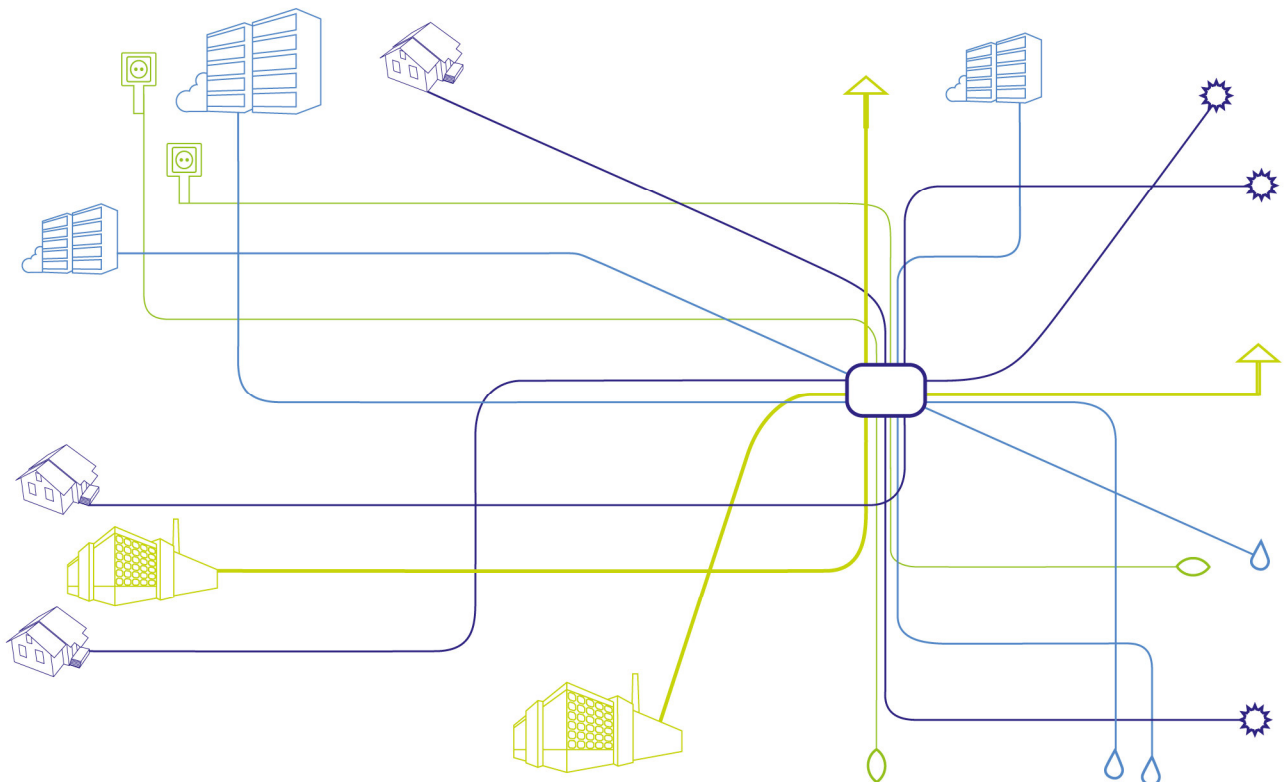




BALI

Active Balancing für Li-Ionen Batterien in Automobilanwendungen



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

1	Einleitung	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Schwerpunkte des Projektes	3
1.3	Verwendete Methoden	3
1.4	Aufbau der Arbeit	3
2	Inhaltliche Darstellung	5
2.1	AP1 Projektmanagement	5
2.1.1	Beschreibung der ursprünglich geplanten Ziele	5
2.1.2	Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine	5
2.1.3	Beschreibung der Schwierigkeiten bei Erreichung der geplanten Ziele Fehler! Textmarke nicht definiert.	
2.2	AP2 Spezifikationen und Anforderungen	5
2.2.1	Beschreibung der ursprünglich geplanten Ziele	5
2.2.2	Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine	5
2.3	AP3 Ermittlung der Zelldaten	11
2.3.1	Beschreibung der ursprünglich geplanten Ziele	11
2.3.2	Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine	12
2.3.3	Beschreibung der Schwierigkeiten bei Erreichung der geplanten	14
2.4	AP4 Batteriesimulation	15
2.4.1	Beschreibung der ursprünglich geplanten Ziele	15
2.4.2	Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine	15
2.4.3	Beschreibung der Schwierigkeiten bei Erreichung der geplanten	18
2.4.4	Beschreibung der „Highlights“ im Projektfortschritt	19
2.5	AP5 Auslegung und Aufbau der Hardware	21
2.5.1	Beschreibung der ursprünglich geplanten Ziele	21
2.5.2	Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine	21
2.6	AP6 Vermessung am Prüfstand	23
2.6.1	Beschreibung der ursprünglich geplanten Ziele	23
2.6.2	Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine	23
2.6.3	Beschreibung der Schwierigkeiten bei Erreichung der geplanten	35
2.6.4	Beschreibung der „Highlights“ im Projektfortschritt	35
2.7	AP7 Spezifikation Ausführung	35
2.7.1	Beschreibung der ursprünglich geplanten Ziele	35
2.7.2	Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine	35
2.7.3	Beschreibung der „Highlights“ im Projektfortschritt	37
2.8	AP8 Demonstrator Chip	38
2.8.1	Beschreibung der ursprünglich geplanten Ziele	38
2.8.2	Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine	38
2.8.3	Beschreibung der Schwierigkeiten bei Erreichung der geplanten Ziele (falls vorhanden)	41
2.8.4	Beschreibung der „Highlights“ im Projektfortschritt	49
3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	51
4	Ausblick und Empfehlungen	52
5	Literaturverzeichnis	53
6	Anhang – Herstellerdatenblatt der Zelle	

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Die Anforderungen an elektrische Energiespeicher hinsichtlich Sicherheit, Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Effizienz und Kosten können mit derzeitigen passiven Balancing-Verfahren nur unzureichend abgedeckt werden, daher wird für dieses Projekt ein radikal neuer Ansatz gewählt.

Die besonders in Mobilitätsanwendungen geforderte Leistung und Reichweite können nur durch Serienschaltung von Li-Ionen Einzelzellen zu einem Pack erfüllt werden. Da aber nicht alle Zellen die exakt gleichen elektrischen Eigenschaften besitzen, entstehen Kapazitäts-Unterschiede, die Über- bzw. Entladung einzelner Zellen zur Folge haben bzw. den max. verfügbaren Energieinhalt einschränken können.

1.2 Schwerpunkte des Projektes

Die Lösung für das Problem der ungleichen elektrischen Eigenschaften der Li-Ionen Zellen ist das Balancing. Dieses kompensiert die unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften, die nutzbare Gesamtkapazität des Energiespeicherpacks steigt. Derzeit verwendete passive Balancingkonzepte nutzen noch nicht alle Möglichkeiten aus, da einfach die überschüssige Ladung vernichtet wird, um schwache Zellen zu schützen. Dabei entstehen jedoch Verluste.

1.3 Verwendete Methoden

In diesem Projekt soll daher ein völlig neuer, innovativer Ansatz eines aktiven Balancing-Verfahrens erforscht werden und ein Nachweis der Funktionsfähigkeit erbracht werden.

Dafür werden in einem ersten Schritt die Anforderungen an Li-Ionen-Batteriesysteme erhoben und bestehende Systemkomponenten, wie insbesondere Batteriezellen, auf ihre Eignung zum optimalen Einsatz im geplanten neuen System analysiert.

Mit Hilfe von Simulationen werden dann weitergehende komplett neue Systemkonzepte und Optimierungspotentiale untersucht und die Hardware wird auf den Einsatz von hochintegrierten Systemkomponenten vorbereitet.

Die neuen Funktionserweiterungen werden in hochintegrierte elektronische Schaltkreise umgesetzt. Nach Fertigung und Test der integrierten Schaltkreise werden diese in die vorbereitete Hardware des Batteriemanagement Demonstrationssystems eingebaut.

Abschließend wird eine ausführliche Mess- und Analysephase für alle Systemkomponenten und des Gesamtsystems am Prüfstand erfolgen. Bei Abschluss des Projekts soll ein Demonstrationssystem verfügbar sein, das die Machbarkeit und Vorteile eines innovativen und hochintegrierten Batteriemanagementsystems veranschaulicht.

1.4 Aufbau der Arbeit

AP1 Projektmanagement

AP2 Spezifikationen und Anforderungen

AP3 Ermittlung der Zelldaten
AP4 Batteriesimulation
AP5 Auslegung und Aufbau der Hardware
AP6 Vermessung am Prüfstand
AP7 Spezifikation Ausführung
AP8 Demonstrator Chip

2 Inhaltliche Darstellung

2.1 AP1 Projektmanagement

2.1.1 Beschreibung der ursprünglich geplanten Ziele

Ziel ist die bestmögliche Realisierung der Projektaufgaben, des operativen Projektmanagements und aller vereinbarten Projektziele. Der Projektkoordinator ist verantwortlich für alle projektinternen Koordinationsaktivitäten sowie für die regelmäßige Kommunikation mit der Förderstelle.

2.1.2 Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine

Der Aufbau eines Projektmanagements mit geordnetem Informationsfluss und regelmäßigen Abstimmungen der Partner untereinander, um zu gewährleisten, dass die Projektziele bestmöglich erreicht werden.

Meetingstruktur:

Alle 2 Wochen findet eine Telefonkonferenz statt.

Alle 6 Monate gibt es ein persönliches Treffen aller Beteiligten.

Nach Bedarf gibt es Meetings zu besonderen Themen.

Bisher:

Kick Off Meeting am 9.Mai 2009

Sicherheits-Workshop am 2.Oktober 2009

Abstimmungsmeeting am 28.Jänner 2010.

Der Kommunikationsaustausch wird durch die gemeinsame Datenplattform i-share von Infineon unterstützt.

2.2 AP2 Spezifikationen und Anforderungen

2.2.1 Beschreibung der ursprünglich geplanten Ziele

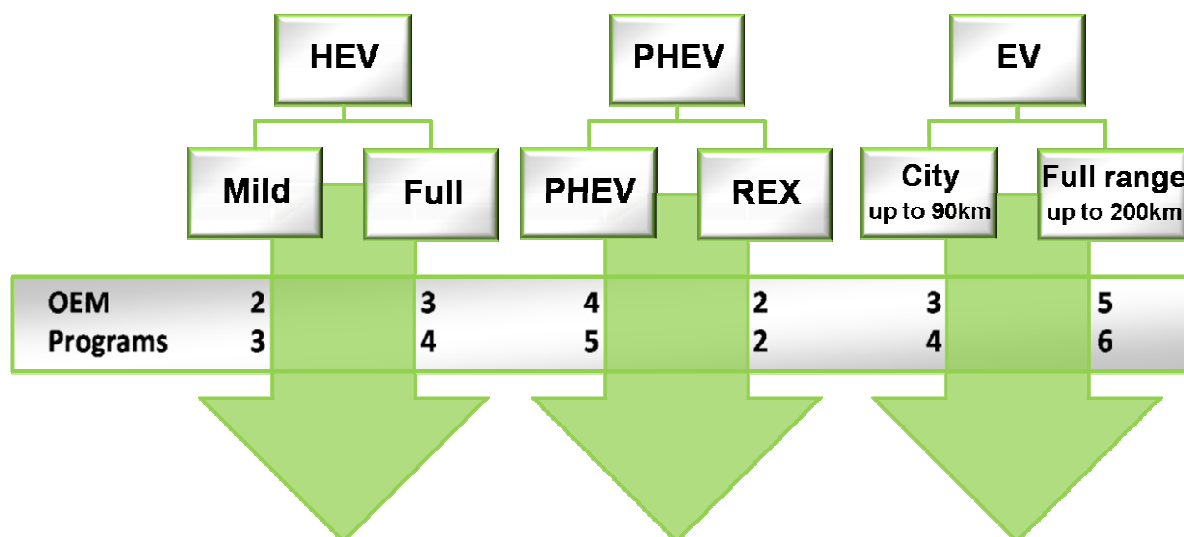
Definition der Gesamtanforderungen an ein elektrisches Energiespeichersystem aus Fahrzeugsicht.

2.2.2 Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine

Als Batteriesystemhersteller mit Gesamtfahrzeugerfahrung liefert MAGNA die Informationen über den Aufbau und die Rahmenbedingungen beim Einsatz von Energiespeichersystemen im Fahrzeugbereich.

Solche Systeme bestehen aus einem zentralen Steuergerät (BMU) und den dezentral verteilten Zellspannungs- und Temperaturüberwachungssteuergeräten (CSC). Über eine Daisy-Chain-Kette sind die CSC's untereinander und mit dem zentralen Steuergerät (BMU)

verbunden. Die Verbindung zum Fahrzeug ist über eine HV-Schnittstelle und eine LV-Schnittstelle realisiert.



Systemspannung [V]	125-360	200-345	280-365
Energie [kWh]	0,8-3	4-17	14-36
Entladeleistung [kW] 10s-Puls/23°C 50% SOC	15-130	35-130	50-150
Temperaturbereich [°C]	-25...+60	-25...+60	-25...+60
System-Lebensdauer [Jahre]	10	10	10

Abbildung 1 Darstellung der wichtigsten Systemparameter von Hybrid- und Elektrofahrzeugen.

Eine wichtige Basis für die Auslegung von Batteriesystemen und den entsprechenden Komponenten ist das Fahrprofil des Fahrzeuges und das daraus abgeleitete Stromprofil.

Fahrzyklus	Dauer	Mittlere Geschwindigkeit	Maximale Geschwindigkeit	Leerlaufanteil
	(Sekunden)	(km/h)	(km/h)	(%)
FTP_72	1372	31,43	91,1	19,0
FTP_75	1877	34,1	91,2	
NEFZ	1180	33,59	120,0	24,0
Stop&Go	1800	3,05	60,0	90,0
Leerlauf	1800	0,00	0,0	100,0
Highway	765	77,67	96,4	0,7

Tabelle 1 Gegenüberstellung verschiedener Fahrzyklen

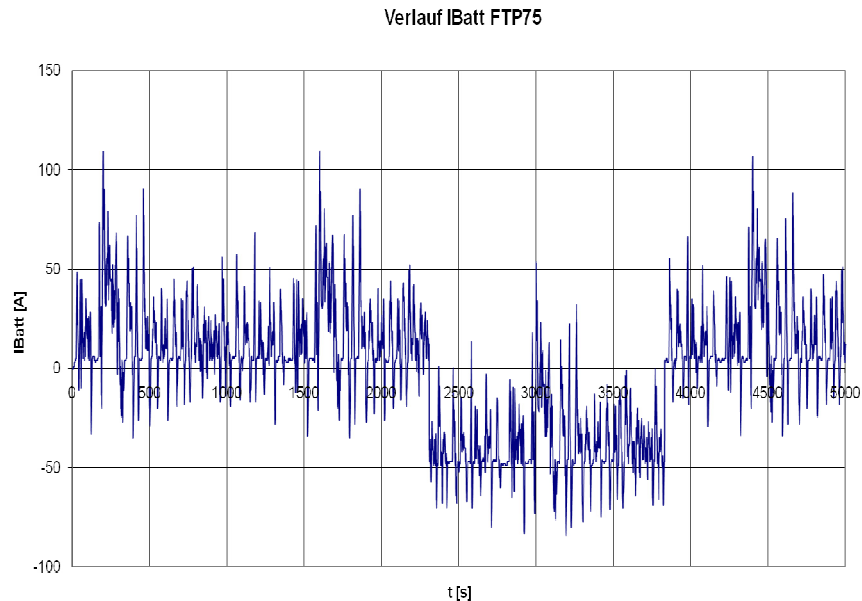


Abbildung 2 Stromprofil eines E-Fahrzeuges nach dem FTP75-Fahrzyklus

Die Anforderungsprofile aus den Bereichen Batteriesystem und Fahrzeug sind im Rahmen der regelmäßigen Projekt-Workshops und Telefonkonferenzen laufend eingeflossen und dienen als Basis für die weiteren Diskussionen und Arbeiten im Projekt.

Spezifikation der Spannungsmessung:

- 12 individuelle ADCs für jede Zelle
- Synchronisierte Messtriggerung über daisy chain Kommando
- Individuelle Batteriespannung auslesbar über SPI oder daisy chain
- Gesamtspannungsmessung mit einem 2. unabhängigen ADC.

