsysteme.

Durch die fehleranfällige Systemarchitektur aus mehreren Komponenten wurde auch beschlossen,

in Zukunft nur mehr auf Insellösungen zu setzen, um Datenverlust durch Stromausfall, Netzausfall, oder Serverwartung zu vermeiden.

Bildung eines mathematischen Batteriemodells anhand der Messdaten Da die Durchlaufzeiten für realitätsnahe Batteriemessungen sehr lang waren, gab es die Idee, das Verhalten der Batterien zu simulieren, anstatt viele unterschiedliche Testszenarien durchzuarbeiten. Die Literatur schlägt gängige Modelle für galvanische Zellen vor, diese sollten als Basis dienen. Dazu wurde ein solches Modell an die Anwendung angepasst und in Matlab/Simulink/Simscape implementiert. Über die Matlab Curve Fitting Toolbox wurde eine Parameterabschätzung anhand der verfügbaren Messdaten der durchgeführten Pulsbelastungen durchgeführt, um das erstellte Modell auf die Messergebnisse zu trainieren.

Nach dem Training waren Modellparameter verfügbar, die zur Simulation des Batterieverhaltens bei unterschiedlichen Stromprofilen verwendet werden konnten. Dazu wurden die Modellparameter für einen bestimmten Batterietyp in das Modell geladen, um dann das Verhalten der Ausgangsspannung dieser Batterietype in Abhängigkeit des Stromprofils zu simulieren. Das funktionierte auch gut, solange das zu simulierende Stromprofil ähnlich dem Stromprofil war, welches zur Erzeugung der Trainingsdaten verwendet wurde. Wurden jedoch Simulationen mit deutlich niedrigeren oder höheren Strömen durchgeführt, wichen die Simulationsergebnisse deutlich von den Messergebnissen tatsächlicher Batterien ab. Auch bei abweichenden Umgebungsbedingungen wie der Temperatur kam es zu deutlichen Abweichungen.

Das spiegelt das unterschiedliche Verhalten der Batterien bei unterschiedlichen Stromprofilen und Umgebungsbedingungen wider, welches durch Messungen unter den entsprechenden Bedingungen erfasst werden sollte. Für die Simulation bedeutet das, dass noch zusätzliche Abhängigkeiten der Modellparameter hinzugefügt werden müssen, wie das Stromprofil oder die Temperatur. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde die Arbeit an der Batteriesimulation deswegen pausiert, um stattdessen das Verhalten der Batterien unter unterschiedlichen Bedingungen genauer messtechnisch zu erfassen und zu verstehen. Wurden genug Erkenntnisse darüber gewonnen, können diese auch wieder in ein zukünftiges Batteriemodell einfließen.

Erste Version der Konstantentladestation Als nächster Schritt wurden die Erkenntnisse aus dem Betrieb der bestehenden Entladestationen genutzt, um eine neue Konstantentladestation zu konzipieren. Hauptaugenmerk lag darauf, dass die Entladestation deutlich mehr Messkanäle bietet, flexibler und benutzerfreundlicher ist, sowie ausfallsicherer als die Vorgänger. Eine ähnliche Lösung wie beim ersten Aufbau zur Protokollierung der Batteriespannung bei Belastung durch einen konstanten Widerstand wurde gewählt, durch Multiplexbetrieb wurde die Anzahl der Messkanäle jedoch auf 128 deutlich erhöht. Die Software wurde von Grund auf neu gestaltet, um die benötigten Funktionen in Form einer einfach bedienbaren grafischen Benutzeroberfläche zu bieten und die Probleme der Vorgängerversionen zu beheben. Sämtliche Parameter können einfach eingestellt werden, die aktuellen Messdaten werden übersichtlich dargestellt und sauber protokolliert. Zusätzlich wurde das System als reine Insellösung konzipiert, um von der Außenwelt unabhängig zu sein und damit die Ausfallsrate deutlich zu reduzieren, und wurde für den unterbrechungsfreien Dauerbetrieb ausgelegt.

Dieses System entspricht bis auf wenige Verbesserungen dem derzeit verwendeten Konstantentladesystem, welches wichtiger Bestandteil der Batterietest-Infrastruktur ist. Der genaue Aufbau und die Arbeitsweise dieses Systems wird in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben.

Erste Version der Pulsentladestation Mit einer ähnlichen Systemarchitektur wie bei der ersten Konstantentladestation wurde auch die erste Pulsentladestation konzipiert und gebaut. Beide

Systeme greifen dabei auf die gleiche PCB zurück, die über unterschiedliche Bestückungsvarianten sowohl Puls- als auch Konstantentladungen ermöglicht. Im Vergleich zur Konstantentladestation bietet die Pulsentladestation wegen der benötigten gleichzeitigen Messung aller Kanäle und der höheren Abtastrate nur 32 Messkanäle. Sollte diese Anzahl zu wenig sein, müssen mehrere Pulsentladestationen parallel betrieben werden.

Die Pulsentladestation arbeitet mit ähnlichen Präzisionsstromsenken wie die Arbiträrenladestation, bietet dabei aber eine deutlich höhere Anzahl an Messkanälen und eine komfortablere Bedienung. Die Software ist sehr ähnlich zur Konstantentladestation und bietet eine benutzerfreundliche Konfiguration sämtlicher Parameter, eine übersichtliche Darstellung der momentanen Messdaten und Ergebnisse, sowie eine saubere Protokollierung der Messergebnisse. Gleich wie die Konstantentladestation ist dieses Testsystem für den unterbrechungsfreien Dauerbetrieb ausgelegt, und als von der Außenwelt unabhängige Insellösung konzipiert.

Dieses Pulsentladesystem ist nach wie vor im Dauerbetrieb und liefert wertvolle Erkenntnisse über das Verhalten von Batterien. Gleich wie beim Konstantentladesystem gibt es inzwischen einen Nachfolger der einige Vorteile gegenüber dieser ersten Version bietet, jedoch momentan noch nicht im Dauerbetrieb ist, sondern für die Entwicklung von automatisierten kombinierten Konstant- und Pulsentladesystemen für die Wareneingangskontrolle in der Fertigung dient.

Der genaue Aufbau und die Funktionsweise dieses Systems wird ebenfalls in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben.

Kapitel 2

Theorie

Dieser Abschnitt enthält Begriffserklärungen, die Definition wichtiger Kenngrößen sowie theoretische Informationen über Batterien (*galvanische Zellen*) allgemein und im speziellen über die verwendeten Technologien und deren Arbeitsweise und Eigenheiten. Diese Informationen dienen als Grundlagen für die Methoden und Anwendungen, die in den folgenden Kapiteln beschrieben werden.

2.1 Begriffserklärung und Kenngrößen von Batterien

Im folgenden Abschnitt sollen gebräuchliche Begriffe und Kenngrößen die im Zusammenhang mit Batterien in dieser Arbeit oder im Allgemeinen verwendet werden in Kurzform definiert werden [5]:

Elektrode: ein chemisch aktives und elektrisch leitfähiges Element in der Zelle, in dem Energie in chemischer Form gespeichert ist, die in elektrische Energie umgewandelt wird. Während der Entladung wird die Elektrode abgebaut oder umgewandelt.

Anode: die negative Elektrode. Hier werden durch die ablaufende chemische Reaktion (Oxidation) Elektronen frei.

Kathode: die positive Elektrode. Hier können durch die ablaufende chemische Reaktion (Reduktion) Elektronen aufgenommen werden.

Elektrolyt: Flüssigkeit oder Festkörper, in der bewegliche Ionen gelagert sind. Dient zum Ladungstransport zwischen Anode und Kathode. Üblicherweise flüssig, um einen geringeren Widerstand für die Ionenbewegung zu erreichen, und damit einen geringen Innenwiderstand der Zelle. Darf nicht elektrisch leitfähig sein, um die Elektroden nicht kurzzuschließen.

Galvanische Zelle: oder kurz nur *Zelle*, bezeichnet die Kombination aus Anode, Kathode und Elektrolyt. Durch diese Kombination kommt es zu einer leitfähigen Verbindung zwischen Anode und Kathode über den Elektrolyt, durch unterschiedliche Positionen in der elektrochemischen Spannungsreihe der Elektrodenmaterialien stellt sich eine Potentialdifferenz zwischen den Elektroden ein (durch Redox-Reaktionen kommt es zu einem Elektronenüberschuss an der Anode, und zu einem Elektronenmangel an der Kathode), die als Spannungsquelle nutzbar ist. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Die Eigenschaften und Menge der Elektrodenmaterialien bestimmen die verfügbare Kapazität der Zelle. Die Bestandteile der Zelle sollten so gewählt werden, dass eine hohe Ausgangsspannung bei einer hohen Kapazität

entsteht, während die Zelle chemisch stabil ist (keine Selbstzersetzung, geringe Selbstentladung) und möglichst unabhängig von äußeren Einflüssen wie Laststrom, Temperatur, etc. arbeitet. Dabei muss auch auf Sicherheit, Preis, Verfügbarkeit, etc. geachtet werden.

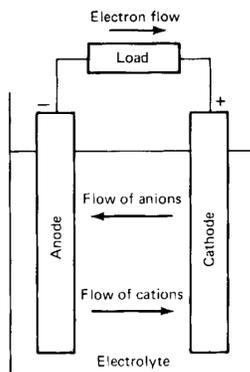


Abbildung 2.1: Prinzipieller Aufbau einer galvanischen Zelle [5]

Separator: elektrisch nicht leitfähiges Material, das zwischen Anode und Kathode in die Zelle eingebracht wird, um interne Kurzschlüsse zu vermeiden. Der Elektrolyt muss den Separator durchdringen können, um einen Ladungstransport zwischen Anode und Kathode zu ermöglichen. In Knopfzellen ist der Separator üblicherweise mit flüssigem Elektrolyt getränkt.

Batterie: genaugenommen eine Verschaltung mehrerer galvanischer Zellen, um eine gewünschte Ausgangsspannung durch Serienschaltung oder Gesamtkapazität durch Parallelschaltung zu erreichen, beispielsweise Verschaltung von 6 Alkalizellen in Serie zu einer 9 V-Batterie. Die einzelnen Zellen sind üblicherweise mechanisch fest zu einer Batterie verbunden und sollten nicht getrennt werden. *Batterie* wird umgangssprachlich meistens auch als Synonym für eine einzelne *Zelle* verwendet.

Kontakte, Klemmen, Terminals: Anschlüsse an der Außenseite der Batterie/Zelle, die elektrisch leitfähig mit den Elektroden verbunden sind, für eine Verbindung mit dem Verbraucher. In manchen Fällen stellen die Elektroden selbst die Außenseite der Zelle dar.

Knopfzelle: eine verbreitete, besonders kompakte Bauform einer Batterie, die für kleinere Leistungen ausgelegt ist. Abbildung 2.2 zeigt den schematischen Aufbau einer Knopfzelle.

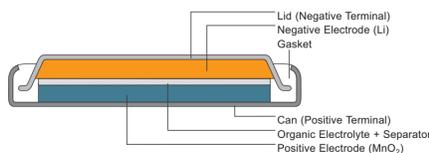


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau einer Lithium-Mangandioxid-Knopfzelle [6]

Primäre Zelle/Batterie: die enthaltene Energie ist in chemischer Form gespeichert und kann nur entnommen werden, d.h. die Zelle ist nach der Entladung "verbraucht" und muss entsorgt werden. Gegenüber sekundären Batterien bieten primäre Batterien üblicherweise bessere Eigenschaften zu einem günstigeren Preis. Wird versucht, primäre Batterien zu laden, kann es zu chemischen Reaktionen kommen, die zur Zerstörung der Batterie und zu Schäden an der Umgebung führen können (Ausgasen, Aufplatzen, Austritt von Elektrolyt, Hitzeentwicklung, Explosion, Brand).

Sekundäre Zelle/Batterie: ist so aufgebaut, dass die Redox-Reaktion in der Zelle rückgängig gemacht werden kann, d.h. durch Anlegen einer äußeren Spannung kann die sekundäre Batterie wieder aufgeladen werden, wobei die Anzahl der Ladezyklen begrenzt ist und die Eigenschaften der Batterie sich mit zunehmenden Ladezyklen verschlechtern. Wird auch als *Akkumulator* bezeichnet. Bieten oft sehr hohe Energiedichte und hohe Nennströme.

Laststrom, Belastung: der Strom, der an den Klemmen von der Batterie entnommen wird.

Laststromprofil: sich zeitlich ändernder Laststrom (üblicherweise periodisch)

Entnommene Ladung: integrale Größe des Laststroms über die Zeit ($Q = \int I dt$)

Ausgangsspannung, Klemmenspannung: die elektrische Spannung, die sich durch die Potentialdifferenz zwischen Anode und Kathode an den Klemmen der Batterie einstellt. Abhängig von den verwendeten Materialien, der Belastung der Batterie, und weiteren Umgebungsbedingungen (Temperatur, Ladungszustand, etc.).

Innenwiderstand: durch eine Vielzahl von Faktoren sinkt die Ausgangsspannung der Zelle/Batterie, wenn dieser ein Laststrom entnommen wird. Dieser Spannungsabfall kann durch einen Innenwiderstand der Batterie modelliert werden, der allerdings neben dem Laststrom auch von vielen weiteren Parametern abhängt, wie dem Ladezustand der Batterie, der Umgebungstemperatur, der Vorgeschichte, etc. Dieser Innenwiderstand setzt sich zusammen aus dem elektrischen Widerstand der Bestandteile der Zelle, sowie dem Ionenwiderstand der Zelle. Der Ionenwiderstand wird dabei von der Ionenleitfähigkeit des Elektrolyten, der Ionenmobilität, der Porosität und aktiven Oberfläche der Elektroden sowie weiteren Faktoren bestimmt, und zusammengefasst als *Polarisation* der Zelle bezeichnet. Der Innenwiderstand und dessen Bestimmung wird im Kapitel 3 in Abschnitt 3.1.4 näher beschrieben.

Leerlaufspannung: die elektrische Spannung, die sich ohne Last zwischen den Klemmen der Batterie einstellt. Auch als *electromotive force (EMF)* bezeichnet.

Lastspannung: im Allgemeinen die Klemmspannung, die sich bei der Belastung mit einem definierten Laststrom einstellt.

Nominalspannung, Nennspannung: nicht allgemein definierter Begriff, der die Klemmenspannung unter bestimmten Bedingungen angibt. Oft entspricht die *Nominalspannung* der Klemmenspannung bei einem definierten *Nominalstrom* über einen großen Bereich der Lebensdauer der Batterie¹.

Entladeschlussspannung, Entladeendspannung: auch *cut-off voltage*, die Klemmenspannung der Batterie, die das Ende der Lebensdauer definiert. Unter dieser Spannung gilt die Batterie als entladen und sollte nicht mehr verwendet werden. Diese Spannung ist üblicherweise der Endwert, bis zu der die Nominalkapazität, Entladungskurven, etc. angegeben werden.

Nominalstrom, Nennstrom: auch *standard discharge current*, der Laststrom der Batterie, der zur Definition von Nominalkapazität, Nominalspannung, Spannungsverlaufs-Entladekurven, etc. angegeben wird. Der durchgehende Laststrom, für den die Batterie ausgelegt ist.

Max. Dauerstrom: auch *maximum continuous load*, der maximal erlaubte kontinuierliche Laststrom, der zu keiner Zerstörung oder Fehlfunktion der Batterie führt. Üblicherweise so angegeben, dass ein gewisser Anteil der Nominalkapazität mit diesem Laststrom immer noch erreicht wird.

Max. Pulsstrom: auch *maximum pulsed load*, der maximal erlaubte Pulsstrom, der zu keiner Zerstörung oder Fehlfunktion der Batterie führt. In Verbindung mit einer maximalen Pulsdauer und Pulsfrequenz angegeben. Üblicherweise so angegeben, dass bei einem gewissen

¹am Beispiel einer neuwertigen Lithiumbatterie vom Typ CR2450: Leerlaufspannung 3.3 V, Nominalspannung lt. Datenblatt 3.0 V

Ladezustand bei Anwendung dieses Pulses die Entladeschlussspannung nicht unterschritten wird.

Kurzschlussstrom: der maximale Strom, den die Zelle/Batterie im Falle eines Kurzschlusses liefern kann. Je nach Energiegehalt und Innenwiderstand kann dieser Strom länger aufrecht gehalten werden oder sich nach kurzer Zeit deutlich reduzieren.

Standardentladung: Entladung einer Zelle/Batterie unter Standardbedingungen (Nominalstrom, richtiger Temperaturbereich, neuwertige Batterie, etc.), bis die Entladeschlussspannung erreicht wird.

Kapazität, Nominalkapazität: die Ladung, die einer Zelle/Batterie bei Standardentladung entnommen werden kann, bis die Entladeschlussspannung unterschritten wird. Üblicherweise in *Milliamperestunden (mAh)* oder *Amperestunden (Ah)* angegeben.

Nutzbare Kapazität: die Ladung, die unter den für die Anwendung gültigen Betriebsbedingungen (Laststromprofil, Temperatur, etc.) tatsächlich entnommen werden kann, bis die Klemmenspannung aus dem für die Anwendung zulässigen Bereich fällt. Diese nutzbare Kapazität hat für die Anwendung eine deutlich größere Aussage als die Nominalkapazität, und sollte für die Berechnung der erwarteten Batterielaufzeit verwendet werden.

Restladung, Restkapazität: momentan in der Batterie noch verfügbare Ladung, als Differenz zwischen Nominalkapazität und entnommener Ladung. Auch als *verfügbare Restladung* als Differenz zwischen *nutzbarer Kapazität* und entnommener Ladung.

Ladungszustand, State of Charge, SOC: prozentueller Anteil der Restkapazität auf die Nominalkapazität oder nutzbare Kapazität. Eine "volle" Batterie entspricht 100%SOC.

Entladezustand, Depth of Discharge, DOD: prozentueller Anteil der verbrauchten Ladung auf die Nominalkapazität oder nutzbare Kapazität. Eine "volle" Batterie entspricht 0%DOD.

Energiegehalt: gibt an, wie viel Energie eine Batterie enthält, üblicherweise in *Wattstunden (Wh)* oder *Kilowattstunden (kWh)* angegeben. Eigentlich eine integrale Größe, in Batteriedatenblättern aber oft als Produkt aus Nominalspannung und Nominalkapazität angegeben.

Energiedichte: Quotient aus Energiegehalt und Volumen der Batterie, abhängig von verwendeten Materialien der Bestandteile. Je höher die Energiedichte, desto kleiner kann eine Batterie mit einem gewünschten Energiegehalt (bzw. gewünschter Nominalkapazität) gebaut werden. Mit steigender Energiedichte steigt aber auch das Risiko bei einer Fehlfunktion, da mehr Energie auf kleinerem Raum frei werden kann (Brand, Explosion, etc.).

Selbstentladung: durch die chemisch aktiven Bestandteile der Zelle/Batterie kommt es üblicherweise zu unerwünschten internen Reaktionen, bei denen aktives Material abgebaut oder umgewandelt wird und dadurch verfügbare Energie verloren geht, was die nutzbare Kapazität der Zelle/Batterie reduziert. Diese Prozesse sind üblicherweise als *Selbstentladung* in Prozent der Nominalkapazität pro Jahr angegeben, hängen von den verwendeten Materialien und dem internen Aufbau ab und sind stark temperaturabhängig.

Passivierung: bei manchen chemischen Zusammensetzungen kann es zu einer Passivierung der Zelle kommen, also zur Bildung einer Schicht zwischen Anode oder Kathode und Elektrolyt bei niedriger Belastung der Batterie über längere Zeiträume. Bei Lithiumzellen ist diese Passivierung beispielsweise gewünscht, da sich dadurch während der Lagerung die Selbstentladung reduziert, indem die Elektroden vor chemischen Prozessen geschützt werden. Allerdings kann es bei passivierten Batterien zu einem *Voltage Delay* kommen, also zu einem Einbruch der Ausgangsspannung bei Belastung, der sich durch den Abbau der Passivierungsschicht während der Belastung reduziert. Man spricht dann von einer *Aktivierung* der passivierten Batterie. Üblicherweise kann bei einer entsprechenden Belastung die Passivierung wieder

rückgängig gemacht werden, je nach Zellchemie und Fortschritt der Passivierung kann diese jedoch auch irreversibel sein.

Entladekurve: eine grafische Darstellung der Entladung der Zelle/Batterie, wobei üblicherweise eine Standardentladung dargestellt wird. Der Verlauf der Klemmenspannung bei einer definierten Belastung wird über die Zeit dargestellt. Im Allgemeinen unterscheidet man zwischen *flachen (flat)* Entladekurven, bei denen die Klemmenspannung lange auf einem beinahe konstanten Wert bleibt und dann kurz vor Ende der Lebensdauer abknickt, oder *steilen (slopy)* Entladekurven, bei denen die Klemmenspannung kontinuierlich abnimmt. Weitere Darstellungsmöglichkeiten umfassen den Verlauf der Klemmenspannung über die entnommene Ladung bzw. SOC/DOD, und können Kurvenscharen für unterschiedliche Belastungen/Temperaturen/etc. enthalten.

Intermittierende Last: bezeichnet eine nicht-kontinuierliche Last, bei der ein kurzer hoher periodischer Laststrom mit einem kontinuierlichen niedrigen Hintergrundstrom kombiniert wird. Eine solche intermittierende Last stellt in vielen Fällen einen realistischen Fall dar (Fernbedienung, Funk-Temperatursensor, IoT, ESL) und wird inzwischen in einigen Batteriedatenblättern in Form einer Entladekurve angegeben.

Bauform: Batterien werden in unterschiedlichen Bauformen angeboten, als Rund-, Knopf-, quaderförmige oder prismatische Zellen, wobei es für diese Bauformen nach IEC standardisierte Bezeichnungen gibt. Für die in dieser Arbeit hauptsächlich behandelten Lithium-Knopfzellen gibt es standardisierte Bezeichnungen in der Form *CR2450*, wobei das erste Zeichen für die Batterietechnologie steht (*C* = Lithium-Mangandioxid), das zweite Zeichen für die Bauform (*R* = Round/Cylindrical, bzw. auch Knopfzellen), und die letzten Zeichen die Außenabmessungen beschreiben (im Fall Round *2450* = 24 mm Außendurchmesser, 5.0 mm Höhe). Weitere Definitionen sind in Standardwerken wie etwa [5] nachzulesen.

Batteriepack: eine Verschaltung mehrerer Zellen/Batterien, um die gewünschte Ausgangsspannung oder Gesamtkapazität zu erreichen. Die einzelnen Zellen/Batterien sind dabei oft zu einem Pack verschweißt und daher mechanisch stabil. Die Zusammenstellung des Packs wird üblicherweise als *Batteriekonfiguration* in der Form *xSyP* angegeben.

Batteriekonfiguration: beschreibt die Zusammensetzung eines Batteriepacks als Serien- und Parallelschaltung mehrerer Batterien/Zellen, die üblicherweise in dem Form *xSyP* angegeben ist. Dabei steht *x* für die Anzahl in Serie geschaltener Batterien/Zellen, und *y* für die Anzahl parallel geschaltener Batterien. Wird beispielsweise ein Batteriepack aus 3 parallel geschaltene Knopfzellen vom Typ CR2450 erstellt, spricht man oft von einem *CR2450 1S3P Pack*.

2.2 Auswahl von Batterietypen

2.2.1 Alkalische Primärzellen

Alkalische Batterien (*Alkali-Mangan-Zellen*, "Alkaline") gehören zu den am weitesten verbreiteten Batterietypen, und werden insbesondere in Consumergeräten verwendet. Verfügbar in verschiedenen Größen (siehe Abbildung 2.3) werden unterschiedliche Kapazitäten angeboten, inklusive für diese Anwendung interessante platzsparende Knopfzellen, sowie zylinderförmige Zellen (*bobbin type*) mit geringen Abmessungen. In größeren Gehäusen werden auch höhere Ausgangsspannungen angeboten, die jedoch ein Vielfaches der nominalen Zellspannung von 1.5 V sind.

Alkalische Batterien sind die Weiterentwicklung der früher geläufigen Zink-Kohle-Batterien und bestehen aus einem alkalischen Elektrolyt (Kalilauge) mit Mangandioxid als Kathode und Zink-



Abbildung 2.3: Typische Bauformen für zylindrische Alkali-Batterien [7]

pulver als Anode, die als Einheit in einem isolierten Metallgehäuse untergebracht sind. Durch die fortlaufende Umwandlung der verwendeten Elektrodenmaterialien in andere Produkte während der Entladung ergibt sich eine charakteristische Entladekurve mit einer deutlichen negativen Steigung, die in Abbildung 2.4 dargestellt ist. Das bedeutet, dass die Zellspannung während der Entladung kontinuierlich abnimmt, während der Innenwiderstand der Zelle kontinuierlich ansteigt. Alkali-Mangan-Zellen haben im unbenutzten Zustand üblicherweise eine nominale Zellspannung von 1.5 V, die sich während der Lebensdauer kontinuierlich bis zu einer typischen Entladeschlussspannung von etwa 0.9 V reduziert.²

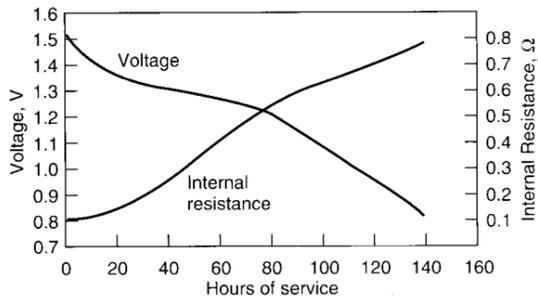


Abbildung 2.4: Typische Entladekurve (Zellspannung sowie Innenwiderstand) von Alkali-Mangan-Zellen [5]

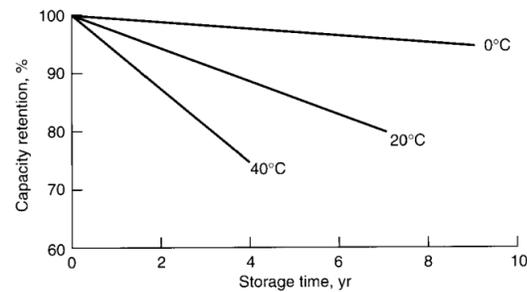


Abbildung 2.5: Typische Werte für die Selbstentladung von Alkali-Mangan-Zellen bei unterschiedlichen Temperaturen [5]

Durch die gute Ionenleitfähigkeit des Elektrolyten und die konstruktionsbedingte große aktive Oberfläche durch die Zinkpulver-Anode ergibt sich für Alkali-Mangan-Zellen ein niedriger Innenwiderstand über die gesamte Lebensdauer (typischerweise in der Größenordnung $\leq 1 \Omega$), sowohl für zylindrische Zellen als auch für Knopfzellen³. Dadurch kann bei geringen bis mittleren Lasten oder intermittierenden Lasten⁴ beinahe die gesamte Nominalkapazität von Alkali-Mangan-Zellen bei der Entladung entnommen werden, die nutzbare Kapazität liegt also nahe an der Nominalkapazität der Zelle. Bei kontinuierlichen höheren Belastungen wird die nutzbare Kapazität zusätzlich durch eine Reduktion der Nominalkapazität begrenzt.

Während der Lagerung und im Betrieb führen ständig laufende interne Reaktionen dazu, dass die Elektrodenmaterialien langsam abgebaut bzw. umgewandelt werden, und damit die nutzbare

²durch diesen typischen Verlauf der Zellspannung lässt sich die ungefähre Restladung aus der Spannungs abschätzen, was bei flacheren Entladekurven schwer oder nicht möglich ist

³der Innenwiderstand ist gegenüber vergleichbaren Lithiumzellen in etwa um eine Zehnerpotenz geringer

⁴kurze, hohe Belastung mit anschließender längerer niedriger Belastung

Kapazität der Zelle über die Zeit reduziert wird. Diese Selbstentladung hängt stark von der Temperatur ab, und nimmt mit steigender Temperatur rasch zu. Typische Werte sind in Abbildung 2.5 dargestellt, und liegen bei Raumtemperatur in etwa bei 3 % bis 5 % pro Jahr.

Durch das Metallgehäuse ist die Batterie weitestgehend versiegelt, bei Erwärmung, Kurzschluss oder langer Lagerung kommt es jedoch durch interne Reaktionen zur Bildung von Wasserstoffgas (*gassing*), durch den entstehenden Überdruck kann es zum Auslaufen der Zelle kommen. Dabei kann der wässrige Elektrolyt austreten, der korrosiv wirkt. Beim Kontakt mit Luft bilden sich typische weiße kristalline Ablagerungen⁵.

Alkali-Mangan-Zellen arbeiten üblicherweise in einem Temperaturbereich von -30°C bis $+55^{\circ}\text{C}$, wobei die Nominalkapazität und der Innenwiderstand stark von der Temperatur abhängen. Mit sinkender Temperatur nimmt auch die Nominalkapazität ab, der Innenwiderstand steigt. Höhere Temperaturen wirken sich bis zu einem gewissen Punkt positiv auf die nutzbare Kapazität und den Innenwiderstand der Zelle aus, da die Elektronenmobilität und die Reaktionsgeschwindigkeit zunehmen. Damit geht allerdings auch eine höhere Selbstentladung einher.

Eignung von Alkalischen Batterien für ESLs Trotz mancher Vorteile wie den niedrigen Kosten und der guten Verfügbarkeit sowie dem niedrigen Innenwiderstand sind Alkali-Mangan-Zellen aufgrund ihrer Eigenschaften für diese Anwendung nicht optimal:

- die nominale Zellspannung von 1.5 V erfordert eine Serienschaltung mehrerer Zellen (und dadurch erhöhten Platzbedarf) oder einen zusätzlichen Spannungswandler (und dadurch erhöhten Energiebedarf und Kosten)
- die deutliche Reduktion der Zellspannung bei Entladung führt dazu, dass nicht die gesamte Kapazität der Batterie genutzt werden kann bevor die minimale Betriebsspannung unterschritten wird, insbesondere bei einer Serienschaltung mehrerer Zellen
- die geringere Energiedichte erfordert im Vergleich zu anderen Batterietypen ein größeres Volumen um die geforderte Nominalkapazität zu erreichen, und damit einen größeren Platzbedarf
- die erhöhte Selbstentladung und generell niedrigere Haltbarkeit macht alkalische Batterien für den Einsatz über >5 Jahre weniger geeignet, bei entladenen Batterien kann außerdem Elektrolyt austreten.

2.2.2 Lithium-Primärzellen

Neben Alkali-Mangan-Batterien zählen Lithium-basierte Batterien zu den am häufigsten eingesetzten Batterien, wobei besonders im Consumer-Bereich Lithium-Mangandioxid-Varianten verbreitet sind. Neben dieser Variante gibt es noch weitere Untergruppen von Lithiumzellen, die jedoch hauptsächlich im Industrie- und Medizinbereich für speziellere Anwendungen eingesetzt werden. Zusätzlich gibt es auch noch Lithium-Sekundärzellen, die als wiederaufladbare Akkumulatoren sehr weit verbreitet sind. Aufgrund der höheren Kosten und des Mehraufwandes, sowie der generellen fragwürdigen Eignung von wiederaufladbaren Batterien in ESLs werden diese nicht weiter behandelt. Die Gruppe der Lithium-Primärzellen ist mit deren prominentesten Vertretern in diesem Abschnitt kurz beschrieben.

Im Gegensatz zu alkalischen Zellen bildet hier Lithium die Anode. Durch die niedrigste Position von Lithium in der elektrochemischen Spannungsreihe eignet sich dieses Material besonders gut

⁵Dabei handelt es sich um Kaliumkarbonat, welches durch die Reaktion von Kaliumhydroxid (aus der Kalilauge) mit dem Kohlenstoffdioxid in der Luft entsteht. Kaliumkarbonat und Kaliumhydroxid sind zwar basisch und dadurch ätzend, davon abgesehen aber nicht gesundheitsschädlich.

als Anode in galvanischen Zellen, dadurch können hohe Ausgangsspannungen von lithiumbasierten Zellen von 3.0 V und höher erreicht werden, die damit deutlich über der Ausgangsspannung von alkalischen Zellen liegen. Zusätzlich ermöglicht Lithium deutlich höhere theoretische Kapazitäten der entstehenden Zellen.

Für das Kathodenmaterial gibt es unterschiedliche Optionen mit unterschiedlichen Vorzügen und Nachteilen. Die geläufigsten Typen sind in den folgenden Abschnitten kurz aufgeführt, und werden auf ihre Eignung für ESLs verglichen. Als Einstieg zeigen Abbildung 2.6 typische Entladekurven für unterschiedliche lithiumbasierte Zellen und Abbildung 2.7 theoretische Energiedichten für unterschiedliche primäre Zellen.

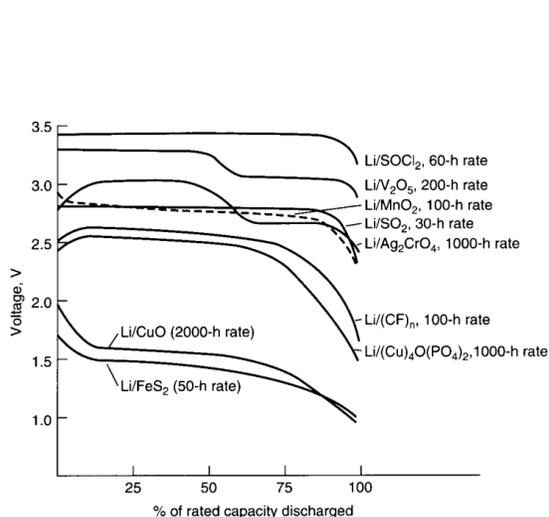


Abbildung 2.6: Typische Entladekurven für unterschiedliche Lithium-Zellen [5]

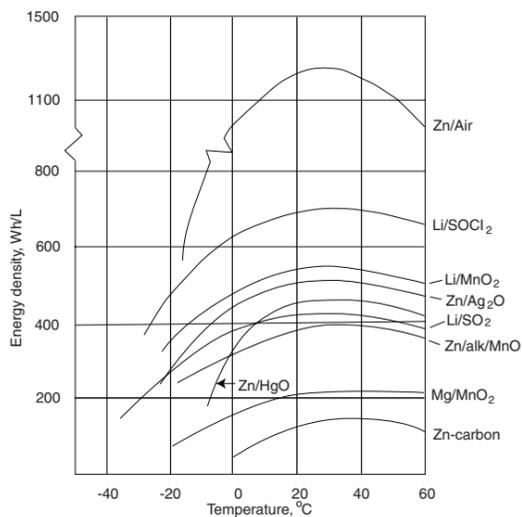


Abbildung 2.7: Typische Energiedichten für unterschiedliche Primärzellen bei unterschiedlichen Temperaturen [5]

2.2.3 Lithium-Schwefeldioxid-Zellen (LiSO2)

Lithium-Schwefeldioxid-Zellen (LiSO₂) gelten als eine der ersten entwickelten Lithiumzellen, und sind bis heute im Gebrauch. Durch die Verwendung von Kohlenstoff (Ruß) und Schwefeldioxid als Kathode entsteht so eine galvanische Zelle, deren Energiedichte über alkalischen Zellen liegt, bei einer Zellspannung von etwa 2.85 V. Die Lithium-Schwefeldioxid-Zelle zeichnet sich durch ihre praktisch waagrechte Entladekurve aus, die auch bei sehr hohen Lasten annähernd waagrecht bleibt, sowie durch den sehr niedrigen Innenwiderstand, der in etwa um den Faktor 10 niedriger ist als beispielsweise bei Lithium-Mangandioxid-Zellen. Dadurch können diese Zellen hohe Ströme über lange Zeiträume liefern, und dabei beinahe die gesamte gespeicherte Energie abgeben. Abbildung 2.8 zeigt die annähernd waagrechten Entladekurven für unterschiedliche Lasten. [5]

Weiters zeichnen sich Lithium-Schwefeldioxid-Zellen durch ihren sehr breiten Temperaturbereich aus, die Zellen können von -55°C bis +70°C eingesetzt werden. Dabei ist die nutzbare Kapazität selbst bei sehr niedrigen Temperaturen und hohen Lasten noch vergleichsweise hoch. Abbildung 2.9 zeigt die typische nutzbare Kapazität dieses Zelltyps bei unterschiedlichen Lasten und Temperaturen. Unter allen geläufigen Zelltypen besitzt die Lithium-Schwefeldioxid-Zelle das beste Verhalten bei niedrigen Temperaturen und hoher Last. [5]

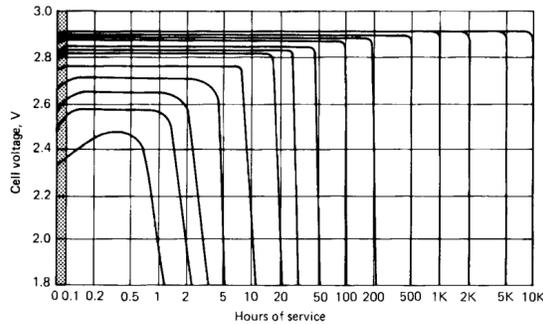


Abbildung 2.8: Typische Entladekurven für Lithium-Schwefeldioxid-Zellen bei unterschiedlichen Lasten [5]

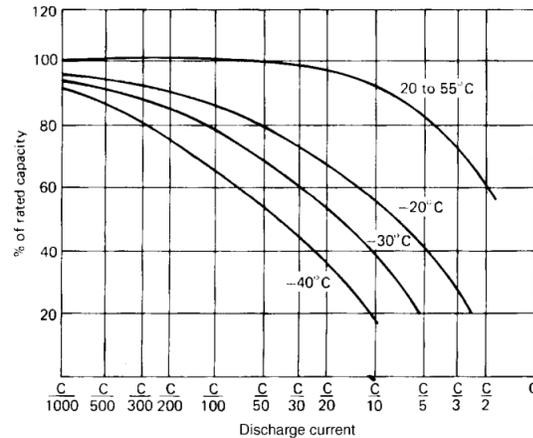


Abbildung 2.9: Typische nutzbare Kapazität für Lithium-Schwefeldioxid-Zellen bei unterschiedlichen Lasten und Temperaturen [5]

Durch die Bildung eines Schutzfilms auf der Anode und der damit verbundenen sehr geringen Selbstentladung bietet die Lithium-Schwefeldioxid-Zelle sehr lange Haltbarkeit bei Lagerung und Betrieb unter niedriger Last. Im Vergleich zu anderen Zelltypen gilt dies auch für erhöhte Temperaturen, die Batterie kann also auch bei hohen Temperaturen gelagert oder betrieben werden, ohne einen großen Teil der Kapazität durch Selbstentladung zu verlieren. Laut [5] haben Messungen bei Raumtemperatur gezeigt, dass die Selbstentladung während der ersten beiden Jahre bei etwa 3% pro Jahr liegt, nach diesem Zeitraum reduziert sich die Selbstentladung aber deutlich, und nach 14 Jahren Lagerung konnte immer noch eine verbleibende Kapazität von über 90% gemessen werden.

Neben diesen Vorteilen bietet die Lithium-Schwefeldioxid-Zelle aber auch Nachteile. Durch die Reaktion mit Schwefeldioxid steht die Batterie ständig unter einem Druck von etwa 4 bar bei Raumtemperatur (bei höheren Temperaturen steigt dieser exponentiell). Dadurch muss die Batterie mit einem Sicherheits-Überdruckventil ausgestattet sein, bei Auslösen dieses Ventils (etwa im Fehlerfall wie Überhitzung oder einem Kurzschluss) können die schädlichen Gase sowie weitere brennbare und giftige Inhaltsstoffe entweichen. Dadurch ist auch der Transport streng reglementiert. Die Kosten sind höher als bei anderen Lithium-Zelltypen, und durch die deswegen geringere Nachfrage sind die Zellen auch schlechter verfügbar. Wegen diesen Nachteilen werden Lithium-Schwefeldioxid-Zellen auch im Consumer-Bereich generell nicht verwendet, ihren Einsatz finden diese Typen wegen der hohen nutzbaren Kapazität, dem großen Betriebstemperaturbereich, der sehr langen Haltbarkeit sowie dem niedrigen spezifischen Gewicht eher in Spezialanwendungen, wie im militärischen Bereich, sowie im Luft- und Raumfahrtbereich, wo übliche Primärbatterien an die Grenzen ihrer Möglichkeiten kommen. Aus diesem Grund werden auch hauptsächlich für diese Anwendungen konzipierte Spezialbauformen angeboten, die Lithium-Schwefeldioxid-Zellen sind jedoch auch in Rundform erhältlich. [5]

Eignung von Lithium-Schwefeldioxid-Zellen für ESLs Trotz der vielen für diese Anwendung sehr guten Eigenschaften wie die hohe nutzbare Kapazität über einen großen Last- und Temperaturbereich, einen sehr niedrigen Innenwiderstand und eine geringe Selbstentladung, kann diese Technologie aufgrund ihrer gesundheitlichen Gefahren bei unsachgemäßer Verwendung oder Fehlfunktion nicht für die digitale Preisauszeichnung oder den Consumer-Bereich generell verwendet werden. Neben diesem *Showstopper* machen auch der hohe Preis und die schlechte Verfügbarkeit, sowie die eingeschränkte Auswahl an Bauformen die Lithium-Schwefeldioxid-Batterie für

diese Anwendung unattraktiv.

2.2.4 Lithium-Thionylchlorid-Zellen (LiSOCl₂)

Eine weitere verbreitete Art von Lithium-Zelle ist die *Lithium-Thionylchlorid-Zelle* (LiSOCl₂), die Graphit und Thionylchlorid als Kathode benutzt und damit mit 3.6V eine der höchsten Nennspannungen aller gebräuchlichen Primärbatterien erreicht. Durch diese Zusammensetzung ist auch die erreichte Energiedichte eine der höchsten der verbreiteten Primärbatterien, die Entladekurve ist ebenfalls nahezu waagrecht über einen großen Lastbereich. Eine typische Entladekurve für unterschiedliche Belastungen ist in Abbildung 2.10 dargestellt. [5]

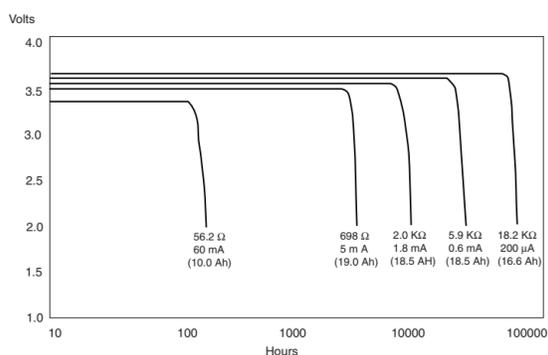


Abbildung 2.10: Typische Entladekurven für Lithium-Thionylchlorid-Zellen bei unterschiedlichen Lasten (in *Bobbin* Bauform) [5]

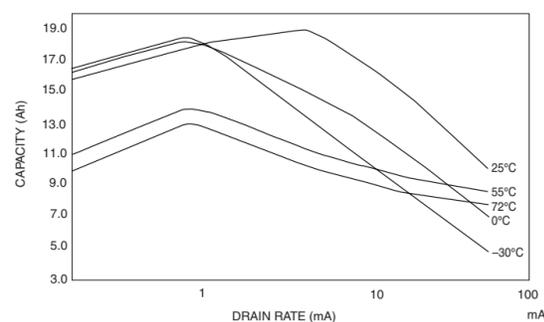


Abbildung 2.11: Typische nutzbare Kapazität für Lithium-Thionylchlorid-Zellen bei unterschiedlichen Lasten und Temperaturen (in *Bobbin* Bauform) [5]

Die Lithium-Thionylchlorid-Zelle bietet mit -60°C bis $+85^{\circ}\text{C}$ einen noch größeren Temperaturbereich als die Lithium-Schwefeldioxid-Zelle, und kann auch einen großen Teil der Kapazität über einen weiten Temperaturbereich liefern. Spezielle Typen erlauben sogar Temperaturen bis hin zu 145°C . Eine typische Gegenüberstellung von nutzbarer Kapazität, Entladestrom und Temperatur ist in Abbildung 2.11 dargestellt. [5]

Wie in den Kurven dargestellt ist kann die Lithium-Thionylchlorid-Zelle im Vergleich zur Lithium-Schwefeldioxid-Zelle allerdings nur geringere Ströme bereitstellen, wobei diese Kurven für eine sogenannte *Bobbin* Konstruktion der Zelle gelten. Der mögliche Strom den die Zelle liefern kann wird stark von dieser Konstruktion beeinflusst, wobei es zwei gebräuchliche Konstruktionsarten gibt:

Bobbin type: die innen liegende Kathode wird durch einen Separator getrennt von der außen liegenden Anode umschlossen (siehe Abbildung 2.12, ähnlicher Aufbau wie alkalische zylindrische Zellen). Dadurch ergibt sich eine geringe Oberfläche zwischen Anode, Elektrolyt und Kathode, die zu einem höheren Innenwiderstand führt. Dieser Typ ist für geringe bis mittlere Ströme ausgelegt. Die Anordnung befindet sich in einem hermetisch abgeschlossenen Gehäuse.

Wound type: die Anode, der Separator und die Kathode sowie der Elektrolyt werden spiralförmig aufgewickelt und mit den Terminals verbunden (siehe Abbildung 2.13). Dadurch ergibt sich eine deutlich größere Oberfläche zwischen Anode, Elektrolyt und Kathode, und damit ein sehr niedriger Innenwiderstand. Dieser Typ ist für hohe bis sehr hohe Ströme ausgelegt. Die Anordnung befindet sich in einem geschlossenen Gehäuse mit einem Sicherheitsventil.

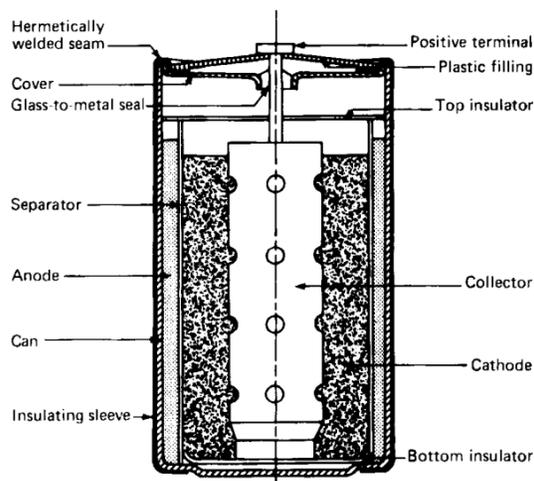


Abbildung 2.12: Schematischer Aufbau einer Lithium-Thionylchlorid-Zelle als *Bobbin type* [5]

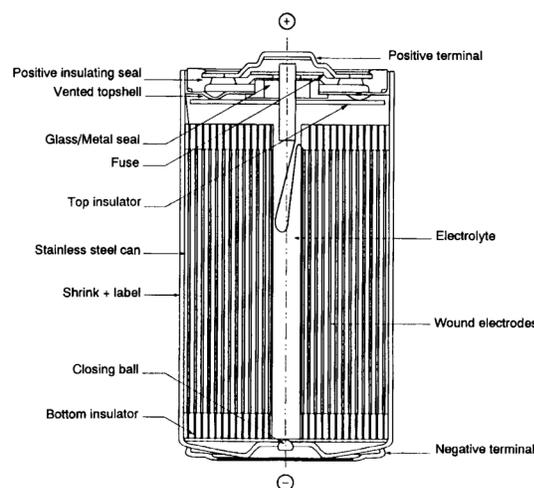


Abbildung 2.13: Schematischer Aufbau einer Lithium-Thionylchlorid-Zelle als *Wound type* [5]

Die Lithium-Thionylchlorid-Zelle hat ein ähnliches Problem wie die Lithium-Schwefeldioxid-Zelle, durch die chemische Zusammensetzung entsteht in der Batterie ein Druck, der von der Temperatur der Zelle abhängt. Durch die ohnehin sehr hohen möglichen Betriebstemperaturen wird dieses Problem zusätzlich verschlimmert. Besonders bei der hochstromfähigen *Wound* Konstruktion kann es durch eine hohe Stromabgabe zu einer so starken Erwärmung der Zelle kommen, dass sich der interne Druck so weit erhöht bis die Zelle explodiert. Um dies zu vermeiden muss ein Sicherheitsventil verbaut werden, um den Überdruck im Fehlerfall kontrolliert abzubauen. Dabei werden aber ähnlich wie bei der Lithium-Schwefeldioxid-Zelle gesundheitschädliche, brennbare oder giftige Gase und Stoffe frei, die so entweichen. Aus diesem Grund ist der Einsatz dieser Type ebenfalls auf Anwendungen im militärischen, Luft- und Raumfahrt- sowie Industriebereich beschränkt, die die besonderen Eigenschaften dieser Zellen verlangen. [5]

Dieses Problem vermeidet die *Bobbin* Konstruktion für Anwendungen mit niedrigen bis mittleren Leistungen. Durch den Aufbau und den damit erheblich höheren Innenwiderstand wird der Strom von der Zelle selbst so weit begrenzt, dass es zu keiner kritischen Erhöhung der Zelltemperatur kommen kann, und somit zu keiner kritischen Druckerhöhung. Das Gehäuse ist hermetisch geschlossen und so konstruiert, dass es dem erwarteten Druck unter den vorgesehenen Bedingungen standhalten kann, dadurch ist kein Sicherheitsventil notwendig, und keine schädlichen Substanzen können aus der Batterie entweichen.

Der Innenwiderstand der Lithium-Thionylchlorid-Zellen kann nicht allgemein angegeben werden, dieser unterscheidet sich je nach Hersteller, genauem Aufbau und chemischer Zusammensetzung der Zelle. Im Allgemeinen liegt er jedoch bei Bobbin-Konstruktionen in einem leicht niedrigeren Bereich als Lithium-Mangandioxid-Zellen, sollte durch den geringen Einfluss auf den Elektrolyt jedoch über die Temperatur deutlich stabiler und geringer sein als bei der Lithium-Mangandioxid-Zelle. Das genaue Verhalten müsste jedoch aufgrund fehlender Angaben messtechnisch untersucht werden.

Ähnlich wie bei der Lithium-Schwefeldioxid-Zelle bildet sich hier auch ein Schutzfilm auf der Anode, der die Selbstentladung bei Lagerung oder niedrigen Strömen sehr gering hält, auch bei höheren Temperaturen. Dadurch kommt es zu Selbstentladungsraten von etwa <1% bis 2% pro Jahr. Diese Passivierung macht sich in den Kapazitätskurven allerdings durch eine niedrigere nutzbare Kapazität bei geringen Lastströmen bemerkbar. Zusätzlich kann es durch diese Passivierung zu

einem *Voltage Delay* kommen, also einem Einbruch der Ausgangsspannung bei höherer Belastung nach einer längeren Periode niedriger Last. Dieser Effekt ist aber hauptsächlich bei hohen Lasten und niedrigen Temperaturen sichtbar. Zusätzlich hat die Lithium-Thionylchlorid-Zelle durch ihr hohe chemische Stabilität eine sehr gute Haltbarkeit von üblicherweise mehr als 10 Jahren. [5]

Während für die Wound-Konstruktion eher Spezialbauformen für die Zellen angeboten werden, werden Lithium-Thionylchlorid-Zellen in Bobbin-Konstruktion in gebräuchlichen zylindrischen Bauformen angeboten, sowie in prismatischen Bauformen. Diese werden üblicherweise in Industrieanwendungen eingesetzt, bei denen eine konstante Spannung über eine lange Zeit oder über einen großen Temperaturbereich bei geringer oder mittlerer Belastung benötigt wird, wie beispielsweise bei CMOS-Backupbatterien

Eignung von Lithium-Thionylchlorid-Zellen für ESLs Aufgrund der hohen Spannung am oberen Ende der möglichen Versorgungsspannung und deren sehr flachen Verlauf, sowie dem breiten Temperaturbereich und der niedrigen Selbstentladung sowie guten Haltbarkeit würde sich die Lithium-Thionylchlorid-Batterie ausgezeichnet in der ESL-Anwendung im Hinblick auf diese Eigenschaften verhalten. Der Stromverbrauch der ESLs müsste von diesen Zellen ebenfalls abgedeckt werden können. Der Effekt einer verringerten nutzbaren Kapazität und einer Passivierung bei geringen Lasten (wie sie im intermittierenden Betrieb der ESLs auftreten würden), sowie der signifikante Innenwiderstand müsste jedoch messtechnisch genauer untersucht werden.

Die gefährlichen Inhaltsstoffe dieser Zellen könnten zum Problem für die Anwendung werden. Inzwischen bieten Hersteller aber bereits Lithium-Thionylchlorid-Zellen in kompakten prismatischen Gehäusen mit Bobbin-Konstruktion an, und sogar in der Bauform von CR2450-Knopfzellen. Diese Modelle bieten ein hermetisch versiegeltes Glasgehäuse, eingeschlossen von einem stabilen Metallgehäuse, und werden daher vom Hersteller als sicherheitstechnisch unbedenklich eingestuft. Diese Zellen erfüllen IEC- und EN-Sicherheitsstandards und sind UL-zertifiziert. Durch die Konstruktion mit Glas- und Metallgehäuse ist jedoch die verfügbare Kapazität niedriger als beispielsweise bei Lithium-Mangandioxid-Zellen in gleicher Bauform, trotz einer deutlich höheren Energiedichte der Lithium-Thionylchlorid-Zelle. [8]

Auch in [5] wird berichtet, dass diese Bobbin-Konstruktionen seit geraumer Zeit in Verwendung sind, unterschiedlichster Sicherheitstests unterzogen wurden, und durch die Konstruktion und Stabilität sicherheitstechnisch unbedenklich sind.

Können diese Zellen zu einem attraktiven Preis und in entsprechenden Stückzahlen bezogen werden, wäre eine Verwendung in ESLs möglich, wenn detaillierte Vermessungen die ausreichende Leistung der Zellen bestätigen. Auch bei einem höheren Preis als die momentan verwendeten Lithium-Mangandioxid-Zellen wäre in Zukunft ein Einsatz in Spezialgebieten wie beispielsweise einem ESL für Gefrierschränke denkbar. Nachdem diese Zellen aber zum Zeitpunkt der Entwicklung der aktuellen ESL-Plattform noch nicht in solchen kompakten Bauformen verbreitet waren und es zur Technologie Sicherheitsbedenken gab, wurden diese im Konzept seinerzeit nicht berücksichtigt.

2.2.5 Lithium-Mangandioxid-Zellen (LiMnO₂)

Die mit Abstand am weitesten verbreitete Lithium-Zelltype ist die *Lithium-Mangandioxid-Zelle* (LiMnO₂), die durch ihre positiven Eigenschaften wie die hohe Nennspannung, die hohe Kapazitätsdichte und geringe Selbstentladung bei gleichzeitiger Sicherheit im Betrieb⁶ bei sehr vielen Consumer-Produkten verbaut wird. Je nach Anforderungen an die Ausgangsleistung der Batterie gibt es unterschiedliche Bauformen, wobei es wie bei anderen Zelltypen unterschiedliche Konstruktionsarten gibt, die die elektrischen Eigenschaften der Zelle maßgeblich beeinflussen:

⁶Lithium-Mangandioxid-Zellen haben einen "exzellenten Ruf in Sachen Sicherheit" [5]

Bobbin type, zylindrisch: wie bereits im Abschnitt 2.2.4 erklärt ist hier eine innen liegende Kathode von der außen liegenden Anode umschlossen, welche durch einen Separator getrennt werden (siehe Abbildung 2.14). Dadurch ergibt sich eine geringe Oberfläche zwischen Anode, Elektrolyt und Kathode, die zu einem höheren Innenwiderstand führt. Durch das große Volumen der Elektroden kann dafür die Kapazität der Zelle bei dieser Bauform maximiert werden. Zusätzlich ergibt sich durch die geringe aktive Oberfläche eine geringe Selbstentladung der Zelle. Dieser Typ ist für hohe Kapazitäten und lange Betriebsdauer bei geringen bis mittleren Strömen ausgelegt, beispielsweise als Backup-Batterie für Digitalschaltungen wie Real Time Clocks, oder als Energieversorgung für Geräte mit niedriger Leistungsaufnahme, wie etwa Smart Meter.

Wound type, zylindrisch: ebenfalls wie im Abschnitt 2.2.4 erklärt werden bei dieser Konstruktion die Anode, der Separator und die Kathode sowie der Elektrolyt spiralförmig aufgewickelt und mit den Terminals verbunden (siehe Abbildung 2.15). Dadurch ergibt sich eine deutlich größere Oberfläche zwischen Anode, Elektrolyt und Kathode, und damit ein sehr niedriger Innenwiderstand. Allerdings nimmt dieser Aufbau sehr viel Volumen in Anspruch, wodurch sich für *Wound*-Zellen im Vergleich zu *Bobbin*-Zellen eine geringere Kapazität bei gleichen Abmessungen ergibt, sowie eine höhere Selbstentladung. Dieser Typ ist für hohe Ströme und insbesondere Pulsbelastungen ausgelegt, wie beispielsweise Blitzgeräte in der Fotografie. Als Schutzmaßnahme bei Überlastung ist ein PTC-Element⁷ in der Batterie verbaut, manche Zellen bieten sogar Separatoren, die sich bei zu hohen Temperaturen so verändern, dass der Stromfluss unterbrochen wird.

Knopfzelle: entspricht vom Prinzip her dem *Bobbin type*, ist aber als Zylinder sehr geringer Höhe für geringen Platzbedarf gebaut (siehe Abbildung 2.16). Durch diese Bauform ergeben sich die gleichen Eigenschaften wie bei *Bobbin*-Zellen, jedoch ist durch die kompaktere Bauform und das dadurch beschränkte Volumen auch die Kapazität dieser Type geringer. Ebenfalls ist der Innenwiderstand aus dem gleichen Grund höher als bei *Bobbin*-Zellen. Durch diese Eigenschaften gelten Knopfzellen als *intrinsisch sicher*, da sich selbst bei Kurzschluss einer neuen Zelle der entstehende Strom durch den hohen Innenwiderstand so begrenzt, dass es zu keiner kritischen Erwärmung kommen kann. Durch die hermetische Versiegelung sowie die geringe enthaltene Energiemenge und die geringe Masse an Lithium unterliegen diese Typen nur vergleichsweise wenigen Transportbedingungen. Durch diese positiven Eigenschaften sowie die sehr große Auswahl an platzsparenden Knopfzellen unterschiedlicher Dimensionen und unterschiedlicher Kapazität werden Knopfzellen in einer sehr großen Auswahl an Geräten mit niedrigem Leistungs- und Energieverbrauch verbaut, wie Uhren, Fernbedienungen, Fahrradcomputer, Küchenwaagen und vielen weiteren Consumer-Artikeln. Neben den Alkali-Zellen gelten Lithium-Mangandioxid-Knopfzellen als die Primärzellen mit den größten Produktionsvolumen. Durch diese sehr hohe Nachfrage ist der Preis entsprechend gering und die Verfügbarkeit entsprechend gut.

Prismatische Zelle: entspricht vom Prinzip her dem *Wound type*, wird aber in prismatischen Bauformen angeboten. Die Eigenschaften sind gleich, aber mehrere Zellen lassen sich platzsparender anordnen.

Pouch-Zelle: entspricht vom Prinzip her ebenfalls dem *Wound type*, wird aber in prismatischen Bauformen angeboten und besitzt statt der stabilen metallischen Außenhülle eine robuste Folie, die so verschweißt wird, dass Metallfahnen als Kontakte herausragen (siehe Abbildung 2.17). Je nach Hersteller und Type können die Bestandteile auch in übereinanderliegenden Schichten (*Sandwich*) aufgebaut sein. Durch die dünne Folie kann ein größerer Teil des Gesamtvolumens für die aktiven Materialien verwendet werden. Diese Bauform ist bei Lithium-Ionen-Sekundärbatterien und Lithium-Polymer-Sekundärbatterien weit verbreitet.

⁷*positive temperature coefficient*, temperaturabhängiger Widerstand der seinen Wert mit steigender Temperatur erhöht, und so als selbstrückstellende Strombegrenzung verwendet werden kann

Diese auch als *Thin Cell* beworbenen Zellen erreichen ähnliche Eigenschaften wie gewickelte zylindrische Zellen, können aber in kompakteren (vor allem flacheren) Bauformen angeboten werden. Durch das üblicherweise quaderförmige Gehäuse lässt sich freies Volumen in Geräten sehr effizient nutzen. Zu den Nachteilen dieser Bauform zählen eine erhöhte Selbstentladung (im Vergleich zu Bobbin- oder Knopfzellen), die höheren Kosten durch die komplexere Struktur und die geringere Nachfrage (im Vergleich zu Knopfzellen), sowie eine mögliche eingeschränkte Haltbarkeit⁸.

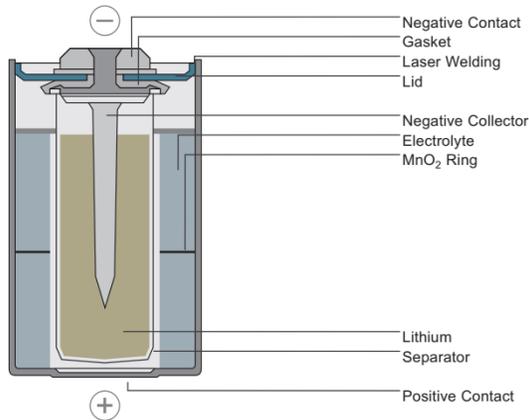


Abbildung 2.14: Schematischer Aufbau einer Lithium-Mangandioxid-Zelle als *Bobbin type* [6]

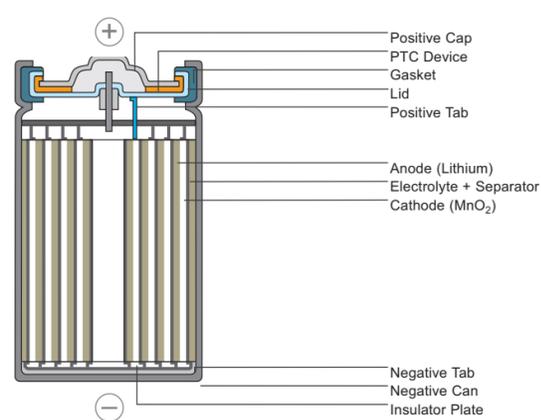


Abbildung 2.15: Schematischer Aufbau einer Lithium-Mangandioxid-Zelle als *Wound type* [6]

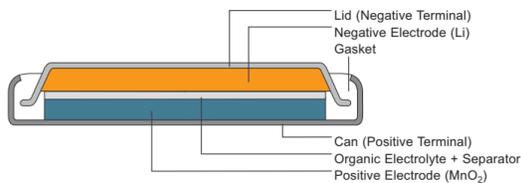


Abbildung 2.16: Schematischer Aufbau einer Lithium-Mangandioxid-Knopfzelle [6]

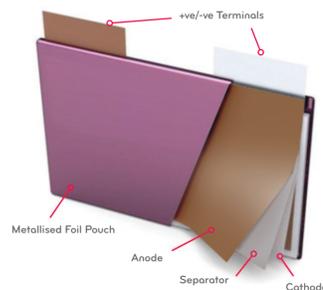


Abbildung 2.17: Schematischer Aufbau einer Lithium-Mangandioxid-Pouchzelle [9]

Die elektrische Leistung von Lithium-Mangandioxid-Zellen ist im direkten Vergleich zu den zuvor angesprochenen Batterietypen in beinahe allen Gebieten schlechter. Durch die Verwendung von Mangandioxid als Kathode und einem entsprechenden Elektrolyten aus Lithiumsalzen, die in unterschiedlichen Mischungen von organischen Lösungsmitteln gelöst sind, ergibt sich eine Entladekurve mit einer deutlichen Abnahme der Spannung über den gesamten Entladeprozess. Fabriksneue Zellen zeigen eine erhöhte Spannung bis zu 3.5 V, die sich nach kurzer Verwendung schnell auf etwa 3.0 V reduziert⁹. Der Verlauf der weiteren Entladung ist je nach Belastung der Zelle deutlich unterschiedlich. Während bei sehr geringen Lasten ebenfalls eine nahezu waagrechte Kurve mit

⁸Anfangs erhielt man kaum Aussagen von Herstellern zur längerfristigen Haltbarkeit, vermutlich wegen Bedenken bei der Dichtheit der verschweißten Folie bzw. Diffusion. Inzwischen wird aber eine "ähnliche Haltbarkeit" wie bei Knopfzellen versprochen, mit mindestens 10 Jahren.

⁹manche Hersteller verwenden auch eine *Vorentladung*, um diese hohe Spannung bei fabriksneuen Zellen zu vermeiden

einem ausgeprägten Knick am Ende der Entladung auftritt, wird die Steigung der Kurve bei steigender Last zunehmend deutlicher¹⁰. Dabei spielt die Konstruktion der Zelle eine große Rolle - eine gewickelte Zelle oder Pouchzelle kann einen deutlich höheren Strom liefern als eine Bobbin- oder Knopfzelle, bevor die Steigung der Entladekurve deutlich zunimmt. Ein typischer Verlauf der Entladungskurve für eine Lithium-Mangandioxid-Knopfzelle bei unterschiedlichen Lasten ist in Abbildung 2.18 dargestellt.

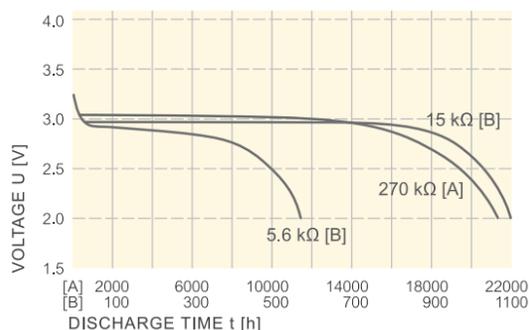


Abbildung 2.18: Typische Entladekurve einer Lithium-Mangandioxid-Knopfzelle (CR2430) bei unterschiedlichen Lasten bei 20°C [6]

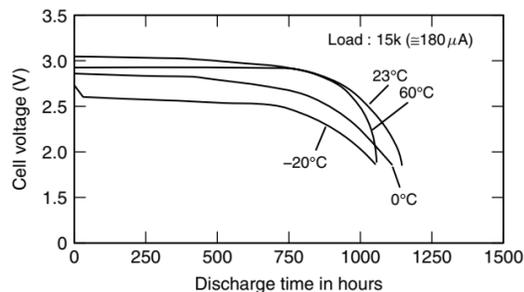


Abbildung 2.19: Typische Entladekurve einer Lithium-Mangandioxid-Knopfzelle bei unterschiedlichen Temperaturen [10]

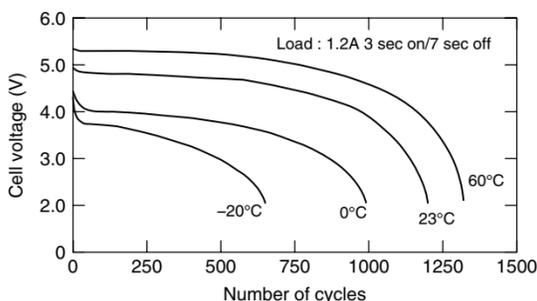


Abbildung 2.20: Spannungsverlauf einer 2CR5 LiMnO₂ Fotobatterie bei pulsformiger Belastung [10]

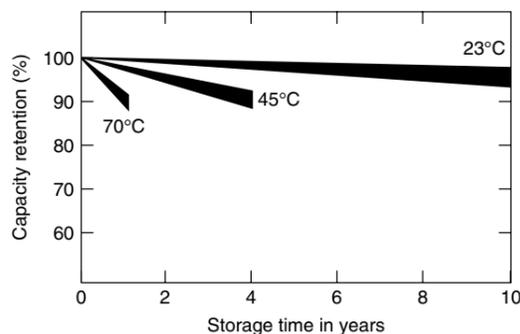


Abbildung 2.21: Typische Bereiche für die Selbstentladung von Lithium-Mangandioxid-Zellen bei unterschiedlichen Temperaturen [10]

Durch die schlechtere Leitfähigkeit des Elektrolyten und durch die chemischen Eigenschaften von Elektrolyt und Kathode ist die Lithium-Mangandioxid-Zelle weniger belastbar und zeigt einen deutlich höheren Innenwiderstand als die Lithium-Schwefeldioxid-Zelle, die Lithium-Thionylchlorid-Zelle und auch die Alkali-Mangan-Zelle. Zusätzlich ist die Nominalkapazität und die Belastbarkeit der Lithium-Mangandioxid-Zelle stark von der Temperatur abhängig, Abbildung 2.19 zeigt die Entladekurve bei unterschiedlichen Temperaturen. Man sieht, dass sowohl reduzierte als auch erhöhte Temperaturen einen deutlichen Einfluss auf die Nominalkapazität haben. In dieser Kurve ist jedoch nur das Verhalten der Ausgangsspannung bei moderater konstanter Belastung angegeben. Bei pulsformiger Belastung kommt die Temperaturabhängigkeit des Innenwiderstandes ebenfalls zur Geltung, die die nutzbare Kapazität bei niedrigen Temperaturen weiter einschränkt (siehe Abbildung 2.20 als Beispiel für eine Lithium-Fotobatterie 2CR5). Im Allgemeinen wird für Lithium-

¹⁰der Verlauf ist jedoch deutlich flacher als bei Alkali-Zellen

Mangandioxid-Zellen ein einsetzbarer Temperaturbereich von üblicherweise -20°C bis $+55^{\circ}\text{C}$ angegeben, durch die Reduktion der Ausgangsspannung sowie die Zunahme des Innenwiderstandes ist die nutzbare Kapazität jedoch bei niedrigeren Temperaturen deutlich eingeschränkt. Abhilfe können gewickelte oder Pouchzellen schaffen, die durch ihren geringeren Innenwiderstand eine höhere nutzbare Kapazität bieten. [5]

Betrachtet man pulsformige Belastungen, stellt sich hier in den typischen Entladekurven ein Wechsel zwischen zwei Teilkurven ein, die jeweils einer Last zugeordnet werden können. Abbildung 2.22 zeigt diesen Zusammenhang schematisch. Es stellt sich eine Lastspannung 1 mit typischem flachen Verlauf bei geringer Last ein, sowie eine Lastspannung 2 mit größerer Steigung bei höherer, gepulster Last. Bei Lasterhöhung reduziert sich die Ausgangsspannung auf die Lastspannung 2, bei Lastreduktion erholt sich die Ausgangsspannung rasch wieder auf Lastspannung 1. So kann im gepulsten Betrieb so lange Ladung entnommen werden, bis Lastspannung 2 unter die Minimalspannung des Systems fällt, während sich die Zelle bei geringerer Last wieder sehr gut auf die ursprüngliche Spannung erholen kann. So sollte bei regelmäßigem Auftreten von Strompulsen die nutzbare Kapazität der Zelle weiterhin recht groß bleiben, solange die Höhe, Dauer und Rate der Impulse nicht zu hoch wird, und wird hauptsächlich durch den Innenwiderstand bestimmt. Auch hier hilft die Verwendung einer gewickelten oder Pouchzelle, um eine höhere nutzbare Kapazität zu erreichen.

Abbildung 2.23 zeigt einen typischen Verlauf für den Innenwiderstand. Ähnlich wie die Ausgangsspannung ist dessen Verlauf in einem großen Bereich sehr flach, bis sich gegen Ende der Entladung ein deutlicher Knick zeigt. Neben dem Ladezustand der Zelle bestimmt auch die Temperatur den Innenwiderstand.

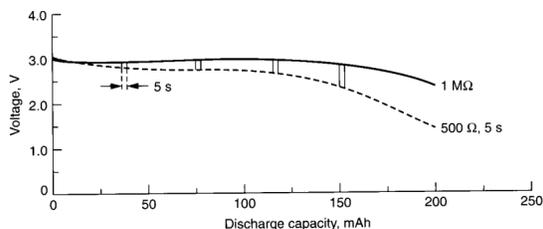


Abbildung 2.22: Verhalten der Ausgangsspannung einer Lithium-Mangandioxid-Knopfzelle bei pulsformiger Belastung [5]

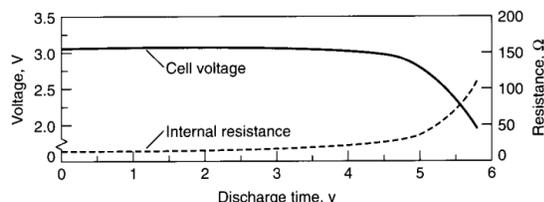


Abbildung 2.23: Typischer Verlauf des Innenwiderstands einer Lithium-Mangandioxid-Knopfzelle [5]

Ähnlich wie bei den zuvor besprochenen Lithiumzellen bildet auch die Lithium-Mangandioxid-Zelle eine Passivierungsschicht, wenn die Zelle nicht oder nur sehr gering belastet wird. Diese Passivierungsschicht sorgt gemeinsam mit der chemischen Stabilität für eine sehr geringe Selbstentladung von typischerweise $\leq 1\%$ bis 3% pro Jahr (siehe Abbildung 2.21 für typische Werte), hat aber im Vergleich zur Lithium-Thionylchlorid-Zelle und zur Lithium-Schwefeldioxid-Zelle einen geringeren Einfluss auf die Ausgangsspannung. Es kommt hier zu praktisch keinem *Voltage Delay*, außer bei niedrigen Temperaturen und hohen Lastströmen. Je nach Bauform unterscheidet sich die Selbstentladung, gewickelte und Pouchzellen liegen durch die größere aktive Oberfläche bei etwa 1% bis 3% pro Jahr, während Bobbin- und Knopfzellen bei $\leq 1\%$ bis 2% pro Jahr liegen. [5]

Nachdem die meisten Lithium-Mangandioxid-Zellen hermetisch verschlossen sind und kein Sicherheitsventil benötigen (mit Ausnahme von gewickelten Zellen für sehr hohe Ströme), genießen diese Batterietypen einen sehr guten Ruf was ihre Sicherheit betrifft [5]. Besonders Knopfzellen begrenzen ihren Ausgangsstrom so weit, dass es zu keiner kritischen Erwärmung kommen kann, die zum Öffnen der Zelle führen kann. Auch die weiteren Bauformen sind so ausgelegt, dass der Strom im Fehlerfall begrenzt wird (beispielsweise durch ein verbautes PTC-Element) und der entstehende

Druck keine Schäden am Gehäuse hervorruft. Pouchzellen können sich bei Übertemperatur oder Kurzschluss zwar ausdehnen, die Konstruktion stellt aber sicher dass es zu keiner Explosion oder Öffnung der Zelle kommt. Dadurch ist ein Einsatz in Anwendungen, bei denen es häufigen Kontakt mit Menschen gibt, unbedenklich. Die enthaltenen Bestandteile, insbesondere der Elektrolyt, enthalten jedoch reizende und in manchen Zusammensetzungen sogar nachgewiesenen krebserregende oder reproduktionstoxische Stoffe, jeglicher Kontakt damit sollte demnach vermieden werden, und undichte oder ausgelaufene Zellen sollten mit größter Sorgfalt behandelt werden. Ohne die Zelle gezielt sehr hohen Temperaturen auszusetzen oder gewaltsames Öffnen der Zelle sollte es jedoch zu keinen undichten Stellen kommen.

Eignung von Lithium-Mangandioxid-Zellen für ESLs Durch die Ausgangsspannung im gewünschten Bereich, sowie eine ausreichend flache Entladekurve unter den meisten Bedingungen eignet sich die Lithium-Mangandioxid-Zelle sehr gut als Energieversorgung für ESLs. Weitere Vorteile wie die hohe Energiedichte und die geringe Selbstentladung und damit sehr lange Haltbarkeit sprechen ebenfalls für den Einsatz in dieser Anwendung. Als wichtigste Kriterien zählen neben der technischen Eignung jedoch auch die Kosten der Batterie sowie deren Verfügbarkeit in großen Stückzahlen - diese Eigenschaften treten insbesondere bei der Lithium-Mangandioxid-Knopfzelle sehr deutlich hervor. Durch die große Verbreitung und die vielen Einsatzgebiete dieser Knopfzellen haben sich deren schwierig im Labor zu prüfenden Vorteile wie die hohe Sicherheit und die lange Haltbarkeit bereits bestätigt. Die kompakte Bauform eignet sich ebenfalls ausgezeichnet für die Verwendung in möglichst kompakten ESLs.

Als problematisch können sich der vergleichsweise hohe Innenwiderstand sowie der deutliche Temperatureinfluss insbesondere bei niedrigen Temperaturen herausstellen, diese Eigenschaften müssen unbedingt messtechnisch spezifisch für diese Anwendung überprüft werden. Besonders durch den Innenwiderstand kann sich bei Knopfzellen eine deutliche Reduktion der nutzbaren Kapazität ergeben, die dazu führen kann dass die erwartete Lebensdauer falsch berechnet wird (geschätzte nutzbare Kapazität zu optimistisch) und dadurch die garantierten Werte nicht erreicht werden können.

Werden in speziellen Anwendungen höhere Anforderungen an die nutzbare Kapazität gestellt, bietet die relativ junge Entwicklung der Pouchzelle eine Ausweichmöglichkeit. Durch die geringeren Stückzahlen und die durch die komplexere Konstruktion bedingten höheren Kosten sollte sich deren Einsatz jedoch soweit wie möglich nur auf Spezialanwendungen beschränken. Vorteile bietet die Pouchzelle auch, weil durch die fehlende Standardisierung der Bauformen die Hersteller benutzerdefinierte Größen anbieten, die exakt an die Anforderungen angepasst werden können. Diese Zellen sind auch in extrem dünnen Bauformen erhältlich, mit Dicken bis zu unter 0.4 mm. Aus diesen Gründen sollten Lithium-Mangandioxid-Pouchzellen ebenfalls für die Anwendung in ESLs messtechnisch genauer evaluiert werden.

2.2.6 Lithium-Kohlenstoffmonofluorid-Zellen ($\text{Li}(\text{CF})_n$)

Die *Lithium-Kohlenstoffmonofluorid-Zelle* ($\text{Li}(\text{CF})_n$) stellt eine Weiterentwicklung der Lithium-Mangandioxid-Zelle dar, die von Panasonic entwickelt und patentiert wurde. Aus diesem Grund werden diese Zellen auch ausschließlich von Panasonic gefertigt. Dabei gibt es ähnlich wie bei Lithium-Mangandioxid-Zellen diesen Typ ebenfalls in den Ausführungen Bobbin, Wound und Knopfzelle. Je nach genauer chemischer Zusammensetzung (Anteil an Fluor und Graphit) ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften der Batterie, wobei einerseits Batterien mit höherer Kapazität als die Lithium-Mangandioxid-Variante möglich sind, oder andererseits mit niedrigerem Innenwiderstand. Durch die chemischen Abläufe während der Entladung hat diese Zelle die Eigenschaft, dass sich der Innenwiderstand bei fortschreitender Entladung reduziert. Gegenüber

Lithium-Mangandioxid-Zellen bieten diese Lithium-Kohlenstoffmonofluorid-Zellen im Allgemeinen eine flachere Entladekurve (siehe Abbildung 2.24), dadurch und durch den abnehmenden Innenwiderstand kann ein sehr großer Teil der gespeicherten Energie entnommen werden. Das gilt auch für pulsformige Belastungen, diese Tatsache ist in Abbildung 2.25 am Beispiel einer Knopfzelle mit 165 mAh Nominalkapazität dargestellt. [5]

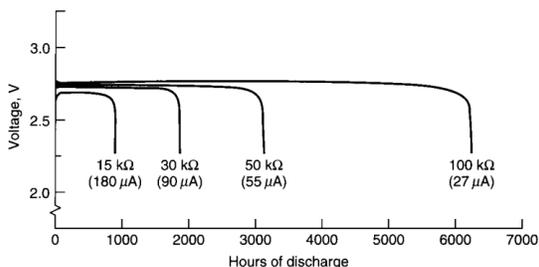


Abbildung 2.24: Typische Entladekurven einer Lithium-Kohlenstoffmonofluorid-Knopfzelle bei unterschiedlichen Lasten [5]

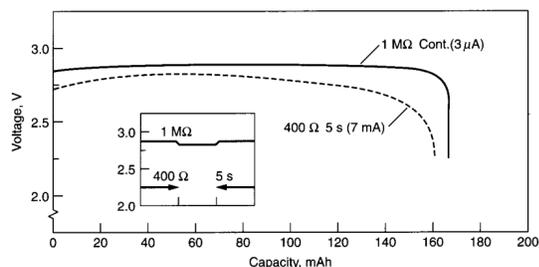


Abbildung 2.25: Verhalten der Ausgangsspannung einer Lithium-Kohlenstoffmonofluorid-Knopfzelle mit 165 mAh Nominalkapazität bei pulsformiger Belastung [5]

Besonders hervorzuheben sind die niedrigere Selbstentladung von etwa 0.5 % pro Jahr bei Raumtemperatur und $\leq 4\%$ pro Jahr bei $+70^\circ\text{C}$, sowie die allgemein guten Eigenschaften und die chemische Stabilität bei hohen Temperaturen (bei Spezialtypen sind bis zu $+150^\circ\text{C}$ möglich). Dadurch sind die Zellen besonders für Anwendungen geeignet, die über einen sehr langen Zeitraum oder bei sehr hohen Temperaturen betrieben werden. [5]

Die Nachteile sind die schlechtere Verfügbarkeit und der höhere Preis, nachdem die Zellen nur von einem Hersteller angeboten werden.

Eignung von Lithium-Kohlenstoffmonofluorid-Zellen für ESLs Durch die etwas besseren Eigenschaften der Lithium-Kohlenstoffmonofluorid-Zelle gegenüber Lithium-Mangandioxid-Zellen wäre diese ebenfalls gut für die Anwendung in ESLs geeignet. Aufgrund der schlechteren Verfügbarkeit und dem höheren Preis, der die geringfügigen Vorteile nicht rechtfertigt, wurden diese Zellen nicht weiter evaluiert.

Falls in Zukunft jedoch Zellen mit niedrigerem Innenwiderstand, niedrigerer Selbstentladung oder höheren Maximaltemperaturen erforderlich sein sollten, kann die Lithium-Kohlenstoffmonofluorid-Batterie weiter verfolgt werden.

Kapitel 3

Methoden

In diesem Kapitel werden die Methoden beschrieben, die benutzt werden um gewisse Kenngrößen von Batterien zu ermitteln. Diese Größen sollen teilweise in den in dieser Arbeit dargestellten entwickelten Messsystemen erfasst werden. Diese Kenngrößen reichen von einfach messbaren Größen bis hin zu nur aufwändig zu messenden Eigenschaften der Batterien:

- Leerlaufspannung der Zelle/Batterie
- Lastspannung der Zelle/Batterie bei definierter Last
- Kurzschlussstrom der Zelle/Batterie
- Innenwiderstand bzw. Impedanz der Zelle/Batterie
- Nominalkapazität der Zelle/Batterie bei Konstantentladung
- Verbleibende Kapazität einer bereits verwendeten Zelle/Batterie
- Leerlaufspannung, Lastspannung, Innenwiderstand der Zelle/Batterie bei beliebigem Stromprofil
- Nutzbare Kapazität der Zelle/Batterie bei beliebigem Stromprofil
- Verhalten bei Alterung der Zelle/Batterie
- Selbstentladung der Zelle/Batterie

Nach der Erklärung der für die Messsysteme relevanten Messmethoden wird später im Kapitel 4 beschrieben, wie die Messsysteme anhand dieser Methoden im Detail konstruiert wurden.

Im Verlauf dieses Kapitels werden zusätzlich die benutzten Messmethoden zur Gegenkontrolle und Verifizierung der bestimmten Größen beschrieben, sowie zum besseren Verständnis der Entwicklung die historisch durchgeführten Messmethoden.

3.1 Messmethoden für elementare Batterieeigenschaften

In diesem Abschnitt werden die elementaren Messmethoden für Kenngrößen beschrieben, die auf eine einfache Art und Weise mit üblichen Messgeräten direkt an der Batterie bestimmt werden können. Dazu gehören die Leerlaufspannung, die Lastspannung, der Kurzschlussstrom sowie der Innenwiderstand der Zelle bzw. Batterie. Aufbauend auf diesen elementaren Größen werden im

Abschnitt 3.2 die komplexeren Messmethoden beschrieben, mit denen die Eigenschaften der Zelle/Batterie über ihre Lebensdauer bestimmt werden können.

3.1.1 Messung der Leerlaufspannung einer Zelle/Batterie

Die Messung der *Leerlaufspannung* ist die einfachste Messung für eine Zelle. Wie in Abbildung 3.1 dargestellt wird ein Voltmeter an die Terminals der Batterie angeschlossen, und der Wert der Leerlaufspannung am Voltmeter abgelesen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Eingangsimpedanz des Voltmeters hoch genug ist, um die Zelle nicht zu belasten und damit eine *Lastspannung* zu messen. Im Falle eines DC-Voltmeters sollte der Eingangswiderstand bei mindestens $1\text{ M}\Omega$, bei Knopfzellen besser $10\text{ M}\Omega$ liegen, um einen Laststrom $< 1\text{ }\mu\text{A}$ zu erreichen.

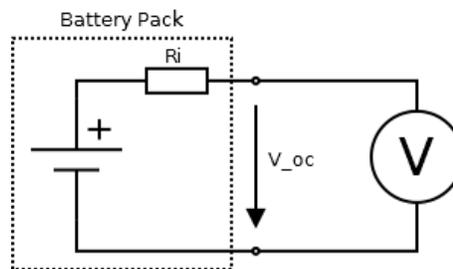


Abbildung 3.1: Messung der Leerlaufspannung V_{oc} einer Zelle/Batterie

Achtung: bei Zellen mit flacher Entladekurve (wie Lithiumzellen) lässt sich von der Leerlaufspannung nicht auf den Ladezustand der Batterie schließen! Auch eine beinahe vollständig entleerte Batterie kann bei entsprechend niedriger Belastung eine Spannung ähnlich einer fabriksneuen Zelle anzeigen.

3.1.2 Messung der Lastspannung einer Zelle/Batterie

Die *Lastspannung* einer Zelle beschreibt deren Ausgangsspannung unter einer gewissen Belastung, und damit die Auswirkung des Innenwiderstandes auf die Leerlaufspannung der Batterie. Dazu wird die Zelle mit dem gewünschten Laststrom belastet, während die Ausgangsspannung der Zelle gemessen wird. Die Ausgangsspannung ergibt sich dann als $V_{load} = V_{oc} - R_i \cdot I_{load}$. Abbildung 3.2 zeigt den entsprechenden Messaufbau.

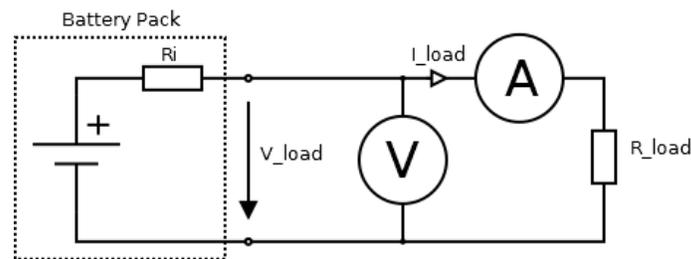


Abbildung 3.2: Spannungsrichtige Messung der Lastspannung V_{load} bei Belastung mit I_{load} einer Zelle/Batterie

Bei dieser Messung ist zu beachten, dass sich je nach Zelltyp und Belastung unterschiedliche Polarisierungseffekte zeigen (siehe Abschnitt 3.1.4), und sich die Lastspannung dadurch zeitlich verändern

wird. Aus diesem Grund sollte die Lastspannung entweder sehr kurz nach dem Anlegen der Last gemessen werden (um beispielsweise den elektrischen Innenwiderstand oder die Auswirkung kurzer Strompulse zu bestimmen), oder so lange vor der Messung gewartet werden, bis sich die Polarisierungseffekte stabilisiert haben und damit die Lastspannung kaum mehr ändert (um beispielsweise den Ionenwiderstand der Zelle zu bestimmen, oder die Auswirkung längerer Strompulse). Wird ein sehr hoher Strom als Last angewendet, können die Polarisierungseffekte auch so stark sein, dass sich die Ausgangsspannung kontinuierlich reduziert - üblicherweise passiert das, wenn der maximale Dauerstrom der Zelle überschritten wird.

Zusätzlich sollte je nach verwendetem Laststrom zwischen *spannungsrichtiger* und *stromrichtiger* Messung von Ausgangsspannung und Ausgangsstrom gewählt werden. Bei sehr geringen Lasten sollte die stromrichtige Messung verwendet werden, bei größeren Lasten die spannungsrichtige Messung. In Abbildung 3.2 wurde die spannungsrichtige Messung gewählt, da das verwendete Voltmeter¹ einen sehr hohen Eingangswiderstand hat und damit die Strommessung kaum verfälscht.

Weiters ist darauf zu achten, dass zwischen zwei solchen Messungen insbesondere bei hohen Lastströmen ausreichend Zeit liegt, um die Polarisierungseffekte in der Batterie wieder rückgängig zu machen, umgangssprachlich die Batterie "rasten" zu lassen. Werden die Belastungen mit zu geringem Abstand ausgeführt, so nehmen die Polarisierungseffekte kontinuierlich zu und die Lastspannung sinkt mit jedem Durchgang weiter, bis irgendwann eine ausreichende Ruhephase zugelassen wird.

Diese Messung eignet sich dazu, das Ende der Lebensdauer in einer Anwendung zu bestimmen. Dazu wird eine benutzte Batterie mit einem Strompuls belastet, der dem Anwendungsfall entspricht. Bricht die Ausgangsspannung dadurch auf einen Wert unter der Minimalspannung des Systems ein, so kann die Batterie als entladen angesehen werden.

Aus dem Verhalten bei pulsformiger Belastung lässt sich zusätzlich der Innenwiderstand der Zelle berechnen. Diese Methode ist detaillierter in Abschnitt 3.1.4 beschrieben.

Diese Messmethode eignet sich auch zur einfachen Qualitätskontrolle von Batterien - stellt die Batterie eine ausreichend hohe Lastspannung unter einer definierten Last zur Verfügung, kann eine Schnellprüfung in der Wareneingangskontrolle als positiv erachtet werden.

3.1.3 Messung des Kurzschlussstromes einer Zelle/Batterie

Die Messung des *Kurzschlussstromes* einer Zelle kann dazu dienen, eine Vorstellung des maximalen Stromes den die Zelle kurzfristig liefern kann zu bekommen (oder auch langfristig, im Falle gewickelter Zellen mit niedrigem Innenwiderstand), oder um die Erwärmung der Zelle im Kurzschlussfall zu überprüfen. Bei Pouchzellen kann die Messung dazu dienen, die Expansion der Pouchzelle zu bestimmen.

Um den Kurzschlussstrom zu bestimmen, wird die Zelle mit einem entsprechenden Amperemeter kurzgeschlossen und der Kurzschlussstrom direkt am Amperemeter abgelesen. Diese Messmethode ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

Bei Knopfzellen und weiteren Batterietypen für geringe Leistungen wird sich der Kurzschlussstrom nach Anlegen des Kurzschlusses schnell reduzieren und die Erwärmung sich in Grenzen halten. Werden jedoch hochstromfähige Zellen kurzgeschlossen, kann ein sehr hoher Strom über eine längere Zeit bestehen bleiben, und es dabei zu einer kritischen Erwärmung der Zelle kommen, die auch aufplatzen, ausgasen oder im schlimmsten Fall explodieren kann, was durch rechtzeitiges Entfernen des Kurzschlusses verhindert werden sollte. Um bei hohen Strömen das Amperemeter nicht

¹beispielsweise Fluke 87V: $> 10\text{ M}\Omega$

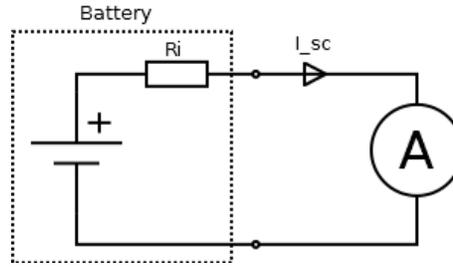


Abbildung 3.3: Messung des Kurzschlussstromes I_{sc} einer Zelle/Batterie mit einem Amperemeter

zu beschädigen, kann auch ein niedriger ohmscher Widerstand entsprechender Leistung und ein Voltmeter zur Bestimmung des Kurzschlussstromes verwendet werden.

Wenn nicht unbedingt notwendig, sollte diese Messung an Zellen und Batterien vermieden werden. Durch den Kurzschluss kann die Zelle beschädigt werden, in jedem Fall kann eine große Ladungsmenge verloren gehen.

Diese Messung kann auch verwendet werden, um den Innenwiderstand der Zelle zu bestimmen. Wird zuerst die Leerlaufspannung und dann der Kurzschlussstrom bestimmt, kann der Innenwiderstand als Quotient aus den beiden berechnet werden: $R_i = \frac{V_{oc}}{I_{sc}}$. Aufgrund der geringeren Belastung und der genaueren Ergebnisse sollte jedoch, speziell für Batterien mit geringer Ausgangsleistung, die in Abschnitt 3.1.4 beschriebene Delta-Methode benutzt werden.

3.1.4 Messung des (ohmschen) Innenwiderstandes einer Zelle/Batterie

Um den *Innenwiderstand* einer Zelle zu bestimmen, kann das in Abschnitt 3.1.2 beschriebene Prinzip der Lastspannungsmessung verwendet werden. Dazu wird der gleiche Messaufbau wie in Abbildung 3.2 verwendet, vor der Messung des Laststromes wird allerdings die Leerlaufspannung wie in Abbildung 3.1 dargestellt gemessen. Dadurch sind alle Parameter in der Gleichung $V_{load} = V_{oc} - R_i \cdot I_{load}$ bis auf den Innenwiderstand R_i bekannt. Damit kann der Innenwiderstand berechnet werden:

$$R_i = \frac{V_{oc} - V_{load}}{I_{load}}$$

Diese Messung ist ebenfalls bei beliebigen stufenförmigen Stromprofilen möglich, wobei bei jeder Änderung des Laststromes der Innenwiderstand entsprechend berechnet werden kann. Mit $V_{load_1} = V_{oc} - R_i \cdot I_{load_1}$ und $V_{load_2} = V_{oc} - R_i \cdot I_{load_2}$ ergibt sich durch Subtraktion:

$$R_i = \frac{V_{load_1} - V_{load_2}}{I_{load_2} - I_{load_1}}$$

Mit diesem Zusammenhang lässt sich für jede Laststromänderung, die eine Ausgangsspannungsänderung hervorruft, der aktuelle Innenwiderstand berechnen (*Delta-Methode*).

Abbildung 3.4 stellt einen typischen zeitlichen Verlauf der Ausgangsspannung einer Batterie bei einer puls förmigen Strombelastung dar. Dabei muss wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben darauf geachtet werden, zu welchem Zeitpunkt die Lastspannung gemessen wird. Man erkennt deutlich die unterschiedlichen Bereiche, in denen die einzelnen Komponenten des Innenwiderstandes wirken: [5]

Elektrischer Widerstand: ergibt sich durch die Summe der elektrischen Widerstände der Bestandteile der Zelle (Leitfähigkeit der Elektroden, Leitfähigkeit der internen elektrischen Verbindungen, Leitfähigkeit der Terminals, etc.). Der elektrische Widerstand macht sich durch

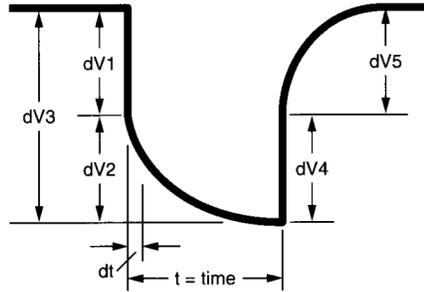


Abbildung 3.4: Typischer zeitlicher Verlauf der Ausgangsspannung einer Zelle bei pulsformiger Belastung [5]

seine unmittelbare und lineare Auswirkung bemerkbar, so tritt der Spannungseinbruch durch den elektrischen Widerstand momentan auf und ist proportional zum Laststrom. In Abbildung 3.4 entspricht dies den Anteilen $dV1$ und $dV4$. Möchte man lediglich den elektrischen Widerstand bestimmen, muss die Messung der Lastspannung unmittelbar *nach* Aktivieren bzw. Entfernen der Last gemessen werden.

Ionenwiderstand: ergibt sich aus dem Einfluss von Faktoren wie der Ionenleitfähigkeit des Elektrolyten, der Ionenmobilität (Beweglichkeit der Ionen), der Größe der aktiven Oberfläche und der Porosität der Elektroden, ablaufenden Nebenreaktionen und weiteren Eigenschaften. Diese Faktoren werden zusammengefasst als *Polarisation* oder *Polarisationseffekte* bezeichnet. Durch deren graduellen Verlauf ergeben sich die Kurven in den Abschnitten $dV2$ und $dV5$ in Abbildung 3.4. Diese sind schwerer zu erfassen, können aber aus der Differenz zwischen Gesamteinbruch $dV3$ und den Anteilen des elektrischen Widerstandes $dV1$ und $dV4$ berechnet werden. Soll der Ionenwiderstand oder der gesamte Innenwiderstand bestimmt werden, ist also eine Messung der Lastspannung unmittelbar *vor* Entfernen der Last bzw. nach dem erneuten Stabilisieren der Ausgangsspannung (beispielsweise vor Aktivieren der nächsten Belastung) zielführend.

Diese beiden Bestandteile ergeben zusammen den *Innenwiderstand* der Zelle. Dieser hängt zusätzlich von Faktoren wie der Konstruktion, Temperatur, dem aktuellen Ladezustand und dem Alter der Zelle ab, wobei diese Faktoren unterschiedliche Einflüsse auf den elektrischen und den Ionenwiderstand haben und daher schwer zu modellieren sind.

In [5] wird empfohlen, statt der Leerlaufspannung die Ausgangsspannung bei einem geringen *Hintergrundstrom* zu messen und den Innenwiderstand über die Delta-Methode zu berechnen, um die Variationen der Leerlaufspannung zu reduzieren und damit stabilere Ergebnisse zu erhalten.

3.2 Messmethoden für Batterieeigenschaften über deren Lebensdauer

In diesem Abschnitt werden Messmethoden für die Kenngrößen beschrieben, die über den gesamten Verlauf der Lebensdauer einer Zelle/Batterie ausgewertet werden müssen, wie die Nominalkapazität bzw. Restkapazität einer Batterie (bei Konstantentladung), den Verlauf von Leerlaufspannung, Lastspannung und Innenwiderstand über die Lebensdauer (bei einem beliebigen, üblicherweise pulsformigen Stromprofil), sowie die Bestimmung der nutzbaren Kapazität für die Anwendung aus den vorher bestimmten Größen. Diese Größen können nicht direkt an der Zelle/Batterie gemessen werden, sondern müssen durch aufwändigere Testmethoden über die gesamte Lebensdauer der

Zelle/Batterie bestimmt werden, was diese Messmethoden auch sehr zeitintensiv macht. Zusätzlich handelt es sich bei diesen Messmethoden um *destruktive Messmethoden*, die die Batterie in ihrem Verlauf entladen und damit gewissermaßen zerstören.

3.2.1 Bestimmung der Nominalkapazität bzw. Restkapazität einer Zelle/Batterie

Um die *Nominalkapazität* einer Zelle/Batterie zu bestimmen, wird üblicherweise eine *Standardentladung* durchgeführt. Das bedeutet, dass die Zelle/Batterie bei ihrem spezifizierten konstanten Nominalstrom (*Standard Discharge Current*) oder einem definierten Konstantwiderstand bei einer definierten Temperatur (üblicherweise Raumtemperatur) entladen wird, bis die Entladeschlussspannung erreicht wird. Während dieser Entladung wird der Verlauf des Laststromes aufgezeichnet, bzw. bei Entladung über einen konstanten Widerstand der Verlauf der Ausgangsspannung aufgezeichnet und daraus der Laststrom berechnet. Wird nun der Laststrom aufintegriert, so kann man die entnommene Ladung in jedem Zeitpunkt berechnen ($Q = \int I dt$). Mit den so erhaltenen Werten kann man eine Kurve der Ausgangsspannung in Abhängigkeit der entnommenen Kapazität erstellen. Die entnommene Kapazität, bei der die definierte Entladeschlussspannung unterschritten wird, wird dabei als *Nominalkapazität* bezeichnet und gibt die Kapazität an, die der Batterie bei den spezifizierten Bedingungen typischerweise entnommen werden kann. Ein Beispiel für eine entsprechende Entladekurve für eine Lithium-Mangandioxid-Zelle ist im Kapitel 2 in Abbildung 2.18 dargestellt.

Aufgrund der üblicherweise sehr geringen Nominalströme besonders bei Knopfzellen können solche Standardentladungen sehr lange dauern (beispielsweise anhand Abbildung 2.18 bis zu 22000 Stunden, bzw. immer noch 1100 Stunden bei einer mittleren Last, das entspricht immer noch 46 Tagen).

Durch die konstante geringe Belastung bei diesem Test ergeben sich Ausgangsspannungskurven die nur langsame Änderungen enthalten. Daher reicht für solche Tests eine geringe Samplerate deutlich < 1 Hz aus.

Mit der gleichen Methode kann auch die Restkapazität einer bereits benutzten Batterie bestimmt werden - die Batterie wird mit einer Standardentladung zu Ende entladen, die daraus bestimmte entnommene Kapazität entspricht der Restkapazität in der Batterie. Ist die Nominalkapazität bekannt, kann aus der Differenz zwischen Nominalkapazität und Restkapazität die in der Anwendung verbrauchte Ladung berechnet werden.

Dabei ist zu beachten, dass die *Standardentladung* nicht unbedingt repräsentativ für die Anwendung ist. Daher macht es Sinn, einen speziell für die Anwendung angepassten Entladestrom zu verwenden, der in etwa der Durchschnittsbelastung in der Anwendung entspricht, bzw. bei sehr geringer Durchschnittsbelastung (wie im Fall von Systemen die über Jahre hinweg betreiben werden) ein Vielfaches der Durchschnittsbelastung zu verwenden. Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass der für die Zelle spezifizierte maximale Dauerstrom nicht überschritten wird, um realistische Ergebnisse zu erhalten. Im Folgenden wird diese Art von Messverfahren kurz als *Konstantentladung* bezeichnet.

Im Allgemeinen wird bei dieser Art der Konstantentladung zwischen den folgenden Varianten unterschieden:

Entladung über Konstantwiderstand: in der einfachsten Variante wird die Zelle mit einem konstanten Widerstand belastet, der so dimensioniert ist, dass sich bei der typischen Nominalspannung der Zelle der gewünschte Laststrom einstellt. Dabei kommt es jedoch je nach Ausgangsspannung der Zelle zu unterschiedlichen Lastströmen, was bei späteren Berechnungen berücksichtigt werden muss, speziell bei Entladekurven mit deutlicher Steigung. Daher

muss bei dieser Variante zwingend die Batteriespannung mitgemessen werden, um den tatsächlichen Laststrom berechnen zu können und damit auf die tatsächliche Ladung schließen zu können. Schwankungen in der Ausgangsspannung der Batterie wirken sich ebenfalls auf den Laststrom aus. Der Vorteil dieser Methode liegt in der Einfachheit.

Entladung über Konstantstrom: diese Variante nutzt eine Stromsenke, um die Zelle mit einem konstanten Strom zu belasten. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass die Belastung der Batterien immer konstant ist, auch wenn sich die Ausgangsspannung verändert. Dadurch können immer die gleichen Entladebedingungen eingehalten werden. Außerdem muss bei dieser Methode die Batteriespannung nicht protokolliert werden, lediglich das Unterschreiten der Entladeschlussspannung muss detektiert werden. Als Nachteil gilt der komplexere Aufbau im Vergleich zum Konstantwiderstand. Durch den gleichbleibenden Strom über die gesamte Entladekurve ist beispielsweise im Fall von Lithium-Mangandioxid-Zellen der Knick am Ende der Entladung deutlicher ausgeprägt, weil der Laststrom im Vergleich zum Konstantwiderstand in diesem Bereich nicht abnimmt.

Entladung über konstante Leistung: diese Variante nutzt ebenfalls eine Stromsenke, deren Laststrom allerdings an die Ausgangsspannung der Batterie angepasst wird, um eine konstante Leistung über den gesamten Entladevorgang zu entnehmen. Nimmt dabei die Ausgangsspannung ab, nimmt der Laststrom entsprechend zu. Diese Variante wird üblicherweise gewählt, wenn das batteriebetriebene Gerät über einen Schaltregler am Batterieeingang verfügt, um dessen Verhalten nachzubilden. Dadurch ergibt sich für diesen Fall die realistischste Entladekurve. Der Knick am Ende der Kurve wird noch deutlicher ausfallen als bei der Konstantstrommethode. Diese Variante ist jedoch am kompliziertesten zu implementieren, da sowohl Ausgangsspannung als auch Laststrom erfasst bzw. moduliert werden müssen.

Um eine seriöse Aussage über die tatsächliche Nominalkapazität einer Zelle machen zu können, müssen aufgrund der Streuungen zwischen einzelnen Zellen des gleichen Typs ausreichend Samples vermessen werden, um eine statistische Auswertung der Ergebnisse zu ermöglichen. Dazu sind ausreichend Kanäle für das Testsystem notwendig, um die Samples in einer akzeptablen Zeit entladen zu können.

3.2.2 Bestimmung des Verlaufs von Leerlaufspannung, Lastspannung und Innenwiderstand über die Lebensdauer

Die in den letzten Abschnitten erklärten Messmethoden lassen sich auch kombinieren, um den Verlauf von Leerlaufspannung, Lastspannung und Innenwiderstand der Zelle über die entnommene Kapazität der Zelle zu bestimmen. Dazu wird wie in Abschnitt 3.2.1 die Ausgangsspannung der Zelle gemessen, während eine veränderliche Last an die Batterie angeschlossen wird. Im einfachsten Fall ist dies ein Widerstand, der über einen Schalter mit der Zelle verbunden werden kann. Die universellere Lösung ist eine steuerbare Stromsenke, mit der ein zeitlich veränderlicher, exakt einstellbarer Strom als Last für die Zelle erzeugt werden kann.

Diese Stromsenke wird nun so angesteuert, dass sich das gewünschte Stromprofil ergibt. Dabei wird es sich üblicherweise um ein pulsartiges Profil handeln, welches einen geringen (oder keinen) Hintergrundstrom, periodisch unterbrochen von einem kurzen, höheren Strompuls enthält. Wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben wird nun die Ausgangsspannung sowie der Strom protokolliert, und aus dem Strom die aufintegrierte entnommene Ladung berechnet.

Wie in Abschnitt 3.1.2 und 3.1.4 beschrieben kann gleichzeitig bei jedem Sprung des Laststromes die dazugehörige Lastspannung bzw. die Leerlaufspannung der Zelle erfasst werden, und aus diesen Werten die entsprechenden Innenwiderstände berechnet werden. Dabei ist zu beachten, dass wie in Abschnitt 3.1.4 beschrieben die Bestandteile des Innenwiderstandes zu den korrekten Zeitpunkten

erfasst werden, um je nach Anforderung den elektrischen Widerstand, den Ionenwiderstand, oder den resultierenden Gesamtinnenwiderstand darzustellen. Aus diesen Daten lassen sich dann Kurven generieren, die den Verlauf der Leerlaufspannung, der unterschiedlichen Lastspannungen, und des berechneten Innenwiderstandes in Abhängigkeit der entnommenen Ladung darstellen. Abbildung 3.5 zeigt solche Kurven, die sowohl die Leerlauf- als auch die Lastspannung (grüne Kurve) als auch den Verlauf des Innenwiderstandes (orange Kurve) bei der Entladung eines CR2450 1S2P Battery-Packs mit einem pulsformigen Stromprofil bestehend aus Ruhephasen ohne Laststrom und periodischen Strompulsen entsprechend der Anwendung. Man sieht, dass die Kurve dem theoretischen Verlauf entspricht, der in Abbildung 2.23 dargestellt ist.

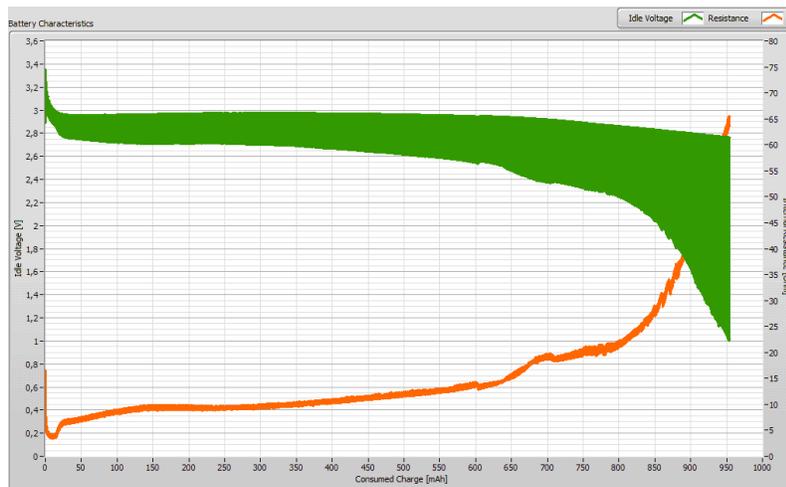


Abbildung 3.5: Gemessener Verlauf der Leerlaufspannung, Lastspannung und des Innenwiderstandes eines CR2450 1S2P Batteriepacks bei pulsformiger Belastung entsprechend der Anwendung

Durch die zeitlich dynamischeren Stromprofile und die schnelleren Änderungen der Ausgangsspannung der getesteten Zelle im Vergleich zur Konstantentladung ist bei diesem Messverfahren eine deutlich höhere Abstrakte notwendig. Im Vergleich zur Konstantentladung ist der Ablauf dieser Testmethode außerdem deutlich komplexer und erfordert mehr Intelligenz des Messsystems.

Mit diesem Verfahren ist es ebenfalls möglich, die Auswirkung von beliebigen Stromprofilen auf den Verlauf der Lastspannung und den Innenwiderstand der Zelle zu evaluieren. Damit kann beispielsweise auch eine komplexere Abfolge von unterschiedlichen Laststromimpulsen simuliert werden. Aufgrund der üblicherweise pulsformigen Stromprofile werden Tests dieser Art im Folgenden kurz als *Pulsentladungen* oder *Pulstests* bezeichnet.

3.2.3 Bestimmung der nutzbaren Kapazität einer Zelle/Batterie bei beliebigem Stromprofil

Im Abschnitt 3.2.2 wurde definiert, wie der Verlauf der Leerlauf- und Lastspannung sowie des Innenwiderstandes einer Batterie erfasst werden können. Um die nutzbare Kapazität aus diesen Kurven nun abzuschätzen, wird ausgewertet ab welcher entnommenen Ladung das betreffende System an seine Grenzen stößt - in diesem Fall die minimal erforderliche Betriebsspannung. Dazu wird der Punkt in der Kurve detektiert, an dem die Lastspannung zum ersten Mal unter die minimale Betriebsspannung einbricht. Die Kapazität, die bis zu diesem Punkt entnommen wurde, kann als *nutzbare Kapazität* für diese Anwendung definiert werden. Abbildung 3.6 zeigt, wie anhand der gemessenen Kurven aus Abbildung 3.5 die nutzbare Kapazität für diese Batterie abgelesen

werden kann.



Abbildung 3.6: Nutzbare Kapazität des zuvor gemessenen CR2450 1S2P Batteriepacks für eine Anwendung mit 2.1 V Minimalspannung

Man erkennt, dass sich bei einer Anwendung mit einer minimalen Betriebsspannung von 2.1 V und diesem Stromprofil eine nutzbare Kapazität für diese Batterie von etwa 840 mAh ergibt. Betrachtet man den Innenwiderstand der Batterie, bei der die Minimalspannung unterschritten wird, ergibt sich ein maximaler Innenwiderstand von etwa 26 Ω .

Wiederholt man nun diesen Test für weitere Batteriesamples, so wird sich eine gewisse Streuung der Kurven ergeben. Um eine seriöse Aussage über die nutzbare Kapazität einer gewissen Batterietype in dieser Anwendung machen zu können, muss deswegen eine gewisse Anzahl an Samples vermessen werden, deren Ergebnisse dann statistisch ausgewertet werden sollten. So lassen sich die Erwartungswerte für die durchschnittliche nutzbare Kapazität bestimmen, sowie statistische Grenzen in denen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit beispielsweise 95 % aller Batterien liegen werden. Um eine statistisch signifikante Anzahl an Samples zu erfassen ist daher eine ausreichende Anzahl an Kanälen notwendig.

Im Allgemeinen muss das Stromprofil als Kompromiss zwischen geringer Testdauer und realitätsnaher Belastung festgelegt werden. Je näher das Stromprofil an das der Anwendung kommt, desto mehr nähert sich auch die Testzeit an die tatsächliche Batterielebensdauer des Systems an, was bei Ultra-Low-Power-Systemen zu unpraktikablen Durchlaufzeiten führt. Deswegen muss ein Stromprofil definiert werden, welches zu einer kurzen Durchlaufzeit führt, jedoch die Batterie nicht so weit überlastet, dass die Ergebnisse deutlich schlechter als in der tatsächlichen Anwendung ausfallen werden. Das schränkt den Duty Cycle des Laststromprofils auf sehr geringe Werte ein. Ziel dieses Tests ist es, eine realistische nutzbare Kapazität der getesteten Batterie abzuschätzen - diese Anforderung führt unweigerlich zu Durchlaufzeiten, die Wochen bis Monate betragen.

Eine Möglichkeit um die Durchlaufzeit zu verringern ist, nur den interessanten Bereich der Kurvenverläufe mit der komplexeren Pulsentladung zu erfassen, und die weniger interessanten flachen Bereiche der Entladekurve durch vorhergehende Konstantentladungen zu überspringen. Ist beispielsweise bekannt dass die nutzbare Kapazität einer Zelle bei etwa 500 mAh liegt, kann mithilfe der Konstantentladung eine Kapazität von 400 mAh vorentladen werden, und dann zur Pulsentladung gewechselt werden, um das exakte Verhalten gegen Ende der nutzbaren Kapazität zu erfassen.

Eine weitere Möglichkeit der Reduktion der Testzeit wäre, das Stromprofil so einzustellen, dass es laufend zu längeren Phasen mit Konstantstrom kommt, bei denen eine gewisse Ladung entnommen

wird, beispielsweise in 1 %-Schritten der Nominalkapazität. Zwischen diesen Schritten wird jeweils für eine gewisse Anzahl Zyklen eine Pulsentladung durchgeführt, um das aktuelle Pulsverhalten zu erfassen.

3.3 Messmethoden für künstliche Alterung und Selbstentladung

In diesem Abschnitt wird beschrieben wie eine beschleunigte künstliche Alterung der Batterien erreicht werden kann, und wie diese zur Bestimmung von Alterungseffekten der Batterien sowie zur Abschätzung der Selbstentladung verwendet werden kann.

3.3.1 Beschleunigte künstliche Alterung einer Zelle/Batterie

Durch die sehr langen Betriebszeiten in dieser Anwendung ist es nicht praktikabel, zu testende Batterien unter kontrollierten Bedingungen jahrelang zu lagern und nach der verstrichenen gewünschten Lagerzeit Tests und Messungen an diesen Samples durchzuführen. Nachdem Ergebnisse in kürzerer Zeit gebraucht werden, ist es notwendig die Zellen für solche Messungen künstlich zu altern, durch sogenanntes *Accelerated Life Testing* (ALT).

Dabei nutzt man bei Batterien den Effekt, dass chemische Systeme bei erhöhten Temperaturen eine erhöhte Reaktivität zeigen, und dadurch chemische Prozesse schneller ablaufen als bei niedrigeren Temperaturen. Dieser Zusammenhang wird durch die *Arrhenius-Gleichung* beschrieben, mit der sich die Reaktionsgeschwindigkeit in einem chemischen Prozess abhängig von der Temperatur und einer prozessspezifischen Aktivierungsenergie berechnen lässt. Für die beschleunigte Alterung muss man nun nicht die exakte Reaktionsgeschwindigkeit bestimmen, sondern kann den Faktor der Vervielfachung der Reaktionsgeschwindigkeit bei einem definierten Temperaturunterschied bestimmen, ohne dazu die exakte Aktivierungsenergie kennen zu müssen. Dazu nimmt man an, dass die Aktivierungsenergie für die Reaktionsgeschwindigkeit bei Raumtemperatur und die beschleunigte Reaktion bei erhöhter Temperatur gleich ist, und kann damit das Verhältnis zwischen diesen Reaktionsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz bestimmen.

Im Allgemeinen gibt es für diesen Zusammenhang eine Annäherung, die beschreibt dass bei einer Temperaturerhöhung von 10 K sich die Reaktionsgeschwindigkeit um den Faktor 2 bis 3 erhöht. Diese Annäherung ist auch als die *Reaktionsgeschwindigkeit-Temperatur-Regel* (RGT-Regel) bekannt und gilt als Faustformel für die Abschätzung der Beschleunigung vieler chemischer und physikalischer Prozesse. Bei Accelerated Life Tests von Batterien wird üblicherweise der Faktor 2 empfohlen, um die Abschätzung der benötigten Zeit zu berechnen. [10]

Demnach lässt sich eine Batterie künstlich altern, in dem sie unter einer kontrollierten erhöhten Temperatur für eine gewisse Zeit gelagert wird. Dabei gilt: je höher die Temperatur, desto kürzer die notwendige Zeit für den Alterungsprozess. Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Batterie weiterhin in ihrem spezifizierten Temperaturbereich betrieben wird, um keine Schäden an der Batterie hervorzurufen.

Annähernd lässt sich der Alterungsprozess daher mit einer Verdopplung der Reaktionsgeschwindigkeit bei einer Erhöhung der Temperatur um 10 K mit folgender Formel beschreiben:

$$\frac{t_{T_0}}{t_{T_1}} = 2^{\frac{T_1 - T_0}{10 \text{ K}}}$$

Dabei sind t_{T_1} bzw. t_{T_0} die Zeitspannen, die für die Reaktion bei den Temperaturen T_1 bzw. T_0 benötigt werden, mit der "Normaltemperatur" T_0 und der erhöhten Temperatur T_1 , d.h. durch

beschleunigte Alterung bei der Temperatur T_1 für die Zeitdauer von t_{T_1} ergibt sich ein künstliches Alter, welches einer Batterie entspricht die für eine Zeitdauer von t_{T_0} bei einer Temperatur von T_0 gelagert wurde.

Die benötigte Zeitdauer, um bei einer definierten Temperatur von 50°C eine bei Raumtemperatur (23°C) für 5 Jahre gelagerte Batterie beschleunigt zu altern beträgt daher:

$$t_{T_1} = \frac{t_{T_0}}{2^{\frac{T_1 - T_0}{10\text{K}}}} = t_{T_0} \cdot 2^{\frac{T_0 - T_1}{10\text{K}}} = 5 \text{ Jahre} \cdot 2^{\frac{23^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}}{10\text{K}}} = 0.77 \text{ Jahre} \approx 281 \text{ Tage}$$

Um diese beschleunigte Alterung in der Praxis durchzuführen werden die Zeitspannen berechnet, die für die gewünschte Alterung benötigt werden. Ein Wärmeschrank mit ausreichend Volumen wird bei 50°C betrieben und für die beschleunigte Alterung verwendet. Für unterschiedliche Alterungsstufen werden Zellen und Batteriepacks in diesem Wärmeschrank gelagert, bis die errechnete Alterungsdauer erreicht ist, und dann entnommen.

Die so entnommenen künstlich gealterten Batterien werden optisch und elektrisch untersucht, um die Auswirkung der Alterung festzustellen. Optische Kontrollen dienen dazu, um Defekte wie ausgelaufene Zellen zu finden. Mit elektrischen Tests wird untersucht ob sich durch die beschleunigte Alterung etwas am Verhalten den Batterien geändert hat, so wird üblicherweise die Leerlauf- und Lastspannung der Zellen gemessen, anschließend wird die nutzbare Kapazität unter Pulsbelastung bestimmt.

3.3.2 Abschätzung der Selbstentladung einer Zelle/Batterie

Neben der optischen und elektrischen Kontrolle der künstlich gealterten Zellen lässt sich durch die beschleunigte Alterung auch die Selbstentladung der Batterien feststellen. Die Selbstentladung der Zellen wird bei Lithiumzellen hauptsächlich durch chemische Prozesse in der Zelle verursacht, die durch die erhöhte Temperatur ebenfalls nach der Arrhenius-Gleichung beschleunigt ablaufen. Durch die Verwendung der Faustformel mit Faktor 2 kann zwar keine exakte Selbstentladung gemessen werden, die gemessene Selbstentladung sollte jedoch eine obere Schranke für die erwartete Selbstentladung darstellen. Würde die Selbstentladung mit einem höheren Beschleunigungsfaktor als 2 ablaufen, wäre die berechnete Zeitspanne für die beschleunigte Alterung kürzer als mit Faktor 2. Anders gesagt wird so die maximale Zeitdauer für die Alterung berechnet und daher die maximale zu erwartende Ladung durch Selbstentladung bei erhöhter Temperatur verloren. Damit kann diese Methode als Abschätzung für die worst case Selbstentladung verwendet werden.

Um einen Zahlenwert für die Selbstentladung zu erhalten, wird eine ausreichende Anzahl fabriksneuer Batterien konstantentladen, um die Nominalkapazität zu bestimmen. Eine ausreichende Anzahl der gleichen Batterien wird im Wärmeschrank gelagert, um die Batterien künstlich zu altern und damit eine Selbstentladung zu verursachen. Haben die Batterien ihr gewünschtes künstliches Alter erreicht, werden sie aus dem Wärmeschrank entnommen und ebenfalls konstantentladen um die verbleibende Nominalkapazität zu bestimmen. Dabei werden die Batterien in 1-Jahres-Schritten auf ein künstliches Alter von 1 bis 6 Jahren gealtert und anschließend vermessen. So lässt sich der Verlauf der erwarteten Selbstentladung als Diagramm darstellen und als erwarteter Wert in Prozent pro Jahr errechnen.

3.4 Messmethoden für die Gegenprüfung und Verifikation

Um die Korrektheit der durchgeführten Abschätzungen und Berechnungen gegenzuprüfen, werden weitere Messungen durchgeführt, das Verhalten von ESLs und Batterien im Betrieb zu bestimmen:

Continuous Acquiring: betreibt das ESL für einen eingeschränkten Zeitraum an einer Konstantspannungsquelle entsprechend den normalen Betriebsbedingungen in einer realistischen Umgebung. Dabei wird die Stromaufnahme des ESLs mit einer ausreichenden Sampling Rate mitgemessen und daraus die erwartete Ladungsaufnahme pro Tag im Normalbetrieb hochgerechnet. Die übliche Laufzeit für die Erfassung beträgt etwa 48 Stunden. Die hochgerechnete Ladungsaufnahme muss sich mit der berechneten Ladungsaufnahme in der Lebensdauerberechnung decken. Wird diesem System zusätzlich die nutzbare Kapazität der verbauten Batterie mitgeteilt, kann direkt die erwartete Lebensdauer für dieses vermessene ESL hochgerechnet werden. Mit dieser Methode kann einerseits die korrekte Berechnung des Ladungsverbrauchs überprüft werden, andererseits kann das korrekte Verhalten des ESLs abseits von Laborbedingungen bestätigt werden. Die Lebensdauerberechnung enthält Felder, die die zu erwartenden Ergebnisse dieser Messmethode angeben um mit den tatsächlichen Ergebnissen verglichen werden zu können (entsprechend Abbildung 3.7).

Continuous Acquiring Results		Estimated	Result
		Power Supply 3V	
Expected Charge Consumption per Day		2,96 As	3,01 As
	Maximum Minimum	2,97 As 2,96 As	3,03 As 2,90 As
Expected Average Current		17,13 µA	17,4 µA
	Maximum Minimum	17,19 µA 17,11 µA	17,53 µA 16,76 µA
Expected Continuous Acquiring Lifetime		7,01 years	6,9 years
	Minimum Maximum	6,99 years 7,02 years	6,85 years 7,16 years

Abbildung 3.7: Vorausberechnung und tatsächliches Ergebnis der *Continuous Acquiring* Verifikationsmethode

Endurance Tests: Dauertests, die zur Gegenprüfung der nutzbaren Batteriekapazität durchgeführt werden. Dazu gibt es für jeden ESL-Typ eine spezielle Firmware, die kontinuierlich definierte Operationen durchführt, in einer festgelegten zeitlichen Abfolge. Dabei kommt es zu keiner Kommunikation mit der Infrastruktur, die Kommunikation wird lediglich durch Einschalten der Funkschnittstelle simuliert, dadurch ist keine spezielle Infrastruktur notwendig. Die Firmware zählt die Anzahl dieser Durchläufe mit, und arbeitet so lange, bis es zum ersten Ausfall wegen zu geringer Batteriespannung kommt, also dem Ende der Lebensdauer. Diese Zählerwerte können anschließend ausgelesen werden. Eine größere Anzahl von ESLs wird mit dieser Firmware versehen und zunächst vermessen, um den exakten Ladungsverbrauch festzustellen. Anschließend werden die vorgesehenen Batterien angeschlossen und der Testdurchlauf damit gestartet. Sind alle ESLs zum Stillstand gekommen und dadurch die Batterien entladen, werden die Zählerwerte ausgelesen und mit dem gemessenen Energieverbrauch multipliziert, um so die verbrauchte Ladung bis zum Ende der Lebensdauer sehr genau zu berechnen. Dieser Wert wird mit der nutzbaren Kapazität der verwendeten Batterie verglichen. In der Lebensdauerberechnung wird ebenfalls berechnet, wie viele Durchläufe unter den definierten Bedingungen für dieses ESL zu erwarten sind, diese können dann mit der tatsächlichen Anzahl an Durchläufen gegengeprüft werden (siehe Abbildung 3.8). Nach einem Testlauf können die Zähler zurückgesetzt und neue Batterien angeschlossen werden, um einen neuen Testlauf zu starten. Je nach verwendeten Operationen und deren Abfolge dauert ein solcher Testlauf einige Wochen.

Real Time Tests: Dauertests, die in entfernten, abgeschlossenen Bereichen durchgeführt werden und einen tatsächlichen Markt simulieren sollen. Dabei wird eine größere Anzahl an unterschiedlichen ESLs an der standardmäßigen Infrastruktur so betrieben, wie dies auch beim Kunden passieren würde, mit den spezifizierten Betriebsbedingungen. Regelmäßig werden interne Diagnosedaten der ESLs an den Server übertragen, um das Verhalten der ESLs und

Continuous Display Updating Results		Estimated	Result
		New Battery (3V)	New Battery (3V)
Expected Number of Updates		27499 Updates	29340 Updates
Jump to Result Entry Minimum Maximum		26943 Updates 27785 Updates	28800 Updates 30200 Updates
Expected Test Runtime		7,46 days	8,0 days
Minimum Maximum		7,31 days 7,54 days	6,58 days 8,23 days
Useable Battery Capacity Estimation from Results		From Configuration	Est. from Result
		New Battery (V)	New Battery (V)
Estimated Useable Battery Capacity		743 mAh	792 mAh
Minimum Maximum Std.Dev.		633 mAh 825 mAh	778 mAh 818 mAh 15 mAh

Abbildung 3.8: Vorausberechnung und tatsächliches Ergebnis der *Endurance Test* Verifikationsmethode

der verbauten Batterien zu überwachen². Im Halbjahresrhythmus wird eine definierte Anzahl an ESLs der unterschiedlichen Typen entnommen und im Labor weiter untersucht. Die Restkapazität der verbauten Batterien wird ermittelt und den berechneten Werten gegenübergestellt. Diese Tests haben zwar lange Laufzeiten, liefern aber durch die Diagnosedaten und das regelmäßige Entnehmen von Prüflingen eine kontinuierliche Kontrolle des aktuellen Zustandes.

Weitere Tests: weitere ESLs befinden sich in laufend unterschiedlichen Teststellungen, beispielsweise als Türschilder die die Raumbelugung inklusive anstehender Termine sowie die Anwesenheit der Mitarbeiter anzeigen. Hierfür werden insbesondere große ESLs verwendet, die eine sehr hohe Ladungsaufnahme und hohe Stromspitzen besitzen. Diese ESLs erhalten sehr viele Displayänderungen pro Tag, die Batterien müssen daher regelmäßig gewechselt werden. Jedes Mal wenn eine leere Batterie gewechselt wird, werden die Diagnosedaten des ESLs ausgelesen und daraus die vom ESL verbrauchte Ladungsmenge berechnet. Mit diesem Wert kann überprüft werden, ob die der Batterie in dieser Teststellung entnommene Kapazität bis zum Ausfall des ESLs der nutzbaren Kapazität entspricht.

Tatsächliches Verhalten im Feld: sobald Ergebnisse und Rückmeldungen aus dem Feld verfügbar sind, sollten diese ebenfalls in die Verifikationsmethoden einfließen und damit die Modelle und Berechnungen bestätigen oder verbessern. Dazu müssen aber die ESLs lange genug im Feld in Betrieb sein, um eine größere Anzahl an ESLs zu erhalten, die das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben. Nachdem es inzwischen nach 4 Jahren Betrieb von größeren Stückzahlen an ESLs nur eine sehr geringe Quote an Rückläufern gibt, deutet dies darauf hin dass es zumindest keine groben Überschätzungen bei der Berechnung der erwarteten Lebensdauer gab.

Diese Tests werden laufend durchgeführt, um Abweichungen von den erwarteten Ergebnissen feststellen zu können. Im Falle einer Abweichung muss herausgefunden werden, wodurch diese verursacht wird. Dadurch können Fehler frühzeitig entdeckt werden, oder die entsprechenden Modelle verbessert werden.

²die Übertragung dieser Diagnosedaten fällt beim Energieverbrauch durch die niedrige Frequenz und Datenmenge nicht ins Gewicht

3.5 Historische Methoden der Batterieevaluierung bei SES-imagotag

Dieser Abschnitt beschreibt die in der Vergangenheit verwendeten Methoden zur Bestimmung der Eigenschaften von Batterien, um zu verstehen welche Probleme und Nachteile diese Methoden hatten, und welche Schritte zur Entwicklung der derzeitigen Methoden geführt haben.

3.5.1 Entladung über konstanten Widerstand und Mitprotokollieren der Batteriespannung

Als erste Methode, die verfügbare Kapazität von Batterien zu ermitteln, wurde die Entladung an einem konstanten Widerstand verwendet, während die Batteriespannung mitprotokolliert wurde. Dieser Aufbau entspricht der in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Messmethode. Dazu wurden auf einem Stück Lochrasterplatine 16 Widerstände aufgelötet, die 5 unterschiedliche Werte hatten und dadurch unterschiedliche Lastfälle darstellten (jeweils bei einer Nominalspannung der Batterie von 3.0 V):

- $820 \Omega (\hat{=} \frac{3.0 \text{ V}}{820 \Omega} = 3.66 \text{ mA})$
- $1000 \Omega (\hat{=} \frac{3.0 \text{ V}}{1000 \Omega} = 3.0 \text{ mA})$
- $2200 \Omega (\hat{=} \frac{3.0 \text{ V}}{2200 \Omega} = 1.36 \text{ mA})$
- $3300 \Omega (\hat{=} \frac{3.0 \text{ V}}{3300 \Omega} = 0.91 \text{ mA})$
- $5600 \Omega (\hat{=} \frac{3.0 \text{ V}}{5600 \Omega} = 0.54 \text{ mA})$



Abbildung 3.9: Erstes 16-Kanal Konstantentladesystem mit Spannungslogger

Üblicherweise wurden zu diesem Zeitpunkt ausschließlich verwendete CR2450 1S2P Packs von unterschiedlichen Herstellern entladen. Die Werte des Lastwiderstandes decken einen Bereich ab, der sich in etwa von der Standardentladung (für CR2450 üblicherweise mit $7.5 \text{ k}\Omega$ angegeben) bis zum maximalen Dauerstrom (je nach Hersteller und Modell zwischen 0.2 mA und 2.0 mA , bei neueren *high drain* Modellen sogar bis zu 6.0 mA) erstreckt, und bilden einen Kompromiss zwischen dem Einhalten der Herstellerspezifikationen und einer kurzen Durchlaufzeit der Messung.

An jeden der 16 Batterieslots wurde ein Kanal des USB-Datenerfassungsgerätes NI-6211 von National Instruments angeschlossen, welches von einer einfachen LabView-Software gesteuert alle 10 Sekunden die Spannungen der Batterien protokollierte. Durch die sehr langsam ablaufende Konstantentladung war die Abtastrate von 0.1 Hz ausreichend. Nach dem Erreichen der Entladeendspannung musste die Entladung manuell unterbrochen werden. Dieses einfache Messsystem ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

Aus den entstandenen Kurven die die Lastspannung über die Zeit darstellten konnten Kurven errechnet werden, die die Lastspannung über die entnommene Ladung darstellten. Diese Kurven für qualitativ hochwertige CR2450 1S2P Packs (Nominalkapazität 1100 mAh) bei einer Belastung mit 820Ω sind in Abbildung 3.10 dargestellt. So konnte abgelesen werden, bei welcher Ladung eine gewisse Spannungsschwelle erreicht wurde, bzw. die Entladeschlussspannung, in Abhängigkeit des Lastwiderstandes. Zusätzlich lässt sich die Streuung der Batterien abschätzen.

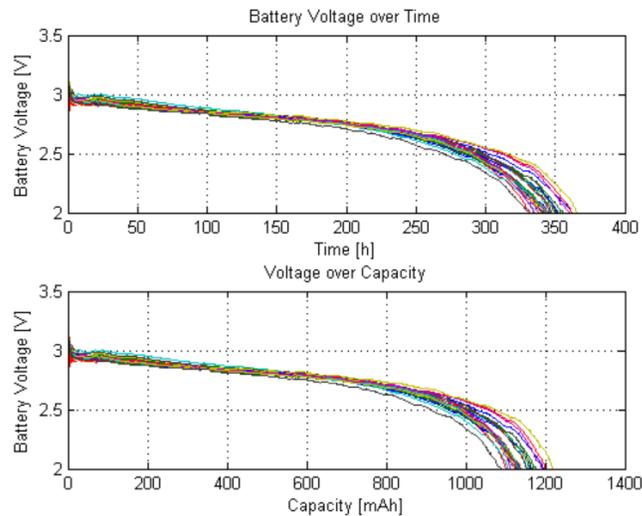


Abbildung 3.10: Konstantentladekurven für qualitativ hochwertige CR2450 1S2P Packs (Nominalkapazität 1100 mAh) bei einer Belastung mit 820Ω

Diese einfache Methode reichte, um die verfügbare Kapazität der Batterien bei konstanter Entladung zu ermitteln bzw. zu verifizieren, um so grobe Qualitätsprobleme feststellen zu können - was tatsächlich auch passiert ist. Mit dieser Messmethode konnte auf einen anderen Hersteller gewechselt werden, der messbar höherwertige Batterien lieferte. Außerdem konnte festgestellt werden, dass die verwendeten höherwertigen Batterien auch bei der erhöhten Last von 820Ω die Nominalkapazität bei Konstantentladung erreichen.

Wie sich herausstellte, hat die konstante Belastung für die Anwendung im ESL jedoch nur eine begrenzte Aussage, da sich das Verhalten der Batterien zwischen konstanter Belastung und pulsformiger Belastung deutlich unterscheidet, und insbesondere der Innenwiderstand der Batterie für die Anwendung im ESL ausschlaggebend ist, dieser bei der Konstantentladung jedoch nicht sichtbar ist.

Für die einfache Qualitätskontrolle, die Ermittlung der Restkapazität einer bereits verwendeten oder gelagerten Batterie, sowie zur Bestimmung der Selbstentladung wird dieses Verfahren jedoch weiterhin verwendet, wenn auch mit einem verbesserten Messsystem.

3.5.2 Pulsförmige Belastung und Mitprotokollieren der Batteriespannung

Um Aussagen zum Verhalten der Batterien bei pulsformiger Belastung zu erhalten, war geplant die bestehende Konstantentladestation so zu modifizieren, dass die Belastung der Batterie pulsformig moduliert werden konnte. Dazu sollte einer der Digitalausgänge des verwendeten USB-Datenerfassungsgerätes verwendet werden, um allen Kanälen kurzzeitig eine höhere Last parallel zu schalten. Wie bisher sollte das Datenerfassungsgerät die Spannung bei geringer Last und hoher Last periodisch messen und mitloggen. So sollte eine realistische Klemmenspannung sowohl bei geringer Last (entsprechend Deep Sleep im μA -Bereich) als auch bei hoher Last (entsprechend aktiver Funkschnittstelle bei ca. 26 mA) gemessen werden, und das Erreichen der minimalen Betriebsspannung bei einer gewissen entnommenen Ladung aufgezeichnet werden. Hierbei handelt es sich um eine vereinfachte Version der im Abschnitt 3.2.2 vorgestellten Messmethode.

Aufgrund der gewünschten Weiterbenutzung als Konstantentladestation und der langen Belegung der Entladestation bei realistischen Stromprofilen wurde diese Idee jedoch verworfen und stattdessen eine eigenständige Arbitrarentladestation entworfen, die beliebige Stromprofile mit deutlich schnelleren Änderungen simulieren und die resultierende Klemmenspannung dementsprechend schnell abtasten konnte, um sehr realitätsnahe Entladungen durchführen zu können.