Spezifikation der ADC Parameter:

- Auflösung: 1mV, 12Bit
- Absolute Genauigkeit: 5mV
- Sampling Frequenz von 1Mhz, Mittelung über 4ms

Im Folgenden sind die wesentlichen Spezifikationen der Komponenten angeführt:

Tabelle 2 Spezifikation der Treiberstufe

Parameter	Symbol	min	typ	max	Unit	Comment
On resistance	Ron		1		Ohm	LS Switch at passive mode, current limited by external resistor
Passive balance current				200	mA	higher current via external transistor
Output voltage gate driver	Uout	-0.3		2*V _{BAT}	V	referring to local Driver GND
Leakage current gate output	Ileak		1		μA	
Gate charge current	Iout		15		mA	slow option nom. Gatedriver Supply range
			20		mA	switch on time ~1us @ Ciss=2.5nF nom. Gatedriver Supply range
			25		mA	fast option nom. Gatedriver Supply range
Gate discharge current	Iout		-15		mA	slow option
			-20		mA	switch off time ~1us @ Ciss=2.5nF
			-25		mA	fast option
Nominal gate driver supply voltage range	Vdd	5		9	V	1)
Extended gate driver supply voltage range	Vdd_ext	3		10	V	1) parameter deviations possible for 3V < Vdd_ext < 5V and 9V < Vdd_ext < 10V
Overvoltage threshold	Vov	9		10	V	VBAT rising 1)
Undervoltage warning threshold	Vuv1	4		5	V	Undervoltage warning. Vout<5V, VBAT falling 1)
Sleepmode threshold	Vuv2	3		4	V	only 1 Bat. --> Sleepmode VBAT falling 1)

Parameter	Symbol	min	typ	max	Unit	Comment
Passive output voltage upper limit	Uds_UL		tbd		mV	define window for open load for allowed balance current between 200mA / 50mA
Passive output voltage lower limit	Uds_LL		tbd		V	
Short to GND passive	Uout_S2 G		tbd		V	Ls Switch Off ---> Uout measured
Short to Bat active threshold	Uout_S2 B		U _n +1		V	while pin Gxx pulling down
Short to Bat delay	td_s2b		5		μs	
Short to GND active threshold	Uout_S2 G		U _{n+2} -1		V	while pin Gxx pulling up
Short to GND delay			5		μs	
Active balancing frequency	f	10	25	50	kHz	frequency to be programmed via chip interface. See register description
On time secondary side		5			μs	on time to be programmed via chip interface. See register description.
Current consumption in sleep mode			15		μA	
Thermal shut down temp	Tsd	170		190	°C	

Tabelle 3 Spezifikation des Fenster Komparators

Parameter	Symbol	min	typ	max	Unit	Comment
Threshold voltage range	$V_{REF,L}$ $V_{REF,H}$	1.5		5	V	variable
Threshold stepsize	V_{STEP}		100		mV	
Threshold voltage accuracy	ΔV_{th}	-50		50	mV	-40C < Tamb < 100C

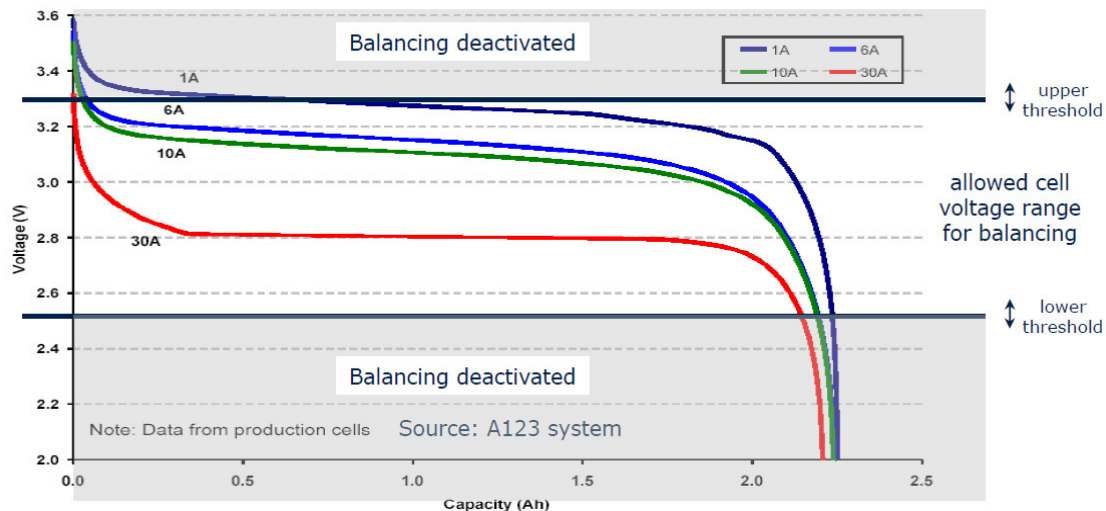
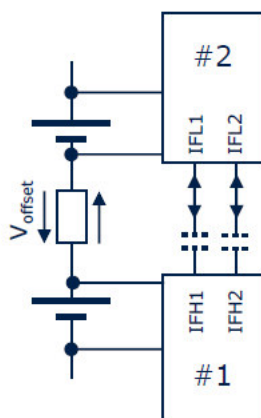


Abbildung 3 Beschreibung und Spezifikation des Fenster Komparators



Interface details:

- Differential voltage interface
- high EMI immunity
- Brutto bitrate 1MBit/s
- CRC included in each frame
- Single Master System → μC is Master
- Half duplex transmission
- optional capacitor needed if $V_{offset} > \text{specified}$
- Autoaddressing: each instance gets its individual adress automatically after powerup
- Broadcast messages supported
- adressable instances: 60
- Bus fail detection and signalization
- I/F activity supervised by watchdog
- goto-sleep and wakeup function

Abbildung 4 Spezifikation der Kommunikation zwischen den Batteriemodulen

Tabelle 4 Spezifikation der Kommunikation

Parameter	Symbol	min.	typ.	max.	UNIT	Comment
DC Voltage difference between ICs	$V_{\text{offset,DC}}$	-5	0	5	V	
transient Voltage difference between ICs	$V_{\text{offset,TR}}$	-20	0	20	V	shape and duration of transients tbd
Bus differential voltage, Logic '1'	V_{DIFF1}	2		5		
Bus differential voltage, Logic '0'	V_{DIFF0}	-5		-2		
optional coupling capacitor	C_c		100		nF	
transmission bitrate	BR		1		MBit	

Tabelle 5 Spezifikation der internen Referenz des Chips

Parameter	Symbol	min	typ	max	Unit	Comment
Bandgap voltage	V_{BG}		2.5		V	Trimmed for temperature stability
Temp dependence Bandgap voltage	$T_K(V_{\text{BG}})$	-0.2		0.2	%	$-40\text{C} < R_{\text{amb}} < 125\text{C}$
External voltage input range	V_{EXT}	0		4.5	V	if used as voltage input
External reference input range	V_{EXT}	1.8		3.2	V	if used as reference input
External reference input filter corner frequency	$f_{g,\text{ext}}$		16		kHz	$R=1\text{M}, C=10\text{pF}$
External reference input bias current	I_{EXT}		0		μA	leakage current only

Tabelle 6 Spezifikation der Temperatur Messung

Parameter	Symbol	min	typ	max	Unit	Comment
Measurement Current	I_T	0.1		2	mA	4 settings + 1 setting OFF (0mA), $0\text{V} < U_{\text{sense}} < 4\text{V}$
Temp dependence prog. current source	$T_K(I_T)$	-2		2	%	rph/rpm combination, variation over Temp $-40\text{C} - 125\text{C}$
Current Source voltage range	U_{sense}	0		4.0	V	I_T decreases for $U_{\text{sense}} > 4$
Amplifier input voltage range	U_{sense}	0		4.5	V	protected with e0
Amplifier open loop Gain	A_0	70			dB	
Amplifier closed loop Gain	G	0		18	dB	4 settings 0/6/12/18 dB, non inverting
Amplifier Offset	V_{offset}	-8	0	8	mV	
Amplifier Input current	I_{BIAS}		0			
Input Filter corner frequency	f_g		16		kHz	$R=1\text{M}, C=10\text{pF}$
ADC input range	V_{ADC}	0.5		4.5	V	clamped @ 5V
Tempsensor resistance		2.5		45	k Ω	
temp dependence		2.3		7.4	%/ $^{\circ}\text{C}$	NTC behaviour
Nr. of ADC Multiplexer inputs	N_{INPUT}		16			
sample rate		0.1		100	Hz	

Meilenstein: AP2: Anforderungsprofil

Die Anforderungen an elektrische Energiespeichersysteme wurden zusammengefasst und erörtert und bilden die Basis für die Auslegung des Balancing-Schaltkreises. Zusätzlich zu den Spezifikationen aus Tabelle 2 bis Tabelle 6:

- Number of batteries: 5 to 12 per battery block
- Maximum battery block total voltage: 60V
- Battery cell voltage range: 1.5-5V
- Interface between battery blocks
 - 2-line daisy chain
 - Integrated voltage level shifters
 - Auto addressing
 - CRC / ECC
 - No. of addressable blocks: 60
 - Built-in interface diagnostics
 - Watchdog function
- Drivers
 - Supporting active and passive balancing
 - Comprehensive diagnosis of driver outputs
 - Extra driver for Interblockbalancing
- Measurement functions for SoC / SoH
 - Precision battery voltage measurement
 - Temperature sensor inputs
- Ultra low current sleep mode
- Supporting functions for SIL compliance
 - additional path for external reference
 - In-operation testability of references and ADCs
 - Windowcomparator for emergency cell voltage diagnosis

2.3 AP3 Ermittlung der Zelldaten

2.3.1 Beschreibung der ursprünglich geplanten Ziele

Aus Herstellerangaben, bereits im Vorfeld vorhandenen Informationen und zusätzlichen Messungen wurden die für die Simulation erforderlichen Kennwerte der Zellen ermittelt.

2.3.2 Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine

Die für die Simulation relevanten Zelldaten wurden auf verschiedene Weise ermittelt:

- Herstellerdatenblatt und zusätzliche vom Hersteller zur Verfügung gestellte Daten bezüglich der Alterung.
- Vermessung am Prüfstand
 - HPPC Test (Hybrid Pulse Power Characterization)
 - Zyklen mit Standard Leistungsprofilen für Elektrofahrzeuge (FTP72, Liberal)
 - Impedanzmessung
 - Alterung durch zyklisieren mit dem Liberal Zyklus

MAGNA hat Daten von 150 prismatischen Energie-Zellen mit 40Ah zur Verfügung gestellt. Es handelt sich dabei zwar nicht um Zellen des Herstellers, die für dieses Projekt als Referenz gewählt wurden, die Aussage über die Streuung der Kapazität dieser Zellen ist jedenfalls von Relevanz.

Eine Impedanzspektroskopie der Zelle lieferte Informationen über die Impedanz der Zelle und ist in Abbildung 5 dargestellt.

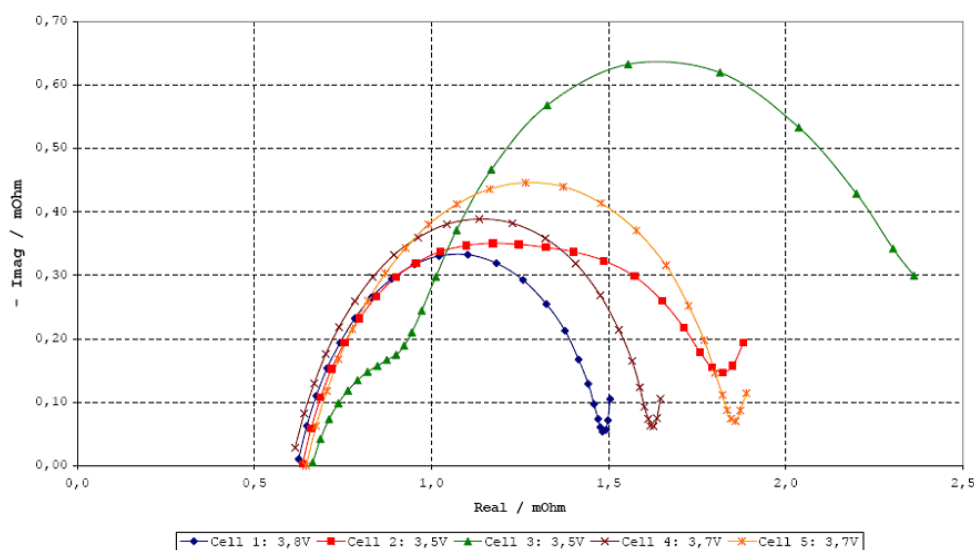


Abbildung 5 Impedanzspektrum der gewählten Zelle

Nennkapazität	C_N	40Ah
Leerlaufspannung	OCV	lookup table
Ladungszustand	SOC	0-1
Kontakt- und Elektrolytwiderstand	R_S	0.0015mΩ
Elektrodenimpedanz	C_D, R_D	50kF, 0.0025mΩ

Tabelle 7 Aus den Zelldaten ermittelte Parameter

Weiters wurde für die Zelle ein HPPC Test (Hybrid Pulse Power Characterization) durchgeführt.

Der Hybrid Pulse Power Test dient zur Ermittlung der Innenwiderstände unter dynamischer Last, welcher die Erwärmung der Zelle bei entsprechender Strombelastung definiert. Die Lebensdauer von Lithium Ionen Zellen ist durch eine Reihe von Parametern bestimmt, wobei die Temperatur der Zelle den größten Einfluss darstellt. Die Streuung der Innenwiderstände der Zellen und somit der thermischen Belastung führt zu unterschiedlicher Alterung der Zellen, welche wiederum eine der grundlegenden Informationen für den Einfluss des Balancings auf die erreichbare Lebensdauer eines Zellverbundes durch das Ausgleichen geringerer Kapazität bereits stärker geschädigter Zellen darstellt. Abbildung 6 zeigt den Ablauf eines HPPC Tests.

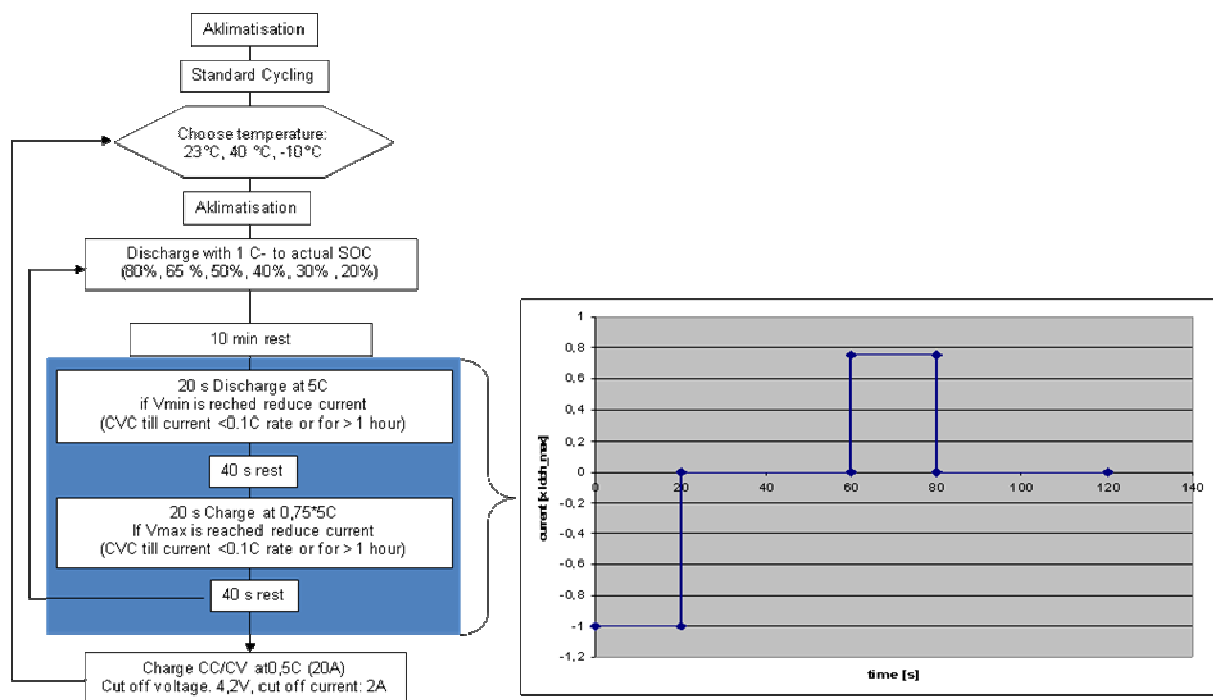


Abbildung 6 Testablauf eines HPPC Tests.

Aus diesen Pulstests (typ. Resultat siehe: Abbildung 7) wurde der Innenwiderstand als maximal, minimal und Durchschnittswert für das Modul bestimmt (siehe Tabelle 8 Innenwiderstände für das Modul aus dem HPPC Test.).

Davon abgeleitet kann geschlossen werden, dass die Innenwiderstände in einem Bereich von 5 – 10% variieren was sich auch auf die unterschiedliche thermische Belastung der Zellen und somit auf die Lebensdauer auswirkt.

Eine kalkulatorische Bewertung dieses Einflusses ist durch die Integration in das Modulkonzept, welches auch eine Kühlung beinhaltet, schwierig. Es wurde daher ein Modul-Balancingtest zum direkten Vergleich von Balancing-Varianten durchgeführt. Die Widerstandsdaten sind jedoch eine essentielle Information zur Erstellung eines elektrischen Zellmodells.

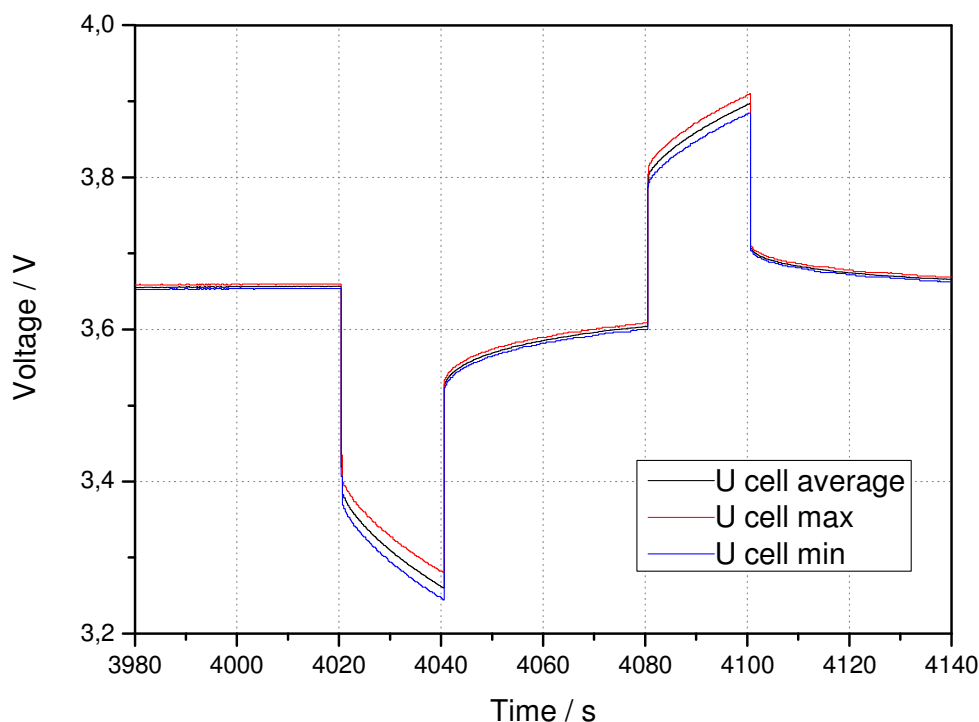


Abbildung 7 Resultate der HPPC Tests.

Tabelle 8 Innenwiderstände für das Modul aus dem HPPC Test.

	Discharge for 20s@ 50% SOC			Charge for 20s@ 50% SOC		
	delta U	Current	Ri	delta U	Current	Ri
	V	A	mΩ	V	A	mΩ
min. value	0,41	200	2,03	0,28	150	1,90
avg. Value	0,39	200	1,20	0,29	150	1,95
max. value	0,37	200	1,85	0,30	150	2,00

Meilenstein: AP3: Parameterliste

Aus Herstellerangaben und eigenen Messungen wurden die Parameter für die Simulation der ausgewählten Zellentechnologie und Type ermittelt, um diese im Simulationsmodell zu verwenden.

2.3.3 Beschreibung der Schwierigkeiten bei Erreichung der geplanten

Der Kontakt zu Zellherstellern ist schwieriger als erwartet, da die für BALI relevanten Informationen zum Teil nicht vorhanden und zum anderen Teil so vertraulich sind, dass sie nicht kommuniziert werden. Durch das Netzwerk der verschiedenen Projektpartner wurde

versucht, detaillierte Daten der Zellen zu bekommen, was nur im eingeschränkten Umfang tatsächlich gelungen ist.

2.4 AP4 Batteriesimulation

2.4.1 Beschreibung der ursprünglich geplanten Ziele

Basierend auf der Parameterliste (AP3) und der in AP2 spezifizierten Betriebsbedingungen wurde ein Simulationsmodell erstellt. Mit diesem Modell wurde die Batterie in einer Simulation nachgebildet und der Einfluss des Balancing Systems auf den Batteriebetrieb dargestellt.

2.4.2 Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine

Für die Simulation der Zellen wurde ein passendes Modell ausgewählt.

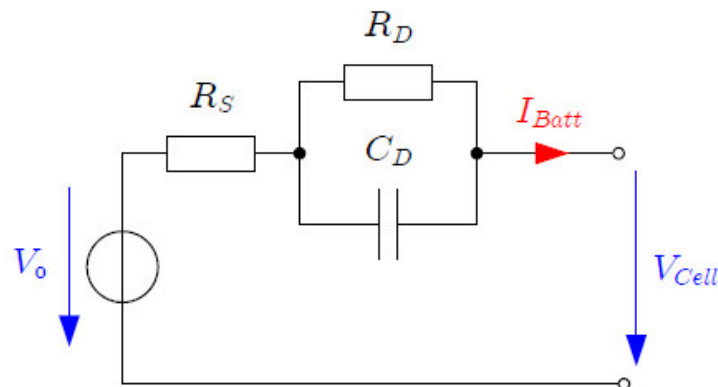


Abbildung 8 Ersatzschaltbild einer Zelle

Aus den oben beschriebenen Messungen wurden die Parameter für die Simulation der Zellen gewonnen. Das Ergebnis ist in Abbildung 9 dargestellt.

Mit Hilfe des entwickelten Zellenmodells wurde ein Modell des Modul-Balancingsystems entwickelt. Da die Simulation auf Schalterebene zu rechenintensiv ist und die Simulationsdauer damit unverhältnismäßig lang wird, wurde dieses Modell auf dem Niveau des Energietransfers aufgebaut. Das Ergebnis ist in Abbildung 10 dargestellt.

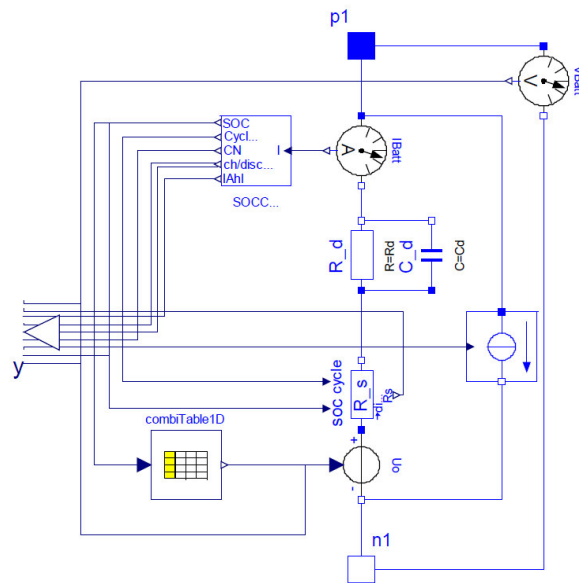


Abbildung 9 Simulationsmodell einer Zelle in Dymola

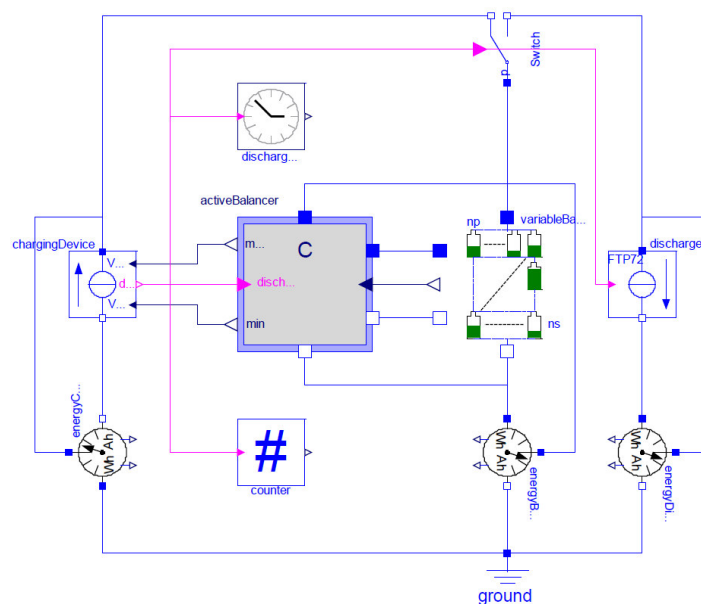


Abbildung 10 Simulationsmodell des Balancingsystems in Dymola

Die Simulation des Gesamtsystems (Intermodul-Balancing) entspricht der des Modul-Balancing-Systems mit entsprechend angepassten Parametern.

Zum Vergleich wurden auch ein passives und ein kapazitives Balancing-System modelliert. Damit kann ein Unterschied zwischen den verschiedenen Balancing-Philosophien schnell aufgezeigt werden.

Wesentlicher Inhalt des Projektes ist die Darstellung der Vor- und Nachteile dieses aktiven Balancing-Systems. Zwei Fragestellungen waren besonders relevant und wurden als Simulationsszenarien untersucht:

- Vorteil des aktiven Balancing-Systems hinsichtlich der erzielten Reichweite eines Fahrzeugs: Unter den angenommenen Bedingungen ergeben sich folgende Szenarien:

Szenario	Streuung der Zellen (Nennkapazität 40Ah)	Vergrößerung der Reichweite
1	1,0Ah	4%
2	1,6Ah	7%
3	2,6Ah	11%

Tabelle 9 Streuung der Zellen und erzielbare Reichweitenvergrößerung

- Welchen Einfluss hat das aktive Balancing auf die Kosten?

Mit einer angenommenen Vergrößerung der Reichweite um 10%, einer Batteriekapazität von 25 kWh ergibt sich je nach spezifischen Kosten der Batterie folgendes Einsparungspotenzial:

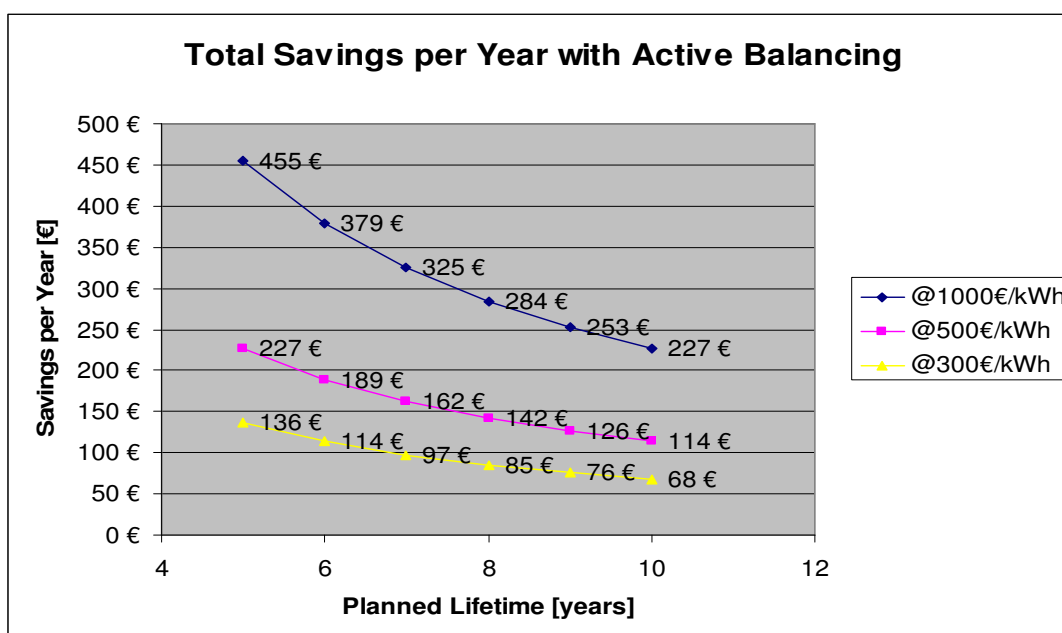


Abbildung 11 Kosteneinsparung durch aktives Balancing

Für die Betriebsstrategie des Balancing, d.h. ob der bestimmende Parameter für den Ladungstransfer die Zellenspannung oder die Zellenladung in Kombination mit der Zellenkapazität ist, wurden die Unterschiede in der Simulation dargestellt. Dabei konnte gezeigt werden, dass durch ein Balancing abhängig von der Zellenladung eine weitere Vergrößerung der Reichweite um 2% erreicht werden kann.

In der Simulation wurden drei verschiedene Betriebsfälle (Zyklusprofile) dargestellt: FTP72, Liberal und Konstantstrom.

Das Balancing kann mit verschiedenen Betriebsstrategien betrieben werden. Hier besteht der Unterschied hauptsächlich darin, ob sich der Lade- bzw. Entladestrom nach Zellspannung oder nach Zellladung abhängig von der Zellkapazität orientiert. Dies ist in der Simulation gut darstellbar und der Einfluss auf die Zellen kann untersucht werden.

Die Simulation kann für konkrete Anforderung in der Schaltungsauslegung verwendet werden, wenn es darum geht den Einfluss von Balancing-Strom oder Zellenstreuung zu ermitteln.

Für das weitere Projekt wird als nächstes der Einfluss der Änderung der Streuung mit zunehmendem Alter der Zellen ermittelt sowie die Änderung der Verlustleistung und Erwärmung der Zellen durch das aktive Balancing dargestellt.

Meilenstein: AP4: Simulationsmodell

Für die einzelne Zelle, für ein Modul und für das gesamte Batteriesystem wurden entsprechende Modelle erstellt. (siehe Batteriesimulation)

Meilenstein: AP4: Simuliertes Batteriesystem

Auf Basis der Zellenmodelle und der Schaltungstopologie des Balancing-Systems wurde das Modell des Modul- und System-Balancings aufgebaut. Mit den Simulationsergebnissen konnten die wesentlichen Fragestellungen wie „Einfluss auf die Reichweite“ und „Einfluss auf die Kosten“ beantwortet werden.

2.4.3 Beschreibung der Schwierigkeiten bei Erreichung der geplanten

Ermittlung der Eingangsparameter für die Simulation

Für die Simulation des Balancings sind grundlegende Eingangsdaten von Nöten um eine entsprechende Bewertung des Balancing-Aufwandes und somit des Nutzens der aktiven Variante durchführen zu können. Im Wesentlichen sind die Zellqualität und die kapazitive Asymmetrie in der Alterung der Zellen zu betrachten.

Die Streuung der Zellen am Beginn der Lebensdauer, d.h. die Streuung der Zellen in der Kapazität durch den Produktionsprozess definiert die Basislinie für das Balancing und wurden vor dem Verbau der Zellen in ein System ermittelt.

Die unterschiedliche Alterung der Zellen hervorgerufen durch unterschiedliche thermische Belastung der Zellen ist ebenfalls ein wesentlicher Simulationsinput, da die kapazitiv schwächste Zelle die Gesamtkapazität des Systems definiert. Durch aktives Balancing ist bis zu einem gewissen Limit der Ausgleich des Einflusses der schlechten Zellen möglich. D.h. es kann rechtzeitig Energie von den weniger gealterten bzw. geschädigten Zellen in die schadhafte Zelle umgeladen werden.

Die Kapazitätsverteilung der Zellen nach entsprechender Alterung wurde am Prüfstand auf Modulbasis als auch auf Systemebene vermessen.

Ein weiterer Parameter, welcher signifikanten Einfluss auf die Simulation bzw. die Evaluierung der Balancing-Strategie hat, ist die Genauigkeit mit der Zellen ausgehend von einem gebalancierten Ruhezustand durch Limitierungen in der Genauigkeit der Messkette im System sowie der Algorithmen zur Bestimmung des Ladezustandes überwacht werden können. Diese Information wurde an Hand eines Systemtests – einer Probefahrt – im realen Fahrzeug ermittelt.

Die Betrachtung unterschiedlicher Selbstentladung von Zellen wurde in diesem Projekt nicht umgesetzt, da dieser Beitrag zu einer Variation in der Kapazitätsverteilung verschwindend klein ist, allerdings bei einer idealen Systemumgebung der ursächliche Grund für ein Zellbalancing darstellt. Es wurde jedoch wie folgt eine kurze Abschätzung durchgeführt:

Die durchschnittliche Selbstentladung von Lithium Ionen Zellen beträgt etwa 3% pro Monat bei einer Variation von +/- 5%. Dies resultiert in einer Variation von etwa +/- 0,1Ah pro Monat. Dieser Anteil ist jedenfalls zu gering um das Potential eines aktiven Balancings zu nutzen.

2.4.4 Beschreibung der „Highlights“ im Projektfortschritt

Mit dem Batteriemodell wurde analysiert, welcher Balancing-Strom bei welcher Kapazitätsstreuung welche nutzbare Energiesteigerung bringt. Hierfür wurden 150 neue Batteriezellen vermessen und die Kapazitätsstreuung bestimmt (Abbildung 12). Die Verteilung der Zellkapazität wurde variiert um eine Alterung im Batteriepack zu simulieren (Abbildung 13). Die nutzbare Energie wurde für alle verschiedenen Zellkapazitätsstreuungen und für verschiedene Balancingströme berechnet und ist in Abbildung 14 dargestellt. Ergebnis: Schon mit einem relativ kleinen Balancingstrom kann die nutzbare Energie bei allen Zellstreuungen deutlich gesteigert werden.

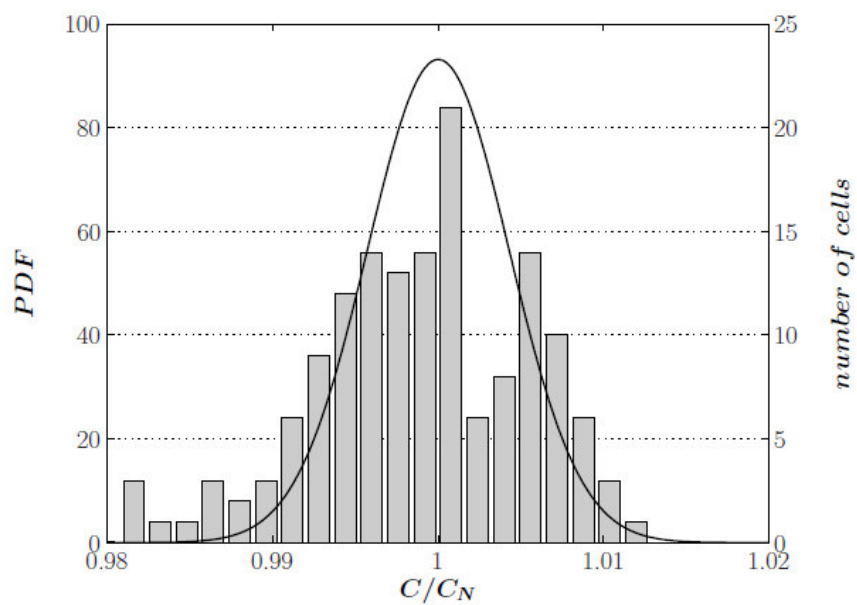


Abbildung 12 Normalverteilung der neu vermessenen Batteriezellen.