3.5.3 Arbiträre Belastung und Messung der Batteriespannung

Um genauere Aussagen über das Verhalten der Batterien bei realitätsnahen Stromprofilen treffen zu können, wurde im nächsten Schritt ein Entladesystem entworfen und gebaut, welches programmierbare Stromprofile erlaubte, und die resultierende Klemmenspannung mit genügend zeitlicher Auflösung abtasten konnte. Ziel war es, den Stromverbrauch der ESLs mit diesem Messsystem zu simulieren, und so unter gleichbleibenden und reproduzierbaren Bedingungen Batterien unter realistischen Stromprofilen zu entladen. Zusätzlich sollte mit diesem System Grundlagenforschung zu den Batterien betrieben werden, um die Auswirkungen unterschiedlicher Stromprofile (Pulshöhe, Pulsdauer, Pulsfrequenz/Duty Cycle, Hintergrundstrom, etc.) auf das Verhalten der Batterien zu untersuchen. Dieser Messaufbau entspricht der im Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Messmethode für beliebige pulsformige Stromprofile.

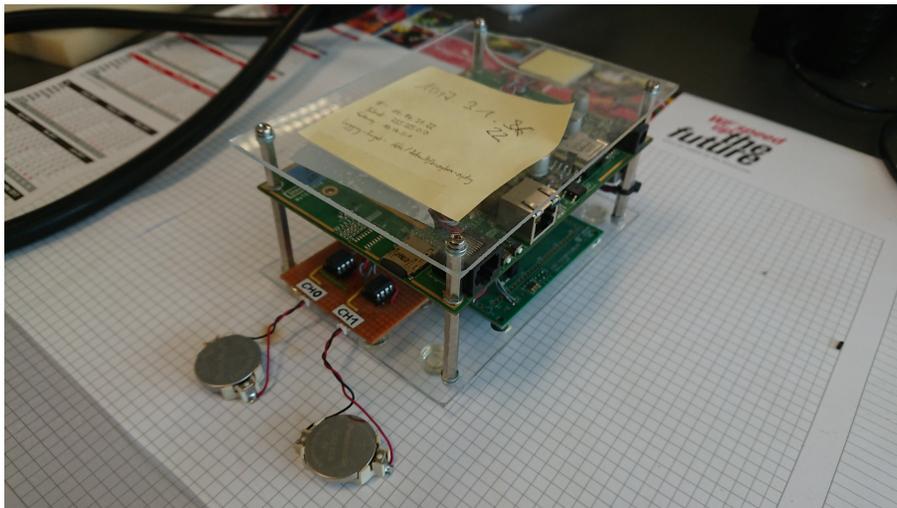


Abbildung 3.11: 2-Kanal Arbitrarentladesystem

Da dieses Messsystem die anderen Systeme durch die voraussichtlich lange Testdurchlaufzeit nicht blockieren sollte, wurde es als eigenständiges System mit vorhandener Hardware aufgebaut. Ein MSP430 Evaluation Board wurde benutzt, um die Stromprofile mit einer Auflösung bis zu $10\ \mu\text{A}$ und $1\ \text{ms}$ zu generieren und die Batteriespannung zu erfassen. Das System bot 2 unabhängige Kanäle mit Präzisions-Stromsenken für die gleichzeitige Entladung von 2 Batterien, mit der Option auf Erweiterung. Die Stromprofile und die Abtastrate konnten per serieller Schnittstelle definiert werden. Die Messergebnisse wurden im Rohformat inklusive Timestamp ebenfalls über eine serielle Schnittstelle ausgegeben.

Ein modifizierter SES-imagotag Access Point diente dazu, die Messergebnisse über die serielle Schnittstelle zu empfangen und zu speichern, sowie die Stromprofile zu Beginn der Messung einzustellen. Zum Speichern der Daten wurde anfangs die im Access Point verbaute SD-Karte benutzt, nach einer gewissen Anzahl Testdurchläufen kam es aber immer zu Datenkorruption durch die sehr hohe Anzahl an Schreibzyklen auf die SD-Karte. Deswegen, und wegen dem begrenzten Speicherplatz auf der SD-Karte, wurde die Software so abgeändert, dass die Messdaten zur Protokollierung per TCP/IP an einen Server übertragen wurden, wo die Daten später auch leichter abrufbar waren.

Die so protokollierten Rohdaten wurden ähnlich der Konstantentladung mit Matlab aufbereitet, um aus dem zeitlichen Verlauf der Klemmenspannung den Verlauf über die entnommene Kapazität zu berechnen, sowie aus den Sprüngen im Stromprofil den Verlauf des Innenwiderstands zu berechnen. Eine beispielhafte Kurve für ein qualitativ hochwertiges CR2450 1S2P Pack bei einer Belastung mit $24\ \text{mA}$ und einem Duty Cycle von 20% bei einer Pulsdauer von $16\ \text{s}$ ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Dabei entspricht die obere Kurve der Klemmenspannung, deren Oberkante die Leerlaufspannung angibt, die Unterkante gibt die Lastspannung an. Wie in der Kurve abgelesen werden kann, kann bis zum Erreichen der Entladeschlussspannung von $2.0\ \text{V}$ unter Last eine Ladung von $885\ \text{mAh}$ entnommen werden (entspricht einer nutzbaren Kapazität von ca. 80%), bzw. bis zum Unterschreiten der ESL-Minimalspannung von $2.3\ \text{V}$ eine Ladung von etwa $770\ \text{mAh}$ entnommen werden (entspricht einer nutzbaren Kapazität von ca. 70%). Die untere Kurve gibt den Verlauf des Innenwiderstands an. Diese Darstellung wurde auch für spätere Messverfahren beibehalten.

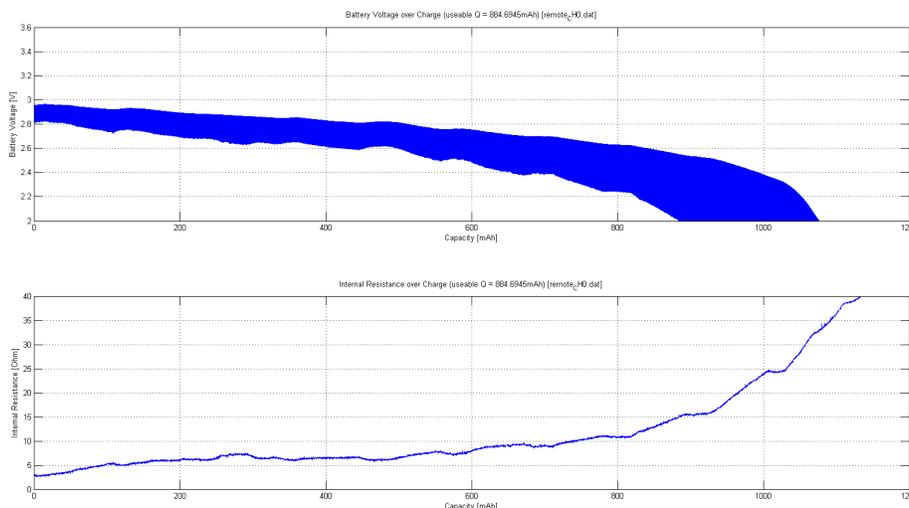


Abbildung 3.12: Pulsentladekurve für qualitativ hochwertige CR2450 1S2P Packs (Nominalkapazität $1100\ \text{mAh}$) bei einer Belastung mit $24\ \text{mA}$ (Duty Cycle 20% , Pulsdauer $16\ \text{s}$)

Diese Messungen wurden ausschließlich bei Raumtemperatur durchgeführt. Die Schwankungen in den Kurven sind auf Temperaturänderungen zurückzuführen, die sich besonders auf den Innenwiderstand und damit auf die Lastspannung auswirken.

Mit dieser Methode konnte festgestellt werden, dass sich die nutzbare Kapazität der Batterie bei pulsformiger Belastung deutlich von der Nominalkapazität unterscheidet. Weiters wurden zahlreiche Versuche durchgeführt, um die Auswirkungen unterschiedlicher Stromprofile auf die Batterie zu untersuchen. Die Ergebnisse dieser Versuche sind im Kapitel 5 aufgeführt und werden im Kapitel 6 diskutiert.

Rasch wurde anhand der Ergebnisse klar, dass die Resultate nicht nur stark von Stromprofil, Temperatur, etc. abhängen, sondern zusätzlich eine starke Streuung zwischen den Batterien auftritt, sogar wenn diese aus der gleichen Charge entnommen wurden. Deutlich mehr Kanäle waren notwendig, um die Streuung zwischen vermeintlich gleichwertigen Batterien bei gleichen Testbedingungen zu erfassen.

Durch die Protokollierung der Daten auf einem Server über das Netzwerk kam es auch immer wieder zu Unterbrechungen und damit den Verlust von Messergebnissen, durch Stromausfälle, Netzwerkausfälle, oder Abstürze oder unangekündigter Wartung des Servers. Deswegen sollte ein neues Testsystem konzipiert werden, welches tatsächlich als Insellösung arbeiten kann, abgetrennt vom Stromnetz und in sich geschlossen, um Ausfälle während der sehr langen Durchlaufzeiten zu vermeiden.

Aus den Ergebnissen die mit diesem Testsystem erfasst wurden, konnten wichtige Designentscheidungen für das zukünftige Testsystem getroffen werden:

- die Anzahl der Kanäle musste deutlich erhöht werden
- die zeitliche Auflösung konnte reduziert werden, da durch die hohe Auflösung die Datenmengen unpraktisch groß wurden, und einfachere pulsformige Stromprofile zu sehr ähnlichen Ergebnissen führten
- die Benutzeroberfläche sollte einfacher werden, die komplette Konfiguration sollte mit einer grafischen Oberfläche erfolgen
- während dem Testdurchlauf sollten bereits Daten zum Verlauf ablesbar sein
- die Auswertung der Messwerte sollte parallel zur Messung oder als automatisches Postprocessing passieren
- besonders bei einer größeren Anzahl Messungen müssen die Ergebnisse sauber mitprotokolliert und mit Metadaten (Batterietyp, Chargennummer, Testbedingungen, etc.) versehen abgelegt werden
- das Testsystem muss unanhängig von der Infrastruktur und vom Stromnetz funktionieren
- das Testsystem soll einfach dupliziert werden können

3.5.4 Bildung eines mathematischen Batteriemodells anhand der Messdaten

Um das Verhalten der Batterien bei unterschiedlichen Belastungen berechnen oder simulieren zu können, gab es die Idee ein mathematisches Modell einer Batterie zu erstellen. In der Literatur und in Papers findet man dazu gebräuchliche Modelle, die das elektrische Verhalten und das thermische Verhalten von galvanischen Zellen unter pulsformigen Belastungen abbilden können [11]. Ein solches allgemeines Modell als elektrisches Ersatzschaltbild ist in Abbildung 3.13 dargestellt. Diese Modelle werden üblicherweise verwendet, um Primär- oder Sekundärzellen zu modellieren,

die als Energiespeicher für mobile Geräte mit hohem Stromverbrauch dienen. Aktuell werden solche Simulationen auch für Batterien vorgeschlagen, die in der Elektromobilität verwendet werden. Damit sind die simulierten Entladeströme deutlich höher, und die simulierten Zeiträume deutlich kürzer als für diese Anwendung interessant, die Anforderungen an die Ergebnisse unterscheiden sich damit auch deutlich.

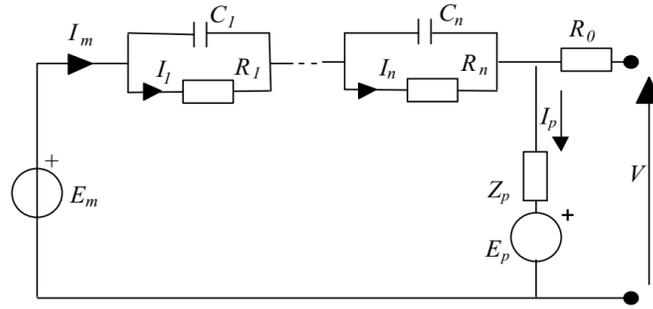


Abbildung 3.13: Mathematisches Modell (*Ersatzschaltbild*) einer allgemeinen galvanischen Zelle [11]

Neben diesen *einfachen* elektrischen Modellen gibt es auch deutlich detailliertere Modelle, die sich mit den elektrochemischen Abläufen in der Zelle befassen. Diese elektrochemischen Modelle sind jedoch deutlich komplexer und damit sehr rechenintensiv, und zielen auf andere Aussagen ab als das Ersatzschaltbild - es geht bei diesen Modellen eher um die chemischen Abläufe als das elektrische Verhalten, deswegen eignen sich diese Modelle weniger für die Betrachtung im Gesamtsystem [11].

Ziel war es, zu evaluieren ob ein sinnvolles Modell der Batterie erstellt werden kann, mit dem das Verhalten unter beliebigen Bedingungen simuliert werden kann, um sich die aufwändigen Messungen zu sparen. Dazu sollten die Messdaten aus den Pulsentladungen verwendet werden, um eine Parameterabschätzung für die intrinsischen Parameter der Batterie durchzuführen.

Die Temperatur der Zelle wurde vorerst außer Acht gelassen, zu Beginn sollte versucht werden den Einfluss des Stromprofils zu simulieren. Dazu wurden die gebräuchlichen mathematischen Modelle so modifiziert, dass die Temperatur nicht berücksichtigt und als konstant angenommen wird. Diese modifizierten Modelle wurden in Matlab/Simulink und Simscape³ implementiert und mit Hilfe der Matlab Curve Fitting Toolbox so trainiert, dass sie das Verhalten der zuvor vermessenen Batterie widerspiegeln.

Durch die großen Datenmengen die bei den Entladungen entstehen, dauert auch die Parameterabschätzung und Optimierung sehr lange. Ein leistungsfähiger Computer war damit oft Wochen oder Monate beschäftigt, je nach Komplexität des Stromprofils bei der Entladung.

Nach der Trainingsphase entstehen Lookup Tables für das implementierte Modell, die das Verhalten der internen Komponenten in Abhängigkeit des State of Charge der Batterie darstellen. Idealerweise reicht ein solcher Datensatz, um mit dem Modell eine repräsentative Batterie zu beschreiben, und damit Simulationen durchführen zu können. Das funktioniert auch, solange sich die Parameter der Simulation in einem ähnlichen Bereich bewegen wie die Testbedingungen, unter denen die als Trainingsdaten für das Modell verwendete Entladekurve ermittelt wurde (siehe Abbildung 3.14 für den Vergleich zwischen einer realen Batterie und dem Simulationsergebnis bei gleichen Bedingungen). Weicht jedoch die Belastung (oder natürlich auch die Temperatur) deutlich von den trainierten Bedingungen ab, driftet auch das Verhalten der simulierten Batterie mit tatsächlichen Messungen auseinander.

Diese starke Abhängigkeit des Verhaltens von den äußeren Einflüssen zeigt sich auch bei weiteren

³ein Addon für Simulink zur Abstrahierung und Simulation physikalischer Elemente

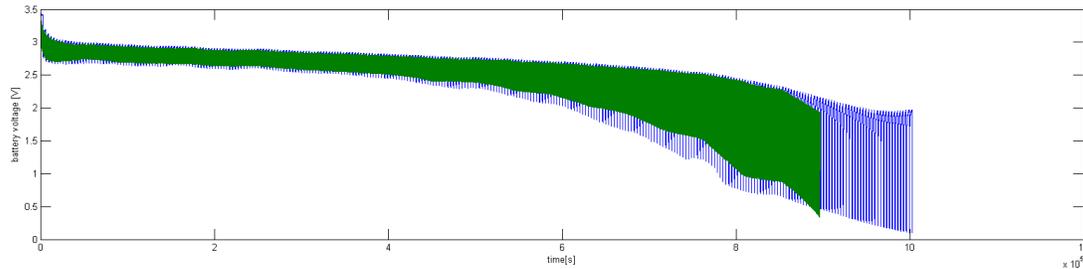


Abbildung 3.14: Entladekurve einer tatsächlichen Batterie (blau) im Vergleich zum Simulationsergebnis (grün)

Tests und Pulsentladungen unter unterschiedlichen Bedingungen, und macht deutlich, dass das Modell mehr Informationen über die Abhängigkeiten der internen Komponenten benötigt, um für unterschiedliche Einsatzgebiete verwendet werden zu können. Dazu müssten die Lookup Tables im Modell um mehrere Dimensionen erweitert werden, um auch die Einflüsse von Temperatur, Belastung, etc. darstellen zu können. Dazu waren aber deutlich mehr Messreihen notwendig, um diese Abhängigkeiten zuerst einmal verstehen und messtechnisch erfassen zu können.

Zusätzlich wurde im Laufe der Vermessungen immer mehr klar, dass die Streuung zwischen den Batterien sehr groß ist und die Definition einer *repräsentativen* “Standard“-Batterie eine deutlich größere Anzahl an Samples benötigt. Ein Ansatz wäre, nachdem die Streuung erfasst ist, Modelle für eine *durchschnittliche*, eine *schlechte* (worst case) und eine *gute* (best case) Batterie zu erstellen.

Aus diesen Gründen wurde die Modellbildung und Simulation der Batterien zu diesem Zeitpunkt pausiert, um sie zu einem späteren Zeitpunkt, an dem mehr Informationen über das Verhalten der Batterien verfügbar sind, weiterzuverfolgen⁴. In weiterer Folge wurde die verfügbare Zeit wieder hauptsächlich für die Weiterentwicklung der Messsysteme genutzt.

3.5.5 Erste Version der Konstantentladestation

Aus den bisherigen Erkenntnissen und Erfahrungen kam es dann zur Entwicklung der ersten Konstantentladestation für den Inselbetrieb, mit der in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Messmethode. Diese verwendet das gleiche USB-Datenerfassungsgerät NI USB-6211, welches auch bereits in den früheren Versionen der Testsysteme zum Einsatz kam, da die Fähigkeiten dieses Geräts ausreichen und die Funktionsweise bereits bekannt war. In erster Linie war diese Entladestation dazu gedacht, die zunehmende Nachfrage an Batterieentladungen zu befriedigen, indem mehrere Kanäle zur Messung der Nominalkapazität zur Verfügung gestellt wurden. Durch die niedrige notwendige Abstrakte bei der Konstantentladung ist es möglich, die 16 Kanäle des USB-Datenerfassungsgerätes über Multiplexer auf beliebig viele Eingänge zu verteilen. Durch die begrenzte Anzahl digitaler Ausgänge als Adressleitungen wurden 8-fach Multiplexer verwendet, um so 8 Multiplexer-Ebenen mal 16 Analogeingänge, also 128 Messkanäle zu erhalten. Abbildung 3.15 zeigt eine schematische Darstellung der Architektur dieser Konstantentladestation. Die Messkanäle sind in 8 gestapelte Bänke zu je 16 Kanälen unterteilt.

Jeder Kanal ist mit einem definierten Entladewiderstand versehen, wobei es Bänke mit veränderten Entladewiderständen gibt, um höhere oder niedrigere Lasten zu ermöglichen, ohne das Messsystem umbauen zu müssen. So kann je nach Bank ein unterschiedlicher Entladewiderstand gewählt werden. Diese Konstantentladestation arbeitet daher mit einem *konstanten Widerstand*, nicht mit

⁴außerdem kam es zu einem Defekt an einer Festplatte, durch den viele Simulationsergebnisse verloren gingen

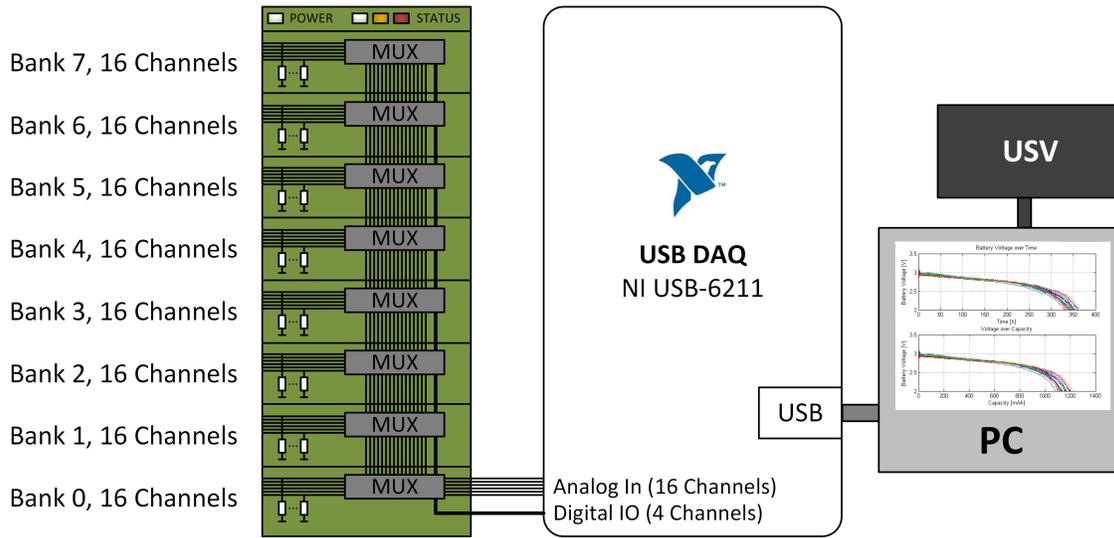


Abbildung 3.15: Schematischer Aufbau der ersten Konstantentladestation

einem *konstanten Strom*. Das wird in der Messung berücksichtigt, indem der tatsächliche Strom aus der gemessenen Spannung und dem verwendeten Entladewiderstand berechnet wird.

Das Datenerfassungsgerät ist per USB mit einem dedizierten Rechner verbunden, der nur eine (oder mehrere) Entladestationen ansteuert und ansonsten nicht benutzt wird. Zusätzlich wird die Netzversorgung des Rechners über eine unterbrechungsfreie Stromversorgung bezogen. Durch diese Maßnahmen sollen Systemausfälle und damit verbundene Datenverluste und Fehlmessungen vermieden werden.



Abbildung 3.16: Foto der ersten Konstantentladestation im Betrieb

Auf dem Rechner läuft eine in LabView programmierte Software, die die Ansteuerung der Multiplexer, sowie die Erfassung, Verarbeitung, Darstellung und Protokollierung der Daten übernimmt. Zusätzlich kann die Konfiguration des Messsystems und das Eintragen der exakten verwendeten Batterietype (Hersteller, Modell, Konfiguration, Produktionscode, Nominalkapazität, weitere In-

formationen), Umgebungsbedingungen, Testbedingungen sowie weitere Anmerkungen pro Kanal oder pro Kanalgruppe über diese grafische Oberfläche komfortabel erfolgen. Während dem Testablauf werden die aktuell verfügbaren Messdaten und Statusinformationen angezeigt. Die Software ist so konzipiert, dass der Betrieb niemals unterbrochen werden muss, so können einzelne Kanäle angehalten, umkonfiguriert und neu gestartet werden, sowie einzelne Batterien ohne Auswirkungen auf die restlichen Messungen getauscht werden können.

Die Daten werden übersichtlich in der Form von CSV-Dateien abgelegt, jede CSV-Datei ist mit einem Header versehen der sämtliche Informationen zum Messdurchlauf enthält. Nach einem erfolgreichen Durchlauf werden Grafiken exportiert, die den Verlauf der Messung anzeigen.

Bis auf einige Verbesserungen entspricht diese Konstantentladestation der aktuellen Version 2.0, die momentan zur Batterieevaluierung eingesetzt wird. Die Verbesserungen der überarbeiteten Version der Konstantentladestation waren hauptsächlich deswegen notwendig, weil Entladungen für einzelne Batterien nicht gezielt angehalten werden konnten, beispielsweise um Batterien auf eine gewisse Restladung *vorzuentladen*. Detaillierte Informationen zum Aufbau und zur Arbeitsweise dieser Konstantentladestationen sind aus diesem Grund in den Kapiteln 3 und 4 zu finden. Momentan befinden sich beide Versionen der Konstantentladestation in durchgehendem Einsatz.

3.5.6 Erste Version der Pulsentladestation

Beim Entwurf der ersten Konstantentladestation wurde darauf geachtet, dass die dazu entworfene PCB ebenfalls für eine Pulsentladestation verwendet werden kann, welche die Batterien mit arbiträren, üblicherweise pulsformigen Stromprofilen belasten kann. Das war möglich, nachdem sich die Architekturen der Konstant- und Pulsentladestation ähnlich sind. So kann nur einer PCB je nach Bestückung als Basis für eine Konstant- oder Pulsentladestation verwendet werden, um Aufwand und Kosten zu sparen.

Der größte Unterschied zwischen der Konstant- und der Pulsentladestation liegt in der Art, wie die Batterien belastet werden. Während bei der Konstantentladestation ein Widerstand für eine annähernd konstante Entladung der Batterie mit einem niedrigen Strom sorgt, verwendet die Pulsentladestation *Präzisions-Stromsenken*, die ein genau definiertes Stromprofil erzeugen. So können pulsformige Ströme erzeugt werden, die kurze, höhere Stromspitzen enthalten, die von längeren Ruhephasen begleitet werden. Damit kann das tatsächliche Verhalten der ESLs nachgestellt werden, und so die nutzbare Kapazität der getesteten Batterie für dieses Stromprofil bestimmt werden.

Aus der Erfahrung mit früheren Testsystemen war bekannt, dass sich relativ langsame Stromprofile für die Messungen gut eignen, deren Stufen im Sekundenbereich liegen. Die dafür erforderlichen Abtastraten sollten im Bereich 1 Hz bis 10 Hz liegen, was einen guten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Menge der anfallenden Messdaten darstellt. Aus diesem Grund kann für die Pulsentladestation eine ähnliche Strategie zum Einsatz kommen, wie sie auch bei der Konstantentladestation verwendet wurde.

Im Vergleich zur Konstantentladestation werden bei dieser Pulsentladestation höhere Abtastraten verwendet, um den Verlauf der Batteriespannung bei pulsformiger Belastung mit einer höheren Auflösung zu erfassen. Dabei kommen die in Abschnitt 3.2.2 und 3.2.3 beschriebenen Methoden zum Einsatz. Durch die pulsformige Belastung ist es wichtig, die Ausgangsspannungen der Batterien zu den passenden Zeitpunkten, korreliert zum Stromprofil abzutasten. Nachdem das NI USB-6211 zwei Analogausgänge bietet, können diese zur Erzeugung von zwei zeitlich versetzten Stromprofilen verwendet werden. Das erlaubt es, die 16 verfügbaren Analogeingänge für 32 Batteriekanäle zu nutzen, von denen jeweils 16 durch diese zeitlich versetzten Stromprofile angesteuert werden. Deswegen werden bei der Pulsentladestation statt den Multiplexern Analogschalter verwendet, um die Analogeingänge zwischen den Kanälen umzuschalten. Aus diesem Grund bietet die Pulsentladestation maximal 32 Batteriekanäle.

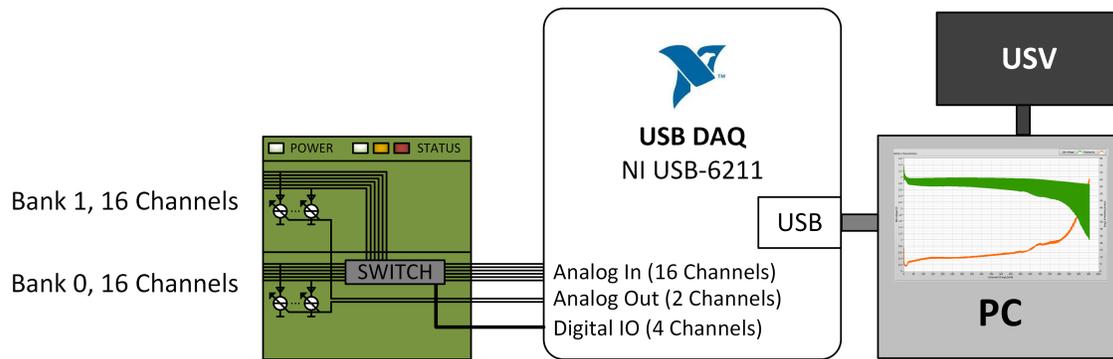


Abbildung 3.17: Schematischer Aufbau der ersten Pulsentladestation

Der restliche Aufbau stimmt mit der ersten Konstantentladestation überein, die Hardware wird von einer in LabView programmierten Applikationssoftware gesteuert, die sämtliche Konfigurationen, Setup der Stromprofile, Erfassen der Daten sowie Darstellung und Protokollierung der Ergebnisse übernimmt. Der Rechner, der dieses System steuert, ist genauso wie die Messhardware über eine unterbrechungsfreie Stromversorgung an das Stromnetz angeschlossen.

Bis auf einige Verbesserungen entspricht diese Pulsentladestation der aktuellen Version 2.0, momentan werden beide Versionen zur Batterieevaluierung eingesetzt. Als Verbesserung zählen wie bei der Konstantentladestation die Möglichkeit, einzelne Batterien von der Last zu trennen, zusätzlich kann der tatsächlich eingepreßte Laststrom der Batterie gemessen werden. Detaillierte Informationen zum Aufbau und zur Arbeitsweise dieser Konstantentladestation sind in den Kapiteln 3 und 4 zu finden.

Kapitel 4

Implementierung

In diesem Kapitel ist der Aufbau des entwickelten Testsystems für Konstant- und Pulsentladung erklärt. Dabei wurde eine Architektur des Messsystems gewählt, die die Verwendung des annähernd gleichen Aufbaus mit unterschiedlichen Bestückungsvarianten als Konstantentladesystem oder Puls- bzw. Arbitrarentladesystem zulässt. Dazu werden die benötigten Elemente für das entwickelte Frontend für die Messung erklärt, sowie deren Verschaltung, um die gewünschten Aufgaben zu erfüllen. Diese Beschreibung der Schaltung ist im Abschnitt 4.1 unter “Hardware” zusammengefasst. Die Hardware wird über eine in LabView programmierte Software gesteuert, diese bietet sämtliche für den Betrieb, die Konfiguration und das Logging notwendigen Funktionen und ist im Abschnitt 4.2 unter “Software” zusammengefasst.

4.1 Hardware

In diesem Abschnitt ist der grundlegende Aufbau der Hardware erklärt, einführend wird das verwendete Datenerfassungsgerät **NI USB-6211** von National Instruments und darauf aufbauend die Systemarchitektur der Konstant- bzw. Pulsentladestation beschrieben. Dieses Datenerfassungsgerät dient als Kernstück zur Steuerung der Messschaltung und Erfassung der Messwerte. Daran angeschlossen ist die entwickelte PCB, auf der sich die Schaltungselemente befinden, die zur Erzeugung der Stromprofile sowie der Messung und dem Multiplex der Messkanäle dienen. In diesem Abschnitt wird hauptsächlich auf diese PCB und die sich darauf befindliche Schaltung eingegangen, um deren Arbeitsweise zu erklären. Dabei wird zuerst die Architektur der einzelnen Systeme im Überblick und danach die verwendeten Komponenten im Detail beschrieben.

4.1.1 Datenerfassungsgerät NI USB-6211

Als zentrales Element zur Steuerung der Messstationen und zur Erfassung der Daten dient ein Datenerfassungsgerät (*Data Acquisition Device*, DAQ) von National Instruments, welches eine Vielzahl von Ein- und Ausgängen anbietet, per USB mit einem Rechner kommuniziert und von diesem Rechner aus über eine LabView-Oberfläche angesteuert wird. Diese Ein- und Ausgänge werden genutzt, um sämtliche Funktionen der Messsysteme zu steuern, die in den folgenden Kapiteln beschrieben werden. In diesen Kapiteln wird detailliert beschrieben, wie die geforderten Funktionen mit Hilfe dieses Datenerfassungsgerätes gesteuert werden, dieser einleitende Abschnitt soll nur einen kurzen Überblick über die Funktionen und Fähigkeiten des verwendeten DAQ darstellen. Ein Datenerfassungsgerät von National Instruments wurde gewählt, weil dadurch eine problemlose

Verwendung in LabView möglich ist, und eine sehr große Auswahl an solchen Geräten von diesem Hersteller existiert¹, aus der genau das passende Gerät gewählt werden kann.



Abbildung 4.1: National Instruments NI USB-6211 Datenerfassungsgerät [12]

Aus den verfügbaren Modellen wurde im Entwurf der ersten Konstant- und Pulsentladestationen das **NI USB-6211** gewählt, weil es sich durch folgende Features und Vorteile für diese Anwendung sehr gut eignete [13]:

USB-Interface: das NI USB-6211 gehört zur Klasse der USB-gesteuerten DAQs und kann daher einfach an beliebige Rechner angebunden werden, es ist keine weitere spezielle Hardware erforderlich, damit kann jeder verfügbare Rechner als Messsystem verwendet werden. Das DAQ wird über USB mit Strom versorgt und wird daher automatisch über die unterbrechungsfreie Stromversorgung des Rechners mitversorgt.

Analogeingänge: das NI USB-6211 bietet 16 Analogkanäle mit einer Auflösung von 16 bit, die mit einer Abtastrate von bis zu 250 kS/s betrieben werden können, und dabei Messbereiche bis ± 10 V bei einer hohen Genauigkeit und einem sehr hohen Eingangswiderstand von > 10 G Ω bieten. Die maximale garantierte Gesamtfehler liegt bei 1.4 mV im benutzten Messbereich von ± 5 V, bestehend aus Offset- und Gain-Fehler, Temperaturkoeffizienten sowie Rauschen. Durch diese Eigenschaften eignet sich das NI USB-6211 hervorragend, um Batteriespannungen direkt mit den Analogeingängen zu erfassen. Die Eingänge können auch paarweise zur differentiellen Messung verwendet werden, um die Anzahl der Kanäle zu maximieren wurde jedoch die single-ended Messung verwendet. Bei der Abtastung mehrerer Analogeingänge reduziert sich die Abtastrate durch das interne Multiplexing der 16 Kanäle auf einen ADC. Der interne Aufbau der Analogeingänge ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die angegebenen Eigenschaften werden durch die Verwendung eines eingebauten hochwertigen Instrumentenverstärkers mit programmierbarem Gain (PGIA) erreicht.

Analogausgänge: ebenfalls sind 2 Analogausgänge mit 16 bit Auflösung und einer Update Rate von bis zu 250 kS/s verbaut, die eine Ausgangsspannung von ± 10 V bieten. Diese Ausgänge bieten einen maximalen garantierten Fehler von 3.5 mV. Der Ausgangsstrom ist mit 2 mA zwar deutlich begrenzt, für diese Anwendung reicht dieses Limit jedoch um die Stromsenken anzusteuern. Die Strombegrenzung entsteht durch die direkte Verbindung der Analog Output Pins mit jeweils einem Digital-Analog-Wandler.

Digitale IOs: zusätzlich bietet das DAQ 8 digitale IOs (jeweils 4 Ein- und Ausgänge), um digitale Signale zu erzeugen bzw. einzulesen, die jeweils mit einem 47 k Ω Pull-Down-Widerstand

¹<http://www.ni.com/de-at/shop/select/multifunction-io-device>

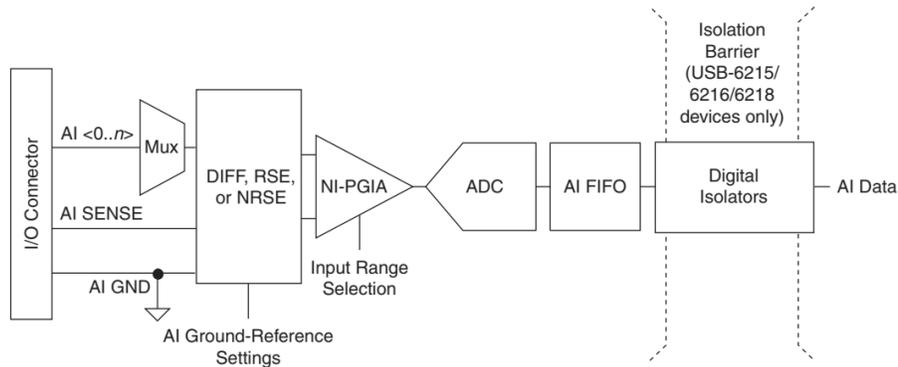


Abbildung 4.2: Blockschaltbild der analogen Eingänge des NI USB-6211 [14]

versehen sind. Die geringe Anzahl und die softwaregetriggerte Ansteuerung dieser stellten sich im Verlauf der Entwicklung der überarbeiteten Messsysteme als Herausforderungen dar, die mit einem anderen DAQ möglicherweise einfacher zu lösen gewesen wären. Die als *static IO* bezeichneten Pins können keine Bitfolge hardwaregetaktet ausgeben, sondern können nur durch die Applikationssoftware *high* oder *low* gesetzt werden. Dadurch können Bitfolgen nur durch Schleifen ausgegeben werden, die den Ausgang nacheinander auf die Werte der einzelnen Bits setzen. Dadurch ist die maximale Bitrate durch den nicht-deterministischen 1 ms Windows Timer Tick vorgegeben. Die digitalen IOs können auch als digitale hardwaregestützte Counter oder Timer verwendet werden, diese Funktion wird in dieser Anwendung jedoch nicht benötigt, und kann auch nicht zur schnellen Ausgabe von beliebigen Bitfolgen genutzt werden.

Selbstkalibrierung: das NI USB-6211 bietet eine eingebaute Selbstkalibrierung, die die Genauigkeit der analogen Ein- und Ausgänge auf die oben beschriebenen garantierten Maximalfehlerwerte begrenzt. Aus Erfahrung liegt der tatsächliche Fehler deutlich unter diesen Maximalwerten.

Formfaktor: die kompakte Bauform und die Ausführung der Ein- und Ausgänge als Schraubanschlüsse auf der Seite des Geräts eignen sich sehr gut für den Einbau in ein kompaktes Batterietestsystem.

Ansteuerung durch LabView: sämtliche Ein- und Ausgänge sowie weitere Komponenten dieses DAQ-Geräts können komfortabel aus LabView angesteuert werden. Mit der Vielzahl an Funktionen die von LabView bereitgestellt werden lässt sich eine ansprechende und einfach zu bedienende Steuersoftware entwickeln, die sämtliche Aufgaben von der Konfiguration, Steuerung und der Datenerfassung bis hin zur Darstellung der Messdaten und Ergebnisse sowie deren Analyse und Protokollierung erfüllen kann. Neben LabView kann das NI USB-6211 auch aus weiteren Umgebungen und Programmiersprachen verwendet werden.

bekanntes Umfeld: das NI USB-6211 wurde schon vor diesem Messsystem für andere Zwecke verwendet, daher sind die Eigenschaften und die Möglichkeiten, sowie die Eigenheiten und Schwierigkeiten dieses Geräts bereits bekannt. Für Entwicklungszwecke war weiters ein unbenutztes NI USB-6211 verfügbar.

Abbildung 4.3 zeigt die Pinbelegung des NI USB-6211, wobei die digitalen Pins als PFI bzw. Px.y bezeichnet werden, die analogen Ein- und Ausgänge als AIx bzw. AOx. Zusätzlich werden noch getrennte Masseanschlüsse für die Analog- und Digitalkanäle zur Verfügung gestellt, sowie eine Sense-Leitung für spezielle Eingangskonfigurationen der Analogeingänge, sowie eine +5V-Versorgung, die bis zu 50mA zur Verfügung stellen kann. Um die externen Schaltungen zu versorgen

wurde jedoch eine dedizierte Stromversorgung auf der PCB vorgesehen.

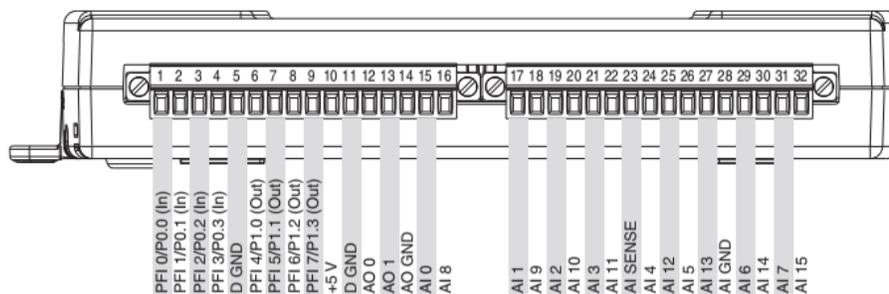


Abbildung 4.3: Pinbelegung des NI USB-6211 [14]

In den folgenden Abschnitten wird die Systemarchitektur für die Konstant- bzw. Pulsentladestation aufbauend auf diesem Datenerfassungsgerät beschrieben.

4.1.2 Systemarchitektur der Konstantentladestation

Anmerkung: prinzipiell verwendet die überarbeitete Konstantentladestation die gleiche Architektur wie die im Abschnitt 3.5.5 bereits kurz vorgestellte erste Version, wurde jedoch um einige nützliche Funktionen erweitert. Die folgende Beschreibung gilt deswegen größtenteils für beide Versionen.

Zweck dieser Konstantentladestation ist es, möglichst viele Batterien gleichzeitig mit einem definierten konstanten Entladestrom oder an einem definierten konstanten Entladewiderstand kontrolliert bis auf eine definierte Entladeschlussspannung zu entladen. Dabei soll der Verlauf der Batteriespannungen über die Zeit und über die entnommene Kapazität erfasst und dargestellt werden, wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben. Diese Entladungen sollen bei unterschiedlichen Bedingungen (Laststrom, Temperatur, etc.) durchgeführt werden können. Neben der vollständigen Entladung bis zum Erreichen einer Entladeendspannung soll es auch möglich sein, eine definierte Ladung zu entnehmen, um nach dieser *Vorentladung* weitere Tests mit den teilweise entladenen Batterien durchzuführen, wie Pulstests oder Messungen in der Anwendung. Die Messergebnisse sollen in einer Form abgelegt werden, in der sie sowohl vom Menschen als auch von Maschinen gelesen und weiterverarbeitet werden können.

Durch die sehr langsamen Änderungen bei Konstantentladung von Batterien reicht für die Konstantentladestation eine Abtastrate von < 1 Hz pro Kanal. In der Praxis wird üblicherweise eine Abtastrate von 0.1 Hz verwendet, also ein Messwert pro 10 Sekunden. So werden auch Spannungsschwankungen sichtbar, die beispielsweise durch schlechte Kontakte auftreten können.

Abbildung 4.4 zeigt eine schematische Darstellung der Architektur der überarbeiteten Konstantentladestation. Das NI USB-6211 stellt den Kern des Aufbaus dar, dieses DAQ-System steuert sämtliche Funktionen der Messschaltung und erfasst die Messdaten. An dieses Datenerfassungsgerät ist die Messhardware in Form von eigens entworfenen PCBs angeschlossen, die gestapelt werden können um die Anzahl der Messkanäle auf bis zu 128 zu erhöhen. Die dazu notwendige Hardware wird im Detail in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Dieses System ist an einen Rechner angeschlossen, auf dem die entsprechende Applikationssoftware läuft (siehe Abschnitt 4.2 für weitere Informationen zur Software). Diese Software ermöglicht die komfortable Konfiguration und Bedienung des Messsystems, die Erfassung der Messdaten, sowie die Darstellung und Protokollierung der Messwerte und Ergebnisse. Die Software ist so ausgelegt,

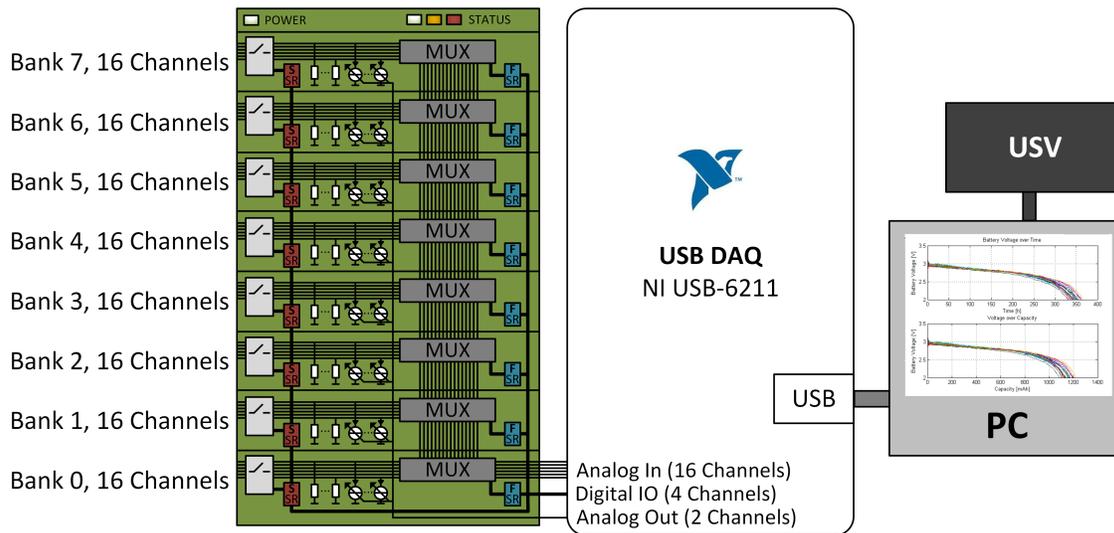


Abbildung 4.4: Schematischer Aufbau der überarbeiteten Konstantentladestation

dass das Messsystem unterbrechungsfrei über lange Zeiträume laufen kann, währenddessen einzelne Kanäle angehalten, umkonfiguriert und mit neuen Batterien erneut gestartet werden können, ohne die restlichen Kanäle zu beeinflussen. Durch eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) ist dieser Rechner und die Messhardware als Insellösung vom Stromnetz und sämtlicher Infrastruktur unabhängig, und so vor Datenverlust durch Netzausfall, etc. geschützt.

Das Messsystem sollte für gleichbleibende Ergebnisse bei einer konstanten Temperatur betrieben werden, bzw. bei einer definierten Temperatur um das Verhalten der Batterien über die Temperatur zu bestimmen. Dazu wird das System in einem ständig klimatisierten Raum betrieben, in dem zusätzlich auch Klima-, Wärme- und Gefrierschränke stehen. So können die Batterien unter den gewünschten Bedingungen entladen werden. Zur Überwachung und Steuerung des Messsystems kann auf den Messrechner per Remote Desktop zugegriffen werden.

Aufbau und Prinzip Auf Basis des NI USB-6211 werden gleich wie bei der ersten Version der Konstantentladestation 128 Batteriekkanäle zur Verfügung gestellt, unterteilt in 8 Gruppen zu je 16 Kanälen. Diese 8 Gruppen werden durch 8 *Bänke* (“Stockwerke”) dargestellt, die jeweils die gleiche PCB verwenden und die Schaltungsteile für die Belastung der Batterie, die Multiplexer, einen Indikator für eine aktive Batterie, sowie weitere Statusanzeigen enthalten. Diese PCB wurde so entworfen, dass pro Bank 16 Messkanäle angeboten werden, die jeweils auf 2 Multiplex-Signale zusammengefasst werden. Über Pfostensteckverbinder werden diese PCBs vertikal verbunden, diese dienen dazu um die 16 verfügbaren Analogeingänge sowie die 4 digitalen Steuersignale des NI USB-6211 auf allen Bänken zur Verfügung zu stellen. Zur Erzeugung von Konstantströmen werden die beiden Analogausgänge ebenfalls über diese Pfostensteckverbinder an alle Bänke verteilt. Zusätzlich werden alle PCBs über diese vertikale Verbindung versorgt.

Auf jeder PCB sind die Lasten für die 16 Batteriekkanäle, sowie Lastschalter untergebracht, mit denen jeder einzelne Kanal von der Last getrennt werden kann (wenn beispielsweise die Entladung abgeschlossen ist). Diese Lastschalter gab es in der ersten Version der Konstantentladestation noch nicht, hier konnten Batterien nur durch physikalisches Abstecken von der Entladestation von der Last getrennt werden. Als Last ist entweder ein konstanter Widerstand oder eine steuerbare Präzisionsstromsenke vorgesehen, um den Laststrom aus der Applikationssoftware heraus einzustellen. Für das Zusammenfassen der Batteriekkanäle auf die Analogeingänge des NI USB-6211 sind Mul-

tiplexer untergebracht. Zusätzlich gibt es Schieberegister, mit denen aus den wenigen verfügbaren digitalen IOs des NI USB-6211 die Steuersignale für die Lastschalter, Multiplexer und weitere Funktionen generiert werden.

Belastung Zum Entladen der Batterien kann bei der Konstantentladestation aus 2 Belastungsvarianten gewählt werden, die auch innerhalb einer Entladestation kombiniert werden können:

Konstantwiderstand: für jeden Kanal kann ein eigener Konstantentladewiderstand bestückt werden. So ist es möglich, beispielsweise für jede Bank einen eigenen Entladewiderstand zu definieren, um unterschiedliche Batterietypen ohne Umbau entladen zu können.

Konstantstrom: dazu werden die Präzisionsstromsenken benutzt, um einen Konstantstrom einzuprägen. Dabei gibt es die Einschränkung, dass durch die 2 Analogausgänge des NI USB-6211 nur 2 unterschiedliche Konstantströme möglich sind, die durch die Bestückung von 0Ω -Jumpers den Kanälen zugeordnet werden können. So kann beispielsweise eine Bank mit 1 mA Laststrom betrieben werden, während die restlichen Bänke mit 2 mA Laststrom betrieben werden. Dabei gibt es wie bei der Pulsentladestation die Möglichkeit, den tatsächlich eingepprägten Strom zu messen.

Details über die Möglichkeiten der Belastung sind in Abschnitt 4.1.4 beschrieben.

Lastschalter Um eine partielle Entladung bis zu einer definierten Ladungsmenge zu ermöglichen, ist für jeden Batteriekanal ein eigener *Load Switch* eingebaut, der getrennt angesteuert werden kann. So kann jede Batterie einzeln bei Erreichen einer gewissen Abbruchbedingung von der Last getrennt werden, um den aktuellen Zustand "einzufrieren". Details über die Lastschalter sind in Abschnitt 4.1.4 beschrieben.

Multiplexer Jede dieser 8 Bänke nutzt 2 Analogeingänge des NI USB-6211, auf die jeweils 8 Batteriekanäle im Multiplexbetrieb geschaltet werden.

- Bank 0 nutzt AI0 für Kanal 0 bis 7, sowie AI1 für Kanal 8 bis 15
- Bank 1 nutzt AI2 für Kanal 0 bis 7, sowie AI3 für Kanal 8 bis 15
- die restlichen Bänke folgen dieser Reihenfolge

Somit werden jeweils die Kanäle 0 bis 7 sowie 8 bis 15 durch zwei 8:1-Multiplexer auf jeweils einen Analogeingang des NI USB-6211 zeitlich hintereinander geschaltet, und von der Software dann dem richtigen Batteriekanal zugeordnet. Dadurch ist es möglich, in jeder Bank die gleichen Steuersignale für die Multiplexer zu verwenden, um so alle Bänke gleichzeitig auf den gleichen Batteriekanal zu schalten.

Das bedeutet, dass in der Konstantentladestation die Batteriekanäle jeder Bank *nacheinander* abgetastet werden, wobei jeweils 2 Analogkanäle des NI USB-6211 pro Bank verwendet werden. Details über die Multiplexer sind in Abschnitt 4.1.5 beschrieben.

Steuersignale Könnten für die erste Konstantentladestation noch die 4 verfügbaren digitalen Ausgänge zur Ansteuerung der Multiplexer und der Statusanzeige verwendet werden, reichten diese für die überarbeitete Version nicht mehr aus, da jeder Lastschalter ebenfalls ein Steuersignal benötigt. Deswegen werden Schieberegister zur Erzeugung der Steuersignale verwendet, die mit unterschiedlichen Updateraten die schnellen Steuersignale für die Multiplexer, sowie die langsamen Steuersignale für die Lastschalter generieren. Diese Steuersignale sind genauer im Abschnitt 4.1.6 beschrieben.

4.1.3 Systemarchitektur der Pulsentladestation

Anmerkung: prinzipiell verwendet die überarbeitete Pulsentladestation die gleiche Architektur wie die im Abschnitt 3.5.6 bereits kurz vorgestellte erste Version, wurde jedoch um einige nützliche Funktionen erweitert. Die folgende Beschreibung gilt deswegen großteils für beide Versionen.

Zweck dieser Pulsentladestation ist es, möglichst viele Batterien gleichzeitig mit einem definierten Stromprofil zu entladen, und dabei den Verlauf der Batteriespannung über die Zeit, sowie den Verlauf der Leerlauf- und Lastspannung und des Innenwiderstandes über die entnommene Ladung zu ermitteln und darzustellen. Die verwendete Messmethode ist in den Abschnitten 3.2.2 und 3.2.3 beschrieben. Diese Entladungen sollen bei unterschiedlichen Bedingungen (Stromprofil, Temperatur, etc.) durchgeführt werden können. Dabei sollen einerseits neue Batterien vollständig entladen werden, sowie für beschleunigte Tests bereits vorentladene Batterien zu Ende entladen werden. Die Messergebnisse sollen in einer Form abgelegt werden, in der sie sowohl vom Menschen als auch von Maschinen gelesen und weiterverarbeitet werden können.

Im Vergleich zur Konstantentladestation werden in der Pulsentladestation Präzisionsstromsenken benutzt, um pulsformige (oder arbiträre) Stromprofile zu erzeugen. Korreliert zu diesen Stromprofilen muss die Batteriespannung mit einer höheren zeitlichen Auflösung abgetastet werden, um die schnelleren Änderungen während der Pulsentladung sichtbar zu machen. Daher muss die Abtastung der Batteriespannung mit einer höheren Rate erfolgen als bei der Konstantentladestation, üblicherweise im Bereich zwischen 1 Hz und 10 Hz pro Kanal. In der Praxis hat sich eine Abtastrate von 2 Hz bewährt, also ein Messwert alle 0.5 s.

Abbildung 4.5 zeigt eine schematische Darstellung der Architektur der überarbeiteten Pulsentladestation. Das NI USB-6211 stellt wieder den Kern des Aufbaus dar, dieses DAQ-System steuert sämtliche Funktionen der Messschaltung und erfasst die Messdaten. An dieses Datenerfassungsgerät ist die Messhardware in Form von eigens entworfenen PCBs angeschlossen, die gestapelt werden können und so bis zu 32 Messkanäle bieten. Die dazu notwendige Hardware wird im Detail in den folgenden Abschnitten beschrieben.

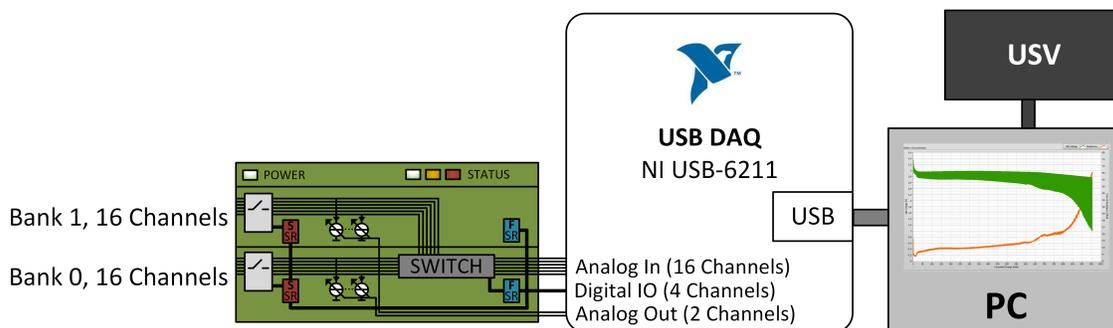


Abbildung 4.5: Schematischer Aufbau der überarbeiteten Pulsentladestation

Dieses System ist an einen Rechner angeschlossen, auf dem die entsprechende Applikationssoftware läuft (siehe Abschnitt 4.2 für weitere Informationen zur Software). Diese Software ermöglicht die komfortable Konfiguration und Bedienung des Messsystems, die Definition der Stromprofile, die Erfassung der Messdaten, sowie die Darstellung und Protokollierung der Messwerte und Ergebnisse. Die Software ist so ausgelegt, dass das Messsystem unterbrechungsfrei über lange Zeiträume laufen kann, währenddessen einzelne Kanäle angehalten, umkonfiguriert und mit neuen Batterien erneut gestartet werden können, ohne die restlichen Kanäle zu beeinflussen. Durch eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) ist dieser Rechner und die Messhardware als Inselösung vom

Stromnetz und sämtlicher Infrastruktur unabhängig, und so vor Datenverlust durch Netzausfall, etc. geschützt.

Das Messsystem sollte für gleichbleibende Ergebnisse bei einer konstanten Temperatur betrieben werden, bzw. bei einer definierten Temperatur um das Verhalten der Batterien über die Temperatur zu bestimmen. Dazu wird das System in einem ständig klimatisierten Raum betrieben, in dem zusätzlich auch Klima-, Wärme- und Gefrierschränke stehen. So können die Batterien unter den gewünschten Bedingungen getestet werden. Zur Überwachung und Steuerung des Messsystems kann auf den Messrechner per Remote Desktop zugegriffen werden.

Aufbau und Prinzip Auf Basis des NI USB-6211 werden gleich wie bei der ersten Version der Pulsentladestation 32 Batteriekanäle zur Verfügung gestellt, unterteilt auf 2 *Bänke* (“Stockwerke”). Diese Bänke für die Pulsentladung nutzen ebenfalls die gleiche PCB wie die Konstantentladestation, welche die Schaltungsteile für die Belastung der Batterie, die Multiplexer (bzw. Schalter), Indikatoren für aktive Batterien, sowie weitere Statusanzeigen enthalten. Ebenfalls werden pro Bank 16 Messkanäle angeboten, durch die notwendige zeitgleiche Abtastung aller Kanäle pro Bank kann hier jedoch kein Multiplexer wie bei der Konstantentladestation verwendet werden.

Bei der Pulsentladestation muss die Erfassung der Batteriespannungen zum richtigen Zeitpunkt erfolgen, um den gewünschten Punkt im Stromprofil zu treffen und damit die Leerlauf- und Lastspannung sowie den Innenwiderstand korrekt berechnen zu können (siehe Abschnitt 3.1.4 für eine detaillierte Erklärung). Das bedeutet, dass alle Kanäle die das gleiche Stromprofil verwenden auch gleichzeitig abgetastet werden müssen, um stabile und sinnvolle Ergebnisse zu erhalten. Nachdem das NI USB-6211 nur 16 Analogeingänge bietet, können maximal 16 Batterien mit dem gleichen Lastprofil betrieben und gleichzeitig erfasst werden. Wegen den 2 Analogausgängen des NI USB-6211 können nur 2 unterschiedliche Stromprofile generiert werden. Daraus ergibt sich eine mögliche Maximalanzahl von 32 Batteriekanälen.

Um periodisch abwechselnd die beiden Bänke abzutasten werden im Vergleich zur Konstantentladestation Analogschalter verwendet, die jeweils eine gesamte Bank auf die verfügbaren Analogkanäle des NI USB-6211 verbinden, um alle 16 Kanäle einer Bank gleichzeitig zu erfassen. Wird die Erzeugung der Stromprofile und die Ansteuerung der Analogschalter sowie die Erfassung der Messsignale korreliert durchgeführt, können die gewünschten Werte für Leerlaufspannung, Lastspannung und Innenwiderstand aus den erfassten Daten ausgelesen bzw. berechnet werden.

Um die Auswirkung einer Laststromänderung auf die Batteriespannung laut Abbildung 3.4 richtig zu erfassen, wird eine definierbare kurze Verzögerung zwischen Änderungen des Laststromes und der Erfassung der Batteriespannungen eingebaut. Dabei hat sich eine Verzögerung von 10 ms als brauchbar erwiesen, um stabile Werte zu erhalten.

Zusätzlich ist es über weitere Analogschalter möglich, sowohl die Batteriespannung als auch den Laststrom an den Präzisionsstromsenken zu messen. Dadurch können Messfehler und fehlerhafte Berechnungen und Darstellungen ausgeschlossen werden, wenn die angeschlossene Batterie den im Stromprofil definierten Strom nicht mehr liefern kann.

Auf jeder PCB sind die Lasten für die 16 Batteriekanäle, sowie Lastschalter untergebracht, mit denen wie bei der Konstantentladestation jeder einzelne Kanal von der Last getrennt werden kann. Als Last werden steuerbare Stromsenken verwendet, die direkt von den beiden Analogausgängen des NI USB-6211 angesteuert werden um die gewünschten Stromprofile zu erzeugen. Diese Stromprofile können in der Applikationssoftware definiert werden. Die Software sorgt dafür, dass die gewünschten Größen periodisch zu den korrekten Zeitpunkten erfasst werden. Wie bei der Konstantentladestation gibt es auch hier Schieberegister, mit denen aus den wenigen verfügbaren digitalen IOs des NI USB-6211 die Steuersignale für die Lastschalter, Analogschalter und weitere Funktionen generiert werden.

Wie bei der Konstantentladestation werden die benötigten Messsignale sowie Steuersignale zwischen den beiden Ebenen der Pulsentladestation über eine vertikale Verbindung über Pfostensteckverbinder ausgetauscht. Dabei werden die digitalen Steuersignale sowie die Analogausgänge für die Stromprofile auf beiden Ebenen zur Verfügung gestellt. Die Messsignale der oberen Bank werden über den Pfostensteckverbinder auf die untere Bank übertragen, wo sich die Analogschalter zur Auswahl zwischen den Bänken befinden. Von dort aus werden die Messsignale auf die Analogeingänge des NI USB-6211 verbunden. Die Analogschalter zur Auswahl zwischen Strom- und Spannungsmessung sowie die Schieberegister zur Erzeugung der Steuersignale befinden sich auf der jeweiligen Bank. Zusätzlich werden alle PCBs über diese vertikale Verbindung versorgt.

Belastung Bei der Pulsentladestation werden die Präzisionsstromsenken benutzt, um ein definiertes Stromprofil zu erzeugen. Dabei werden die 2 Analogausgänge des NI USB-6211 dazu verwendet, um getrennte, zeitlich versetzte Stromprofile für die beiden Bänke zu erzeugen, dabei werden alle Batteriekkanäle einer Bank mit dem exakt gleichen Stromprofil belastet. Je nach gewünschtem Maximalstrom und Genauigkeit der Stromprofile können über eine Bestückungsänderung die Präzisionsstromsenken für unterschiedliche Strombereiche konfiguriert werden.

Bei bereits weit entladenen Batterien oder hohen Lastströmen kann es dazu kommen, dass eine Batterie den im Stromprofil definierten Laststrom nicht mehr liefern kann. Der tatsächliche Laststrom stimmt in diesem Fall nicht mit dem im Stromprofil eingetragenen Strom überein, dazu kommt es zu einer fehlerhaften Darstellung der Lastspannung und zu einer fehlerhaften Berechnung des Innenwiderstandes. Um dieses Problem zu vermeiden bietet die überarbeitete Pulsentladestation die Möglichkeit, den tatsächlich von der Präzisionsstromsenke eingepprägten Strom zu messen und so die Darstellung und Berechnung zu korrigieren. Diese Möglichkeit gab es bei der ersten Pulsentladestation noch nicht, hier konnte nur die Batteriespannung gemessen werden.

Details über die Möglichkeiten der Belastung sind in Abschnitt 4.1.4 beschrieben.

Lastschalter Wie bei der Konstantentladestation ist für jeden Batteriekkanal ein eigener *Load Switch* eingebaut, der getrennt angesteuert werden kann um so jede Batterie einzeln bei Erreichen einer gewissen Abbruchbedingung von der Last zu trennen. Nachdem die Pulsentladung ein destruktiver Test ist, mit dem die Batterie üblicherweise vollständig entladen wird um deren Verhalten insbesondere am Ende der Lebensdauer zu untersuchen, wird ein vorzeitiges Abtrennen und damit Einfrieren des aktuellen Zustandes bei der normalen Pulsentladung nicht benötigt. Der tiefere Sinn dieser Lastschalter ist die Möglichkeit, mit einer Pulsentladestation ein automatisiertes, selbstständiges Abarbeiten einer schnellen *Vorentladung* mit einem Konstantstrom und anschließender Pulsentladung durchzuführen, ohne die Batterien an zwei separate Konstant- und Pulsentladestationen anzuschließen.

Dazu wird die Pulsentladestation zuerst im Modus *Konstantentladung* betrieben, in dem mit den Präzisionsstromsenken der entsprechende konstante Entladestrom aus den Batterien entnommen wird, bis eine vorgegebene entnommene Ladungsmenge erreicht ist. Diese Ladungsmenge kann für jede Batterie unterschiedlich eingestellt werden. Erreicht eine Batterie diese Menge, wird sie von der Stromsenke getrennt. Sobald alle Batterien auf die eingestellte Ladungsmenge gekommen sind, wird zuerst eine gewisse Zeit gewartet, um die Batterien etwas erholen zu lassen. Danach wird in den Pulsentlademodus gewechselt und die Batterien damit vollständig entladen, um deren nutzbare Kapazität, sowie die Verläufe von Leerlauf- und Lastspannung sowie Innenwiderstand zu bestimmen.

Diese Methode eignet sich durch den automatisierten Ablauf und die definierten Einstellungen als Test abseits vom Labor, bei dem ständig die gleichen oder ähnlichen Messungen durchgeführt werden, beispielsweise in der Produktion als Wareneingangskontrolle mit einer definierten Anzahl an Batteriesamples. Diese werden angeschlossen, der passende Batterietyp ausgewählt, und die

Messung gestartet. Ist die Entladung abgeschlossen, kann für jede Batterie eine nutzbare Kapazität bestimmt werden. Diese kann für die getesteten Samples statistisch ausgewertet werden, um einen besseren Überblick über das Verhalten und die Streuung der Batterien zu bekommen. Mit definierten Ober- und Untergrenzen kann für die getestete Charge eine Entscheidung getroffen werden, ob diese angenommen oder zurückgewiesen werden soll. Dadurch kann durch die laufende Qualitätskontrolle eine mögliche Veränderung der Qualität der gelieferten Batterien erkannt werden.

Details über die Lastschalter sind in Abschnitt 4.1.4 beschrieben.

Multiplexer Um die 16 Analogeingänge abwechselnd auf die 32 Batteriekanäle zu verbinden, werden Analogschalter statt den Multiplexern verwendet. Dazu erzeugen die beiden Analogausgänge zeitlich versetzte Stromprofile, die auf jeweils einer Bank als Laststromprofil verwendet werden. Synchron dazu wechseln die Analogschalter zwischen Bank 0 und Bank 1, um die beiden Bänke ebenfalls zeitversetzt abzutasten und somit mit den Stromprofilen synchron zu sein. Diese Analogschalter werden im Schaltplan und in der Software als MUX2 bezeichnet, da 2 Eingangssignale auf einen Analogkanal durchgeschaltet werden.

Zusätzlich nutzt besonders die Pulsentladestation die Möglichkeit, den tatsächlich eingepprägten Laststrom der Batterie zu messen. Steigt gegen Ende der Lebensdauer der Batterie deren Innenwiderstand, kann es dazu kommen dass der im Stromprofil eingestellte Strom nicht mehr geliefert werden kann und der tatsächliche Laststrom nicht mit dem eingestellten Stromprofil übereinstimmt. In dem Fall würde weder die gemessene Lastspannung noch die Berechnung von entnommener Kapazität, Innenwiderstand, etc. korrekt sein. Deswegen sind auf der PCB weitere Analogschalter untergebracht, die die Analogeingänge zwischen Batteriespannung und dem tatsächlichen Laststrom der Präzisionsstromsenken umschalten können. Damit kann bei regelmäßigem Umschalten zwischen diesen Größen sowohl die Batteriespannung als auch der tatsächliche Laststrom jedes Kanals gemessen werden. Diese Analogschalter werden im Schaltplan und in der Software als INMUX bezeichnet, da direkt am Eingang (*Input*) zwischen Batteriespannung und Laststrom umgeschaltet wird.

Diese Funktionsweise der korrelierten Abtastung ist als zeitlicher Verlauf in Abbildung 4.6 dargestellt. Die beiden oberen Diagramme zeigen zwei Kanäle auf zwei Bänken, die sich einen Analogeingang teilen, beispielsweise Kanal 0 auf Bank 0 und Kanal 0 auf Bank 1. Die blaue bzw. grüne Kurve stellt dabei die jeweilige Batteriespannung V_{B1} bzw. V_{B0} dar, die rote bzw. violette Kurve zeigt die Stromprofile I_{B1} bzw. I_{B0} . Im den unteren beiden Diagrammen sind die Steuersignale für INMUX und MUX2 dargestellt. Die senkrechten grauen Linien zeigen die Abtastzeitpunkte, an denen alle 16 Analogeingänge gleichzeitig abgetastet werden, mit eingefärbten Punkten ist dabei markiert, wann welches Signal abgetastet wird.