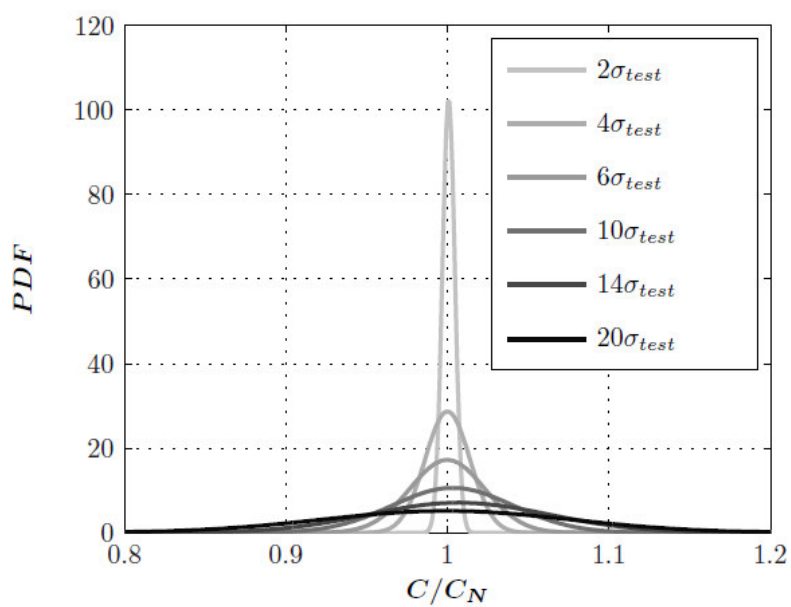


Abbildung 13 Variation der Streuung der Zellkapazitäten für ein gealtertes Batteriepack.

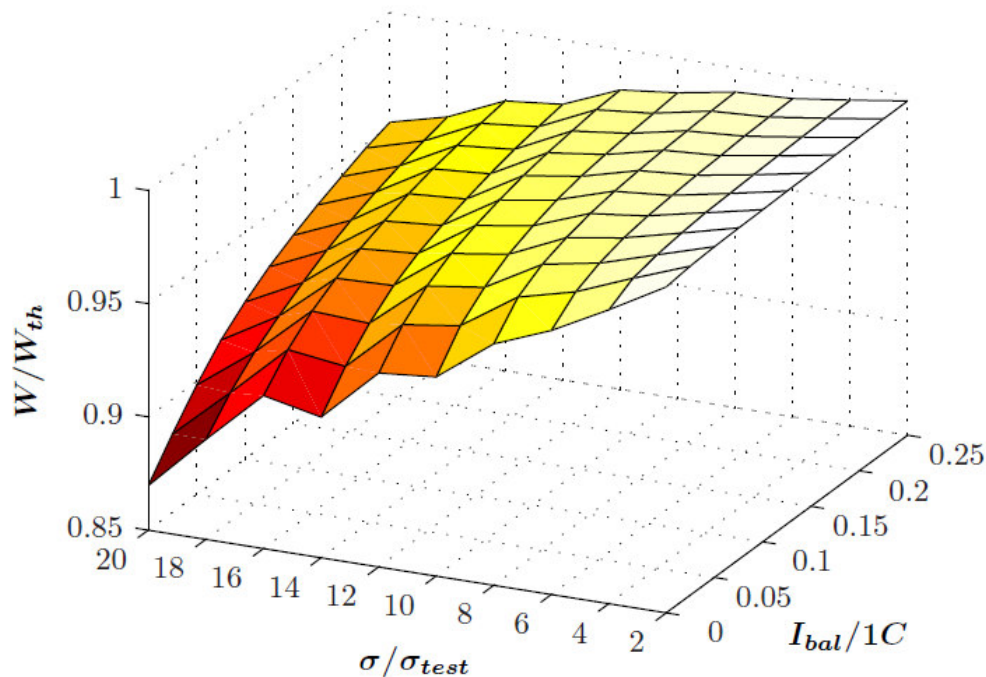


Abbildung 14 Nutzbare Energie bezogen auf die theoretische Entladeenergie in einem Batteriepack mit 12 in Serie geschalteten Batteriezellen für verschiedene Zellstreuungen und für verschiedene Balancingströme.

2.5 AP5 Auslegung und Aufbau der Hardware

2.5.1 Beschreibung der ursprünglich geplanten Ziele

Batteriesysteme mit dem Balancingsystem aufbauen und mit Sensorik zur Vermessung ausrüsten.

Nach der Abstimmung des Systems anhand der sich in der Simulation ergebenden Erkenntnisse wird der Aufbau entsprechend adaptiert und für den Einbau von integrierten Subsystemen vorbereitet.

2.5.2 Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine

Im Rahmen des Projektes wurden Messungen bezüglich des Balancing-Verhaltens an einem Modul bestehend aus 12 in Serie verschalteten 40Ah-Zellen durchgeführt.

Zu diesem Zweck wurde eine mit diskreten Bauelementen versehene Balancing-Demonstratorschaltung von Infineon als Balancingeinheit verwendet.

Der diskrete Aufbau für praktische Erprobungen des Balancing-Prinzips wurde überarbeitet. Durch ein Hardware- und Software-Redesign konnte die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Balancing-Aufbaus deutlich gesteigert werden. Nach dem Balancing liegen nun alle Zellspannungen innerhalb eines Bandes von 20mV.

Die Einführung einer Abmagnetisier-Überwachung des Trafos vermeidet Ausfälle bei extremen Ladungsdifferenzen der Zellen.

Ziel der Messungen war es, erste Erkenntnisse bezüglich des Zusammenspiels der Schaltungstechnik und der Software zu erhalten.

Die Messungen dienten auch zur Bewertung der Simulationsergebnisse.

Meilenstein: AP5: Inbetriebnahmeprotokolle

Der diskret aufgebaute Demonstrator wurde in Betrieb genommen und vermessen.

Siehe

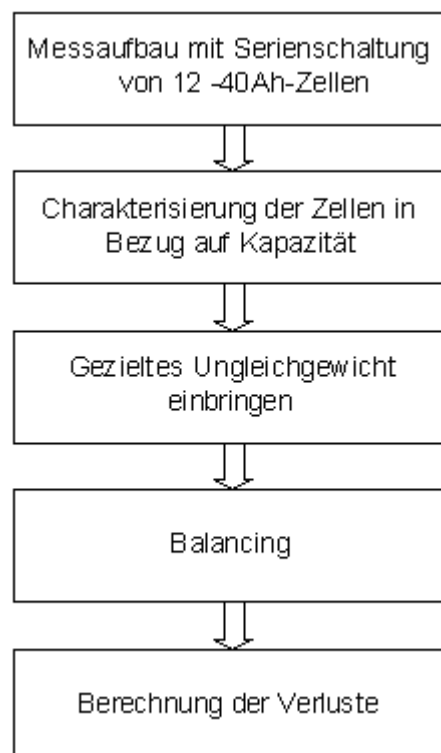


Abbildung 18.

2.6 AP6 Vermessung am Prüfstand

2.6.1 Beschreibung der ursprünglich geplanten Ziele

Das Batteriesystem wird vor und nach der Abstimmung am Prüfstand vermessen um die Simulationsdaten zu validieren.

2.6.2 Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine

Eine der Aufgabenstellungen war, den Balancingbedarf anhand eines real gealterten Prototypmoduls zu ermitteln. Dies ermöglicht Rückschlüsse bezüglich technischer Auslegung und Plausibilisierung der Wirtschaftlichkeit eines aktiven Balancing-Systems.

Basis zur Ermittlung des Balancingbedarfs ist die Kapazitätsermittlung der einzelnen Zellen eines Blocks (Moduls).

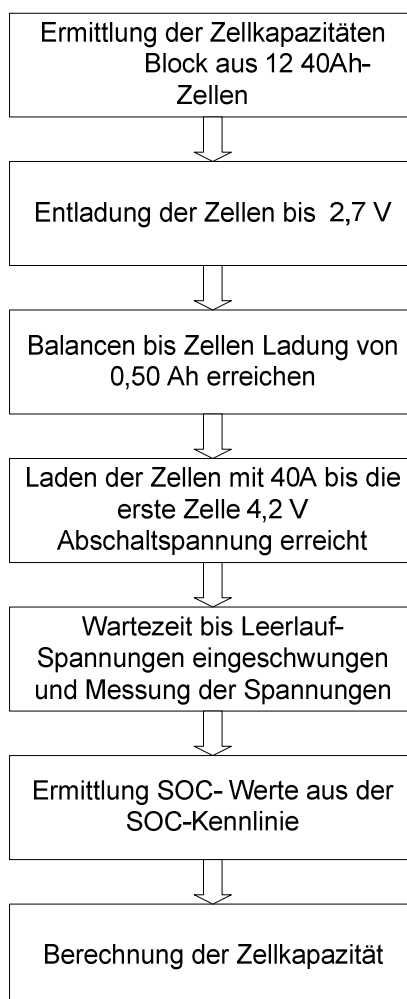


Abbildung 15 Ablauf zur Ermittlung der Zellkapazitäten eines Moduls

Zelle	Abschaltspannungen
	V

1	4,1985
2	4,1490
3	4,1445
4	4,1400
5	4,1325
6	4,1235
7	4,1280
8	4,1340
9	4,1295
10	4,1355
11	4,1505
12	4,1730

Tabelle 10 Abschaltspannungen der Zelle

Die Zellen werden alle mit der gleichen Ladungsmenge (38,53 Ah) geladen bis eine Zelle (in diesem Fall Zelle 1) die höchste zulässige Ladespannung von 4,2V (gemessen 4,1985V) erreicht.

Leerlaufspannung der Zellen (OCV)	U	SOC	Ah _{Laden} (gemessen)	Ah _{abs} (berechnet)
	V	%	Ah	Ah
Zelle 1	4,0830	91,3000	38,53	42,2
Zelle 2	4,0470	88,0300	38,53	43,8
Zelle 3	4,0425	86,3900	38,53	44,6
Zelle 4	4,0200	85,9700	38,53	44,8
Zelle 5	4,0170	85,7110	38,53	45,0
Zelle 6	4,0290	86,7300	38,53	44,4
Zelle 7	4,0350	87,2500	38,53	44,2
Zelle 8	4,0395	87,6300	38,53	44,0
Zelle 9	4,0335	87,1186	38,53	44,2
Zelle 10	4,0365	87,3745	38,53	44,1
Zelle 11	4,0470	88,2700	38,53	43,7
Zelle 12	4,0590	89,3000	38,53	43,1

Tabelle 11 SOC-Bestimmung aus Zellladekurve

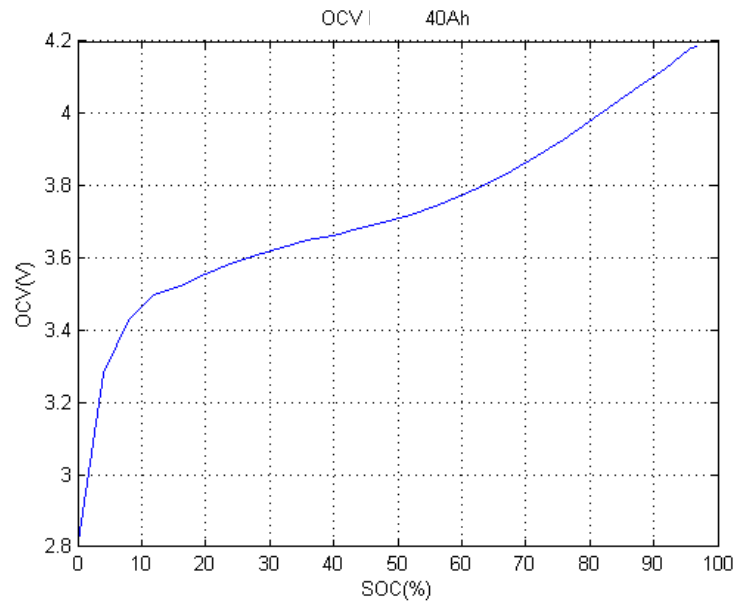


Abbildung 16 SOC-Kennlinie der implementierten 40Ah – Zelle

$$Ah_{abs} = Ah_{Laden} / SOC (\%) \cdot 100$$

Ah_{abs} : reale Ladungsmenge der jeweiligen Zellen des Moduls

Ah_{Laden} : gemessene Ladungsmenge der Einzel-Zellen bis die erste Zelle die Abschaltspannung von 4,2 V erreicht.

SOC : Ladezustand, aus der SOC-Kennlinie, über die Leerlaufspannung (OCV) ermittelt

Ergebnis:

Der Kapazitäts-Mittelwert der 12 Zellen des Moduls beträgt 44 Ah.

Durch ein aktives Balancing können aus den 11 Zellen mit der höheren Kapazität 1,8 Ah in die Zelle mit der niedrigsten Kapazität (Zelle 1) verschoben werden um die mittlere Kapazität von 44 Ah zu erreichen.

Diese Ladungsmenge von 1,8 Ah entspricht 4,1% der mittleren Kapazität von 44Ah und stellt den Gewinn dar, der durch ein aktives Balancen erreichbar ist.

Der diskret aufgebaute Demonstrator wurde bei MAGNA vermessen. Die Zellenspannungen wurden aufgezeichnet um den Verlauf des Balancingvorgangs zu sehen. Das Ergebnis ist in Tabelle 12 zu sehen.

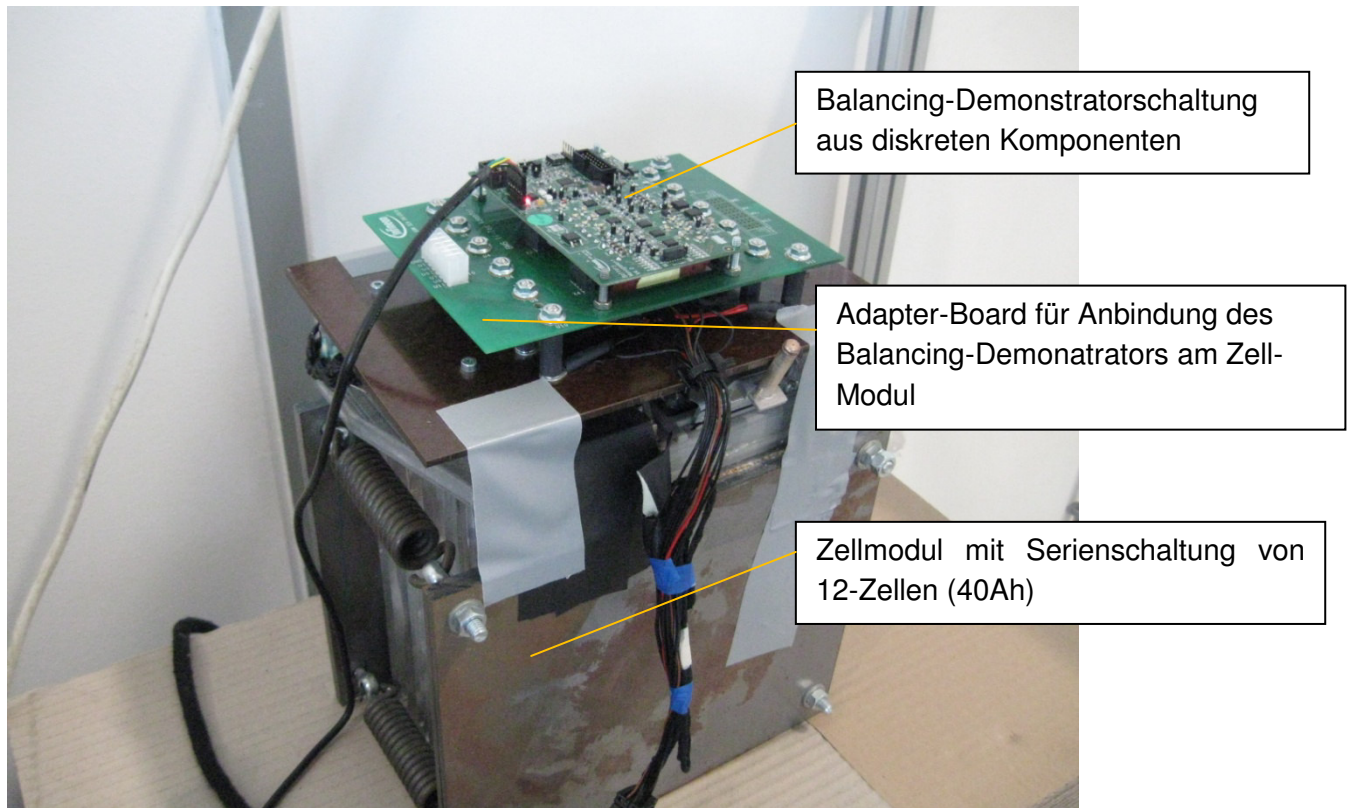


Abbildung 17 Messwert-Aufnahme am Modulaufbau

Tabelle 12 Gemessene Zellspannungen im Verlaufe des Balancing-Vorgangs

Zelle	Ausgangs- spannung [V]	Spannung nach 3h Balancen [V]	Spannung nach 11h Balancen [V]	Spannung nach 18,5 h Balancen [V]	Spannung nach 24,5 h Balancen [V]
1	3,551	3,528	3,585	3,618	3,643
2	3,539	3,581	3,619	3,639	3,649
3	3,539	3,566	3,606	3,629	3,645
4	3,532	3,553	3,587	3,607	3,626
5	3,539	3,603	3,644	3,668	3,680
6	3,538	3,547	3,572	3,597	3,618
7	3,925	3,877	3,806	3,736	3,685
8	3,930	3,879	3,783	3,729	3,700
9	3,922	3,870	3,790	3,735	3,699
10	3,927	3,876	3,787	3,715	3,675
11	3,940	3,872	3,811	3,766	3,741
12	3,953	3,870	3,707	3,624	3,576

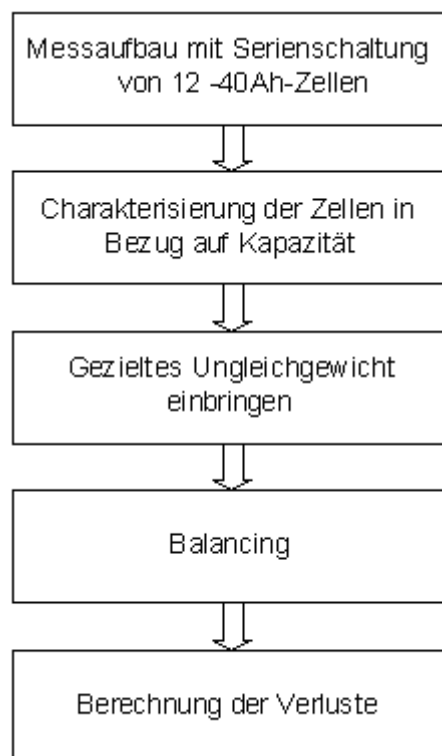


Abbildung 18 Ablauf der Messung am Demonstrator

Abbildung 1920 zeigt den Verlauf der 12 Zellenspannungen während des Balancingvorganges. Die Ausgangssituation dabei war, dass die eine Hälfte der Zellen auf 20% SOC (kleiner 3,55V) und die andere auf 80% SOC (größer 3,90V) geladen waren.

Mit der Aktivierung des Balancingvorgangs beginnen die Zellenspannungen zusammen zu laufen und erreichen nach 25 Stunden Werte zwischen 3,6V und 3,75V.

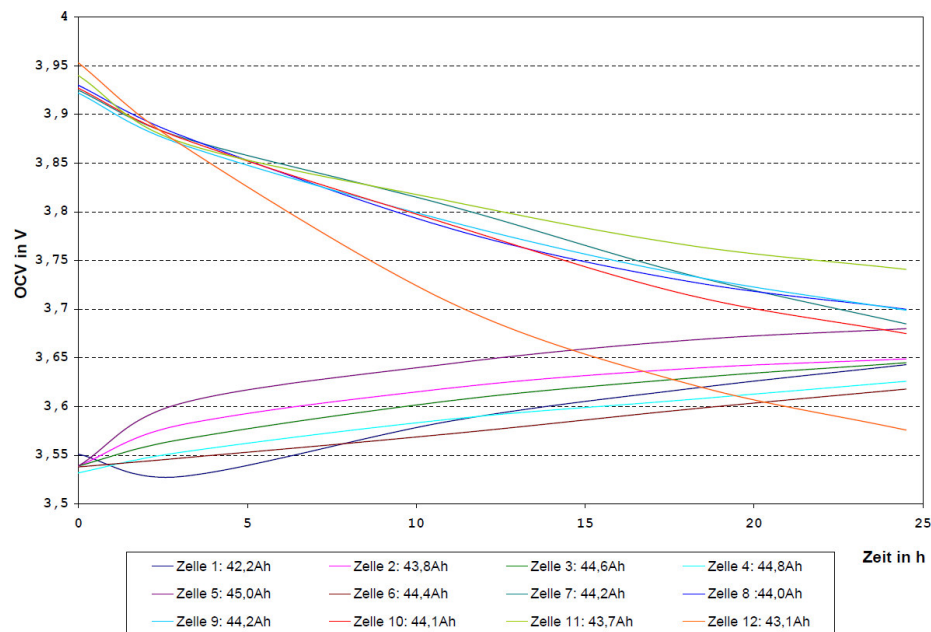


Abbildung 19 Zellenspannung während des Balancing-Vorgangs

Als Vergleich zum aktiven Balancing ist in Abbildung 20 Passives Balancing berechnet ($I = 0,1A$) das passive Balancing dargestellt.

Die Daten wurden nicht gemessen, sondern über Berechnungen in derselben Konstellation wie beim aktiven Balancing ermittelt.

Nach ca. 160 Stunden wurde mit einem Balancing-Strom von 0,1A ein Zusammenlaufen der Spannungen im Bereich von 3,55V ermittelt.

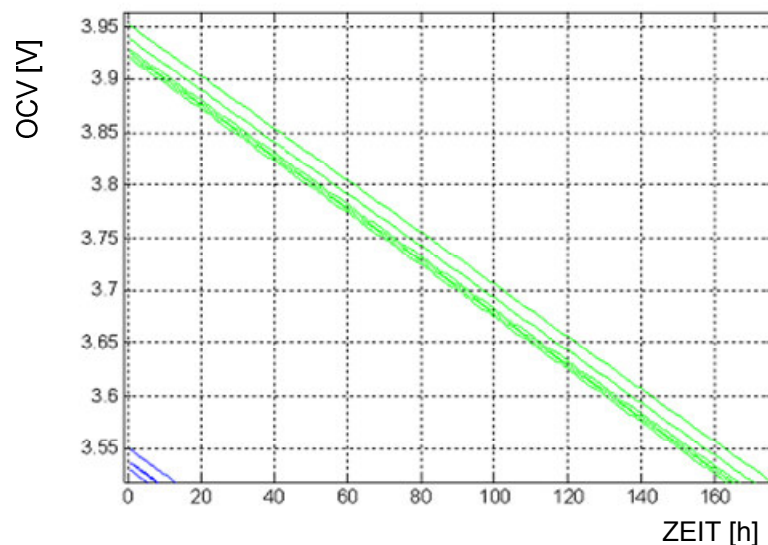


Abbildung 20 Passives Balancing berechnet ($I = 0,1A$)

Weitere Betrachtungen hinsichtlich Energieverteilung und Verluste ergaben folgende **Ergebnisse:**

Balancing Verfahren	aktives Balancing	passives Balancing
Energie vor dem Balancen	864 Wh	864 Wh
Energie nach dem Balancen	760 Wh	330 Wh
Verluste	12%	62 %
Balancing-Dauer	25h	160h

Tabelle 13 Vergleich: Aktives und passives Balancing

Anhand der Kapazitätverteilungen von Zellen wurde zum einen ein Basisdatensatz für die Simulation ermittelt, zum anderen wurde eine Energiebilanzrechnung zum Vergleich der beiden Balancing-Strategien durchgeführt (Schema siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Abbildung 21 Abbildung 21 Schema der Bewertung von aktivem und passivem Balancing auf Basis von Zellmessdaten**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Um eine Vergleichbarkeit der Zellen zu erreichen wurde ein „Normsystem“ als Basis gelegt.

- Definition eines Modellsystems:
 - EV: 65Ah-Zelle, 20KWh, 96 Zellen in Serie
- Skalierung der Messdaten auf 20 KWh-Modellsystem mit 65Ah-Zelle
- Kalkulation der fiktiven Ersparnis:
 - Bessere Nutzung der installierten Energie → Downsizing des Systems oder höhere Reichweite (1KWh ergibt ca. 6,5 km mehr Reichweite bei EV);
 - Kostenbasis: 1KWh ~ 400 € Zellkosten

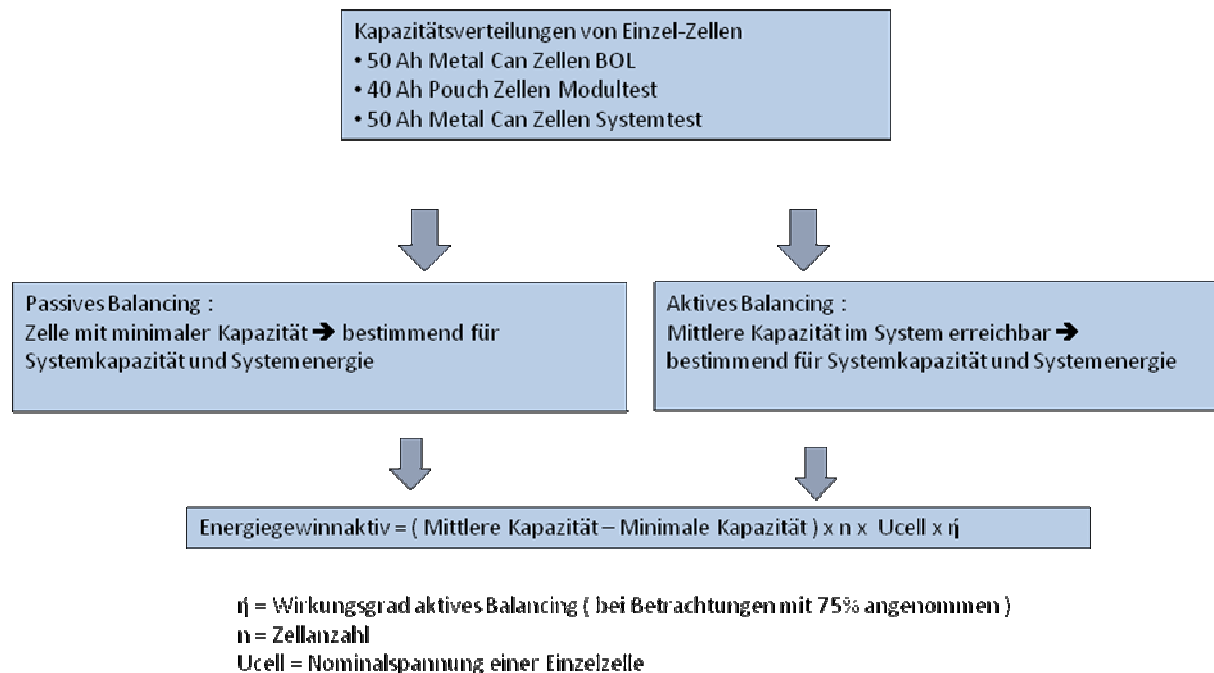


Abbildung 21 Schema der Bewertung von aktivem und passivem Balancing auf Basis von Zellmessdaten

Ergebnisse:

Min Kapaz. [Ah] ...	Minimale skalierte Zellkapazität
Durchschnittskapaz. [Ah]...	Durchschnittliche skalierte Zellkapazität
StdAbw. ...	Standardabweichung
W _{passiv} [kWh] ...	Durchschnittliche Energie nutzbar nach passivem Balancing
W _{aktiv} [kWh] ...	Durchschnittliche Energie nutzbar nach aktivem Balancing
Gewinn Akt. Bal. [KWh] ...	Zusätzlich nutzbare Energie durch Einsatz von aktivem Balancing
Fiktive Ersparnis [EUR] ...	Kostenindikation durch zusätzlich nutzbare Energie (~ 400 EUR/kWh)
Gewinn W _{aktiv} /W _{passiv} [%] ...	Zusätzlich prozentuell nutzbare Energie durch Einsatz von aktivem Balancing

Tabelle 14 Ergebnisse der fiktiven Bewertung.

Basisdaten zur Kalkulation ermittelt von:	Min. Kapaz. [Ah]	Durchschnittskapaz. [Ah]	StdAbw.	Wpassiv [KWh]	Waktiv [KWh]	Gewinn Akt. Bal. [KWh] bei $\eta=75\%$	Gewinn Waktiv/Wpassiv [%]	Fiktive Ersparnis [EUR]	Anmerkung
50Ah Metal Can Zelle (Zellebene)	62,46	65,50	1,72	19,79	20,51	0,72	3,6	288	BOL
50Ah Metal Can Zelle (Systemebene)	60,01	61,19	0,411	19,01	19,29	0,28	1,1	112	80 Vollzyklen
40Ah Pouch Zelle	48,49	51,23	1,06	15,36	16,01	0,65	4,2	260	3600 Vollzyklen

Aus den Testergebnissen ermittelte Kapazitätsstreuungen resultieren durch die Anwendung der aktiven Balancingvariante bereits unter Berücksichtigung einer Energieeffizienz von 75% zwischen 0,28 kWh und 0,72 kWh zusätzlich nutzbare Energie. Diese kann entweder zu einer Erhöhung der Reichweite, Verlängerung der Lebensdauer oder Downscaling des Systems genutzt werden. Um dieses Potential ökonomisch zu bewerten wurde ein durchschnittlicher Preis pro installierter Energie von 400 EUR/kWh angenommen. Es besteht somit ein Einsparungspotential zwischen 100 und 300 EUR. Diese breite Variation ist wiederum als Indikator zu werten, dass das Einsparungspotential wesentlich von der Qualität der Zelle abhängig ist.

Die errechnete fiktive Ersparnis berücksichtigt jedoch keinerlei Messgenauigkeiten im System, welche zu einer Limitierung des Potentials führen. Um diese Bewerten zu können wurde ein Test am realen Fahrzeug durchgeführt.

Die Messkette in Batteriesystemen im Fahrzeug unterliegt einer Limitierung der Spannungsmessgenauigkeit der Zellen welche jedoch für die Statusbestimmung der Zellen herangezogen wird. Um ein Optimum an Genauigkeit und somit eine bestmögliche Nutzung der installierten Energie zu gewährleisten, sind Algorithmen zur Bestimmung des Batterieladezustandes sensibel und werden daher auch durch den Betrieb des Systems beeinflusst.

Es wurde ein Test in einem realen Prototypfahrzeug durchgeführt, der den Fehler in der Spannungsmessung und somit in der Ladezustandsbestimmung der durch den Betrieb verursacht wird ermitteln soll.

Die Messfahrt wurde mit 82,5% geladenem, passiv gebalancierten Batteriesystem durchgeführt. Dieses ist in einem bei MAGNA entwickelten Prototypfahrzeug verbaut (siehe Abbildung 22)



Abbildung 22 Mini Range-Extender Prototypfahrzeug.

Messsetup:

- System gealtert: etwa 10.000 km
- Vermessung der SOC's aller Einzelzellen durch Messung der Zellspannungen
 - vor der Fahrt im gebalancierten Zustand um den Grundzustand zu ermitteln
 - Unmittelbar nach der Fahrt bzw. der Belastung um die Unterschiede in einem nicht relaxiertem Zustand zu ermitteln
 - nach 4h Ruhezeit um die Unterschiede im relaxiertem Zustand zu ermitteln
- Die SOC Bestimmung erfolgt durch Spannungsmessung der Einzelzellen und Rückrechnung auf den SOC via der OCV Kennlinie der Zelle
- Die Messgenauigkeit im Fahrzeug entspricht etwa 10mV → OCV Kurve → 0,68Ah Messungenauigkeit → Entspricht Inbalance vor Test (siehe Abbildung 23)

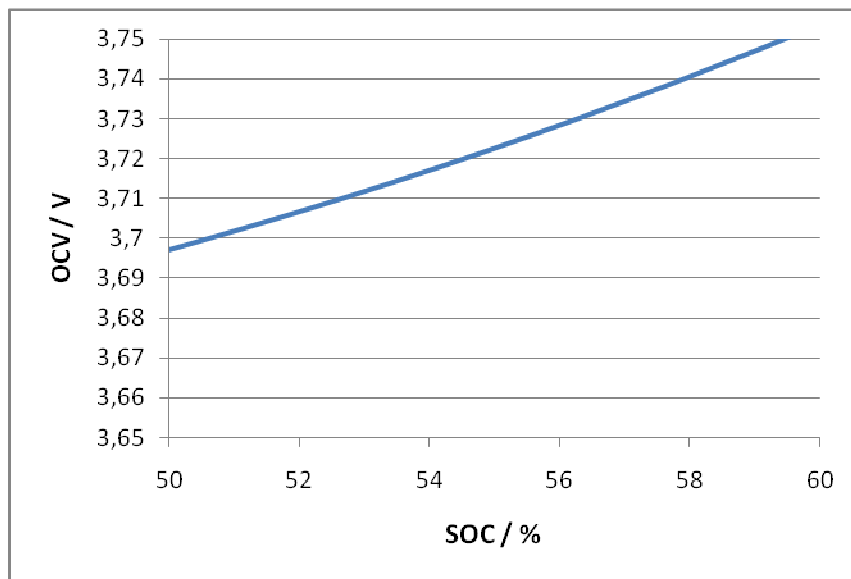


Abbildung 23 Durch Messgenauigkeit resultierende Inbalance vor dem Test

Ergebnisse:

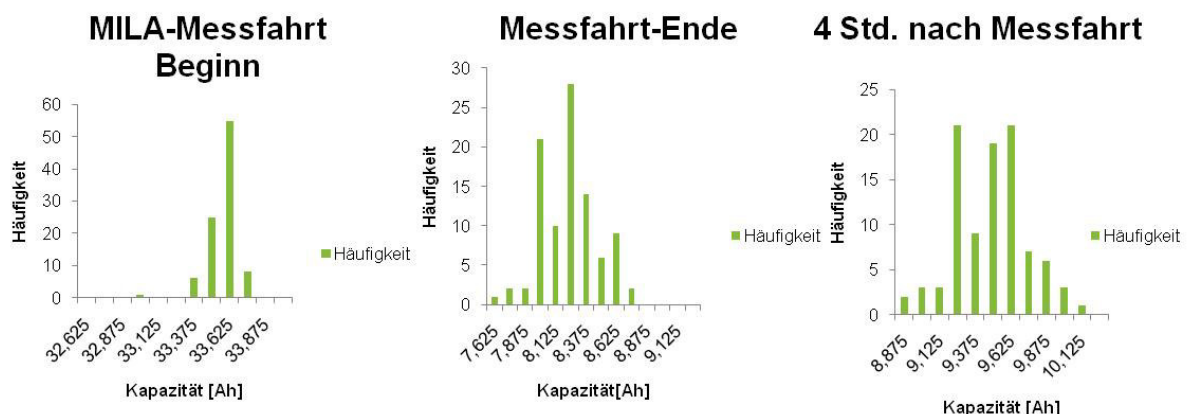


Abbildung 24 Ergebnisse der realen Testfahrt

Durch den realen Betrieb, welcher das volle Spektrum der Einflüsse auf das System erfasst konnte festgestellt werden, dass die Streuung der Zellen bereits innerhalb eines Entladezyklus signifikant steigt. Zu Beginn der Messfahrt entspricht die Abweichung der Zellen von 0,77Ah in etwa der Messgenauigkeit im Fahrzeug. Nach der Messfahrt wurden unmittelbar die Zellspannungen gemessen und über die Spannungs-kennlinie der Zelle einem Kapazitätswert zugeordnet. Dies wurde bewusst nicht über die in der Systemüberwachung implementierte Software durchgeführt um diverse Korrekturen durch die Algorithmen zu umgehen. Eine weitere Messung wurde nach einer Pause von 4h nach der Messfahrt durchgeführt um auch den Ruhezustand nach der Belastung wiederum aufzuzeichnen. Durch die Ruhephase steigt die Zellspannung und somit auch der zugeordnete Kapazitätswert wiederum an. Es ist deutlich erkennbar, dass durch die Belastung eine

signifikante Inbalance im das System feststellbar ist, welche 68% höher ist als im Anfangszustand.