MUX2 bestimmt dabei, welche Bank abgetastet wird, INMUX schaltet zwischen Spannungs- und Strommessung um. Die gelben senkrechten Linien zeigen, dass die Signale von Bank 1 (V_{B1} und I_{B1}) abgetastet werden, wenn MUX2 = high ist. Bei MUX2 = low werden die Signale von Bank 0 (V_{B0} und I_{B0}) abgetastet.

Ebenso zeigen die senkrechten orangen Linien, dass bei INMUX = high die Batteriespannung abgetastet wird, und bei INMUX = low der eingepprägte Laststrom der Präzisionsstromsenke. Dabei wird INMUX mit der doppelten Frequenz von MUX2 betrieben, dadurch werden jeweils Spannung und Strom abgetastet, bevor auf die andere Bank gewechselt wird. So werden periodisch V_{B0} , I_{B0} , V_{B1} , I_{B1} abgetastet. Diese Abtastung geschieht für alle 16 Kanäle gleichzeitig, die Software ordnet die Messwerte den richtigen Kanälen zu.

Bei der Erzeugung der Signale muss die Software dafür sorgen, dass die Timings der Analogeingänge und Analogschalter eingehalten werden, damit die Werte zum Zeitpunkt der Messung stabil sind.

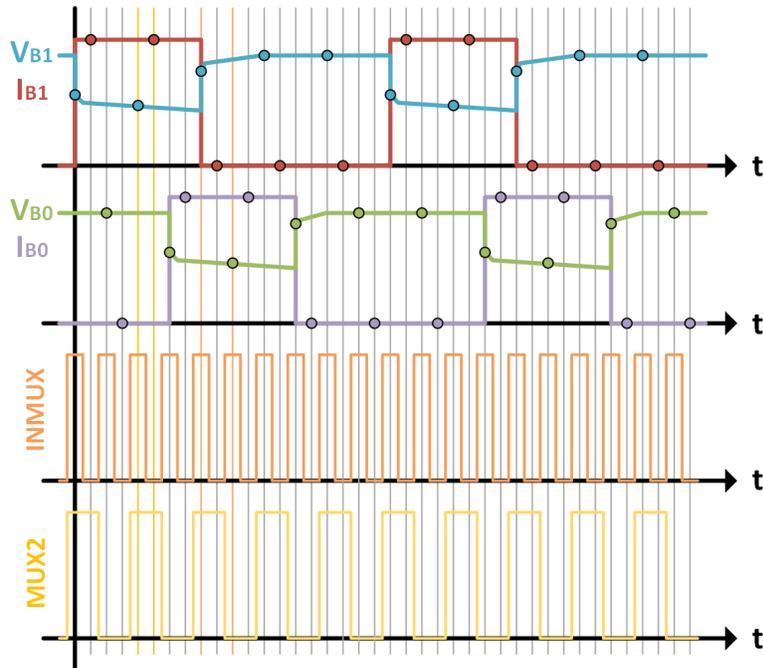


Abbildung 4.6: Arbeitsweise der Analogschalter bei der Pulsentladestation

Details über die Analogschalter sind in Abschnitt 4.1.5 beschrieben.

Steuersignale Wie bei der überarbeiteten Konstantentladestation reichten durch die zusätzlichen Lastschalter die vom NI USB-6211 bereitgestellten Digitalausgänge nicht mehr aus, um alle benötigten Steuersignale zu erzeugen. Dazu werden ebenfalls Schieberegister benutzt, um die erweiterten Steuersignale zu erzeugen. Diese Schieberegister sind genauer im Abschnitt 4.1.6 beschrieben.

4.1.4 Belastung der Batterien

Wie in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben kann die Belastung der Batterien je nach Einsatzzweck auf unterschiedliche Arten vorgenommen werden. Dabei kann zwischen der Konstantentladung über einen konstanten Widerstand oder über einen konstanten Strom aus Präzisionsstromsenken gewählt werden, sowie einer Pulsentladung über ein beliebiges Pulsprofil ebenfalls aus Präzisionsstromsenken. Die dazu verwendeten Lasten und deren Aufbau sind in diesem Abschnitt beschrieben. Zusätzlich ist die Möglichkeit der Messung des Laststroms der Präzisionsstromsenken möglich, sowie das Abtrennen der Last für einzelne Kanäle, um die Ladungsentnahme aus diesen Batterien anzuhalten. Die dazu verwendeten Schaltungen sind in den Unterkapiteln dieses Abschnittes erklärt.

Konstantentladung mit konstantem Widerstand

Die einfachste Form der Batterieentladung ist wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben die Entladung über einen konstanten Widerstand. Nachteil bei dieser Methode ist, dass der Laststrom nicht konstant ist, sondern von der aktuellen Batteriespannung bestimmt wird. Außerdem kann eine

Änderung des Entladestromes bei dieser Variante nur durch eine Bestückungsänderung der Lastwiderstände erfolgen.

Abbildung 4.7 zeigt einen Schaltplanausschnitt, der die Lastwiderstände für 8 Kanäle der Konstantentladestation darstellt². Parallel zu den Lastwiderständen können Kondensatoren bestückt werden, die als Filter wirken.

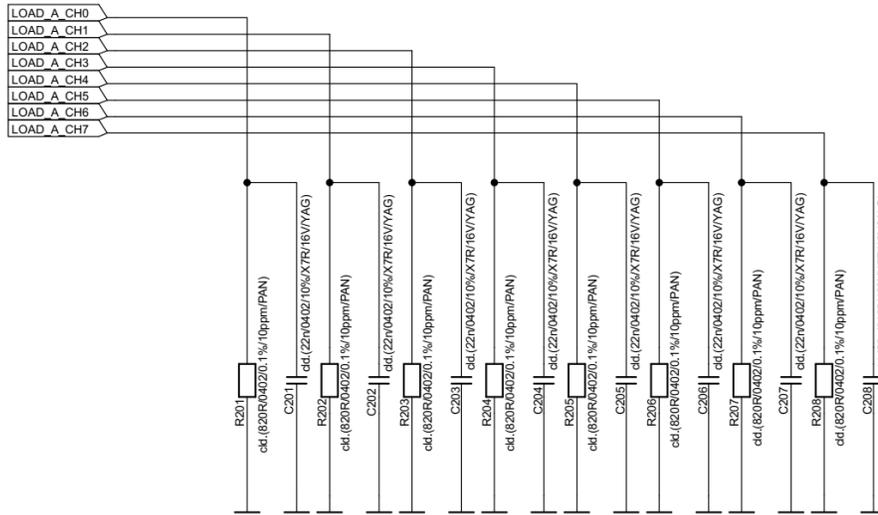


Abbildung 4.7: Schaltplanausschnitt mit den konstanten Entladewiderständen für 8 Kanäle der Konstantentladestation

In dieser Implementierung ist für jeden Batterieeingang jeder Bank ein Entladewiderstand mit 0.1 % Genauigkeit vorgesehen, der für die Entladung über einen Konstantwiderstand verwendet wird. Dieser Entladewiderstand ist mit dem Netz `LOAD_A/B_CHn` verbunden, der die Last für den Batteriekanal `n` darstellt³. Wie im Abschnitt 4.1.4 beschrieben ist das Netz `LOAD_A/B_CHn` über einen Lastschalter mit dem entsprechenden Batterieeingang `CH_A/B_n` verbunden, daher kann softwaregesteuert der Lastwiderstand mit dem Batterieeingang verbunden oder getrennt werden.

Dadurch ergibt sich für eine Batterie mit der Lastspannung $V_{BAT,load}$ und einem Entladewiderstand von R_{load} ein Laststrom von:

$$I_{BAT,load} = \frac{V_{BAT,load}}{R_{load}}$$

Durch die Verwendung von eng tolerierten Widerständen als Last kann der tatsächliche Laststrom aus der Batteriespannung mit hoher Genauigkeit berechnet werden. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, eine Kalibrierung der Lastwiderstände in der Software vorzunehmen.

Diese Variante der Entladung über konstante Widerstände wurde bei der ersten Konstantentladestation verwendet. Dabei wurden auf den unterschiedlichen Bänken unterschiedliche Entladewiderstände bestückt, um unterschiedliche Lastströme ohne Bestückungsänderung zu erlauben.

²bei dieser Bestückungsvariante der Konstantentladestation werden die Präzisionsstromsenken statt den konstanten Widerständen als Lasten verwendet, daher sind die Widerstände nicht bestückt und mit `c1d.(...)` (= *cleared*) gekennzeichnet

³**A** steht dabei für die erste Hälfte der Kanäle einer Bank (Kanal 0 bis 7), wobei **B** für die zweite Hälfte stehen würde (Kanal 8 bis 15). Dadurch sind die durch einen Multiplexer bei der Konstantentladestation auf einen Analogeingang zusammengeführten Kanäle zusammengefasst.

Entladung mit arbiträrem Stromprofil oder Konstantstrom

Um Batterien mit einem konstanten Strom oder einem pulsformigen Stromprofil entladen zu können, wurden zusätzlich *Präzisions-Stromsenken* für jeden Kanal vorgesehen. Diese bieten den Vorteil, dass der Laststrom unabhängig von der Batteriespannung eingestellt werden kann und von der Stromsenke konstant gehalten wird. Dabei kann der gewünschte Strom durch eine Spannung am Eingang der Stromsenke eingestellt werden. Wird diese Spannung verändert, kann auch der Strom verändert werden - damit ist es möglich, mit den Stromsenken beliebige Stromprofile zu erzeugen, wenn diese von einem Analogausgang des NI USB-6211 angesteuert werden.

Abbildung 4.8 zeigt einen Schaltplanausschnitt mit einer solchen Präzisionsstromsenke. Die Schaltung selbst ist eine modifizierte Version einer Präzisionsstromquelle aus [15]. Ein Präzisions-Operationsverstärker OPA192 von Texas Instruments mit niedriger Offsetspannung, niedriger Temperaturdrift, geringem Rauschen und Rail-to-Rail Ein- und Ausgängen dient dazu, die Gate-Source-Spannung eines n-Kanal-MOSFETs PMV20XNE von NXP/Nexperia so einzustellen, dass die an einem 0.1% Shuntwiderstand R_{shunt} (unten R313) abfallende Spannung exakt dem Vorgabewert entspricht, der dem Operationsverstärker an seinem nichtinvertierenden Eingang zugeführt wird.

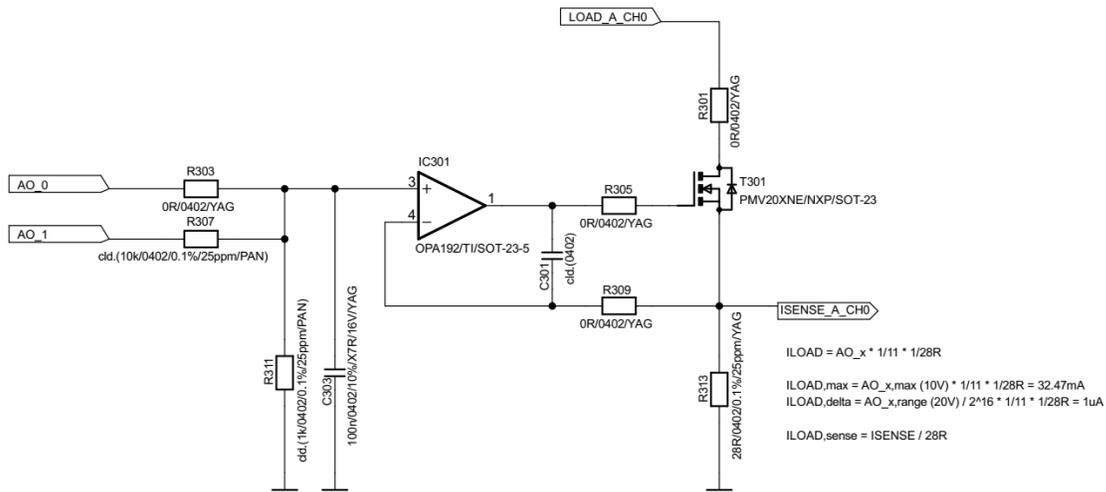


Abbildung 4.8: Schaltplanausschnitt mit Präzisions-Stromsenke für ≤ 32.5 mA für einen Kanal

Die Spannung aus dem Analogausgang $AOUT_n$ wird über einen 1:11 Spannungsteiler auf eine Spannung im Netz AO_n reduziert, die der gewünschten Spannung am Shunt entspricht. Dabei werden für den Spannungsteiler Widerstände mit 0.1% Genauigkeit verwendet (der Spannungsteiler ist in der Abbildung nicht eingezeichnet). Dadurch lässt sich die gesamte Auflösung der Analogausgänge des NI USB-6211 in dem an den Shunt angepassten Spannungsbereich nutzen. Die Präzisionsstromsenke stellt dann den Laststrom aus der an $LOAD_A/B_CHn$ angeschlossenen Batterie so ein, dass gilt:

$$I_{load} = AOUT_n \cdot \frac{1}{11} \cdot \frac{1}{R_{shunt}}$$

Der maximale Laststrom ist durch den Wert von R_{shunt} bestimmt, und beträgt:

$$I_{load,max} = AOUT_n,max \cdot \frac{1}{11} \cdot \frac{1}{R_{shunt}}$$

Mit der maximalen Ausgangsspannung des NI USB-6211 von 10 V und den Werten aus Abbil-

dung 4.8 also

$$I_{load,max} = 10 V \cdot \frac{1}{11} \cdot \frac{1}{28 \Omega} = 32.47 mA$$

Die Auflösung, also die kleinste mögliche Änderung des Laststroms, ergibt sich bei einem 16bit Analogausgang zu:

$$I_{load,delta} = \frac{AOUT_n_{max} - AOUT_n_{min}}{2^{16}} \cdot \frac{1}{11} \cdot \frac{1}{R_{shunt}}$$

Für diese Anwendung also:

$$I_{load,delta} = \frac{10 V - (-10 V)}{2^{16}} \cdot \frac{1}{11} \cdot \frac{1}{28 \Omega} = 0.99 \mu A$$

Mit einer garantierten Genauigkeit der Analogausgänge des NI USB-6211 von max. 3.5 mV ergibt sich ein maximaler Fehler von:

$$I_{load,error} = AOUT_n_{error} \cdot \frac{1}{11} \cdot \frac{1}{R_{shunt}} = 3.5 mV \cdot \frac{1}{11} \cdot \frac{1}{28 \Omega} = 11.36 \mu A$$

Zusätzlich kann die an R_{shunt} abfallende Spannung (I_{SENSE_A/B_CHn}) genutzt werden, um den tatsächlich von der Stromsenke eingepprägten Strom zurückzulesen, beispielsweise für den Fall dass die Batterie diesen eingestellten Strom aufgrund des hohen Innenwiderstandes nicht mehr liefern kann. Durch die geringe Spannung die an R_{shunt} abfällt ($\leq AOUT_n_{max} \cdot \frac{1}{11} = 10 V \frac{1}{11} = 0.91 V$) ist die Genauigkeit aber geringer als bei der Stromeinstellung. Dabei gilt:

$$I_{SENSE_A/B_CHn} = I_{load} \cdot R_{shunt}$$

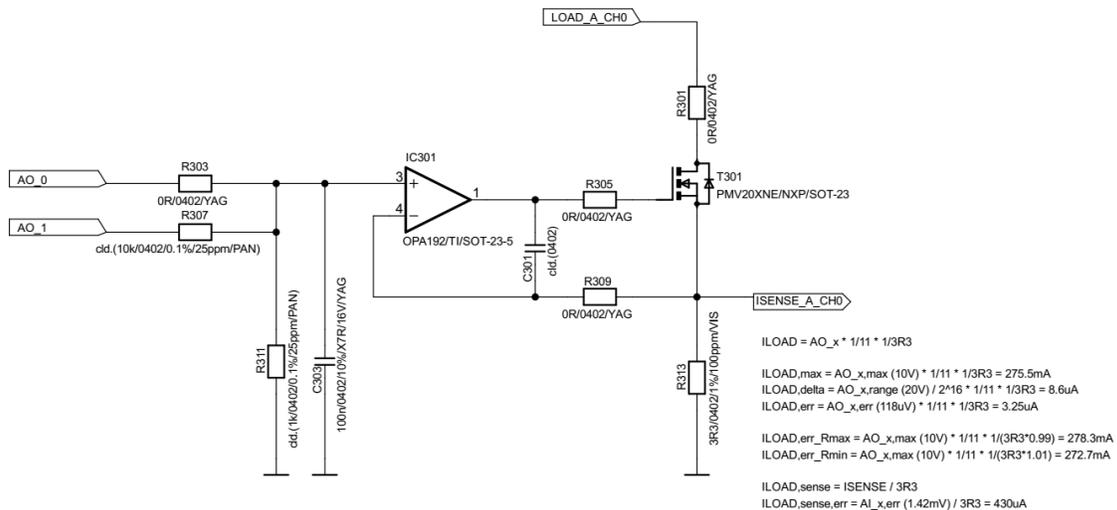


Abbildung 4.9: Schaltplanausschnitt mit Präzisions-Stromsenke für ≤ 275 mA für einen Kanal

Je nach Dimensionierung von R_{shunt} lassen sich mit diesen Präzisionsstromsenken unterschiedliche Strombereiche abdecken. Für eine Pulsentladestation die höhere Stromspitzen aus den Batterien entnehmen kann wurde beispielsweise die Schaltung in Abbildung 4.9 verwendet, die mit $R_{shunt} = 3.3 \Omega$ Ströme mit bis zu 275 mA erreichen kann. Der maximale Fehler beträgt dabei etwa 0.1 mA.

Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass durch diese hohen Ströme auch dementsprechen höhere Verlustleistungen entstehen, die vom Shuntwiderstand und vom MOSFET abgegeben werden.

Die Operationsverstärker sind mit +5V versorgt, daher ist darauf zu achten dass die Threshold-Spannung des verwendeten MOSFET gering genug ist, dass der Ausgang des Operationsverstärkers die Summe aus Threshold-Spannung und Spannung am Shunt bei Maximalstrom erreichen kann.

Die Präzisionsstromsenken sind ebenfalls mit den Netzen `LOAD_A/B_CHn` verbunden, und können daher wie die Entladewiderstände aus Abschnitt 4.1.4 per Software von den Batteriekkanälen `CH_A_n` getrennt werden.

Wie bei der Entladung über einen Konstantwiderstand ist es auch möglich, die Präzisionsstromsenken in der Software zu kalibrieren.

Je nach Ansteuerung der Analogausgänge mit einem konstanten Wert oder einer beliebigen (periodischen) Funktion lässt sich diese Präzisionsstromsenke zur Entladung mit einem Konstantstrom oder mit einem (periodischen) Stromprofil nutzen.

Messung des tatsächlichen Laststromes

Wie in den vorhergehenden Kapiteln bereits beschrieben kann der tatsächlich von den Stromsenken eingeprägte Laststrom über das Netz `ISENSE_A/B_CHn` ausgelesen und berechnet werden. Insbesondere bei Pulstests, bei denen die Batterie durch hohe Ströme oder den bereits hohen Innenwiderstand an ihre Grenzen stößt, ist dieser Wert von Bedeutung. Aus diesem Grund enthält die Messhardware eine Möglichkeit, diese Signale neben der Batteriespannung zurückzulesen, indem mit einem Analogschalter zwischen der Batteriespannung `VBAT_A/B_CHn` (direkt verbunden mit den Batteriekkanälen `CH_A/B_n`) und dem Messsignal für den eingepprägten Laststrom `ISENSE_A/B_CHn` als Eingangssignal für die Analogeingänge umgeschaltet werden kann.

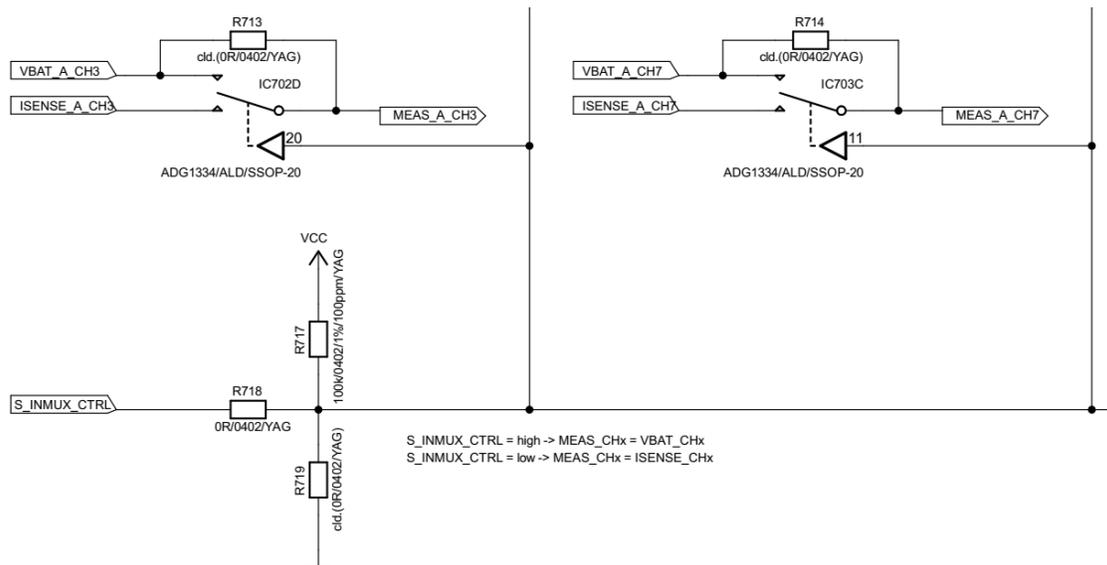


Abbildung 4.10: Schaltplanausschnitt mit Analogschaltern für VBAT/ISENSE-Messsignalauswahl für zwei Kanäle

Abbildung 4.10 zeigt einen Schaltplanausschnitt mit diesen Analogschaltern für 2 Kanäle. Dabei wird lediglich das Messsignal `MEAS_A/B_CHn` zwischen der Batteriespannung `VBAT_A/B_CHn` und

dem Stromsignal ISENSE_A/B_CHn umgeschaltet. Gesteuert wird der Analogschalter durch das Signal S_INMUX_CTRL. Die Arbeitsweise dieser Umschaltung ist bereits in Abschnitt 4.1.3 beschrieben - bei der Erfassung wird für jeden Kanal sowohl die Batteriespannung als auch das Stromsignal periodisch hintereinander erfasst.

Ist diese Funktionalität nicht erwünscht, kann der Analogschalter entfernt und durch einen 0Ω-Jumper stattdessen zur Überbrückung bestückt werden. Wie in Abschnitt 4.1.4 bereits kurz beschrieben ist die Genauigkeit dieser Strommessung jedoch geringer als die Genauigkeit bei der Einstellung des Stroms, da der Eingangsbereich des Analogeingangs dabei nur teilweise genutzt werden kann.

Die verwendeten Analogschalter sind die gleichen, die für die Umschaltung der Bänke in der Pulsentladestation verwendet werden und sind im Abschnitt 4.1.5 näher beschrieben.

Abtrennen der Last mittels Lastschalter

Wie ebenfalls in den vorhergehenden Kapiteln bereits beschrieben bietet die Messhardware die Möglichkeit, Batterien einzeln von deren Last zu trennen, um den aktuellen Ladezustand beizubehalten, beispielsweise bei Erreichen einer gewünschten Teilentladung. Dazu ist für jeden Batteriekanal ein Lastschalter (*Load Switch*), bestehend aus einem p-Kanal MOSFET, vorgesehen. Ein Schaltplanausschnitt dazu ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

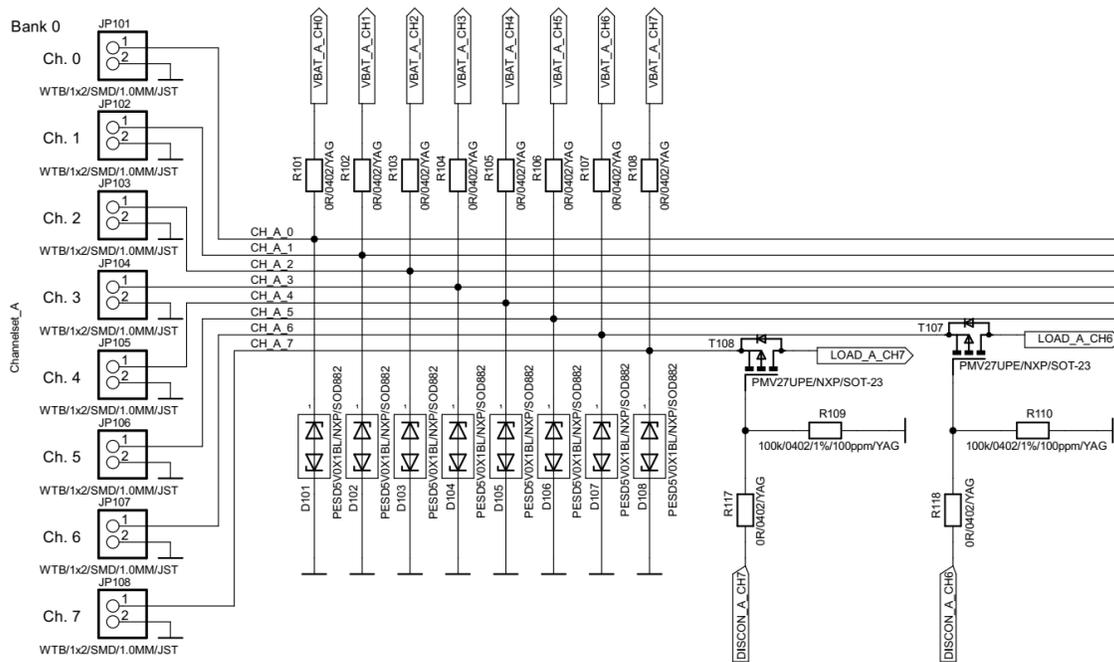


Abbildung 4.11: Schaltplanausschnitt mit Lastschalter zwischen Batterieanschluss und Konstant-/Pulslast für zwei Kanäle

Diese Abbildung zeigt die gesamte Eingangsbeschaltung der Messsysteme. Oben ist die direkte Verbindung der Batteriespannungs-Messkanäle VBAT_A/B_CHn mit den Batterieanschlüssen CH_A/B_n dargestellt. Die Batterieanschlüsse sind mit Low-Leakage-ESD-Dioden gegen Schäden durch elektrostatische Entladungen geschützt. Direkt zwischen den Batterieanschlüssen und den Konstant- bzw. Pulslasten befinden sich die p-Kanal MOSFETs zum Trennen der Last von der Batterie.

Als MOSFET wurde der Typ PMV27UPE von NXP/Nexperia ausgewählt. Durch die niedrige Threshold-Spannung von max. -0.95 V ist eine minimale Batteriespannung von etwa 1 V notwendig, um die MOSFETs durchzuschalten. Damit ist die minimale Entladeschlussspannung festgelegt, wenn diese MOSFETs bestückt werden. Sollen die Batterien auf niedrigere Spannungen entladen werden, muss entweder ein anderer MOSFET mit einer geringeren Threshold-Spannung verwendet werden, oder der Lastschalter muss komplett weggelassen werden.

Der verwendete MOSFET vom Typ PMV27UPE weist einen sehr niedrigen Einschaltwiderstand $R_{DS,on}$ von $\ll 100\text{ m}\Omega$ auf, um den Messfehler des Innenwiderstandes gering zu halten. Der Drain-Leckstrom liegt bei $V_{DS} = -20\text{ V}$ bei $< 1\text{ }\mu\text{A}$, Messungen haben gezeigt dass dieser bei geringeren Drain-Source-Spannungen wesentlich unter diesem Wert liegt. Durch den Leckstrom kommt es deswegen zu keiner nennenswerten Entladung der Batterie.

Jeder MOSFET wird von einem eigenen Steuersignal DISCON_A/B_CHn angesteuert, dadurch kann jede Batterie einzeln von der dazugehörigen Last getrennt werden. Dieses Steuersignal hat $+5\text{ V}$ -Logikpegel und wird von eigens dafür vorgesehenen Schieberegistern erzeugt. Diese Schieberegister werden im Abschnitt 4.1.6 beschrieben.

4.1.5 Multiplex der Messkanäle

Wie in den vorigen Abschnitten beschrieben verwenden die Entladestationen Multiplexing, um die Anzahl der Batteriekanäle zu erhöhen. Dabei sind die Anforderungen der Konstantentladestation anders als die der Pulsentladestation, weswegen auch unterschiedliche Multiplex-Verfahren eingesetzt werden. Diese beiden Verfahren sind in diesem Abschnitt beschrieben.

8:1 Multiplex der Konstantentladestation

Bei der Konstantentladestation reicht eine geringe Abtastrate der Batteriekanäle, außerdem ist keine gleichzeitige oder zeitlich genau definierte Erfassung der Kanäle notwendig. Daher können in der verfügbaren Zeit viele Kanäle über N:1 Multiplexer auf die 16 verfügbaren Analogeingänge des NI USB-6211 verbunden und abgetastet werden.

Durch die Abtastperiode von 10 Sekunden und die kurze Umschaltdauer der Multiplexer könnten theoretisch sehr viele Batteriekanäle an einem NI USB-6211 erfasst werden. Als Mittelweg zwischen einer großen Anzahl an Kanälen und kompakten mechanischen Abmessungen und daher mechanischer Stabilität und Benutzerfreundlichkeit wurden 128 Batteriekanäle gewählt. Dabei werden jeweils 8 Batteriekanäle über einen 8:1 Multiplexer auf einen Analogeingang verbunden. Dazu werden 3 bit (MUX16_A0, MUX16_A1, MUX16_A2) für die Ansteuerung der 8:1 Multiplexer benötigt ($2^3 = 8$ Zustände). Mit einem Enable-Signal (MUX16_EN) können die Multiplexer getrennt werden. Die Beschaltung eines solchen Multiplexers ist in Abbildung 4.12 gezeigt.

Dabei sind die Batteriekanäle MEAS_A/B_CHn in 8 horizontale Bänke unterteilt, die je zwei 8:1 Multiplexer verwenden, also 16 Batteriekanäle pro Bank. Alle Multiplexer auf allen Bänken werden mit den gleichen Steuersignalen angesteuert, daher werden die 8 Batteriekanäle pro Halb-Bank jeweils hintereinander abgetastet. Nähere Informationen zu den Steuersignalen sind in Abschnitt 4.1.6 angeführt. Die Ausgänge der Multiplexer werden über $0\text{ }\Omega$ -Jumper zur entsprechenden vertikalen Verbindung zwischen den Bänken BUS_A/B_n und damit zum entsprechenden Analogeingang des NI USB-6211 an der untersten Bank (*Bank 0*) geführt.

Als 8:1 Multiplexer werden jeweils 2 ADG1608 von Analog Devices pro Bank verwendet. Diese CMOS-Analogmultiplexer können bei $+5\text{ V}$ Single Supply betrieben werden und bieten Rail-to-Rail Ein- und Ausgänge um sämtliche positiven Batteriespannungen zwischen 0 V und $+5\text{ V}$ verarbeiten zu können. Die Multiplexer arbeiten nach dem *break-before-make*-Prinzip, wobei ein Schalter

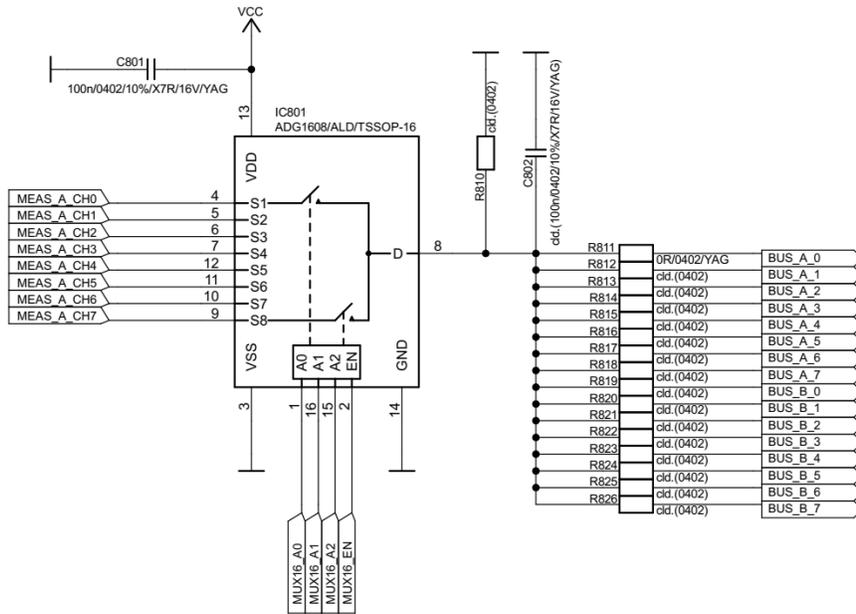


Abbildung 4.12: Schaltplanausschnitt mit einem 8:1 Multiplexer für eine Halb-Bank der Konstantentladestation

vollständig geöffnet wird, bevor der nächste geschlossen wird - damit kann es zu keinem Querstrom zwischen den Batteriekanälen kommen. Mit einem On-Widerstand von $\leq 10 \Omega^4$ und flachem Verlauf ($\Delta R_{FLAT,on} \leq 2.3 \Omega$) sowie gutem Matching zwischen den Channels ($\Delta R_{ON} \leq 0.3 \Omega$) wird das Messsignal direkt von der Batterie an die Analogeingänge des NI USB-6211 verbunden. Die dabei möglichen Leckströme des ADG1608 liegen bei $\ll 1 \text{ nA}$ und sind daher für die Batterieentladung vernachlässigbar. Durch den geringen On-Widerstand existiert jedoch eine deutliche *Charge Injection* von typischerweise 11 pC zwischen Steuereingang und Analogausgang des Multiplexers, die sich als kurzzeitiger Glitch am Ausgang zum Zeitpunkt des Umschaltens bemerkbar macht [15]. Durch die geringe Abtastrate, die ausreichende Wartezeit zwischen Umschalten und Abtasten, sowie den geringen Ausgangswiderstand der Batterien beeinflusst diese Charge Injection jedoch die Messwerte nicht. Der Kondensator am Ausgang des Multiplexers ist als Abhilfe vorgesehen, wäre es zu einem Einfluss gekommen hätte dieser die zusätzliche Ladung "geschluckt". Durch die Größenordnung der Charge Injection im Picocoloumb-Bereich und die geringen Schaltfrequenzen der Multiplexer ist der Einfluss der injizierten Ladung auf die Batteriekapazität ebenfalls vernachlässigbar.

Die Abtastung erfolgt mit einer Umschaltperiode von 0.5 Sekunden, dabei wird binär hochgezählt und so alle Kanäle des Multiplexers hintereinander abgetastet. Die Software ordnet dabei die Messwerte den entsprechenden Batteriekanälen zu. Sind alle Kanäle abgetastet, also nach $8 \cdot 0.5 \text{ s} = 4 \text{ s}$, wartet die Logik bis der nächste Abtastzyklus beginnt. Bei einer Abtastperiode von 10s pro Kanal bleiben also 6 Sekunden Ruhezeit bis zum nächsten Abtastzyklus.

2:1 Multiplex/Umschaltung der Pulsentladestation

Im Vergleich zur Konstantentladestation muss bei der Pulsentladung die Umschaltung der Kanäle öfter und vor allem deren Erfassung gleichzeitig passieren, die zusätzlich zeitlich auf das Stromprofil abgestimmt sein muss. Daher können bei der Pulsentladestation keine N:1 Multiplexer verwendet

⁴alle Angaben lt. Datenblatt als Maximum bei Raumtemperatur (25°C)

werden. Durch die Verfügbarkeit von 2 Analogkanälen können zwei zeitlich versetzte Stromprofile für 2 Bänke erzeugt werden, während Analogschalter dazu synchronisiert zwischen den beiden Bänken umschalten, um diese an den 16 verfügbaren Analogeingängen des NI USB-6211 zu erfassen. Man kann also von einem 2:1 Multiplex sprechen. Der zeitliche Ablauf ist im Abschnitt 4.1.3 beschrieben. Die dazu verwendete Beschaltung der Analogschalter ist in Abbildung 4.13 dargestellt.

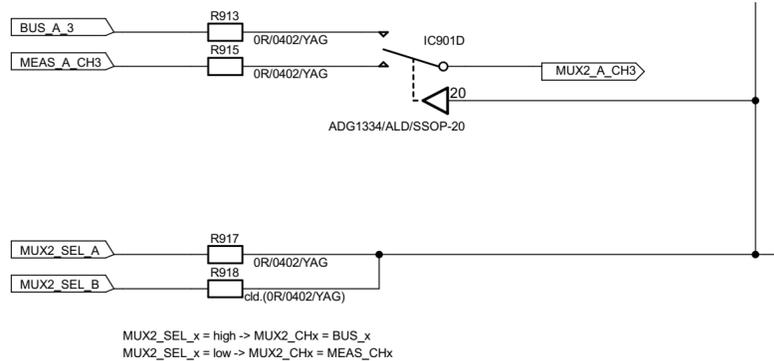


Abbildung 4.13: Schaltplanausschnitt mit Analogschaltern für die Bank-Auswahl bei der Pulsentladestation

Die Analogschalter sind dabei in der unteren Bank (*Bank 0*) untergebracht, und können ihre Ausgänge MUX2_A/B_CHn zwischen den Messsignalen auf Bank 0 (MEAS_A/B_CHn) und den Messsignalen die über die vertikale Verbindung von Bank 1 kommen (BUS_A/B_n) umgeschaltet werden⁵. Die Ausgänge der Analogschalter sind dabei direkt mit den 16 Analogeingängen des NI USB-6211 verbunden. Zur Ansteuerung dieser Analogschalter wird nur ein Steuersignal gebraucht (MUX2_SEL_A/B), welches je nach Pegel die Messsignale von Bank 0 oder Bank 1 auf die Analogeingänge verbindet.

Bei der Pulsentladestation werden die Batteriekanäle üblicherweise mit einer Abtastperiode von 0.5 Sekunden erfasst. Die Schaltperiode der Analogschalter beträgt daher 0.25 s. Die Abtastung erfolgt in diesem Takt kontinuierlich, es gibt also keine Ruhezeit in der die Logik auf etwas wartet wie bei der Konstantentladestation.

Bei den verwendeten Analogschaltern handelt es sich um ADG1334 von Analog Devices. Mit 4 integrierten Analogschaltern werden 4 ADG1334 benötigt, um die 16 Analogeingänge auf 32 Batteriekanäle umzuschalten. Diese CMOS-Analogschalter können bei +5 V Single Supply betrieben werden und bieten Rail-to-Rail Ein- und Ausgänge um sämtliche positiven Batteriespannungen zwischen 0 V und +5 V verarbeiten zu können. Die Analogschalter arbeiten nach dem *break-before-make*-Prinzip, wobei ein Schalter vollständig geöffnet wird, bevor der andere geschlossen wird - damit kann es zu keinem Querstrom zwischen den Batteriekanälen kommen. Mit einem On-Widerstand von $\leq 500 \Omega$ ⁶, einem Widerstandsverlauf von $\Delta R_{FLAT,on} \leq 65 \Omega$ und einem Matching zwischen den Channels von $\Delta R_{ON} \leq 20 \Omega$ ist der Durchlasswiderstand deutlich höher als beim verwendeten 8:1 Multiplexer ADG1608, jedoch durch den sehr hohen Eingangswiderstand der Analogeingänge des NI USB-6211 von $> 10 \text{ G}\Omega$ (Eingangskapazität 100 pF) immer noch problemlos für die direkte Verbindung der Messsignale zum Analogeingang geeignet⁷. Die *Charge Injection* ist dafür jedoch mit 2 pC deutlich geringer. Hier gelten die gleichen Bemerkungen zur Charge Injection wie in Abschnitt 4.1.5, die Charge Injection hat ebenfalls keine Auswirkung auf die erfassten

⁵auf Bank 1 sind die Messsignale direkt auf die vertikale Verbindung geschaltet

⁶alle Angaben lt. Datenblatt als Maximum bei Raumtemperatur (25°C)

⁷hätte es Probleme aufgrund des zu hohen On-Widerstandes gegeben, wären auch andere Analogschalter mit niedrigeren Werten im gleichen Package verfügbar

Messsignale, als Abhilfe wären ebenfalls Kondensatoren an den Ausgängen der Analogschalter bestückbar. Die dabei möglichen Leckströme des ADG1334 liegen bei ≤ 10 nA und sind daher für die Batterieentladung vernachlässigbar.

Die gleiche Struktur der Analogschalter wird ebenfalls für die Umschaltung zwischen Batteriespannungsmessung und Laststrommessung der Stromsenken verwendet (INMUX), die diese gelten die gleichen Eigenschaften, bei INMUX ist lediglich die Schaltfrequenz doppelt so hoch. Diese Messsignalumschaltung ist im Abschnitt 4.1.4 detailliert beschrieben.

4.1.6 Steuerung des Multiplex

Zur Ansteuerung des Multiplex sind bei den 8:1 Multiplexern der Konstantentladestation 3 digitale Steuersignale notwendig (MUX16_A0, MUX16_A1, MUX16_A2)⁸, für die Analogschalter bei der Pulsentladestation ist lediglich ein digitales Steuersignal notwendig (MUX2_A/B_CHn). Dabei konnten bei den ersten Varianten der Konstant- und Pulsentladestationen direkt die 4 verfügbaren digitalen Ausgänge des NI USB-6211 verwendet werden, da die ersten Versionen noch keine Zusatzfeatures wie die Lastschalter oder die Messung des Laststromes boten. Dabei blieb sogar noch ein digitaler Ausgang übrig, der zur Statusanzeige mit einer LED verwendet wurde.

Bei der Überarbeitung der Messhardware kam jedoch der dringende Wunsch nach diesen Zusatzfeatures auf, um die Messungen und die Evaluierungen zu verbessern und zu vereinfachen. Deswegen musste eine Lösung gefunden werden, wie die Anzahl der Steuersignale erhöht werden kann, indem nur die vorhandenen digitalen Ausgänge genutzt wurden. Die Schwierigkeit dabei war, dass jeder einzelne Batteriekanal angesteuert werden muss, um individuelle Lastschalter zu ermöglichen - bei einer Konstantentladestation mit 128 Kanälen sind daher 128 zusätzliche Steuersignale notwendig.

Durch die sehr begrenzte Anzahl von 4 vorhandenen digitalen Ausgängen wurden Schieberegister gewählt, um daraus mehrere Steuersignale zu erzeugen. Ein Standard-CMOS-Schieberegister vom Typ 74HC595 bietet beispielsweise 8 Ausgänge, damit kann ein serieller Datenstrom in einen 8 Bit breiten parallelen Datenstrom gewandelt werden. Diese Schieberegister bieten interne Register, um den aktuellen Zustand zu halten, sowie einen Ausgang, an dem der serielle Datenstrom nach dem Durchlaufen der 8 Bits wieder ausgegeben wird. Daruch können diese kaskadiert werden, um eine beliebige Anzahl an digitalen Ausgängen zu erzeugen, und benötigen nur 3 Eingangssignale:

- Data In (DS, "DIN"): serielle Eingabe der Daten Bit für Bit
- Clock (SHCP, "CLK"): bei jeder *Clock*-Flanke wird ein Bit von *Data In* übernommen
- Write (STCP, "WR"): bei einer *Write*-Flanke werden die eingetakteten Bits gepuffert und parallel an die Ausgänge gelegt

Mit diesen 3 Leitungen lassen sich also beliebig lange serielle Bitfolgen parallelisieren und daher eine beliebige Anzahl an Steuersignalen erzeugen. In Abbildung 4.14 ist ein Blockschaltbild des 74HC595 gezeigt. Der serielle Datenausgang Q7S ("DOUT") kann mit dem Dateneingang des nächsten Schieberegisters verbunden werden, um diese bei Verwendung der gleichen Clock- und Write-Leitung zu kaskadieren. Die zusätzlichen Leitungen /MR (Master Reset) und /OE (Output Enable) dienen zum Rücksetzen des Schieberegisters und zum Tristate-Schalten der Ausgänge. Diese Funktionen werden nicht gebraucht und mit fixen Pegeln versehen. Abbildung 4.15 zeigt den zeitlichen Ablauf der seriellen Dateneingabe und des Übernehmens der Werte.

Diese Lösung klingt in der Theorie gut, in der Praxis scheitert sie jedoch an den Eigenschaften des NI USB-6211. Wie bereits beschrieben bietet das NI USB-6211 nur *statische* digitale IOs - das bedeutet, dass diese nicht für das schnelle Ausgeben von Bitfolgen geeignet sind. Um Bitfolgen auszugeben, muss der Ausgang in der richtigen Reihenfolge auf *high* bzw. *low* geschaltet werden,

⁸MUX16_EN kann fix auf *enable* gesetzt werden

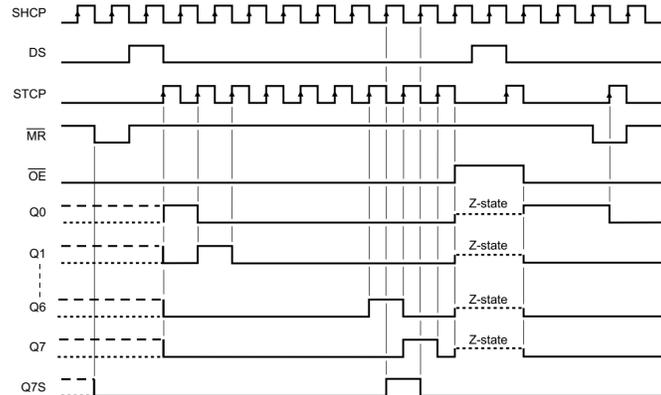
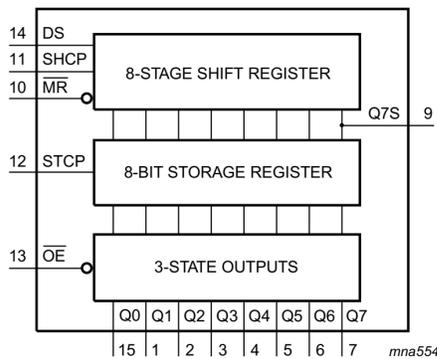


Abbildung 4.14: Blockschaltbild eines Schieberegisters vom Typ 74HC595 [16]

Abbildung 4.15: Timing-Diagramm (Beispiel) eines Schieberegisters vom Typ 74HC595 [16]

bis die gesamte Bitfolge ausgegeben ist. Dabei wird dieses Setzen des Ausgangs per Software getriggert, dadurch kommt es zu einer gewissen, nicht-deterministischen Wartezeit im Bereich von etwa 1 – 2 ms durch die Abarbeitung im Windows-Scheduler. Durch den fehlenden Determinismus kann es fallweise auch deutlich länger dauern.

Soll nun ein 8bit Schieberegister befüllt werden, sind im schlimmsten Fall 8 Änderungen des Datenbits nötig, sowie 8 steigende und 8 fallende Flanken der Clock-Leitung, sowie eine steigende und eine fallende Flanke der Write-Leitung, also insgesamt $3 \cdot 8 + 2 = 26$ sequentielle Änderungen der digitalen Ausgänge. Bei einer Abarbeitungsdauer von 1 – 2 ms pro Änderung kann das 52 ms dauern (oder länger). 52 ms klingt am ersten Blick nicht viel, für die Ansteuerung von 128 Lastschalter-Signalen (= $16 \cdot 8$) und 8 Multiplex-Steuersignalen sind jedoch bereits $3 \cdot (17 \cdot 8) + 2 = 410$ Änderungen notwendig, also $410 - 820$ ms rein für das Schreiben der Schieberegister. Da jede Änderung eines Bits in einem Schieberegister ein Update aller Schieberegister erfordert, würde jede Änderung eines Bits üblicherweise bis zu 820 ms dauern.

Da jedoch die Kanäle mit einer Rate bis zu 10 Hz umgeschaltet und erfasst werden sollen, und das Umschalten die Änderung eines oder mehrerer Bits verlangt, ist die beschriebene Lösung für diese Aufgabe zu langsam, da für das Umschalten *und* Erfassen lediglich max. 100 ms zur Verfügung stehen.

Fast Shift Register und Slow Shift Register Um die Geschwindigkeit für das Ansteuern des Multiplex deutlich zu erhöhen, wurden die Schieberegister in 2 Gruppen aufgeteilt:

Fast Shift Register (FSR): diese beinhalten die Daten, die *schnell* geändert werden müssen, also die Signale für die Ansteuerung der Multiplexer und Anlogschalter. Diese Daten werden in *einem* Schieberegister gespeichert, wobei sich eine Kopie dieses Schieberegisters auf jeder Bank befindet - so werden auf jeder Bank die gleichen 8 Steuersignale erzeugt. Alle FSR erhalten die gleichen DIN, CLK und WR Signale. Dadurch dauert ein Update des FSR $3 \cdot 8 + 2 = 26$ Änderungen, also 26 – 52 ms. Dabei bleibt noch genug Puffer für die Erfassung und mögliche Verzögerungen durch den Windows-Scheduler, um unter 100 ms zu bleiben.

Slow Shift Register (SSR): diese beinhalten die Daten, die nur selten geändert werden müssen und daher nicht zeitkritisch sind, also die 128 Signale für die Ansteuerung der Lastschalter. Diese Daten werden in 16 kaskadierten Schieberegistern gespeichert, wobei sich jeweils 2 kaskadierte SSR auf jeder Bank befinden. Die Datenausgänge sind dabei zwischen diesen

jeweils 2 SSR und zwischen den Bänken auf die Dateneingänge durchgeschliffen, so dass die 16 SSR über alle Bänke kaskadiert sind und damit 128 unabhängige Steuersignale für alle Kanäle erzeugen. Alle 16 SSR erhalten die gleichen CLK und WR Signale. Dadurch dauert ein Update des SSR $3 \cdot (16 \cdot 8) + 2 = 386$ Änderungen, also $386 - 772$ ms. Diese Änderungen werden nur durchgeführt wenn sie notwendig sind, und zu einem günstigen Zeitpunkt (in der Konstantentladestation beispielsweise in der 6 Sekunden langen Ruhephase zwischen den Abtastzyklen). Bei der Pulsentladestation reduziert sich die Anzahl der Änderungen durch die geringere Anzahl der Kanäle auf $3 \cdot (4 \cdot 8) + 2 = 98$, also $98 - 196$ ms. Durch das Aufspalten der Abarbeitung beispielsweise in 4 Pakete lassen sich $25 - 50$ ms lange Teilsequenzen erzeugen, die in der verfügbaren Wartezeit nach dem Update des FSR und der Messsignalerfassung abgearbeitet werden können.

Mit dieser Implementierung der Schieberegister ist es möglich, die Steuersignale in der verfügbaren Anzahl und Zeit zu erzeugen.

Dabei bleibt nur das Problem der 4 verfügbaren Digitalausgänge - die beiden Schieberegister brauchen jeweils DIN, CLK und WR Signale, also insgesamt 6 Signale. Dabei lässt sich jedoch der Umstand nutzen, dass die Schieberegister nur bei einer CLK-Flanke neue Daten von DIN übernehmen. Dadurch lässt sich das gleiche DIN-Signal für FSR und SSR verwenden, wenn eigene Clock-Leitungen für FSR und SSR verwendet werden.

Beim Signal WR kann ebenfalls die Tatsache genutzt werden, dass eine Flanke an WR nur dann zu einer Änderung der Ausgänge des Schieberegisters führt, wenn zuvor auch neue Daten mittels CLK-Flanken in das Schieberegister geschrieben wurden. Wieder kann also ein gemeinsames WR-Signal verwendet werden, wenn eigene Clock-Leitungen für FSR und SSR verwendet werden.

Damit lassen sich die 4 Digitalausgänge für die Erzeugung sämtlicher Steuersignale in der benötigten Zeit verwenden, wenn sie als geteilte Datenleitung DIN, geteilte Write-Leitung WR, und separate Clock-Leitungen CLK_FSR und CLK_SSR verwendet werden. Schaltplanausschnitte mit dem Fast Shift Register und den Slow Shift Registern für eine Bank sind in den Abbildungen 4.16 und 4.17 dargestellt.

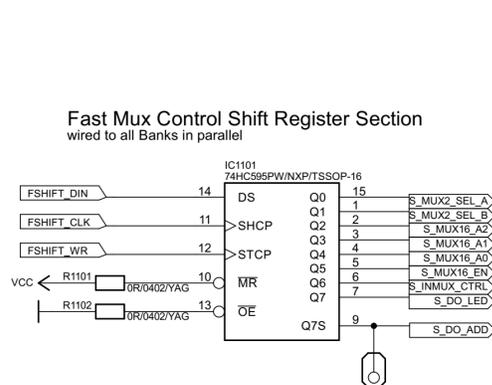


Abbildung 4.16: Schaltplanausschnitt mit Fast Shift Register (FSR)

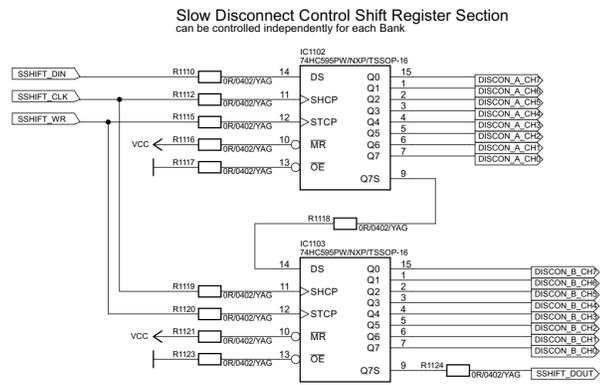


Abbildung 4.17: Schaltplanausschnitt mit Slow Shift Registern (SSR)

4.1.7 Batterieindikator

Als optischer Indikator, welche Batterien noch aktiv sind oder ob die gewünschten Entladungen bereits gestartet oder beendet wurden, wurde jeder Batteriekanal mit einem Aktivitätsindikator

versehen. Dazu befindet sich neben jedem Batteriekanal eine LED, die aufleuchtet solange der Kanal aktiv ist, also eine Last an die Batterie verbunden ist, und die Batteriespannung über einer definierten Schwelle liegt. Dazu ist an jedem Lastkanal `LOAD_A/B_CHn` ein Komparator vorgesehen, der die Batteriespannung mit der definierten Schwelle vergleicht. Die einzige Anforderung an diesen Komparator ist ein geringer Biasstrom und ein kompaktes Gehäuse, dazu wurde ein TS881 von ST Microelectronics verwendet. Dieser steuert einen FET an, der eine grüne LED einschaltet.

Die LED erlischt, wenn entweder der Kanal per Software abgeschaltet wird (also die Last getrennt wird, daher an `LOAD_A/B_CHn` keine Spannung anliegt), oder wenn die aktuelle Leerlauf- oder Lastspannung der Batterie unter der Schwelle von üblicherweise 2.0 V liegt. Abbildung 4.18 zeigt einen Schaltplanausschnitt mit einem solchen Komparator.

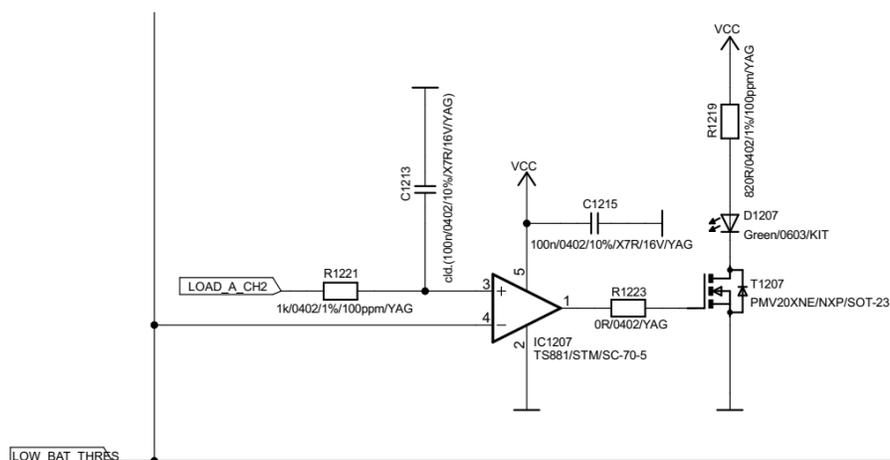


Abbildung 4.18: Schaltplanausschnitt mit Komparator für die Batterieindikatoren

Zusätzlich gibt es LEDs, die vom *Fast Shift Register* angesteuert werden und den aktuellen Status des Messsystems zeigen. Üblicherweise blinkt eine LED dazu im Takt der Abtastvorgänge, um als *Heartbeat* zu dienen. So kann schnell die korrekte Funktion optisch geprüft werden.

Indikator-Spannungsschwelle Die Spannungsschwelle für die Komparatoren wird auf jeder Bank mit einer einstellbaren TLV431-Spannungsreferenz erzeugt. Dabei wird der TLV431B-Typ verwendet, der eine Genauigkeit von 0.5 % und eine Temperaturdrift von max. 12 mV über den gesamten Temperaturbereich aufweist. Mit einem Spannungsteiler am Referenzpin wird die Ausgangsspannung auf exakt 2.0 V eingestellt. Diese Spannung ist die übliche Entladeschlussspannung von Lithiumknopfzellen.

4.1.8 Spannungsversorgung

Die Messhardware ist mit einer eigenen Spannungsversorgung versehen, da die vom NI USB-6211 zur Verfügung gestellte +5 V Versorgung nicht ausreichend Strom für die komplette Messstation liefern kann. Dazu wird die Spannungsversorgung auf der untersten Bank bestückt (*Bank 0*), diese versorgt über die vertikale Verbindung die restlichen Bänke. Abbildung 4.19 zeigt den dazu vorgesehenen Schaltungsteil.

Am Eingang erwartet die Spannungsversorgung +5 V \pm 10 %, beispielsweise aus einem Steckernetzteil. Die Spannungsversorgung sieht **keinen Spannungsregler** und **keinen Überspannungsschutz** vor, die Eingangsspannung muss daher im richtigen Bereich liegen! Als Anschluss für das

ebenfalls kontrolliert werden. Aus den erfassten Werten müssen die benötigten Informationen extrahiert oder berechnet werden. Diese Informationen müssen dann verständlich dargestellt und protokolliert werden.

Stabilität: durch die sehr lange Laufzeit von solchen Batterie-Entladetests muss die Software für den dauerhaften Betrieb ausgelegt sein. Es darf bei unterschiedlichen Bedingungen zu keinen Fehlern kommen, die zum Ausfall der Software und damit zum Verlust von Messergebnissen führen. Dazu muss eine entsprechende Fehlerbehandlung eingebaut werden, die nicht-kritische Fehler dementsprechend erkennt und umgeht, behandelt, oder ignoriert, und bei kritischen Fehlern dafür sorgt, dass das Messsystem in einen definierten Zustand übergeht und wenn irgendwie möglich nur den betreffenden Kanal deaktiviert. Dazu gehört auch die Umgebungsunabhängigkeit, beim Ausfall von Infrastruktur (Stromnetz, Netzwerk, etc.) darf es ebenfalls zu keinem Ausfall des Messsystems kommen.

Benutzerfreundlichkeit: die Messsysteme sollen komfortabel und einfach zu bedienen sein. Die Konfiguration der Messsysteme und der einzelnen Kanäle muss einfach möglich sein - Werte wie Lastströme sollen einfach eingetragen werden können, Funktionen per Klick aktiviert werden können. Zu jedem Messdurchlauf müssen alle dazugehörigen Informationen über das Mess-Setup und das *Device under Test* (DUT), also die Batterie, eingetragen werden können. Diese Informationen müssen auch jederzeit abrufbar sein, genauso wie die Informationen zu den aktuellen Ergebnissen. Konfiguration und Start/Stop der Kanäle muss einfach erfolgen. Die Kanäle sollen unabhängig voneinander oder in Gruppen verwaltet werden können.

Information: während dem Durchlauf von Tests sollen die aktuellen Informationen und Zustände in der Software angezeigt werden. Dazu zählen die bisher verfügbaren Messergebnisse, sowie sämtliche Informationen zum Kanalsetup und zum DUT. Mögliche Fehlerzustände müssen auch angezeigt werden. Außerdem soll der Zustand des gesamten Messsystems auf einen Blick ersichtlich sein.

Nachverfolgbarkeit: sämtliche Ergebnisse und Messdaten müssen nachvollziehbar protokolliert werden. Dazu müssen Protokolldaten so aufgebaut werden, dass diese sämtliche Informationen enthalten, die für den Messdurchlauf und für die Ergebnisse von Bedeutung sind. Dazu gehören neben den Messdaten und Ergebnissen selbst auch die Konfiguration der Messsysteme und des betreffenden Kanals, inklusive aller Einstellungen, dem verwendeten Stromprofil, sowie sämtliche Informationen die über das DUT eingetragen wurden. Diese Daten sollen von Menschen oder zur weiteren Verarbeitung von Maschinen gelesen werden können. Eine grafische Darstellung der aufgenommenen Kurven soll ebenfalls generiert werden können.

Reproduzierbarkeit: die Software muss mit einem strengen Kontrollschema ablaufen, welches möglichst deterministische und damit gleichbleibende Abläufe für die Ansteuerung und Auswertung der Messhardware garantiert. Es darf zu keinen zufälligen Abweichungen zwischen Messdurchläufen kommen. Würden theoretisch Messungen mit den gleichen DUTs unter den gleichen Bedingungen mehrmals durchgeführt werden, müssen auch immer die gleichen Ergebnisse dabei herauskommen.

Wartbarkeit: die Software soll wartbar bleiben, und einfach ausgebaut werden können. Dazu sollten die grundlegenden Regeln zur Softwareentwicklung und zur Entwicklung in LabView beachtet werden. Dazu zählt auch eine einheitliche oder ähnliche Plattform, auf der die Konstant- und Pulsentladessysteme aufgebaut werden.

Die Software für die Entladesysteme wurde in *LabView* entwickelt. Gründe für die Verwendung sind der große Umfang an bereits inkludierten Funktionalitäten, die nicht selbst entwickelt und getestet werden müssen, und zur Datenerfassung, Verarbeitung, Visualisierung und Protokollierung verwendet werden können, um die Komplexität und den Aufwand so gering wie möglich zu halten. Das verwendete Datenerfassungsgerät von National Instruments wird von LabView nativ

unterstützt. LabView ist außerdem auf der Erfassen und Verarbeiten großer Datenmengen und für einen durchgehenden Betrieb ausgelegt. Auch die vorhandene Erfahrung zur Entwicklung von Hardware-Software-Systemen in LabView war ausschlaggebend.

4.2.2 Funktionalität

In diesem Abschnitt ist die grundlegende Struktur der Software und der korrekte Ablauf erklärt, die benötigt werden um die geforderte Funktionalität zu erfüllen.

Grundsätzlich ist die Software mit einem *Producer-Consumer* Design Pattern aufgebaut, um die Ansteuerung und Erfassung der Messhardware möglichst gut vom Rest der Software zu entkoppeln und so für einen möglichst guten Determinismus (im Rahmen des Möglichen) zu sorgen. Abbildung 4.20 zeigt dabei die vereinfachte Struktur der Steuersoftware, die in dieser Form sowohl für die Konstant-, als auch für die Pulsentladesysteme gilt. Jeder Block stellt ein Unterprogramm dar (“VI”, *Virtual Instrument*, vergleichlich Funktionen in traditionellen Programmiersprachen). Die gelb-grüne Error-Leitung zeigt den Datenfluss, der die Abarbeitungsreihenfolge vorgibt - parallel angeschlossene VIs werden tatsächlich parallel ausgeführt, seriell angeschlossene VIs hintereinander. Für das einfachere Verständnis ist die Struktur stark vereinfacht dargestellt, in Wahrheit sind noch deutlich mehr VIs an der Abarbeitung beteiligt, wobei die Top-Level-VIs hierarchisch abstrahiert aus zahlreichen Sub-VIs zusammengesetzt sind, um die Übersichtlichkeit, Kapselung und geforderte Wartbarkeit zu gewährleisten⁹.

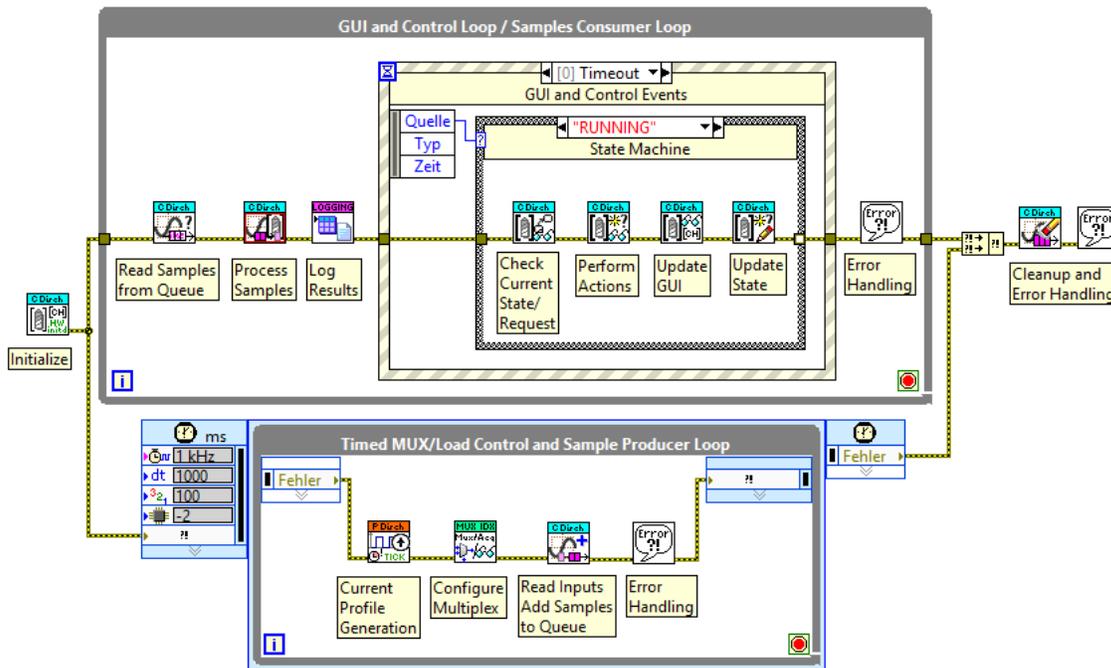


Abbildung 4.20: Vereinfachter Überblick über die Struktur der Steuersoftware für Konstant- und Pulsentladesysteme

Dabei ist der Ablauf in zwei Schleifen aufgeteilt:

⁹die Steuersoftware für das Pulsentladesystem setzt sich beispielsweise aus über 220 VIs zusammen

Producer-Schleife ist eine zeitgesteuerte Schleife, in der alle zeitlich kritischen Prozesse untergebracht sind. Dazu gehört die Ansteuerung der Schieberegister und Multiplexer, die Erzeugung der Stromprofile, und die Erfassung der Messdaten. Erfasste Messdaten werden mit der Kanalnummer und einem Zeitstempel versehen einfach unverarbeitet in eine Queue, eine Form eines FIFO-Puffers¹⁰, eingereiht. Die Verarbeitung der Messdaten geht dadurch sehr zügig und es entsteht keine Verzögerung in der zeitkritischen Schleife. Aufgrund dieser Erzeugung von Daten wird diese Schleife *Producer* genannt. Die Kontrollinformationen für das Stromprofil und für die Ansteuerung des Multiplex werden ebenfalls über eine Queue empfangen und in dieser Schleife lediglich abgearbeitet, die Abarbeitungszeit hält sich hier auch in Grenzen. In Summe muss die gesamte Abarbeitungszeit unter der Periode der Schleifenausführung liegen, dazu wurde noch ausreichend zeitlicher Puffer eingeplant. In seltenen Fällen (Windows-Hintergrundprozesse, etc.) kann es jedoch dazu kommen, dass es zu Verzögerungen kommt und die Schleife dadurch in der verfügbaren Zeit nicht abgearbeitet werden kann - man spricht dann von *missed deadlines*. In diesem Fall wird die Schleife fertig abgearbeitet, und der nächste Schleifendurchlauf unmittelbar danach gestartet - ein Durchlauf ist daher verzögert. Der darauf folgende Schleifendurchlauf sollte wieder zum geplanten Zeitpunkt durchgeführt werden (darum kümmert sich der Scheduler von LabView). Kommt es so zu einer *missed deadline*, wird ein Zähler erhöht der in der Software angezeigt wird. Üblicherweise ist dieser Zählerstand 0 oder nahe Null, die Software wurde also mit genug zeitlichem Puffer in der Producer-Schleife entworfen.