Es ist somit zu schließen, dass der Anteil der nicht nutzbaren Kapazität durch Messungenauigkeiten zwar gegeben ist, jedoch signifikante Kapazitätsanteile durch Balancing besser genutzt werden können.

Min Kapaz. [Ah] ...	minimale skalierte Zellkapazität
Durchschnittskapaz. [Ah]...	Durchschnittliche skalierte Zellkapazität
StdAbw. ...	Standardabweichung
Wpassiv [kWh] ...	Durchschnittliche Energie nutzbar nach passivem Balancing
Waktiv [kWh] ...	Durchschnittliche Energie nutzbar nach aktivem Balancing
Gewinn Akt. Bal. [KWh] ...	Zusätzlich nutzbare Energie durch Einsatz von aktivem Balancing
Fiktive Ersparnis [EUR] ...	Kostenindikation durch zusätzlich nutzbare Energie (~ 400 EUR/kWh)
Gewinn Waktiv/Wpassiv [%] ...	Zusätzlich prozentuell nutzbare Energie durch Einsatz von aktivem Balancing

Tabelle 15 Ergebnisse der realen Bewertung nach der Testfahrt.

Basisdaten zur Kalkulation ermittelt von:	Min. Kapaz. [Ah]	Durchschnittskapaz. [Ah]	StdAbw.	Wpassiv [KWh]	Waktiv [KWh]	Gewinn Akt. Bal. [KWh] bei $\eta=75\%$	Gewinn Waktiv/Wpassiv [%]	Fiktive Ersparnis [EUR]	Reales Einsparungspotential [EUR]	Anmerkung
50Ah Metal Can Zelle (Zellebene)	62,46	65,50	1,72	19,79	20,51	0,72	3,6	288	176	BOL
50Ah Metal Can Zelle (Systemebene)	60,01	61,19	0,411	19,01	19,29	0,28	1,1	112	0	80 Vollzyklen
40Ah Pouch Zelle	48,49	51,23	1,06	15,36	16,01	0,65	4,2	260	148	3600 Vollzyklen

Die Kalkulation des realen Einsparungspotentials basiert auf der ermittelten Messungenauigkeit von 0,68Ah im realen Fahrzeug - ermittelt auf Basis einer 40Ah Zelle. Bei Skalierung resultiert diese Messungenauigkeit in 280Wh, die daher nur nutzbar werden wenn neben der Implementierung des aktiven Balancings auch eine Verbesserung der Messkette im Fahrzeug umgesetzt wird.

Meilenstein: AP6: Validiertes Simulationsmodell

Aus den Daten der Vermessung des diskret aufgebauten Demonstrators konnte eine Validierung des Simulationsmodells durchgeführt werden und die grundsätzliche Tauglichkeit

des Simulationsmodells nachgewiesen werden. Abbildung 25 zeigt den Vergleich der Zellsimulation mit der Messung während eines realistischen Fahrprofils. Der Fehler während des gesamten Fahrzyklus bleibt unter 2%.

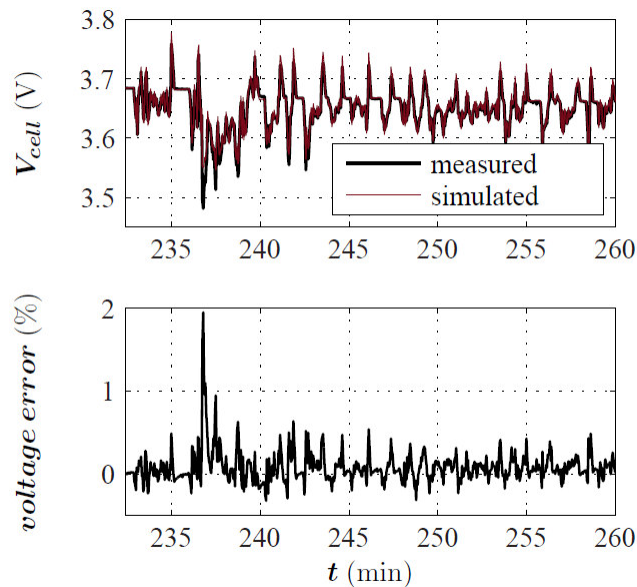


Abbildung 25 Vergleich von Simulation und Messung.

2.6.3 Beschreibung der Schwierigkeiten bei Erreichung der geplanten

Durch einen Fehler in der Software muss der Balancing Test mit 12 Zellen wiederholt werden.

2.6.4 Beschreibung der „Highlights“ im Projektfortschritt

Der Fehler zwischen Simulation und Messung während des gesamten Fahrzyklus bleibt unter 2%.

2.7 AP7 Spezifikation Ausführung

2.7.1 Beschreibung der ursprünglich geplanten Ziele

Evaluierung von Optimierungspotential des Energiemanagements durch die Integration neuer Funktionen in das Batteriemanagement System.

2.7.2 Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine

Für das Balancingverfahren ergaben sich verschiedene mögliche Strategien, die simulationsunterstützt evaluiert wurden. Dabei konnte durch entsprechende Balancingstrategien ein nennenswertes Optimierungspotenzial erschlossen werden.

- Top and bottom charge balancing
- Interblock balancing
- Balancing function
 - No. of secondary coil FET-drivers: 12
 - No. of primary coil FET drivers: 1
 - No. of interblock balancing FET drivers: 1
 - Programmable duty cycle and no. of balance pulses
 - Zero point switching
 - Comprehensive driver diagnostics
- Diagnostic
 - Short circuit G_n to U_{n-1} and U_n
 - Open circuit G_n , U_n
 - Cell under-/overvoltage
 - Transistor ON state(Balancing operation)

2.7.3 Beschreibung der „Highlights“ im Projektfortschritt

- Für den hochintegrierten Chip und das gesamte System wurden Automotive-Spezifikationen erarbeitet. Dabei konnten die verschiedenen Anforderungen der Chipentwickler und der Anwender zusammengefasst werden und eine realistische und praxistaugliche Spezifikation erstellt werden.
- Durch die Simulation konnte dargestellt werden, dass dieses System tatsächlich technische und wirtschaftliche Vorteile bietet. Die eingesparten Kosten durch dieses System liegen ein Vielfaches über den zusätzlichen Kosten durch das System.
- Bisher sind zwei Patentanmeldungen entstanden. Diese betreffen Schaltungsvarianten von aktiven Balancingsystemen.
- In einem Workshop mit Experten zum Thema „funktionelle Sicherheit“ von MAGNA und AIT wurde besonders das Thema Sicherheit beleuchtet, um die Erkenntnisse ins Chip- und Systemdesign einfließen zu lassen.
- Fortschritt beim Chipdesign.
Wesentliche Teile des Chips sind in Design und Layout fertig gestellt.
- Eingehende Simulationen haben gezeigt, dass das Diagnose- und Referenzkonzept eine single-chip SIL3 Lösung ermöglicht. Dies ermöglicht eine Kosteneinsparung durch eine geringere Anzahl benötigter Komponenten im Batteriemanagementsystem.

2.8 AP8 Demonstrator Chip

2.8.1 Beschreibung der ursprünglich geplanten Ziele

Anhand der gesammelten Erkenntnisse werden Funktionsmuster eines monolithisch integrierten Subsystems für das neu konzipierte und erweiterte Batterie Managementsystem entwickelt und aufgebaut.

2.8.2 Beschreibung der Ergebnisse und Meilensteine

Core Functions

- Konfiguration Active-/Passive Balancing APn wird beim Hochlauf sicher erkannt – OK
- Safety Function: Änderung der Konfiguration während des Betriebes führt sofort zum Abbruch des Balancing und wird mit Error-Flag gemeldet – OK
- Bandgap – interne Referenzspannung. Die Referenzspannung von 2.5V ist sehr gut am Zielwert – OK
- Konfiguration Active-/Passive Balancing APn wird beim Hochlauf sicher erkannt – OK
- Safety Function: Änderung der Konfiguration während des Betriebes führt sofort zum Abbruch des Balancing und wird mit Error-Flag gemeldet – OK
- Bandgap – interne Referenzspannung. Die Referenzspannung von 2.5V ist sehr gut am Zielwert – OK
- Trimmung – OK
- Oscillator: Hochlauf, Grundfrequenz, Trimmbarkeit – OK
- E²PROM für Chip-ID und Trimmparameter Programmieren und Auslesen der E²-Zellen – OK
- Übernahme der Trimmparameter – nicht alle Parameter werden von der Logik eingelesen und verarbeitet. Abhilfe – Auslesen der E²-Zellen mittels BMS-uC und zurückspielen in die relevanten Logik-Register.
- Hot Plug In der Zellspannungen: Beliebige Reihenfolge der Zellspannungs-Kontaktierung – erste Tests OK.
- Systematische Überprüfung ist noch offen.
- Testmodes
 - Safety: Verriegelung für Aktivierung der Testmodes – OK
- Zugriff auf interne Testregister und Funktionen (lesend und schreibend) – OK
- Zugriff auf analoge Testfunktionen - OK
- Spannungsversorgung interne Spannungsregler für Analog-Blöcke, Logik und Interblock-Kommunikation: Genauigkeit und Ausgangsströme – OK
- Überwachung der Versorgungsspannungen (Overcurrent, Undervoltage) – OK
- Umschaltung und Betrieb mit externer Versorgung – OK
- Wakeup mit Anlegen externer Versorgung – OK
- Standby- und Betriebsströme – OK
- Bootstrap-Schaltung für G12 Treiber: die Chargepump läuft nicht stabil an. Abhilfe: eine externe Diodenbeschaltung an den Pins.
- nSLEEP, nFAULT, nRES Funktionalität und Konfigurierbarkeit – OK

- VIO: Betrieb von SPI und Interface-Signalen mit 3.3V bzw. 5.0V – OK
- GPIO PinsFunktion der vier GPIO Pins – OK
- Treiberstärke als Digital-Output – OK
- Treiber-Grenzfrequenz ist für Applikations-Betrieb – OK
- Treiber-Grenzfrequenz für Testmodes - gerade noch ausreichend, aber schnellere Ansteuerung geplant
- Overtemperature ShutdownChip Temperature Measurement – OK
- Overtemp. Komparator – OK, aber Schwelle liegt mit ca. 34°C wesentlich zu tief. Abhilfe durch Kommunikation über BMS-uC.

Safety Concept - ProSIL

- Umschaltung interne / externe Spannungsreferenz – OK
- Window-Watchdog bei allen 12 Zellspannungs-KanälenKomparatoren, unabhängig von den SigmaDelta-ADCs; Vorgabe unterschiedlicher Grenzschnnungen und Überprüfung auf Auslösung (Summen-Fehlersignal und Detailinformationen) – OK
- Abschaltung bei Konfigurationsfehlern – OK
- Schaltbarer Prüfstrom bei ext. Temperatur-MUX – OK
- Gate-Treiber und FET-Überwachung – OK
- Von der Zellspannungsmessung unabhängigeÜberprüfung der Blockspannung mittels SAR-ADC (U/6, U/12) - OK

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Demonstrator Chips dargestellt:

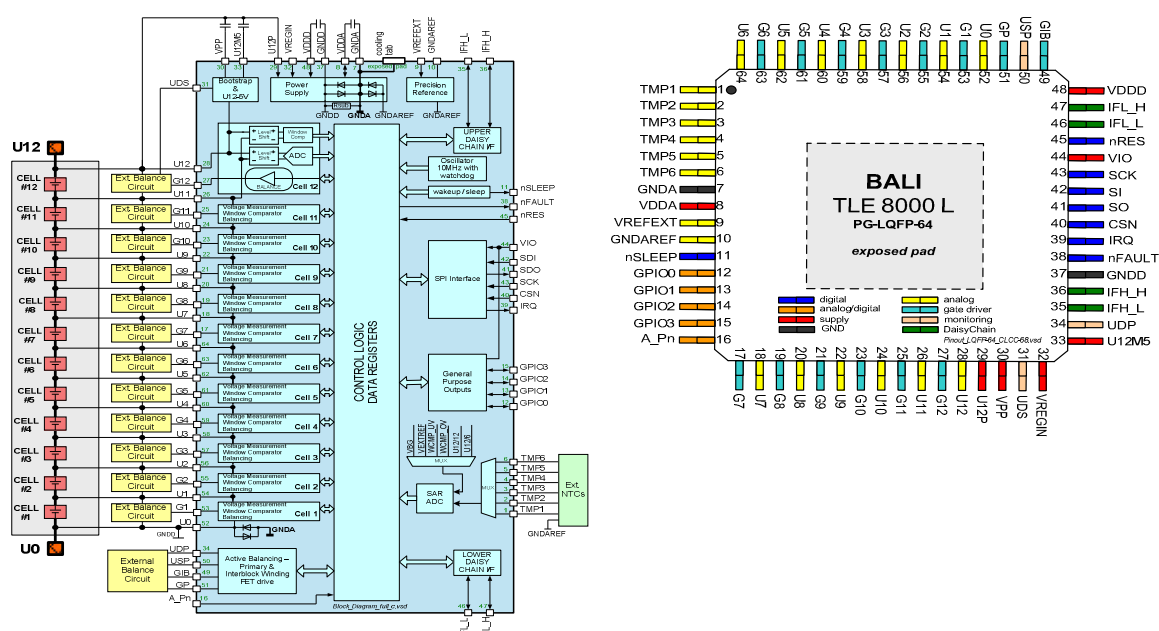


Abbildung 28 Blockdiagramm und Pinning vom Testchip

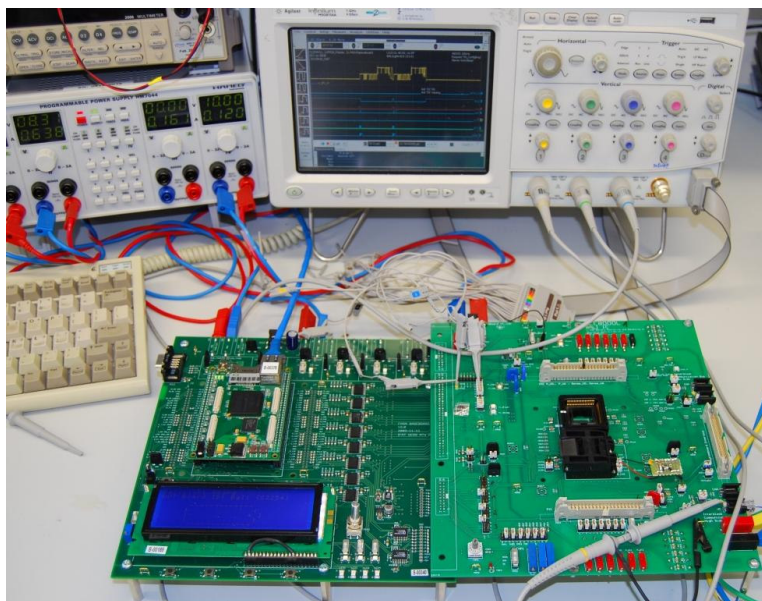


Abbildung 29 Verifikationsboard mit PC GUI

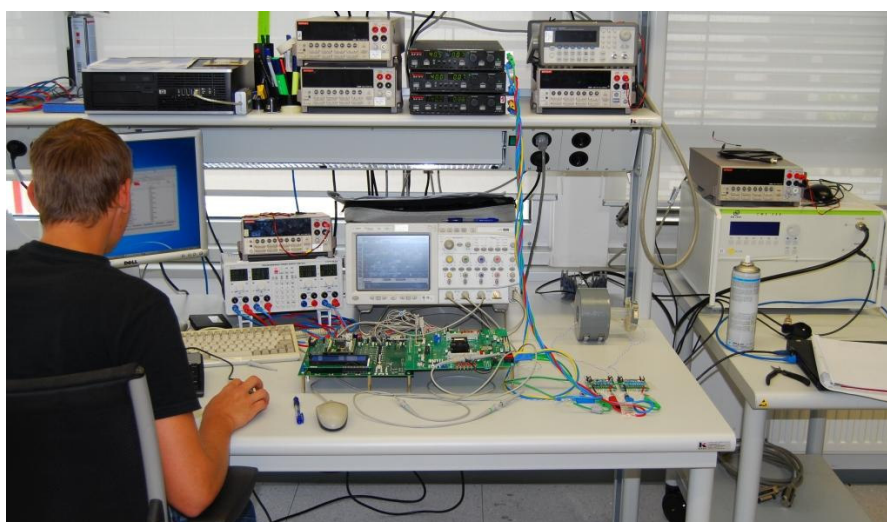


Abbildung 30 Verifikation am Laborplatz

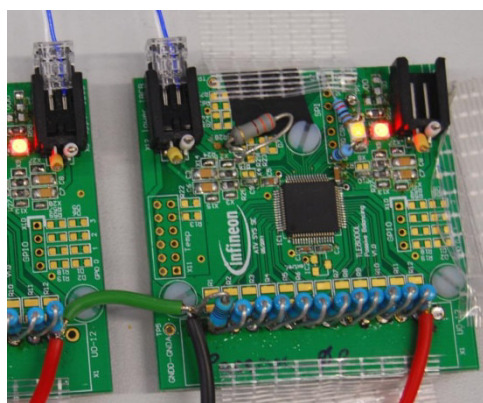


Abbildung 31 Passive Boards für Kommunikationstests (IBCB)

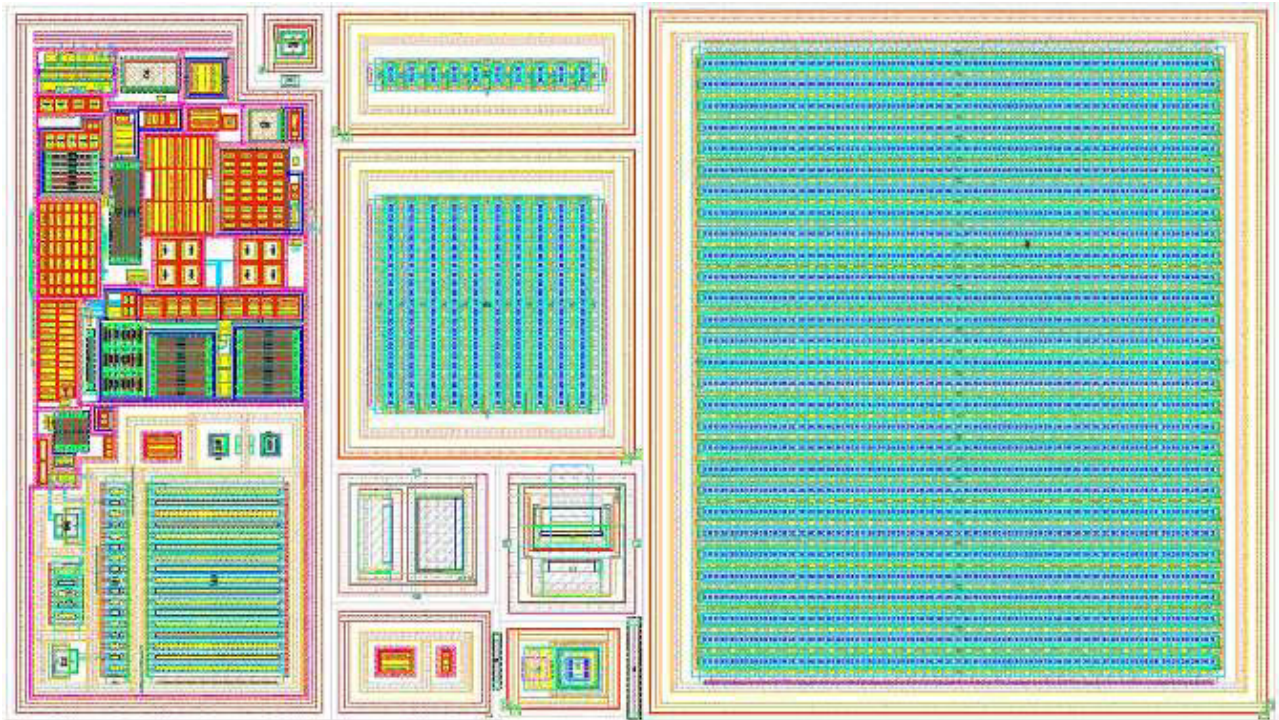


Abbildung 32 Layout der Treiberstufe

2.8.3 Beschreibung der Schwierigkeiten bei Erreichung der geplanten Ziele (falls vorhanden)

Untersuchungen an Trafos für aktives Balancing Version 1: U44-Kern mit diskreter Ansteuerung

- Bei einem ersten diskreten Aufbau wurde ein U44-Kern mit konventioneller Drahtwickeltechnik verwendet.
- Es ergab sich bei einer Schaltfrequenz von 19 Kilohertz ein Wirkungsgrad von über 80% bei einem mittleren Strom von 5 Ampere.
- Diese Werte sind für ein aktives Zellbalancing völlig ausreichend. Nachteilig ist aber das große Gewicht und der Bauraumbedarf des Trafos.
- Mit einer Höhe von 22 mm bestimmt er maßgeblich die Höhe des Bauraums für die Elektronik.
- Da in einem Fahrzeug ca. 10 Trafos eingebaut werden, trägt das Gewicht von 120 gr. pro Stück erheblich zum Fahrzeuggewicht bei.

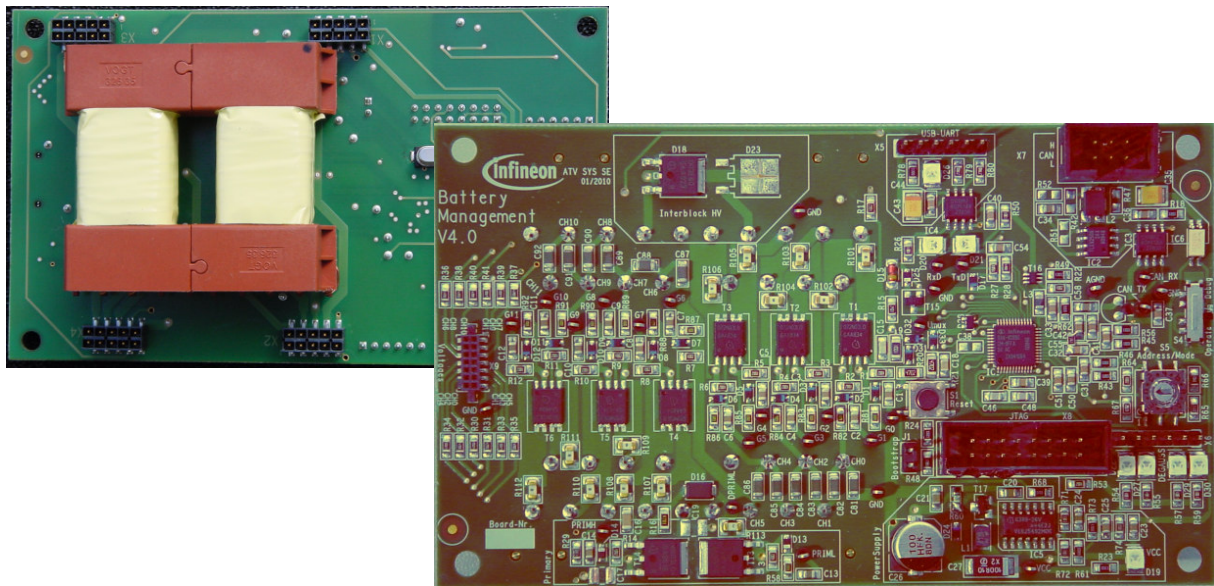


Abbildung 33 Diskretes Board V4 mit Trafo U44

- Um das Ferritvolumen verringern zu können, erhöht man üblicherweise die Frequenz.
- Der Trafo konnte auf eine Bauhöhe von 7 mm und ein Gewicht von 17 g reduziert werden.
- In einem ersten Versuch wurde mit 80 Kilohertz gearbeitet. Dies brachte aber mehrere Nachteile mit sich.
- Das mit steigender Frequenz zunehmend induktive Verhalten der Zellen ist hier aber schon deutlich spürbar.
- Das Balancing arbeitet mit Strompulsen. Der daraus resultierende Wechselanteil muss aber von den Zellen geglättet werden.
- Lokale Kondensatoren auf der Platine parallel zu den Zellen würden helfen. Sie scheiden aber aufgrund der erforderlichen Größe und den Kosten aus.
- Durch die viel höhere Zahl von Schaltvorgängen bei höheren Frequenzen steigen damit auch die Schaltverluste an.
- Diskreter Aufbau mit 8 Bit μC wie in Board V4, da zu dem Zeitpunkt der TLE8000 noch nicht verfügbar war
- Bei diesem Testaufbau wurden Testpulse für den Trafo in Assembler-Programmierung erzeugt
- Erkenntnis: Betrieb mit 80 kHz nicht sinnvoll
- In einem weiteren Schritt wurde der Trafo wieder vergrößert und die Frequenz auf unter 40 Kilohertz abgesenkt.
- Der resultierende Trafo hat nun 8 mm Höhe bei einem Gewicht von 31 g
- Die gegenüber der Version 2 größere Fläche stört nicht. Entscheidend ist die weiterhin geringe Höhe der Baugruppe

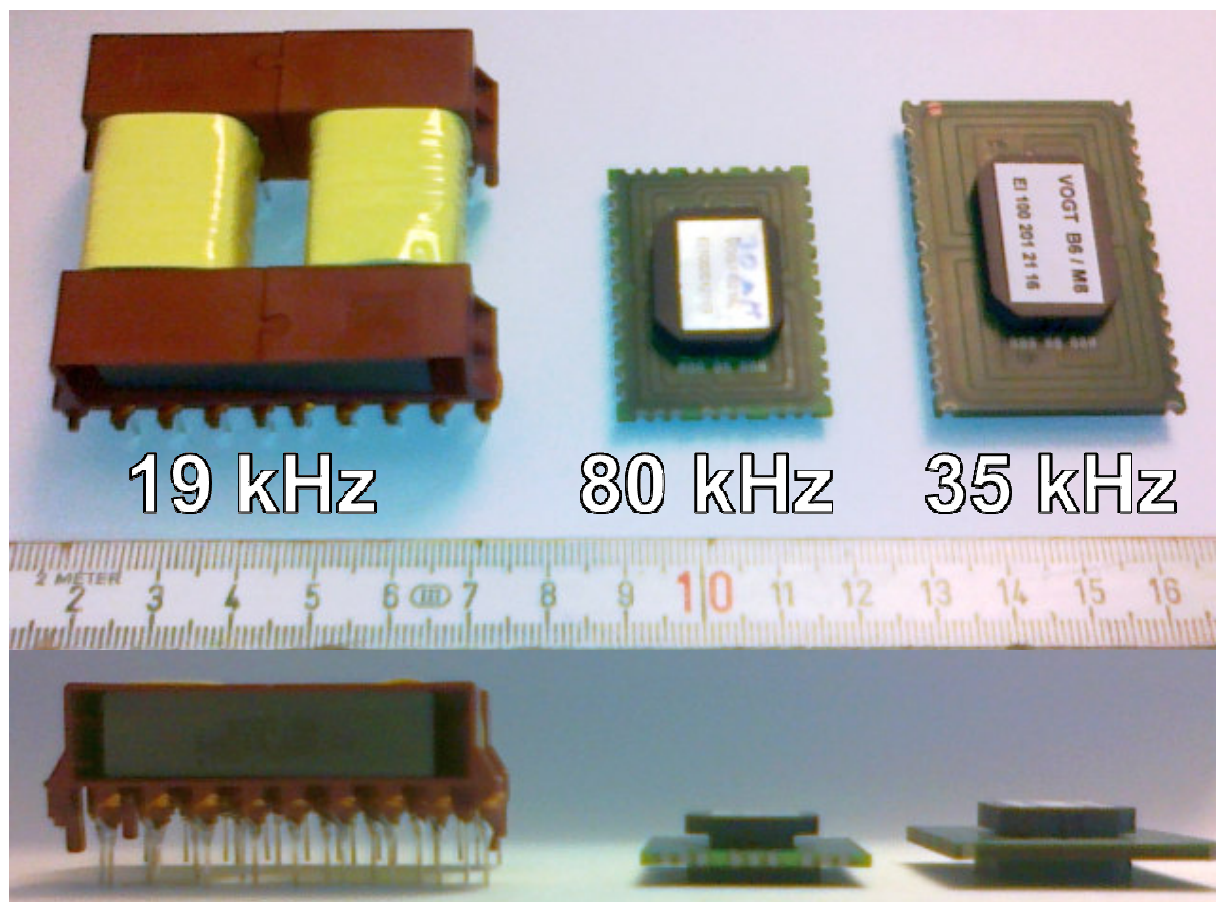


Abbildung 34 Evolutionsschritte beim Trafo

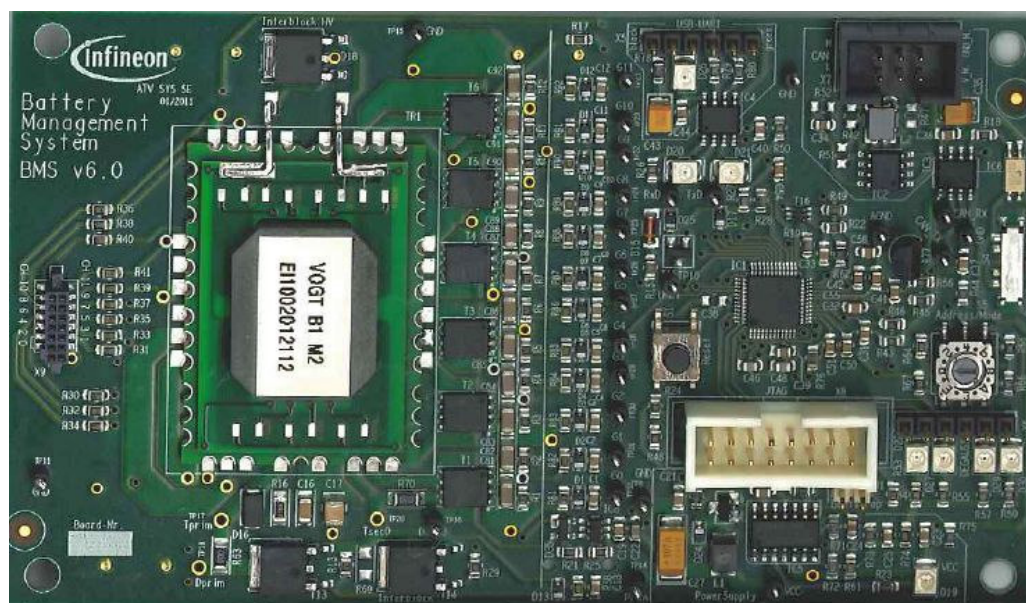


Abbildung 35 Diskretes Board mit verkleinertem Trafo

Ermittlung der Verluste:

- Fazit: Der Kupferquerschnitt in der Leiterplatte des Trafos muss erhöht werden
 - Breitere Leiterbahnen-> Fläche der Platine wird größer
 - Erhöhung der Kupferdicke von 70µm auf 105 µm

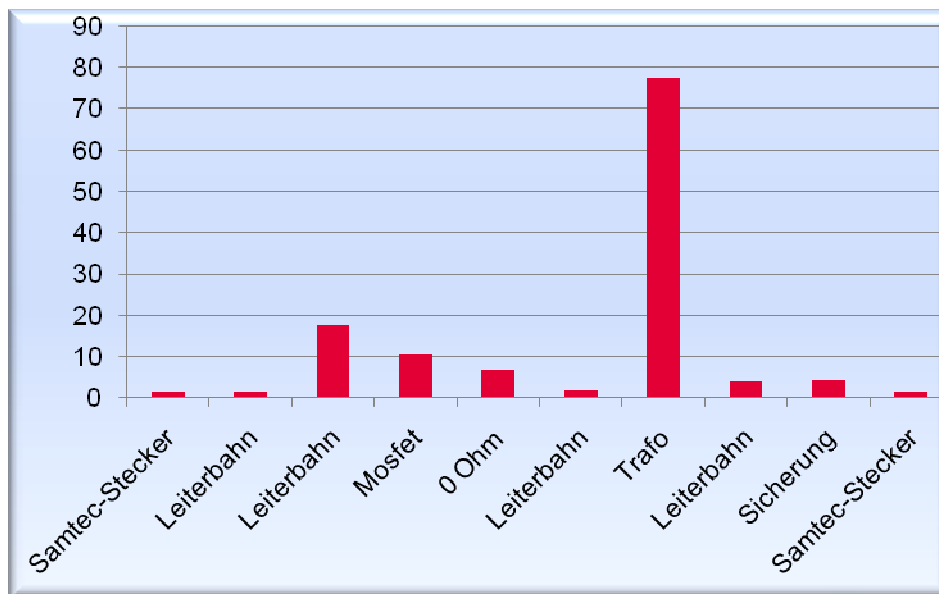


Abbildung 36 Verluste im Primärkreis bei einem Gleichstrom von 1A

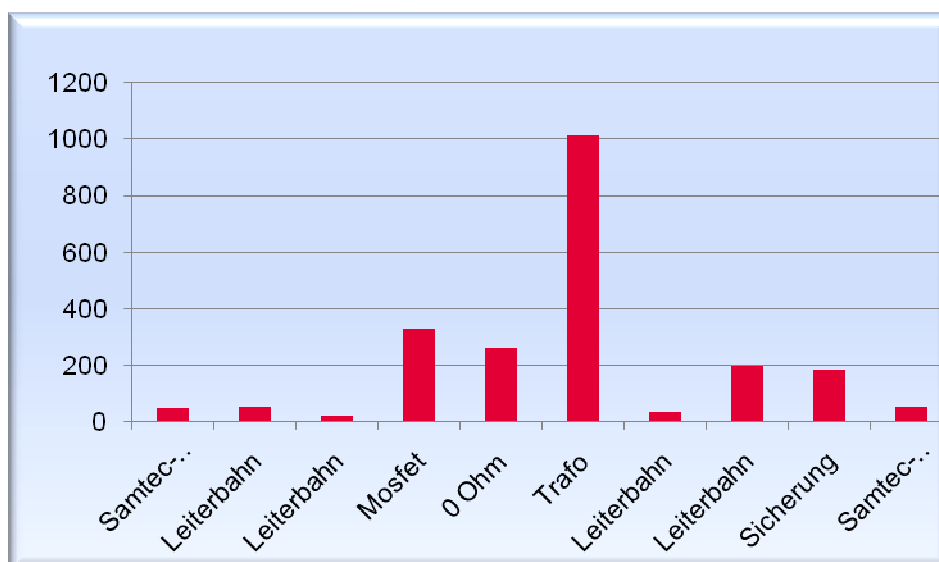


Abbildung 37 Verluste im Sekundärkreis bei einem Gleichstrom von 1A

- Der induktive Widerstand in einer Zelle (z.B. $0,5\mu\text{H}$) bremst erst einmal den Stromfluss in die Zelle. Dies sieht man in den mit den Pfeilen markierten Spannungsbuckeln
- Fazit: Je geringer die Frequenz, desto weniger wirkt sich die parasitäre Induktivität der Zellen aus