Consumer-Schleife ist eine zeitlich unkritische Schleife, die sämtliche anderen Aufgaben erfüllt. Hier werden die Messdaten aus der Queue ausgelesen (daher der Name *Consumer*), richtig skaliert und kalibriert, und danach weiterverarbeitet. Dabei ist die Abarbeitungsgeschwindigkeit weniger kritisch, solange die Daten im Schnitt schneller abgearbeitet werden können als sie erzeugt werden, also solange die Queue nicht überläuft. Dazu wurde einerseits ein ausreichend großer Puffer für die Queue angelegt, andererseits wird darauf geachtet dass die Abarbeitungsgeschwindigkeit in der Consumer-Schleife im Rahmen bleibt. Aus den Daten werden die Messergebnisse berechnet, grafisch dargestellt, und protokolliert. Kommt es dabei zu einer Verzögerung, beispielsweise bei der Erzeugung eines grafischen Entladeverlaufs, wird die Consumer-Schleife nicht beeinflusst, da diese parallel zur Producer-Schleife abläuft¹¹. Dazu muss nur der Puffer der Queue groß genug gewählt werden, um auch im schlimmsten Fall sämtliche erzeugten Messdaten während der Verzögerung aufnehmen zu können. In der Consumer-Schleife wird auch die Grafische Benutzeroberfläche (GUI) gesteuert und die Eingaben des Benutzers verarbeitet. Daraus werden die einzustellenden Zustände für die Hardware bestimmt, und die vorverarbeiteten Informationen über eine weitere Queue an die Producer-Schleife zur entsprechenden Steuerung der Hardware übergeben.

Vor der Ausführung der Schleifen wird die Hardware und die Software initialisiert, beim Beenden der Entladesysteme werden alle Subsysteme in der richtigen Reihenfolge und korrekt heruntergefahren, aufgeräumt, und in einen definierten Zustand gebracht. Um ein unabsichtliches Abschalten des Systems zu vermeiden sind noch einige Sicherheitsabfragen eingebaut.

Während dem kompletten Ablauf werden ständig Fehlerabfragen eingebaut, diese reagieren auf unerwünschte oder unerwartete Zustände. Je nach Schwere des Fehlers wird dieser entweder behandelt oder gemeldet und ignoriert, bei schwereren Fehlern wird der aktuelle Messvorgang abgebrochen und damit ein Messwert verworfen. Bei kritischen Fehlern wird entweder der betreffende Batteriekanal deaktiviert oder das gesamte Messsystem heruntergefahren, was zum Scheitern des Messdurchlaufs führt und damit unbedingt vermieden werden sollte.

¹⁰*first in first out*, in diesen Puffer werden der Reihe nach Werte geschrieben und können an einer anderen Stelle wieder in der gleichen Reihenfolge entnommen werden

¹¹der Windows-Scheduler führt die Producer-Schleife mit einer höheren Priorität aus, diese kann die Consumer-Schleife und weitere Prozesse unterbrechen

4.2.3 Konfiguration

Über die Software kann die komplette Konfiguration der Batterieentladesysteme durchgeführt werden. Dazu zählt die initiale Konfiguration wie die Anschlussbelegung des NI USB-6211¹², die Anzahl an Bänken und damit Messkanälen¹³, die Einstellung von Sampleraten, Wartezeiten für die Abtastung, Wertebereichen, und Bestückungsvarianten (wie beispielsweise die Lastwiderstände für die Konstantentladung, oder die Shuntwiderstände der Stromsenken). Zusätzlich kann eine Kalibrierung durchgeführt werden, indem die exakten Bauteilwerte oder die Übertragungsfunktionen der Messhardware eingetragen werden.

Neben der initialen Konfiguration, die vor dem Start des Messsystems durchgeführt werden muss, können auch die Laufzeiteinstellungen komfortabel über die Software gesteuert werden. Dazu zählen die Stromprofile, die über einen eingebauten Stromprofil-Editor verändert werden können, sowie die Konfiguration jedes einzelnen Kanals. Dabei werden neben den Informationen über die Batterie (das DUT) auch kanalspezifische Informationen wie die Entladeendspannung, die Abbruchbedingungen, etc. eingestellt. Screenshots, die die Einstellmöglichkeiten zeigen und erklären, sind im Abschnitt 5.1.2 zu finden.

Die kanalspezifischen Einstellungen können entweder für einen Kanal eingetragen werden (wenn beispielsweise für einen Kanal eine spezielle Konfiguration gewünscht ist, oder für jeden Kanal eine andere Konfiguration), oder in beliebigen Gruppen für mehrere Kanäle auf einmal (wenn beispielsweise eine gesamte Bank mit der gleichen Batterie unter den gleichen Bedingungen betrieben werden soll, was durch die notwendige Anzahl an Samples üblicherweise der Fall ist). Gleichermaßen können Kanäle einzeln gestartet, gestoppt und zurückgesetzt werden, oder in beliebigen Gruppen. Weiters wurde eine *Auto Start*-Funktion implementiert, mit der ein Kanal automatisch erkennt ab wann eine Batterie angesteckt wird, und dann die zuvor konfigurierte Messung automatisch startet.

Informationen über die Batterie Zu den Informationen über die Batterie, die für jeden Kanal abgelegt werden können, zählen:

- Batterietyp (z.B. *CR2450*)
- Batteriekonfiguration (z.B. *1S2P* für ein Battery pack mit 2 parallelen Zellen)
- Batteriehersteller (z.B. *Varta*)
- Produktionsdatum/Charge/Date Code (z.B. *04/2018*)
- Nominalkapazität (z.B. 550 mAh, optional zur Fortschrittsanzeige)
- Weitere Bemerkungen, wie Temperaturbereich, Vorbehandlung, etc.

Diese Eigenschaften können entweder manuell eingegeben werden oder bereits vordefinierte Templates für die meistverwendeten Batterietypen verwendet werden. Wieder ist eine Konfiguration entweder pro Kanal oder für beliebige Kanalgruppen möglich.

4.2.4 Erfassung und Darstellung der Informationen und Ergebnisse

Durch die historische Entwicklung der Batteriemessverfahren wurden bereits einige Erfahrungen gesammelt, die in die Entwicklung der Steuersoftware einfließen, vor allem um sie möglichst übersichtlich, benutzerfreundlich und einfach bedienbar zu gestalten. Dazu zählt auch die übersichtliche Darstellung des momentanen Zustandes und der bereits erfassten Daten.

¹²falls die Hardware einmal verändert wird

¹³weniger Bänke oder Kanäle bedeutet höhere mögliche Abtastraten

Dazu zeigt die Software im Betrieb “live” eine Übersicht über alle Kanäle an, in der nach Bank und Kanal angeordnet die wichtigsten Informationen pro Kanal angezeigt werden. Dazu zählt der Status (frei/aktiv/abgeschlossen/Fehler), sowie eine Fortschrittsanzeige die die bereits entnommene Kapazität im Vergleich zur Nominalkapazität/Zielkapazität anzeigt.

Von dieser Übersicht kann man auf eine Detailansicht wechseln, die sämtliche Informationen über einen Kanal anzeigt. Dazu zählt eine ausführliche Übersicht über den Status und aktuellen Zustand, sämtliche kanalspezifischen Informationen wie die Batterieangaben entsprechend Abschnitt 4.2.3, Stromprofile, aktuelle Spannung und Ladung, aktueller Strom, Entladeendspannung sowie Abbruchbedingungen. Dazu gehört auch ein grafisch dargestellter Verlauf der Entladekurven und eine Fortschrittsanzeige, die die entnommene Kapazität gegenüber der Nominalkapazität (bzw. Zielkapazität) anzeigt. Beim Pulsentladesystem wird neben dem zeitlichen Verlauf von Batteriespannung und Laststrom (ebenfalls “live”) auch der bisherige Verlauf von Leerlaufspannung, Lastspannung und Innenwiderstand über die entnommene Kapazität angezeigt.

Screenshots im Betrieb und weitere Informationen sind im Kapitel 5 im Abschnitt 5.1.2 zu finden.

4.2.5 Protokollierung der Ergebnisse

Neben der Live-Anzeige der Informationen und Ergebnisse müssen diese auch protokolliert werden, um die Daten später nachvollziehbar weiterverwenden zu können. Dazu ist es unumgänglich, nicht nur die Messdaten selbst abzulegen, sondern auch Informationen zum Mess-Setup, zur Konfiguration und zum DUT selbst (entsprechend Abschnitt 4.2.3). Bei früheren Messsystemen wurden diese Daten meist nicht als integraler Teil der Messprotokolle sauber abgelegt, und konnten dann unter Umständen nicht mehr richtig zugeordnet werden.

Aus diesem Grund wurde für die Prokole ein Header definiert, der sämtliche Messbedingungen und Kanalinformationen enthält. Diese sind in einer strukturierten Form im Header untergebracht, um diese später auch von Maschinen lesbar zu machen. Aus dieser Forderung entstand auch die Protokollierung in der Form von Textdateien als CSV-Datei, da diese sowohl vom Menschen als auch von Maschinen gelesen werden können, und für den Import in sämtliche gängigen Softwarepakete geeignet sind, wie Matlab, Excel, R, etc. Im Header werden ebenfalls die Spalten der CSV-Datei definiert.

Die Messdaten selbst werden im Fließkomma-Format Zeile für Zeile in die Protokolldatei geschrieben. Die zusammengehörigen Werte pro Sample, wie Spannung, Strom, entnommene Kapazität, werden als Spalten in die CSV-Datei geschrieben. Dadurch kann die Protokolldatei beliebig lang werden, so lange der verfügbare Speicher ausreicht. Je nach Messverfahren (Konstantentladung oder Pulsentladung) unterscheidet sich die Anzahl und der Inhalt der Spalten.

Eine solche CSV-Datei wird für jeden Messkanal angelegt und mit einem informativen Namen versehen, um diese auch schnell auffindbar zu machen, ohne den Header in der Datei lesen zu müssen. Bei der Protokollierung der Messdaten im Pulsentladesystem werden sogar 2 CSV-Dateien pro Kanal angelegt, die einerseits die zeitliche Darstellung des Batterieverhaltens unter Pulsbelastung, und andererseits den Verlauf von Leerlaufspannung, Lastspannung und Innenwiderstand über die entnommene Kapazität anzeigen.

Die CSV-Dateien werden laufend auf die Festplatte geschrieben, um im Falle eines Systemausfalles zumindest die bis zu dem Zeitpunkt aufgenommenen Daten nicht zu verlieren.

Zusätzlich zu diesen CSV-Dateien wird für jeden abgeschlossenen Kanal eine grafische Darstellung der Entladekurve generiert, um das Verhalten beim Durchsehen der Protokolldateien auf einen Blick beurteilen zu können.

Beispiele für die Protokolldateien sind im Kapitel 5 im Abschnitt 5.1.2 zu finden.

Kapitel 5

Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dieser Arbeit präsentiert. Dazu gehören die entstandenen Messsysteme für Konstantentladung und Pulsentladung, die dazugehörige Steuersoftware sowie die damit gewonnenen Messdaten und Messergebnisse. Dazu ist dieses Kapitel in Abschnitte unterteilt, welche die konstruierte Messhardware kurz zeigen, einen Überblick über die Steuersoftware geben, und im größten Abschnitt die Messergebnisse darstellen. Die aus den Messergebnissen gewonnenen Erkenntnisse werden im Kapitel 6 diskutiert.

Durch die historische stufenweise Entwicklung dieser Messsysteme werden in den Abschnitten mit den Messergebnissen auch Messdaten von den Vorgängerversionen der Entladestationen gezeigt, da die Messverfahren die gleichen waren und diese Messdaten auch zum Verständnis des Verhaltens der Batterien beitragen.

5.1 Messsysteme

Im ersten Abschnitt sollen kurz die entstandenen Messsysteme gezeigt werden, da diese auch als *Ergebnis* dieser Arbeit gelten. Dazu wird kurz die tatsächliche Messhardware als bestückte PCB präsentiert, sowie die entstandene Steuersoftware.

5.1.1 Messhardware

Für sowohl das Konstantentladesystem als auch das Pulsentladesystem sollte die gleiche Messhardware verwendet werden, die mittels Bestückungsvarianten für den entsprechenden Zweck konfiguriert werden kann. Dadurch muss einerseits nur eine PCB entwickelt und gewartet werden, die entsprechend viele Funktionen bietet. Andererseits können Kosten gespart werden, wenn nur eine PCB gefertigt werden muss, und dann durch unterschiedliche Bestückungsvarianten an den Einsatzzweck angepasst werden kann. Zusätzlich kommt es so zu einer einheitlichen Plattform für die Messsysteme, was zu einheitlichen Gehäusen, Infrastruktur, etc. führt. Die Bestückungsvarianten wurden so gewählt, dass möglichst viele PCBs mit einer einheitlichen Bestückung bestellt werden können, um Komplexität und Kosten beim Bestücker zu sparen. So können beispielsweise bei der Konstantentladestation die PCBs für die einzelnen Bänke gleich bestückt werden, die Konfiguration jeder einzelnen Bank kann mit einigen wenigen 0Ω -Jumpfern manuell durchgeführt werden.

Bei der Entwicklung der Messhardware wurde auf die üblichen Regeln zum Schaltungsdesign und Layout geachtet. Durch die Verwendung als präzises Messsystem wurde insbesondere auf ein EMV-

gerechtes Layout geachtet, um Störeinflüsse von außen zu minimieren und dadurch Messfehler gering zu halten. So wurden empfindliche Signalleitungen so kurz wie möglich gehalten und von anderen, störenden Signalleitungen isoliert, zusammengehörige Schaltungsteile im Layout als zusammenliegender Block aufgebaut, empfindliche Bereiche mit ausreichend Masseflächen als Abschirmung verwendet, Stromrücklaufpfade berücksichtigt, etc.

Außerdem wurde auf ein sinnvolles Systemdesign geachtet, um die Messstationen auch sinnvoll aufbauen zu können und für die mechanische Stabilität zu sorgen. Ein ergonomisches Arbeiten mit den Messstationen sollte ebenfalls möglich sein, um beispielsweise das Anschließen der Batterien an das Messsystem mit voll ausgebauten Bänken nicht zur Qual zu machen.

Dazu wurde das Layout so angeordnet, dass die unterste PCB (*Bank 0*) direkt an das NI USB-6211 angeschlossen wird. Dazu werden die Schraubverbindungen des NI USB-6211 und gewinkelte Stiftleisten auf der untersten PCB im richtigen Rastermaß verwendet. Die weiteren Bänke werden über vertikale Buchsen- und Stiftleisten variabler Höhe miteinander verbunden. Mit Schraubverbindungen können diese Bänke mechanisch stabil miteinander verbunden werden. Die Batterieanschlüsse sind in Form von 2-poligen WTB-Steckverbindern aus der SM-Serie von JST¹ direkt an der Vorderseite der PCB in konstantem Abstand nebeneinander angeordnet. Die LED-Indikatoren befinden sich unmittelbar neben den Batterieanschlüssen. Die restlichen Schaltungselemente sind sinnvoll in Gruppen zusammengefasst auf der PCB platziert.

Um die Abmessungen der PCB gering zu halten und ein EMV-gerechtes Schaltungsdesign zu ermöglichen, wurde eine 4-Layer Leiterplatte entworfen. Da die überarbeitete Version der Messhardware im Vergleich zur ersten Version einige zusätzliche Funktionen erhielt (Lastschalter, Stromsenken-Strommessung, etc.), jedoch die gleichen Abmessungen haben sollte, musste auf doppelseitige Bestückung ausgewichen werden.

Abbildung 5.1 zeigt ein 3D-Modell der bestückten Leiterplatte, diese 3D-Modelle werden während der Entwicklung verwendet um eine Vorstellung und einen Überblick über das entstehende System zu bekommen. Dabei sind alle möglichen Bestückungsvarianten eingezeichnet.

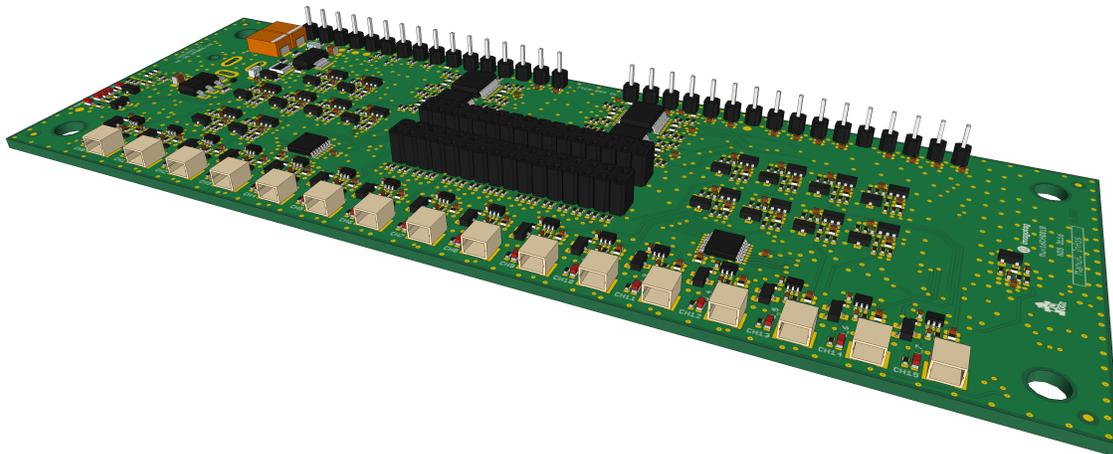


Abbildung 5.1: 3D-Modell der voll bestückten PCB für Konstant- und Pulsentladesysteme

Abbildungen 5.2 bis 5.5 zeigen das Layout der PCB, die Lagen sind dabei von links nach rechts in der PCB untergebracht. Die oberste Lage (*Top*), zweite Lage (*GND*) und unterste Lage (*Bottom*) sind mit gefluteten Masseflächen versehen, wobei die zweite Lage als reine Massefläche verwendet wird, um ein gutes Verhalten im Hinblick auf EMV-Eigenschaften zu erreichen. Die dritte Lage

¹wie von SES-imagotag für Batteriesteckverbindungen auf den ESLs der Generation 1 verwendet

(*VCC*) ist als Versorgungslayer ausgeführt, hier kann die +5 V-Versorgungsspannung (*VCC*) überall abgegriffen werden. Dadurch wird das Layout vereinfacht und ebenfalls die EMV-Eigenschaften unterstützt. Zusätzlich werden in der dritten Lage zahlreiche Signalleitungen geführt.

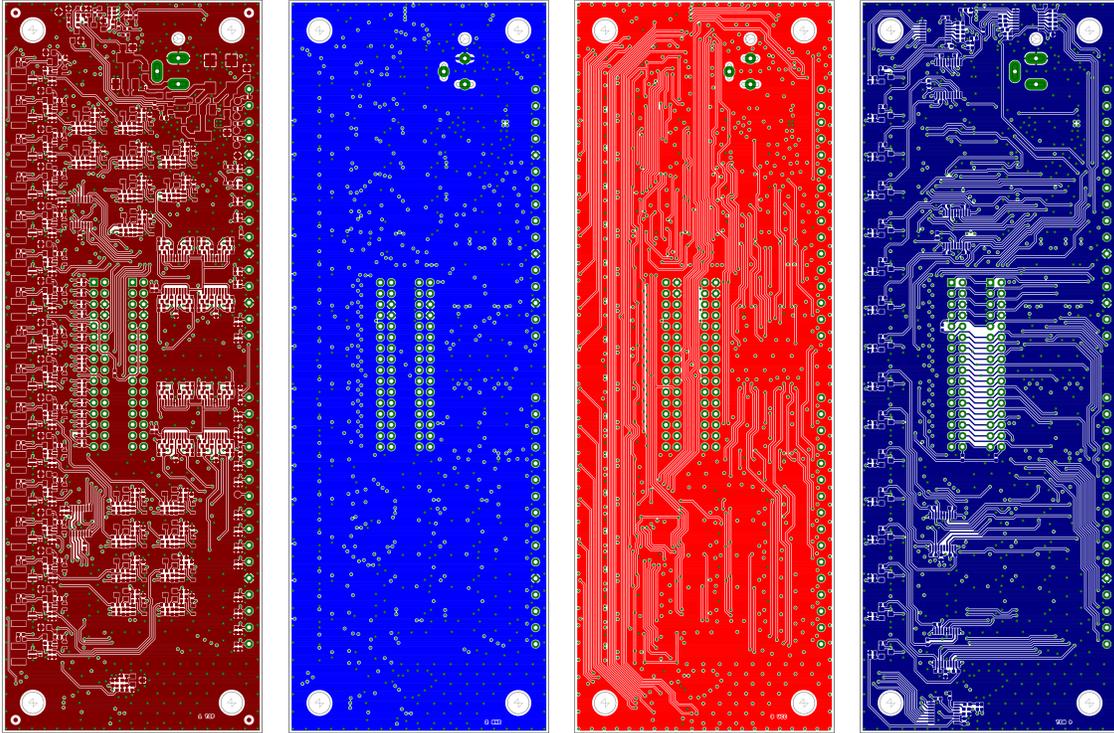


Abbildung 5.2: Oberster Layer *Top* (1) der Messhardware (Gerberdaten)
 Abbildung 5.3: Zweiter Layer *GND* (2) der Messhardware (Gerberdaten)
 Abbildung 5.4: Dritter Layer *VCC* (3) der Messhardware (Gerberdaten)
 Abbildung 5.5: Unterster Layer *Bot* (4) der Messhardware (Gerberdaten)

Die folgende Abbildung 5.6 zeigt eine etwas künstlerische Darstellung aller Layer, die in einer Zeichnung kombiniert und transparent dargestellt sind, hier können die zahlreichen Verbindungen zwischen den Blöcken erahnt werden.

Die weiteren Abbildungen 5.7 und 5.8 zeigen die Positionen der Bauteile für die Bestückung auf der Ober- und Unterseite der PCB. Die Unterseite ist dabei gespiegelt, also mit Blick von unten dargestellt. Man erkennt dabei, dass die Bauteile in logischen Funktionsblöcken angeordnet sind. So werden beispielsweise die Präzisionsstromsenken jeweils als kompakter Block aufgebaut, um Störeinflüsse durch lange Leitungen, Verkopplungen, etc. zu minimieren.

Die Abbildungen 5.9 und 5.10 zeigen die fertiggestellte Konstantentladestation. Aufgrund des noch nicht fertig gestellten Gehäuses werden nur 4 der 8 möglichen Bänke verwendet. Hinter der Konstantentladestation ist das NI USB-6211 sichtbar, daneben steht der Rechner der die Konstantentladestation steuert.

Abbildung 5.11 zeigt die fertiggestellte Pulsentladestation. Die grünen LEDs zeigen aktive Kanäle an. Hinter der Pulsentladestation ist das angeschlossene NI USB-6211 und der Rechner der die Messsysteme steuert sichtbar. Für Tests in den Klimaschränken oder in externen Batteriefixtures (siehe Abbildung 5.12) sind geschirmte Flachbandkabel zur Pulsentladestation verlegt, um schnell zwischen unterschiedlichen Testaufbauten umstecken zu können.

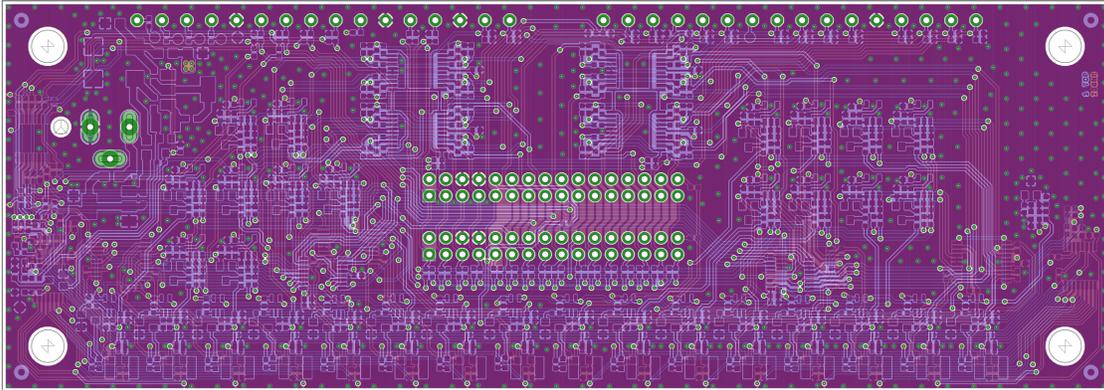


Abbildung 5.6: Darstellung aller kombinierter Layer der Messhardware

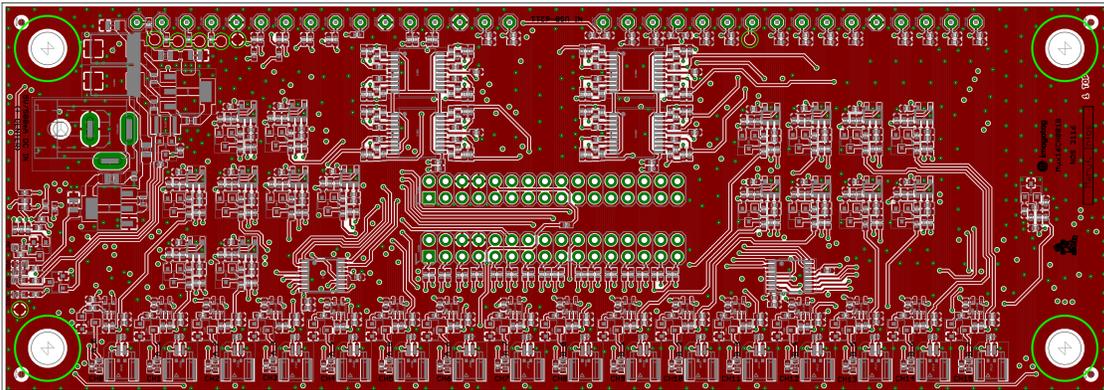


Abbildung 5.7: Darstellung der Bauteile auf der Oberseite

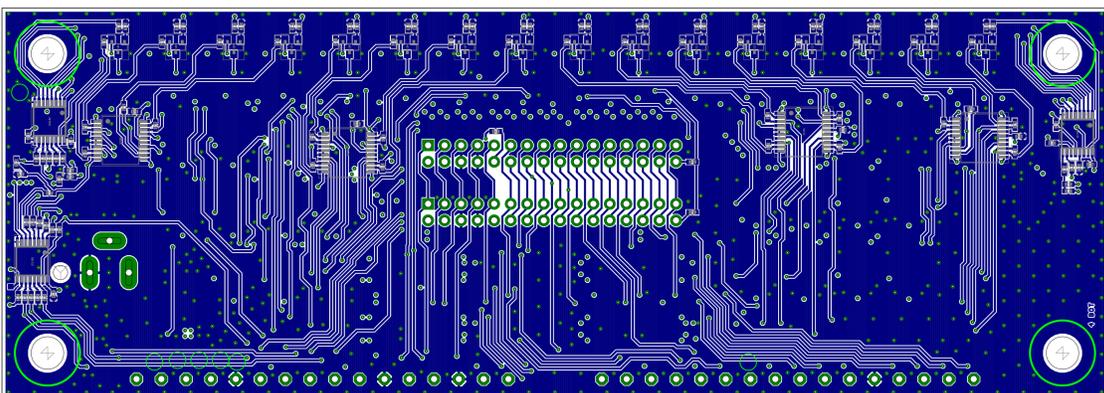


Abbildung 5.8: Darstellung der Bauteile auf der Unterseite (gespiegelt)

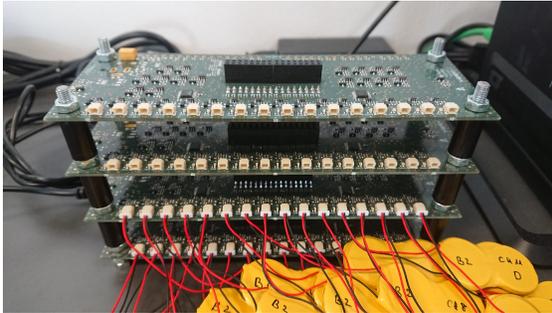


Abbildung 5.9: Konstantentladestation im Betrieb mit CR2450 1S2P Packs (alle Kanäle durchgelaufen)



Abbildung 5.10: Konstantentladestation mit NI USB-6211 und Steuerrechner



Abbildung 5.11: Pulsentladestation im Betrieb mit CR2450-Einzelfixtures



Abbildung 5.12: CR2450-Testadapter für Einzelzellen, an die Pulsentladestation angeschlossen

5.1.2 Steuersoftware

Im folgenden Abschnitt wird die Steuersoftware der Messsysteme im Betrieb anhand von Screenshots präsentiert und erklärt. Dabei bieten wie im Kapitel 4 beschrieben beide Systeme in der Steuersoftware Ansichten für die schnelle Übersicht über alle Kanäle, für Detailinfos und Konfiguration zu jedem Kanal, für die gruppenweise Konfiguration mehrerer Kanäle, sowie für die Konfiguration der Belastung und der Stromprofile. Zusätzlich gibt es einen Bereich für die grundlegende Konfiguration der Messhardware, sowie einen Bereich für Status- und Debuginformationen.

Beide Systeme nutzen die gleiche Basis und sehen daher ähnlich aus. Die jeweiligen Oberflächen wurden an die Bedürfnisse und Anforderungen der entsprechenden Messsysteme angepasst, um eine möglichst komfortable Bedienung zu ermöglichen. Dabei nutzt die Oberfläche mehrere Reiter (Tabs), um die einzelnen Bereiche anzuzeigen. Wählt man beispielsweise einen Batteriekanal im *Overview*-Tab, wird automatisch in den *Channel View*-Tab gewechselt und die Details des gewählten Batteriekanals angezeigt.

Die in LabView programmierte Software kann auf jedem beliebigen Rechner mit dem installierten LabView Runtime Environment betrieben werden und stellt keine besonderen Anforderungen an den Rechner. Für einen möglichst deterministischen Ablauf sollte jedoch keine andere ressourcenhungrige Software auf dem Rechner laufen. Es können auch mehrere Entladestationen am gleichen Rechner betrieben werden, da die Hardware in der Konfigurationsansicht adressiert werden kann. Werden mehrere Entladestationen an einem Rechner betrieben, oder wird die Konstantentladestation voll ausgebaut auf 128 Kanäle, empfiehlt sich bei längeren Laufzeiten (geringe Entladeströme und große Batteriekapazitäten) ein Rechner mit ausreichend RAM um die Messdaten für die Darstellung im Speicher halten zu können².

Konstantentladesystem

Um einen Überblick über die bis zu 128 Batteriekkanäle zu erhalten, gibt es einen *Overview*-Tab. Dieser stellt kurz zusammengefasst den aktuellen Status und Fortschritt aller Kanäle dar. Diese Übersicht ist in Abbildung 5.13 dargestellt.

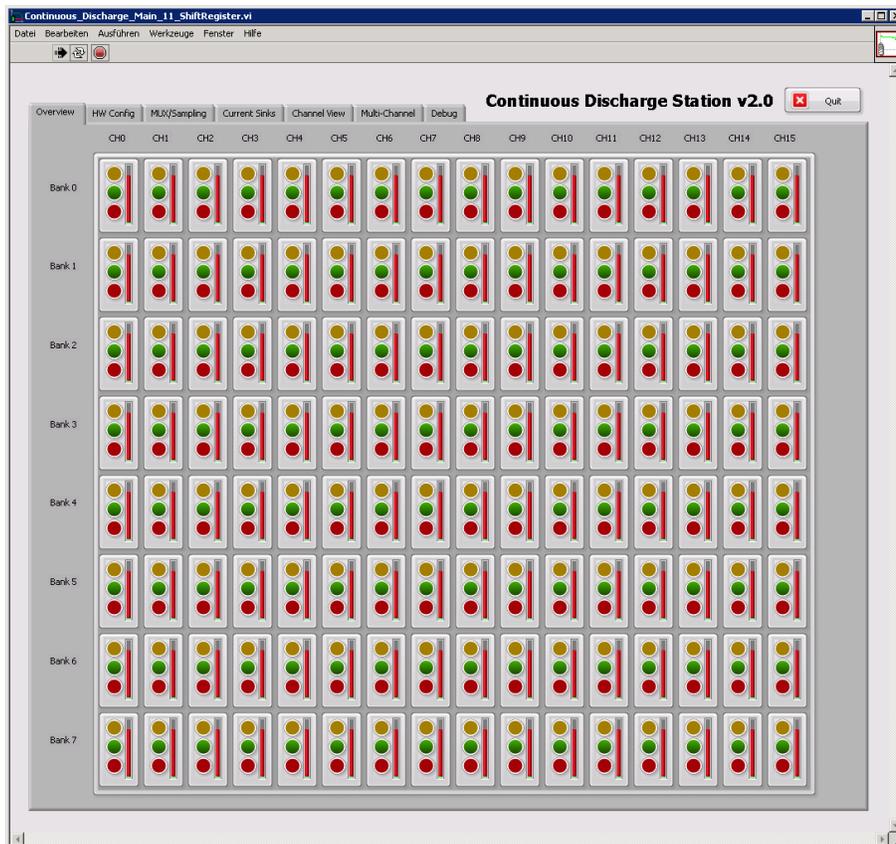


Abbildung 5.13: *Overview*-Tab mit Überblick aller 128 Messkanäle des voll ausgebauten Konstantentladesystems (hier: alle Kanäle unkonfiguriert und angehalten)

Wählt man einen dieser Kanäle aus, wechselt die Software in den *Channel View*-Tab. Dieser ist in Abbildung 5.14 dargestellt und enthält sämtliche Informationen und kanalspezifische Konfigurationen, sowie im laufenden Betrieb eine Live-Darstellung der Messwerte und der bisherigen

²auf einem Rechner der die ersten Versionen der Konstant- und Pulsentladestation ansteuert sind beispielsweise 8 GB RAM verbaut, das ist ausreichend

Entladekurve, sowie eine Fortschrittsanzeige (gemessen an der Nominalkapazität, bzw. Zielkapazität). In diesem *Channel View*-Tab kann ein Kanal auch konfiguriert, gestartet und angehalten werden.

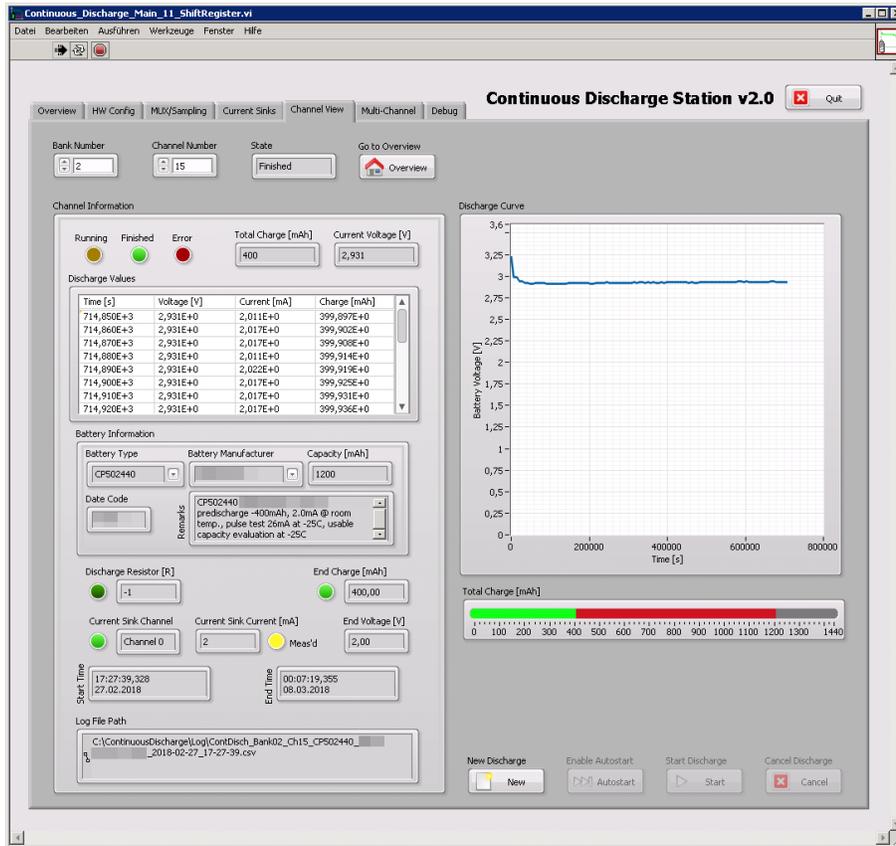


Abbildung 5.14: *Channel View*-Tab mit allen Informationen und aktuellem Zustand eines abgeschlossenen Kanals, bei dem die zu entnehmende Ladung von 400 mAh erreicht wurde

Sollen mehrere Kanäle gleichzeitig konfiguriert, gestartet oder angehalten werden, bietet sich dazu der *Multi Channel*-Tab an. Hier können ebenfalls sämtliche Informationen und kanalspezifische Einstellungen eingetragen werden, und dann auf eine beliebige Auswahl an Kanälen (bankweise) angewendet werden. So kann beispielsweise eine komplette Bank mit der gleichen Batterietype und den gleichen Einstellungen und Stromprofilen konfiguriert und gestartet werden. Diese *Multi Channel*-Ansicht ist in Abbildung 5.15 dargestellt, in der linken Hälfte werden dabei die Kanalinformationen und Einstellungen eingetragen, in der rechten Hälfte werden die betreffenden Kanäle angezeigt und können ausgewählt werden.

Zusätzlich gibt es noch einen Tab *Current Sinks*, in dem die Stromsenken konfiguriert werden können. Da es sich dabei jedoch nur um 2 Eingabefelder für den Entladestrom der beiden möglichen Kanäle handelt, sowie Buttons zum Übernehmen der Ströme (sofern nicht gerade Messungen laufen), wurde dieser Tab nicht gesondert dargestellt.

Weiters bietet die Steuersoftware für das Konstantentladesystem einen *Hardware Configuration*-Tab, in dem die Messhardware konfiguriert werden kann. Das betrifft die Anzahl der Bänke, die Entladewiderstände (falls vorhanden), Shunt-Widerstände der Präzisionsstromsenken, Konfigurati-

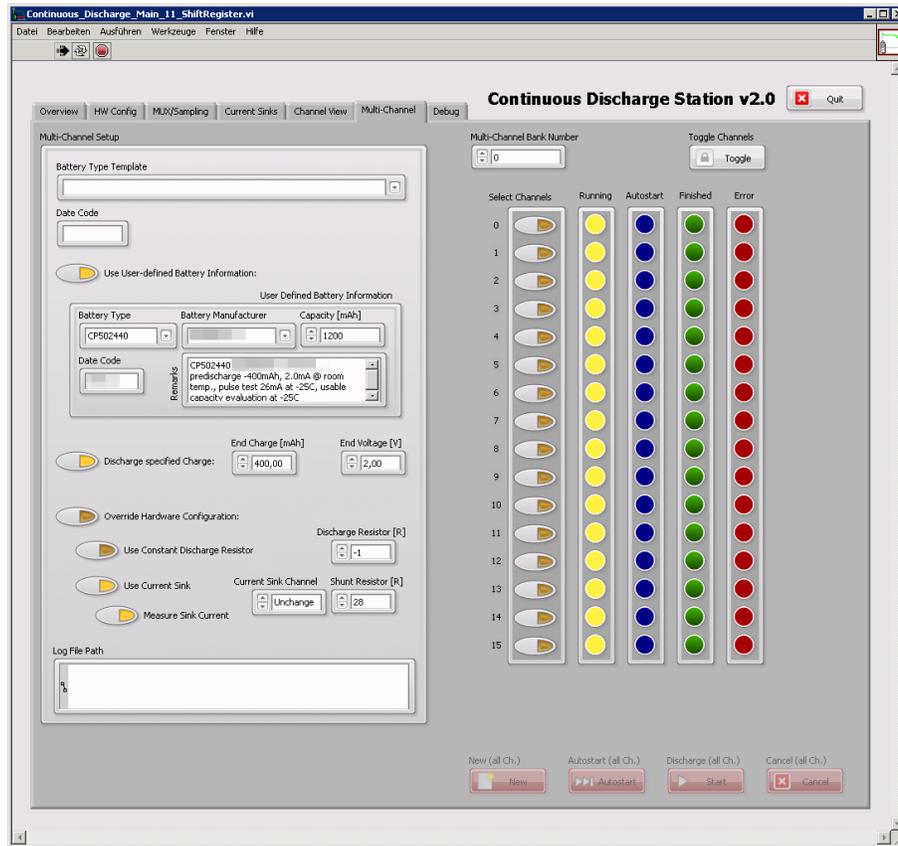


Abbildung 5.15: *Multi Channel*-Tab mit Konfiguration und Kanalauswahl für Bank 0 (hier: alle Kanäle bereits in Betrieb)

on der Analogeingänge und Ausgänge und Zuordnung des richtigen Datenerfassungsgeräts³, sowie die Schieberegister und dazugehörigen Digitalkanäle. Diese Konfiguration ist in Abbildung 5.16 dargestellt.

Zusätzlich gibt es noch einen *MUX/Sampling*-Tab, in dem die Abtastraten und weitere Timing-Werte wie Offsets oder Setup- und Hold-Werte konfiguriert werden können. In einem Tab *Debug* werden aktuelle Laufzeitinformationen angezeigt, wie die Pufferfüllstände, *Missed Deadlines*, aktueller Zustand des Samplingsystems, und weitere interne Informationen.

Die erste Version des Konstantentladesystems bietet noch weniger Konfigurationsmöglichkeiten, hier konnten lediglich Batterien bis zum Erreichen der Entladeendspannung oder bis zum manuellen Abbruch der Messung entladen werden. Abbildung 5.17 zeigt den *Channel View*-Tab dieser alten Version mit geringerem Funktionsumfang.

Pulsentladesystem

Gleich wie beim Konstantentladesystem gibt es beim Pulsentladesystem zentral ebenfalls einen *Overview*-Tab, der den aktuellen Zustand aller 32 Messkanäle zeigt, sowie den Fortschritt dieser in Form der bereits entnommenen Ladung (siehe Abbildung 5.18). Aktive Kanäle werden dabei

³so können mehrere Messsysteme an einem Steuer-Rechner betrieben werden

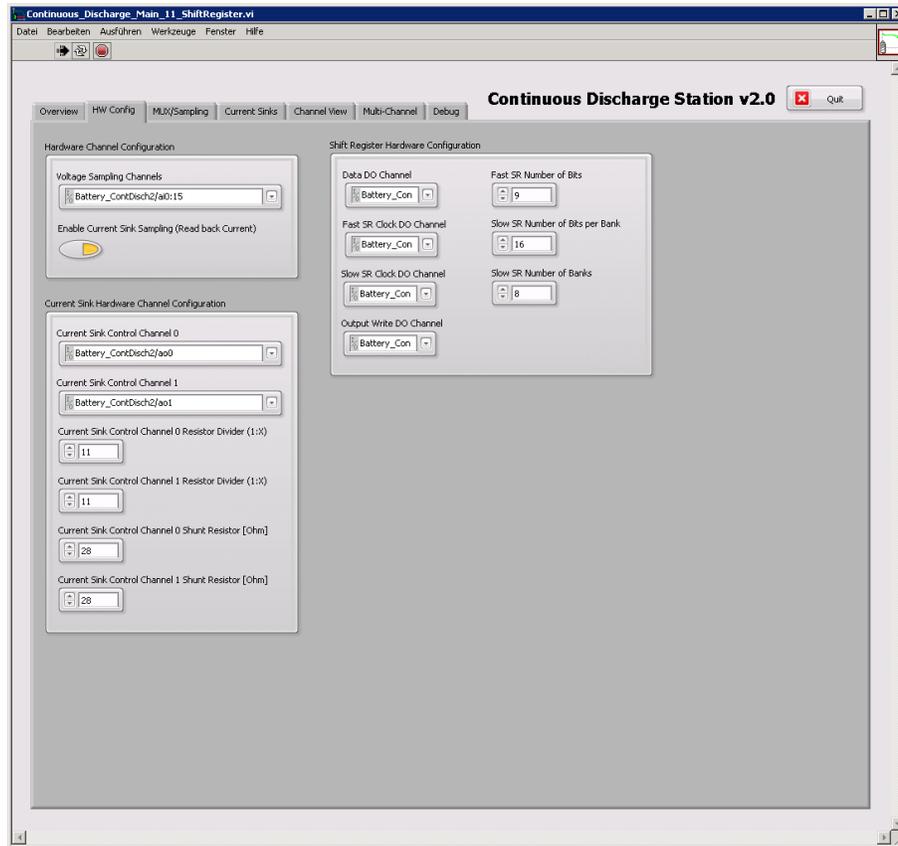


Abbildung 5.16: *Hardware Configuration*-Tab mit grundlegenden Einstellungen für die Messhardware)

mit einem gelben Signal angezeigt, abgeschlossene Kanäle mit einem grünen Signal. Im Fehlerfall wird ein rotes Signal angezeigt. Der grüne Balken gibt den Fortschritt der Entladung an, der rote Balken entspricht dabei der Nominalkapazität der getesteten Batterie.

Wählt man in der Übersicht einen der Kanäle aus, wechselt die Software zu den Detailinformationen des gewählten Kanals im *Channel View*-Tab. Dieser ist in Abbildung 5.19 dargestellt und zeigt auf einen Blick sämtliche Informationen zur Batterie und zur Konfiguration des Kanals. Im linken Bereich sind neben Bank- und Kanalnummer und aktuellem Zustand einige aktuelle Messwerte dargestellt. Zusätzlich sind die historischen Werte in Tabellenform angegeben, wobei eine Tabelle den zeitlichen Verlauf von Laststrom, Batteriespannung und aufintegrierter entnommener Ladung enthält, und die zweite Tabelle die daraus pro Periode des pulsformigen Stromprofils errechneten Werte von Leerlaufspannung, Lastspannung und Innenwiderstand bei steigender und fallender Flanke des Stromprofils, über die entnommene Ladung. Aus diesen beiden Tabellen entstehen die Diagramme im rechten Bereich, wobei das obere Diagramm den zeitlichen Verlauf der aktuellen Periode des Stromprofils, und das untere Diagramm den bereits aufgenommenen Verlauf von Leerlauf- und Lastspannung (grünes Band) sowie den Wert des Innenwiderstands bei steigender und fallender Flanke des Stromprofils (oranges Band) anzeigt. Unter den Diagrammen stellt eine Fortschrittsanzeige die bereits entnommene Kapazität im Vergleich zur Nominalkapazität dar. Dabei berücksichtigt diese Version der Steuersoftware die bereits vor der Pulsentladung durch eine Konstantentladung vorgenommene *Vorentladung* von 400 mAh nicht, die zur Beschleunigung der Messung durchgeführt wurde. Tatsächlich wurden also bereits $400 \text{ mAh} + 252 \text{ mAh} = 652 \text{ mAh}$

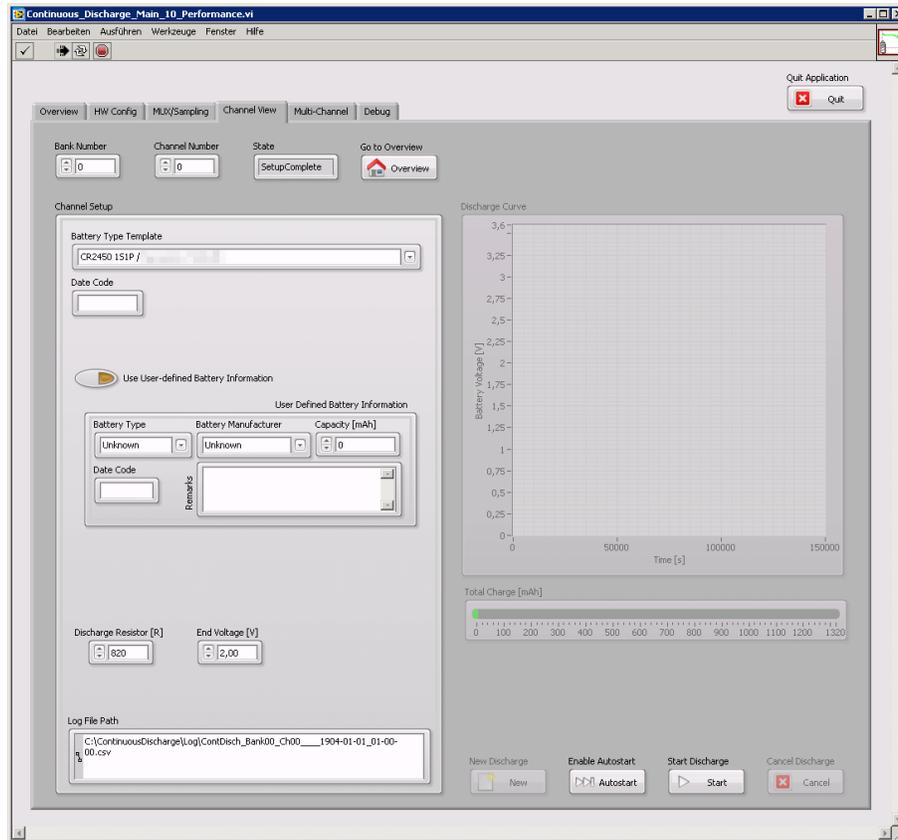


Abbildung 5.17: *Channel View*-Tab des ersten Konstantentladesystems, bei der Kanalkonfiguration gibt es im Vergleich zu Abb. 5.14 deutlich weniger Einstellmöglichkeiten.

entnommen⁴. Nähere Informationen zur getesteten Batterie, inklusive den Testbedingungen und der Vorentladung in der Konstantentladestation, ist im linken unteren Bereich dargestellt.

Auch bei der Pulsentladestation können mehrere Kanäle mit Hilfe des *Multi Channel*-Tab gleichzeitig konfiguriert, gestartet oder angehalten werden, dieser Tab ist in Abbildung 5.20 dargestellt. Gleich wie beim Konstantentladesystem lassen sich im linken Bereich die Informationen und Einstellungen eintragen, im rechten Bereich lassen sich die entsprechenden Kanäle pro Bank auswählen.

Das Pulsentladesystem bietet zusätzlich einen Stromprofil-Editor im Tab *Current Profiles*, dargestellt in Abbildung 5.21. In diesem Tab können für die beiden Bänke unterschiedliche Stromprofile eingestellt werden, dabei gibt es eine Auswahl zwischen unterschiedlichen Stromprofil-Typen. Für diese Messungen ist dabei das gebräuchlichste Profil das einfache t_{on}/t_{off} -Profil, bei dem ein Laststrom definiert werden kann, der in Form eines Pulses für eine gewisse Zeitdauer t_{on} angelegt wird, gefolgt von einer Ruhephase ohne Strom mit einer Zeitdauer von t_{off} .

Zusätzlich werden noch weitere Profile unterstützt, wie ein t_{on}/t_{off} -Profil mit Hintergrundstrom, ein mehrphasiges stufenförmiges Stromprofil, beliebige anwendungsspezifische Stromprofile oder auch Konstantströme zur Konstantentladung. Zusätzlich gibt es bei den puls förmigen Profilen die Möglichkeit, statt einer Einschalt- und Ausschaltzeit die bei älteren Messsystemen verwendete Methode von Duty Cycle und SOC-Step-Size zu verwenden, in der pro Puls ein gewisser Bruchteil der

⁴diese Funktion ist im aktuellen Prototypen bereits untergebracht, dieser befindet sich jedoch noch nicht im Produktiveinsatz

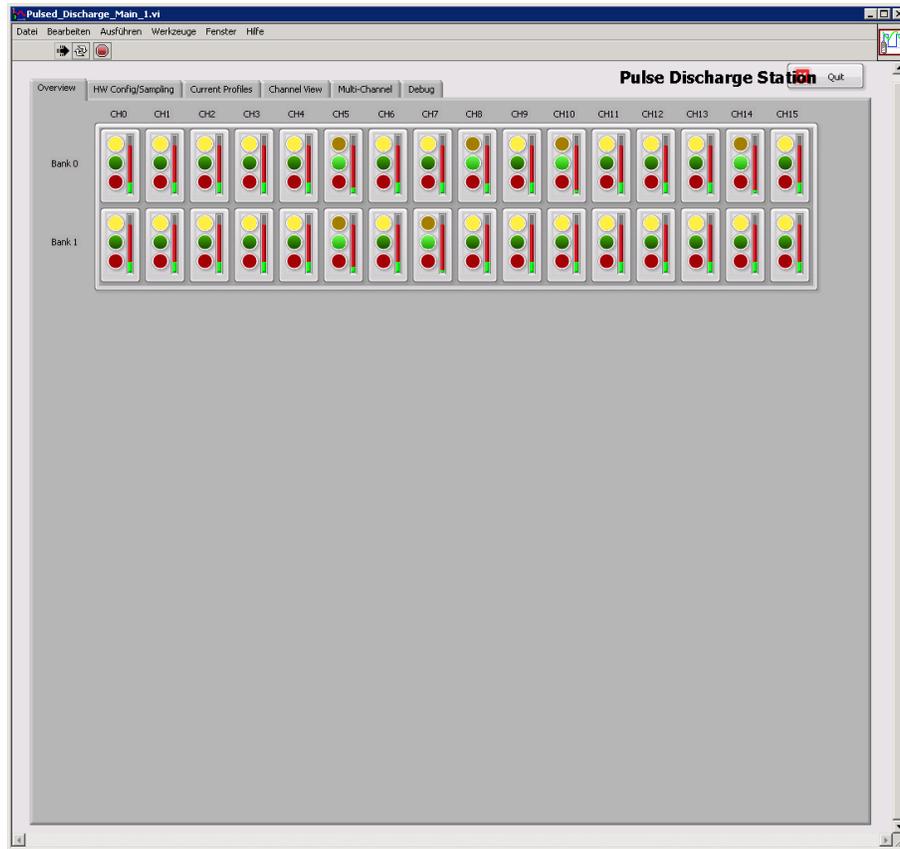


Abbildung 5.18: *Overview*-Tab mit Überblick aller 32 Messkanäle des Pulsentladesystems (hier: Kanäle in Betrieb, einige bereits abgeschlossen)

Nominalkapazität entladen wurde (*SOC Step Size*), und zur Bestimmung der Ruhezeit nach dem Puls ein *Duty Cycle* angegeben wurde. So konnten batterieabhängige parametrisierte Stromprofile ohne Rechenaufwand eingegeben werden. Inzwischen werden aber üblicherweise nur mehr einfache t_{on}/t_{off} -Profile verwendet.

Rechts wird eine Vorschau des gewählten Stromprofils angezeigt. Ist der Kanal editierbar, also momentan nicht aktiv, kann das Stromprofil übernommen werden. Im unteren Bereich des Stromprofil-Editors werden noch weitere Eigenschaften angezeigt, wie beispielsweise die abgeschätzte Gesamtdauer des Testdurchlaufs mit diesem Stromprofil.

Während die Entwicklung des Konstantentladesystems als abgeschlossen betrachtet werden kann, wird das Pulsentladesystem weiter ausgebaut und mit Funktionen versehen, wenn Zeit zur Entwicklung übrig ist. Dazu sind Funktionen in Arbeit, wie beispielsweise eine Erkennung und tabellarische Auswertung, ab welcher entnommenen Kapazität eine oder mehrere definierte Spannungsschwellen unterschritten wurden. Dazu ist jedoch eine intelligente Filterung der Messdaten notwendig, da sonst Ausreißer zu Falschergebnissen führen können. Ist diese Erkennung implementiert, kann daraus eine automatisierte statistische Auswertung erfolgen, die statistische Grenzen für die erwartete nutzbare Kapazität liefert.

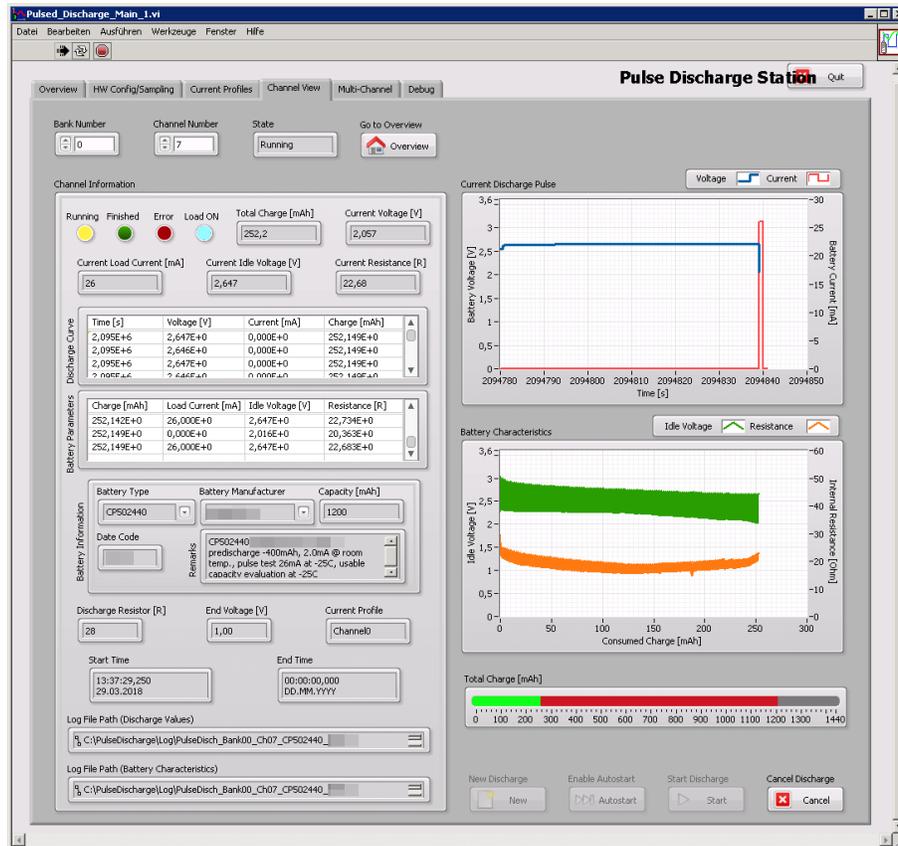


Abbildung 5.19: *Channel View*-Tab mit allen Informationen und aktuellem Zustand eines aktiven Kanals für eine Lithium-Mangandioxid-Pouchzelle bei -25°C , die die Spannungsschwelle von 2.2 V bei etwa $400\text{mAh} + 150\text{mAh} = 550\text{mAh}$ erreicht hat

5.2 Messergebnisse Konstantentladesystem

In diesem Abschnitt werden einige der Messergebnisse präsentiert, die mit dem Konstantentladesystem bestimmt wurden. Aufgrund des Umfangs der verfügbaren Messergebnisse werden zur Übersicht einige typische Verläufe dargestellt, sowie interessante Ergebnisse, die die Abhängigkeiten von bestimmten Test- oder Umgebungsbedingungen zeigen, sowie unerwartete Ergebnisse. Im Vergleich zu den Ergebnissen des Pulsentladesystems sind die Ergebnisse des Konstantentladesystems wenig überraschend, da die Kurven großteils mit den Angaben in den Datenblättern übereinstimmen.

Aus diesem Grund wurden die Konstantentladungen hauptsächlich anfangs zur Qualitätsbestimmung durchgeführt, später wurde die Konstantentladestation großteils zur Vorbehandlung für die Pulsentladung sowie zur Bestimmung der Restkapazität von Batterien und zur Messung der Selbstentladung verwendet. Diese Beispiele sind in diesem Abschnitt angeführt.

5.2.1 Format der Messergebnisse

Zum Einstieg soll das Format der abgelegten Messdaten in CSV-Dateien gezeigt werden. Dazu werden wie in Abschnitt 4.2.5 beschrieben die erfassten Messwerte in tabellarischer Form in ein

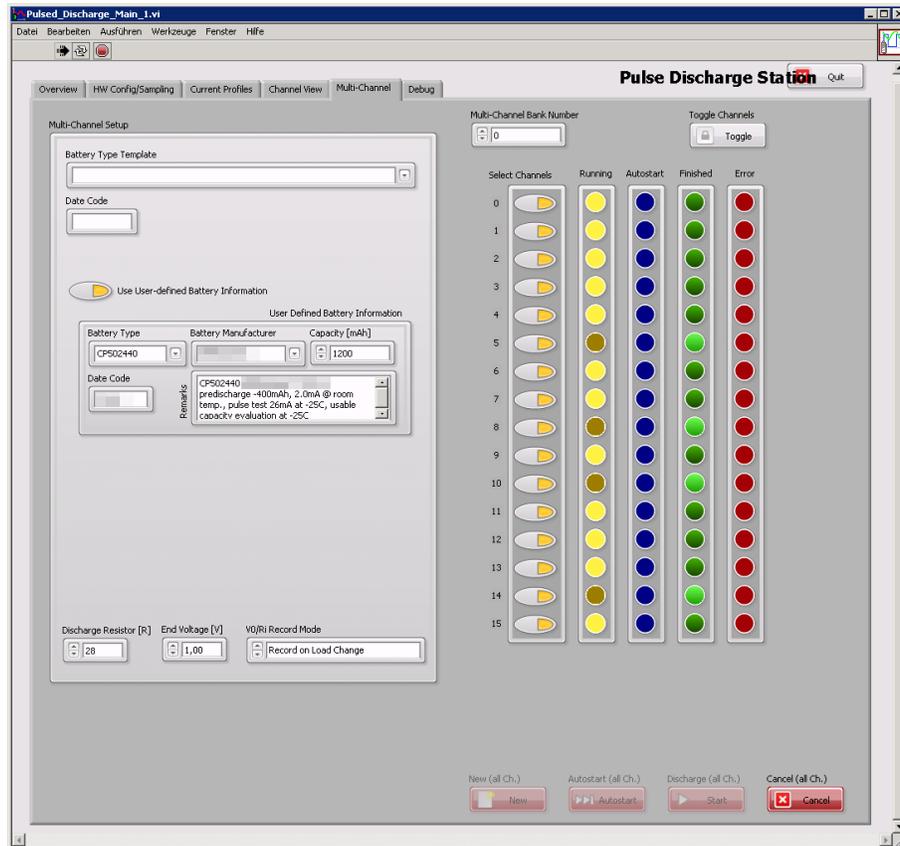
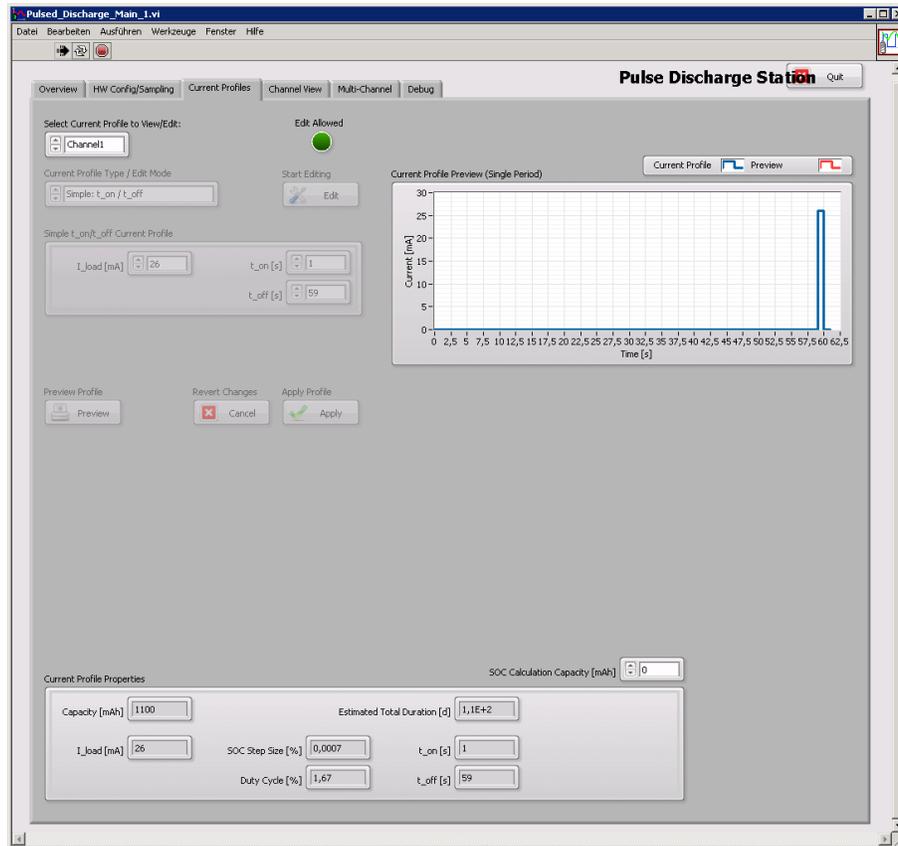


Abbildung 5.20: *Multi Channel*-Tab mit Konfiguration und Kanalauswahl für Bank 0 (hier: einige Kanäle bereits abgeschlossen)

Textfile geschrieben, in dessen ersten Zeilen sich ein Header befindet, in dem sämtliche Test- und Umgebungsbedingungen angegeben sind. Am Ende des Headers sind die Bezeichnungen der Spalten definiert, nach dem Header sind Zeile für Zeile die Messdaten selbst enthalten. In Listing 5.1 ist eine (gekürzte) Protokolldatei für das Konstantentladesystem dargestellt. Zusätzlich zu den CSV-Dateien werden auch grafische Darstellungen der Entladekurven zum Ende des Durchlaufs generiert. Zahlreiche solche Kurven sind in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Abbildung 5.21: *Current Profile Editor*-Tab zur Einstellung der Stromprofile)

Listing 5.1: Protokollformat (mit Header) des Konstantentladesystems

```

1 #BEGIN HEADER
2 #Start Time: 16:22:17,862 14.12.2017
3 #End Time: 14:17:52,746 21.12.2017
4 #Total Charge: 600,0mAh
5 #Battery Type: CR2450 1S2P
6 #Battery Manufacturer: Man."A"
7 #Battery Date Code: n.a.
8 #Battery Capacity: 1100,000000mAh
9 #Remarks: predischarge -600mAh, 3.6mA @ room temp., pulse test 26mA at room temp
10 #Channel Number: 0
11 #Discharge Resistor enabled: FALSE
12 #Discharge Resistor: -1,000000R
13 #Current Sink enabled: TRUE
14 #Current Sink Load Current: 3,600000mA
15 #Current Sink Shunt Resistor: 28,000000R
16 #Current Sink Channel: Channel 0
17 #Sink Current Measurement enabled: TRUE
18 #Discharge to End Charge enabled: TRUE
19 #Specified End Charge: 600,000000mAh
20 #End Voltage: 2,000000V
21 #Time [s] Voltage [V] Current [A] Charge [mAh]
22 #END HEADER
23 0,000000;3,334215;0,000008;0,000000
24 10,000000;2,855036;0,003626;0,010071
25 20,000000;3,052035;0,003620;0,020127
26 30,000000;3,084759;0,003614;0,030166
27 40,000000;3,099887;0,003626;0,040237
28 ...
29 597180,000000;2,440155;0,003614;599,978943
30 597190,000000;2,440320;0,003614;599,988953
31 597200,000000;2,440155;0,003614;599,998962
32 597210,000000;2,440320;0,003608;600,008972

```

5.2.2 Bestimmung der Nominalkapazität und Batteriestreuung

Zur Bestimmung der Nominalkapazität wurden wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben die Batterien bei Raumtemperatur über einen konstanten Widerstand entladen. Dabei wurden die Parameter der Entladung anhand den Spezifikationen der Batterien gewählt, die in deren Datenblättern angegeben sind. Als Entladeendspannung wurde der für Lithiumknopfzellen gebräuchliche Wert von 2.0 V verwendet, der Entladestrom wurde so gewählt, dass sich ein Kompromiss aus geringer Durchlaufzeit und zulässiger Belastung der Batterie ergibt. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass der im Datenblatt angegebene maximale Dauerstrom pro Zelle nicht überschritten wird.

Nachdem der maximale Dauerstrom pro Zelle üblicherweise zwischen 2 mA und 4 mA liegt, wurde ein konstanter Entladewiderstand von $R_{const} = 820 \Omega$ gewählt, der einen Entladestrom von $I_{const} = \frac{V_{nominal}}{R_{const,old}} = \frac{3.0 V}{820 \Omega} = 3.66 mA \approx 3.6 mA$ ergibt. Dazu wurden Vergleichsmessungen des Verhaltens mit unterschiedlichen Lastwiderständen durchgeführt - als Beispiel sind Messungen mit 820Ω ($\approx 3.6 mA$) und $2.2 k\Omega$ ($\approx 1.4 mA$) in den Abbildungen 5.22 und 5.23 dargestellt. Die Ergebnisse sind in etwa vergleichbar, wobei die Durchlaufzeit mit 820Ω lediglich ein Drittel beträgt - aus diesem Grund wurde der Wert von 820Ω als Standardwert gewählt.

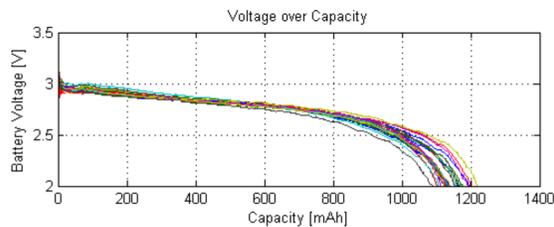


Abbildung 5.22: Entladekurve eines CR2450 1S2P Packs mit 820Ω Konstantwiderstand, gemessene Nominalkapazität etwa 1100 – 1200 mAh

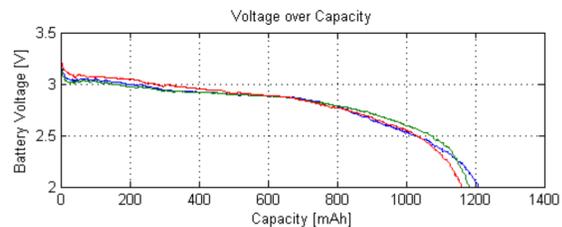


Abbildung 5.23: Entladekurve eines CR2450 1S2P Packs mit $2.2 k\Omega$ Konstantwiderstand, gemessene Nominalkapazität etwa 1150 – 1200 mAh

Durch die Verwendung eines geringeren Lastwiderstandes und dadurch eines höheren Laststromes im Vergleich zu den in den Datenblättern angegebenen Nominalkapazitäten bei *Standardentladungen* mit sehr niedrigen Lastwiderständen (typischerweise $6.8 k\Omega$ bis $7.5 k\Omega$) kann die so bestimmte Nominalkapazität bei deutlich erhöhtem (aber zulässigem) Laststrom als *worst case*-Messung mit verschärften Bedingungen betrachtet werden.

Neuere Messungen mit der überarbeiteten Konstantentladestation verwenden statt des konstanten Entladewiderstandes einen konstanten Entladestrom, dieser entspricht aber dem Entladestrom mit Konstantwiderstand bei Nominalspannung, d.h. bei Konstantentladungen mit einem ursprünglichen Konstantwiderstand von beispielsweise $R_{const} = 820 \Omega$ wurde ein Konstantstrom von $I_{const} = \frac{V_{nominal}}{R_{const,old}} = \frac{3.0 V}{820 \Omega} = 3.66 mA \approx 3.6 mA$ gewählt.

Bei manchen CR2450-Einzelzellen bestimmter Hersteller die im Laufe der Qualifizierungsmessungen analysiert wurden liegt die maximale Dauerbelastbarkeit deutlich unter den oben angegebenen Werten⁵, daher wurde der Entladewiderstand für Einzelzellen im Verlauf der Messungen auf $3.3 k\Omega$ ($\approx 1.0 mA$) angepasst.

Die folgenden Abbildungen 5.24 bis 5.30 zeigen beispielhaft Ergebnisse aus den Konstantentladungen. Durch die Vielzahl an Ergebnissen werden lediglich einige Anschauungsbeispiele in diesem Abschnitt dargestellt. Eine kurze Beschreibung dazu befindet sich in der Bildunterschrift.

⁵beispielsweise CR2450 eines Herstellers: max. 0.2 mA pro Zelle

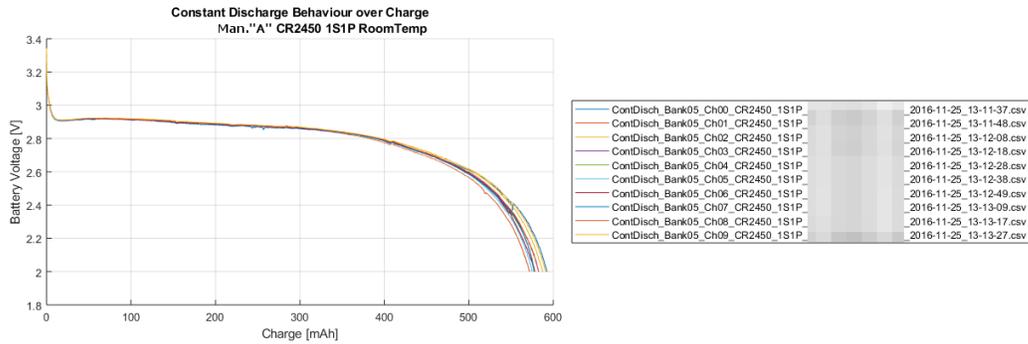


Abbildung 5.24: Konstantentladung einer CR2450 Einzelzelle mit $820\ \Omega$ bei Raumtemperatur, gemessene Nominalkapazität 570 – 590 mAh (Datenblatt: 550 mAh) \Rightarrow Angabe im Datenblatt erfüllt und übertroffen

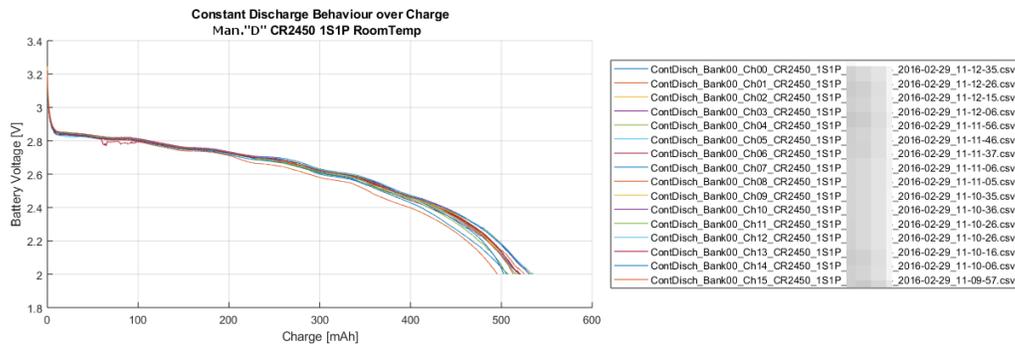


Abbildung 5.25: Konstantentladung einer CR2450 Einzelzelle eines anderen Herstellers mit $820\ \Omega$ bei Raumtemperatur, gemessene Nominalkapazität 490 – 530 mAh (Datenblatt: 550 mAh) \Rightarrow Angabe im Datenblatt nicht erreicht

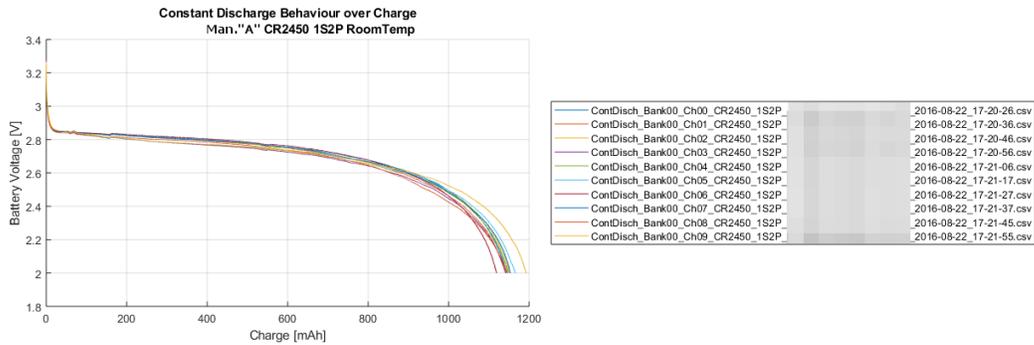


Abbildung 5.26: Konstantentladung eines CR2450 1S2P Packs mit $820\ \Omega$ bei Raumtemperatur, gemessene Nominalkapazität 1100 – 1200 mAh (Datenblatt: 1100 mAh) \Rightarrow Angabe im Datenblatt erfüllt und übertroffen

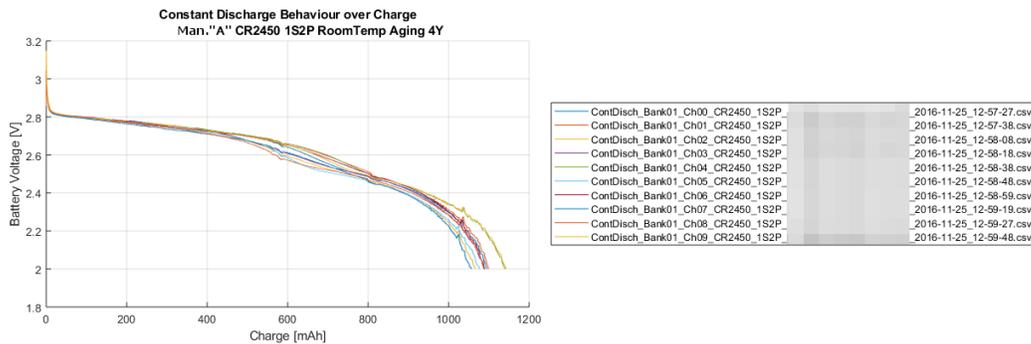


Abbildung 5.27: Konstantentladung eines CR2450 1S2P Packs mit $820\ \Omega$ bei Raumtemperatur nach 4 Jahren künstlicher Alterung, gemessene Nominalkapazität $1050 - 1150\ \text{mAh} \Rightarrow \Delta Q \approx 50\ \text{mAh} \hat{=} -5\%$ in 4 Jahren (Datenblatt: $1100\ \text{mAh}$, $< 2\%$ Selbstentladung pro Jahr) \Rightarrow Angaben im Datenblatt erfüllt

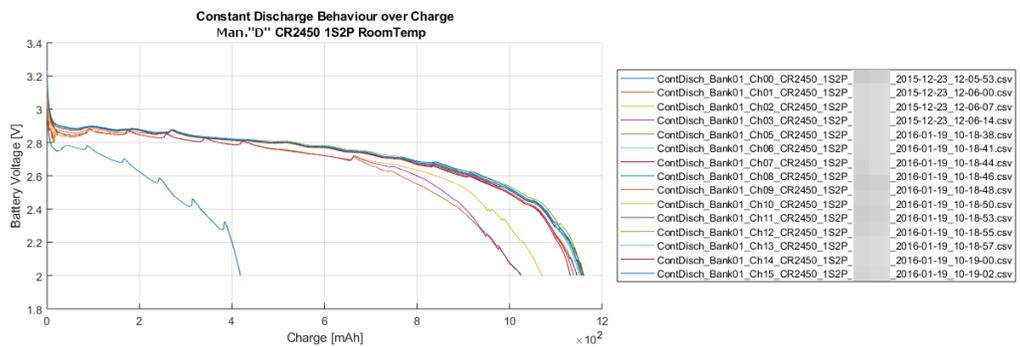


Abbildung 5.28: Konstantentladung eines CR2450 1S2P Packs eines anderen Herstellers mit $820\ \Omega$ bei Raumtemperatur, gemessene Nominalkapazität $1030 - 1160\ \text{mAh}$ (Datenblatt: $1100\ \text{mAh}$) \Rightarrow Angabe im Datenblatt groÙtenteils erfüllt, **ein Ausreisser** mit $420\ \text{mAh} \rightarrow$ verursacht durch fehlerhafte Verschweißung des Packs (die Schwankungen in den Kurven wurden durch Temperaturschwankungen verursacht)

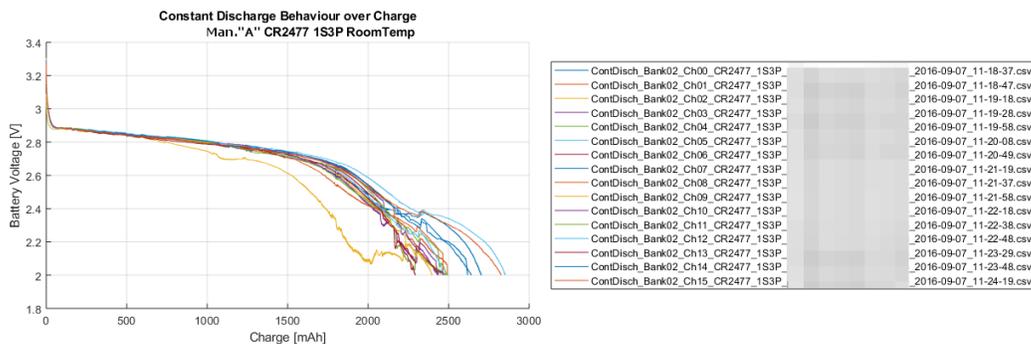


Abbildung 5.29: Konstantentladung eines CR2477 1S3P Packs mit $820\ \Omega$ bei Raumtemperatur, gemessene Nominalkapazität $2300 - 2850\ \text{mAh}$ (Datenblatt: $3000\ \text{mAh}$) \Rightarrow Angabe im Datenblatt **deutlich** nicht erreicht, ungewöhnliches Verhalten gegen Ende der Entladung

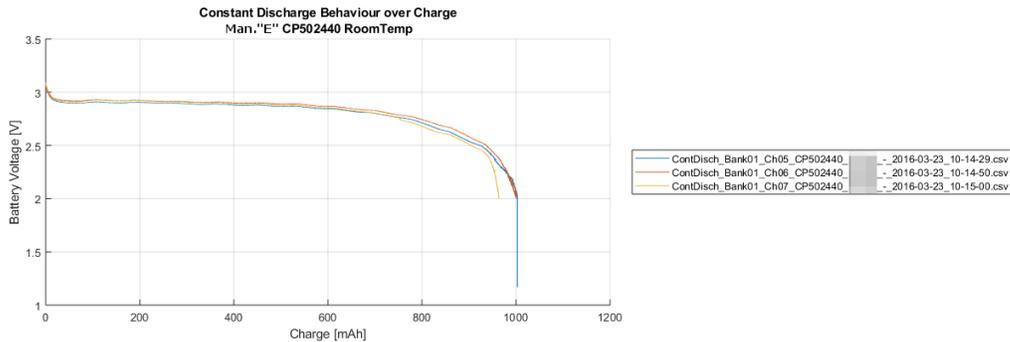


Abbildung 5.30: Konstantentladung einer CP502440 Pouchzelle mit $820\ \Omega$ bei Raumtemperatur, gemessene Nominalkapazität $950 - 1000\ \text{mAh}$ (Datenblatt: $1200\ \text{mAh}$) \Rightarrow Angabe im Datenblatt **deutlich** nicht erreicht

Der Großteil der Ergebnisse bestätigt die Angaben im Datenblatt und zeigt dass die getesteten Zellen/Batterien die angegebene Nominalkapazität auch unter verschärften Bedingungen erreichen. Die Streuung der Nominalkapazität liegt dabei üblicherweise bei $< 10\%$. Manche Batterietypen von bestimmten Batterieherstellern erreichen die angegebene Nominalkapazität unter diesen Bedingungen jedoch nicht, oder zeigen eine deutlich erhöhte Streuung - das kann ein Zeichen dafür sein, dass die Batterie durch den erhöhten Laststrom *überlastet* ist und daher die angegebene Nominalkapazität nicht liefern kann. In diesem Fall machte sich dieser Umstand auch in der Pulsentladung bemerkbar, wo die Ergebnisse dieser Batterien auch deutlich unter den Ergebnissen der als *brauchbar* bewerteten Batterien liegen. Wie bereits erwähnt sind für diese Anwendung die Ergebnisse der Pulsentladung jedoch deutlich interessanter als die Konstantentladekurven und die Nominalkapazität bei Konstantentladung.

5.2.3 Selbstentladung

Wie bereits im vorherigen Abschnitt kurz demonstriert, kann das Konstantentladesystem zur Bestimmung der Selbstentladung der Zellen/Batterien verwendet werden. Dazu werden die Zellen wie im Kapitel 3 beschrieben bei einer erhöhten Temperatur künstlich gealtert. Für die so erhaltenen Batterien mit einem künstlichen Alter von 0 bis N Jahren wird dann jeweils die Nominalkapazität mit Hilfe des Konstantentladesystems bestimmt. Die so bestimmten Werte können dann gegenübergestellt werden, um einen durchschnittlichen Ladungsverlust pro Jahr und damit eine erwartete Selbstentladung zu errechnen.

Abbildung 5.31 zeigt die grafische Auswertung der Selbstentladung für ein CR2450 1S2P Pack für die ersten 4 Jahre. Dabei stellen die grünen Balken die durchschnittliche gemessene Nominalkapazität der Samples dar, die schwarzen Linien geben die Streuung der Messwerte an. Die grauen Balken geben die resultierende Selbstentladung pro Jahr in % aus dem Ladungsverlust im Vergleich zum Vorjahr an. Durch die geringe Anzahl an Samples ($N = 10$) ist die Streuung relativ hoch, aus diesem Grund kommt es vermutlich auch zu einer Zunahme der Selbstentladungsrate zwischen Jahr 2 und Jahr 3 - aus diesem Grund sollten diese Messungen mit einer höheren Anzahl an Samples wiederholt werden.

Man erkennt, dass die Selbstentladungsrate über die Zeit deutlich abnimmt. Im ersten Jahr liegt die Selbstentladungsrate mit etwa $2.4\%/Jahr$ sogar über der im Datenblatt angegebenen Rate von $< 2\%/Jahr$. Diese Rate wird nach dem ersten Jahr aber rasch deutlich unterschritten. Die erhöhte Rate im ersten Jahr könnte ebenfalls durch die zu geringe Anzahl Samples verursacht worden sein.

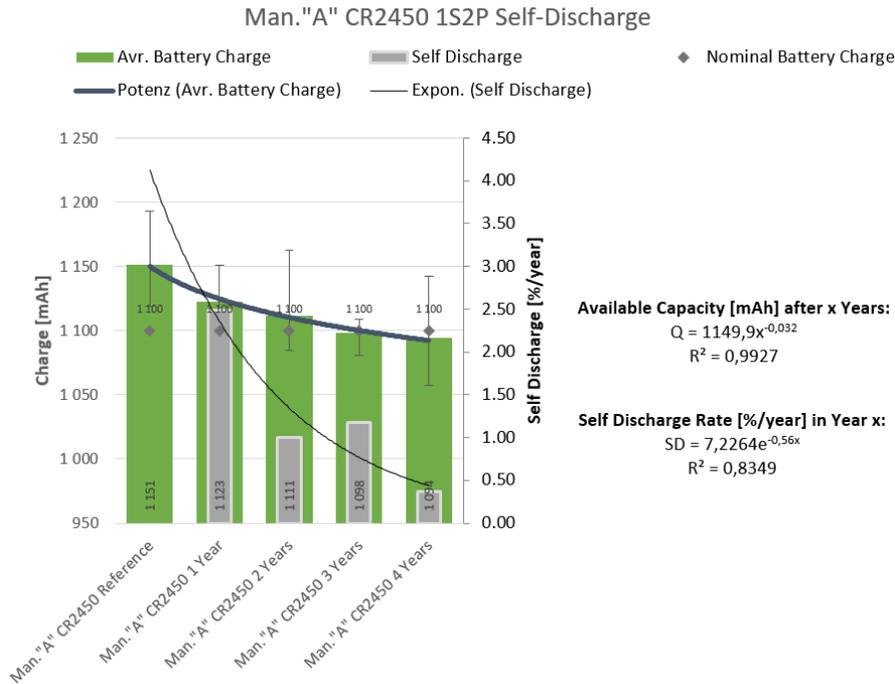


Abbildung 5.31: Abschätzung der Selbstentladung eines CR2450 1S2P Packs bei künstlicher Alterung über 4 Jahre

Es wurde versucht, den geschätzten Verlauf der verbleibenden Kapazität und den Verlauf der Selbstentladungsrate mit Trendlinien darzustellen. Diese Trendlinien und deren mathematische Beschreibung sind ebenfalls in Abbildung 5.31 dargestellt. Die verbleibende Kapazität lässt sich am besten durch eine Potenzfunktion darstellen, die Selbstentladungsrate lässt sich durch eine Exponentialfunktion annähern. Diese Messung zeigt, dass für die Abschätzung der Lebensdauer für diese Batterie eine durchschnittliche Selbstentladungsrate von 2%/Jahr, wie im Datenblatt angegeben, ein gültiger Wert ist. Der genaue Verlauf der Selbstentladung sollte jedoch in Zukunft mit weiteren Messungen bestimmt werden.

5.3 Messergebnisse Pulsentladesystem

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des Pulsentladesystems präsentiert. Hier werden ebenfalls aufgrund des Umfangs der verfügbaren Messergebnisse nur einige Beispiele zum Überblick, sowie einige "interessante" Ergebnisse, die die Abhängigkeit von bestimmten Test- oder Umgebungsbedingungen zeigen, aufgeführt. Da es sich bei diesen Ergebnissen und Erkenntnissen um das eigentliche Know-How zu Batterien für solche Ultra-Low-Power-Anwendungen handelt, und diese damit wertvolles Eigentum des Unternehmens sind, werden die Ergebnisse nur überblicksweise und auszugsweise präsentiert. Die Ergebnisse werden anschließend in Kapitel 6 diskutiert.

Diese Ergebnisse sind in keinem Batteriedatenblatt zu finden, und für die Anwendung besonders interessant. Bei den Messungen wurden zuerst als eine Art Grundlagenforschung Versuche durchgeführt, um den Einfluss der Stromprofile auf das Batterieverhalten abzuschätzen, und mit diesen Kenntnissen sinnvolle Lastprofile für die Qualifizierungsmessungen definiert. Später wurde mit diesen Lastprofilen das Verhalten einer größeren Anzahl Samples bestimmt, um das Verhalten der

Batterien in der ESL-Anwendung besser abschätzen zu können. Diese Ergebnisse wurden auch verwendet, um weitere Batteriehersteller und Batteriemodelle für den Einsatz in ESLs zu qualifizieren. In weiterer Folge wurde der Temperatureinfluss auf das Batterieverhalten evaluiert.

Mit diesen Erkenntnissen schließt dieses Kapitel ab, weitere Grundlagenforschung, Evaluierungen und Qualifizierungen sind bereits “in der Pipeline” und werden nach Abschluss dieser Arbeit fortgeführt. Das Pulsentladesystem ist somit im Dauerbetrieb und liefert kontinuierlich neue Messdaten und Erkenntnisse.

5.3.1 Format der Messergebnisse

Gleich wie beim Konstantentladesystem werden beim Pulsentladesystem ebenfalls Protokolldateien im CSV-Format mit vorangestelltem Header erzeugt, wie im Abschnitt 4.2.5 beschrieben. Im Header befinden sich sämtliche für die Messung relevanten Informationen über die getestete Batterie, die Umgebungsbedingungen, sowie das verwendete Stromprofil und die Konfiguration des Messsystems. Am Ende des Headers sind die Bezeichnungen für die Spalten definiert, danach folgen die Messdaten in tabellarischer Form. Im Gegensatz zum Konstantentladesystem werden beim Pulsentladesystem jedoch 2 Protokolldateien für jeden Kanal generiert:

- der zeitliche Verlauf der Batteriespannung und des Stromprofils (*Discharge Curve*). Aus diesen rohen Messwerten können wenn nötig im Nachhinein noch Informationen extrahiert werden. Durch die vergleichsweise hohe Abtastrate können diese Dateien sehr groß werden.
- der Verlauf von Leerlaufspannung, Lastspannung und Innenwiderstand über die entnommene Ladung (*Battery Behavior*). Aus diesen Kurven kann die nutzbare Kapazität und das Verhalten der Batterie über ihre Lebensdauer abgelesen werden.

Zusätzlich wird ebenfalls eine grafische Darstellung der Leerlaufspannung, Lastspannung und des Innenwiderstands am Ende jedes Durchlaufs generiert. Diese Grafik dient dazu, die Daten einfach und rasch sichten zu können, und wird auch in den folgenden Abschnitten zur Veranschaulichung verwendet. Werden weitere Details benötigt, können die Protokolldateien weiterverarbeitet werden.

In Listing 5.2 ist eine (gekürzte) Protokolldatei für den zeitlichen Verlauf des Pulsentladesystems dargestellt. Listing 5.3 zeigt eine gekürzte Protokolldatei für den Verlauf von Leerlaufspannung, Lastspannung und Innenwiderstand über die entnommene Ladung.

Listing 5.2: Protokollformat (mit Header) für zeitlichen Verlauf des Pulsentladesystems

```

1 #BEGIN HEADER
2 #PULSE DISCHARGE
3 #DISCHARGE CURVE
4 #Start Time:      11:20:23,423 22.12.2017
5 #End Time:      05:11:41,520 04.01.2018
6 #Total Charge:   132,5mAh
7 #Battery Type:   CR2450 1S2P
8 #Battery Manufacturer: Man."A"
9 #Battery Date Code: n.a.
10 #Battery Capacity: 1100,000000mAh
11 #Remarks:      predischarge -600mAh, 3.6mA @ room temp., pulse test 26mA at room temp
12 #Channel Number: 1
13 #Discharge Resistor: 28,000000R
14 #End Voltage:   1,000000V
15 #BEGIN CURRENT_PROFILE
16 #Current Profile Type: Simple t_on/t_off Profile
17 #Raw Profile:
18 #Step 1/2:      Current 0,00mA, Duration 59,00s
19 #Step 2/2:      Current 26,00mA, Duration 1,00s
20 #END CURRENT_PROFILE
21 #Time [s]      Voltage [V] Current [mA]      Charge [mAh]
22 #END HEADER
23 0,000000;2,903270;0,000000;0,000000
24 0,500000;2,903434;0,000000;0,000000
25 1,000000;2,903270;0,000000;0,000000
26 ...
27 58,500000;2,903434;0,000000;0,000000
28 59,000000;2,222907;26,000000;0,003611
29 59,500000;2,259572;26,000000;0,007222
30 60,000000;2,850327;0,000000;0,007222
31 60,500000;2,882553;0,000000;0,007222
32 61,000000;2,889130;0,000000;0,007222
33 61,500000;2,891925;0,000000;0,007222
34 ...

```

Listing 5.3: Protokollformat (mit Header) für Leerlaufspannung, Lastspannung und Innenwiderstand des Pulsentladesystems

```

1 #BEGIN HEADER
2 #PULSE DISCHARGE
3 #BATTERY CHARACTERISTICS
4 #Start Time:      11:20:23,423 22.12.2017
5 #End Time:      05:11:41,520 04.01.2018
6 #Total Charge:   132,5mAh
7 #Battery Type:   CR2450 1S2P
8 #Battery Manufacturer: Man."A"
9 #Battery Date Code: n.a.
10 #Battery Capacity: 1100,000000mAh
11 #Remarks:      predischarge -600mAh, 3.6mA @ room temp., pulse test 26mA at room temp
12 #Channel Number: 1
13 #Discharge Resistor: 28,000000R
14 #End Voltage:   1,000000V
15 #BEGIN CURRENT_PROFILE
16 #Current Profile Type: Simple t_on/t_off Profile
17 #Raw Profile:
18 #Step 1/2:      Current 0,00mA, Duration 59,00s
19 #Step 2/2:      Current 26,00mA, Duration 1,00s
20 #END CURRENT_PROFILE
21 #Charge [mAh]    Load Current [mA] Idle Voltage [V]      Internal Resistance [R]
22 #END HEADER
23 0,000000;26,000000;2,903434;26,174141
24 0,007222;0,000000;2,259572;22,721355
25 0,007222;26,000000;2,902448;24,656433
26 0,014444;0,000000;2,265984;22,360893
27 0,014444;26,000000;2,901790;24,447744
28 ...
29 132,520569;0,000000;1,004079;69,441246
30 132,520569;26,000000;2,861343;70,465706
31 132,527786;0,000000;1,001448;69,517128
32 132,527786;26,000000;2,861179;70,547913

```

5.3.2 Bestimmung eines Test-Stromprofils

Noch bevor die aktuellen Konstant- und Pulsentladesysteme entwickelt wurden, wurden bereits Batterietests mit pulsformigen Stromprofilen durchgeführt, um das Verhalten der Batterien bei pulsformiger Belastung zu analysieren. Diese Messungen wurden mit den in Abschnitt 1.4.5 beschriebenen historischen Batteriemessmethoden durchgeführt und lieferten wertvolle Kenntnisse über die Auswirkungen von unterschiedlichen Stromprofilen, die später zur Definition der Test-Stromprofile verwendet wurden. Diese Test-Stromprofile wurden mit dem in Abschnitt 3.5.3 beschriebenen 2-Kanal Arbiträrenladesystem an einzelnen Samples getestet, wobei schnell die Notwendigkeit eines Testsystems mit deutlich mehr Kanälen für deutlich mehr Samples klar wurde.

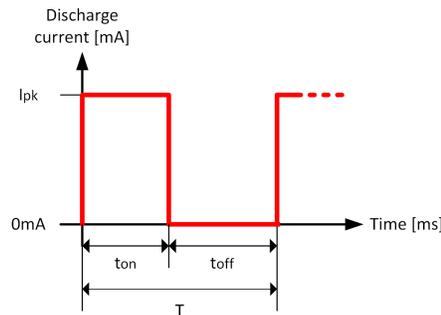


Abbildung 5.32: Einfaches pulsformiges Stromprofil, definiert durch I_{pk} , t_{on} und t_{off}

In diesem Abschnitt sind einige dieser Test-Stromprofile dargestellt. Dabei wurden generische pulsformige Stromprofile wie in Abbildung 5.32 verwendet, und die Parameter I_{pk} , t_{on} und t_{off} variiert. Zur einfacheren Definition wurden dabei auch oft der *Duty Cycle* $DC = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$ und die Ladungszustand-Schrittweite (*SOC Step Size*) $\Delta SOC = \frac{I_{pk} \cdot t_{on}}{Q_{nom}}$ verwendet, also das Puls-Pausen-Verhältnis und die pro Puls entnommene Ladung als Prozentsatz der Nominalkapazität. Diese Werte werden auch in der Literatur und in Papers über Batterietests verwendet, und wurden deswegen übernommen.

Um das Verhalten der Batterie abzuschätzen, wurden getrennt einzelne Parameter verändert, während die restlichen Parameter gleich blieben. So wurde beispielsweise die Höhe des Pulsstromes I_{pk} variiert, während Duty Cycle und SOC-Schrittweite gleich blieben, um die Auswirkung unterschiedlicher Pulsströme bei gleichbleibender Ladungsentnahme zu analysieren. Einige solche Parametervariationen sind in den folgenden Abschnitten kurz dargestellt, dabei wurde immer die gleiche Batteriepack-Type verwendet, ein CR2450 1S2P Pack mit einer Nominalkapazität von 1100 mAh. Als Entladeendspannung wurde bei diesen Evaluierungsmessungen eine Schwelle von 2.0 V verwendet. Sämtliche Messungen in diesem Abschnitt wurden bei Raumtemperatur durchgeführt.

Variation der Pulshöhe

In der ersten Versuchsreihe wurden Stromprofile mit unterschiedlichen Pulshöhen verwendet, deren Duty Cycle und SOC-Schrittweite jedoch gleich blieben. Das bedeutet, dass zwar die Höhe der Pulsströme variiert wurde, die dabei entnommene Ladung pro Puls jedoch zwischen den Messungen gleich blieb. Der Duty Cycle, also das Verhältnis zwischen Belastungsdauer und Ruhedauer, wurde dabei auch gleich gehalten. Nachdem es keinen Anhaltspunkt gab, wurden für die ersten Messungen ein Duty Cycle von 50 % und eine SOC-Schrittweite von 1 % willkürlich festgelegt, nachdem diese

Werte in Papers auch verwendet wurden⁶, die Pulshöhe wurde anfangs zwischen 3.5 mA (SoC low-power), 8 mA (SoC aktiv), 16 mA (Zwischenschritt) und 24 mA (SoC aktiv + RF-Transmission) variiert.

24mA Abbildung 5.33 zeigt die Messung für ein CR2450 1S2P Pack unter einem Stromprofil mit 24 mA Laststrom (entsprechend der ESL-Anwendung bei Funkübertragungen), und einem Duty Cycle von 50 % bei der SOC-Schrittweite von 1 %. Dabei handelt es sich jedoch um einen Strom *deutlich* über dem maximalen Dauerstrom der Batterie, der für eine Dauer von etwa 27 Minuten entnommen wurde, mit anschließender 27-minütiger Ruhephase. Die dabei entnommene nutzbare Kapazität von etwa 506 mAh $\approx 46\%$ der Nominalkapazität ist dafür jedoch erstaunlich hoch. Von einem "realistischen" Stromprofil für die Anwendung ist dieses Stromprofil jedoch weit entfernt und muss noch angepasst werden.

16mA Abbildung 5.34 zeigt die Messung für ein CR2450 1S2P Pack unter einem Stromprofil mit 16 mA Laststrom, die Werte für Duty Cycle und SOC-Schrittweite wurden beibehalten. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.34 dargestellt. Der reduzierte Pulsstrom reduziert die Spannungseinbrüche bereits deutlich, und lässt eine nutzbare Kapazität von etwa 714 mAh $\approx 65\% Q_{nom}$ zu. Die Pulsdauer von 41 Minuten ist ebenfalls unrealistisch, in späteren Messungen wurde daher die Reduktion der Pulsdauer untersucht.

8mA Abbildung 5.35 zeigt die Messung für ein CR2450 1S2P Pack unter einem Stromprofil mit 8 mA Laststrom (entsprechend aktivem SoC), die Werte für Duty Cycle und SOC-Schrittweite wurden wieder beibehalten. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.35 dargestellt. Der reduzierte Pulsstrom reduziert die Spannungseinbrüche nochmals deutlich, und lässt eine nutzbare Kapazität von etwa 1010 mAh $\approx 92\% Q_{nom}$ zu. Die Pulsdauer von 82 Minuten ist zwar äußerst unrealistisch, der Pulsstrom liegt aber inzwischen unterhalb des im Datenblatt angegebenen maximalen Dauerstroms von 4 mA pro Zelle, damit kann die Nominalkapazität bei dieser Batterie nahezu erreicht werden.

3.5mA Abbildung 5.36 zeigt die Messung für ein CR2450 1S2P Pack unter einem Stromprofil mit 3.5 mA Laststrom (entsprechend SoC im low-power Modus), die Werte für Duty Cycle und SOC-Schrittweite wurden wieder beibehalten. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.36 dargestellt. Ähnlich wie bei 8 mA Pulsstrom liegt man hier unterhalb des angegebenen maximalen Dauerstroms, deswegen erreicht man eine nutzbare Kapazität von etwa 1065 mAh $\approx 97\% Q_{nom}$ zu.

Auswertung Vergleicht man die Ergebnisse der in den Abbildungen 5.33 bis 5.36 dargestellten Messungen, fällt auf dass der Innenwiderstand scheinbar mit sinkendem Pulsstrom zunimmt. Das spiegelt sich auch in der Tatsache wider, dass der Spannungseinbruch während der Belastung nicht proportional zum Pulsstrom ist. Auch in späteren Messungen hat sich dieses Phänomen gezeigt - reduziert man den Pulsstrom, so verbessert sich das Verhalten der Lastspannung zwar, jedoch in einem geringeren Maße als man erwarten würde.

Stellt man die nutzbare Kapazität mit dem Pulsstrom bei sonst gleichen Parametern gegenüber, ergibt sich ein Verlauf wie in Abbildung 5.37 dargestellt. Man sieht dass die nutzbare Kapazität bei niedrigen Strömen nahe der Nominalkapazität in Sättigung geht, während sich bei Erhöhung des Pulsstromes ein nichtlinearer Verlauf zwischen Pulsstrom und nutzbarer Kapazität einstellt. Bei steigendem Pulsstrom nimmt die nutzbare Kapazität immer langsamer ab.

⁶Die Papers beschäftigten sich jedoch üblicherweise mit leistungsfähigeren Batterien, beispielsweise für die Elektromobilität. Daher war das Verhalten und die nutzbare Kapazität der auf geringe Dauerleistungen ausgelegten Lithium-Knopfzellen bei solchen Stromprofilen, wenig überraschend, weit weg von der Nominalkapazität.

I_{pk} [mA]	t_{on} [s]	I_{off} [mA]	t_{off} [s]	DC [%]	Δ SOC [%]	$Q_{useable}$ [mAh]	$Q_{useable}$ [%]
24	1650	0	1650	50	1	506	46

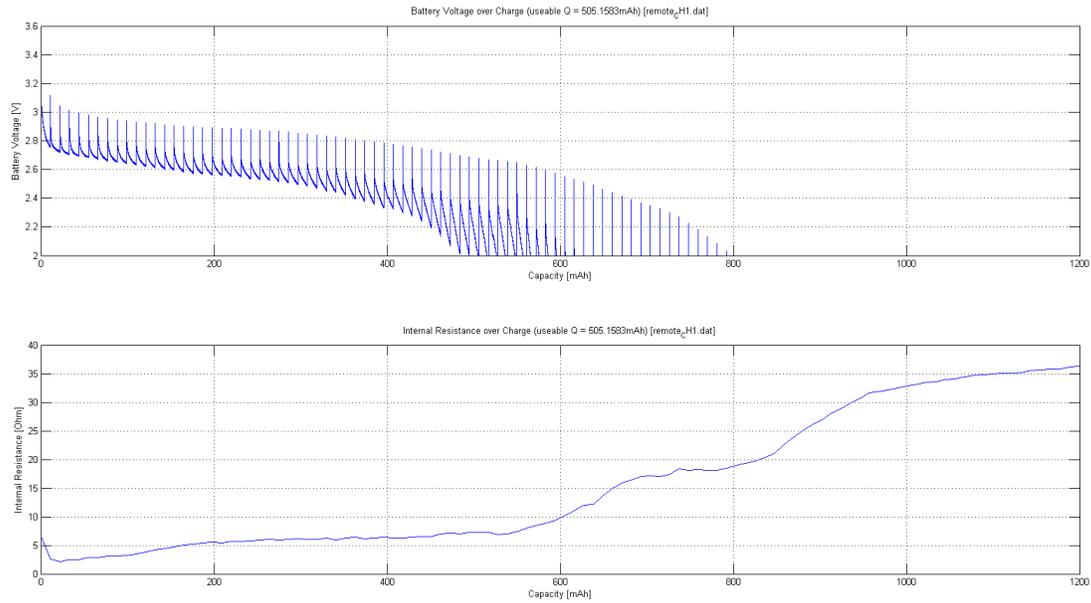


Abbildung 5.33: CR2450 1S2P: Pulsstromprofil mit 24 mA, 50 % Duty Cycle, 1 % SOC-Schrittweite

I_{pk} [mA]	t_{on} [s]	I_{off} [mA]	t_{off} [s]	DC [%]	Δ SOC [%]	$Q_{useable}$ [mAh]	$Q_{useable}$ [%]
16	2475	0	2475	50	1	714	65

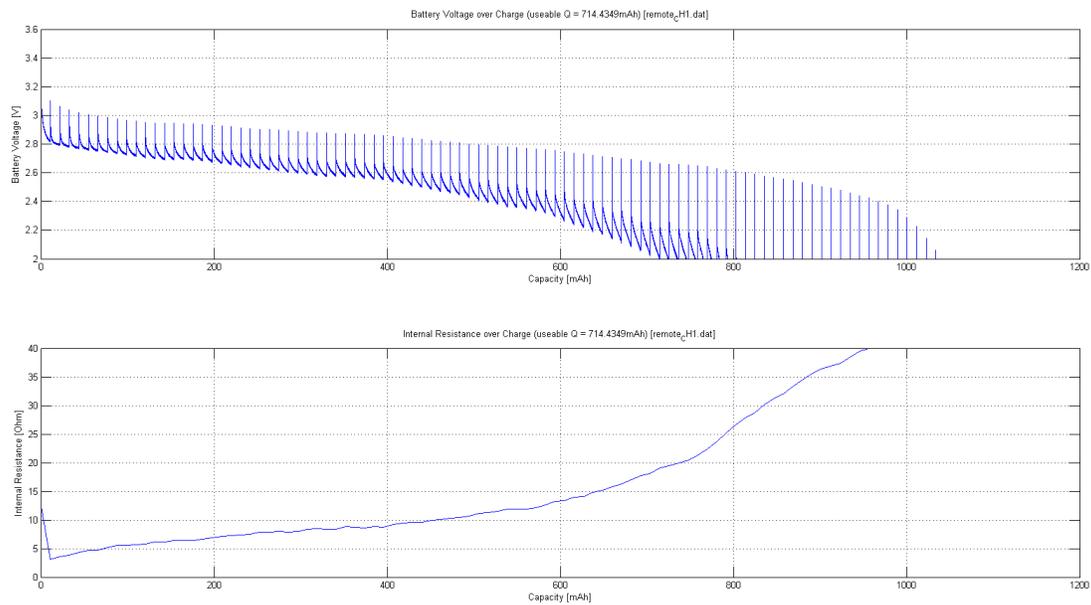


Abbildung 5.34: CR2450 1S2P: Pulsstromprofil mit 16 mA, 50 % Duty Cycle, 1 % SOC-Schrittweite

I_{pk} [mA]	t_{on} [s]	I_{off} [mA]	t_{off} [s]	DC [%]	Δ SOC [%]	$Q_{useable}$ [mAh]	$Q_{useable}$ [%]
8	4950	0	4950	50	1	1010	92

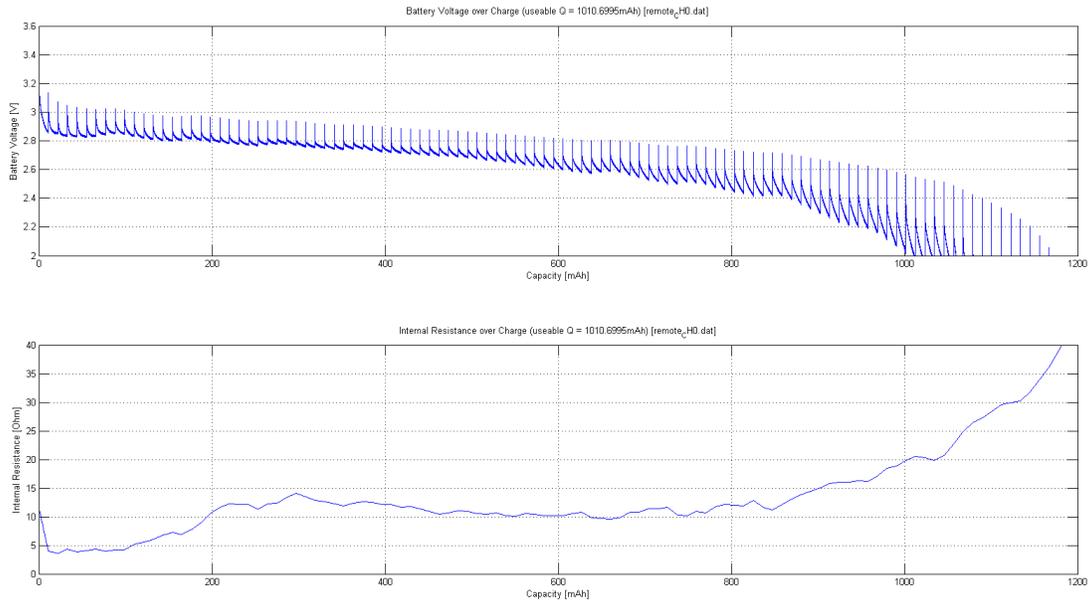


Abbildung 5.35: CR2450 1S2P: Pulsstromprofil mit 8 mA, 50 % Duty Cycle, 1 % SOC-Schrittweite

I_{pk} [mA]	t_{on} [s]	I_{off} [mA]	t_{off} [s]	DC [%]	Δ SOC [%]	$Q_{useable}$ [mAh]	$Q_{useable}$ [%]
3.5	11314	0	11314	50	1	1065	97

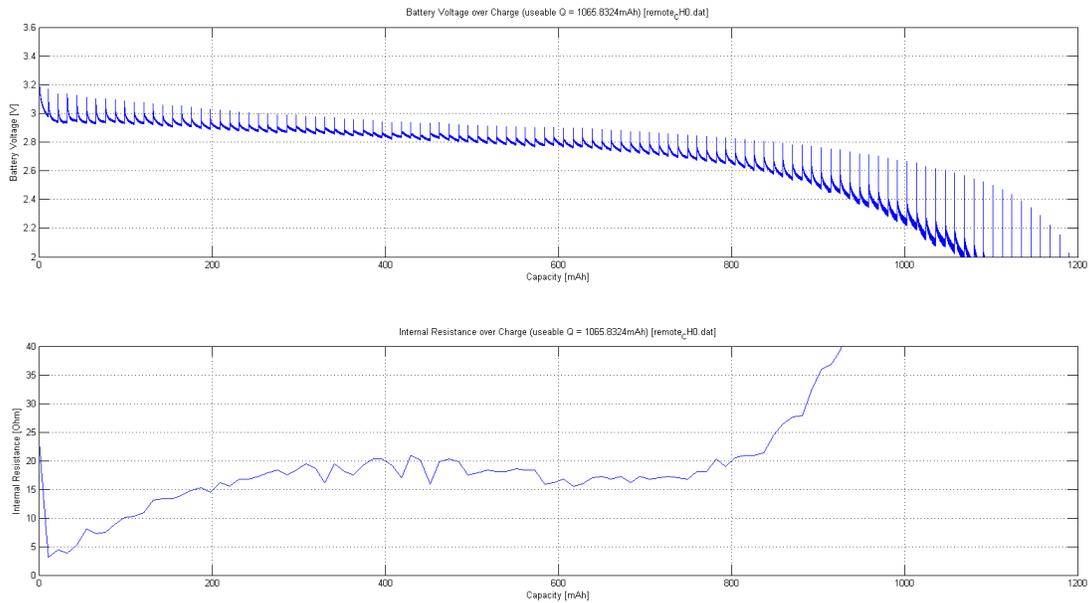


Abbildung 5.36: CR2450 1S2P: Pulsstromprofil mit 3.5 mA, 50 % Duty Cycle, 1 % SOC-Schrittweite

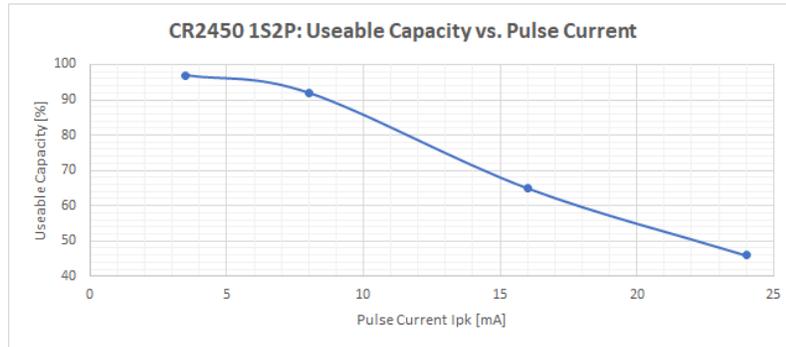


Abbildung 5.37: Zusammenhang zwischen nutzbarer Kapazität und Pulsstrom

Diese Messungen wurden für weitere Batteriehersteller und Batterietypen wiederholt, wobei sich meistens ein ähnliches Bild bot. Manche Batterietypen von anderen Herstellern zeigten jedoch ein deutlich anderes Verhalten, und konnten bei den gleichen Stromprofilen deutlich weniger nutzbare Kapazität liefern. Bei wiederholten Messungen der gleichen Batterietype vom gleichen Hersteller wurde jedoch die Schwankung der Batterien deutlich, und der Bedarf eines Testsystems mit einer höheren Anzahl an Kanälen.

Variation des Timings (Duty Cycle und SOC-Schrittweite)

Im nächsten Schritt wurde der Einfluss des Duty Cycle und der SOC-Schrittweite auf die nutzbare Kapazität untersucht. Dabei wurde die Höhe des Strompulses gleich gehalten, und entweder der Duty Cycle oder die SOC-Schrittweite verändert. Wie sich herausstellte, haben sowohl Duty Cycle als auch SOC-Schrittweite deutlichen Einfluss auf die nutzbare Kapazität, am besten lässt sich das Verhalten über die Puls-Einschaltzeit t_{on} und die Ruhezeit t_{off} beschreiben. Die nutzbare Kapazität ist umso höher, je kürzer die Einschaltzeit und je länger die Ruhezeit ist, also bei einem kombinierten niedrigen Duty Cycle und niedriger SOC-Schrittweite. Erhöht man einen dieser beiden Werte, kommt es zu einer längeren Einschaltzeit und/oder einer kürzeren Ruhezeit, und damit zu einer niedrigeren nutzbaren Kapazität.

Als Beispiel sei die in Abbildung 5.38 dargestellte Messung für ein CR2450 1S2P Pack unter einem Stromprofil mit 24 mA Laststrom und einem Duty Cycle von 20 % bei der SOC-Schrittweite von 0.4 %, also einer Einschaltzeit von 11 Minuten und einer Ruhezeit von 44 Minuten. Im Vergleich zum vorher in Abbildung 5.33 gezeigten Stromprofil mit ebenfalls 24 mA aber höherer Einschaltzeit hat sich die nutzbare Kapazität deutlich von 506 mAh $\approx 46\%$ auf 809 mAh $\approx 74\% Q_{nom}$ erhöht.

Bei einer weiteren Reduktion auf eine Einschaltzeit von etwa einer Minute und einer Ruhezeit von etwa 4 Minuten (Duty Cycle 20 %, SOC-Schrittweite 0.04 %) bei gleichbleibendem Pulsstrom von 24 mA ergibt sich eine weitere Erhöhung der nutzbaren Kapazität auf 904 mAh $\approx 82\%$. Die Kurve dazu ist in Abbildung 5.39 dargestellt.

Wird die Einschaltzeit ein weiteres Mal reduziert auf 16 Sekunden bei einer Ruhezeit von 66 Sekunden (Duty Cycle 20 %, SOC-Schrittweite 0.01 %) bei weiterhin gleichbleibendem Pulsstrom von 24 mA ergibt sich eine nutzbare Kapazität von 885 mAh $\approx 80\%$ (siehe Abbildung 5.40). Das zeigt einerseits die Schwankung der Batterien, da bei günstigeren Bedingungen die nutzbare Kapazität verringert wurde, andererseits die Tatsache dass auch hier eine Sättigung erreicht wird, und eine weitere Reduktion der Einschaltzeit kaum mehr Verbesserung bringt.

Ähnliche Messungen wurden für andere Batterietypen und Batteriehersteller wiederholt, mit ähnlichen Ergebnissen. Während dieser Messungen machten sich jedoch ebenfalls die Schwächen des

I_{pk} [mA]	t_{on} [s]	I_{off} [mA]	t_{off} [s]	DC [%]	Δ SOC [%]	$Q_{useable}$ [mAh]	$Q_{useable}$ [%]
24	660	0	2640	20	0.4	809	74

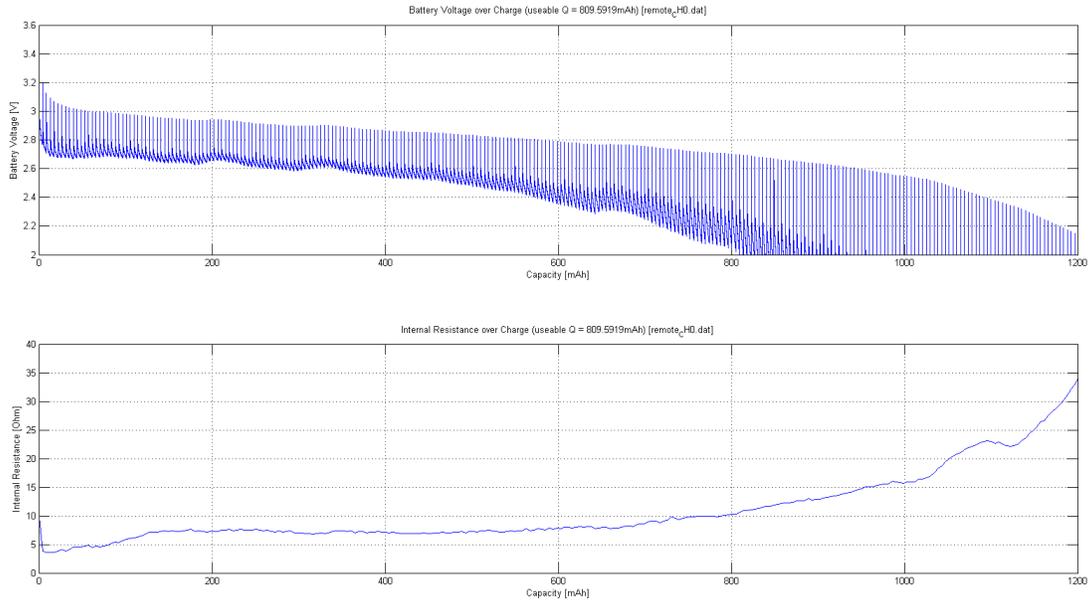


Abbildung 5.38: CR2450 1S2P: Pulsstromprofil mit 24 mA, 20% Duty Cycle, 0.4% SOC-Schrittweite

I_{pk} [mA]	t_{on} [s]	I_{off} [mA]	t_{off} [s]	DC [%]	Δ SOC [%]	$Q_{useable}$ [mAh]	$Q_{useable}$ [%]
24	66	0	264	20	0.04	904	82

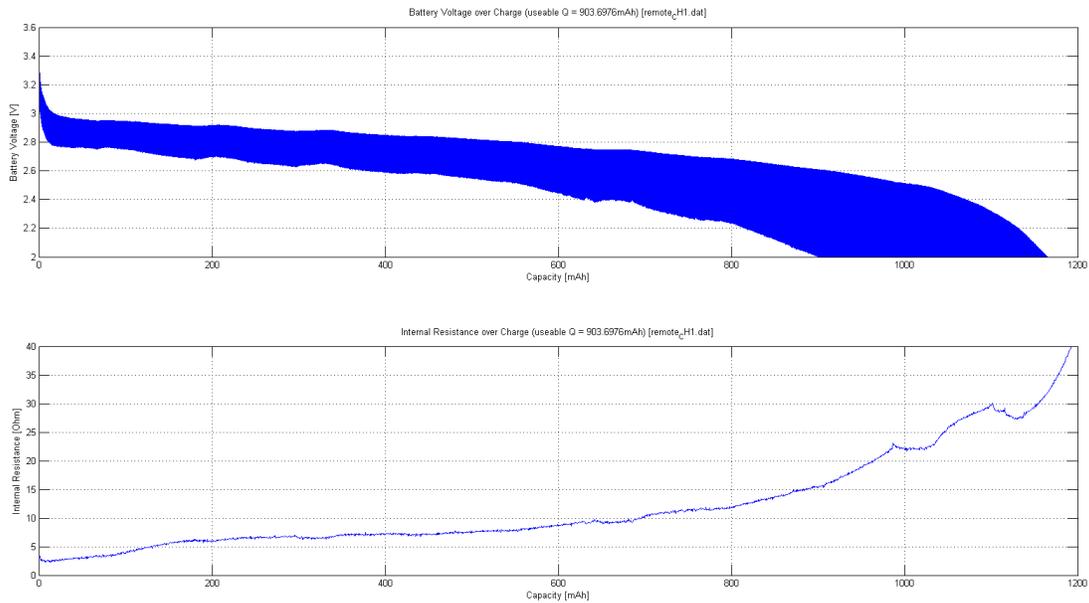


Abbildung 5.39: CR2450 1S2P: Pulsstromprofil mit 24 mA, 20% Duty Cycle, 0.04% SOC-Schrittweite

I_{pk} [mA]	t_{on} [s]	I_{off} [mA]	t_{off} [s]	DC [%]	Δ SOC [%]	$Q_{useable}$ [mAh]	$Q_{useable}$ [%]
24	16	0	66	20	0.01	885	80

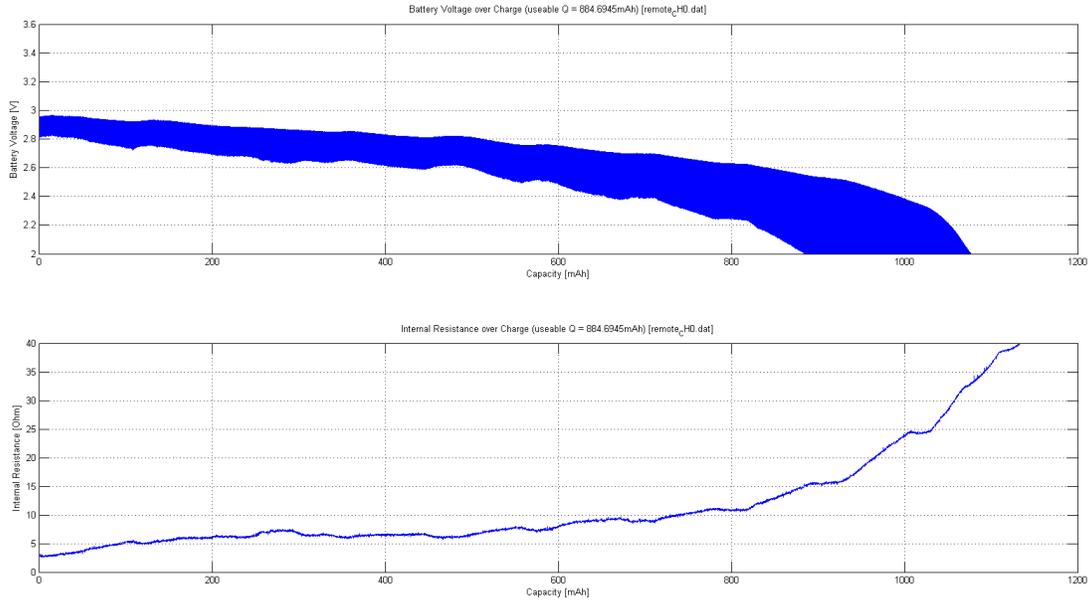


Abbildung 5.40: CR2450 1S2P: Pulsstromprofil mit 24 mA, 20 % Duty Cycle, 0.01 % SOC-Schrittweite

2-Kanal Arbiträrenladesystems bemerkbar. Durch die beobachtete deutliche Schwankung zwischen den Batterien gleichen Typs waren deutlich mehr Messungen notwendig um die Variation abzuschätzen, als mit dem 2-Kanal-System möglich. Zusätzlich sorgten immer häufiger werdende Ausfälle der Netzwerkanbindung oder unangekündigte Server-Neustarts dafür, dass das Remote-Logging des 2-Kanal Arbiträrenladesystems fehlschlug und dadurch Messdaten verloren gingen. Aus diesem Grund wurde beschlossen, ein neues Messsystem zu entwerfen, und nach Fertigstellung dessen wurden die neuen Konstant- und Pulsentladesysteme zur weiteren Charakterisierung der Batterien verwendet.

Definition eines Test-Stromprofils für das Pulsentladesystem

Mit den in diesem Abschnitt beschriebenen Erkenntnissen, die aus Messungen mit dem 2-Kanal Arbiträrenladesystem gewonnen wurden, wurde für spätere Messungen mit dem Pulsentladesystem ein pulsartiges Stromprofil definiert, welches zur Bestimmung der nutzbaren Kapazität für die ESL-Anwendung genutzt werden sollte. Dabei musste ein Kompromiss zwischen Messdauer und Realismus des Profils getroffen werden. Wird ein Profil mit hohen Lastströmen und langer Einschaltzeit gewählt, ist zwar die Testzeit kurz, jedoch stellt das Stromprofil eine deutlich höhere Belastung für die Batterie dar. Wie in den Messungen in diesem Abschnitt dargestellt kommt es dazu zu einer deutlich geringeren gemessenen nutzbaren Kapazität, da die Batterie durch das fordernde Stromprofil überlastet wird. Reduziert man andererseits die Einschaltzeit und den Duty Cycle deutlich, so werden die Ergebnisse zwar immer realistischer werden, die Messungen jedoch auch deutlich länger dauern.

Um repräsentative Ergebnisse für die ESL-Anwendung zu erhalten wurde der Laststrom entsprechend der Anwendung mit dem höchsten zu erwartenden Strom im normalen Betrieb mit 26 mA

gewählt (aktiver SoC, laufende Funkübertragung). Als Einschaltzeit wurde ebenfalls ein realistischer Wert von 1 Sekunde verwendet - in diesem Bereich liegt die Dauer der Funkübertragung eines Bildes⁷. Als Ruhezeit wurde eine Dauer von 59 Sekunden verwendet - das ergibt einen Duty Cycle von 1.7%. Mit Werten in dieser Größenordnung wurden bei den Untersuchungen brauchbare und stabile Ergebnisse erreicht, der durchschnittliche Entladestrom der Batterie liegt bei 0.43 mA und damit deutlich unter dem zulässigen Dauerstrom einer Zelle.

I_{pk} [mA]	t_{on} [s]	I_{off} [mA]	t_{off} [s]	DC [%]	I_{avg} [mA]	Q_{1Day} [mAh]
26	1	0	59	1.67	0.43	10.4

Tabelle 5.1: Standard-Teststromprofil für zukünftige Messungen mit dem Pulsentladesystem

Durch dieses Stromprofil ergibt sich ein Ladungsverbrauch pro Tag von 10.4mAh, die Durchlaufzeit für die vollständige Pulsentladung einer CR2450-Einzelzelle ergibt sich also zu $\leq \frac{Q_{nom}}{Q_{1Day}} = \frac{550mAh}{10.4mAh} \approx 53$ Tage. Dieser Wert ist vertretbar, insbesondere weil üblicherweise keine vollständige Pulsentladung durchgeführt wird, sondern zuvor eine definierte *Vorentladung* mit dem Konstantentladesystem vorgenommen wird.

Messungen mit diesem Test-Stromprofil sind im folgenden Abschnitt dargestellt.

5.3.3 Bestimmung der nutzbaren Kapazität und Batteriestreuung

In diesem Abschnitt werden übersichtsartig die Ergebnisse des Pulsentladesystems aus Abschnitt 4.1.3 präsentiert, die zur Bestimmung der nutzbaren Kapazität (Q_{use}) unterschiedlicher ESL-Typen mit unterschiedlichen Batterien verwendet wurden. Dabei wurden die im Kapitel 3 definierten Methoden zur Bestimmung der nutzbaren Kapazität verwendet. Als Test-Stromprofil dient, wenn nicht anders angegeben, das in Abschnitt 5.3.2 bzw. in Tabelle 5.1 definierte Test-Stromprofil. Als Spannungsschwelle für die Bestimmung der nutzbaren Kapazität werden 2.2 V verwendet, was der getesteten Minimalspannung der ESLs entspricht.

Wenn nicht anders angegeben, wurden die Messungen in diesem Abschnitt bei Raumtemperatur durchgeführt (etwa 23°C, klimatisiert). Vergleichende Messungen bei niedrigeren Temperaturen sind in Abschnitt 5.3.4 zu finden.

Wichtigster Unterschied zu den bisherigen Messungen ist die Möglichkeit, mit dem Pulsentladesystem bis zu 32 Kanäle parallel zu betreiben, und damit pro Durchlauf eine deutlich größere Anzahl an Samples unter den gleichen Bedingungen zu testen.

Vorentladung mit Konstantentladesystem

Üblicherweise wurden die getesteten Batterien/Zellen vor der Pulsentladung durch eine Konstantentladung *vorentladen*, um die Pulstests zu beschleunigen. Durch den vergleichsweise niedrigen Durchschnittsstrom beim verwendeten Pulsstromprofil werden pro Tag etwa 10.4mAh von der Batterie entnommen, ein CR2450 1S2P Pack mit nominal 1100mAh würde daher bis zu 15 Wochen (106 Tage) für einen vollständigen Durchlauf benötigen.

Abbildung 5.41 zeigt eine solche vollständige Entladung eines CR2450 1S2P Packs mit dem Pulsentladesystem. Die grüne Kurve zeigt dabei den Verlauf der Leerlaufspannung (obere Kante der grünen Linie) sowie der Lastspannung (untere Kante der grünen Linie), die orange Kurve zeigt den Verlauf des ohmschen Innenwiderstandes. Beim Innenwiderstand werden ebenfalls die Werte beim Anlegen der Last und beim Entfernen der Last bestimmt (wie in Abschnitt 3.1.4 beschrieben),

⁷bei den zu der Zeit der Definition üblichen kleinen bis mittleren Displaygrößen

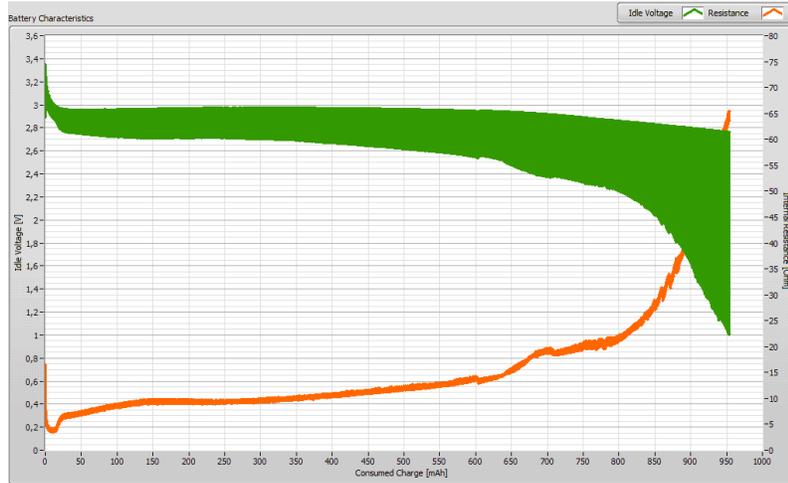


Abbildung 5.41: Vollständige Pulsentladung eines CR2450 1S2P Packs, $Q_{use} \cong 820$ mAh

diese beiden Werte für den Innenwiderstand bei steigender und fallender Last liegen jedoch üblicherweise sehr nah aneinander, für den Innenwiderstand ergibt sich daher nur ein schmales Band. Der in Abschnitt 3.1.4 beschriebene Ionenwiderstand (*Polarisation*) wird in der Innenwiderstandskurve nicht dargestellt, da dieser Effekt in der Lastspannung deutlicher sichtbar ist. Man erkennt, dass bei steigendem Innenwiderstand auch das aufgespannte Band zwischen Leerlauf- und Lastspannung breiter wird. Die nutzbare Kapazität bis zu einer Spannungsschwelle von 2.2 V beträgt etwa 820 mAh.

Die Kurven in Abbildung 5.41 zeigen ebenfalls, dass der Verlauf von Leerlauf- und Lastspannung sowie Innenwiderstand in einem großen Bereich der Lebensdauer sehr flach und damit wenig interessant ist. Aus diesem Grund bietet es sich an, die zeitintensive Pulsentladung für diesen Bereich zu überspringen, und stattdessen eine Konstantentladung durchzuführen, um in den hinteren Bereich der Kurve vorzurücken.

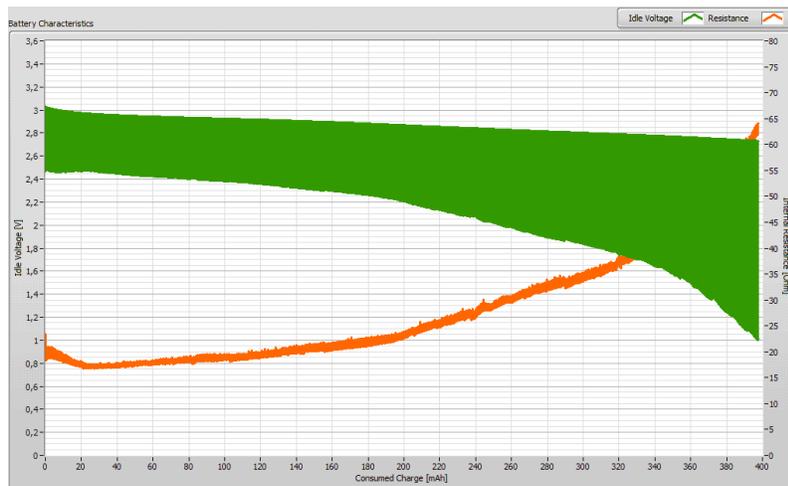


Abbildung 5.42: Pulsentladung eines CR2450 1S2P Packs nach 600 mAh Vorentladung, $Q_{use} \cong 800$ mAh

Dazu zeigt Abbildung 5.42 die pulsformige Entladung nach einer *Vorentladung* von 600 mAh im

Konstantentladesystem. Die vorentladene Kapazität von 600 mAh muss zur entnommenen Kapazität der Pulsentladung addiert werden. Es zeigt sich ein sehr ähnliches Verhalten - die Schwelle von 2.2 V wird bei einer entnommenen Ladung von etwa 200 mAh erreicht, also nach einer gesamt entnommenen Ladung von etwa 800 mAh. Der Verlauf von Lastwiderstand und Innenwiderstand ist ebenfalls sehr ähnlich zum hinteren Bereich von Abbildung 5.41. Dadurch zeigt sich, dass die kombinierte Konstant- und Pulsentladung zu vergleichbaren Ergebnissen wie eine vollständige Pulsentladung führt. Durch den um den Faktor 7 höheren Entladestrom in der Konstantentladestation kann so die Gesamtdauer der Entladung deutlich verkürzt werden.

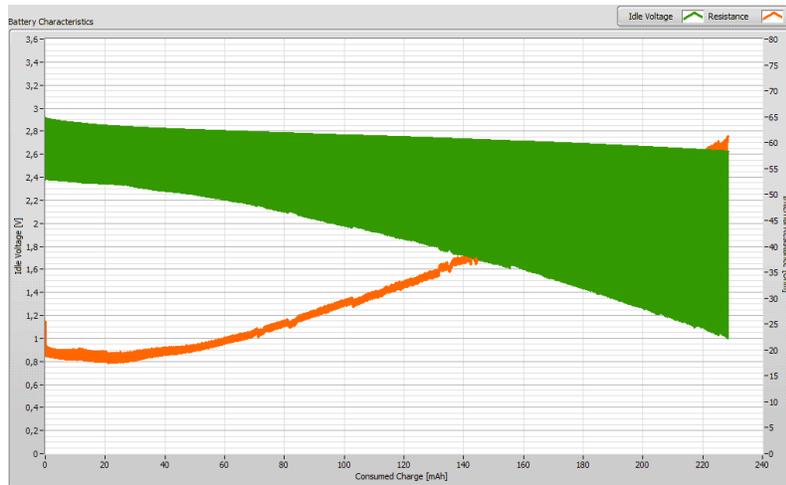


Abbildung 5.43: Pulsentladung eines CR2450 1S2P Packs nach 780 mAh Vorentladung, $Q_{use} \approx 840$ mAh

Dieses Verfahren lässt sich auch noch weiter zur Beschleunigung der Messungen ausnutzen. Abbildung 5.43 zeigt wiederum eine pulsförmige Entladung nach einer *Vorentladung* von 780 mAh. Wieder kommt man auf eine nutzbare Kapazität von $780 \text{ mAh} + 60 \text{ mAh} = 840 \text{ mAh}$.

Die Gültigkeit dieses kombinierten Messverfahrens wurde ebenfalls in Gesprächen mit Experten von Varta Microbattery bestätigt. Die Abweichung zwischen den gemessenen nutzbaren Kapazitäten lässt sich durch die Schwankung zwischen den Batterien erklären. Im Verlauf dieses Kapitels wird der Umfang der möglichen Streuung noch demonstriert.

Besonderheiten in den Entladekurven

Die während der Pulsentladung entstehenden Entladekurven sehen üblicherweise aus wie in den Abbildungen 5.41 bis 5.43 dargestellt. Manche Kurven fallen jedoch durch abweichende Formen auf, wobei es zu unerwarteten Einbrüchen, Stufen oder Sprüngen oder sogar einer Art "Rauschen" in den Ergebnissen kommen kann. Einige solche Abweichungen werden im Kapitel 6 in Abschnitt 6.2.2 diskutiert.

Streuung der Messergebnisse

Wie bereits in den vorherigen Abschnitten beschrieben zeigt das Verhalten der Batterien unter absolut gleichen Bedingungen starke Streuungen zwischen den Batterien, auch innerhalb von Chargen. Zur Verdeutlichung dieser Streuung werden in diesem Abschnitt einige Kurvenscharen gezeigt, die

jeweils einen Testdurchlauf mit der gleichen Batteriecharge unter gleichen Bedingungen am Pulsentladesystem darstellen.

Um die Kurvenscharen übersichtlicher darzustellen, wurden die üblichen kombinierten Diagramme, die Leerlauf- und Lastspannung sowie Innenwiderstand enthalten, in einzelne Diagramme zerlegt. Diese einzelnen Diagramme enthalten dann die Kurvenscharen *einer* Größe für den durchgeführten Testdurchlauf.

Abbildung 5.44 zeigt solche Kurvenscharen für die Leerlaufspannung, die Lastspannung, den Innenwiderstand bei fallender Last und den Innenwiderstand bei steigender Last von 16 CR2450 1S2P Packs.

Die Leerlaufspannung ist in der ersten Kurve in Abbildung 5.44 dargestellt und zeigt für alle Packs beinahe das gleiche Verhalten. Dabei nimmt die Leerlaufspannung fast linear mit der entnommenen Kapazität ab. *Achtung:* dieses Verhalten gilt nur unter diesem periodischen pulsformigen Stromprofil. Aus Erfahrung mit ESLs ist bekannt, dass sich die Leerlaufspannung bei einem in der Anwendung gebräuchlichen deutlich niedrigeren Duty Cycle bis zum Ende der nutzbaren Batteriekapazität auf eine hohe, annähernd gleichbleibende Leerlaufspannung erholt. Der in dieser Abbildung suggerierte annähernd lineare Zusammenhang zwischen Leerlaufspannung und Ladungszustand existiert in der realen Anwendung **nicht** und kann daher auch nicht zur Bewertung eines Batterieladestandes von Lithiumbatterien verwendet werden.

In der zweiten Kurve in Abbildung 5.44 ist der Verlauf der Lastspannungen dargestellt. Wird beispielsweise eine Spannungsschwelle von 2.2V verwendet, erreicht die schlechteste Batterie in diesem Durchlauf diese Schwelle bei einer entnommenen Kapazität von etwa 820 mAh. Die beste Batterie erreicht die Schwelle bei etwa 960 mAh. Dabei handelt es sich um eine Streuung von 140 mAh, das sind über 10 % der Nominalkapazität von 1100 mAh dieser Batterie. Dadurch ist eine statistische Auswertung dieser Ergebnisse interessant, um einen Erwartungswert für die nutzbare Kapazität und statistische Schranken für deren Schwankung zu definieren.

Die dritte und vierte Kurve in Abbildung 5.44 zeigen den ohmschen Innenwiderstand, der bei fallender Last (Kurve 3) bzw. steigender Last (Kurve 4) berechnet wurde. Die Kurven zeigen dabei keinen signifikanten Unterschied. Dabei kommt es bei den meisten Batterien zu einem rasanten Anstieg des Innenwiderstandes ab einer gewissen entnommenen Kapazität. Betrachtet man die Kurven von Innenwiderstand und Lastspannung gemeinsam, kann man feststellen dass die Lastspannungsschwelle bei einem Innenwiderstand von etwa 25Ω erreicht wird.

Betrachtet man diese Kurven für Batterien anderer Hersteller, so ergibt sich meistens ein ähnliches Bild. Abbildung 5.45 zeigt die gleichen Kurven wie Abbildung 5.44, für den gleichen Batterietyp eines anderen Herstellers unter den gleichen Testbedingungen. Wieder zeigt sich ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Leerlaufspannung und entnommener Kapazität. Bei der Lastspannung ergibt sich ein aufgespannter Bereich von etwa 770 mAh bis 1020 mAh, bis die Spannungsschwelle von 2.2V unterschritten wird. Dabei ergibt sich eine Schwankungsbreite von 250 mAh, also über 20 % der nutzbaren Kapazität.

Allerdings ist hier auffällig, dass sich die Kurvenschar der Lastspannung in zwei Bänder aufteilt. Dieses Verhalten zeigt sich auch bei den wieder recht ähnlichen Kurven des Innenwiderstandes in Abbildung 5.45. Diese dargestellten Kurven dienen jedoch als Extrembeispiel, eine so markante Aufteilung in Bänder wurde in anderen Durchläufen noch nicht beobachtet. Diese und weitere Auffälligkeiten in den Ergebnissen der Pulsentladung werden im Kapitel 6 diskutiert.

Zahlreiche weitere Messungen kommen auf ähnliche Ergebnisse, wobei die nutzbare Kapazität von Hersteller zu Hersteller deutlich schwanken kann. Damit dient das Pulsentladesystem als wertvolles Werkzeug, um die Eignung eines bestimmten Batterieherstellers oder Batterietyps für die ESL-Anwendung zu qualifizieren.

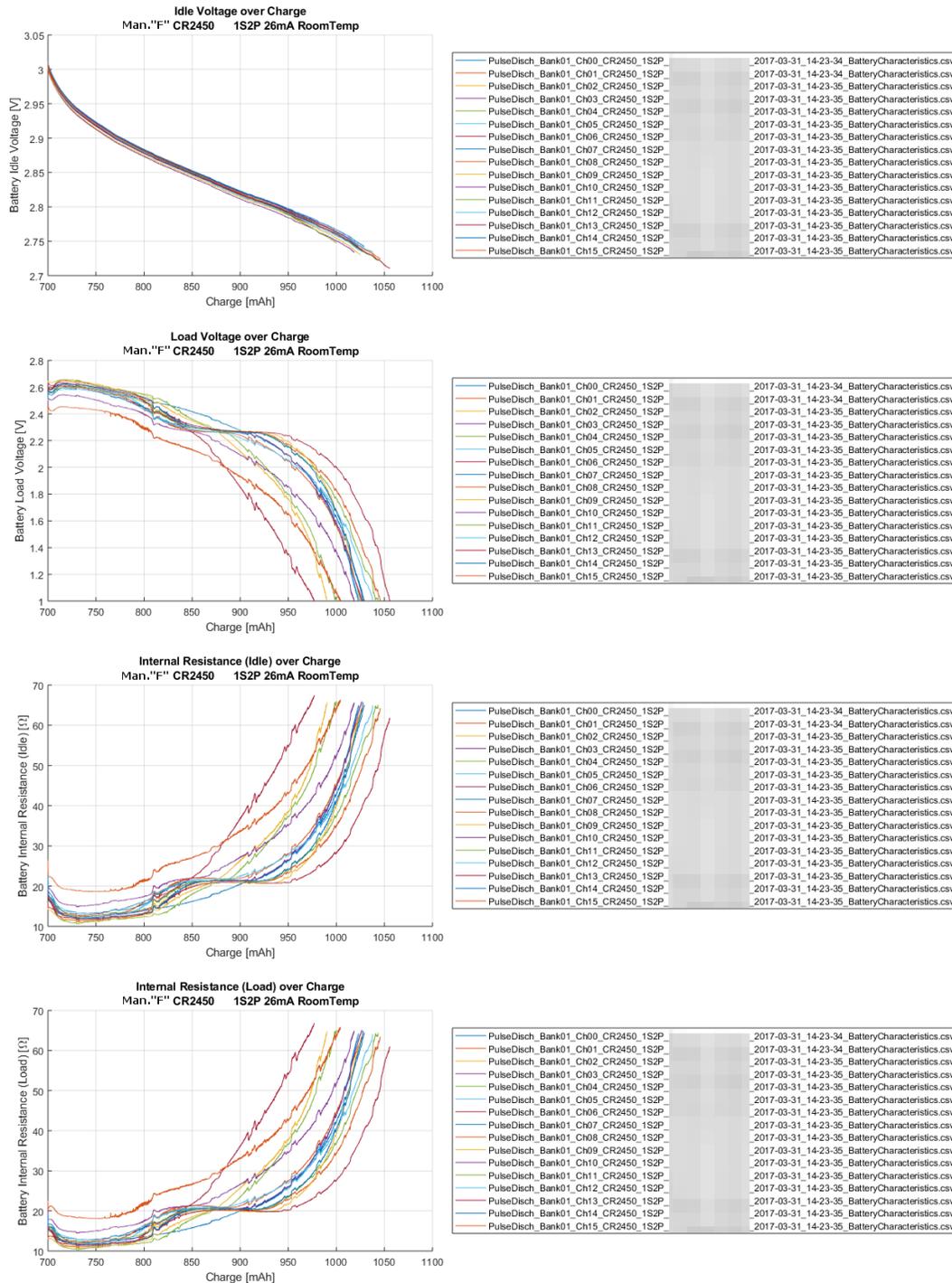


Abbildung 5.44: Kurvenscharen für Leerlaufspannung, Lastspannung, Innenwiderstand bei fallender Last und Innenwiderstand bei steigender Last für 16 CR2450 1S2P Packs bei Raumtemperatur, $Q_{use} \approx 820 - 960$ mAh

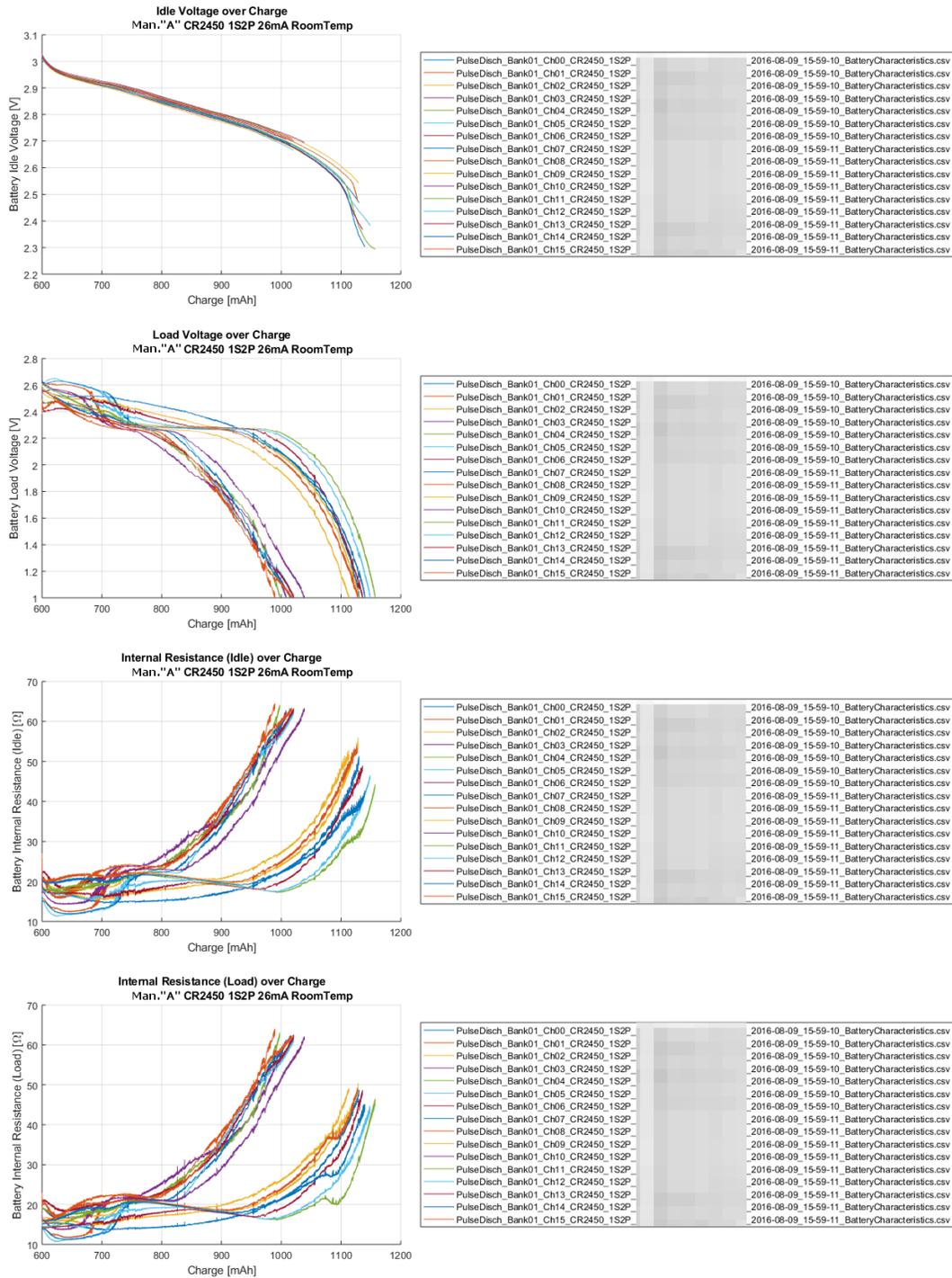


Abbildung 5.45: Kurvenscharen für Leerlaufspannung, Lastspannung, Innenwiderstand bei fallender Last und Innenwiderstand bei steigender Last für 16 CR2450 1S2P Packs eines anderen Herstellers bei Raumtemperatur, $Q_{use} \approx 770 - 1020$ mAh

Dabei stellte sich heraus, dass die Kurvenschar der Lastspannungen das bevorzugte Mittel der Bewertung ist. Nachdem die minimale Betriebsspannung durch das System vorgegeben ist, und die tatsächliche Betriebsspannung unter Last direkt aus den Kurven abgelesen werden kann, muss lediglich das Erreichen des Schwellwerts bestimmt werden. Die nutzbare Kapazität von weiteren Batterietypen wurde ebenfalls mit dieser Methode bestimmt, Abbildung 5.46 zeigt beispielsweise die Ergebnisse für eine CR2450 Einzelzelle, mit einer nutzbaren Kapazität von etwa 380 mAh bis 480 mAh.

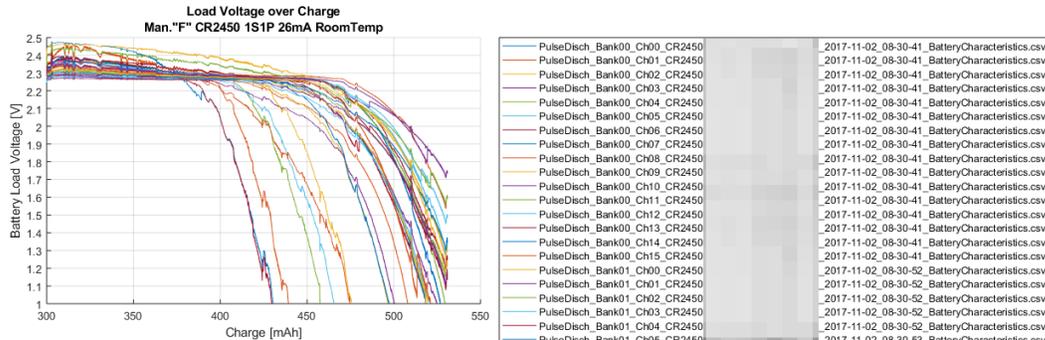


Abbildung 5.46: Kurvenschar für die Lastspannung von 32 CR2450 Einzelzellen bei Raumtemperatur, $Q_{use} \approx 380 - 480$ mAh

Massive Schwankungen von teilweise über 25 % der nutzbaren Kapazität unter gleichbleibenden Bedingungen, wie sie in den Abbildungen 5.44, 5.45 und 5.46 dargestellt sind, sind keine Seltenheit, auch nicht bei namhaften und qualitativ hochwertigen Herstellern.

5.3.4 Abhängigkeit Temperatur

In weiteren Messdurchläufen wurde der Einfluss der Temperatur auf die nutzbare Kapazität ermittelt, nachdem der Temperaturbereich für die ESL-Anwendung schrittweise von Raumtemperatur auf den Kühlbereich (0-10°C) und den Tiefkühl-Bereich (-25°C) erweitert wurde. Dazu sollte evaluiert werden, ob die Batteriepaks die auch im Raumtemperatur-Bereich verwendet werden ebenfalls bei diesen niedrigeren Temperaturen eingesetzt werden können, und welche Reduktion der Batterielaufzeit zu erwarten ist.

Dazu wurden zuerst die CR2450 1S2P Packs, die bereits bei Raumtemperatur qualifiziert waren und in Standard-ESLs verbaut wurden, bei -25°C getestet. Zum Herantasten an die nutzbare Kapazität wurden dabei Vorentladungen auf 100 mAh, 200 mAh, 300 mAh, 400 mAh und 500 mAh durchgeführt, wobei sich jedoch für alle Vorentladestufen das gleiche, in Abbildung 5.47 gezeigte Verhalten einstellte - nach einigen wenigen entnommenen mAh brechen die Batterien auf < 2.2 V ein. Das legt nahe, dass die Zelle bei dieser Temperatur und diesem Stromprofil überlastet ist, und Polarisierungseffekte eintreten, die so stark sind dass sich die Batterie in der verfügbaren Ruhezeit nicht ausreichend erholen kann. Das spiegelte sich auch im Betrieb von Standard-ESLs im Gefrierschrank wider - nach einigen Displayupdates fielen diese ESLs aus. Die Standard-CR2450 sind daher **nicht** für den dauerhaften Betrieb bei -25°C mit diesem Stromprofil geeignet.

Als Alternative wurden Pouchzellen vom Typ CP502440 getestet, die einen deutlich niedrigeren Innenwiderstand als Standard-Knopfzellen aufweisen, und dadurch bei niedrigeren Temperaturen ebenfalls ein besseres Verhalten und eine deutlich höhere nutzbare Kapazität zeigen. Abbildung 5.48 bestätigt dies, die gemessene nutzbare Kapazität liegt bei etwa 650 – 820 mAh.

Später wurden auch vom Hersteller beworbene "Low-Temperature" CR2450 1S2P Packs getestet,

die für den Betrieb bis -40°C und darunter vorgeschlagen wurden. Welche Änderungen an den Zellen vorgenommen wurden, um diesen erweiterten Temperaturbereich zu ermöglichen und das Verhalten bei sehr niedrigen Temperaturen zu verbessern, wurde vom Hersteller nicht preisgegeben. Die Testergebnisse in Abbildung 5.49 zeigen, dass die Batterien tatsächlich funktionieren und Energie abgeben können, ohne wie die Standard-Zellen zusammenzubrechen. Die Lastspannung reduziert sich dabei jedoch auf Werte zwischen 2.2 V und 1.8 V. Kann das System ohne Probleme bis 1.8 V betrieben werden, so stellen diese “Low Temperature”-Zellen eine Alternative für die Pouchzelle dar.

Nach etwa 400 mAh entnommener Ladung wurde die Messung abgebrochen, obwohl noch kein deutlicher Knick der Lastspannung und damit das Ende der Lebensdauer erkennbar war.

Anmerkung: die in diesen Kurven dargestellten *Spitzen* in der Lastspannung entstehen durch das Öffnen des verwendeten Gefrierschranks, wenn beispielsweise weitere Tests im Gefrierschrank laufen und die DUTs getauscht werden. Durch das minutenlange Öffnen erhöht sich die Temperatur der Batterien in den Testfixtures, was zu einer Reduktion des Innenwiderstandes und damit zu einer Zunahme der Lastspannung führt. Sobald der Gefrierschrank wieder geschlossen ist, stellen sich die vorherigen Werte wieder ein.

Nach diesen Messungen wurden noch weitere Tests für den Kühlbereich durchgeführt, wobei sich zeigte dass die Standard-CR2450 1S2P Packs für diesen Zweck ihre Aufgabe erfüllen, die nutzbare Kapazität gegenüber Raumtemperatur jedoch etwas eingeschränkt ist. Vergleicht man diese Ergebnisse mit den Ergebnissen des Standard-CR2450 1S2P Packs für -25°C , bedeutet das, dass der Einfluss der Temperatur bei negativen Temperaturen deutlich zunimmt, während er bis etwa 0°C in einem vertretbaren Bereich bleibt.

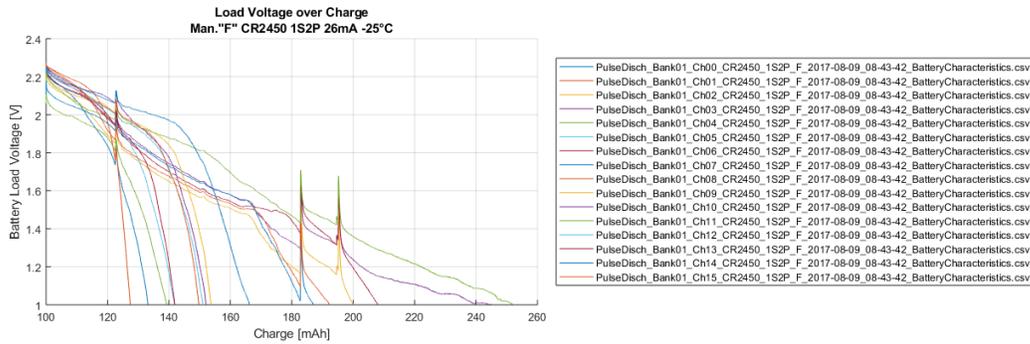


Abbildung 5.47: Kurvenschar für die Lastspannung von 16 Standard-CR2450 1S2P Packs bei -25°C , keine korrekte Funktion möglich

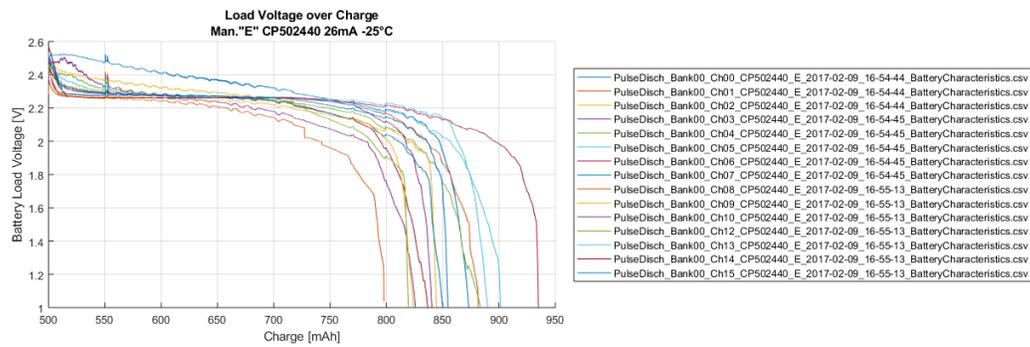


Abbildung 5.48: Kurvenschar für die Lastspannung von 16 CP502440 Pouchzellen bei -25°C , $Q_{use} \cong 650 - 820 \text{ mAh}$

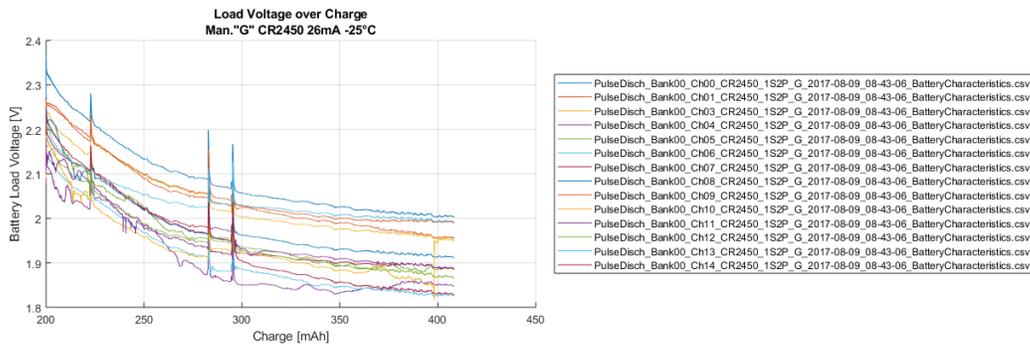


Abbildung 5.49: Kurvenschar für die Lastspannung von 16 "Low-Temperature" CR2450 1S2P Packs bei -25°C , Operation bei Betriebsspannungen bis 1.8 V möglich

Kapitel 6

Conclusio

Das folgende Kapitel stellt eine abschließende Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Arbeit dar. Neben der Bedeutung der Resultate für die Anwendung gibt es ebenfalls ein kurzes Resümee der daraus gewonnenen Erkenntnisse über das Verhalten von Lithium-Knopfzellen in Ultra-Low-Power Anwendungen, und welchen Nutzen diese Erkenntnisse auch in Bereichen abseits der Evaluierung des Batterieverhaltens bringen bzw. bereits gebracht haben.

Im Anschluss an die Zusammenfassung der Ergebnisse und Erkenntnisse sind die Herausforderungen und Probleme beschrieben, die beim Durchführen dieser Arbeit aufgetreten sind. Abschließend wird noch der zukünftige Ausblick für die weiteren Schritte sowie mögliche Verbesserungen des bestehenden Systems beschrieben.

6.1 Zusammenfassung

Hintergrund zur Entstehung dieser Arbeit war die Frage nach der erwarteten Batterielaufzeit von intelligenten Displays, sogenannten *Electronic Shelf Labels* (ESLs) der Firma **SES-imagotag**, die per Funk kommunizieren und zur Anzeige bistabile elektrophoretische Displays nutzen. Nach kurzer Einarbeitung in die Materie stellte sich heraus, dass die Informationen zum Verhalten der verwendeten Lithium-Mangandioxid-Knopfzellen unter den in dieser Anwendung entstehenden pulsformigen Belastungen sehr spärlich gesäät sind. Diese Zellen sind üblicherweise für Anwendungen gedacht, die über lange Zeit hinweg einen niedrigen, konstanten Strom verbrauchen, wie beispielsweise Uhren, Küchenwaagen oder Fahrradcomputer, und sind für solche Anwendungen im Datenblatt auch ausreichend spezifiziert.

Die Anwendung in Electronic Shelf Labels stellt sich jedoch als deutlich fordernder für diese Knopfzellen heraus als die üblichen Anwendungen. Durch die Funkübertragungen kommt es zu kurzen aber hohen Stromimpulsen, die jedoch nur gelegentlich auftreten, während sich das System den überwiegenden Teil der Zeit in einem Deep-Sleep-Modus mit sehr niedriger Energieaufnahme befindet. Durch die verwendete bistabile Displaytechnologie kommt es ebenfalls solange die Anzeige statisch bleibt zu keiner zusätzlichen Stromaufnahme, jedoch zu hohen Strompulsen wenn der Inhalt des Displays geändert werden soll.

Für solche pulsformigen Belastungen, deren Ströme im Pulsfall deutlich über dem zulässigen maximalen Konstantstrom der verwendeten Batterien liegen, findet man in den Datenblättern der Batterien nur in den seltensten Fällen Informationen. Auch die Batteriehersteller selbst können für Lastfälle wie in dieser Anwendung kaum Informationen liefern. Ohne solche Informationen kann man jedoch keine realistische Abschätzung der erwarteten Lebensdauer der Batterien durchführen,

auch wenn man die vorkommenden Stromprofile noch so genau kennt. Erschwerend kommt hinzu, dass die Abnehmer von ESLs verständlicherweise verlangen, dass SES-imagotag eine minimale Batterielebensdauer für die ESLs angibt, die bis auf Ausnahmen nicht unterschritten werden darf. Das bedeutet, dass die Abschätzung der Lebensdauer der Batterie haltbar sein muss, und deswegen die tatsächlich nutzbare Kapazität der Batterien und deren Streuung bekannt sein muss. In den meisten Anwendungen, in denen Lithium-Knopfzellen verwendet werden, ist diese Anforderung weniger streng, besonders im Consumer-Bereich - ist die Batterie entladen, wird sie ausgetauscht und die Sache ist erledigt. Werden bei 20.000 Preisschildern in einem Supermarkt die Batterien leer bevor die angegebene Laufzeit erreicht wurde, ist die Sache komplizierter. Insbesondere, weil es bei einem bistabilen Display nicht ersichtlich ist, dass die Batterie leer ist - der Displayinhalt wird nach wie vor angezeigt.

Aus diesem Grund war die Zielsetzung dieser Arbeit, Messmethoden für die Bewertung des Verhaltens von Batterien in solchen Ultra-Low-Power Anwendungen zu definieren, daraus entsprechende Messsysteme zu entwickeln, und mit diesen Messsystemen die nötigen Tests an Batterien durchzuführen, um Aussagen über deren erwartetes Verhalten in der Anwendung des ESL-Systems treffen zu können. Im Zuge dessen sollte auch die erwartete nutzbare Kapazität der verwendeten Batterien und deren Streuung in dieser Anwendung bestimmt werden, um diese für eine möglichst genaue Abschätzung der erwarteten Batterielaufzeit in der ESL-Anwendung zu nutzen.

Dazu wurden gängige Messmethoden für die Analyse der wichtigsten Eigenschaften von Batterien an die spezifischen Anforderungen im ESL-System adaptiert, und in Form mehrerer Messsysteme implementiert. Diese Messsysteme wurden so konzipiert, dass einerseits die unterschiedlichen Bedingungen simuliert werden können, denen Batterien in der ESL-Anwendung ausgesetzt sind, und andererseits eine große Anzahl an Samples vermessen werden können, um die signifikante Streuung der Batterien erfassen und quantisieren zu können. Dabei wurde auch auf eine statistische Auswertung der Ergebnisse Wert gelegt.

Beim Design und der Implementierung der Batteriemesssysteme wurde darauf geachtet, dass diese aussagekräftige, nachvollziehbare Ergebnisse liefern, die auch für die Anwendung repräsentativ sind. Dabei sollte eine effiziente Erfassung der Messwerte für unterschiedliche Batterietypen möglich sein, ohne dazu viel manuelle Arbeit aufwenden zu müssen. Die Durchführung der Messungen sollte dabei möglichst komfortabel sein.

Aus diesen Vorgaben und Anforderungen entstanden Batteriemesssysteme, die das Verhalten der Batterien bei der Anwendung entsprechenden konstanten oder pulsformigen Stromprofilen automatisiert und autark erfassen können. Dabei wird zwischen einem *Konstantentladesystem* und einem *Pulsentladesystem* unterschieden.

6.1.1 Konstantentladesystem

Das **Konstantentladesystem** ist für die Erfassung der *Nominalkapazität* und der nutzbaren Kapazität unter konstanten Belastungen konzipiert. Dabei wird eine große Anzahl von Messkanälen zur Verfügung gestellt, um bis zu 128 Batterien gleichzeitig über einen konstanten Widerstand oder einen konstanten Strom entladen zu können. Das Ergebnis der Konstantentladung bei einer vollständigen Entladung ist die Nominalkapazität bei dem eingestellten Entladestrom, also die Ladung die unter definierten Bedingungen entnommen werden kann, bis eine definierte Entladeendspannung erreicht wird. Zusätzlich werden Entladekurven aufgezeichnet, die die Batteriespannung über die entnommene Ladung zeigen.

Da diese Kurven bei konstanter Belastung nur eine begrenzte Aussage über das tatsächliche Verhalten in der Anwendung haben, dient die Konstantentladung eher als Verfahren um die im Datenblatt angegebene Nominalkapazität unter verschärften Bedingungen als einfache Qualitätskontrolle zu verifizieren.

Ebenfalls ist mit dem Konstantentladesystem die definierte Entnahme einer gewissen Ladung möglich, um Batterien kontrolliert auf gewisse Ladungszustände bringen zu können. Dazu kann in der Steuersoftware eine Ladungsmenge eingestellt werden, nach deren Erreichen die Batterie automatisch von der Entladestation getrennt wird. Solche *vorentladenen* Batterien werden einerseits für elektrische und funktionale Tests und Analysen der ESLs bei unterschiedlichen Ladungszuständen der Batterie gebraucht, andererseits kann durch die Vorentladung die Testzeit im Pulsentladesystem reduziert werden. Zusätzlich ist eine Bestimmung der *Restkapazität* einer benutzten Batterie möglich, bei bekannter Nominalkapazität kann daraus die in der Anwendung verbrauchte Ladung berechnet werden.

Das Konstantentladesystem kann in Kombination mit einem Verfahren zur beschleunigten Alterung der Batterien auch zur Bestimmung der *Selbstentladung* der Batterie eingesetzt werden. Dazu werden fabriksneue Batterien durch Lagerung bei kontrollierten erhöhten Temperaturen künstlich auf unterschiedliche Stufen gealtert. Nach der beschleunigten Alterung wird die Nominalkapazität dieser unterschiedlich gealterten Batterien und fabriksneuer Batterien bestimmt. Aus den Unterschieden dieser Nominalkapazitäten kann die Selbstentladung der Batterien bestimmt werden.

6.1.2 Pulsentladesystem

Die für die Anwendung interessanteren Eigenschaften von Batterien lassen sich mit Hilfe des **Pulsentladesystems** bestimmen. Dabei werden die getesteten Batterien mit einem definierbaren puls-förmigen Stromprofil belastet, welches durch die Stromprofile in der Anwendung bestimmt wird um dadurch eine Aussage über das Verhalten der Batterien in der Anwendung zu erreichen. Dazu wird zeitlich korreliert zum Stromprofil die Ausgangsspannung jeder Batterie erfasst. Aus den gemessenen Werten an definierten Punkten im Stromprofil lassen sich die *Leerlaufspannung* der Batterie sowie unterschiedliche *Lastspannungen* bestimmen. Aus diesen Werten der Leerlauf- und Lastspannungen lässt sich der *Innenwiderstand* der Batterie berechnen, der sich aus einem ohmschen Anteil und einem Polarisationsanteil zusammensetzt. Diese Messungen werden kontinuierlich durchgeführt, um eine Aussage über den Verlauf dieser Größen über die entnommene Kapazität der Batterie zu erhalten.

Durch die Anforderung einer zeitlich mit dem Stromprofil korrelierten Messung müssen bei dem Pulsentladesystem alle Kanäle gleichzeitig erfasst werden. Dadurch ist kein Multiplexbetrieb wie bei dem Konstantentladesystem möglich, durch zwei verfügbare Kanäle für Stromprofile lassen sich allerdings 32 Messkanäle realisieren. Dabei können prinzipiell beliebige Stromprofile eingestellt werden, üblicherweise werden aber einfache puls-förmige Profile verwendet, die durch Pulsstrom, Pulsdauer und Ruhedauer definiert werden.

Das Ergebnis der Pulsentladung sind Kurven, die den zeitlichen Verlauf von Batteriespannung und Laststrom darstellen, sowie Kurven die das Verhalten von Leerlaufspannung, Lastspannung und Innenwiderstand über die entnommene Ladung darstellen. Aus diesen Kurven lassen sich viele Aussagen über das erwartete Verhalten der Batterie in der Anwendung ableiten. Wird ein für die Anwendung repräsentatives Stromprofil für die Pulsentladung verwendet, lässt sich aus dem Verlauf der Lastspannung die nutzbare Kapazität der Batterie bestimmen. Dabei wird die entnommene Ladung gesucht, bei der die Lastspannung unter die für die Anwendung erforderliche Minimalspannung fällt - zu diesem Zeitpunkt kann das System ausfallen, die Batterie gilt als "entladen". Somit stellt diese entnommene Ladung die *nutzbare Kapazität* der Batterie in dieser Anwendung dar.

Wie sich herausstellt ist die Schwankung zwischen Batterien auch bei mehreren Samples aus der gleichen Charge eines Modells von einem Herstellers sehr hoch. Dadurch muss eine entsprechend große Anzahl an Samples vermessen werden, um eine statistische Abschätzung des Erwartungswerts und der Schwankung der nutzbaren Kapazität durchführen zu können.

Das Pulsentladesystem wird auch dazu verwendet, das Verhalten der Batterien bei unterschiedlichen Bedingungen zu evaluieren. Dazu gehört beispielsweise die Variation der Umgebungstemperatur, um das Verhalten und die nutzbare Kapazität in unterschiedlichen Einsatzszenarien zu bestimmen, beispielsweise bei Raumtemperatur, im Kühlbereich und im Tiefkühlbereich. Ebenfalls können die Auswirkungen unterschiedlicher Stromprofile auf das Verhalten der Batterie mit Hilfe des Pulsentladesystems bestimmt werden.

Durch die geringere Anzahl an Kanälen und die geringere Ladungsentnahme über die Zeit dauert es beim Pulsentladesystem deutlich länger eine gewisse Menge an Samples zu vermessen, als beim Konstantentladesystem. Durch den Einsatz mehrerer Pulsentladesysteme lässt sich dieser Flaschenhals beseitigen.

6.1.3 Kombinierte Nutzung von Konstant- und Pulsentladesystem

Die Problematik der langen Testdauer und des geringen Durchsatzes des Pulsentladesystems lässt sich auch durch eine *Kombination von Konstant- und Pulsentladung* entschärfen. Die Entladekurven von Lithiumbatterien sind über einen sehr breiten Bereich sehr flach, bevor sie gegen Ende der nutzbaren Kapazität mit einem Knick in der Kurve deutlich wegbrechen. Das bedeutet, dass der flache Bereich der Entladekurven wenig Information enthält, und daher nicht von Interesse ist. Der Zeitpunkt, zu dem die deutliche Reduktion der Lastspannung und der deutliche Anstieg des Innenwiderstandes beginnt und damit die nutzbare Kapazität definiert, ist der Bereich von größter Bedeutung in den Entladekurven.

Daher liegt es nahe, den uninteressanten Bereich zu überspringen, und das Verhalten der Batterie bei pulsformiger Belastung erst bei Erreichen dieses interessanten Bereichs zu beobachten. Dazu wird das Konstantentladesystem benutzt, um so viel Ladung zu entnehmen, bis dieser interessante Bereich beinahe erreicht ist. Die Batterie wird dann vom Konstantentladesystem getrennt und an das Pulsentladesystem angeschlossen, um die Beobachtung des interessanten Bereichs bei pulsformiger Belastung zu starten. Die Pulsentladung wird dann so lange durchgeführt, bis eine definierte Entladeendspannung deutlich unter der minimal in der Anwendung erforderlichen Betriebsspannung erreicht wurde. So kann die nutzbare Kapazität wieder ermittelt werden, indem der Wert der *entnommenen Gesamtladung* gesucht wird, bei der die minimal in der Anwendung erforderliche Betriebsspannung unterschritten wird. Diese entnommene Gesamtladung ergibt sich dabei aus der Summe der zuvor im Konstantentladesystem durchgeführten *Vorentladung* und der im Pulsentladesystem entnommenen Ladung.

Durch diese Methode lässt sich die große Anzahl der zur Verfügung stehenden Kanäle des Konstantentladesystems nutzen, um die Pulsentladung deutlich zu beschleunigen und damit den Durchsatz des Pulsentladesystems zu erhöhen.

Diese kombinierte Messmethode wurde verifiziert, indem Batterien zuerst über einen langen Zeitraum vollständig mit dem Pulsentladesystem entladen wurden, und dadurch Kurven des Verhaltens über die gesamte nutzbare Kapazität erstellt wurden. Anschließend wurden Batterien des gleichen Herstellers aus der gleichen Charge unterschiedlich weit vorentladen, und dann mit dem Pulsentladesystem zu Ende entladen. Die dabei entstehenden Kurven wurden übereinandergelegt, wobei bei sämtlichen Batterien der unterschiedlichen Vorentladungen der markante Knick und das Erreichen der nutzbaren Kapazität in etwa bei der gleichen entnommenen Gesamtladung eintrat. Spätere Messungen bei unterschiedlichen Vorentladestufen bestätigten diesen Zusammenhang wiederholt. Später wurde dieses Verfahren auch in Gesprächen mit Experten von Varta Microbattery als gültige Messmethode bestätigt. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass der Konstantentladestrom innerhalb der Spezifikationen der Batterie bleibt, um die nutzbare Kapazität nicht durch Überlastung zu reduzieren und damit die Messergebnisse zu verfälschen.

6.1.4 Kommerzielle Lösungen

Batterietestsysteme mit ähnlichen Funktionen werden auch als kommerzielle Lösung von Anbietern wie MACCOR¹ oder Arbin Instruments² angeboten. Diese Systeme bieten eine große Bandbreite an Lösungen für unterschiedliche Batterietypen und Leistungsklassen, von Kleinstzellen bis hin zu Hochleistungsbatterien aus der Elektromobilität. Der Aufbau ist ähnlich modular, so können Racks mit Einschüben für eine große Anzahl an Messkanälen anwendungsspezifisch aufgebaut werden, ähnlich den in dieser Arbeit entwickelten Messsystemen. Diese professionellen Lösungen sind jedoch für den industriellen Einsatz gedacht, und daher deutlich robuster (und weniger platzsparend) ausgeführt als die für das Labor konzipierten Messsysteme in dieser Arbeit. Die Kosten für solche professionellen Testsysteme belaufen sich jedoch auf ein Vielfaches der in dieser Arbeit präsentierten Systeme.

Vergleicht man die Spezifikationen der Systeme, bieten die professionellen Systeme zwar eine höhere Genauigkeit und höhere Sample Rates (im Fall von Arbin Instruments) bzw. sogar sehr ähnliche Spezifikationen (im Fall von MACCOR), im Grunde genommen aber die gleichen Funktionen. Ein direkter Vergleich mit diesen professionellen Testsystemen ist leider mangels Zugang zu solchen Testsystemen und mangels Erfahrungen mit solchen Testsystemen und deren Steuersoftware und Bedienbarkeit nicht möglich.

Im Vergleich mit den angegebenen Funktionen und Spezifikationen dieser sehr hochpreisigen, professionellen Testsysteme stellt sich das eigens entwickelte Testsystem als ebenfalls sehr leistungsfähiges Equipment dar, das ähnliche Funktionen und Spezifikationen aufweisen kann. Zusätzlich hat das eigens entwickelte Testsystem den Vorteil, dass sowohl die Hardware als auch die Software anhand vieler Erfahrungen und Erkenntnisse genau für die speziellen Anforderungen in dieser Anwendung optimiert wurden. Es ist beispielsweise nicht bekannt, ob mit diesen professionellen Systemen kombinierte Konstant- und Pulsentladungen durchgeführt werden können, um die Messabläufe zu beschleunigen.

6.2 Ergebnisse und Erkenntnisse

In diesem Abschnitt werden die in Kapitel 5 präsentierten Ergebnisse kurz zusammengefasst und diskutiert. Dabei ist anzumerken, dass die Messsysteme weiterhin im Dauerbetrieb sind und laufend neue Ergebnisse produzieren.

Anmerkung: da es sich bei den Ergebnissen dieser Messsysteme und den daraus gewonnenen Erkenntnissen um das eigentliche Know-How hinter der Evaluierung und Qualifizierung von Batterien für solche Ultra-Low-Power Anwendungen handelt, sind diese Informationen firmenintern sehr wertvoll und daher streng vertraulich. Aus diesem Grund werden die erlangten Ergebnisse und Erkenntnisse in dieser Arbeit nur teilweise und übersichtsartig dargestellt. Die Balkendiagramme, die einen Überblick über Nominalkapazität bzw. nutzbare Kapazität bereits vermessener Batterietypen darstellen, werden lediglich rein qualitativ und als Ausschnitte der verfügbaren Daten präsentiert. Diese Übersichtsdiagramme sind daher nur als Anschauungsbeispiele zu verstehen, in denen nicht alle aktuellen Erkenntnisse berücksichtigt sind.

6.2.1 Ergebnisse der Konstantentladung

Die Konstantentladung liefert für die eingesetzten Batterien Messwerte für die Nominalkapazität bei verschärften Bedingungen, sowie die dazugehörigen Entladekurven. Dabei wird im Vergleich zu

¹<http://www.maccor.com/Products/PrimaryCellTesters.aspx>

²<http://www.arbin.com/products/battery-testing/cell-testing/>

den in den Datenblättern durchgeführten *Standardentladungen* mit sehr geringem Entladestrom (*Standard Discharge Current*, typ. deutlich unter 1 mA) der Entladestrom deutlich angehoben. Grund dafür ist einerseits eine Beschleunigung der Tests, andererseits eine Bewertung der Batterie bei verschärften Bedingungen. Kann die Batterie die Nominalkapazität vollständig oder beinahe auch bei deutlich erhöhtem Laststrom liefern, ist dies ein positiver Indikator für eine gute Belastbarkeit der Zelle, und damit einem guten Verhalten unter pulsformigen Stromprofilen.

Dabei lassen sich unterschiedliche Verhalten bei unterschiedlichen Batterietypen und Batterieherstellern feststellen. Während für manche Batterietypen der erhöhte Laststrom kein Problem darstellt, zeigen andere Batterietypen bei dem erhöhten Strom eine deutliche Reduktion der gemessenen Nominalkapazität. Dieses Verhalten spiegelt sich auch in späteren Pulstests wieder, wo die Batterien eine ähnliche Empfindlichkeit gegenüber höheren Strömen, und damit eine deutlich geringere nutzbare Kapazität zeigten.

Für die Anwendung selbst sind jedoch die Ergebnisse der Konstantentladung weniger aussagekräftig, deswegen werden diese Kurven hauptsächlich zur einfachen Qualitätskontrolle verwendet. Bei qualitativ hochwertigen Batterien entsprechen die gemessene Nominalkapazität und die aufgenommenen Kurven in etwa den im Datenblatt angegebenen Werten und dargestellten Kurven. Die Kurven entsprechen den erwarteten Verläufen, ein Beispiel für ein CR2450 1S2P Pack mit 1100 mAh Nominalkapazität ist in Abbildung 6.1 dargestellt, dieser entspricht dem im Datenblatt der entsprechenden Batterie angegebenen Verlauf bis auf eine durch den höheren Laststrom leicht verringerte Ausgangsspannung.

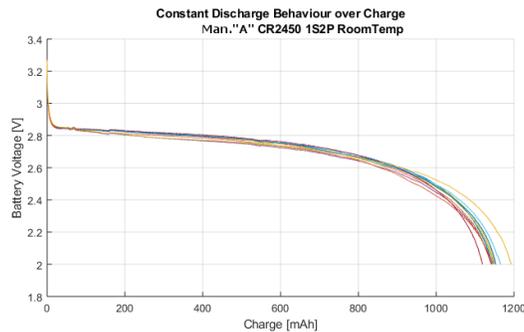


Abbildung 6.1: Konstantentladung eines CR2450 1S2P Packs, gemessene Nominalkapazität 1100 – 1200 mAh (Datenblatt: 1100 mAh)

Abbildung 6.2 zeigt einen rein qualitativen Ausschnitt aus den bis jetzt durchgeführten Messungen zur Bestimmung der Nominalkapazität von unterschiedlichen Batterietypen und -konfigurationen verschiedener Hersteller. Dabei zeigt der rautenförmige Punkt die im Datenblatt angegebene Nominalkapazität, der orange Balken gibt die durchschnittliche gemessene Nominalkapazität an, der schwarz markierte Bereich die Streuung der Messwerte an. Man erkennt, dass manche getesteten Batterien den im Datenblatt spezifizierten Wert erreichen, andere Typen jedoch deutlich davon entfernt liegen. Die Streuung ist auch bei manchen Typen höher als bei anderen Typen.

Aufgefallen ist beispielsweise, dass besonders CR2477-Typen bei dem verschärften Entladestrom Probleme haben, die Nominalkapazität zu erreichen. Dieser Zusammenhang ist ebenfalls in Abbildung 6.2 dargestellt.

Wie beschrieben hat sich der Hauptzweck der Konstantentladung jedoch zur Vorentladung von Batterien für die Pulsentladung, sowie zur Feststellung der Restkapazität bzw. verbrauchten Ladung von Batterien aus Versuchen oder aus dem Feld verschoben. Dazu gehört auch die Messung der durch Selbstentladung verbrauchten Ladung.

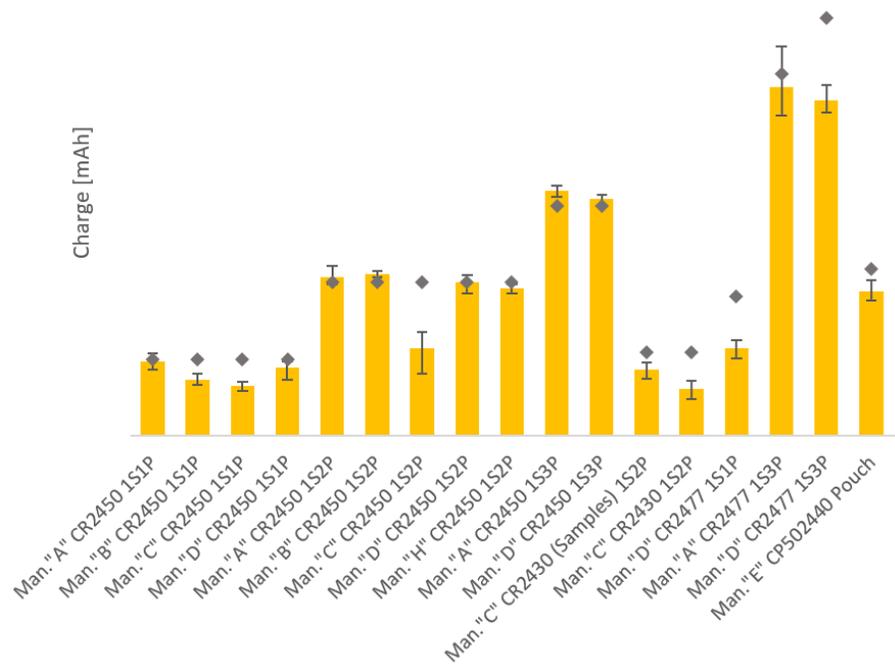


Abbildung 6.2: Ausschnitt der Ergebnisse der Konstantentladungen, rein qualitative Darstellung

Fallbeispiel: deutlich reduzierte Nominalkapazität

Mit Hilfe des Konstantentladesystems konnten neben der initialen Bestimmung und Bewertung der Nominalkapazität auch bereits Qualitätsmängel in gelieferten Batterien festgestellt werden, abseits des Verhaltens bei pulsformiger Belastung. Dabei konnte bei einer getesteten Batteriecharge eine deutliche Reduktion der Nominalkapazität um etwa 20 % festgestellt werden.

Bei Diskussionen mit dem Hersteller wurde herausgefunden, dass der Lieferant der Zellen in der Fertigungslinie für die betroffenen CR2477 die Maschinen für das Einsetzen des Rohmaterials in die Zelle wegen der hohen Nachfrage auf Modelle mit höherem Durchsatz umgestellt hat. Dabei wurden nicht alle Parameter der alten Maschinen korrekt übernommen, und so die Menge an Rohmaterial in der Batterie angeblich unabsichtlich reduziert. Die Parameter wurden nach der Diskussion angepasst, und darauffolgende Chargen erzielten wieder die ursprüngliche Nominalkapazität.

Würden solche Batterien mit reduzierter Kapazität ausgeliefert, so kann es im schlimmsten Fall dazu kommen, dass die versprochene Batterielebensdauer nicht erreicht werden kann und die Batterien deswegen getauscht werden müssen. Speziell durch die große Menge an ESLs die üblicherweise an Kunden geliefert werden, wäre ein solcher Austausch mit sehr viel Aufwand und sehr hohen Kosten verbunden. Mit den verfügbaren Testsystemen ist es möglich, solche Fälle im Vorhinein zu entdecken und dadurch entstehende Probleme zu verhindern.

6.2.2 Ergebnisse der Pulsentladung

Wie beschrieben werden die Ergebnisse des Pulsentladesystems dazu genutzt, um die nutzbare Kapazität unterschiedlicher Batterietypen und Konfigurationen für betreffende ESLs zu bestimmen. Dazu wird die entnommene Gesamtkapazität, bei der die Lastspannung der Batterie die minimal

nötige Betriebsspannung des ESLs unterschreitet, als *nutzbare Kapazität* definiert. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 6.3 anhand eines typischen Verlaufs von Leerlauf- und Lastspannung sowie Innenwiderstand noch einmal dargestellt. Das abgebildete Diagramm wird vom Pulsentladesystem in dieser Form für jeden abgeschlossenen Kanal generiert, es stellt den Verlauf der Ausgangsspannung der Batterie grün dar, wobei die obere Kante der Leerlaufspannung entspricht, und die untere Kante der Lastspannung. Aus diesen Werten wird der Innenwiderstand errechnet und mit einer orangenen Kurve dargestellt.

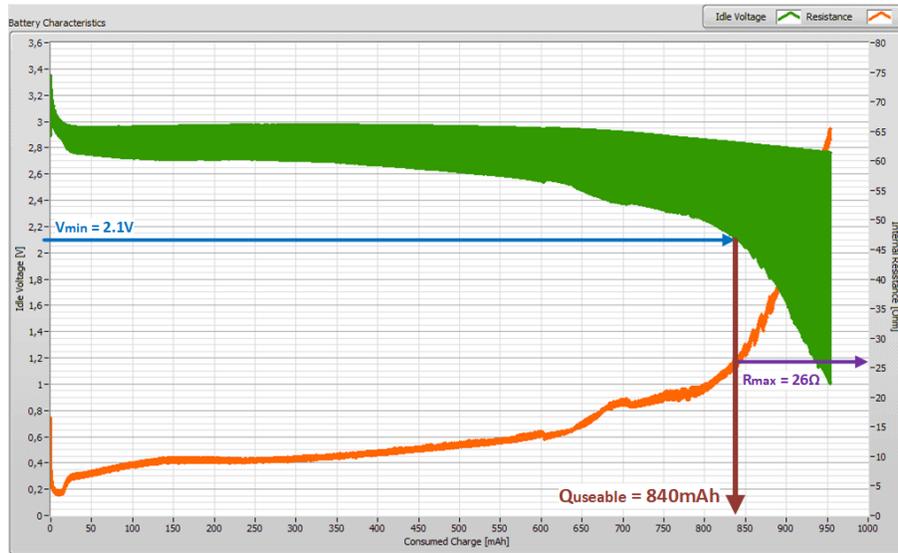


Abbildung 6.3: Feststellung der nutzbaren Kapazität durch Pulsentladung eines CR2450 1S2P Packs bis 2.1 V, gemessene nutzbare Kapazität 840 mAh (Nominalkapazität: 1100 mAh)

Was in der Theorie einfach klingt, wird in der Anwendung durch die große Streuung zwischen den Batterien deutlich erschwert. Dabei sind Unterschiede der gemessenen nutzbaren Kapazität von bis zu 20 % keine Seltenheit, auch bei Batterien von namhaften und qualitativ hochwertigen Herstellern. Diese große Streuung sorgt dafür, dass sich ein großer möglicher Bereich ergibt, in dem die nutzbare Kapazität liegen kann. Nachdem die Batteriebensdauer der ESLs als Minimalwert angegeben wird, den der größte Teil der ESLs erreichen muss, ist es unumgänglich für die Berechnung oder Auslegung der Batteriebensdauer den schlechtesten Wert der nutzbaren Kapazität als *worst case*-Wert zu verwenden. Das heißt aber auch, dass eine "gute" Batterie mit 20 % höherer nutzbarer Kapazität eine deutlich längere mögliche Laufzeit aufweisen wird.

Durch eine statistische Auswertung der Verteilung dieser nutzbaren Kapazität lässt sich abschätzen, wo der Erwartungswert der nutzbaren Kapazität und damit auch der Erwartungswert der resultierenden Batteriebensdauer liegen wird. Analog lässt sich die statistische Verteilung der abgeschätzten Lebensdauer ermitteln, um die Wahrscheinlichkeit für die Ausfallrate bei einem gewissen Alter bestimmen zu können. Um diese Verteilung repräsentativ zu erfassen, muss eine dementsprechende Anzahl Stichproben vermessen werden. Dazu wird üblicherweise ein voller Testdurchlauf des Pulsentladesystems mit 32 Stichproben aus der gleichen Batteriecharge verwendet. Gibt es Zweifel an der dadurch gemessenen Streuung, kann die Messung mit weiteren Stichproben wiederholt werden, bis eine ausreichende Anzahl an Stichproben erreicht wurde.

Abbildung 6.4 zeigt die Streuung von 16 qualitativ hochwertigen CR2450 1S2P Packs bei Raumtemperatur. Dabei handelt es sich bei allen Samples um das gleiche Modell eines Herstellers, alle

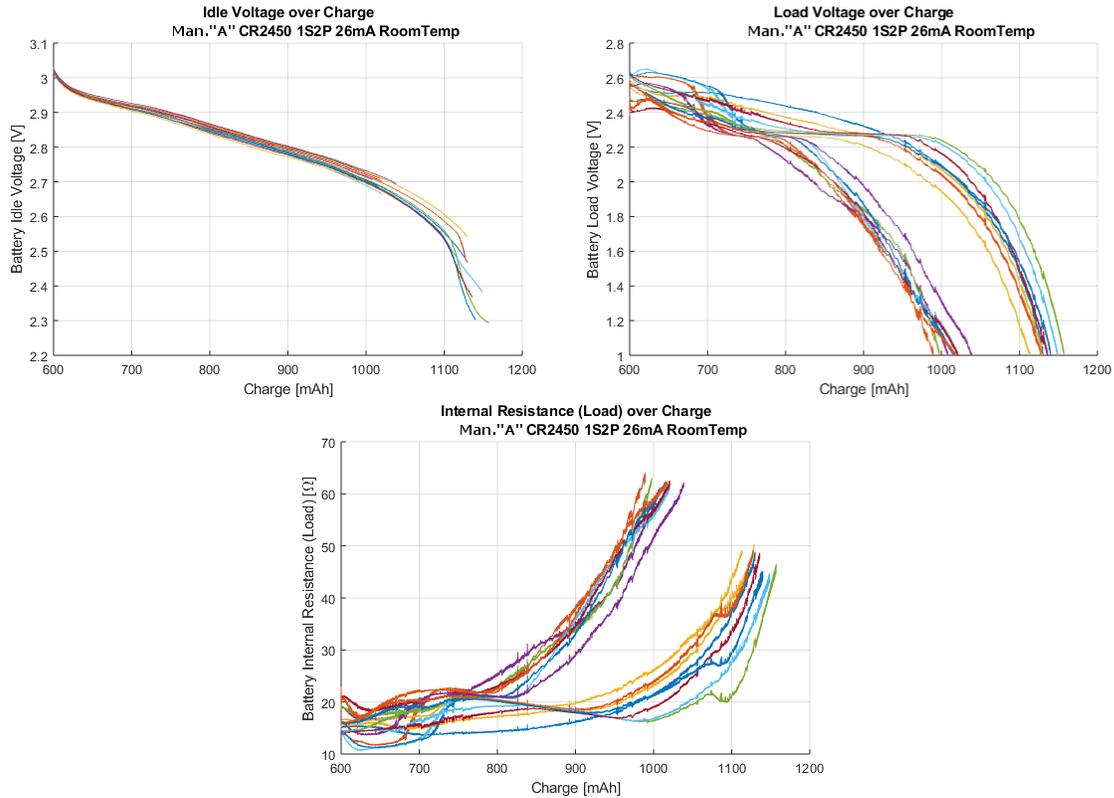


Abbildung 6.4: Kurvenscharen für Leerlaufspannung, Lastspannung und Innenwiderstand von 16 CR2450 1S2P Packs, $Q_{use} \approx 770 - 1020$ mAh (bis 2.2 V), auffällige Verteilung

Stichproben stammen aus der gleichen Charge. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die Kurven nicht in einem Diagramm dargestellt, sondern gruppiert in Leerlaufspannung, Lastspannung und Innenwiderstand zusammengefasst. Dabei ergibt sich bei einer Spannungsschwelle von 2.2 V anhand der Lastspannung eine nutzbare Kapazität zwischen 770 mAh und 1020 mAh der 1100 mAh Nominalkapazität, das entspricht einer Streuung von etwa $900 \text{ mAh} \pm 15\%$. In den Diagrammen für die Lastspannung und den Innenwiderstand lässt sich außerdem eine Konzentration der Verteilung auf zwei Bänder feststellen.

Es gibt mehrere plausible Gründe für diese Bänder - möglich wäre eine (unerwünschte) Mischung von 2 Chargen des Zellherstellers, Zellen aus unterschiedlichen Produktionslinien die geringfügig unterschiedlich eingestellt sind (ebenfalls unerwünscht), oder aber auch ein Wechsel des Rohmaterials, beispielsweise durch ein neues Fass Elektrolyt. Abgesehen davon kann es sich auch um einen reinen Zufall handeln, dass sich bei diesen 16 Stichproben die Kurven in zwei Bereichen anhäufen. Die in Abbildung 6.4 gezeigten Kurven stellen ein Extrembeispiel dar, eine so deutliche Aufspaltung wurde seither nicht mehr beobachtet. Es kann jedoch ausgeschlossen werden, dass die Aufspaltung durch einen Einfluss der Testsysteme entsteht, es zeigt sich keine Korrelation zu den Kanälen der Testsysteme.

Weitere Auffälligkeiten die in den Entladekurven aus dem Pulsentladesystem aufgefallen sind, sind in Abschnitt 6.2.2 beschrieben.

Neben der starken Streuung innerhalb der gleichen Charge eines Batteriemodells des gleichen Herstellers kommt es natürlich auch zu deutlichen Unterschieden zwischen Herstellern oder Batteriemodellen. Je nach Hersteller ist die chemische Zusammensetzung der Batteriebestandteile und

der Aufbau der Batterie leicht unterschiedlich, was zu signifikant verändertem Verhalten führen kann. Dabei kann es auch dazu kommen, dass Batterien von manchen Herstellern durch Pulsströme in der ESL-Anwendung überlastet werden und die nutzbare Kapazität dadurch deutlich reduziert wird. Durch die resultierende starke Verringerung der erwarteten Batterielebensdauer sind solche Batterien für diese Anwendung nicht geeignet, und werden in der Qualifizierungsphase ausgeschlossen.

Diese Erkenntnisse wurden auch bereits in anderen Untersuchungen zu dem Verhalten von Lithium-Knopfzellen in Ultra-Low-Power Anwendungen bestätigt. So stellt etwa ein White Paper [17] von Texas Instruments über das Verhalten von Knopfzellen bei pulsformigen Stromprofilen in einer *Bluetooth Low Energy* Applikation ähnliche Zusammenhänge zwischen der Nominalkapazität und der nutzbaren Kapazität von CR2032 Knopfzellen, sowie deren Unterschiede für verschiedene Hersteller fest. Die Messmethode ist dabei ähnlich, entsprechend dem Stromprofil in der BLE-Anwendung werden Lastströme an die Batterie angelegt, bis die minimale Systemspannung unterschritten wird. Das in diesem White Paper gemessene Verhalten der CR2032 wird als Prozentsatz der nutzbaren Kapazität von der Nominalkapazität bei unterschiedlichen Lastströmen in Abbildung 6.5 dargestellt.

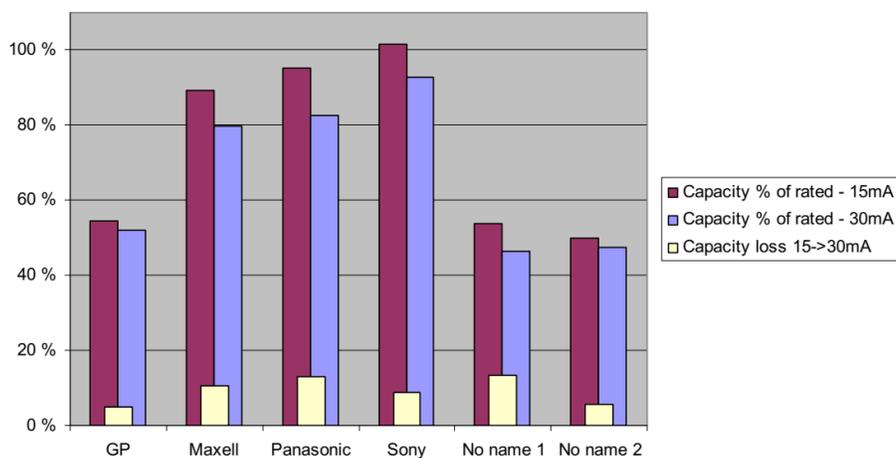


Abbildung 6.5: Ähnliche Ergebnisse der nutzbaren Kapazität als Prozentsatz der Nominalkapazität bei pulsformiger Belastung einer CR2032, aus [17]

Die Vermutung, dass es unterschiedliche Freiheitsgrade zur Optimierung der Zellen auf einen bestimmten Einsatzzweck gibt wurde durch Experten der Firma Varta Microbattery bestätigt. Dabei kann je nach Aufbau und Zusammensetzung der Batterie diese entweder auf eine maximale Nominalkapazität, eine geringe Selbstentladung, oder auf einen niedrigen Innenwiderstand optimiert werden. Dabei wird üblicherweise die Reaktivität des Elektrolyten mit dem Elektrodenmaterial, sowie die Oberflächenbeschaffenheit der Elektroden angepasst. So kann beispielsweise durch eine poröse Elektrodenoberfläche die aktive Oberfläche maximiert werden, um den Innenwiderstand der Zelle zu reduzieren. Durch diese Erhöhung der Oberfläche kommt es jedoch zu einer Reduktion des nutzbaren Volumens der Elektroden, was zu einer Reduktion der Nominalkapazität führt. Größere aktive Oberfläche bedeutet auch eine erhöhte Selbstentladung.

So sind offensichtlich die Zellen mancher Hersteller für eine maximale Nominalkapazität ausgelegt, die jedoch nur bei einem geringeren Laststrom erreicht werden kann. Bei manchen Herstellern macht sich dieser Umstand im Datenblatt bemerkbar, weil eine untypisch erhöhte Nominalkapazität und/oder ein untypisch niedriger maximaler Dauerstrom angegeben ist. Solche auf Kapazität optimierten Batterien sind in der ESL-Anwendung aufgrund ihrer geringeren Belastbarkeit jedoch

weniger geeignet als Batterien die auf niedrigen Innenwiderstand optimiert sind. Seit dem Trend des batteriebetriebenen *Internet of Things* als ähnliche Ultra-Low-Power Anwendung sind inzwischen sogar von manchen Herstellern spezielle Lithium-Knopfzellen verfügbar, die als "optimiert für Pulsbelastungen" beworben werden. Diese Behauptungen haben sich bei einer solchen optimierten Zelle die im Laufe dieser Arbeit evaluiert wurde bestätigt. Genauere Untersuchungen zur "Standard"-Zelle dieses Herstellers sind jedoch noch ausständig, um den tatsächlichen Unterschied der Nominalkapazität, nutzbaren Kapazität und Selbstentladung zu bestimmen.

Man kann vielleicht argumentieren, dass das Test-Stromprofil zur Bestimmung der nutzbaren Kapazität deutlich strenger ist als das tatsächliche Stromprofil in der Anwendung, und dass bei einem sanfteren Stromprofil auch ausgeschiedene Zellen, die für weniger hohe Belastungen ausgelegt sind, ein positives Ergebnis der Qualifizierung erhalten würden. Diese Untersuchungen können im Nachhinein fortgesetzt werden, im Vordergrund steht momentan eine Auswahl von Zellen, die die geforderte nutzbare Kapazität auch unter erschwerten Bedingungen erreichen können.

Temperaturverhalten

Da die ESLs auch für Spezialzwecke im Frischebereich (0-10°C) und im Tiefkühlbereich (-25°C) angeboten werden, wurde das Verhalten der Batterien für diese Bereiche ebenfalls bestimmt. Dabei ergab sich eine deutliche Abhängigkeit des Verhaltens und der nutzbaren Kapazität von der Temperatur.

Messungen zeigten, dass durch die verringerte Temperatur einerseits die Leerlaufspannung abnimmt, und andererseits der Innenwiderstand steigt. Diese beiden Effekte bewirken in Kombination eine deutliche Reduktion der nutzbaren Kapazität. Diese Veränderungen werden unter anderem durch die Verringerung der chemischen Aktivität in der Zelle, sowie die verringerte Ionenleitfähigkeit im Elektrolyten verursacht. Dabei besteht kein linearer Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Verhalten der Zelle. [5]

Messungen machen deutlich, dass dabei Temperaturen über 0°C eine vergleichsweise geringe Auswirkung auf die nutzbare Kapazität haben. Gegenüber Raumtemperatur ist die nutzbare Kapazität zwar merklich eingeschränkt, es kann jedoch noch ein großer Teil der ursprünglichen nutzbaren Kapazität entnommen werden. Zum Zeitpunkt des Erfassens dieser Arbeit standen erst wenige Messergebnisse in diesem Temperaturbereich zur Verfügung, deswegen können erst Abschätzungen durchgeführt werden.

Um die Auswirkungen niedriger Temperaturen abzuschätzen, wurden zuerst Messungen für den schlechtesten Fall durchgeführt, dazu wurden die Batterien bei -25°C pulsförmig entladen. "Standard"-Zellen vom Typ CR2450 zeigen dabei neben einer deutlich verringerten Leerlaufspannung bereits kurz nach Start der Pulsentladung eine kontinuierliche Abnahme der Ausgangsspannung, die minimale Betriebsspannung wird bereits nach einigen entnommenen Milliamperestunden unterschritten. Das bedeutet, dass die Batterie unter diesen Bedingungen den benötigten Strom nicht liefern kann, Polarisierungseffekte sorgen dafür dass die Ausgangsspannung kontinuierlich abnimmt, weil die Batterie durch die verringerte Reaktivität nicht ausreichend Ladung bereitstellen kann, um sich in der Ruhephase des Pulsprofils zu erholen. Wieder kann argumentiert werden, dass für diese Betriebsbedingungen das Test-Stromprofil möglicherweise zu streng definiert wurde. Versuche mit ESLs, die bei -25°C mit Standard-CR2450-Packs betrieben wurden, zeigten jedoch auch dass es bei diesen Bedingungen zu Ausfällen der ESLs kommt, weshalb die Eignung der Standard-CR2450-Zellen für diese Anwendung vorerst ausgeschlossen wurde. In späteren Versuchen kann untersucht werden, ob eine Reduktion des Innenwiderstandes durch eine Parallelschaltung mehrerer Zellen möglicherweise eine Verbesserung bringt. Die Vermutung liegt jedoch nahe, dass die nutzbare Kapazität trotzdem nur einen geringen Teil der bei Raumtemperatur nutzbaren Kapazität betragen wird.

Deswegen wurden im nächsten Schritt Pouchzellen getestet, die aufgrund ihrer Bauweise prinzipiell einen deutlich niedrigeren Innenwiderstand aufweisen. Dieser nimmt zwar ebenfalls mit sinkender Temperatur zu, durch den deutlich geringeren Wert bleibt dabei die Lastspannung unter dem Test-Stromprofil jedoch über einen deutlich größeren Bereich oberhalb der minimalen Systemspannung. Damit kann eine ausreichende nutzbare Kapazität erreicht werden, um ESLs im Tiefkühlbereich zu betreiben. Die Leerlaufspannung der Pouchzelle zeigt ähnlich wie bei der Standard-Knopfzelle ebenfalls einen deutlich verringerten Wert bei negativen Temperaturen. Durch die erhöhten Kosten der Pouchzellen gegenüber Standard-Knopfzellen werden die Pouchzellen auch nur für diese Spezialanwendung verwendet, für die Anwendung bei Raumtemperatur kommen weiterhin Standard-Knopfzellen zum Einsatz.

Zusätzlich wurden spezielle CR2450-Typen getestet, die für Niedertemperaturbetrieb optimiert sind. Dabei stellte sich heraus, dass das Verhalten tatsächlich deutliche Unterschiede zu Standard-CR2450 zeigt. Die Leerlaufspannung reduziert sich zwar auf ähnlich niedrige Werte, es kommt jedoch nicht zu starken Polarisierungseffekten, die die Ausgangsspannung der Zelle unter dem Test-Stromprofil kontinuierlich abnehmen lassen. Die Lastspannung wird zwar ebenfalls deutlich gegenüber der Leerlaufspannung reduziert, dabei stabilisiert sich die Lastspannung jedoch im Bereich von etwa 2.0 V. In diesem Bereich bleibt die Lastspannung dann über einen großen Teil der Entladung, in Messungen wurden nutzbare Kapazitäten > 400 mAh bei CR2450 1S2P Packs mit 1100 mAh Nominalkapazität beobachtet. Die Messung wurde jedoch anschließend abgebrochen. Für die ESL-Anwendung ist üblicherweise eine minimale Betriebsspannung von 2.2 V definiert, kann diese Schwelle jedoch auf 2.0 V oder darunter reduziert werden, wäre ein Einsatz dieser Niedertemperatur-CR2450-Zellen prinzipiell möglich.

Eine weitere Alternative für den Tiefkühlbereich würden die im Kapitel 2 vorgestellten Lithium-Thionylchlorid-Zellen darstellen, die ein deutlich besseres Verhalten bei niedrigen Temperaturen zeigen als die Lithium-Mangandioxid-Knopfzellen. Eine zukünftige Verwendung wäre also möglich, dazu müssen diese Zellen jedoch vorher ebenfalls in den Testsystemen charakterisiert werden.

Bei erhöhten Temperaturen sind weniger Schwierigkeiten zu erwarten als bei niedrigen Temperaturen, da durch die erhöhte Reaktivität der Materialien in der Zelle der Innenwiderstand sinken sollte, und die Leerlaufspannung etwa auf dem gleichen Wert bleiben sollte. Die nutzbare Kapazität müsste aus diesem Grund ähnliche oder höhere Werte als bei Raumtemperatur annehmen. Als problematisch könnte sich die zunehmende Selbstentladung bei höheren Temperaturen herausstellen, durch die die nutzbare Kapazität über lange Zeiträume merkbar reduziert wird.

Nachdem sich die Anwendungen momentan jedoch auf Raumtemperatur und niedrige Temperaturen beschränken, und auch keine Hochtemperatur-ESLs in nächster Zeit geplant sind, wurde das Hauptaugenmerk auf die Charakterisierung bei Raumtemperatur und niedrigen Temperaturen gelegt.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Pulsentladung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Verhalten einer Zelle oder Batterie bei pulsformiger Belastung von sehr vielen Parametern abhängt. Dazu zählt neben der verwendeten Batterietechnologie auch die herstellerabhängige Konstruktion und Zusammensetzung der Zelle, sowie mögliche Optimierungen in Richtung maximale Nominalkapazität oder verringerter Innenwiderstand. Neben diesen zellspezifischen Eigenschaften spielt auch die Konfiguration der Batterie eine große Rolle - werden mehrere Zellen zu einem Batteriepack parallel geschaltet, teilt sich der Laststrom entsprechend auf und die einzelnen Zellen sind geringeren Belastungen ausgesetzt, dadurch erhöht sich die nutzbare Kapazität. Zusätzlich wird der resultierende Innenwiderstand bei parallel geschalteten Batterien ebenfalls reduziert, wodurch sich der Einfluss auf die Lastspannung ebenfalls verringert.

Neben diesen Einflüssen haben auch die Betriebsbedingungen eine deutliche Auswirkung auf das Verhalten und die nutzbare Kapazität der Batterie. So spielt neben dem Stromprofil und den damit verbundenen Spitzenströmen, Pulsdauern und Ruhephasen auch die Umgebungstemperatur eine große Rolle, wobei sich die Entladeeigenschaften der Batterie mit sinkender Temperatur verschlechtern.

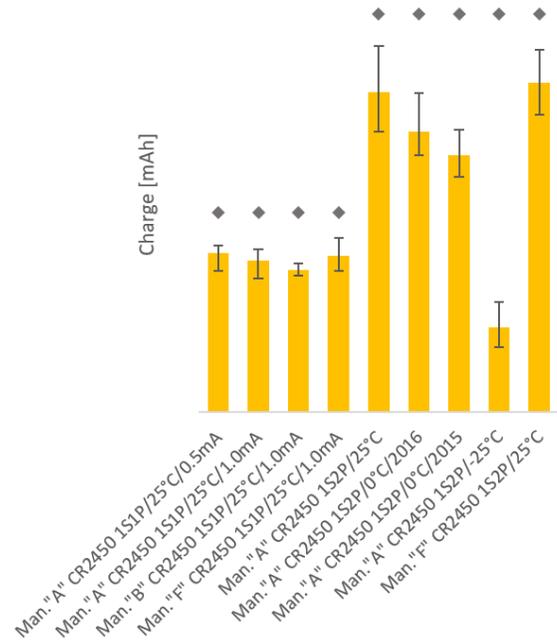


Abbildung 6.6: Anschauungsbeispiel: rein qualitative Betrachtung einiger Ergebnisse der Pulsentladungen

Als Anschauungsbeispiel ist in Abbildung 6.6 eine rein qualitative Übersicht über die nutzbare Kapazität einiger evaluierter Batterietypen dargestellt. Dabei fällt die große Streuung der nutzbaren Kapazität, und die deutliche Schwankung zwischen unterschiedlichen Herstellern auf. Auch beim gleichen Modell eines Herstellers kann es zu Veränderungen der nutzbaren Kapazität aufeinanderfolgender Chargen kommen. So sind in der Übersicht Messwerte für den gleichen Batterietyp mit unterschiedlichem Produktionsdatum dargestellt (2015 und 2016). Der deutliche Unterschied kommt von einer durchgeführten Optimierung der Zelle in Richtung Pulsverhalten (Reduktion des Innenwiderstandes). Dadurch kam es aber auch zu Nebeneffekten, die Charge mit dem verbesserten Innenwiderstand zeigte ein markanteres Passivierungsverhalten. Während dieser Passivierung kam es zu einer Erhöhung des Innenwiderstandes, wenn die Zelle nicht oder nur gering belastet wurde - dieses Verhalten war in den Messdaten deutlich sichtbar. Nach einer Weile Betrieb im Pulsentladesystem normalisierte sich der Innenwiderstand auf typische Werte.

Anhand solcher Daten und Diagramme kann die gemessene nutzbare Kapazität der verwendeten Batterie für die jeweiligen Betriebsbedingungen abgelesen und in die Berechnung der erwarteten Lebensdauer eingesetzt werden.

Auffälligkeiten/Besonderheiten in den Entladekurven

Die während der Pulsentladung entstehenden Entladekurven sehen üblicherweise aus wie in Abbildung 6.3 dargestellt. Manche Kurven fallen jedoch durch abweichende Formen auf, einige solche

Abweichungen werden in diesem Abschnitt dargestellt.

Initial erhöhte Spannung und Passivierung In Abbildung 6.3 erkennt man die erhöhte Spannung einer fabriksneuen Batterie von bis zu 3.5 V zu Beginn der Entladung, die sich jedoch schnell auf die Nominalspannung von etwa 3.0 V reduziert. Diese erhöhte Spannung einer Zelle die noch nie belastet wurde liegt in der Natur der Lithium-Mangandioxid-Technologie. Manche Hersteller vermeiden diese initial erhöhte Spannung, indem eine gewisse Ladung noch in der Fabrik entnommen wird. [5]

Weiters ist ein erhöhter Innenwiderstand zu Beginn der Messung sichtbar, dieser wird durch eine Passivierung der Zelle verursacht, die zuerst abgebaut werden muss. Die Passivierung zeigt sich auch durch die reduzierte Lastspannung ganz am Anfang der Messung, die sich dann kurz erholt und anschließend durch die Reduktion der Initialspannung der fabriksneuen Batterie wieder reduziert. Diese Passivierung kommt wie in Kapitel 2 beschrieben zustande, weil die Lithium-Mangandioxid-Zelle bei keiner oder geringer Belastung eine Schutzschicht an der Anode bildet, die die Selbstentladung reduziert. Diese Schutzschicht erhöht aber auch den Innenwiderstand und muss zuerst abgebaut werden, bevor die volle Leistung der Zelle wieder zur Verfügung steht.

Schwankungen der Temperatur Schwankungen in der Temperatur haben einen deutlichen Einfluss auf den Innenwiderstand der Zelle, und damit auf die Lastspannung. Wie groß dieser Einfluss ist, zeigt die Entladekurve in Abbildung 6.7. Zu Beginn dieser Entladung wurde im Sommer die Klimaanlage in der Kammer, in der die Batterieentladesysteme untergebracht sind, wiederholt ab- und wieder angeschaltet. Dadurch kam es zu einer Erwärmung und Abkühlung der Batterien, diese machen sich in deutlichen Schwankungen des Innenwiderstandes von bis zu 10 Ω bemerkbar, die Lastspannung schwankt dadurch auch um bis zu 0.2 V. Solche Schwankungen sind in den Kurven immer wieder zu sehen.

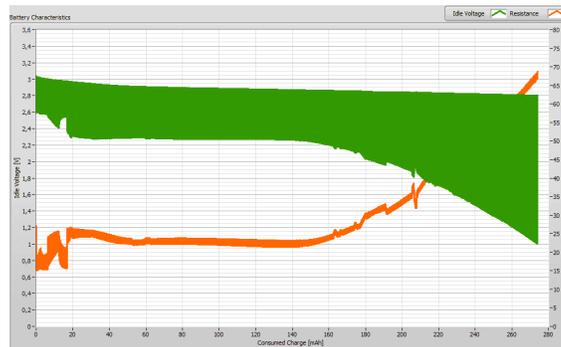


Abbildung 6.7: Sprünge in den Entladekurven, verursacht durch rasche Umgebungstemperaturänderungen

Stufen/Plateaus in der Entladekurve Manche Entladekurven zeigen keinen kontinuierlichen, langsamen Anstieg des Innenwiderstandes und damit eine kontinuierliche, langsame Abnahme der Lastspannung, sondern stufenförmige Veränderungen oder Plateaus in den Entladekurven. Ein solches Beispiel ist in Abbildung 6.8 gezeigt.

In Gesprächen mit Experten von Varta Microbattery wurde erklärt, dass diese Stufen von Änderungen der chemischen Reaktion bzw. der Materialeigenschaften im Inneren der Zelle verursacht werden. Dabei kann es durch Verunreinigungen zu Nebenreaktionen kommen, die sich durch solche



Abbildung 6.8: Entladekurven mit deutlichen Stufen und Plateaus

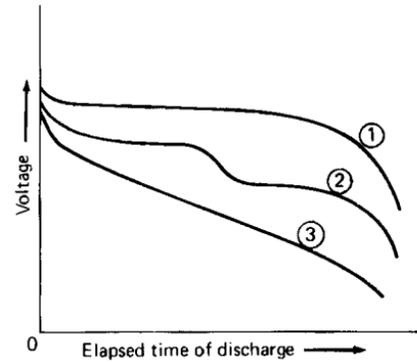


Abbildung 6.9: Entladekurve bei Veränderung des Reaktionsmechanismus in Zellen (2) [5]

Stufen bemerkbar machen. Auch ein ungleichmäßiger Aufbau oder ein ungleichmäßiger Verbrauch der Rohmaterialien in der Zelle kann zu solchem Verhalten führen. Auch mechanische Veränderungen an der internen Struktur der Batterie durch den Materialabbau können zu solchen Phänomenen führen. Diese Aussagen werden auch von der Literatur bestätigt (siehe Abbildung 6.9), die weitere mögliche Ursachen wie Veränderung im aktiven Material und eine dadurch ausgelöste Veränderung der Reaktionsmechanismen erwähnt (vgl. [5]).

Aus diesen Gründen kommen diese Unterschiede im Entladeverhalten nicht nur bei unterschiedlichen Batterietypen oder Herstellern vor, es kann auch sein dass manche Chargen betroffen sind, oder auch ein gewisser Teil innerhalb der gleichen Charge.

“Rauschen” in der Entladekurve In manchen Fällen konnte eine Art “Rauschen” in den Entladekurven festgestellt werden, wie in Abbildung 6.10 dargestellt. Bei Einzelzellen, die üblicherweise in Batteriehaltern getestet werden, wird dieses Rauschen durch schlechte Kontakte der Batteriehalter bzw. Vibrationen oder Temperaturänderungen während den Tests verursacht. In seltenen Fällen tritt ein solches Rauschen jedoch auch bei verschweißten Batteriepacks auf, die mit einem vercrimpten Stecker an das Messsystem angeschlossen sind, und deswegen dieses Verhalten nicht zeigen dürften. Es ist noch nicht geklärt, woher dieses Rauschen in diesem Fall kommt. Mögliche Ursachen wären Mängel bei den Steckverbindern oder der Vercrimpung, Experten von Varta Microbattery berichteten jedoch auch von möglichen Auswirkungen der internen mechanischen Verbindungen, wenn diese mangelhaft sind. Dazu kann es auch zu sprunghaften Änderungen des Innenwiderstands der Zelle kommen. Dieses Phänomen ist noch Gegenstand der Forschung.

6.2.3 Verifikation der Ergebnisse

Wie im Kapitel 3 beschrieben, wurden die Ergebnisse über unterschiedliche Wege überprüft, gegengerechnet und verifiziert. Dabei wurden ESLs unter deutlich verschärften Bedingungen mit tatsächlichen Batterien betrieben, indem beispielsweise kontinuierlich Displayänderungen durchgeführt wurden bis die Batterie entleert war. Über die Anzahl der Displayupdates und der weiteren durchgeführten Operationen kann dann eine gesamte entnommene Kapazität berechnet werden. Diese sollte in etwa mit der bestimmten nutzbaren Kapazität übereinstimmen.

Weitere Verifizierungsmethoden umfassen etwa den realitätsnahen Betrieb über einen längeren Zeitraum mit kontinuierlicher Abfrage der Batterieparameter und einer regelmäßigen Entnahme von Stichproben mit anschließender Auswertung der Restkapazität in den betreffenden Batterien.



Abbildung 6.10: Entladekurven mit deutlichem “Rauschen” bei einem verschweißten 1S2P Batteriepack mit Steckverbinder

Diese sollte mit den errechneten Schätzwerten zusammenstimmen, und die gemessene Lastspannung sollte sich im erwarteten Bereich bewegen.

Zusätzlich werden auch immer wieder Werte aus dem Feld abgefragt, die ebenfalls die erwarteten Werte widerspiegeln sollen. Inzwischen sind die ersten größeren Mengen ausgelieferter ESLs bereits seit etwa 4 Jahren in Betrieb, und die Rücklaufquoten sind weiterhin verschwindend gering. Im Verlauf der nächsten Jahre sollte sich deshalb die Korrektheit der Lebensdauerabschätzung und Batteriecharakterisierung bestätigen.

Alle diese durchgeführten Verifizierungsmethoden kommen auf ähnliche Ergebnisse, was ein gutes Zeichen dafür ist, dass die Abschätzung der nutzbaren Kapazität und die Berechnung der Batterielebensdauer realistisch ist. Eine endgültige Aussage lässt sich jedoch erst treffen, wenn die ersten größeren Mengen an ESLs mit verbrauchter Batterie aus dem Feld gemeldet werden - idealerweise erst deutlich nach Ablauf der versprochenen Batterielebensdauer.

6.2.4 Batteriesimulation

Wie ebenfalls im Kapitel 3 beschrieben wurde, gab es in der Vergangenheit Bemühungen, ein mathematisches Modell einer Lithium-Knopfzelle für diese Anwendung zu erstellen. Damit sollten die Auswirkungen unterschiedlicher Betriebsbedingungen durch Simulation bestimmt werden können, ohne viel Zeit und Aufwand für tatsächliche Messungen zu investieren. Das so geschaffene Batteriemodell wurde mit Messdaten aus tatsächlichen Pulsentladungen trainiert, um Simulationen mit möglichst realitätsnahen Aussagen durchführen zu können.

Wurde mit diesem so trainierten Batteriemodell die Auswirkung eines definierten Stromprofils simuliert, stimmten die Ergebnisse der Simulation gut mit tatsächlichen Messwerten zusammen - solange die Betriebsbedingungen wie das Laststromprofil und die Umgebungstemperatur ähnlich zu den Bedingungen waren, unter denen die Trainingsdaten für das Batteriemodell erstellt wurden. Durch den starken Einfluss dieser Betriebsbedingungen konnte das so trainierte Modell beispielsweise nicht ohne weiteres dazu benutzt werden, ESLs mit deutlich höherer Stromaufnahme zu simulieren. Dazu wären eine Vielzahl weiterer Messdurchläufe notwendig gewesen, um Trainingsdaten für die unterschiedlichen Bedingungen zu erzeugen, diese müssten dann im Batteriemodell korrekt ausgewählt werden um repräsentative Ergebnisse zu erzielen.

Als weitere Schwierigkeit stellte sich die starke Streuung der Batterien untereinander heraus. So waren die Kenntnisse zu gering, um Modelle zu definieren, die das Verhalten einer durchschnittlichen, guten oder schlechten Batterie darstellten.

Aus diesen Gründen wurde die Arbeit an der Batteriesimulation pausiert, mit dem Ziel, diese später bei ausreichender Kenntnis über das Verhalten der Batterien fortzusetzen. Diese Pläne existieren nach wie vor, mit den Messdaten aus den Batterieentladesystemen kommen auch immer mehr Daten zusammen, die später für das Trainieren der Batteriemodelle verwendet werden können.

6.2.5 Selbstentladung

Aus den Messdaten der Entladesysteme konnte auch die Selbstentladung der Batterien abgeschätzt werden. Dazu wurden die Zellen und Batterien bei erhöhter Temperatur entsprechend der Arrhenius-Gleichung *künstlich gealtert* und anschließend die Nominalkapazität nach unterschiedlichen Alterungsstufen gemessen. Daraus kann die Selbstentladung bestimmt werden. Dabei konnte die Angabe im Datenblatt bei Raumtemperatur verifiziert werden. Es zeigte sich auch der in den Datenblättern nicht angegebene Verlauf der Selbstentladung. So kommt es bei neuen Batterien zur höchsten Selbstentladung laut den im Datenblatt spezifizierten Werten, über die Jahre hinweg reduziert sich die Selbstentladung jedoch deutlich.

Der Verlauf der Selbstentladung in Prozent pro Jahr scheint dabei einer Exponentialfunktion zu folgen. Um den tatsächlichen Verlauf zu bestätigen sind jedoch noch weitere Messungen mit einer größeren Anzahl an Samples notwendig. Mit den bisherigen Messungen konnte jedoch die angenommene Selbstentladung bei Raumtemperatur bestätigt werden.

Als Nebenprodukt der künstlichen Alterung für die Bestimmung der Selbstentladung konnten bei der beschleunigten Alterung Qualitätsmängel ansonsten gut bewerteter Batterien festgestellt werden. Dabei kam es nach einigen Monaten im Wärmeschrank zum Austritt von Elektrolyt bei einigen der gealterten Zellen. Dabei nahm die Anzahl der Zellen mit solchen Dichtheitsproblemen mit zunehmendem künstlichen Alter zu. Aus diesem Grund wurde ein zufälliger Fehler ausgeschlossen.

Nach Rücksprachen mit dem Hersteller und weiteren Nachforschungen kam man zu dem Ergebnis, dass einerseits die Rohmaterialien für das Zellgehäuse Qualitätsschwankungen durch Umstellungen in chinesischen Stahlwerken zur Einhaltung kürzlich geltender strengerer Umweltschutzrichtlinien ausgesetzt waren, und andererseits die Werkzeuge zur Verarbeitung der Zellgehäuse nicht ausreichend gewartet wurden, und so scharfkantige Stellen Beschädigungen in den Dichtungen der Zellen verursachten, durch die Elektrolyt entweichen konnte. Der Zellhersteller war von diesen Erkenntnissen und Qualitätsproblemen deutlich überrascht. Es wurden Schritte eingeleitet, um diese Probleme in Zukunft vermeiden zu können.

6.3 Anwendungen der Erkenntnisse

Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse über das Verhalten der Batterien lassen sich einige nützliche Anwendungen realisieren, die bereits ganz oder teilweise eingeführt wurden, oder noch in der Planung sind. Diese "Nebenwirkungen" der Batterieentladesysteme sind in diesem Abschnitt kurz beschrieben.

6.3.1 Detaillierte Qualitätsüberprüfung beim Hersteller

Aus dem Verhalten der Batterien in diesen Messsystemen lassen sich Anforderungen für beschleunigte Tests ableiten, die die Batterien bestehen müssen um einen reibungslosen Betrieb des Systems zu ermöglichen. Dazu gehören Konstantentladekurven bei definierten Lasten, die höher sind als in den Datenblättern üblicherweise angegeben, vereinfachte Messvorschriften für Pulstestverfahren zur Überprüfung der nutzbaren Kapazität der Batterien, sowie weitere Prüfungen der elektrischen

und mechanischen Eigenschaften der Zellen und Batterien. Diese Vorschriften werden in Form von *Anforderungsdokumenten* an die Batteriehersteller und -lieferanten weitergegeben und müssen von diesen bestätigt werden, um sicherzustellen, dass die gelieferte Ware für diesen Einsatzzweck geeignet ist.

In den Anforderungen sind Tests definiert, die entweder einmalig zur Qualifikation durchgeführt werden müssen, oder regelmäßig anhand von Stichproben zur Kontrolle der gleichbleibenden Qualität, oder während der Produktion an jeder produzierten Zelle oder Batterie (beispielsweise eine Lastspannungsmessung bei definierter Last).

Werden die Batterien direkt beim Hersteller anhand dieser Richtlinien und Anforderungen überprüft, und sind die dazugehörigen Messergebnisse zugänglich, kann ein höheres Vertrauen in die Qualität der gelieferten Batterien gelegt werden und auf eine aufwändige laufende Qualifizierung und Qualitätskontrolle bei SES-imagotag verzichtet werden. In diesem Fall reichen Stichproben, um die Glaubwürdigkeit der Messergebnisse zu bestätigen. Ein weiterer Vorteil wäre, dass eine große Anzahl an Messdaten über sämtliche Chargen und Modelle verfügbar wäre, mit denen die Streuung der Parameter besser bewertet werden kann.

6.3.2 Wareneingangskontrolle und Qualitätssicherung

Weigern sich Batteriehersteller, die in den Anforderungsdokumenten definierten Prüfungen durchzuführen oder sind die Ergebnisse nicht glaubwürdig, muss die Qualität der gelieferten Zellen und Batterien wiederum selbst überprüft werden. Um diese Prüfungen an den dafür passenden Ort zu verlagern, sollten diese als Wareneingangskontrolle beim Fertiger der ESLs implementiert werden, um die Qualität der eintreffenden Batterien stichprobenartig zu überprüfen.

Aus den ausgearbeiteten und im Labor erprobten Messmethoden lassen sich vereinfachte Testprozeduren für spezielle Testszenarien definieren. Anhand dieser Prozeduren können industrietaugliche Testsysteme konstruiert werden, die für diese Wareneingangskontrolle in der Fertigung verwendet werden können, um so das Einhalten der Anforderungen an die Batterien zu überprüfen, und ohne große Verzögerung mögliche Qualitätsprobleme feststellen zu können.

Dabei können die gleichen Messmethoden und Test-Stromprofile wie bei der kombinierten Konstant- und Pulsentladung verwendet werden, die so weit automatisiert werden sollte, dass nur eine gewisse Anzahl an Stichproben aus der Lieferung an das Testsystem angeschlossen werden muss, der Batterietyp ausgewählt wird, und die Messung dann gestartet werden kann. Nach Abschluss der Messung innerhalb weniger Wochen sollte dann vom Testsystem anhand bei SES-imagotag vorhandener Referenzdaten eine einfache Bewertung in der Form OK oder NOT OK erfolgen, die dann über die Freigabe der Lagerware entscheidet.

6.3.3 Online-Batteriebewertung

Die bekannten Entladekurven der eingesetzten Batterien können dazu genutzt werden, um anhand der im ESL messbaren Eigenschaften der Batterie (Leerlaufspannung, Lastspannung, Innenwiderstand) auf den momentanen Entladezustand der Batterie rückschließen zu können, um dem Benutzer rechtzeitig eine Warnung über das bevorstehende Ende der Betriebsbereitschaft des ESLs oder einen bevorstehenden Batteriewechsel anzeigen zu können.

Werden diese Daten vom Feld in die Entwicklung zurückgeführt, lässt sich auch das Batteriemodell verfeinern, und das tatsächliche Verhalten der Batterie im Feld genauer bewerten.

6.4 Herausforderungen und Probleme

Während der Entwicklung dieser Messsysteme und der Durchführung der Messungen kam es erwartungsgemäß zu einigen Herausforderungen und Problemen, die gelöst werden mussten. Einige dieser Schwierigkeiten sind in diesem Abschnitt kurz aufgeführt.

6.4.1 Probleme historischer Messmethoden

Während dem Betrieb der in Kapitel 3 präsentierten historischen Messsysteme kam es immer wieder zu Schwierigkeiten und Einschränkungen, die in den darauffolgenden Modellen verbessert und ausgemerzt wurden. So wurde beim Betrieb der Konstantentladesysteme rasch festgestellt, dass die reine Konstantentladung nur wenig Aussage über das tatsächliche Verhalten der Batterien in der Anwendung besitzt. Aus diesem Grund wurden parallel zu den Konstantentladesystemen auch Pulsentladesysteme entwickelt, um die weitaus interessanteren Eigenschaften der Batterien bei Pulsentladung zu bestimmen.

Komplexität und Benutzerfreundlichkeit In diesen Bereichen gab es ständige Verbesserungen der Messsysteme. Während anfangs viele Schritte notwendig waren, um Pulsentladevorgänge in den ersten Arbiträr- und Pulsentladesystemen durchzuführen, läuft inzwischen der Großteil der Vermessungen automatisiert ab. Anfangs mussten die Pulsprofile noch für jeden Durchlauf aufwändig manuell als Folge von Kommandos über die serielle Schnittstelle an die Pulsentladestation gesendet werden, die Messdaten dann von der seriellen Schnittstelle wieder empfangen werden und von einer Software dekodiert und protokolliert werden. Während dem Durchlauf gab es kaum eine Aussage über den Fortschritt der Messung. Die Protokolle mussten dann in Matlab weiterverarbeitet werden, um die Kurven für Leerlauf- und Lastspannung sowie Innenwiderstand zu erhalten. Die vielen Schritte in dieser Kette waren aufwändig, unkomfortabel und fehleranfällig.

In den aktuellen Messsystemen sind die Abläufe so weit automatisiert, dass die Batterien nur mehr angeschlossen werden müssen, die entsprechenden Daten eingegeben werden oder als Template ausgewählt werden, ein vordefiniertes Pulsprofil ausgewählt oder ein neues erstellt wird, und mit Klick auf *Start* die Messung gestartet wird. Während dem Durchlauf sind sämtliche Informationen zum Status und bisherigen Verhalten sichtbar, am Ende der Messung entstehen Protokolle mit aussagekräftigen Werten und grafische Darstellungen der interessanten Verläufe.

Anzahl Kanäle Schnell fiel bei den Messungen auf, dass die Streuung zwischen Batterien gleichen Typs, sogar gleicher Charge, deutlich höher war als angenommen. Durch die wenigen verfügbaren Messkanäle in den ersten Messsystemen waren deswegen mehrere Testdurchläufe notwendig, um eine Aussage über die tatsächliche Streuung der Werte machen zu können. Dabei kam es immer wieder zu Unsicherheiten, weil sich die Umgebungsbedingungen zwischen den Messdurchläufen unterschieden, beispielsweise durch unterschiedliche Temperaturen während unterschiedlicher Jahreszeiten, die durch wochen- bis monatelange Durchlaufzeiten oder kurzfristige Wetterunterschiede und eine fehlende kontrollierte Umgebung verursacht wurden.

Aus diesem Grund wurde bei der Planung und Konstruktion neuer Messsysteme darauf geachtet, eine ausreichende Anzahl an Messkanälen zur Verfügung zu stellen.

Ablage der Messdaten Ein weiteres Problem war die Frage der Protokollierung der Messdaten. Bei Stand-Alone Systemen wie der Arbiträr-entladestation mussten die Messdaten irgendwo abgelegt werden, zur Verfügung stand auf dem zweckentfremdeten ESL Access Point nur eine SD-Karte. Die hier verwendeten kostengünstigen Flash-Speicher bieten eine begrenzte Anzahl von

Schreib- und Löschzyklen. Anfangs wurde die Anzahl der Schreibzyklen auf die SD-Karte durch die Protokollierung unterschätzt, es kam jedoch immer wieder zu Systemausfällen während der Messdurchläufe durch defekte SD-Karten wegen der hohen Anzahl der Schreibvorgänge. Diese Ausfälle waren zwar selten, führten jedoch zum vollständigen Datenverlust des Messdurchlaufs.

Aus diesem Grund wurden die Messdaten über eine Netzwerkverbindung an einen entfernten Server gesendet und dort protokolliert. Das führte jedoch zu weiteren Problemen, wenn dieser Server nicht erreichbar war, wie beispielsweise durch Stromausfälle, Netzwerkausfälle, oder unangekündigte Wartung des Servers. Je mehr die Infrastruktur für andere Prozesse verwendet wurde, desto häufiger wurden solche Ausfälle. Daher wurde beschlossen, die Messsysteme künftig als abgeschlossenes System zu entwickeln, zu dem keine Unberechtigten Zugang haben.

Wie bereits beschrieben war anfangs auch das Format der Protokolle ungünstig und erforderte Post-Processing durch zusätzliche Tools. Inzwischen werden sämtliche interessanten Ergebnisse in den Messsystemen ermittelt und in den Protokollen abgelegt. Der einzige notwendige manuelle Schritt nach einem Messdurchlauf ist die statistische Auswertung der zusammenhängenden Kanäle. Dieser Schritt soll in Zukunft jedoch auch in die Messsysteme integriert werden.

Systemausfälle Bei älteren Systemen gab es ebenfalls häufig das Problem des Datenverlustes bei Ausfall des Messsystems. Diese Ausfälle wurden durch Stromausfälle oder Infrastrukturausfälle (beispielsweise Netzwerkausfall bei der Protokollierung auf einem entfernten Server), oder durch Stabilitätsprobleme der Software oder menschliches Versagen ausgelöst. Um diesem Problem entgegenzuwirken wurden die neueren Entladesysteme als unabhängige und abgeschlossene Inselssysteme aufgebaut, die resistent gegen Ausfälle der Infrastruktur und durch eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) auch resistent gegen Stromausfälle sind. Die Systeme wurden so aufgestellt, dass nur ausgewählte qualifizierte Personen darauf Zugriff haben.

Zwischendurch kam es trotzdem zu vereinzelt Ausfällen, weil es beispielsweise an einzelnen Wochenenden zu Stromausfällen kam, die erst am Montag entdeckt und behoben wurden. Diesen Zeitraum konnte die USV nicht überbrücken, die Messungen wurden ebenfalls unterbrochen. Vorübergehende Abhilfe schaffte der Wechsel auf eine andere Phase des Stromnetzes. Wie sich später herausstellte kam es durch einen defekten Boiler zu zufälligen Netzausfällen, entsprechend Murphy's Law gehäuft an Wochenenden. Ablösung gegen solche Probleme können eigentlich nur redundante USVen schaffen, die mehrere Phasen des Stromnetzes nutzen.

Besonders in der Anfangsphase kam es auch wenige Male zu Systemausfällen wegen Stabilitätsproblemen der Software. Gerade bei komplexen Systemen bei denen mehrere Teilsysteme zusammenarbeiten (wie die Arbiträtentladestation mit Datenumwandlung auf einem externen modifizierten ESL Access Point und Protokollierung auf einem entfernten Server) steigt dabei die Wahrscheinlichkeit für Ausfälle durch Fehler oder Stabilitätsprobleme einer Einzelkomponente. Dieses Problem wurde ebenfalls durch Zusammenführung in ein abgeschlossenes System und ausführliche Softwaretests behoben.

Umgebungsbedingungen Wie bereits angesprochen kam es zu Unsicherheiten in den Messergebnissen, weil sich die Umgebungsbedingungen zwischen den Testdurchläufen änderten. Anfangs waren die Messsysteme noch am Schreibtisch in Betrieb, durch Temperaturschwankungen durch Jahreszeitenwechsel, unterschiedliche Wetterbedingungen und Sonneneinstrahlung, sowie weitere Faktoren kam es dabei zu ständigen Änderungen der Eigenschaften. Diese sind in manchen in dieser Arbeit dargestellten Kurven durch langsame Schwankungen der Ergebnisse erkennbar. Dieses Problem wurde gelöst bzw. verringert, indem die Testsysteme in einem ständig klimatisierten Raum bei möglichst gleichbleibenden Bedingungen betrieben werden.

Lange Test-Durchlaufzeiten Durch prinzipbedingt lange Testdurchlaufzeiten, beispielsweise bei einer vollständigen Pulsentladung einer Batterie, kam es einerseits zu einer stärkeren Auswirkung der zuvor beschriebenen Probleme, andererseits zu längeren Verzögerungen zwischen Start des Tests und Abschluss des Tests mit Resultaten. Deswegen wurden die Durchlaufzeiten verkürzt, indem neuere Messmethoden definiert wurden, wie die kombinierte Konstant- und Pulsentladung.

Replizierbarkeit Die ersten Messsysteme waren hauptsächlich *Bastellösungen*, die auf Lochrasterplatten mit verfügbaren Komponenten aufgebaut waren, und teilweise auf modifizierten Versionen von verfügbaren Baugruppen, wie ESL Access Points, basierten. Das bedeutet, dass der Aufbau eines weiteren Testsystems aufwändig war, und gleichbleibende Ergebnisse schwierig zu erzielen waren.

Um dieses Problem zu beheben, wurden spätere Messsysteme mit eigens dafür entwickelten PCBs aufgebaut, wobei die Ressourcen für das ESL-System genutzt wurden, um professionelle PCBs zu beziehen und professionell bestücken zu lassen. Bei dieser Messhardware wurde großes Augenmerk auf die korrekte und stabile Funktion gelegt, um stabile und nachvollziehbare Messergebnisse zu erhalten. Für die Datenerfassung wurden kommerzielle Systeme, beispielsweise von National Instruments, genutzt. Diese Systeme wurden so gewählt, und deren Steuersoftware so entwickelt, dass der Betrieb an handelsüblichen PCs möglich war.

Dadurch können diese Systeme einfach repliziert werden, indem die entsprechenden Leiterplatten bestellt und laut den definierten Plänen bestückt werden, an das käuflich erworbene Datenerfassungssystem und an den Steuer-PC angeschlossen werden, und die entsprechende Software installiert wird.

6.4.2 Herausforderungen bei Konstant- und Pulsentladesystem

Obwohl die zuvor genannten Probleme bei der Konstruktion der aktuellen Konstant- und Pulsentladesysteme so gut wie möglich berücksichtigt wurden, kam es auch hier zu Schwierigkeiten und Problemen, die es zu lösen galt.

Dabei kam es auch bei der Systementwicklung der überarbeiteten Konstant- und Pulsentladesysteme zu Schwierigkeiten, weil das verwendete Datenerfassungsgerät an seine Grenzen stieß. Das verwendete NI USB-6211 wurde hauptsächlich gewählt, weil es bereits zuvor im Einsatz war, und für die Nutzung in den Testsystemen weiterverwendet werden sollte. Dabei reichte die Anzahl der digitalen IOs und analogen Ausgänge für die ersten Versionen der Konstant- und Pulsentladestation, die noch nicht alle aktuellen Funktionen wie die Abtrennung einzelner Kanäle zur Verfügung stellte. Daher reichten die verfügbaren Ausgänge, um die Multiplexer und Analogschalter anzusteuern.

In den überarbeiteten Messsystemen sollten diese Funktionen jedoch implementiert werden, und dabei das Systemdesign mit dem NI USB-6211 als Datenerfassungsgerät beibehalten werden. Deswegen musste die deutlich aufwändigere Ansteuerung der Multiplexer, Analogschalter, Lastschalter und weiterer Elemente konzipiert und implementiert werden. Wie sich bei der Anpassung der Software herausstellte, sollte diese Lösung hier auch durch die fehlende hardware-getaktete Ansteuerung der Digitalsignale deutlich aufwändiger werden als vermutet. Anstatt vorgegebene Bitmuster auf die digitalen Ausgänge zu schreiben, mussten die einzelnen Flanken und Zustände korreliert durch die softwaremäßige Ansteuerung in Schleifen erzeugt werden. Dabei mussten zahlreiche Optimierungen vorgenommen werden, um die Umkonfiguration der Multiplexer, Analogschalter, Lastschalter und weiterer Elemente in der verfügbaren Zeit zu ermöglichen. Dazu musste bereits in der Konzeptphase ein Design mit mehreren unterschiedlich angesteuerten Schieberegistern erdacht werden, das die benötigten Signale in der vorgegebenen Zeit mit nur 4 langsamen

softwaregesteuerten “statischen” digitalen Ausgängen ermöglichte.

In Retrospektive wäre es vermutlich einfacher gewesen, auf ein anderes Datenerfassungsgerät zu wechseln. Beim Umstieg auf ein fortschrittlicheres *rekonfigurierbares*³ Datenerfassungssystem hätten auch weitere Schwierigkeiten des NI USB-6211 umgangen werden können, wie beispielsweise die Ansteuerung sämtlicher zeitkritischer Vorgänge wie die Erzeugung der Stromprofile, die Ansteuerung der Multiplexer und Anlogschalter, sowie die zeitlich korrekte Erfassung in einem nicht-deterministischen System. Durch die softwarebasierte Steuerung des NI USB-6211 sind sämtliche Vorgänge vom Scheduler und Systemtimer des Windows-Betriebssystems abhängig. Durch den fehlenden Determinismus und die geringe zeitliche Auflösung der Systemtimer kann dabei lediglich in Schritten von minimal einer Millisekunde gearbeitet werden, die jedoch auch nicht garantiert werden. Steht ein Prozess mit höherer Priorität an, beispielsweise systemintern, wird dieser auch ausgeführt und damit die Ansteuerung der Hardware unterbrochen. Dauert dieser Systemprozess sehr lange, kann es auch zu einer deutlichen Verzögerung der Ansteuerung und Messdatenerfassung kommen, und damit zu Messfehlern. Kommt es außerdem zu einem Absturz im System oder zu einem Fehler einer Komponente, kann es passieren dass die Ansteuerung und Erfassung der Messdaten ebenfalls angehalten oder abgebrochen wird.

In einem echtzeitfähigen oder rekonfigurierbaren System könnten diese kritischen Vorgänge in die Hardware ausgelagert werden, das Datenerfassungsgerät besitzt dabei eine eigene CPU mit Echtzeitbetriebssystem sowie optional einen FPGA-Kern, in dem nochmal eine unanhängige Software läuft. Dabei laufen diese Vorgänge deterministisch und garantiert ab, es ist also sichergestellt dass die zeitkritischen oder generell kritischen Vorgänge so ablaufen wie definiert. Der Datenaustausch mit dem Steuerrechner, der hauptsächlich die Kommunikation mit dem Datenerfassungsgerät, die Darstellung und Protokollierung der Daten, sowie das Reagieren auf Benutzerinteraktionen und Darstellen von Informationen übernimmt, ist so gepuffert, dass zeitweilige Kommunikationsstörungen überbrückt werden, und es dadurch zu keinem Datenverlust kommen kann. Fehlerzustände wie der Absturz eines Programmes können erkannt und behoben werden, ohne die Datenerfassung und Ansteuerung der Hardware zu behindern.

Nachteilig wäre die höhere Komplexität der Software für ein solches fortgeschrittenes Datenerfassungsgerät, da die Bestandteile für den FPGA, den Echtzeitprozessor, und den Host getrennt entwickelt werden müssen. Dabei käme es zum Bruch mit dem bestehenden System, welches von Grund auf neu konzipiert und implementiert werden müsste. Die Kosten für solche fortgeschrittenen Datenerfassungsgeräte sind auch deutlich höher als für einfache Geräte wie das NI USB-6211.

Zu weiteren Problemen kam es anfangs im Betrieb durch Ausfälle der Software. Diese Ausfälle entstanden großteils durch Fehler, die zur Laufzeit auftraten, wie der Absturz von Systemkomponenten oder Gerätetreibern durch eine ungünstige Abarbeitungsreihenfolge der Kommandos oder durch zufällige Fehler verursachte ungültige Bedingungen. Durch zusätzliche Sicherheitsabfragen und kontrollierte Fehlerbehandlung konnten diese Probleme vermieden werden.

Weiters kam es zu Abstürzen der *NI Shared Variable Engine*, die verteilte Variablen zur Verfügung stellt, die zur Steuerung des Programmablaufs benutzt werden. Wie sich herausstellte, hat die benutzte Version der LabView Runtime Engine scheinbar Fehler, die den Absturz dieser Shared Variable Engine verursachen können, beispielsweise durch den Verlust der Netzwerkverbindung des Steuer-PC. Durch den Absturz der Engine löst das Abfragen oder Setzen der verteilten Variablen Fehler aus, die zum Stillstand der Steuersoftware führten. Diese Probleme konnten vermieden werden, indem solche Fehler beim Verarbeiten der verteilten Variablen vorübergehend ignoriert werden, falls diese auftreten, um den durchgängigen Betrieb der Testsysteme sicherzustellen.

Anfangs kam es auch immer wieder zu Ausfällen, weil das Betriebssystem aus unbekanntem Gründen neu startete oder der Steuerrechner nicht mehr ansprechbar war. Außerdem kam es zu unzuläs-

³die National-Instruments-Bezeichnung für ein FPGA-basiertes System mit einer Vielzahl an schnellen, korrelierten, “echten” digitalen und analogen IOs

sigen Neustarts, die durch Windows Updates verursacht wurden, obwohl diese Neustarts explizit deaktiviert wurden. Abhilfe schaffte hier der Einsatz eines *Windows Server*-Betriebssystems.

6.4.3 Streuung

Eine weitere Herausforderung war und ist die große Streuung der Messergebnisse. Wie in dieser Arbeit beschrieben ist diese Streuung bei den verwendeten Batterien jedoch systeminhärent und kann nicht vermieden werden. Deswegen muss darauf geachtet werden, dass ausreichend Samples vermessen werden, um die Streuung korrekt bewerten zu können. Bei den 128 Kanälen des Konstantentladesystems ist das leicht möglich, bei den 32 Kanälen des Pulsentladesystems kann es nötig sein, weitere Testdurchläufe durchzuführen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Testbedingungen die gleichen sind, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

Durch die große Streuung ergeben sich auch sehr große Unterschiede in der errechneten Batterielaufzeit für eine “schlechte” und eine “gute” Batterie. Dabei müssen aber auch die schlechtesten Batterien die geforderte Batterielebensdauer erreichen. Dadurch kann es dazu kommen, dass “gute” Batterien eine Laufzeit *deutlich* über der angegebenen Lebensdauer erreichen, und auch durchschnittliche Batterien deutlich über dieser Angabe liegen. Deswegen ist eine statistische Erfassung der gemessenen nutzbaren Kapazität nötig, um auf eine erwartete Verteilung der nutzbaren Kapazität und damit der Lebensdauer zu ermöglichen.

Neben der chargeninternen Streuung kann es auch zu Veränderungen des Batterieverhaltens bei unterschiedlichen Chargen kommen. Es kam bereits vor, dass Batteriehersteller das Verhalten der Batterien optimierten, aber dabei Nebenwirkungen verursachten, die erst bei späteren Messungen festgestellt wurden. Daher ist es wichtig, regelmäßig Vergleichsmessungen bei den gelieferten Batteriechargen durchzuführen. Durch die begrenzte Anzahl der Messkanäle und die eigentlich durchgängige Auslastung der Testsysteme für andere Zwecke ist diese laufende Qualitätskontrolle der Batterien schwierig unterzubringen. Aus diesem Grund soll diese Qualitätskontrolle in Zukunft als ständige Wareneingangskontrolle beim Fertiger oder als Warenausgangskontrolle beim Batteriehersteller durchgeführt werden.

6.4.4 Batteriekontakte

Ein Problem, welches sich in den Testfixtures für Einzelzellen der Testsysteme zeigte, war der Kontaktwiderstand zwischen Knopfzellen und den dafür vorgesehenen Batteriehaltern. Dabei kam es zu einem “Rauschen” der Messergebnisse, das durch Schwankungen des Übergangswiderstandes entsteht. Neben dem Rauschen kam es auch zu kurzzeitigen Sprüngen des gemessenen Innenwiderstands, ohne dass dieses Verhalten auf Temperaturänderungen zurückgeführt werden konnte. Diese Probleme waren beinahe nur bei Einzelzellen feststellbar, die über speziell dafür vorgesehene kommerziell erhältliche Batteriehalter von namhaften Herstellern kontaktiert wurden. Waren die Zellen oder Batterien über Kabel und Steckverbinder angebunden, gab es dieses Problem nicht⁴. Dieses Verhalten konnte später auch bei ESLs der neuen Generation bei Vibration, Stößen oder Temperaturänderungen (die vermutlich minimale Verformungen auslösen) festgestellt werden, in denen statt Batteriepacks nur mehr Einzelzellen verwendet werden und über Batteriekontakte direkt mit der PCB verbunden werden.

Abhilfe schafft hier eine Verbesserung des Designs der Batteriehalter, sowie eine Optimierung von Anpressdruck, Oberflächenbeschaffenheit und der Eigenschaften sowie Anzahl der Kontaktstellen.

⁴in Einzelfällen konnte ebenfalls ein ähnliches Verhalten beobachtet werden, dieses Verhalten wird jedoch momentan noch untersucht

6.5 Ausblick

Natürlich kommt die Entwicklung der Messmethoden und die Durchführung dieser Batteriemessungen nach dem Abschluss dieser Arbeit nicht zum Stillstand, sondern wird weiter vorangetrieben. Dazu gibt es bereits einige Ideen für zukünftige Entwicklungen und Verbesserungen, sowie eine weitere Charakterisierung von unterschiedlichen Batterietechnologien für den Einsatz in Ultra-Low-Power Anwendungen, im speziellen im Bereich der *Electronic Shelf Labels*. Diese sind in diesem Abschnitt kurz überblicksweise zusammengefasst.

6.5.1 Weitere Charakterisierung und Grundlagenforschung

Um das Verständnis der eingesetzten Batterietechnologien weiterhin zu verbessern, wird ein zweites Pulsentladesystem mit einigen Verbesserungen in der Software in Betrieb genommen, welches für die *Grundlagenforschung* zum Batterieverhalten vorgesehen ist. Dabei soll die Wirkung folgender veränderter Bedingungen untersucht werden:

- unterschiedliche Laststromprofile zum Optimieren des Test-Stromprofils
 - Auswirkung von Maximalstrom
 - Auswirkung von Pulsdauer
 - Auswirkung von Ruhedauer
- Auswirkung sehr kurzer Stromspitzen (Millisekunden-Bereich), diese sollten von der Doppelschichtkapazität der Batterien bereitgestellt und damit für die Batterie und den Innenwiderstand “unsichtbar” sein (bis auf den Ladungsverbrauch)
- Auswirkung des Konstantentladestroms der Vorentladung auf die Ergebnisse der Pulsentladung. Hier wurde ein Zusammenhang gesehen, der jedoch noch nicht vollständig geklärt ist.
- Erhöhung der Stabilität der Messergebnisse für den Innenwiderstand durch geringfügigen *Hintergrundstrom* statt reinem Leerlauf in den Ruhephasen, wie in [5] vorgeschlagen
- genauere Untersuchungen zu den Auswirkungen von Temperaturunterschieden, auch bei Temperaturerhöhung

6.5.2 Evaluierung weiterer Batterietypen

Durch die mögliche Notwendigkeit in der Anwendung sollen in Zukunft neben Lithium-Mangandioxid-Zellen auch weitere Batterietechnologien auf deren Verhalten und nutzbare Kapazität untersucht werden:

Lithium-Thionylchlorid-Batterien: da diese Batterietechnologie besonders für Anwendungen im Tiefkühlbereich geeignet scheint, sollte das Verhalten dieser Batterien ebenfalls anhand der zur Verfügung stehenden Testmethoden charakterisiert werden. Für die Spezialanwendung wäre ein Einsatz dieser schlechter verfügbaren und preislich weniger attraktiven Batterietechnologie möglich, um das Produkt für den Tiefkühlbereich zu optimieren. Dabei ist es auch möglich, dass mit einer Lithium-Thionylchlorid-Batterie eine deutlich höhere nutzbare Kapazität erreicht wird als mit speziellen Lithium-Mangandioxid-Knopfzellen oder Pouchzellen, wodurch eine geringere Anzahl an Zellen ausreicht, um die geforderte Lebensdauer zu erreichen, und damit der erhöhte Preis ausgeglichen wird. Dazu muss diese Technologie jedoch zuerst untersucht und getestet werden.

Alkali-Batterien: in Spezialanwendungen mit eingeschränktem Platzbedarf ist es möglich, dass Knopfzellen aufgrund ihres Durchmessers keinen Platz finden. Nachdem kleinere Knopfzellen mit geringerem Durchmesser zwar erhältlich sind, jedoch nur einen Bruchteil der Kapazität aufweisen, wäre eine Lösung mit einer Vielzahl kleinerer Knopfzellen preislich nicht attraktiv. Als Alternative könnten zylindrische Alkali-Batterien verwendet werden, beispielsweise in der sehr kompakten Bauform AAAA. Da diese Batterien jedoch ein deutlich anderes Verhalten als Lithiumbatterien aufweisen, müssen diese ebenfalls zuvor ausreichend getestet werden. Durch die deutlich niedrigeren Innenwiderstände der Alkali-Batterien sollte das Pulsverhalten im Vergleich zu Lithium-Mangandioxid-Zellen jedoch deutlich besser sein. Durch die geringe Ausgangsspannung der Batterie und deren große Schwankung über die Lebensdauer ist für den Betrieb jedoch ein Spannungsregler notwendig, um ESLs damit versorgen zu können. Problematisch könnte die Haltbarkeit und Selbstentladung der Alkali-Batterien werden.

6.5.3 Qualifizierung weiterer Batteriehersteller

Durch den Verbrauch großer Stückzahlen der verwendeten Lithium-Knopfzellen ist es sinnvoll, alternative Hersteller zu qualifizieren, um im Falle von Lieferengpässen reagieren zu können, und das Risiko des Produktionsstillstands durch Probleme eines Batterieherstellers zu verringern. Zusätzlich gibt es ein großes Potential für Kosteneinsparungen, wenn ein preislich attraktiverer Batteriehersteller gefunden werden kann, dessen Batterien die Anforderungen des ESL-Systems ebenfalls erfüllen können.

6.5.4 Mögliche Verbesserungen der Messsysteme

Während der Nutzung der aktuellen Messsysteme sind auch einige Punkte aufgefallen, in denen die Messsysteme noch verbessert werden könnten. Diese Verbesserungen stellen zwar keine Notwendigkeit dar, bewirken jedoch eine Erhöhung der Benutzerfreundlichkeit und Effizienz der Vermessungen. Weiters gäbe es mögliche Optimierungen, die zu genaueren oder stabileren Messergebnissen führen können.

Hardware

Verbesserungen in der Messhardware dienen hauptsächlich zur Steigerung der Benutzerfreundlichkeit. So kommt es beispielsweise zu einem hohen zeitlichen Aufwand, wenn die in der Konstantentladestation vorentladene Batterien in die Pulsentladestation übergeführt werden sollen. Dazu müssen 32 Batterien von einer Station abgesteckt, und an der anderen Station wieder angesteckt werden, da die Batterien einzeln an die Entladestation über 2-polige Verbinder kontaktiert werden. Eine mögliche Verbesserung wäre ein zusätzlicher mehrpoliger Stecker, der dazu genutzt werden kann um externe Testfixtures mit *einem* Steckverbinder zu kontaktieren, in denen sich dann die 32 zu testenden Batterien befinden. So kann dieses Testfixture dann mit einem Steckvorgang von der Konstantentladestation getrennt und an die Pulsentladestation angeschlossen werden. Außerdem können die Batterien am Schreibtisch ergonomisch in dieses Testfixture eingefügt werden. Werden für die Steckverbinder und Kabel geschirmte Varianten verwendet, lassen sich auch kurze Distanzen mit diesen überbrücken. So kann beispielsweise mit einer Leitung ein Batterietest in einem Tiefkühlschrank verbunden werden. Die Kabellängen und Qualität der Steckverbinder dürfen dabei aber keinen signifikanten Einfluss auf die Messergebnisse haben (beispielsweise bei pulsformiger Belastung mit hohen Strömen).

Für die geplanten Testsysteme zur Wareneingangskontrolle wäre eine Industrialisierung der momentanen Messsysteme notwendig, da diese für den Betrieb durch geschultes Personal am Schreibtisch

ausgelegt sind. Für eine Industrialisierung wären robuste Steckverbinder sowie ein generell robuster Aufbau mit einem stabilen Gehäuse notwendig, der einen Einsatz unter rauen Bedingungen in der Fertigung übersteht. Zusätzlich wären Schutzmaßnahmen an den Eingängen notwendig, um Beschädigungen im Fehlerfall zu vermeiden. Außerdem wäre es ratsam, mögliche elektromagnetische Störquellen in der Industrieumgebung auszuschließen - hier wäre beispielsweise die Verbindung der Bänke der Messsysteme über ungeschirmte Stiftleisten ein potentielles Problem.

Sollen mit den Messsystemen zukünftig auch Batterietechnologien mit anderen Ausgangsspannungen getestet werden können, sind möglicherweise Anpassungen an der Messschaltung notwendig. So kann es beim Test von Alkali-Batterien zu Einschränkungen kommen, weil diese bei einer deutlich niedrigeren Spannung arbeiten als Lithiumbatterien (typischerweise 1.65 V bis 0.8 V), bei der die Testsysteme an ihre Grenzen stoßen. So werden bei den Lastschaltern am Eingang p-Kanal MOSFETs verwendet, die eine Thresholdspannung von maximal 0.9 V haben. Sinkt also die Batteriespannung unter 0.9 V, kann unter Umständen die Verbindung zur Last nicht aufrecht erhalten werden. Um dieses Problem zu beheben, wären in einer einfachen Variante MOSFETs mit geringerer Thresholdspannung notwendig, für eine saubere Lösung müssten jedoch andere Schaltelemente verwendet werden, oder eine negative Spannung für die Ansteuerung der Gates verwendet werden.

Eine weitere mögliche Verbesserung der Messschaltung selbst wären zusätzliche Präzisions-Impedanzwandler oder Präzisions-Verstärker mit niedrigem Biasstrom direkt am Batterieanschluss. So kann der Einfluss der Messschaltung auf die Batterie weiter reduziert werden, beispielsweise beim Multiplex der Batteriekanäle auf das Datenerfassungsgerät. Nachdem dieser Fehler aber vernachlässigbar gering ist, kann diese Verbesserung als *nice to have* kategorisiert werden. Werden Verstärker verwendet, lässt sich die Batteriespannung auf den möglichen Eingangsspannungsbereich verstärken, um die maximale Auflösung des Datenerfassungssystems zu nutzen.

Software

Neben den Verbesserungen in der Hardware der Messsysteme gibt es auch noch ein paar mögliche Verbesserungen in der Software. Die nützlichste dieser Änderungen wäre eine Steuersoftware für eine automatisierte kombinierte Konstant- und Pulsentladung. Dabei wäre geplant, dass die bestehende Pulsentladestation mit 32 Kanälen weiterverwendet wird. Über die steuerbaren Stromsenken wird zunächst ein niedriger Konstantstrom eingestellt, und die Batterien so lange entladen bis eine definierte Ladungsmenge entnommen ist (vgl. Vorentladung). Jede Batterie, die diese Ladungsmenge erreicht hat, wird durch den Lastschalter vom Entladesystem getrennt. Wurde bei alle angeschlossenen Batterien die Vorentladung abgeschlossen, sollten alle Lastschalter getrennt sein. Diese bleiben noch für eine definierte Ruhezeit in dieser Stellung, bevor die Schalter wieder geschlossen werden und die Pulsentladung beginnt. Die Pulsentladung läuft dabei gleich ab wie im momentanen Pulsentladesystem und wird durchgeführt, bis die Batterien eine definierte Entladeendspannung erreicht haben. Dann gilt die Messung als abgeschlossen, und die finalen Protokolldateien werden erstellt.

Um die manuelle Auswertung der Ergebnisse zu automatisieren, kann die statistische Auswertung ebenfalls in die Steuersoftware für die Entladesysteme übernommen werden. Dabei muss definiert werden, welche Kanäle für *eine* statistische Analyse verwendet werden sollen - hier müssen natürlich die gleichen Batteriemodelle angeschlossen werden. Für diese Anzahl an Samples werden dann die Messergebnisse entsprechend statistisch ausgewertet, um beispielsweise Erwartungswerte für die nutzbare Kapazität und deren Verteilung zu erhalten. Durch Störungen, die den Ergebnissen überlagert sein können, wird allerdings eine gewisse Intelligenz und Filterung der Ergebnisse benötigt, um sinnvolle Aussagen treffen zu können.

Kombiniert man diese beiden Verbesserungen, lässt sich eine Steuersoftware für das in Abschnitt 6.5.4 erwähnte Testsystem zur Wareneingangskontrolle erstellen. Dabei sollen anfangs nur die Batterien

angeschlossen werden, der korrekte Batterietyp anhand Vorlagen gewählt werden, und der Test mit Klick auf “Start” gestartet werden. Nach Abschluss des Tests soll dann eine einfache Bewertung OK oder NOT OK angezeigt werden. Die Messdaten sollen natürlich in das Repositorium von SES-imagotag rückgeführt werden, um eine gute Abbildung des Verhaltens und der Streuung der eingesetzten Batterietypen zu erhalten.

Eine weitere potentielle Möglichkeit zur Verbesserung der Software stellt eine verbesserte Protokollierung der Messwerte dar. Neben dem Export als CSV-Datei bietet LabView noch weitere Methoden der Protokollierung an, die bevorzugte Form wäre im TDMS-Format, das von National Instruments genau für diesen Zweck definiert wurde⁵. Dabei handelt es sich um ein strukturiertes Dateiformat, welches die Messdaten mit Metainformationen versehen binär ablegt. Dadurch lassen sich die Messdaten hierarchisch gliedern (beispielsweise in Bänke und Kanäle) sowie mit Zusatzinformationen versehen (beispielsweise Kanaleinstellungen und Batterieinformationen).

Durch die Binärform und die Struktur dieser TDMS-Daten (*Technical Data Management Streaming*) lassen sich Messdaten sehr platzsparend und effizient ablegen, sowie strukturiert wieder auslesen. Das Datenformat ist dabei für sehr große Datenmengen geeignet, die in geringer Zeit vollständig oder partiell geschrieben, gelesen, dargestellt und ausgewertet werden können. Das TDMS-Format vereint dabei die Vorteile von Text-, Binär- und XML-Dateien, sowie die Vorzüge einer Datenbank. Dabei gibt es spezielle Anwendungen von National Instruments wie *Diadem*, mit denen Daten in diesem Format gesichtet, verarbeitet und ausgewertet werden können.

Nachteil der TDMS-Daten ist, dass diese von Anwendungen außerhalb des National-Instruments-Universums nicht nativ verarbeitet werden können. Es gibt Importer für Excel, Matlab, und weitere Applikationssoftware, sowie Bibliotheken für gängige Programmiersprachen, die jedoch wieder als Zwischenschritt notwendig sind. Der große Vorteil von Textdateien, dass diese einfach zu importieren sind und “schnell” betrachtet werden können, geht dadurch verloren. Aus diesem Grund wird das TDMS-Format für diese Anwendung momentan nicht verwendet. Für eine zukünftige Version der Software gibt es jedoch Ideen, parallel zu den CSV-Protokolldateien auch TDMS-Daten zu erzeugen, um diese weiterzuverwenden wo diese sinnvoll sind.

Die momentan zur Verfügung stehenden Messsystemen sind jedoch trotz dieser zusätzlichen Ideen uneingeschränkt nutzbar und erfüllen ihren Zweck voll und ganz. Diese Systeme arbeiten seit der Inbetriebnahme im Dauerbetrieb, absolvierten dabei inzwischen eine Vielzahl von Messdurchläufen und liefern am laufenden Band wertvolle Informationen über die getesteten Batterien. Mit diesen Ergebnissen und Informationen lassen sich haltbare Aussagen über das Verhalten sowie über die Ähnlichkeiten und Unterschiede von unterschiedlichen Batterietechnologien in dieser speziellen Anwendung treffen, und daraus die erwartete Lebensdauer mit guter Genauigkeit abschätzen. Zusätzlich lassen sich damit potentielle Qualitätsprobleme entdecken, um unerwarteten Ausfällen im Feld vorzubeugen.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass diese Messsysteme trotz der sehr hohen produzierten Stückzahlen, der großen Bandbreite an Betriebsbedingungen, und der starken Schwankungen der Batterieeigenschaften zu einem ruhigen Schlaf beitragen.

⁵weitere Informationen unter <http://www.ni.com/white-paper/3727/>

Literaturverzeichnis

- [1] “E-ink website,” <http://www.eink.com>, April 2018.
- [2] “Ses-imagotag produktkatalog,” 2015.
- [3] “Ses-imagotag website,” <http://www.ses-imagotag.com>, April 2018.
- [4] S. Nöhmer, “Automated test and measurement system for mcu/rf system-on-chip designs,” Seminar Project, Graz University of Technology, Institut für Elektronik, 2015.
- [5] D. Linden and T. Reddy, *Linden’s Handbook of Batteries*. McGraw-Hill Education, 2011, vol. 4.
- [6] *Handbook of Primary Lithium Cells*, Varta Microbattery, 2010, http://products.varta-microbattery.com/applications/mb_data/documents/sales_literature_varta/HANDBOOK_Primary_Lithium_Cells_en.pdf.
- [7] “Energizer website,” <http://www.energizer.com>, April 2018.
- [8] *EVE ER2450T Data Sheet/Technical Specification*, EVE Energy Very Endure, 2010, <http://en.evebattery.com>.
- [9] *Our Guide to Batteries*, Johnson Matthey Battery Systems, 2012, <http://www.jmbatterysystems.com/JMBS/media/JMBS/Documents/JMBS-Guide-to-Batteries.pdf>.
- [10] C. Daniel and J. O. Besenhard, *Handbook of Battery Materials*. Wiley-VCH Verlag, 2011, vol. 2.
- [11] T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri, and R. Jackey, “High fidelity electrical model with thermal dependence for characterization and simulation of high power lithium battery cells,” *Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International*, 2012.
- [12] “National instruments website,” <http://www.ni.com>, April 2018.
- [13] *NI USB-6211 Specifications*, National Instruments, 2017, <http://www.ni.com/pdf/manuals/375195d.pdf>.
- [14] *NI USB-621x User Manual*, National Instruments, 2009, <https://www.ni.com/pdf/manuals/371931f.pdf>.
- [15] P. Horowitz and W. Hill, *The Art of Electronics*. Cambridge University Press, 2015, vol. 3.
- [16] *74HC595 Data Sheet*, Nexperia, 2017, <http://www.nexperia.com>.
- [17] M. Jensen, *White Paper SWRA349: Coin Cells and Peak Current Draw*, Texas Instruments, 2010, <http://www.ti.com>.