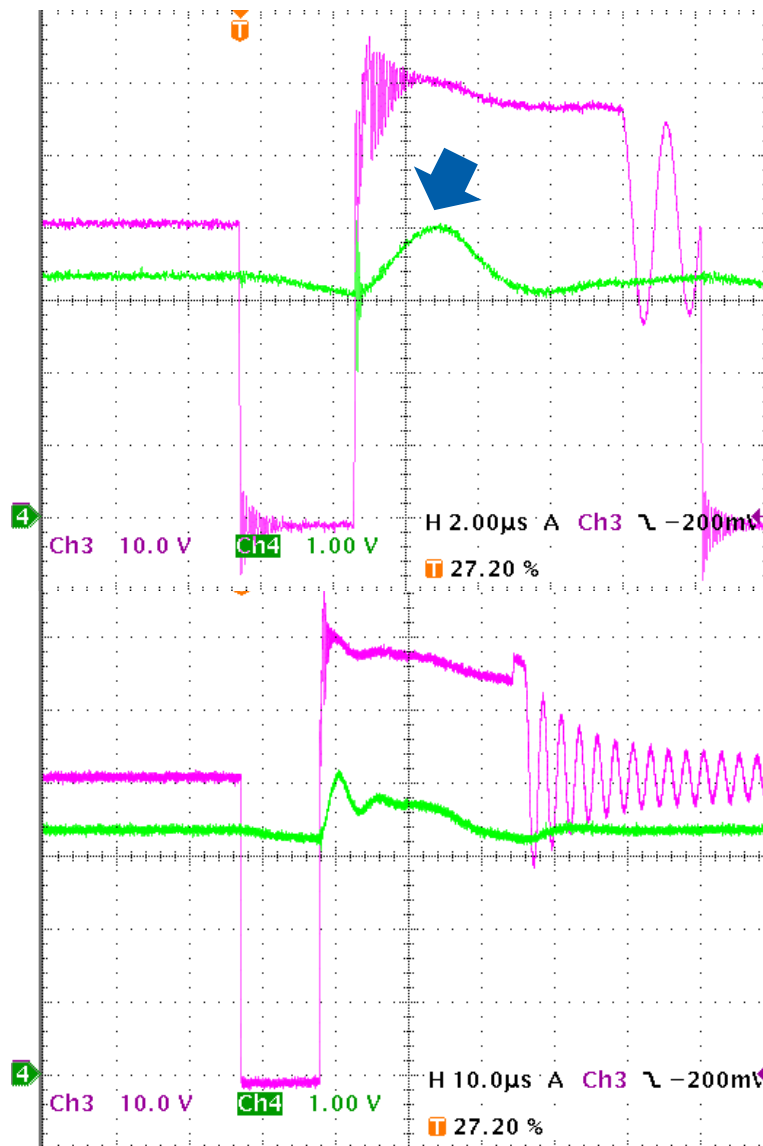


Abbildung 38 Oben: Bei 80 kHz erstreckt sich die Störung fast über den ganzen Nutzpuls

Interblock Communication Bus ICB

- ICB Receiver Low-side und High-side Empfindlichkeit und Schwellen für Differenzsignal – OK
- Auswertung mit Offset-Spannungen bis $\pm 5\text{V}$ – OK

- IBCB Transmitter Low-side und High-side Treiberstärke bei +/-10mA – OK
- Kommunikation über IBCB Kommunikation mit 1Mbps, beide Richtungen – OK
Mögliche Leitungslängen: Übertragungstest bis 10m Leitungslänge – OK
- Zuweisung von Knoten-Adressen via IBCB – OK
- Safety – Communication-WDOG; Abschaltung bei Überschreitung des 250ms Zeitfensters – OK
- Adressierung der Knoten bei WDOG-Frames muss mit individueller Adressierung der Knoten erfolgen. Abhilfe – BMS-uC muss alle Knoten einzeln adressieren. Das führt zu leicht erhöhtem Bus-Traffic, ist aber kein Problem.
- Wake-up SequenceWake-up durch IBCB Low-side – OK
Weitergabe des Wake-up auf IBCB High-side – OK
- Störfestigkeit des IBCB
Erste Tests mit einem BCI-System (Bulk Current Injection) wurden bereits durchgeführt. HF-Ströme wurden dabei als Common-mode Störung eingeprägt. Zwischenergebnis – bei einzelnen Störfrequenzen wurde erhöhte Empfindlichkeit festgestellt. Weitere Tests sind geplant.

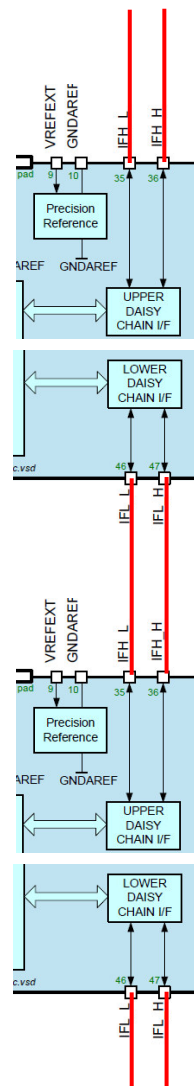


Abbildung 39 Interblock Communication Bus ICB

ADC_SigmaDelta

- Zellspannungsmessung ADC-Ausgabewerte – OK
- Trimmung grundsätzlich OK, aber Streuung der ADCs ist etwas höher als erwartet. Der Trimmbereich ist nicht für alle gemessenen Toleranzen ausreichend. Abhilfe Trimm-Bereich: Ermittlung der Zellspannungs-Messfehler pro Kanal, Speicherung von Korrekturwerten im E²PROM und Korrektur-Rechnung im BMS-Mikrokontroller
- Trimmung– Trimmkonzept Das gewählte Trimmkonzept weist Grenzen bei Offset- und Gain-Korrektur auf. Überarbeitung ist nötig.

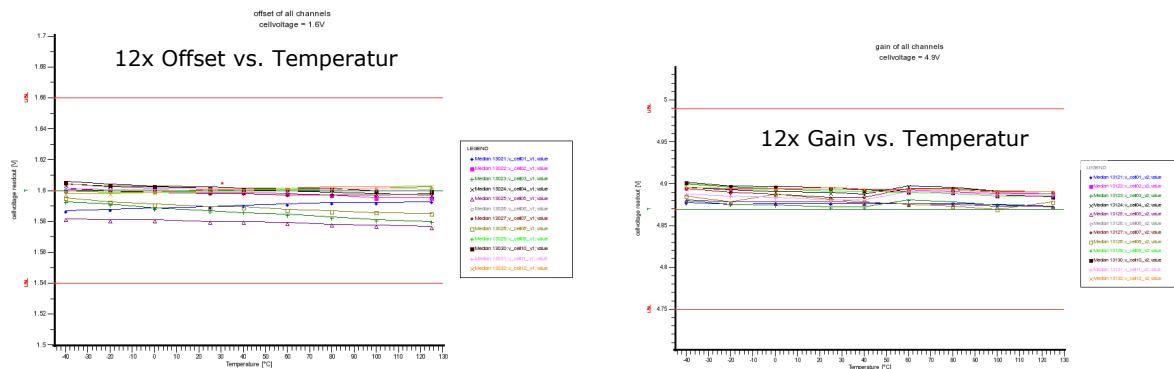


Abbildung 40 Trimmkonzept

ADC_SAR

- Externe Temperaturmessung (6 ext. Sensoren) Stromquellen 5/10/15/20uA – OK
- MUX für ext. Sensoren – OK
- ADC-Ausgabewerte – OK
- Interne Temperaturmessung ADC-Ausgabewerte – OK
- Übertemperatur-Abschaltung – *nicht OK, Auslösung bei +45°C*
- Interne Spannungsmessung MUX für interne Spannungen – OK
- ADC-Ausgabewerte – OK
- Betrieb mit externer Referenzspannung (Safety Concept) Überprüfung der Safety-Funktion – OK
- Safety Concept – Kontrolle der Blockspannung Blockspannung 1/6 bzw. 1/12 unabhängig von der Zellspannungsmessung – OK

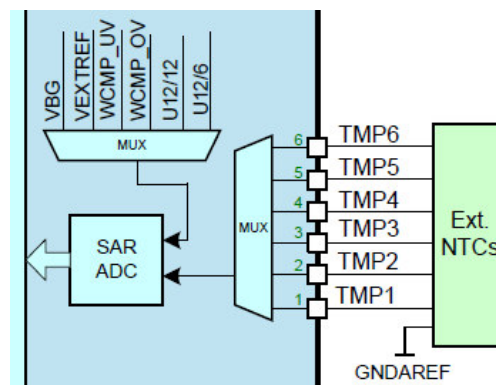


Abbildung 41 ADC SAR

Active Balancing

- Active Balancing – Grundfunktionen Treiberstufen für externe FETs – OK
- Diagnosefunktionen, Komparatorschwellen – OK
- VPP-Generierung für G12-Treiberstufe – nicht OK, Chargepump läuft nicht stabil. Abhilfe mit externer Diodenschaltung.
- Active Balancing – Manueller Mode Betrieb mit dem Demonstrator-Board BMS 6.0 – OK

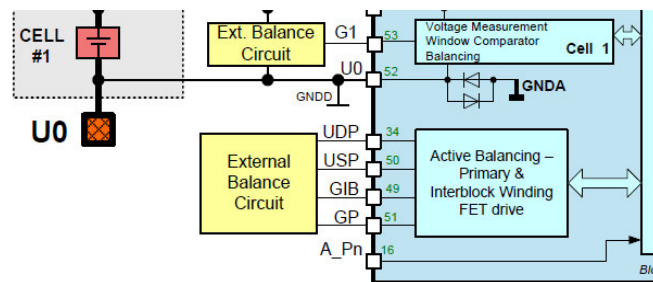


Abbildung 42 Blockschaltbild Active Balancing

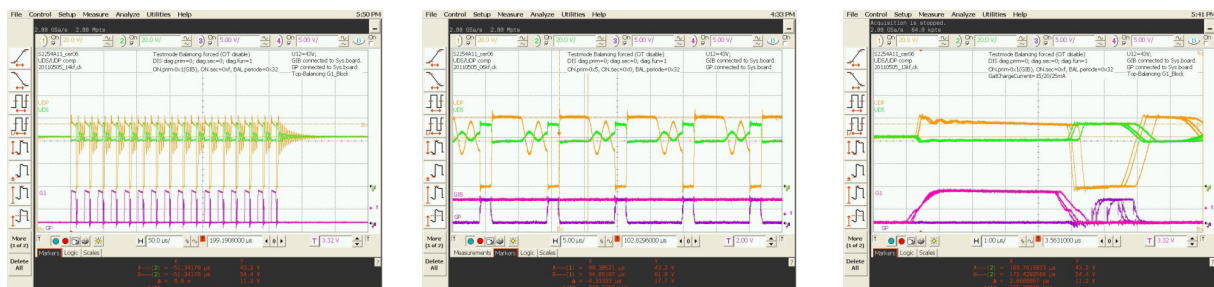


Abbildung 43 Messdiagramme zum Active Balancing

Active Balancing – AUTO Mode Delays der Diagnose-Komparatoren sind zu kurz, um alle Variationen in den Spannungsverläufen abzudecken. AUTO-Mode ist nur eingeschränkt möglich.

Passive Balancing

- Passive Balancing – Grundfunktionen – OK
- Interne Leistungsstufen, Strom und R_ON – OK
- Treiberstufen für externe FETs – OK Diagnose von Overcurrent, Undercurrent– OK
- Open Load Erkennung mit I_diag – OK
- Open Load Erkennung mit ON_Gx ist nicht ganz zuverlässig. Abhilfe durch Verwendung der I_diag Funktion.
- Passive Balancing – BetriebAktivierung / Deaktivierung von 1..12 Kanälen – OK
- Verlustleistung, Chipwärmung. Die Chipwärmung beim passiven Balancing hängt neben der Verlustleistung am Chip auch wesentlich von den thermischen Bedingungen am Board ab. Hier sind weitere Tests nötig.

2.8.4 Beschreibung der „Highlights“ im Projektfortschritt

HF-Messungen bei MAGNA

- MAGNA eMini im Betrieb auf Prüflin

- Messung von HV-Spannung und Strom DC-Messung für Information über Last- und Rekuperationsbedingungen. HF-Messung für Störungsermittlung.
- Ergebnisse für Abschätzung der Störbedingungen am Testchip



Abbildung 44 HF-Messungen bei MAGNA

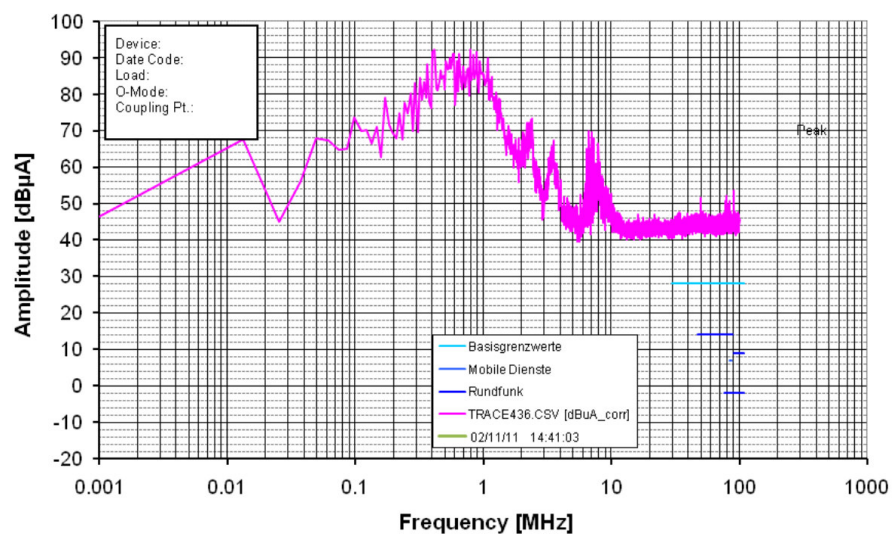


Abbildung 45 HF-Messungen bei MAGNA

4 Ausblick und Empfehlungen

Im Laufe des Projekts konnte die grundsätzliche Funktionstauglichkeit des Verfahrens mithilfe von Messungen an einem Versuchsaufbau sowie in der Simulation bestätigt werden. Durch Betrachtung der Kosten über die gesamte Batterielebensdauer und der Kosten für das hier untersuchte Balancing-System konnte nachgewiesen werden, dass dessen Einsatz auch wirtschaftlich gerechtfertigt ist. Dies ist für die Verbreitung im Automotivbereich eines der wichtigsten Kriterien.

Im Rahmen der detaillierten Untersuchung mit der Funktionsweise des aktiven Balancing-Systems wurden einige Verbesserungen und Erweiterung gefunden. Aktuell sind zwei Patenteinreichungen in Arbeit und einige Erweiterungen der Betriebsstrategie zur Optimierung des Wirkungsgrades und der Lebensdauer der Batterie werden untersucht.

Das Verhalten und die Eigenschaften eines durch das aktive Balancing symmetrierten Batteriemoduls wurden durch Simulationen untersucht. Als Basis für diese wurden Zellendaten durch Messungen ermittelt und die Resultate in Simulationsmodellen abgebildet. Die Batteriesteuerung in einem Fahrzeug ist hinsichtlich der Sicherheitsanforderungen ein kritisches Element. Dies wurde bei der Systemdefinition in der Funktionsweise, der Schaltungsarchitektur und im Signalfluss berücksichtigt.

- Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Entwicklung und Verifikation des Testchips wesentliche Erkenntnisse für das Design des geplanten Produkt-Chips gebracht hat.
- Die Chip-Funktionalität, die Partitionierung der Funktionsblöcke, das Safety-Concept (proSIL) und vor allem die Balancing-Strategien und Interblock-Kommunikation konnten bestätigt werden.
- Das fehlerhafte Verhalten einiger Testchip-Funktionen ist bereits überwiegend verstanden und die Verbesserungen für den Produkt-Chip sind in Arbeit.
- Die Demonstrator-Prints und System-Prints der Systemgruppe zeigen die Tauglichkeit des Testchips im applikationsnahen Betrieb. Sie bilden die Basis für die Verifikation von Passive- und Active-Balancing durch (potentielle) Kunden.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Markus Einhorn, Valerio F. Conte, Christian Kral, Jürgen Fleig, Robert Permann, "Parameterization of an Electrical Battery Model for Dynamic System Simulation in Electric Vehicles", *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, September 2010
- [2] Markus Einhorn, J. Fleig "Improving of Active Cell Balancing by Equalizing the Cell Energy Instead of the Cell Voltage", *Electric Vehicle Symposium and Exposition (EVS)*, November 2010
- [3] Markus Einhorn, Werner Rößler, Jürgen Fleig, "Improved Performance of Serially Connected Li-Ion Batteries With Active Cell Balancing in Electric Vehicles" *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, VOL. 60, NO. 6, Juli 2011

IMPRESSUM

Verfasser

AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Mobility Department
Peter Gollob
Giefinggasse 2 , 1210 Wien
Tel: +43 (0) 50 550 - 0
E-Mail: office(at)ait.ac.at
Web: www.ait.ac.at

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at
Web: www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Weder der Klima- und Energiefonds noch die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) sind für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH