

Evaluierung einer neuartigen Umrichtertopologie zur Kombination von Batterie, Balancing-Systemen, Umrichtern und Ladeschaltungen

- Vorstudie -

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter dem AZ: 31873/01
von der deutschen Bundesstiftung Umwelt

Von

Dipl. Ing. Arthur Singer
Prof. Dr.-Ing. Thomas Weyh
Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Pfisterer
Dipl. Ing Florian Helling
M. Eng. Ulrich Bürger

Bewilligungsempfänger:
MaxSolar GmbH, Schmidhamer Str. 22, 83278 Traunstein

Konsortialpartner:
Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg
Hochschule Osnabrück, Albrechtstraße 30, 49076 Osnabrück

22.12.2015

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen..... | 3 |
| 1.1 | Abbildungsverzeichnis..... | 3 |
| 1.2 | Tabellenverzeichnis | 4 |
| 2 | Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen | 5 |
| 3 | Zusammenfassung..... | 6 |
| 4 | Einleitung..... | 6 |
| 5 | Hauptteil..... | 8 |
| 5.1 | Allgemeine Einsatzgebiete von Speichersystemen | 8 |
| 5.1.1 | Energy shifting - Verschiebung von Energiemengen..... | 8 |
| 5.1.2 | Peak shaving - Reduzierung von Spitzenlasten | 8 |
| 5.1.3 | Load/production ramping - Abmilderung von Last- und Produktionssprüngen | 8 |
| 5.1.4 | Blindleistungskompensation - Reduzierung des Phasenversatz | 8 |
| 5.1.5 | Frequency control - Stützung der 50 Hz Netzfrequenz | 9 |
| 5.2 | Zusätzliche Verwendungsmöglichkeiten der neuen Technologie..... | 9 |
| 5.2.1 | Inselnetze mit starken Schwankungen in der Last | 9 |
| 5.2.2 | Induktive Lasten mit hohen Lastspitzen..... | 9 |
| 5.2.3 | Unterschiedliche Signalformen - Netzfilterung - Blindleistungskompensation | 9 |
| 5.3 | Grundsätzliche Vorüberlegungen..... | 10 |
| 5.3.1 | Beschreibung der aktuellen Situation | 10 |
| 5.3.2 | Darstellung der grundlegenden Idee..... | 12 |
| 5.4 | Berechnungen und Simulationsergebnisse | 15 |
| 5.4.1 | Vorüberlegungen zur Stufenzahl und Auslegung der Module | 15 |
| 5.4.2 | PWM-Modulation der Ausgangsspannung | 17 |
| 5.4.3 | Veranschaulichung dynamischer Seriell-Parallel-Verschaltung und Bedeutung für die Effizienz | 19 |
| 5.5 | Verlustbetrachtung und Effizienz des Gesamtsystems | 23 |
| 5.6 | Steuerung und Regelung des Batterieumrichters | 25 |
| 5.6.1 | Funktionsweise des Seriell-Parallel-Algorithmus | 25 |
| 5.6.2 | Dynamisches Balancing der Ladezustände..... | 26 |
| 5.7 | Hardwaremäßige Umsetzung der 9-Schalter-Topologie | 27 |
| 5.7.1 | Übersicht zum Aufbau eines Submoduls..... | 27 |
| 5.7.2 | Zentrale Steuereinheit..... | 29 |
| 5.7.3 | Sonstige Komponenten | 29 |
| 5.8 | Messergebnisse und Funktion..... | 30 |
| 5.9 | Wirtschaftliche Betrachtungen | 32 |

| | | |
|--------|--|----|
| 5.9.1 | Kostenentwicklung Speichersysteme | 32 |
| 5.9.2 | Marktentwicklung Klein- und Großspeicher | 34 |
| 5.10 | Wirkungsgradsteigerung und tCO ₂ -Einsparung mit der neuen Technologie im Vergleich zu klassischen PWM-Umrichtern | 34 |
| 5.11 | Normen und Richtlinien | 37 |
| 5.11.1 | Allgemeine Sicherheitsnormen | 37 |
| 5.11.2 | Sicherheitsnormen und Richtlinien für Speichersysteme | 37 |
| 5.11.3 | Allgemeine Kompatibilitätsnormen | 37 |
| 5.11.4 | Normen und Richtlinien zur Netzkonformität von Speichern..... | 37 |
| 5.12 | Sicherheitskonzept | 38 |
| 5.12.1 | Umgebungsbedingungen | 38 |
| 5.12.2 | Schutzklassen..... | 38 |
| 5.12.3 | Sicherheit im Programmablauf..... | 39 |
| 5.13 | Ausblick..... | 40 |
| 6 | Fazit | 41 |
| 7 | Quellenverzeichnis | 42 |
| 8 | Anhänge..... | 42 |

1 Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

1.1 Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1: | Bestandteile eines Batteriemanagementsystems (BMS)..... | 11 |
| Abbildung 2: | Klassischer Aufbau eines Systems mit Batteriespeicher, Umrichter und elektrischer Maschine | 12 |
| Abbildung 3: | Vorgeschlagener Aufbau mit in Wechselrichtern integrierten Energiespeichern | 13 |
| Abbildung 4: | Grundsätzliche Topologie eines Umrichtermoduls..... | 14 |
| Abbildung 5: | Bypass - Modul wird überbrückt..... | 14 |
| Abbildung 6: | +V - Modul entspricht einer positive Spannungsstufe..... | 14 |
| Abbildung 7: | -V - negative Spannungsstufe, invers zu +V | 15 |
| Abbildung 8: | Parallel - verdoppelt die Kapazität und halbiert den Widerstand | 15 |
| Abbildung 9: | Sinussignal angenähert durch Stufen verschiedener Höhe und Abtastfrequenz | 16 |
| Abbildung 10: | 3D-Plot zu Mean Square Error über Batteriespannung und Abtastrate der Referenzspannung..... | 16 |
| Abbildung 11: | Auswertung „Höhenlinien“ zu Mean Square Error..... | 17 |
| Abbildung 12: | Stufenweise PWM-Modulation [1] | 18 |
| Abbildung 13: | Stufenweise PWM-Modulation bei 8 Stufen und 50Hz, 230V Sinusreferenz..... | 19 |
| Abbildung 14: | Veranschaulichung dynamische seriell-parallel Schaltung | 20 |
| Abbildung 15: | Ohmsche Verluste in den Halbleiterschaltern bei Parallelschaltung von drei Modulen..... | 21 |
| Abbildung 16: | Verluste im Gesamtsystem | 23 |
| Abbildung 17: | Leistungsverteilung Einfamilienhaus | 24 |
| Abbildung 18: | Effizienz in Abhängigkeit von der Anzahl Module und der Leistung | 24 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 19: Annäherung eines Sinussignals durch Multi-Level-Umrichter mit Einzelzellen auf den Submodulen | 25 |
| Abbildung 20: Veranschaulichung der dynamischen seriell-parallel Schaltung..... | 25 |
| Abbildung 21: Algorithmus zur Ermittlung der geeignetsten Stufenkonfiguration nach [8] | 26 |
| Abbildung 22: Konzeptioneller Aufbau eines Submoduls | 27 |
| Abbildung 23: Vierlagiges Layout der Submodule | 28 |
| Abbildung 24: Laboraufbau des Batteriespeichers | 29 |
| Abbildung 25: Funktion des Laboraufbaus: Links als Stufen diskretisierte Sinusspannung mit 50Hz (3 Module), rechts: mit PWM überlagerte Stufenpyramide mit Ausgangsfilter (4 Module) | 30 |
| Abbildung 26: Mit PWM überlagerte Stufenpyramide (3 Module) | 30 |
| Abbildung 27: PWM Modulation über der Sinusausgangsspannung..... | 31 |
| Abbildung 28: Beliebige Spannungsformen können über den Laboraufbau ausgegeben werden. | 31 |
| Abbildung 29: Kostenzusammensetzung Kleinspeicher heute und in drei Jahren | 33 |
| Abbildung 30: Marktentwicklung Kleinspeicher | 34 |
| Abbildung 31: Marktentwicklung Großspeicher | 34 |
| Abbildung 32: Wirkungsgradvergleich des beantragten Batteriespeichers gegenüber klassischem PWM-Umrichter | 36 |
| Abbildung 33: Beurteilung der Schutzklasse, kritische Zustände und Maßnahmen..... | 39 |
| Abbildung 34: Sicherheitsablauf im Programmcode..... | 40 |

1.2 Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Verluste in der Parallelschaltung abh. von der Anzahl parallel geschalteter Module..... | 22 |
| Tabelle 2: Ohmsche Verluste im Vergleich zwischen M2C und M2PC; Normierte Darstellung auf $1/(R_{on} \cdot I^2)$ | 22 |
| Tabelle 3: Performanz des Lade- und Entladealgorithmus abhängig vom eingepprägten Leistungsfluss | 27 |
| Tabelle 4: Impedanz der Submodule im Betrieb | 32 |
| Tabelle 5: Vergleich aktueller Systemkosten zu erwarteten Systemkosten in 3 Jahren..... | 33 |
| Tabelle 6: Vergleich beantragter Batteriespeicher zu klassischem PWM-Umrichter | 35 |
| Tabelle 7: Jährliche Einsparmöglichkeiten pro Haushalt..... | 36 |

2 Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

AC *Alternating current, Wechselstrom*

Ah *Amperestunden, Kapazität von Batterien*

DC *Direct current, Gleichstrom*

EMV *Elektromagnetische Verträglichkeit*

kW *Kilowatt - Leistungsangabe*

LiFePo4 *Lithium-Eisen-Phosphat, spezielle Zellchemie von Lithiumbatterien*

M2C *Modular Multi-Level Converter, Mehrstufiger Umrichter*

M2PC *Modular Multi-Level Parallel Convert, Mehrstufiger Umrichter mit Parallelfunktion*

MOSFET *Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor*

mΩ *Milli-Ohm, elektrischer Widerstand*

PWM *Pulsweitenmodulation, Betriebsmodus von elektronischen Schaltern*

SOC *State of Charge, Füllstand einer Batterie*

SOH *State of Health, noch vorhandene Kapazität der Zelle in Prozent der Nennkapazität*

tCO₂ *Tonnen Kohlenstoffdioxid*

Wh *Wattstunde, Energieangabe*

3 Zusammenfassung

In diesem als Vorstudie ausgelegtem Entwicklungsprojekt wird eine neuartige Umrichtertopologie evaluiert, die es ermöglicht, den klassischen Aufbau von Batterieumrichtersystemen aufzubrechen. Dafür verschmelzen Balancingsystem, Umrichter und Ladeschaltung in kleine, modulare Leistungselektroniken, die direkt auf die Batteriezellen bzw. –packs angebracht werden und durch eine zentrale Steuereinheit geschaltet werden. Laut Simulationen und Berechnungen bringt diese neue Topologie eine bisher noch unerreicht hohe Systemeffizienz – auch im Teillastbereich – und kombiniert diese mit einem hochflexiblen Aufbau, der dieses System für alle denkbaren Leistungsanwendungen qualifiziert.

Durch diesen neuen Ansatz kann nicht nur die Effizienz von Batteriespeichern gesteigert und die Kosten gesenkt werden, sondern es werden auch ganz neue Einsatzbereiche ermöglicht: Durch den modularen Aufbau auf Zell- bzw. Packebene können Batterien verschiedener Typen, Spannungen und Zellchemien miteinander verschalten und gemeinsam agieren. Auch der Einsatz von Second-Life-Zellen, z.B. aus der Elektromobilität in stationäre Energiespeicher, wird damit möglich. Dadurch kann der Verbrauch von Batterien und damit auch seltenen Erden gesenkt werden. Zudem wird auch die Sicherheit erhöht; wo vormals Hochvoltbatterien genutzt werden, werden hier nur noch Module der Schutzkleinspannungsklasse verwendet. Dem modularen Aufbau ist auch eine Redundanz¹ und damit eine erhöhte Ausfallsicherheit inhärent.

In dieser Vorstudie wurden viele Teilsysteme des Batterieumrichters evaluiert, berechnet und simuliert. Zudem wurde ein einphasiges Labormuster aufgebaut, dessen Funktion mit einem vereinfachten Steueralgorithmus bewiesen werden konnte. Die ersten Ergebnisse und Messungen waren so vielversprechend, dass die DBU ein zweijähriges Folgeprojekt fördert, in dessen Rahmen ein dreiphasiger Prototyp bedeutend höherer Leistung und Funktionalität verwirklicht wird.

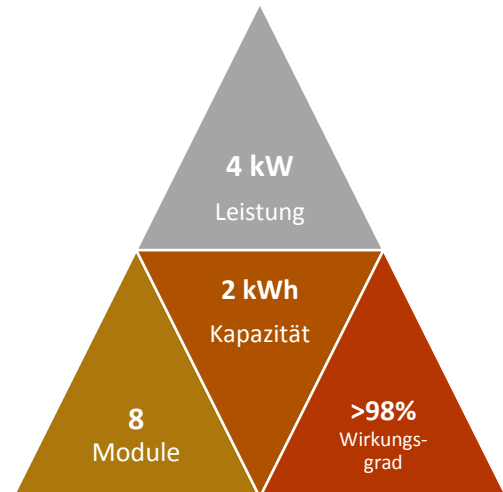
4 Einleitung

Die Energiewende ist eines der großen Themen in Deutschland. Immer mehr elektrische Energie wird aus regenerativen Quellen gewonnen, wie Wasserkraft, Windkraft, Photovoltaik und Biomasse. Bei vielen dieser Quellen kann die zeitliche Verfügbarkeit der Energie jedoch nicht beeinflusst werden. Um einen hohen Wirkungsgrad und damit eine hohe Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten, muss die gesamte zur Verfügung stehende Energie umgesetzt und eingespeist werden. Diese eingespeiste elektrische Energie muss zeitgleich mit der Erzeugung auch verbraucht werden. Die klassischen bisherigen Systeme zur Energieerzeugung konnten in der Vergangenheit relativ gut geregelt werden, so dass die Erzeugung dem Verbrauch angepasst werden konnte; im Gegensatz dazu sind die regenerativen Quellen, wie auch die Verbraucher in ihrer Energieaufnahme sehr unflexibel, weshalb zusätzliche Energiespeicher in naher Zukunft dringend benötigt werden.

¹ bei der Nutzung von mehr Modulen als unbedingt notwendig um die minimal notwendige Ausgangsspannung zu erreichen – jedes zusätzliche Modul erhöht die Ausfallsicherheit um eine Stufe.

Es gibt schon heute viele Ansätze zur Zwischenspeicherung der Energie. Für große Energiemengen werden beispielsweise Pumpspeicher- oder Druckspeicherkraftwerke verwendet. Diese Systeme können große Mengen an Energie speichern und wieder abgeben, jedoch sind sie stark standortabhängig und werden größtenteils als zentrale Speichersysteme eingesetzt. Weiterhin können auf Grund der geologischen Verhältnisse solche Speichersysteme in Deutschland nur in begrenztem Umfang erstellt werden. In Produktionsanlagen wird eigene elektrische Energie durch Reststoffverwertung erzeugt und verbraucht, beispielsweise bei Kläranlagen, holzverarbeitenden oder abfallverwertenden

Unternehmen. Auch in privaten Wohneinrichtungen wird immer mehr elektrische Energie, über Photovoltaik, Heiz- und Windkraft, erzeugt. Diese Energie wird höher vergütet, wenn sie selbst verbraucht wird, um einen Anreiz zu schaffen die Netzbelastung zu minimieren. Da Verbrauch und Erzeugung aber zeitlich oft stark differieren, ist es in vielen Fällen sinnvoll, die Energie zwischenspeichern um sie zeitversetzt abrufen zu können. Um dies wirtschaftlich darstellen zu können, müssen Batteriespeichersysteme noch günstiger werden.



Zahlreiche Forschungsprojekte der letzten Jahre beschränken sich daher darauf, Batterien billiger zu machen und die Energiedichte der Zellen zu erhöhen. Sehr wenige beschäftigen sich aber mit dem Weg der Energie zwischen Batterie und Generator/Verbraucher. Mit dem hier vorgestellten Umrichterkonzept soll diese Lücke geschlossen werden - mehr Effizienz und klügere Systeme könnten genau den Unterschied machen, der den Einsatz stationärer Energiespeicher deutlich attraktiver macht.

Die Zielsetzung des geförderten Projektes ist einen einphasigen, modularen Prototypen mit der patentierten M2PC (Modular Multilevel Parallel Converter)-Topologie zu bauen. Dabei sollen bis zu acht Module aufgebaut werden, die es ermöglichen, hocheffizient Energie zu speichern und abzugeben. Pro Modul wird eine 12 V, 20 Ah LiFePo4 Batterie eingesetzt, was einer gesamten Speicherkapazität von 1920 Wh ergibt. Die Leistungsabgabe wird vor allem durch die Batterien beschränkt und soll in diesem Fall auf 4 kW begrenzt werden. Besonderes Augenmerk verdient die anvisierte Effizienz: Laut den Simulationen soll der Wirkungsgrad der Leistungselektronik 98% übersteigen. Wir werden überprüfen, ob dieser Wert im realen Einsatz erreicht werden kann.

5 Hauptteil

5.1 Allgemeine Einsatzgebiete von Speichersystemen

Speichersysteme werden heute als wichtige Komponente der Energiewende anerkannt. Durch den Einsatz von Speichern können auf verschiedenste Weisen erneuerbare Energien in das Netz integriert werden, bzw. die Kapazität für weitere erneuerbare Energien geschaffen werden.

5.1.1 Energy shifting - Verschiebung von Energiemengen

Die klassische und am ehesten in den Sinn kommende Anwendung von Energiespeichern ist die Verwendung zur zeitlichen Verschiebung von Energiemengen. Hier wird die erzeugte Energie im Speicher zwischengepuffert und bei Bedarf wieder freigegeben.

Für diese Anwendung sind relativ hohe Kapazitäten notwendig, so dass eine Anwendung in vielen Fällen erst mit sinkenden Batteriepreisen wirtschaftlich wird.

Eine Ausnahme stellen hier die Inselnetze dar [2]. Durch die Substitution von Dieselgeneratoren, die sehr hohe Strompreise verursachen, kann es hier heute schon sinnvoll sein Energiemengen mit erneuerbaren Energiequellen zu erzeugen und mit Speichern eine Bevorratung durchzuführen.

5.1.2 Peak shaving - Reduzierung von Spitzenlasten

Unternehmen in Deutschland haben ab einer Leistungsspitze von 30 kW heute in aller Regel keinen reinen Bezugstarif mehr, bei dem lediglich die bezogene Energiemenge bezahlt werden muss, sondern auch einen leistungsabhängigen Tarif, bei dem die maximal bezogene Leistung ebenso in Rechnung gestellt wird. Durch die Reduzierung von Lastspitzen mittels eines Speichers können hier teils erhebliche Mehrwerte erzeugt werden. Darüber hinaus wird die Belastung der technischen Anlagen reduziert. Dies führt in manchen Fällen auch dazu, dass weitere Maschinen in Betrieb genommen werden können ohne einen (teuren, langwierigen) Ausbau des Anschlusses vorzunehmen.

5.1.3 Load/production ramping - Abmilderung von Last- und Produktionssprüngen

Bei Produktionsanlagen und Verbrauchsanlagen die sehr schnell sehr viel Last bzw. Einspeisung erzeugen ist es wichtig, die Steigung zu limitieren, um das Netz nicht unnötig zu belasten. Hier können Speicher entsprechend einen wertvollen Beitrag liefern, um das Netz zu entlasten.

5.1.4 Blindleistungskompensation - Reduzierung des Phasenversatz

Manche Gerätschaften weisen die spezielle Eigenschaft auf, dass der Strom nicht am höchsten ist, wenn die Spannung am höchsten ist, sondern weisen einen sogenannten Phasenversatz auf (insbes. induktive und kapazitive Lasten). Dieser Phasenversatz ist besonders belastend, da nicht alle Erzeugungsanlagen in der Lage sind Blindleistung bereitzustellen. Aus diesem Grund müssen Verbraucher die eine hohe Blindleistung aufweisen in aller Regel eine Kompensation vorweisen. Diese kann aber auch zentral durchgeführt werden. Speicher besitzen in aller Regel die Möglichkeit in gewissem Maße Blindleistung bereitzustellen.

Insbesondere die Kompensation bzw. Bereitstellung von Blindleistung ist eine Stärke der neuen Technologie. Durch den zeitlichen Versatz von Spannung(s-) und Strom(maximum), fließen die größten Ströme dann, wenn mehrere Module parallel geschaltet sind – der Innenwiderstand des Speichers sinkt, die Verluste nehmen ab.

5.1.5 Frequency control - Stützung der 50 Hz Netzfrequenz

Der wichtigste Faktor für die Netzstützung des Übertragungsnetzes ist die Stützung der 50 Hz Netzfrequenz. An der Netzfrequenz lässt sich direkt das Verhältnis aus Bedarf und Produktion ablesen. Wenn die Frequenz steigt ist zu viel Energie im Netz. Wenn die Frequenz sinkt ist zu wenig Energie im Netz. Einen Ausgleich dieser Energiemengen schaffen 3 Mechanismen:

- Momentanreserve (rotierende Massen in Kraftwerken, stark abnehmend)
- Primärregelleistung (spezielle flexible Kraftwerke)
- Sekundärregelleistung (Kraftwerke und abschaltbare Lasten)

In allen 3 Bereichen, kann ein Speichersystem wichtige Beiträge beisteuern.

5.2 Zusätzliche Verwendungsmöglichkeiten der neuen Technologie

Durch die neue Technologie ergeben sich neue Einsatzgebiete, die mit bisher am Markt verfügbaren Systemen gar nicht oder nicht so gut dargestellt werden können. Ein paar der möglichen zusätzlichen Einsatzgebiete und warum die neue Technologie hier besser zum Einsatz kommt werden im Folgenden dargestellt:

5.2.1 Inselnetze mit starken Schwankungen in der Last

Konventionelle Wechselrichter bestehen in aller Regel aus einer eingangsseitigen Gleichstrom Wandlung, einem hochkapazitiven Zwischenkreis und einer PWM modulierten Wechselstrom- Erzeugung. Bei einem Lastsprung reagiert dieses System immer auf die Änderung der Ausgangsspannung mit einer Änderung der Regelung. Dies hat zur Folge, dass ein Einbrechen der Spannung und entsprechende Oberwellen auf dem Sinus nicht verhindert werden können. Insbesondere empfindliche Elektronikgeräte können sensibel auf diese Effekte reagieren.

Das im Projekt neu zu entwickelnde System bietet hier den Vorteil, dass die Akkus über Leistungsschalter hart an die Lasten angeschlossen werden, so dass das System bei einer Laständerung nicht aktiv reagieren muss, da die mit der Last verbundenen Zellen automatisch mehr Energie liefern. Insbesondere in Kombination mit Lithium-Zellen, die einen sehr geringen Innenwiderstand aufweisen, sind keine großen Störungen in der Ausgangsspannung zu erwarten.

5.2.2 Induktive Lasten mit hohen Lastspitzen

Im netzverbundenen Betrieb kann es bei der Zuschaltung von induktiven Lasten (z.B. große Motoren) dazu kommen, dass im Einschaltmoment sehr hohe Ströme fließen, die dazu führen, dass das Netz lokal kurzzeitig „zusammenbricht“. Wenn ein Speichersystem mit der hier verwendeten Topologie niederinduktiv eingebunden wird, kommt derselbe Effekt wie im Inselnetz bei starken Lastwechseln zum Tragen. In diesem Fall wird das Speichersystem kurzzeitig große Teile des Stromflusses übernehmen und somit ein einbrechen der Spannung verhindern. Die Stärken aus 7.4.4. kommen zum Tragen.

5.2.3 Unterschiedliche Signalformen - Netzfilterung - Blindleistungskompensation

Da die hier vorgestellte Topologie nicht auf eine spezielle Signalform festgelegt ist, ergeben sich in der Steuerung verschiedenste Möglichkeiten das System zu nutzen. So lassen sich bei Bedarf alternative Signalformen einstellen. Auch ist es möglich bei Störungen auf dem Sinus bewusst unterstützend einzugreifen und eine aktive Netzfilterung darzustellen.

Darüber hinaus kann eine vollständige Verschiebung, im ganzen Leistungsbereich, zwischen Spannung und Strom durchgeführt werden. Somit kann das System mit bis zu 100 % der Systemleistung Blindleistungskompensation durchführen und somit ebenfalls das Netz auf lokaler Ebene unterstützen.

5.3 Grundsätzliche Vorüberlegungen

5.3.1 Beschreibung der aktuellen Situation

Aus Gründen der Effizienz werden in Elektrofahrzeugen und stationären Energiespeicherlösungen in der Regel Hochvoltbatteriesysteme verbaut. Hohe Spannungen ermöglichen bei gleicher Leistung geringere Ströme, wodurch insgesamt die Verluste im System verringert werden. Diese Batteriesysteme liefern oft Gleichspannungen zwischen 400V und 600V an den Anschlussklemmen

In konventionellen Kompaktspeichern müssen bei diesen hohen Ausgangsspannungen oft mehr als 100 Zellen in Reihe geschaltet werden (die Spannung einer einzelnen Lithium-Ionen-Zelle liegt dabei zwischen 3,3 und 3,8 V). Problematisch hierbei ist, dass die Zellen oft nicht gleichartig sind. Das liegt zum einen an Fertigungstoleranzen, was sich im Volumen, der Impedanz und der Entladerate auswirken kann, zum anderen aber auch an Temperaturunterschieden oder ungleichmäßiger Belastung im Betrieb². In einer Reihenschaltung sind sämtliche Zellen von einem Strom durchflossen, sodass die schwächste Zelle mit der geringsten Kapazität sowohl das Lade- und Entladeverhalten, als auch die Gesamtkapazität des gesamten Zellenverbundes bestimmt. Bei Lithium-Ionen-Zellen muss hierauf besonders Acht gegeben werden - zu hohe Ströme können nicht nur zur Zerstörung einer Zelle, sondern zu einem Brand führen.

Ein typisches Batterie-Management-System, BMS ist in Abb. 1 skizziert. Dieses misst zum einen elektrische Zustandsparameter der einzelnen (Makro-) Zellen, aber auch die Temperatur an bestimmten Stellen des Batteriespeichers. Es reagiert auf kritische Temperaturen und regelt dementsprechend Lade- und Entladeströme, allerdings ohne Blick auf die kommenden Anforderungen an das Gesamtsystem. Weiterhin müssen die in Reihe geschalteten Einzelzellenstränge an jedem Knoten das gleiche Spannungsniveau, wie die anderen Stränge

² Hersteller von Lithiumbatterien versuchen die Fertigungstoleranzen von Batteriezellen zu verringern, um die Lebensdauer, die nutzbare Kapazität und die generelle Performanz der Batteriepacks zu erhöhen. Dies ist allerdings mit erheblich höheren Fertigungskosten verbunden. Um eine möglichst hohe Fertigungsgenauigkeit zu erreichen werden aktuell beispielsweise Standardabweichungen von $\pm 1\%$ bei der Elektrodendicke und -dichte und von $\pm 0,1\%$ bei dem Gewichtsanteil des aktiven Materials angestrebt [3]. Dabei herrscht in Fachkreisen nur Einigkeit darüber, dass einige dieser Fertigungstoleranzen nur eine vergleichsweise geringe Steigerung der Batterie-Performanz bewirken, aber nicht wie hoch der Einfluss der einzelnen Parameter, sei es Anodendicke oder -dichte oder auch die Prozesstemperatur bei der Herstellung, konkret auf die Performanz der Zellen ist [4–6]. Die Fertigungstoleranzen und die Abweichungen zwischen den einzelnen fabrikneuen Zellen stellen auch nur den Startwert für die über die Zyklenzahl stark ansteigenden Abweichungen zueinander dar. Je geringer die Fertigungstoleranzen werden, desto geringer werden zwar die Abweichungen, jedoch wird es auf absehbare Zeit nicht wirtschaftlich möglich sein, die Abweichungen so stark zu reduzieren, dass kein Batteriemangement mehr nötig sein wird. Dies liegt daran, dass auch Faktoren wie Temperaturgradienten im Batteriepack für eine unterschiedliche Alterung der einzelnen Zellen sorgen [4]. Abweichungen von 10% bis 20% bezüglich der Kapazität und des Innenwiderstandes sind dabei selbst bei den neusten Zellen mit einer geringen Fertigungstoleranz keine Seltenheit [4, 7]. Um die aus diesen Faktoren resultierenden Nachteile, wie die über die Lebensdauer des Batteriepacks sinkende nutzbare Kapazität und die Erhöhung der Ausfallwahrscheinlichkeiten einzelner Zellen und damit zumeist des ganzen Batteriepacks zu reduzieren, wird bei allen aktuell erhältlichen Systemen vorab eine kostspielige Batterieselektierung durchgeführt, ein aufwendiges Batteriemangement implementiert und zusätzlich 30-50% mehr Kapazität verbaut als benötigt [5]. Dabei ist zu beachten, dass der zu betreibende Aufwand mit der Zahl der verwendeten Zellen steigt und der Austausch von defekten Zellen durch neue unweigerlich zu einer weiteren Erhöhung der Parameterunterschiede führt [6].

aufweisen, da ansonsten Ringströme und damit Verluste entstehen können, was im schlimmsten Fall zur Zerstörung der Zellen führen kann.

Beim Laden und Entladen können die technischen Besonderheiten und Zustände der einzelnen Zellen bisher nur unter Zuhilfenahme aktiver Batteriemanagementsystemen berücksichtigt werden. Die Leistungsdaten, sowie die Nutzungs- und Lebensdauer des Gesamtsystems wird von der schwächsten Zelle des Verbundes bestimmt. Batteriesysteme mit mehr als 100 Zellen sind zudem sehr voluminös und können nur unter Einschränkung konstruktiver Möglichkeiten in ein Fahrzeug verbaut werden. Einen guten Überblick über aktuelle passive und aktive BMS bieten CAO et al (2008).

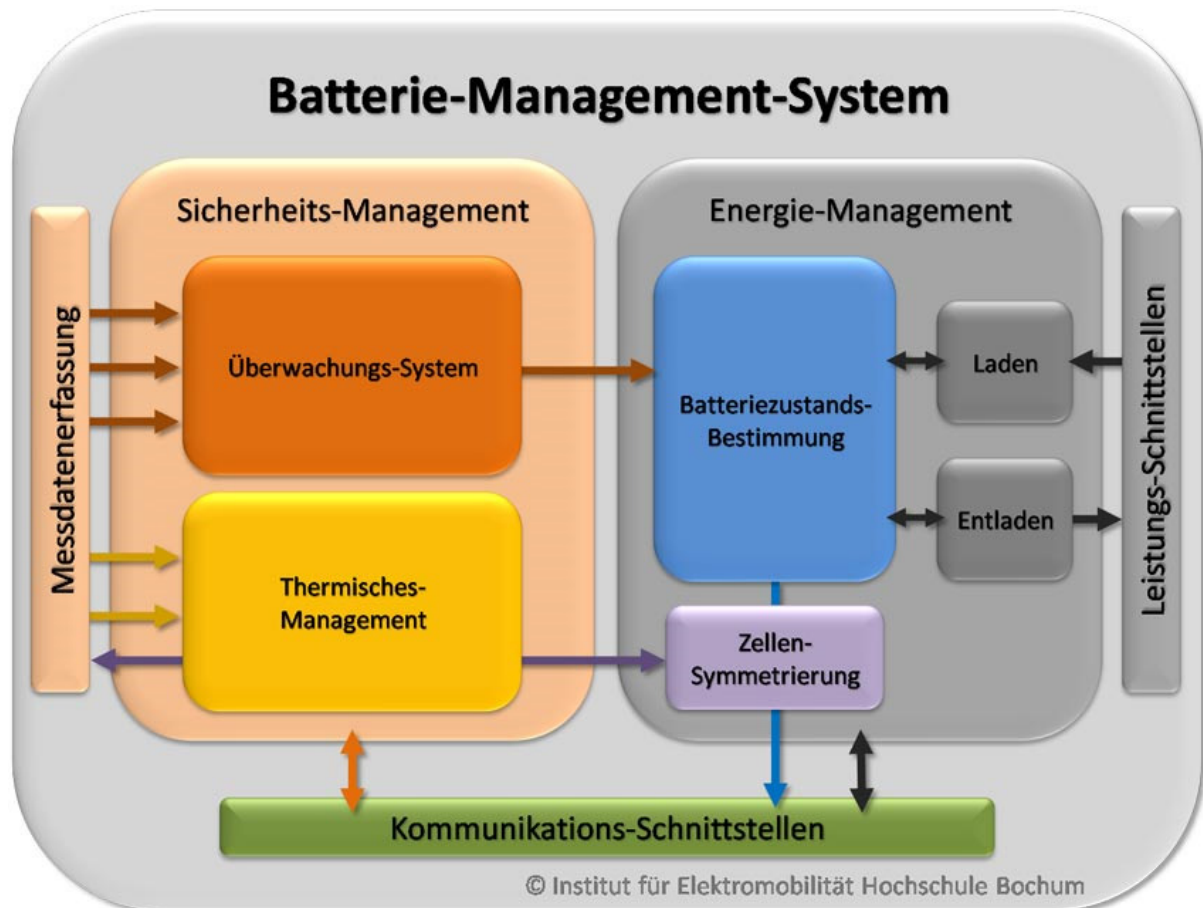


Abbildung 1: Bestandteile eines Batteriemanagementsystems (BMS)

Der klassische Aufbau eines Systems mit Batteriespeicher, Umrichter und elektrischer Maschine ist in Abbildung 2 dargestellt. Oftmals ist zusätzlich noch eine separate Ladeschaltung zum Laden der Batterien notwendig. Der Batteriespeicher besteht wie oben beschrieben aus einer Vielzahl von parallel und in Reihe geschalteter Einzelzellen. Der Wechselrichter ist oft als Chopper oder als Brückenschaltung (i.d.R. ein- oder dreiphasig, abhängig vom Verbraucher) konzipiert, d.h. er lässt die konstante Ausgangsspannung des Batteriespeichers nur für eine bestimmte Dauer einer Periode am Verbraucher anliegen, um so einen veränderbaren Mittelwert der Spannung am Ausgang des Wechselrichters bereitzustellen. Im einfachsten Fall liegt am Verbraucher für eine halbe Periodendauer (beispielsweise bei einer Frequenz von 50 Hz) eine positive Spannung an, die für die folgende halbe Periodendauer umgepolt wird, um so eine Wechselspannung zur Verfügung zu stellen. Die Steuerung ist dabei zwar sehr einfach, die Form der Ausgangsspannung ist dabei aber weit von einer Sinusschwingung entfernt, was wiederum zu zusätzlichen Verlusten in der Maschine und zu elektromagnetischen Störungen führt. Um die Wellenform des Ausgangssignals zu glätten werden große Reaktanzen benötigt, die voluminös, schwer und zudem teuer sind.

Eine andere Möglichkeit zur Erzeugung der erforderlichen Wechselspannung besteht in der Pulsweitenmodulation der Ausgangsspannung. Die Periode ergibt sich dabei aus der Grundfrequenz des Choppers, welche oft um 20kHz oder höher liegt. Die elektrische Maschine sieht also Spannungspulse relativ hoher Frequenz und variierender Länge (Pulsweitenmodulation, PWM), wobei die baulich bedingte Induktivität der elektrischen Maschine diese gepulste Spannung glätten und über das Verhältnis von "AN" zu "AUS" das resultierende Spannungsniveau als Mittelwert bestimmt. Durch geeignete Steuerungen können somit als Ergebnis auch näherungsweise Sinusschwingungen einstellbarer Frequenz und Amplitude erzeugt werden (siehe Abb.2 oben).

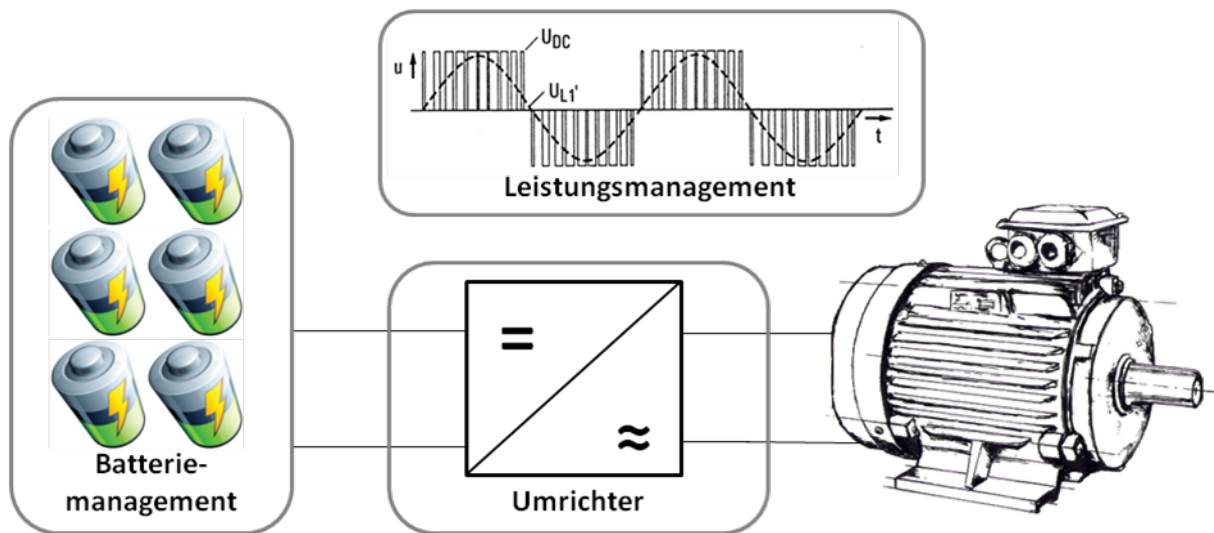


Abbildung 2: Klassischer Aufbau eines Systems mit Batteriespeicher, Umrichter und elektrischer Maschine

Problematisch sind dabei die harten Wechsel zwischen "AN" und "AUS", bei denen sich die Ausgangsspannung extrem schnell ändert, wodurch EM-Strahlung abgegeben wird, welche die Funktion empfindlicher Elektronik (z.B. Spannungsmessung, Kommunikation) beeinträchtigen kann. Die Schaltvorgänge werden zwar durch parasitäre (und oft auch bewusst eingebaute) Reaktanzen gedämpft, eine optimale Lösung ist dies aber nicht. Weiterhin entstehen durch die hohen Schaltfrequenzen Schaltverluste in den Leistungstransistoren des Choppers. Niedrigere Schaltfrequenzen des Choppers sind aber nicht sinnvoll, da die Qualität der Ausgangsspannung darunter leiden würde oder größere Reaktanzen eingebaut werden müssten.

5.3.2 Darstellung der grundlegenden Idee

Um die oben beschriebenen Schwächen der konventionellen Architekturen zu beseitigen, wird mit dem klassischen, in Abb. 2³ skizzierten Aufbau gebrochen und eine Art Multi-Level-Umrichter [9–11] eingesetzt. Batterie und Umrichter sind nicht mehr zwei getrennte Systeme, sondern werden miteinander verschmolzen.

Dadurch ergibt sich eine Hintereinanderschaltung vieler "kleiner Umrichter" mit einer Vielzahl integrierter, hintereinander geschalteter Zellen. Durch diese modularen Wechselrichter ändert sich auch die Betriebsstrategie des Umrichters fundamental: Nicht mehr die gesamte zur Verfügung stehende Gleichspannung wird pulsweitenmoduliert zerhackt und anschließend geglättet. Vielmehr wird eine Treppenfunktion mit kleinen Spannungsstufen gefahren, um beliebige Spannungsformen nachzubilden. Nur für das Feintuning der Spannungslevel kann PWM zum Einsatz kommen (siehe Skizze oben rechts in Abbildung 3). Infolge dieses Konzeptes müssen die einzelnen Module

³ Die folgenden Abbildungen wurden angelehnt an [8], erstellt, das sich im Allgemeinen auf Multi-Level-Umrichter bezieht. In folgenden Kapiteln wird unsere tatsächliche Implementierung dieser Topologie für Batteriespeicher dargestellt, die noch einen zusätzlichen Schalter als Schutz für die Batterie enthält.

wesentlich seltener geschaltet werden; gleichzeitig sind aber auch noch wesentlich geringere Spannungen zu schalten als bei konventionellen Wechselrichtern, wie z.B. in Abbildung 2 dargestellt. Dadurch können die Schaltverluste und die EM-Strahlung drastisch reduziert werden. Gleichzeitig verbessert sich dadurch die Spannungsqualität wesentlich und der Einfluss von Oberschwingungen und Störungen beim Anschluss an ein Netz wird minimiert. Glättungsfiler können stark minimiert werden. Die Leistungselektronik ermöglicht eine individuell auf das Batteriemodul angepasste Lade- und Entladestrategie. Der einzige Nachteil des neuen Systems liegt in der aufwendigeren Steuerung der Module, der aber bei manchen, heute schon verfügbaren aktiven Batteriemanagementsystemen in ähnlichem Umfang schon benötigt wird. Wenn man allerdings berücksichtigt, dass das neue System ein vollständiges Batterie-Management-System, einen Umrichter und eine Ladeeinrichtung in einem System vereint ist der zusätzliche Steuerungsaufwand des hier vorgestellten Konzeptes relativ gesehen, nicht höher als bei besagten bisherigen Systemen.

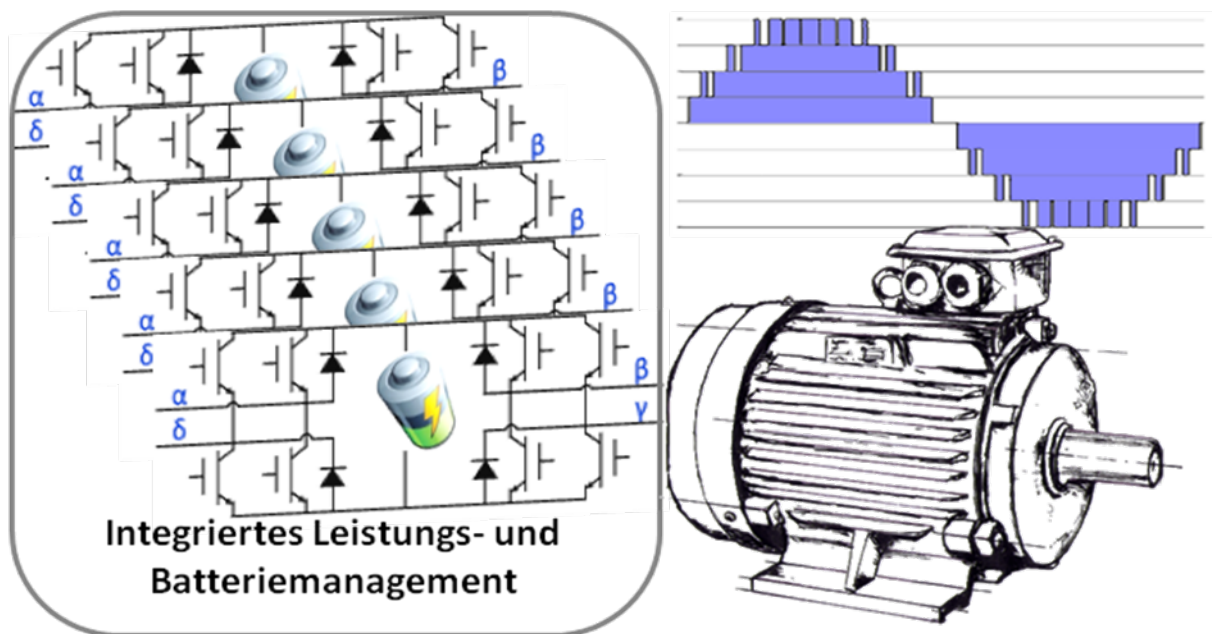


Abbildung 3: Vorgeschlagener Aufbau mit in Wechselrichtern integrierten Energiespeichern

Ein weiterer Vorteil des hier vorgestellten Systems besteht darin, dass ein Umladen zwischen einzelnen Batterie-Umrichter-Modulen mit verschiedenen Ladezuständen überflüssig wird, da diese entsprechend ihrem jeweiligen Ladezustand angesteuert werden können. Das heißt, dass vollgeladene Module verstärkt zum Einsatz kommen, wenn Leistung/Energie abfließt. Umgekehrt werden bevorzugt leerere Zellen in den Stromfluss geschaltet, wenn das Gesamtsystem geladen wird. Durch diese Betriebsstrategie können Verluste im Batteriespeicher reduziert werden, da keine Umladung (wie sie in bisherigen BMS durchgeführt wurde) erforderlich ist, da voraussichtlich auf eine aufwendige aktive Modul-/Zellsymmetrierung komplett verzichtet werden kann. Weiterhin ermöglicht die neue Schaltungstopologie auch das dynamische Parallelschalten einzelner Zellen, wodurch insbesondere die durch den Innenwiderstand der Zellen verursachten Verluste stark reduziert werden können.

Gleichzeitig wird das Batteriemanagementsystem pro Modul dadurch vereinfacht, eine Ladungssymmetrierung wird bei den anvisierten Niederspannungslösungen möglicherweise nicht benötigt, in jedem Fall aber gegenüber einem bisherigen Hochvoltpeicher vereinfacht. Die Zuverlässigkeit, Nutzungs- und Lebensdauer des Gesamtspeichersystems kann mit Sicherheit gesteigert werden. Im Schadensfall kann ein einziges Modul mit wenigen Batterie-Zellen ersetzt werden – das Gesamtspeichersystem muss nicht komplett getauscht werden. Dies bedeutet eine

deutliche Reduzierung der Wartungskosten, bei gleichzeitiger Vermeidung unnötiger Umweltbelastungen. Zudem könnten Wartungsintervalle solcher neuartiger Batteriesysteme auf Grund von Redundanz und dem "Umrichtermanagementssystem" (homogene Belastung aller Umrichtermodule durch intelligente Ansteuerung der Module) deutlich länger sein. Der Ausfall eines oder mehrerer Module führt im ungünstigsten Fall zu einer Reduktion der Maximalleistung, aber nicht zu einem Totalausfall.

Abb. 4 zeigt eine mögliche Variante zur Realisierung der neuartigen Module, wobei C_s eine oder mehrere Batteriezellen bzw. eine Parallelschaltung von Batteriezellen und Speicherkondensatoren darstellt. Der Aufbau entspricht im Prinzip einer doppelten H-Brücke eines kleinen Umrichters. Dadurch, dass benachbarte Module jeweils über zwei Leitungen miteinander verbunden sind, ist eine sehr flexible dynamische Verschaltung der Speichereinheiten der Module untereinander möglich, welche durch die jeweilige Ansteuerung der einzelnen 8 Schalttransistoren erzielt werden kann.

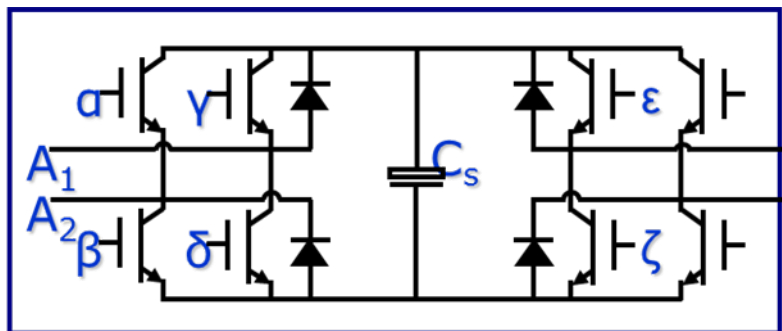


Abbildung 4: Grundsätzliche Topologie eines Umrichtermoduls

Dabei können verschiedene Schaltzustände der Module eingestellt werden, um den Stromfluss des Gesamtsystems zu steuern. Beispielsweise kann erreicht werden, dass ein jeweiliges Modul keinen Beitrag zu den Spannungsstufen leistet (Bypass, siehe Abb. 5), eine positive Spannungsstufe erzeugt wird (+V, siehe Abb. 6) oder bei dem invertierten Schaltzustand eine negative Spannungsstufe entsteht (-V, siehe Abb. 7).

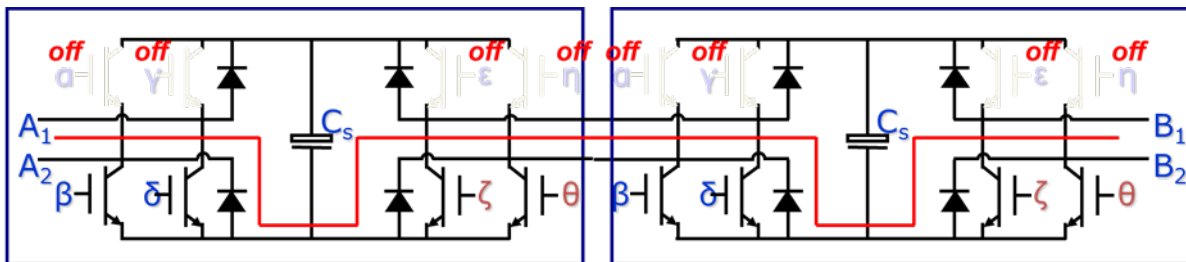


Abbildung 5: Bypass - Modul wird überbrückt

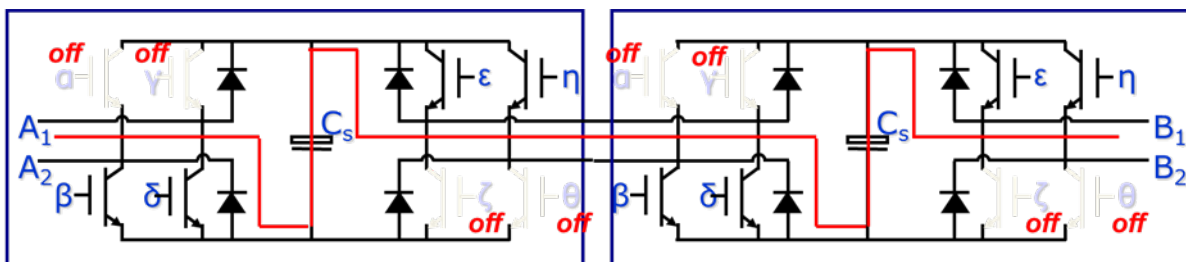


Abbildung 6: +V - Modul entspricht einer positive Spannungsstufe

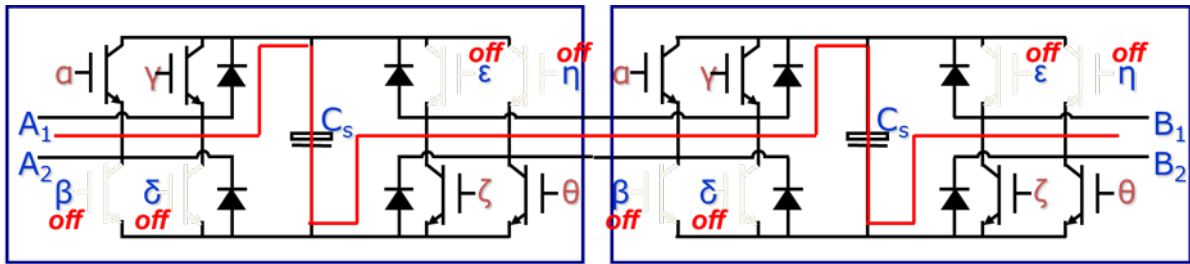


Abbildung 7: -V - negative Spannungsstufe, invers zu +V

Der größte Vorteil dieser Topologie wird jedoch im Parallelmodus erzielt (siehe Abb. 8). Dabei werden die Batteriezellen von zwei oder mehr aufeinander folgenden Module parallel geschaltet. Dadurch kann der wirksame Innenwiderstand dieser Batteriezellen entsprechend halbiert bzw. noch weiter reduziert werden, wodurch wiederum die Verluste des Gesamtsystems verkleinert werden. Diese dynamische Verschaltungsmöglichkeit der einzelnen Batteriezellen hat ein sehr großes Potential, um mit einer optimierten Betriebsstrategie sowohl die einzelnen Module gleichmäßig zu belasten, als auch um Zellsymmetrierungsvorgänge zu minimieren und damit insgesamt die Effizienz des Gesamtsystems zu steigern.

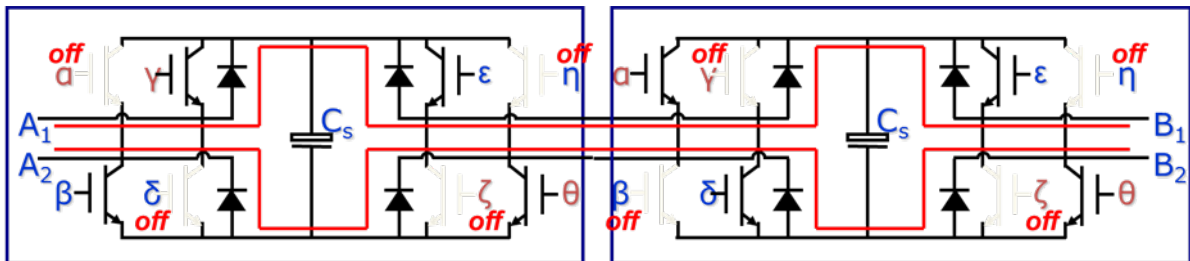


Abbildung 8: Parallel - verdoppelt die Kapazität und halbiert den Widerstand

Weiterhin ermöglicht diese neue Schaltungstopologie auch, unterschiedliche Speichertechnologien miteinander zu kombinieren, um spezifische Stärken optimal nutzen und Schwächen kompensieren zu können. Beispielsweise könnten in einem mit unterschiedlichen Batteriezellen bestückten System bei hohen Lade- und Entladeleistungen bevorzugt Zellen mit geringem Innenwiderstand zum Einsatz kommen, während bei kleineren Leistungen Zellen mit hoher Energiedichte (aber geringerem Leistungsvermögen) bevorzugt angesprochen werden.

5.4 Berechnungen und Simulationsergebnisse

5.4.1 Vorüberlegungen zur Stufenzahl und Auslegung der Module

Aber wie viele Stufen nimmt man nun für ein sinnvoll ausgelegtes System? Sinnvolle Bewertungsmaße sind in erster Linie Effizienz und Kosten, aber auch Komplexität, Fehleranfälligkeit und Verfügbarkeit, technische Machbarkeit sei vorausgesetzt.

Man betrachte Abbildung 9 zur Veranschaulichung. Dort ist in rot eine sinusförmige Referenzspannung mit einer Frequenz von 50Hz und einer Amplitude von 230V dargestellt, die, wie im Batterieumrichter später auch, stufenförmig nachgebildet werden soll. Dazu wird zum einen bei der blauen Linie von einer Stufenhöhe von 24 (entsprechend eines 24V-Batterieblocks) bei einer Abtastfrequenz von 300 Hz ausgegangen, bei der grünen Linie von einer Stufenhöhe von 3 bei einer Abtastfrequenz von 3kHz. Man kann sehr leicht erkennen, dass die grüne Linie der Referenz viel besser und genauer folgt.

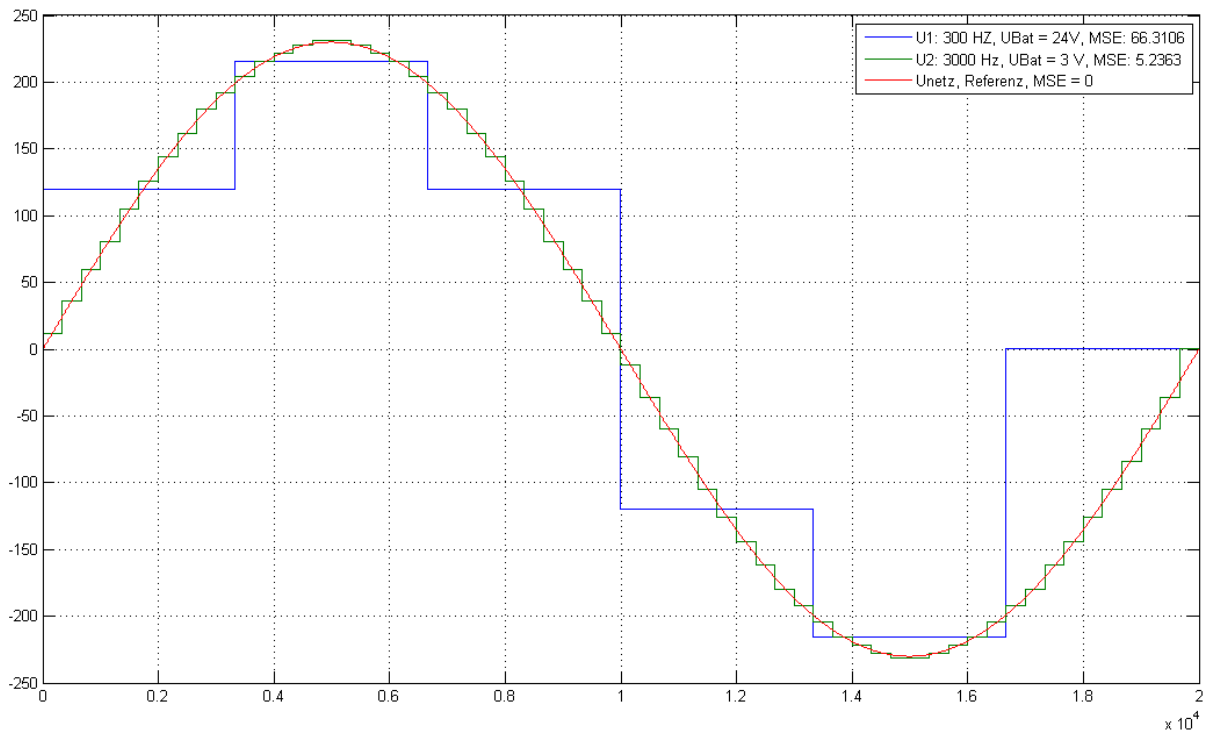


Abbildung 9: Sinussignal angenähert durch Stufen verschiedener Höhe und Abtastfrequenz

Wenn man diese Vorgehensweise für eine Vielzahl an Referenzspannungen und Abtastraten durchführt und als Bewertungsmaß den MSE (Mean Square Error, Summe kleinster Fehlerquadrate) nimmt, ergibt sich Abbildung 10 oder ausgewertet nach „Höhenlinien“ Abbildung 11.

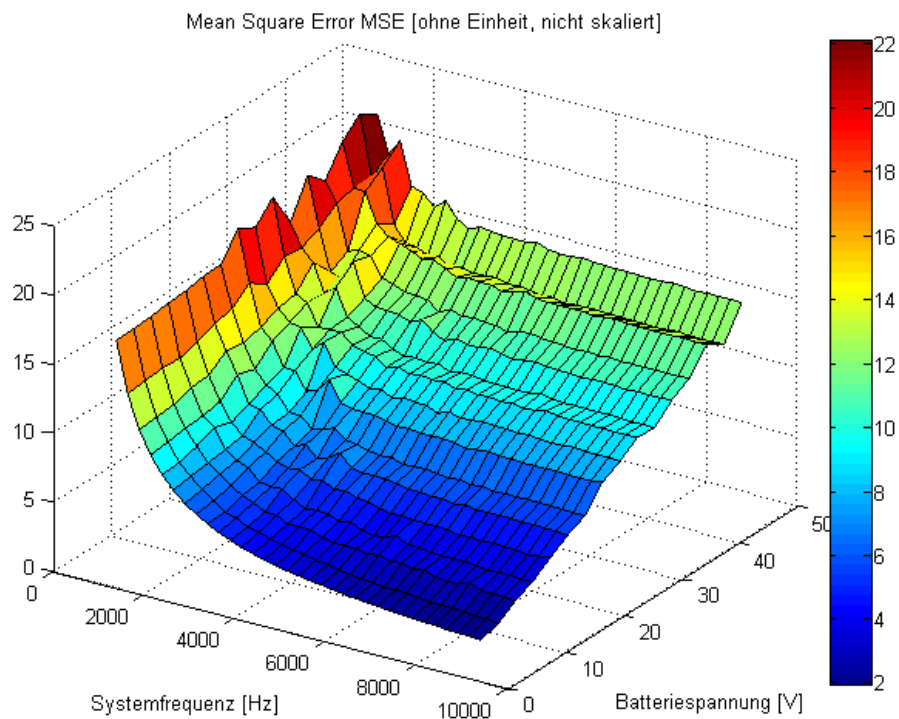


Abbildung 10: 3D-Plot zu Mean Square Error über Batteriespannung und Abtastrate der Referenzspannung

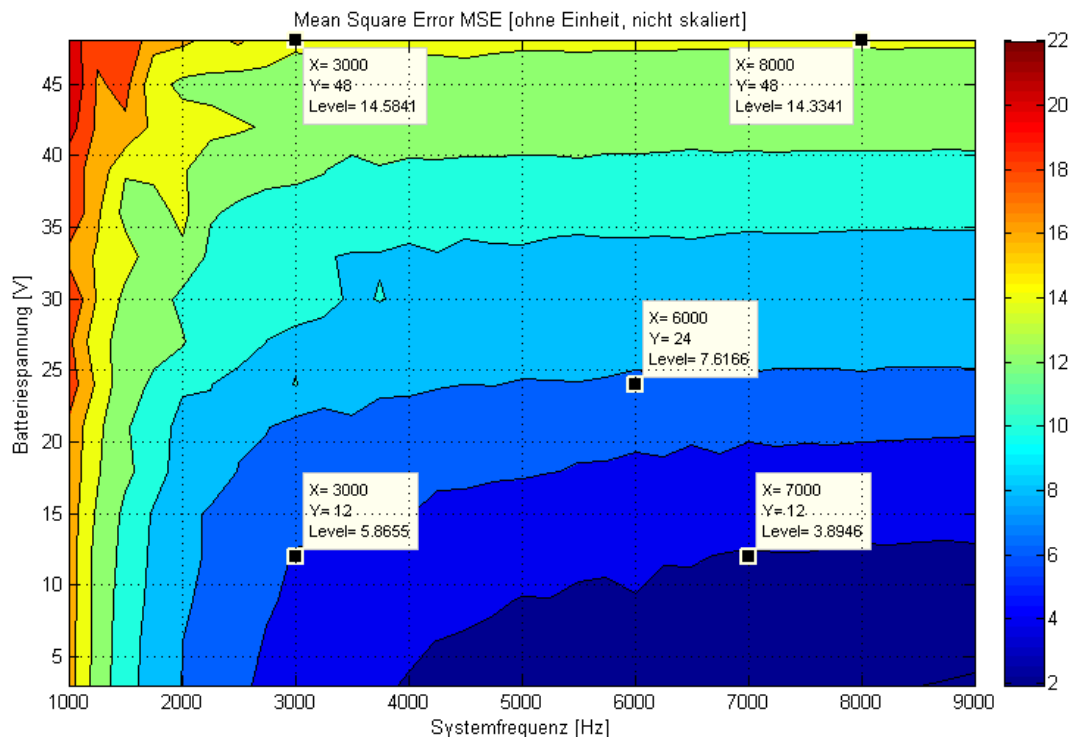


Abbildung 11: Auswertung „Höhenlinien“ zu Mean Square Error

Ein enges Folgen der Referenzspannung bedeutet, dass der Ausgangsfilter kleiner ausgelegt werden kann. Der Ausgangsfilter glättet die Ausgangsgrößen des Umrichters und muss, abhängig davon, ob die Ausgangsspannung über oder unter der Referenzspannung liegt, Energie aufnehmen bzw. abgeben. Gleichzeitig darf er nie voll- oder leerlaufen, da er sonst seiner Funktion nicht nachkommen kann. Bildlich kann man sich leicht vorstellen, dass bei großen Differenzen der Ausgangs- zur Referenzspannung ein entsprechend großer Filter benötigt wird, um diese auszugleichen. Große Filter haben jedoch den Nachteil, dass sie teuer sind und Verluste einbringen. So ist in allen Anwendungen eine Minimierung des Ausgangsfilters üblich. Mit der hier vorgestellten Technologie kann der Filter an sich schon sehr klein ausfallen, da die Stufen niemals wie bei einem Zwei-Punkt-Umrichter den vollen Spannungsumfang betragen. Trotzdem wird, wie bei eben jenem die Ausgangsspannung PWM-moduliert, um auch in zeitlicher Hinsicht nicht viel Energie im Filter puffern zu müssen.

5.4.2 PWM-Modulation der Ausgangsspannung

Pulsweitenmodulation (PWM) ist ein übliches Verfahren in der Elektronik, um eine beliebige Ausgangsgröße, meistens eine Spannung, zu erzeugen, die zwischen dem Nullpunkt und der Referenzgröße liegt. Zur Veranschaulichung: Angenommen eine Hochvoltbatterie habe 400V und PWM wäre auf einen Duty-Cycle von 50% eingestellt, so ergeben sich (bei einem sinnvoll ausgelegten Ausgangsfilter) 200V. Bei einem Duty-Cycle von 25% ergeben sind entsprechend 100V usw. Man kann also mit einer Spannungsquelle mit einer höheren Spannung als der Netzspannung folglich alle benötigten Spannungswerte der positiven Halbwelle abfahren. Für die negative Halbwelle benötigt man zusätzlich noch einen Umpoler, der aus den positiven Werten negative erzeugt. Dies ist die Funktionsweise eines klassischen Zwei-Punkt-Umrichters.

In unserem Fall haben wir aber eine Vielzahl von Spannungsebenen, die allesamt PWM-moduliert werden können. Sinnvollerweise wird aber nur eine einzige Spannungsstufe dabei gleichzeitig PWM-moduliert, während die anderen Stufen stabil gehalten werden. Die Modulierung wurde in diesem Fall an [1] angelehnt, wie auch Abbildung 12 zeigt. Im obigen Teil der Darstellung sieht man, dass die

Referenzspannung mit den Spannungsniveaus der einzelnen Stufen (u_{cell}) verglichen wird. Die Spannungen der einzelnen selbst werden dabei mit einem Dreieckssignal moduliert. Im unteren Teil der Darstellung kann man erkennen, dass wenn immer die AC-Referenzspannung größer als die modulierte Dreiecksspannung einer Stufe ist, diese Stufe angeschaltet wird. Die darunter liegenden Stufen sind dabei immer an, die darüber liegenden immer aus.

Eigene Simulationen mit acht 48V-Stufen und einer sinusförmigen Spannung mit 50Hz und einem

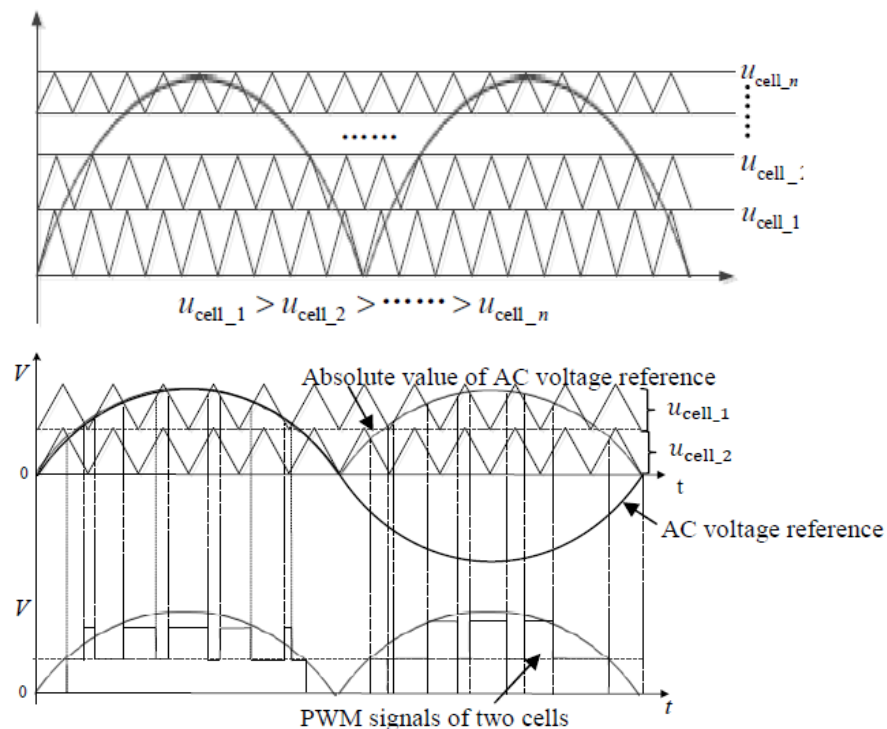


Abbildung 12: Stufenweise PWM-Modulation [1]

Effektivwert von 230V ergeben Abbildung 13. Dabei sind farblich gekennzeichnet und mit Dreieckssignalen moduliert die einzelnen Submodule auf ihrem jeweiligen Spannungsniveau dargestellt. Die dunkelblaue, dicke Linie ist die Netzspannung, der gefolgt wird. Die orangene, dicke Linie ist die Ausgangsspannung des Batteriespeichers. Aus Gründen der Anschaulichkeit wurde die PWM-Frequenz so niedrig gewählt, dass die Schaltstufen breit sind. Man erkennt beispielsweise rechts oben sehr gut, dass das achte Modul nur angeschaltet wird, wenn die blaue Referenzspannung die Dreiecksspannung des achten Moduls übersteigt. Die Stufen werden breiter, je größer die Referenzspannung zur jeweiligen Stufenhöhe ist und nur ein einziges Modul schaltet zu jeder Zeit.

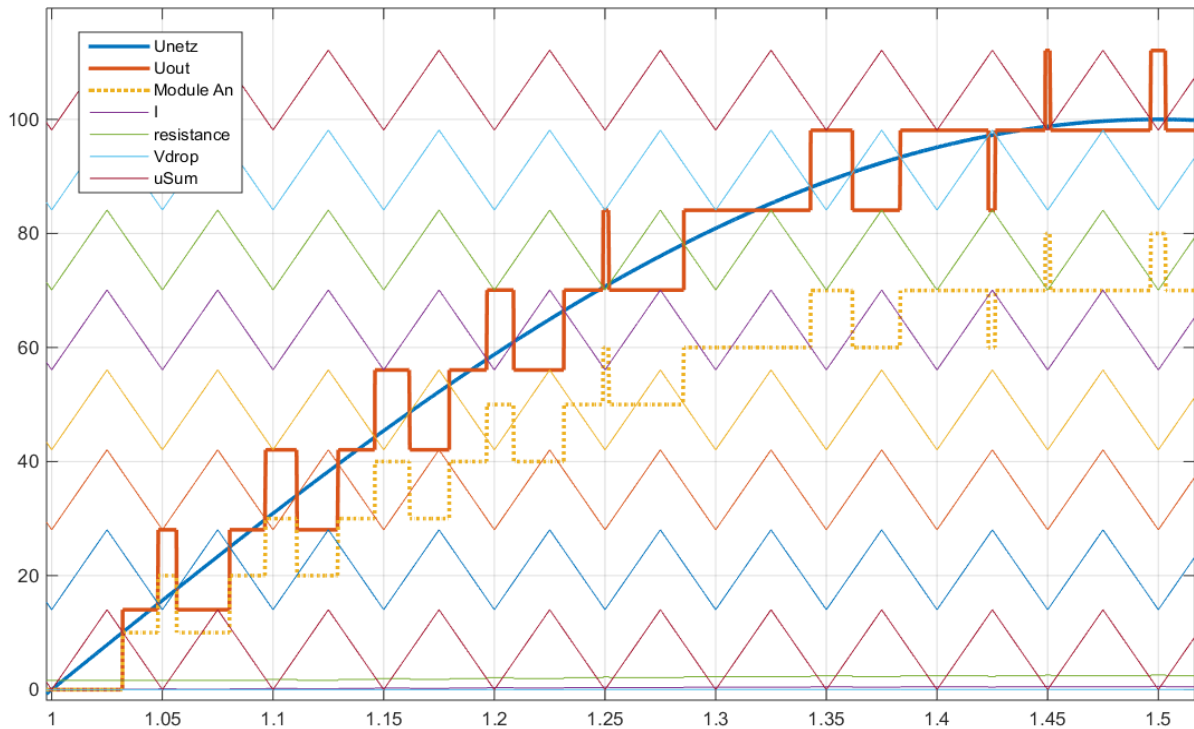


Abbildung 13

Abbildung 13: Stufenweise PWM-Modulation bei 8 Stufen und 50Hz, 230V Sinusreferenz

5.4.3 Veranschaulichung dynamischer Seriell-Parallel-Verschaltung und Bedeutung für die Effizienz

Nachdem in den vorhergehenden Abschnitten die grundsätzliche Funktion eines Multi-Level-Converters erklärt wurde, wird in diesem Abschnitt die tatsächliche Neuerung dieser Erfindung aufgezeigt, die dynamische Seriell-Parallel-Verschaltung. Bei der klassischen Multi-Level-Betriebsstrategie, wird zuerst berechnet, welche Ausgangsspannung benötigt wird, dann wie vielen Stufen das entspricht und abschließend kann das Ergebnis wie oben beschrieben noch durch PWM-Modulation verfeinert werden.

Der Nachteil dabei ist jedoch, dass Module, die gerade nicht benötigt werden, überbrückt werden. Ihr Leistungsteil liegt im Strompfad, produziert also Verluste, während deren Energiespeicher nicht genutzt wird. Dies kann im Fall von Batteriespeichern als Verschwendung angesehen werden. Zum einen würden die Batterien bei der einfachen Serienschaltung immer den vollen Strom sehen, würden also stärker belastet werden als unbedingt notwendig. Zum anderen haben Batterien i.d.R. einen höheren Widerstand als zeitgemäße Halbleiterschalter, sodass über diesen Widerstand proportional zum Quadrat des Stromes Joule'sche Verluste entstehen, die die Batterien zudem aufheizen. Genau diese beiden Nachteile werden durch die Parallelschaltung beseitigt, da durch die Parallelschaltung von n Modulen der Strom durch den Energiespeicher um den Faktor $1/n$ abnimmt.

Aber zuerst zum Funktionsprinzip dieser dynamischen Verschaltung. In Abbildung 14 ist farblich gekennzeichnet, welche Module gemeinsam auf einer Stufe sind. Rechts ist eine numerische Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Stufen, die die Module über eine Periode annehmen. Hellgrün

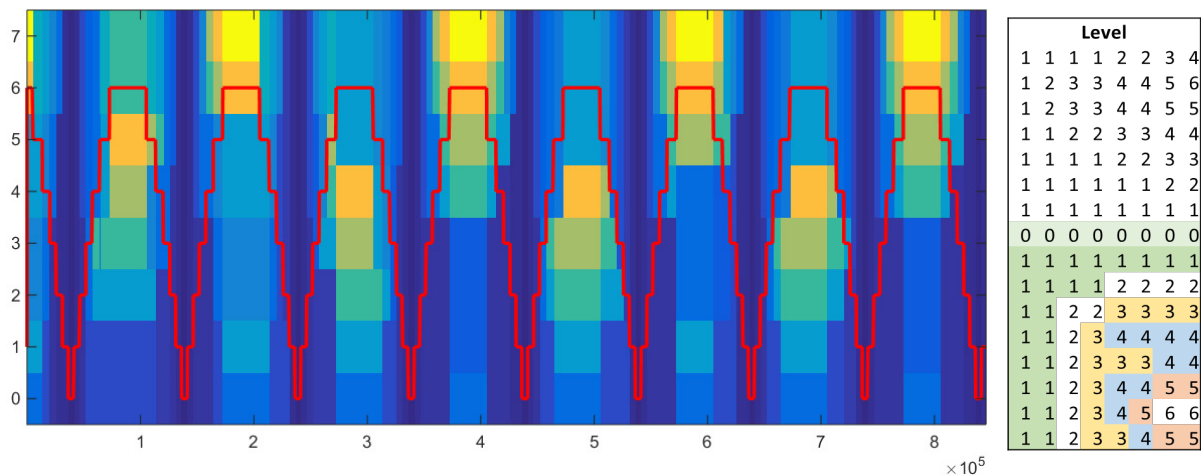


Abbildung 14: Veranschaulichung dynamische seriell-parallel Schaltung

in der Mitte erkennt man den „Null“-Zustand – alle Module sind ausgeschaltet, die Ausgangsspannung ist 0 V. Eine Zeile darunter sieht man die erste Stufe, alle acht Module sind parallel zu einander, jedes Modul trägt zu einem Achtel den Ausgangsstrom. Wieder eine Zeile tiefer wird nun die doppelte Modulspannung als Ausgangsspannung ausgegeben. Je die Hälfte der Module bilden eine Stufe, jedes Modul trägt ein Viertel des Ausgangsstromes. In dem nächsten Zeitabschnitt wird der erste Parallelblock in der Mitte geteilt. Die ersten beiden Module bilden die erste Stufe und tragen je die Hälfte des Ausgangsstromes, die nächsten Module bilden die zweite Stufe und die letzten vier Module die dritte Stufe. Im letzten Parallelblock teilt sich der Strom wie im Schritt davor auf alle vier Module auf. So wird Schritt für Schritt die Ausgangsspannung erhöht, indem die Parallelblöcke aufgeteilt werden, bis alle acht Module in Serie verschaltet sind. Beim Absenken der Ausgangsspannung passiert dasselbe nur umgekehrt; serielle Module und kleinere Parallelblöcke werden zu (größeren) Parallelblöcken verschaltet bzw. überbrückt, wenn sich ihre Spannung zu sehr von den Nachbarn unterscheidet.

Dies passiert dynamisch, d.h. nicht immer dieselben Module bilden die selben Funktionsblöcke wie in der Periode zuvor, sondern die Blöcke werden abhängig von Spannung und SOC der Batterien immer wieder neu erstellt, um die Belastung einzelner Module über die Zeit zu balancieren. Dies kann man auch gut in Abbildung 14 links erkennen. Über mehrere Perioden ist eingezeichnet, wie die Module untereinander verschaltet sind: Die rote Linie zeigt die Ausgangsstufe des Batteriespeichers (linke Skala). Farblich hinterlegt ist dabei die Verschaltung der Module untereinander. Bei der Stufe 0 ist der Hintergrund dunkelblau – alle Module sind im gleichen Modus und überbrückt. Bei der Stufe 1 erkennt man ein helleres Blau, alle Module sind parallel zueinander. Wenn man sich nun die Stufe 6 zum Zeitpunkt 1 anschaut, kann man erkennen, dass – von unten nach oben der farbliche Hintergrund – die unteren zwei Module zueinander parallel sind (gleiche Farbe), die nächsten vier Module seriell verschaltet sind (unterschiedliche Farbe) und die oberen beiden Module wiederum parallel zueinander stehen (gleiche Farbe). Wenn man diese farbliche Hinterlegung mit den anderen Zeitpunkten vergleicht, an denen eine Stufenhöhe 6 ausgegeben wird, fällt auf, dass sich die Zusammensetzung ändert; die Module werden dynamisch parallel und seriell geschaltet, sodass der Ladezustand der Module zu jederzeit balanciert wird.

Lohnt sich denn der erhöhte Steuerungsaufwand? Ja, das tut er gleich aus mehreren Gründen:

- Die ohmschen Verluste berechnen sich zu $P=R \cdot I^2$. Bei der Parallelschaltung zweier Module halbiert sich also der Strom, die Verluste pro Module verringern sich folglich auf 25%. Dadurch steigt nicht nur die Effizienz, sondern auch die Wärmeentwicklung in den nun minder belasteten Zellen sinkt, was positive Auswirkungen auf die Zellen haben sollte.
- Die Zellen werden nicht mehr mit dem gesamten Systemstrom belastet, sondern nur noch mit einem Bruchteil dessen.
- Die Zellen werden im Betrieb balanciert, d.h. ein verlustbehaftetes Balancing wäre beim Einsatz von Einzelzellen obsolet.

5.4.3.1 Verlustbetrachtung im Leistungsteil bei Stromfluß

Die Verluste des Leistungsteils setzen sich zusammen aus den ohmschen Verlusten gemäß $P_0 = R \cdot I^2$, wobei R der Widerstand im Strompfad und I der Strom ist, sowie den Schaltverlusten P_{sw} die proportional zu der Schaltfrequenz und der zu schaltenden Spannung sind. Durch den Umstieg von kleineren Modulen im Vergleich zu den üblicherweise verwendeten Hochvoltspeichern wird die zu schaltende Spannung massiv reduziert. Inwiefern die Schaltfrequenz vermindert werden kann, wird noch untersucht.

Die ohmschen Verluste setzen sich wiederum zusammen aus den Verlusten in den verwendeten Halbleitern und den Verlusten in der Batterie und sind bei niedrigen Schaltfrequenzen dominant. Um einen Algorithmus zu erstellen um die Verluste zu berechnen lohnt sich der Blick auf den Strompfad verschiedener Verschaltungsvarianten. Wir gehen von einer Schaltung mit doppelter H-Brücke (für Umrichter) bzw. mit 9 Schaltern beim Batteriespeichersystem aus. Wenn drei Module parallel sind, stellt sich die Situation wie in Abbildung 15 gezeigt dar:

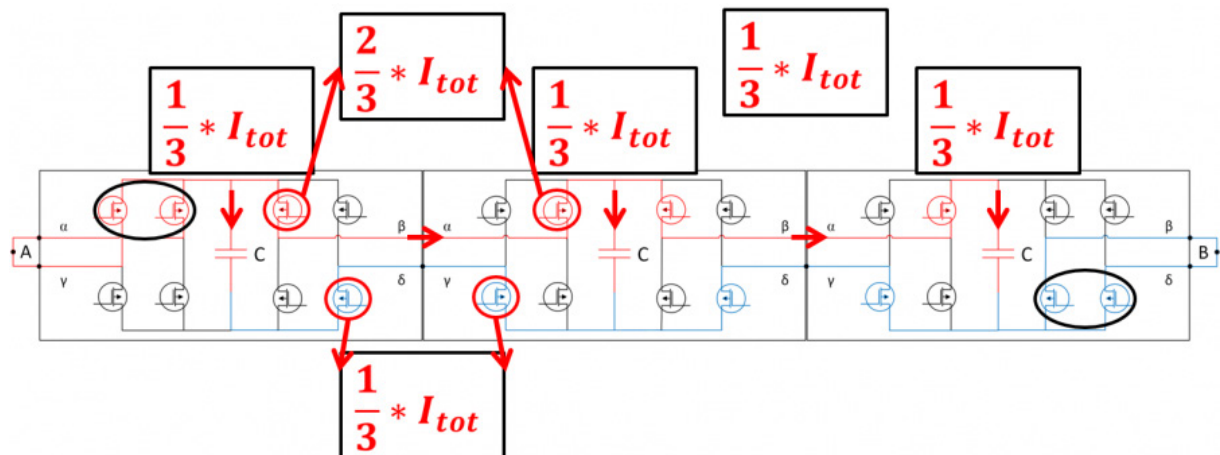


Abbildung 15: Ohmsche Verluste in den Halbleiterschaltern bei Parallelschaltung von drei Modulen

Pro Energiespeicher, in diesem Fall Kondensatoren, fließt (im Idealfall, bei identischen Energiespeichern und Schaltern sowie verlustfreien Zuleitungen) ein Drittel des Stromes. Aus der Kirchhoff'schen Knotenregel folgt, dass bei einem Eingangsstrom von I und Kondensatorströmen von $I/3$ die Schalter von unterschiedlich großen Strömen durchflossen werden. Während sich der Strom bei den ersten beiden roten MOSFETs (links oben) noch im Verhältnis 1:2 aufteilt, fließt am ersten Knoten mit Kondensator (linker roter Pfeil) ein Drittel des Stromes in den Energiespeicher. Die beiden folgenden Schalter im oberen Strompfad müssen demnach zwei Drittel des Stromes übernehmen. Am nächsten Speicher fließt wiederum ein Drittel des Stromes ab, folglich durchströmt die folgenden beiden rot eingezeichneten Schalter nur noch ein Drittel des Stromes. Im unteren Stromzweig ist die Situation gespiegelt: die ersten beiden Schalter durchströmt ein Drittel des Stromes und die nächsten beiden tragen dann schon den Strom zweier Energiespeicher (zwei Drittel des Gesamtstromes). Am

Angang der Parallelschaltung teilt sich der Gesamtstrom wiederum gleichmäßig auf die zwei Schalter rechts unten auf.

Die Leitungsverluste ergeben sich zu $P_{on}=R \cdot I^2$ und sind folglich abhängig vom Quadrat des Stromes. Die Verluste von unterschiedlich großen Parallelschaltungen sind in folgender Tabelle dargestellt. In der letzten Zeile wird eine allgemeingültige Berechnungsvorschrift für Parallelschaltungen gezeigt.

Tabelle 1: Verluste in der Parallelschaltung abh. von der Anzahl parallel geschalteter Module

| Parallel | Anzahl Schalter für Parallelschaltung | Leitungsverluste durch Schalter | Eingangs- & Ausgangsschalter | Verluste durch Speicher |
|----------|---------------------------------------|--|------------------------------|-------------------------|
| 2 | 4 | $4(I/2)^2 R_{on}$ | $4R_{on}(I/2)^2$ | $2R_{in}(I/2)^2$ |
| 3 | 8 | $[4(2I/3)^2+4(I/3)^2]R_{on}$ | $4R_{on}(I/2)^2$ | $3R_{in}(I/3)^2$ |
| 4 | 12 | $[4(3I/4)^2+4(2I/4)^2+4(I/4)^2] R_{on}$ | $4R_{on}(I/2)^2$ | $4R_{in}(I/4)^2$ |
| 5 | 16 | $[4(4I/5)^2+4(3I/5)^2+4(2I/5)^2+4(I/5)^2] R_{on}$ | $4R_{on}(I/2)^2$ | $5R_{in}(I/5)^2$ |
| (1) | 0 | 0 | $4R_{on}(I/2)^2$ | $R_{in}I^2$ |
| p | $4(p-1)$ | $4R_{on} \sum_{n=1}^{p-1} \left(\frac{n}{p}I\right)^2$ | $4R_{on}(I/2)^2$ | $p \cdot R_{in}(I/p)^2$ |

In Tabelle 2 sind diese Leitverluste im Vergleich zwischen der klassischen M2C und der neuen M2PC-Topologie dargestellt. Unter der Annahme, dass der Leitungswiderstand der MOSFETs R_{on} 3 mΩ und der Innenwiderstand der Batterie (inklusive Innenwiderstand des Batterieschalters) $12 \cdot R_{on}$, also 36mΩ beträgt werden in der Tabelle die Verlustleistungen normiert auf $1/(R_{on} \cdot I^2)$ aufgezeigt, wobei I der Systemstrom ist. Weiterhin wird aus Vergleichbarkeitsgründen angenommen, dass der Serienbetrieb mit derselben Neun-Schalter-Topologie durchgeführt wird wie der Parallelbetrieb. Dabei arbeiten immer zwei MOSFETs parallel, was die Verluste in diesen senkt und für bessere Werte als bei einer einfacheren M2C-Topologie sorgt.

Bei der reinen Serienschaltung ist immer die gleiche Anzahl an MOSFETs im Betrieb, da die Submodule immer im Leistungsweig liegen und durch die MOSFETs nur bestimmt wird, ob der Systemstrom durch die Speicher oder an ihnen vorbei geleitet wird. Daher ändert sich der Wert in der Spalte P_{on} nicht. In P_{bat} stehen die Verluste der Batterien. Es sind immer so viele Batterien im Stromzweig wie Stufen benötigt werden und alle Batterien werden vom ganzen Strom durchflossen, sodass die normierten Verluste pro Spalte um 12 steigen.

Im Parallelbetrieb wird die Rechnung komplizierter.

Tabelle 2: Ohmsche Verluste im Vergleich zwischen M2C und M2PC; Normierte Darstellung auf $1/(R_{on} \cdot I^2)$

| Stufe | Seriell | | | Parallel | | | Einsparungen | | | |
|-------|-----------|----------|--------|---------------|-----------|----------|--------------|-----------|----------|--------|
| | P_{bat} | P_{on} | Gesamt | Konfiguration | P_{bat} | P_{on} | Gesamt | P_{bat} | P_{on} | Gesamt |
| 0 | 0 | 8 | 8 | alle aus | 0 | 8 | 8 | 0% | 0% | 0% |
| 1 | 12 | 8 | 20 | 8p | 1,5 | 9,75 | 11,25 | 88% | -22% | 44% |
| 2 | 24 | 8 | 32 | 2*4p | 6 | 9 | 15 | 75% | -13% | 53% |

| | | | | | | | | | | |
|---|----|---|-----|---------------|----|------|-------|-----|-----|-----|
| 3 | 36 | 8 | 44 | $2*3p + 1*2p$ | 14 | 8,44 | 22,44 | 61% | -6% | 49% |
| 4 | 48 | 8 | 56 | $4*2p$ | 24 | 8 | 32 | 50% | 0% | 43% |
| 5 | 60 | 8 | 68 | $3*2p+2*1p$ | 42 | 8 | 50 | 30% | 0% | 26% |
| 6 | 72 | 8 | 80 | $2*2p+4*1p$ | 60 | 8 | 68 | 17% | 0% | 15% |
| 7 | 84 | 8 | 92 | $1*2p+6*1p$ | 78 | 8 | 86 | 7% | 0% | 7% |
| 8 | 96 | 8 | 104 | $8*1p$ | 96 | 8 | 104 | 0% | 0% | 0% |

5.5 Verlustbetrachtung und Effizienz des Gesamtsystems

Bei Betrachtung des Gesamtsystems ergeben sich die einzelnen Verluste wie in Abbildung 16 dargestellt.

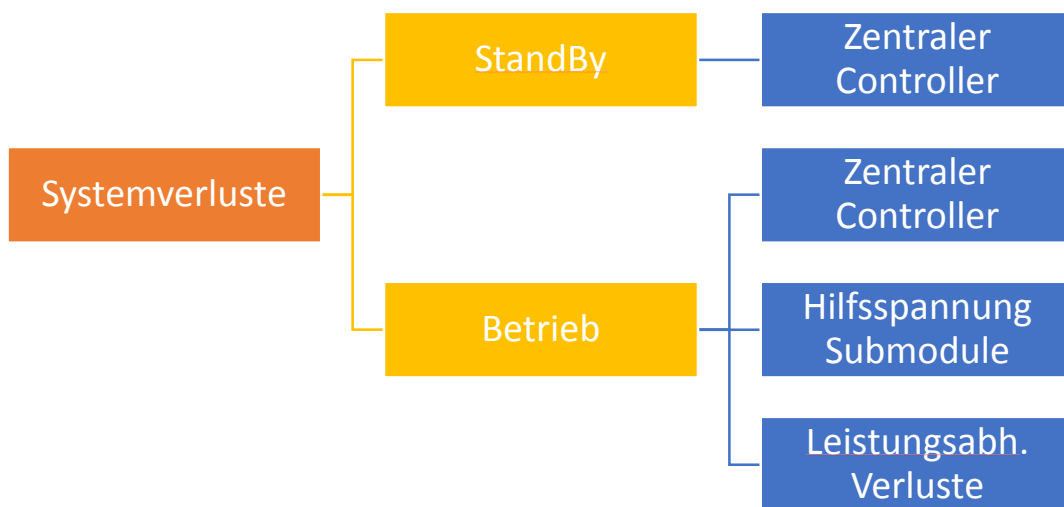


Abbildung 16: Verluste im Gesamtsystem

Dabei fällt auf, dass es zwei Betriebsmodi gibt:

1. Standby: Das Speichersystem ist nicht aktiv, beispielsweise weil der Speicher voll oder leer ist. In diesem Fall ist nur der zentrale Controller aktiv, der die Netzmessungen vornimmt und die Leistungsflüsse überwacht, um ggfs. den Rest der Speichersystems zu aktivieren, welches in diesem Fall komplett ausgeschaltet ist. Wir gehen davon aus, dass in diesem Fall nicht mehr als 2 W an Leistung benötigt werden.
2. Betrieb: Das Speichersystem ist aktiv. Neben dem zentralen Controller, der nun zusätzlich noch die Submodule steuert und die Ladezustände der Zellen balanciert ist nun die Spannungsversorgung der Submodule aktiviert. Zusätzlich treten an jedem Submodul leistungsabhängige Verluste gemäß Abschnitt 5.4.3.1 auf.

Im Modus „Betrieb“ erhöht sich der Leistungsbedarf des zentralen Controllers möglicherweise auf bis zu 3 W. Pro Submodul selbst soll statisch (Hilfsspannung) nicht mehr als 1 W abfallen. Die leistungsabhängigen Verluste sollen in der Elektronik nicht höher als 1% sein, mit Batterie erhöhen sich diese auf bis zu 3%. Somit kann leistungs- und damit anwendungsabhängig ein Optimum an Submodulen ermittelt werden.

Ermittelt man den Optimalfall für ein Einfamilienhaus, stellt man fest, dass die Leistung in einem Einfamilienhaus typischerweise sehr niedrig ausfällt. Die Leistungsverteilung aus Abbildung 17 wurde in hochauflösend (1 Minute) über mehrere Wochen aufgenommen und statistisch ausgewertet.

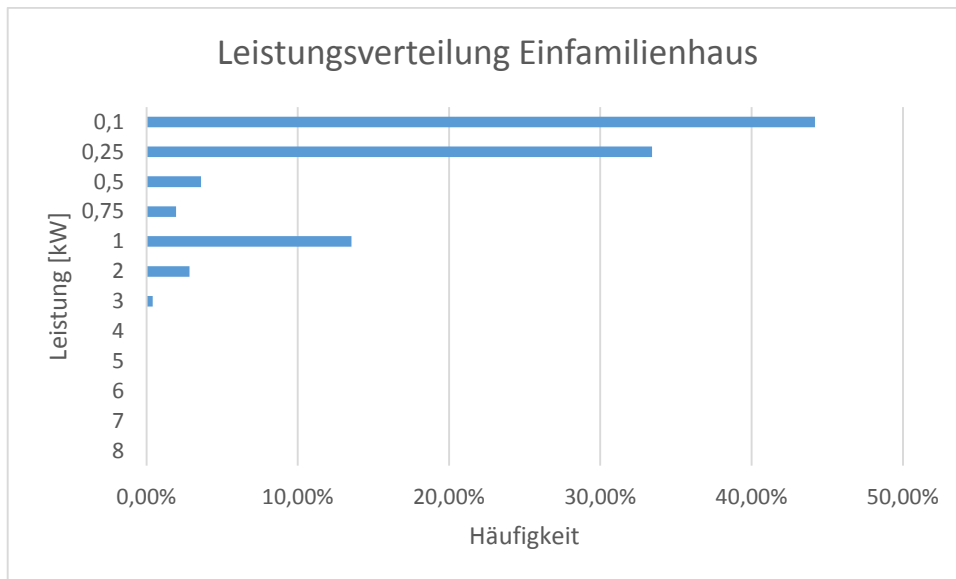


Abbildung 17: Leistungsverteilung Einfamilienhaus

Berechnet man die Wirkungsgrade für die jeweiligen Leistungsstufen stellt man fest, dass insbesondere bei den kleinen Leistungen die im Haushalt häufig auftreten, der Wirkungsgrad mit weniger Modulen steigt, da die Verluste in der Bereitstellung der Versorgungsspannungen für die Submodule dominant in die Berechnung mit eingehen. Dies ist in Abbildung 18 dargestellt.

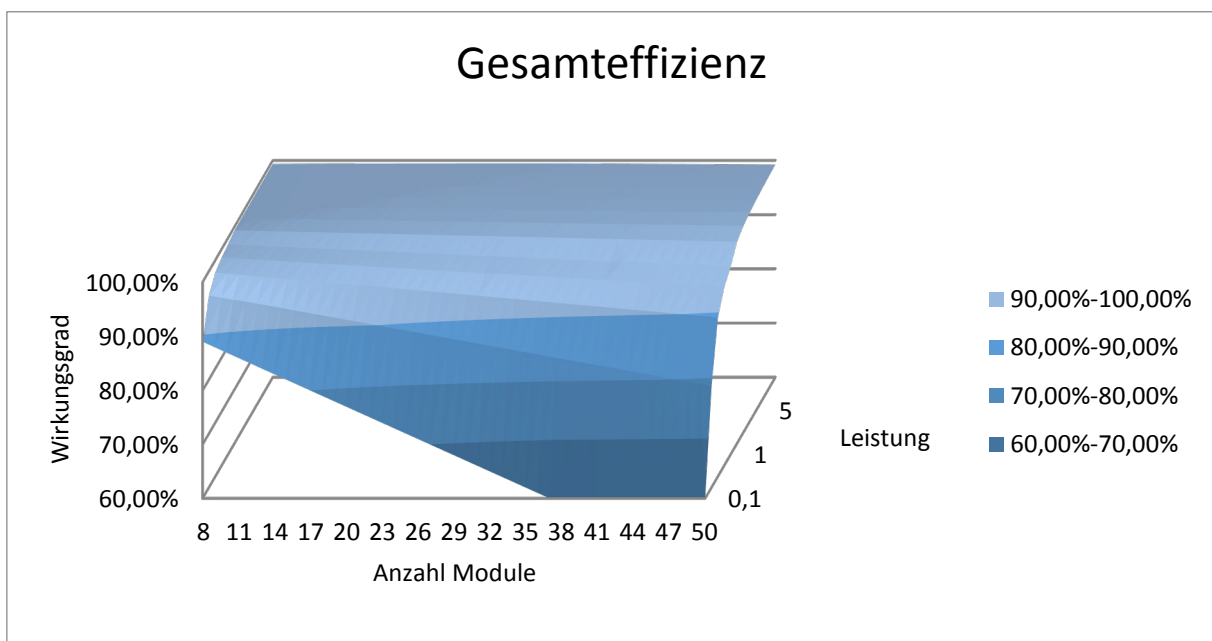


Abbildung 18: Effizienz in Abhängigkeit von der Anzahl Module und der Leistung

Berechnet man für die Leistungsverteilung im Einfamilienhaus also die optimale Effizienz, ist der Einsatz der Minimalanzahl an Modulen von 8 empfehlenswert.

Geplant ist, die Verlustleistung der Submodule weiter zu verringern und damit die Effizienz weiter zu steigern.

5.6 Steuerung und Regelung des Batterieumrichters

5.6.1 Funktionsweise des Seriell-Parallel-Algorithmmus

Der hier vorgestellte Batterieumrichter basiert auf dem Prinzip der Multi-Level-Umrichter. Diese bauen die Ausgangsspannung aus der Spannung der jeweiligen Spannung der verwendeten Submodule auf – eine sinusförmige Spannung wird folglich als Stufenfunktion angenähert, wie in Abbildung 19 beispielsweise für Module auf Zellbasis und damit einer Stufenhöhe von ca. 3,5V gezeigt wird.

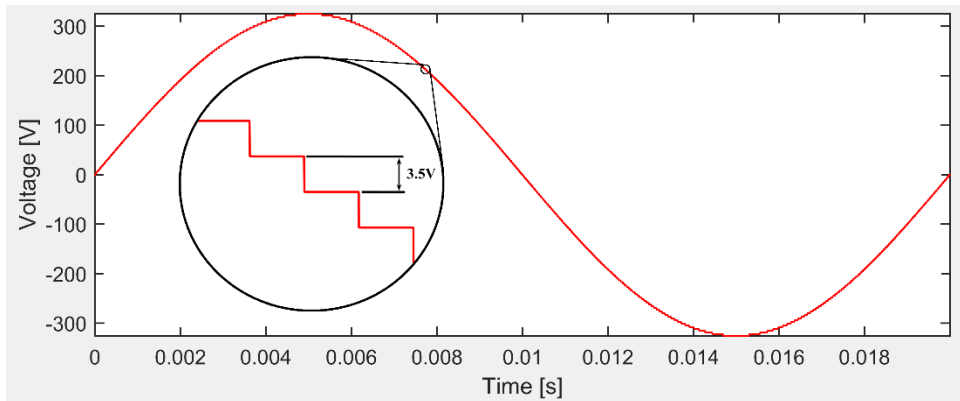


Abbildung 19: Annäherung eines Sinussignals durch Multi-Level-Umrichter mit Einzelzellen auf den Submodulen

Bei klassischen Multi-Level-Umrichtern wird, um eine Stufe hinzuzufügen ein zusätzliches Modul in Serie geschaltet; um eine Stufe zu entfernen ein Modul überbrückt. In Stufe eins wäre somit nur ein einziges Modul aktiv, in der höchsten Stufe würden alle eingesetzt werden. In der hier vorgestellten Technologie können immer alle Module aktiv sein, da die Module auch parallel geschaltet werden, wenn die Ausgangsspannung nicht so hoch ist (siehe Abbildung 20 für ein anschauliches Beispiel mit vier Modulen).

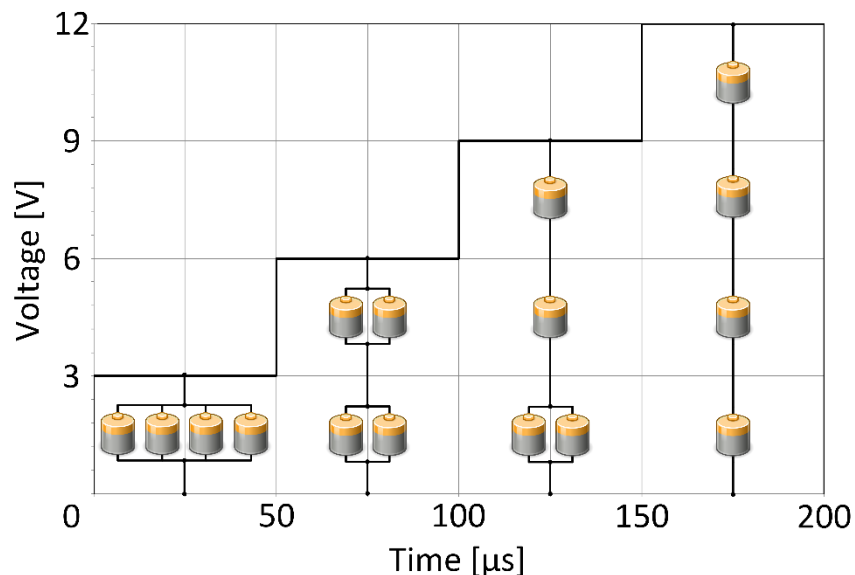


Abbildung 20: Veranschaulichung der dynamischen seriell-parallel Schaltung

Die aktuell beste Stufenkonfiguration wird gemäß dem in Abbildung 21 dargestellten Blockschaltbild berechnet. Der Algorithmus (nach [8]) kennt die Spannungshöhe der nächsthöheren und nächstniedrigeren Stufe $u_{LevelUp}$ bzw. $u_{LevelDown}$ und er misst die Ausgangsspannung des Systems u_{Out} und die Netzspannung u_{Netz} . Die letzten beiden vergleicht er miteinander und falls der

Unterschied größer ist als die Hälfte der nächsthöheren bzw. nächstniedrigeren Stufenspannung, erhöht er die Ausgangsspannung um eine Stufe bzw. erniedrigt sie um eine Stufe.

- Die Stufe wird erhöht: Falls alle Module aus sind (er also die Stufe 0 ausgibt) schaltet der Algorithmus alle Module parallel, deren Spannung und SOC vergleichbar sind. Falls schon Module aktiv sind, überprüft er, ob es noch inaktive Module gibt, die noch inaktiv sind. Ansonsten wählt er den Block paralleler Module mit dem höchsten SOC auf und teilt diesen möglichst mittig auf (siehe auch hierzu Abbildung 20).
- Die Stufe wird erniedrigt: Zuerst wird überprüft, ob es aktive Einzelmodule gibt. Davon wählt der Algorithmus dasjenige mit dem geringsten SOC aus und schaltet es parallel mit dem Nachbarn mit der ähnlichsten Spannung und SOC. Ansonsten identifiziert er den Parallelblock mit dem geringsten SOC und versucht ebenfalls diesen mit dem ähnlichsten Nachbarn parallel zu schalten. Ist der Unterschied zu groß, wird das oben identifizierte Modul überbrückt. Die exakte Schwelle, um Verluste durch Ausgleichsströme zu verhindern, ist Bestandteil weitergehender Untersuchungen. Die Ausgangsspannung sinkt um eine Stufe.

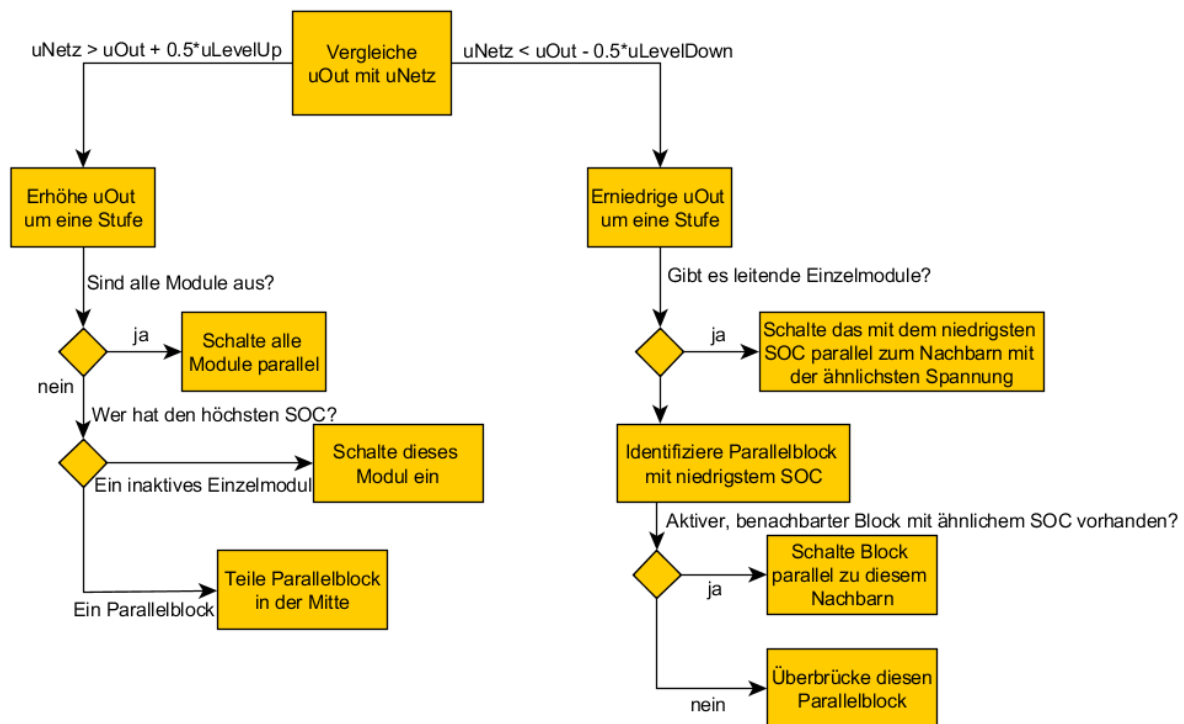


Abbildung 21: Algorithmus zur Ermittlung der geeignetsten Stufenkonfiguration nach [8]

5.6.2 Dynamisches Balancing der Ladezustände

Wie im vorhergehenden Abschnitt aus dem Blockschaltbild ersichtlich wird, ändert sich der Algorithmus abhängig davon, ob dem Batteriespeicher Energie zugeführt oder entnommen wird. Während im Entladebetrieb die volleren Batterien verstärkt eingesetzt werden, kehrt sich dies im Ladebetrieb um. Die leersten Batterien werden bevorzugt eingesetzt und seriell geschaltet, damit genau diese schneller aufgeladen werden. Die Simulationsergebnisse zeigen eindrucksvoll, wie unterschiedlich sich diese beiden Algorithmen schon bei kurzen Laufzeiten auf die Ladezustände auswirken.

Dabei wurde ein System mit 8 Submodulen à 48V simuliert, welches am Netz operiert. Jeder Versuch ist mit identischen Batterien auf exakt gleichem SOC von 70,0% gestartet und die SOC wurden nach 3s Betrieb überprüft. Dies wurde sowohl mit dem Lade- als auch dem Entladealgorithmus getestet.

Dabei wurden die Batterien je einmal aufgeladen und entladen, sodass sich die Marix in Tabelle 3 ergibt. Man erkennt, dass schon nach drei Sekunden die SOC's der Batterien um einen Faktor 100 bei der Varianz auseinanderlaufen, mit dem richtigen Batteriemangement die SOC's jedoch sehr nahe beieinander gehalten werden können.

Tabelle 3: Performanz des Lade- und Entladealgorithmus abhängig vom eingepprägten Leistungsfluss

| | Entladen der Batterie | Laden der Batterie |
|--------------------|---|---|
| Ladealgorithmus | Durchschnittlicher SOC: 69,828% Varianz: 4,635e-3 Standartabweichung: 0,063 | Durchschnittlicher SOC: 70,107% Varianz: 1,056e-7 Standartabweichung: 0,00028 |
| Entladealgorithmus | Durchschnittlicher SOC: 69,828% Varianz: 1,385e-5 Standartabweichung: 0,00251 | Durchschnittlicher SOC: 70,105% Varianz: 1,285e-3 Standartabweichung: 0,0325 |

5.7 Hardwaremäßige Umsetzung der 9-Schalter-Topologie

5.7.1 Übersicht zum Aufbau eines Submoduls

Die Simulationsergebnisse sollen natürlich in Hardware validiert werden. Dafür wurden die Platinen für den Leistungsteil Submodule aufgebaut, eine Messschaltung für die Batteriemessungen konzipiert sowie passende Mikrocontroller ausgewählt und programmiert.

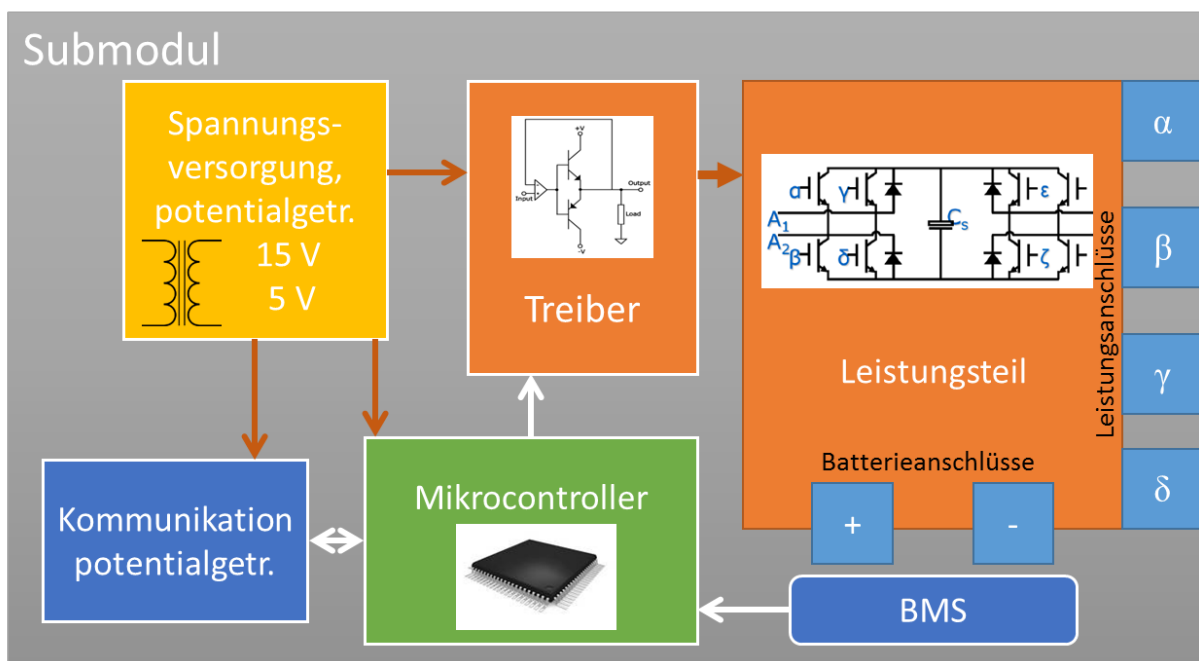


Abbildung 22: Konzeptioneller Aufbau eines Submoduls

Der Aufbau eines Submoduls ist schematisch in

Abbildung 22 dargestellt. Jedes Submodul ist gleichartig und besitzt

- eine isolierte Spannungsversorgung mit 6 gegeneinander potentialgetrennten Ausgängen, von denen 15V Versorgungsspannung für die Treiber und MOSFETs zur Verfügung stellen
- eine Treiberstufe, die die Logiksignale des Mikrocontroller in Schaltsignale für die MOSFETs umsetzt
- einen Leistungsteil, der bestehend aus neun MOSFETs die Grundlage der M2PC-Topologie bildet

- Anschlüsse am Leistungsteil für die Batterie sowie zu den Leistungsteilen der anderen Submodule.
- eine potentialgetrennte Kommunikationsschnittstelle um mit der zentralen Kommunikationseinheit auch über das sich dynamisch verändernde Grundpotential des Submoduls Daten austauschen zu können.
- ein Batteriemanagementsystem mit einer Messeinrichtung für die wichtigsten Batterieparameter
- einen Mikrocontroller um die Batteriedaten zu verarbeiten und an die zentrale Steuereinheit zu senden sowie gemäß den erhaltenen Daten aus dem Kommunikationsbus den richtigen Schaltzustand im Leistungsteil einzustellen. Der Mikrocontroller überwacht auch sicherheitskritische Größen und kann ggfs. dezentral eine Notabschaltung des Moduls auslösen.

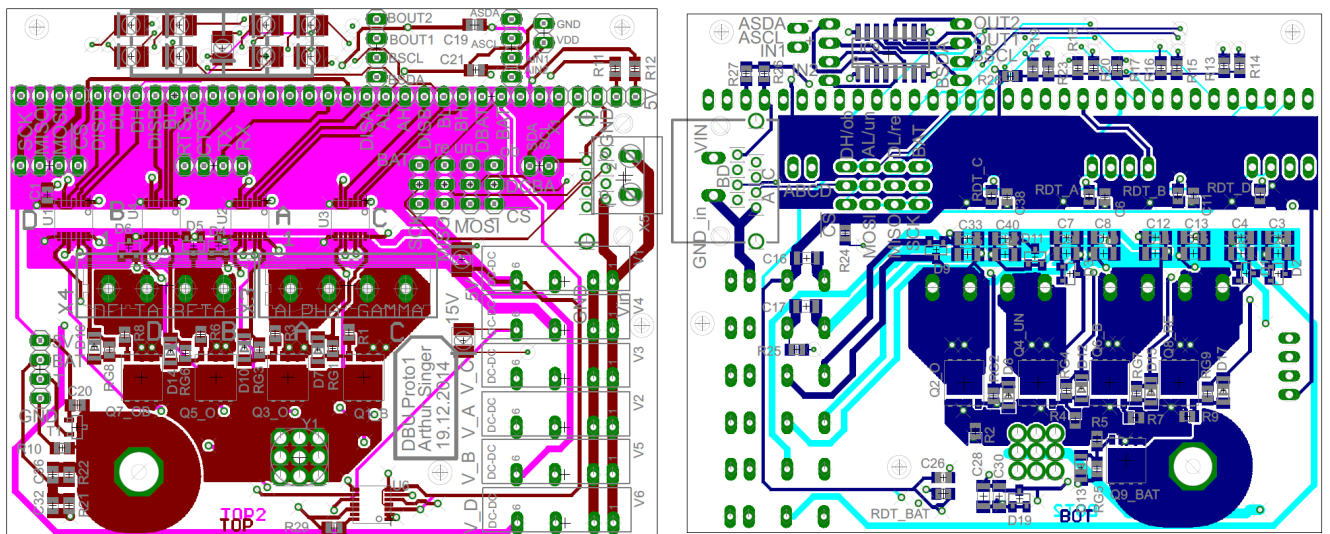


Abbildung 23: Vierlagiges Layout der Submodule

Der Schaltplan sowie das Layout der Platinen wurden mit dem CAD-Programm Eagle von Cadsoft erstellt. Um die Platine möglichst kompakt und die Signale möglichst störungsfrei zu halten wurde das Layout auf vier Ebenen erstellt. So können Signalwege und Leistungszweige sauber voneinander getrennt werden, es gibt weniger Übersprechen und im Leistungsteil können die Leiterbahnen entsprechend breit und damit niederohmig gehalten werden.

In Abbildung 23 sieht man das vierlagige Layout der Platinen. Dabei ist blau die unterste Lage (4) und rot die oberste Lage(1); die Innenlagen sind entsprechend in Magenta (2) und Cyan (3) eingefärbt. Die unteren beiden Lagen (blau und cyan) sind spiegelverkehrt dargestellt, dies ist beim Bestücken der unten angebrachten Bauteile von Vorteil.

Besonders gut kann man die Batterieanschlüsse erkennen. Die große Bohrung links unten (rot) wird genutzt, um die Platine am negativen Batterieanschluss festzuschrauben. So wird ein sehr guter elektrischer und thermischer Kontakt hergestellt, über den die Temperaturmessung läuft und der die Referenzspannung für die Batteriemessung bereitstellt. Rechts davon (rot) sieht man 3x3 Löcher. Dort wird über ein spezielles Bauteil ein Kabel befestigt, welches vom Pluspol der Batterie kommt. Auf diese Art und Weise ist die Platine fest mit der Batterie verbunden und die Zuleitungen sind so kurz wie möglich.

Weiterhin erkennt man noch die Leistungspfade oberhalb der Batterieanschlüsse. Über die großen blauen und roten Flächen fließt der Strom aus den Batterien durch die MOSFETs in die Mitte zu den Anschlüssen zu den anderen Modulen. Weiter oben erkennt man den kupferfreien, waagerechten

Balken, der den Logikteil vom Leistungsteil trennt. In dem Bereich ist die blaue Fläche die Massefläche für den Logikteil und die magentafarbene Fläche stellt die +5V Versorgungsspannung bereit. Noch weiter oben erkennt man noch die lange Stiflleiste zum Anschluss des Mikrocontrollers.

Abbildung 24 zeigt den Laboraufbau des Batteriemrichters mit acht Modulen und den Verbindungen untereinander. Man erkennt, dass die Leistungselektronik relativ klein ist und direkt auf den Batterien sitzt. Was auf dem Bild noch fehlt ist die zentrale Steuereinheit mit den Kommunikationsleitungen sowie Netzfilter, Netzmessung und Netzanschluss.



Abbildung 24: Laboraufbau des Batteriespeichers

5.7.2 Zentrale Steuereinheit

Die zentrale Steuereinheit ist ein Kernstück des Umrichters, da im Vergleich zu einem klassischen PWM-Umrichter viel mehr Untereinheiten koordiniert werden müssen. Die zentrale Steuereinheit muss die Ausgabestufe in Echtzeit anpassen, die jeweiligen Stufenkonfigurationen berechnen, SOC und Spannung der eingesetzten Submodule verfolgen und sich auf das Stromnetz einregeln. Zum jetzigen Zeitpunkt ist noch nicht sicher, wie genau diese Steuereinheit ausgelegt sein muss. Für den Laboraufbau wurde ein C2000 Mikrocontroller von Texas Instruments verwendet, der zwar die Stufen nach einem einfachen Muster ausgeben kann, aber mit der Berechnung des tatsächlichen Algorithmus überfordert ist. Damit schafft es der μC nicht, ein Ausgangssignal mit 50Hz auszugeben. Zurzeit wird eine MicroLabBox von dSpace verwendet, um den kompletten Algorithmus laufen zu lassen. Für eine kostengünstigere und portablere Variante wird in Zukunft ein ARM Cortex A9 Prozessor programmiert.

5.7.3 Sonstige Komponenten

Für den Netzanschluss wird noch ein L- oder LCL-Filter benötigt. Dieses wird ausgelegt, sobald feststeht, auf welcher PWM-Frequenz das System laufen wird. Schütze zur Sicherheitsabschaltung und Trennung vom Netz wurden schon besorgt. Außerdem befindet sich eine Messeinheit im Aufbau,

um Strom, Spannung und Frequenz des Stromnetzes zu vermessen, damit sich der Speicher darauf einregeln kann.

5.8 Messergebnisse und Funktion

Der Laboraufbau mit drei bzw. vier Modulen funktioniert. Bisher wurden 12 V Spannungsquellen bzw. Batterien angeschlossen, was bei vier Modulen eine Spitzenspannung von 48 V ergibt. Die Grundfrequenz beträgt 50 Hz, die überlagerte PWM Frequenz – PWM wird nur auf eine einzige Stufe angewandt, nicht auf die gesamte Spannungshöhe – beträgt ca. 25 kHz. In den Versuchen wurde jeweils eine Sinusspannung vorgegeben, der der Laboraufbau bzw. Steueralgorithmus folgen sollte.

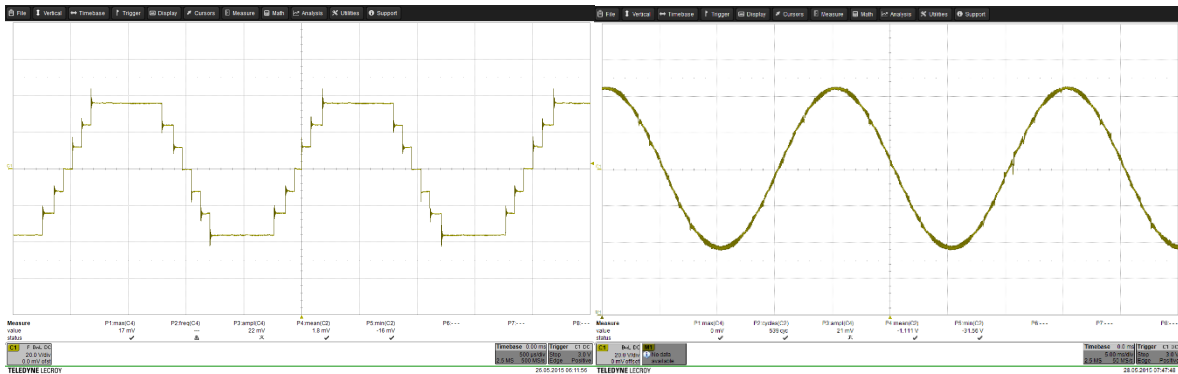


Abbildung 25: Funktion des Laboraufbaus: Links als Stufen diskretisierte Sinusspannung mit 50Hz (3 Module), rechts: mit PWM überlagerte Stufenpyramide mit Ausgangsfilter (4 Module)

In Abbildung 25 erkennt man links die Stufenpyramide, mit der ein Sinussignal durch drei Module nachgebildet wird. Rechts wird diese Stufenpyramide mit einem PWM-Signal überlagert und gefiltert, sodass eine saubere Sinusspannung entsteht. In Abbildung 27 sieht man die ungefilterte, mit PWM (10 kHz) überlagerte Stufenpyramide.

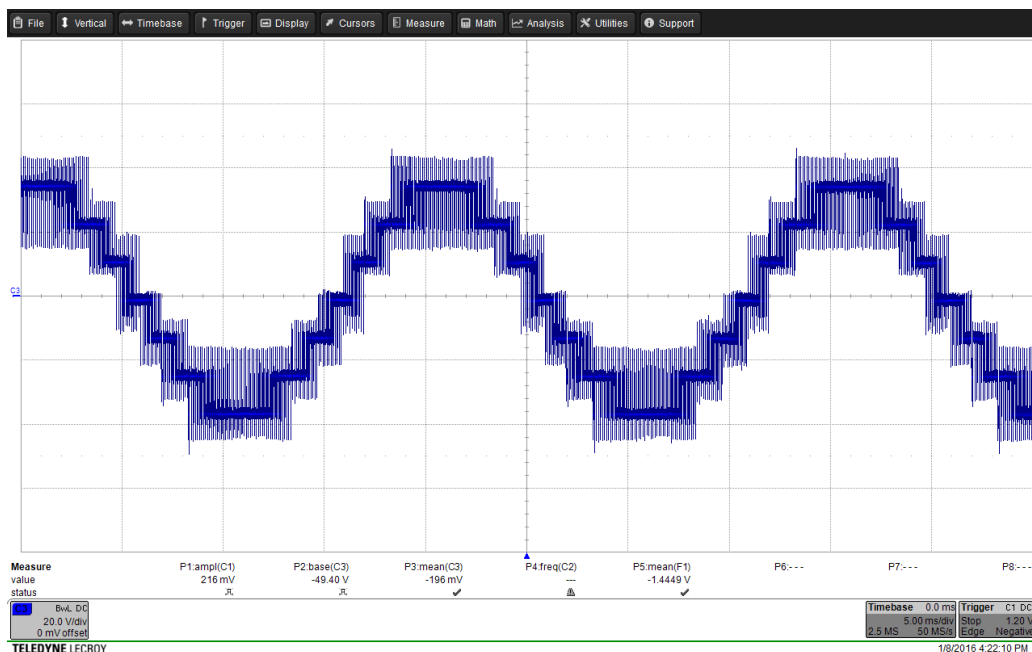


Abbildung 26: Mit PWM überlagerte Stufenpyramide (3 Module)

In Abbildung 27 wird die PWM-Modulation gezeigt, die in diesem Fall nur ein einziges Modul durchführt. Das PWM-Signal ist positiv, wenn die Sollspannung (der vorgegebene Sinus) kleiner ist als die aktuelle Stufe und negativ, wenn die Sollspannung größer ist. So werden die ehemals gerade Stufen bei steigendem Sinus rechts der Stufenmitte erhöht und links der Stufenmitte erniedrigt, um

dem vorgegebenen Sinus ähnlicher zu sehen. Dadurch kann der Ausgangsfilter kleiner ausfallen; Kosten und Verluste sinken.

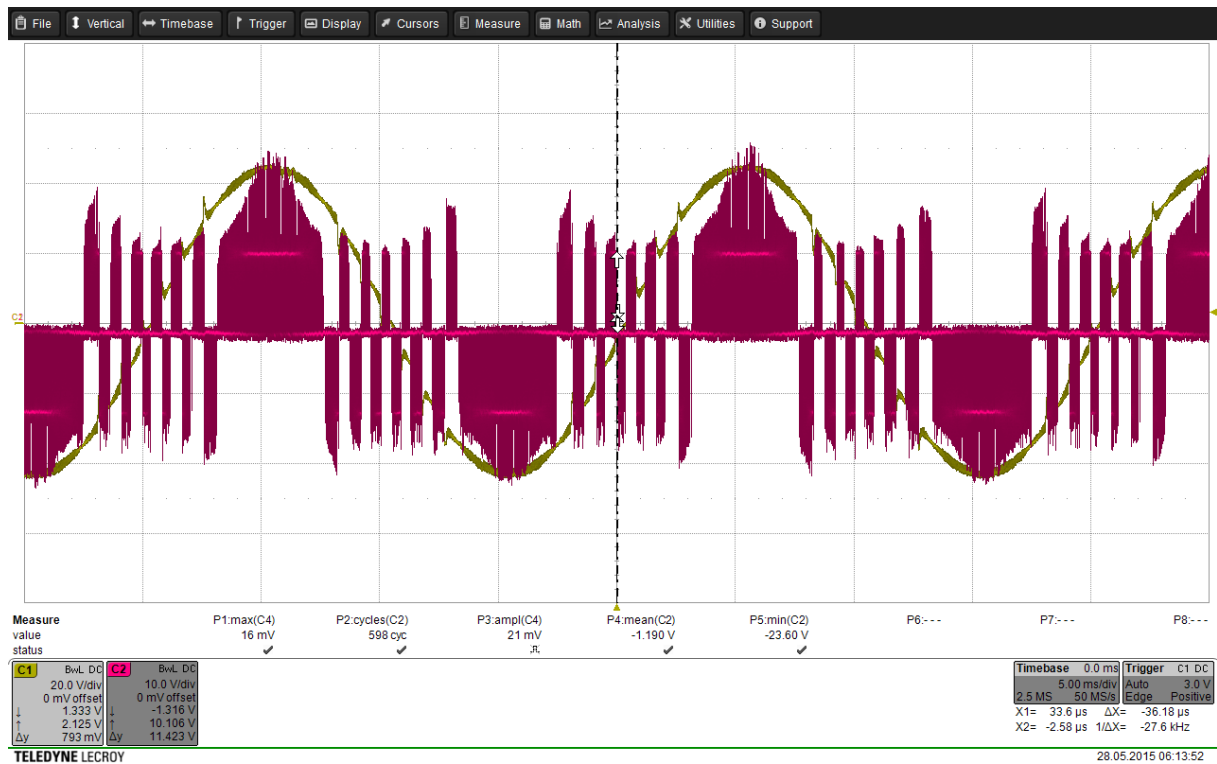


Abbildung 27: PWM Modulation über der Sinusausgangsspannung

Durch diesen Aufbau kann man sogar beliebige Spannungsformen vorgeben (Abbildung 28), die durch den Laboraufbau nachgebildet werden. Dadurch wird die herausragende Flexibilität des

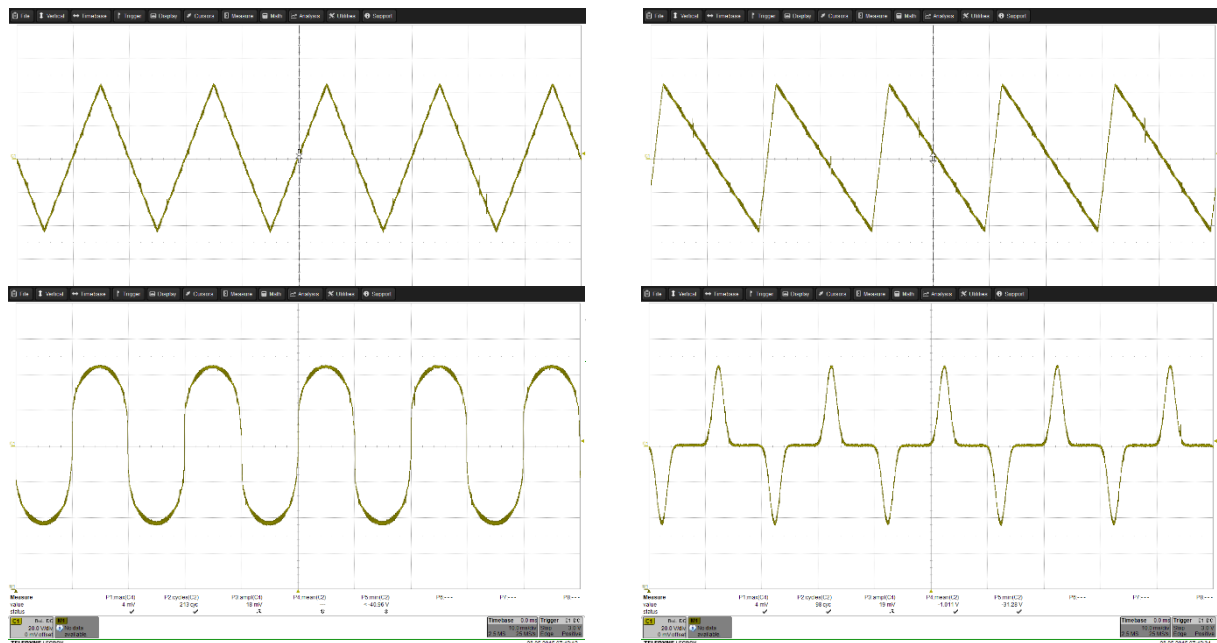


Abbildung 28: Beliebige Spannungsformen können über den Laboraufbau ausgegeben werden.

vorgestellten Systems unter Beweis gestellt.

Die tatsächliche Effizienz im Betrieb konnte noch nicht überprüft werden. Doch die Vermessung der Submodule stimmt soweit mit den Größen in der Simulation überein, sodass weiterhin darauf

vertraut werden kann, dass die Simulationsergebnisse realistisch sind. Die Impedanz der Submodule (siehe Tabelle 4) wurde nach Anlegen der Versorgungsspannung und Durchschalten der MOSFETs in genannter Konfiguration ohne Batterie gemessen. In beiden Fällen ist der Widerstand mit gerade mal 7 mΩ sehr niedrig. Auch die Wechselspannungsimpedanz bei 50 kHz ist mit 18,6 bzw. 14,4 mΩ ausgesprochen niedrig. Wie zu erwarten wächst sie bei höheren Frequenzen an. Diese werden im Betrieb aber nicht erreicht.

Tabelle 4: Impedanz der Submodule im Betrieb

| Active Low | | | | Parallelschaltung (Halbbrücken A & B) | | | |
|------------|---------|----|---------|--|---------|----|---------|
| | 50kHz | | 500kHz | | 50kHz | | 500kHz |
| R | 0,00701 | Ω | 0,01348 | R | 0,00761 | Ω | 0,0125 |
| X | -0,0172 | Ω | -0,165 | X | -0,0122 | Ω | -0,2201 |
| Ls | -0,0547 | μH | -0,0657 | Ls | -0,0389 | μH | -0,0876 |
| Z | 0,01855 | Ω | 0,16554 | Z | 0,0144 | Ω | 0,22048 |
| Θ | -1,1832 | ° | -1,4893 | Θ | -1,0142 | ° | -1,5141 |

5.9 Wirtschaftliche Betrachtungen

Der Bewilligungsempfänger vermittelte durch seine Marktkenntnis, den Projektpartnern einen Einblick in die aktuelle Marktsituation und die Endkundenerfordernisse. So war es möglich, nicht nur die Endkundenpreise verschiedener aktuell erhältlicher Speichersysteme samt den i.d.R. sehr positiv formulierten Produktdatenblättern zu analysieren, sondern auch die Einkaufspreise zu betrachten und auf tatsächliche Tests dieser Systeme zurückzugreifen.

5.9.1 Kostenentwicklung Speichersysteme

So konnte auch ein Cost-Break-Down eines Speichersystems eines namhaften deutschen Speichersystemproduzenten⁴ erstellt werden. Darin ist offensichtlich, dass der größte Kostenblock heutzutage der Akkupack samt Batteriemanagementsystem ist. Es wird prognostiziert basierend auf den langfristigen Einkaufskonditionen, die Samsung (als einer der Marktführer für Lithium-Ionen-Zellen) jetzt schon anbietet einen Preisverfall der Akkupacks um 50%, von heute ca. 500€/kWh auf ca. 250€/kWh im Jahr 2018. Bei der Leistungselektronik wurden die Erfahrungen in der Preisentwicklung der Photovoltaikwechselrichter auf die Batteriespeicher übertragen. So wird mit einem massiven Preisverfall von 66%, von heute ca. 1.500€ auf 500€ gerechnet. Auch bei der Steuerung wird durch den allgemeinen Trend, dass Prozessoren und Rechenleistung kontinuierlich billiger werden (Moor'sches Gesetz) eine Absenkung der Kosten von ca. 500€ auf 150€ für ein gleichartiges System erwartet.

Im Gegensatz zu den obigen, in der Tabelle rot dargestellten Positionen, wird bei den grünen Werten von keinen wesentlichen Preisänderungen innerhalb der nächsten Jahre ausgegangen. Beim Gehäuse sind v.a. die reinen Materialkosten ausschlaggebend, bei denen keine allzu große Preisdynamik vorhergesehen wird. Sonstige Kosten beinhalten die Kosten für Verkabelung, Kleinteile (z.B. Schrauben, Nieten, Aderendhülsen,...), die sonstige Anschlussstechnik (z.B. Klemmenblock, Reihenklempen, DIN-Schienen,...) und den eigentlichen Aufbau des Systems aus den Komponenten.

⁴ Aus Wettbewerbsgründen wird besagter Hersteller nicht namentlich genannt.

Im „Nachlass Installateur“ ist der verbesserte Einkaufspreis, den der Installateur im Vergleich zum Listenpreis erhält, um die Aufwände, aber auch die Marge abzudecken und das System trotzdem zum vom Hersteller beworbenen Preis verkaufen zu können, dargestellt. Bei diesen beiden Punkten gehen wir davon aus, dass sie in etwa gleich bleiben bzw. auf Grund tendenziell wachsender Personalkosten leicht steigen werden. Die heutige Marge des Herstellers ist mit 483€, entsprechend 8,2% vom Verkaufspreis relativ gering verglichen mit dem Risiko ein neues Produkt zu entwickeln, zu bewerben und zu vertreiben. Es wird davon ausgegangen, dass besagter Hersteller in diesem Fall nicht kostendeckend arbeitet und hier eine Marktpenetrationsstrategie verfolgt, bzw. fehlende Mittel aus Forschungsgeldern finanziert. Aus diesem Grund wird erwartet, dass diese Marge über die nächsten Jahre absolut stabil bleibt, relativ gesehen aber auf 15% steigt. Hier ist allerdings die Unsicherheit relativ hoch, da die Strategie des Herstellers natürlich nicht bekannt ist und somit nicht vorhergesehen werden kann. Aus der bisherigen Entwicklung lässt sich jedoch erkennen, dass der Hersteller (wie auch die meisten anderen am Markt) die positiven Preisentwicklungen mit einer gewissen Verzögerung an die Kunden weitergibt.

In den beiden Kuchendiagrammen sind die relativen Kostenanteile dargestellt – der Kuchen in drei Jahren verliert von 5.900€ auf 3.500€ gut 40% an Wert und wird somit kleiner.

Tabelle 5: Vergleich aktueller Systemkosten zu erwarteten Systemkosten in 3 Jahren

| Kosten heute: | | | | Kosten in 3 Jahren: | |
|-------------------------|-------------|-----------|-------------------|---------------------|-------------------|
| Akkupack (Zellen + BMS) | 1 x 4,5 kWh | 500 €/kWh | 2'250.00 € | 250 € / kWh | 1'125.00 € |
| Leistungselektronik | 1 | 1'500 € | 1'500.00 € | 500 € | 500.00 € |
| Steuerung | 1 | 500 € | 500.00 € | 150 € | 150.00 € |
| Gehäuse | 1 | 300 € | 300.00 € | 300 € | 300.00 € |
| sonstige Kosten | | 100 € | 100.00 € | 110 € | 110.00 € |
| Nachlass Installateur | | | 767.00 € | | 813.95 € |
| Marge Hersteller X | | | 483.00 € | | 501.05 € |
| Gesamt | | | 5'900.00 € | | 3'500.00 € |

Kostenzusammensetzung

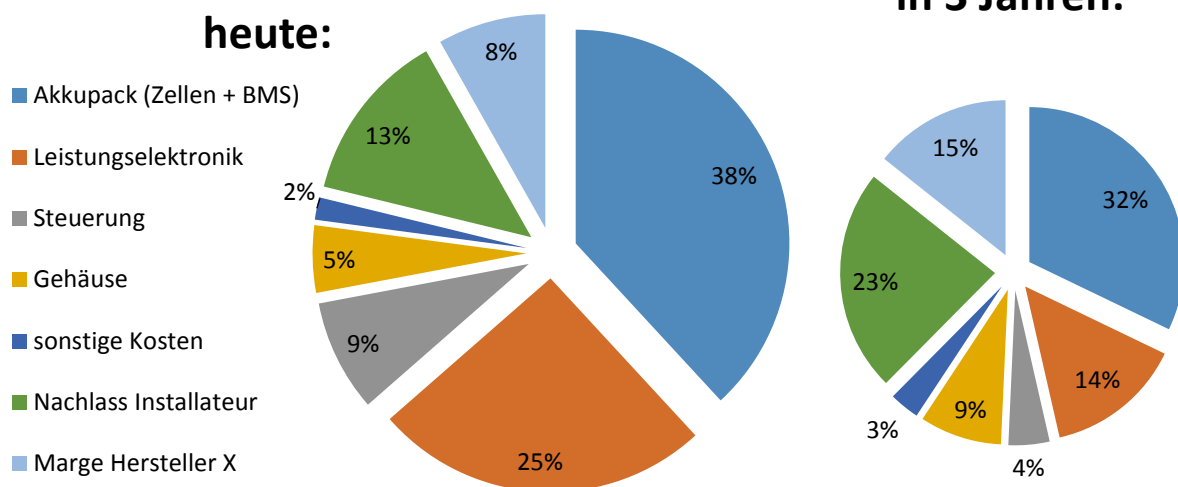
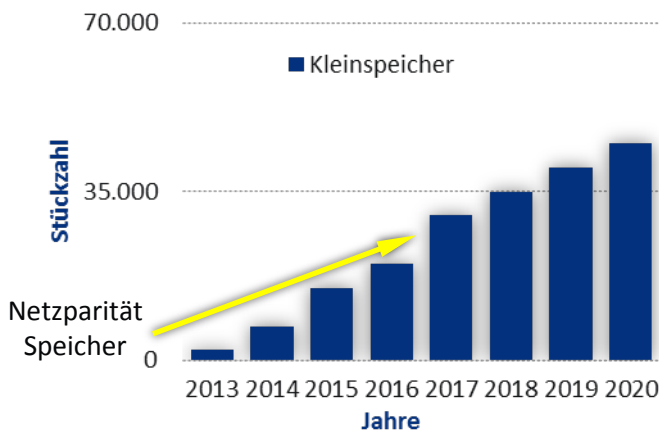


Abbildung 29: Kostenzusammensetzung Kleinspeicher heute und in drei Jahren

5.9.2 Marktentwicklung Klein- und Großspeicher

Basierend auf den aktuellen Marktstudien von IBESA⁵ wird eine sehr positive Entwicklung von Kleinspeichersystemen für Einfamilienhaushalten erwartet. Die Studien basieren auf aktuellen Befragungen von Installateuren in ganz Deutschland und den erwarteten Projekten.



Quelle: 2013 - 2017 Schätzung von IBESA, 2018 - 2020 Forecast Smart Power GmbH & Co. KG

Mit den oben genannten Abschätzungen für die Entwicklung der Komponenten und Systempreise wird mit einer Netzparität für Speicher in den Jahren 2017 oder 2018 gerechnet (u.a. auch abhängig von der angenommenen Strompreisentwicklung und der Entwicklung der sonstigen Systemeigenschaften).

Abbildung 30: Marktentwicklung Kleinspeicher

Für Großspeicher ergibt sich, durch die Vermarktung von Regelleistung, ein neuer

Markt, der es schon heute ermöglicht Großspeicher gewinnbringend zu vermarkten. Da diese Anwendung noch recht neu ist, sind noch keine belastbaren Daten zur Entwicklung der Verkaufszahlen vorhanden. Insbesondere ist es schwierig abzusehen, in wie weit der Markteintritt von Stromspeichern den Regelleistungsmarkt, der mit derzeit 700 MW Primärregelleistungsbedarf und ca. 3000 MW Sekundärregelleistungsbedarf eine sehr begrenzte Größe besitzt, beeinflusst.

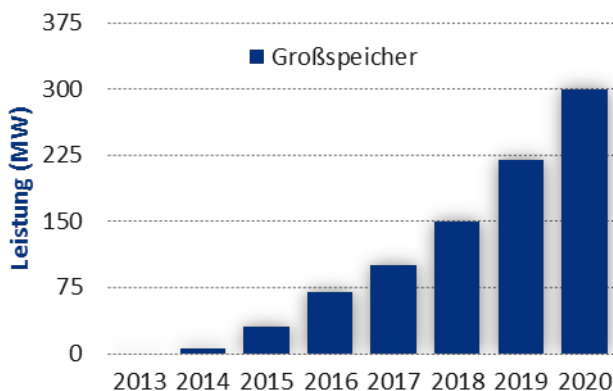


Abbildung 31: Marktentwicklung Großspeicher

Trotzdem lässt sich aufgrund von im Bau befindlichen, beauftragten, geplanten und ausgeschriebenen Anlagen für die nächsten 2 Jahre ein grober Forecast abgeben. Zusätzlich zu den Regelleistungsspeichern werden auch Großspeicher für Industrieunternehmen immer interessanter und werden einen weiteren Markt bilden, der sich heute jedoch noch sehr schwer in Zahlen fassen lässt. Besonders ab 2017 sind die Zahlen jedoch einer hohen Streubreite unterlegen.

Bei den dargestellten Zahlen handelt es sich um Zahlen für Deutschland. Mit einem konkurrenzfähigen Produkt ist jedoch die Ausweitung auf Märkte im Ausland sehr wahrscheinlich, was weitere Marktpotentiale eröffnet.

5.10 Wirkungsgradsteigerung und tCO₂-Einsparung mit der neuen Technologie im Vergleich zu klassischen PWM-Umrichtern

Die neue Technologie mit dynamischer Seriell-Parallel-Schaltung hat nicht nur Vorteile in Bezug auf Ausfallsicherheit, Flexibilität und Batteriemanagementsystem sondern ermöglicht auch Wirkungsgradsteigerungen im Vergleich zu klassischen PWM-Umrichtern.

Der simulierte Wirkungsgrad (bei dem auch Batterieverluste mit einbezogen wurden) ist ausgesprochen hoch und fällt auch im – für typische Anwendungsszenarien sehr wichtigen –

⁵ IBESA International battery & energy storage alliance „Storage business climate index“

Teillastbetrieb nur unmerklich ab, siehe Tabelle 6 Spalte 3. Diese simulierten Werte wurden soweit bereits möglich durch Messungen am ersten Prototypen im Labor validiert. Addiert man zu den Verlusten noch den Leistungsbedarf des zentralen Mikrocontrollers und der Ansteuerung ergibt sich der Wirkungsgrad in Spalte 5. Dieser wird mit einem Referenzsystem eines namhaften deutschen Herstellers⁶ derselben Leistungsklasse verglichen. Die Wirkungsgrade der beiden Systeme werden in den letzten Spalten verglichen. Relativ gesehen ist unser System zwischen 3,5% und 5% besser, bei niedrigen Leistungen sogar um ca. 27%.

Tabelle 6: Vergleich beantragter Batteriespeicher zu klassischem PWM-Umrichter

| Leistung [kW] | Verlustleistung [W] | Effizienz Leistungselektronik | Verlustl. inkl. μ C & Ansteuerung [W] | Eff. DBU Batterie-speicher-system | Effizienz PWM Vergleichs-system | Relativer Unterschied | Absoluter Unterschied [W] |
|---------------|---------------------|-------------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| 3 | 35,13 | 98,83% | 48,13 | 98,37% | 93,20% | 5,2% | 155,1 |
| 2,65 | 27,9 | 98,95% | 40,90 | 98,45% | 93,60% | 4,9% | 128,6 |
| 2,5 | 24,35 | 99,03% | 37,35 | 98,48% | 94,00% | 4,5% | 111,9 |
| 2 | 16,23 | 99,19% | 29,23 | 98,52% | 94,40% | 4,1% | 82,5 |
| 1,75 | 12,2 | 99,30% | 25,20 | 98,53% | 94,80% | 3,7% | 65,4 |
| 1,5 | 8,96 | 99,40% | 21,96 | 98,51% | 94,90% | 3,6% | 54,2 |
| 1,25 | 6,161 | 99,51% | 19,16 | 98,45% | 94,90% | 3,5% | 44,3 |
| 1 | 4,03 | 99,60% | 17,03 | 98,28% | 94,50% | 3,8% | 37,8 |
| 0,75 | 2,291 | 99,69% | 15,29 | 98,05% | 94,30% | 3,8% | 28,1 |
| 0,5 | 1,035 | 99,79% | 14,04 | 97,26% | 93,80% | 3,5% | 17,3 |
| 0,25 | 0,2808 | 99,89% | 13,28 | 95,63% | 88,00% | 7,6% | 19,1 |
| 0,1 | 0,1133 | 99,89% | 13,11 | 86,89% | 60,00% | 26,9% | 26,9 |

Eine graphische Darstellung der Wirkungsgrade bei verschiedenen Lasten zeigt Abbildung 1. Der Wirkungsgradabfall bei niedrigen Lasten ist bedingt durch die lastunabhängigen und damit im Vergleich relativ höheren Verluste durch die Mikroprozessoren und die Ansteuerelektronik. Aber auch da hat das beantragte System einen signifikant besseren Wirkungsgrad als das Vergleichssystem. Im Durchschnitt ist der Wirkungsgrad des neuen Systems um 6,25%-Punkte besser. Dies bedeutet, dass die Verluste unseres Systems mindestens um den Faktor 2, meist aber um den Faktor 3 - 4 unter denen des Vergleichssystems liegen. Dabei ist noch zu beachten, dass bei den Simulationen die Batterie und deren Verluste mitsimuliert wurden. Im Vergleichssystem wird jedoch nur der Wirkungsgrad der Elektronik (ohne Batterie) betrachtet, wodurch unser System im tatsächlichen Einsatz nochmals besser abschneiden dürfte.

Um die Energieeinsparmöglichkeiten aufzuzeigen, wurden die Verluste für einen Haushalt aufs Jahr hochgerechnet (siehe Tabelle 7). Dort wurden die jeweiligen Verlustleistungen mit der Auftrittshäufigkeit eines selbst gemessenen Haushalts (minütliche Messwerte, skaliert auf 4000 kWh Jahresverbrauch) multipliziert und aufs Jahr hochgerechnet. Alternativ kann mit dem Standardlastprofil für Haushalte des BDEW gearbeitet werden. Dort wird jedoch von 15-Minuten-Werten ausgegangen, sodass Lastspitzen geglättet werden. Somit treten seltener Spitzenlasten auf, die niedrigen Lasten, bei denen der beantragte Batteriespeicher noch besser abschneidet im Vergleich zum PWM-System, entsprechend umso öfter.

⁶ PWM-Vergleichssystem ist SunnyIsland 3.0M von SMA; Werte entnommen aus dem Datenblatt unter <http://files.sma.de/dl/17632/SI30M-44M-DDE1445-V11web.pdf>

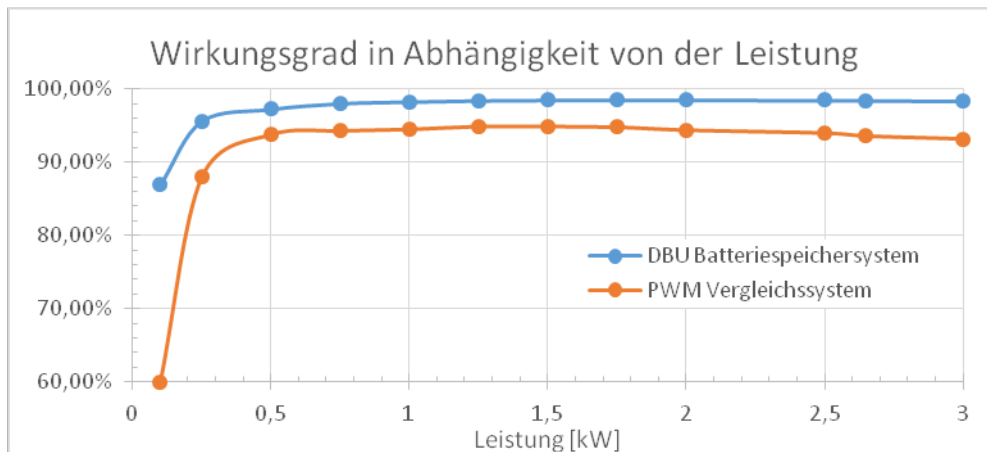


Abbildung 32: Wirkungsgradvergleich des beantragten Batteriespeichers gegenüber klassischem PWM-Umrichter

Insgesamt ergeben sich für den beantragten Batteriespeicher im Jahr Verluste von 120 kWh, für das Vergleichsprodukt ca. 369 kWh. Die Differenz aus den beiden ergibt das Einsparpotential unseres Systems i.H.v. 249 kWh pro Jahr und pro Haushalt, was Einsparungen von ca. 67€ im Jahr bei einem Strompreis von 27ct/kWh entspricht. Mit der bekannten Relation von 0,6 t CO₂ pro 1000 kWh ergeben sich CO₂-Einsparungen in Höhe von 0,15t pro Haushalt. Laut Speichermonitor 2015⁷ wurden in Deutschland von März 2013 bis März 2015 17.000 Haushaltsspeicher zugebaut. Würden diese auf unserer Technologie basieren, könnten dadurch 4,2 GWh elektrischer Energie oder 2550 t CO₂ pro Jahr eingespart werden.

Tabelle 7: Jährliche Einsparmöglichkeiten pro Haushalt

| Leistung [kW] | Häufigkeitsverteilung Stromverbrauch | Verlust pro Jahr DBU Batterie-speicher [kWh] | Verlust pro Jahr PWM-Umrichter [kWh] |
|--|--------------------------------------|--|--------------------------------------|
| 3 | 0,278% | 1,19 | 4,97 |
| 2,65 | 0,139% | 0,50 | 2,06 |
| 2,5 | 0,208% | 0,70 | 2,74 |
| 2 | 1,668% | 4,31 | 16,36 |
| 1,75 | 1,320% | 2,97 | 10,53 |
| 1,5 | 3,405% | 6,67 | 22,82 |
| 1,25 | 4,309% | 7,33 | 24,06 |
| 1 | 5,073% | 7,65 | 24,44 |
| 0,75 | 1,390% | 1,78 | 5,20 |
| 0,5 | 3,058% | 3,67 | 8,30 |
| 0,25 | 23,280% | 22,26 | 61,18 |
| 0,1 | 53,092% | 60,99 | 186,04 |
| Summe: | | 120,00 | 368,71 |
| Einsparung in kWh: | | | 248,71 |
| Einsparung in tCO₂ p.a.: | | | 0,15 |

⁷ Jahresbericht zum Speichermonitoring (RWTH Aachen, 2015),

http://www.speichermonitoring.de/fileadmin/user_upload/Speichermonitoring_Jahresbericht_2015_web.pdf

5.11 Normen und Richtlinien

Für die Neuentwicklung eines Speichersystems müssen diverse Normen und Richtlinien berücksichtigt werden. Da geplant ist, am Ende des Forschungsprojektes ein Produkt zu entwickeln sollten schon frühzeitig die entsprechenden Normen und Richtlinien eingehalten werden, um später eine CE-Kennzeichnung zu vereinfachen und den Netzanschluss zu ermöglichen

5.11.1 Allgemeine Sicherheitsnormen

Im Bereich der Sicherheitsnormen sind insbesondere die Normen der VDE zu beachten. Für das Speichersystem relevante Normen sind:

VDE 0100 (Normenreihe Niederspannungsanlagen)

VDE 0110 (Luft und Kriechstrecken)

VDE 470 (Schutzklassen)

VDE 0810 (Funktionale Sicherheit)

5.11.2 Sicherheitsnormen und Richtlinien für Speichersysteme

Da die Entwicklungen für Speichersysteme noch sehr neu sind, sind bisher noch kaum verwertbare Normen verfügbar. Daher müssen in vielen Fällen entsprechende Industrienormen verwendet werden.

Für die Zellsicherheit:

UN 38.3

Da es derzeit noch keine eigenständige Norm für stationäre Speichersysteme gibt müssen hilfsweise auch Normentwürfe [12] und Leitfäden [15] berücksichtigt werden. Der derzeit wohl wichtigste Normentwurf ist der Normentwurf DIN EN ISO 62619. Darüber hinaus sind wichtige Leitfäden die Checkliste des Karlsruher Institutes für Technologie (KIT) [13] und der dazugehörige Sicherheitsleitfaden [14], der in Zusammenarbeit mit diversen Verbänden entwickelt wurde.

5.11.3 Allgemeine Kompatibilitätsnormen

Wie bei jedem Elektronikgerät müssen allgemeine Normen für die Elektromagnetische Störaussendung und Störempfindlichkeit eingehalten werden:

EMV: DIN EN 61000 (Normenreihe)

Abhängig vom zukünftigen Einsatzgebiet des Speichersystems müssen unterschiedliche Grenzwerte der Normenreihe eingehalten werden. So gelten für den Industriebereich andere (weniger strenge) Anforderungen. Da das System aber auch im Haushaltsbereich eingesetzt werden soll sind hier die strengeren Kurven für die maximale Störaussendung in Abhängigkeit von der Frequenz anzusetzen.

Darüber hinaus ist wichtig, sicherzustellen, dass berührbare Kontakte so ausgeführt sind, dass keine Zerstörung durch Elektrostatische Entladungen hervorgerufen wird und das System auch nicht in einen unsicheren Zustand gerät. Hierfür gilt die entsprechende Normenreihe:

ESD: DIN EN 61340 (Normenreihe)

5.11.4 Normen und Richtlinien zur Netzkonformität von Speichern

Da wie bereits weiter oben erwähnt derzeit keine dezidierten Normen existieren wird bei Speichersystemen derzeit von den Verteilnetzbetreibern in Anlehnung an die Photovoltaik-Industrie die Einhaltung der Grenzwerte in Bezug auf Oberwelligkeit und Netzverhalten bei Netzstörungen die VDE Anwendungsregel für Niederspannungssysteme angelegt:

VDE AR N 4105

Darüber hinaus wird im Mittelspannungsbereich die Einhaltung der BDEW Mittelspannungsrichtlinie gefordert. Diese wird derzeit im Rahmen eines Normentwurfes überarbeitet:

Netzkonformität Mittelspannungsanlagen:

BDEW MSP-RL
VDE AR N 4110

Darüber hinaus gilt für den Anschluss des Speichers die Einhaltung der Technischen Anschlussbedingungen des Verbandes der Netzbetreiber:

VDN-TAB 2007

Ergänzend zu diesen Richtlinien wurden durch das Forum Netztechnik/ Netzbetrieb Richtlinien für den Anschluss von Speichern entwickelt:

FNN - „Anschluss und Betrieb von Speichern am Niederspannungsnetz“

Diese Richtlinien stellen die Wesentlichen Rahmenbedingungen für Speicher im Verteilnetz deutscher Verteilnetzbetreiber dar.

5.12 Sicherheitskonzept

Für das System müssen mehrere verschiedene Sicherheitsaspekte berücksichtigt werden, da es sich sowohl um ein System mit Lithiumzellen handelt, die einer nicht abschaltbaren Gleichstromquelle entsprechen und darüber hinaus in der Handhabung gewisse Risiken bergen, als auch um ein Wechselstromsystem mit Wechselspannungen, die jenseits der zulässigen Berührspannungen liegen.

5.12.1 Umgebungsbedingungen

Um die im Betrieb zulässigen Grenzwerte für Lithiumbatterien einzuhalten müssen die Umgebungsbedingungen sehr genau definiert werden. So darf bei Lithiumbatterien unter 0 °C keine Ladung erfolgen, da es sonst zu einer Schädigung der Zellen kommen kann und darüber hinaus ein gefährdendes Verhalten der Zellen nicht ausgeschlossen werden kann. Zudem, müssen die Umgebungstemperaturen ebenfalls nach oben sehr stark beschränkt werden, da sonst durch die zusätzlichen Verluste in der Zelle ebenfalls ein negatives Verhalten hervorgerufen werden kann. Typischerweise geben Hersteller eine maximale Umgebungstemperatur von 40 °C an.

Darüber hinaus ist es wichtig, um die Lebensdauer der Zellen so weit wie möglich zu erweitern, die Temperatur im idealen Bereich zu halten. Je nach Zellchemismus sind 10 bis 20 °C optimal. Somit sind die Installationsbedingungen in den meisten Kellerräumen ideal für Speichersysteme.

5.12.2 Schutzklassen

Da die Systeme in geschlossenen Räumen verbaut werden müssen, um auch die Umgebungsbedingungen einzuhalten besteht in Bezug auf die Resistenz gegen Wasser keine besondere Anforderung.

Die Berührsicherheit sollte soweit gegeben sein, dass beim Transport die Kontakte nicht ohne weiteres berührt werden können. Im laufenden Betrieb sollte eine Berührung durch Gegenstände >2,5 mm ausgeschlossen sein (ähnlich einer Steckdose).

Somit ergibt sich die IP Schutzklasse 31.

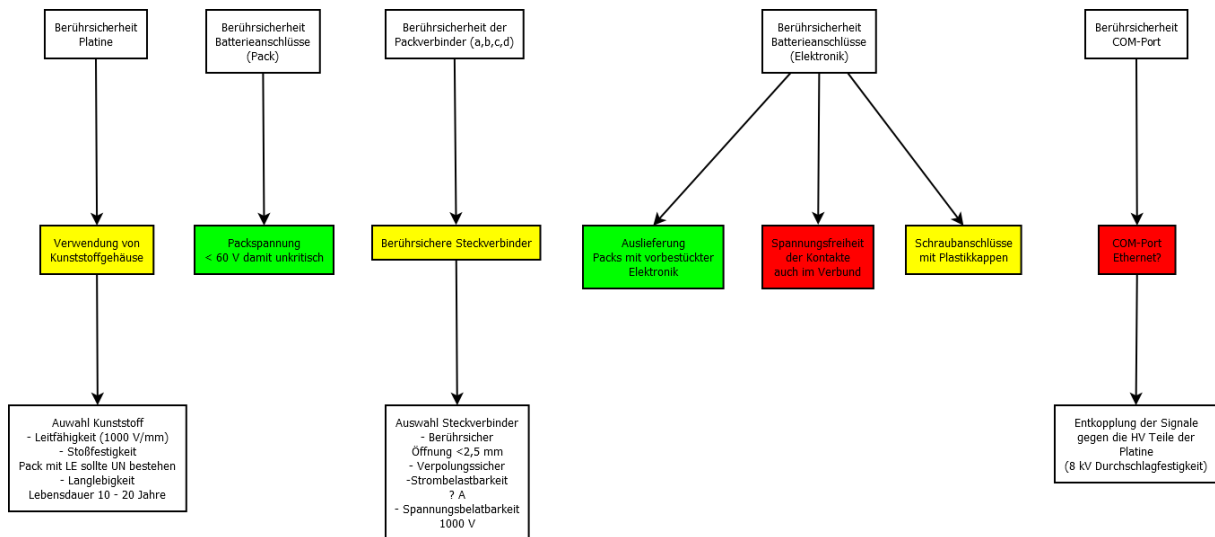


Abbildung 33: Beurteilung der Schutzklasse, kritische Zustände und Maßnahmen

Um bei leichten Schlägen zu verhindern, dass gefährliche Zustände eintreten, ist es darüber hinaus wichtig eine gewisse Festigkeitsanforderung an das Gehäuse des Systems und der Komponenten zu stellen.

IK5?

5.12.3 Sicherheit im Programmablauf

Um zu jederzeit einen sicheren Zustand der Batterie gewährleisten zu können müssen gewisse Sicherheitsabläufe im Programmcode geplant und sichergestellt werden. Ein gängiges Verfahren für die Softwareplanung sicherheitskritischer Programmcodes ist die Anwendung des V-Modells. Für den ersten Prototypen ging es primär um die Funktionsverifikation. Daher wurde auf die genaue Anwendung des V-Modells verzichtet und für die implementierten Sicherheitsfunktionen eine vereinfachte Softwareplanung und Realisierung gewählt.

Die im Endprodukt zu implementierenden Sicherheitsfunktionen sind in dem folgenden Ablaufdiagramm dargestellt:

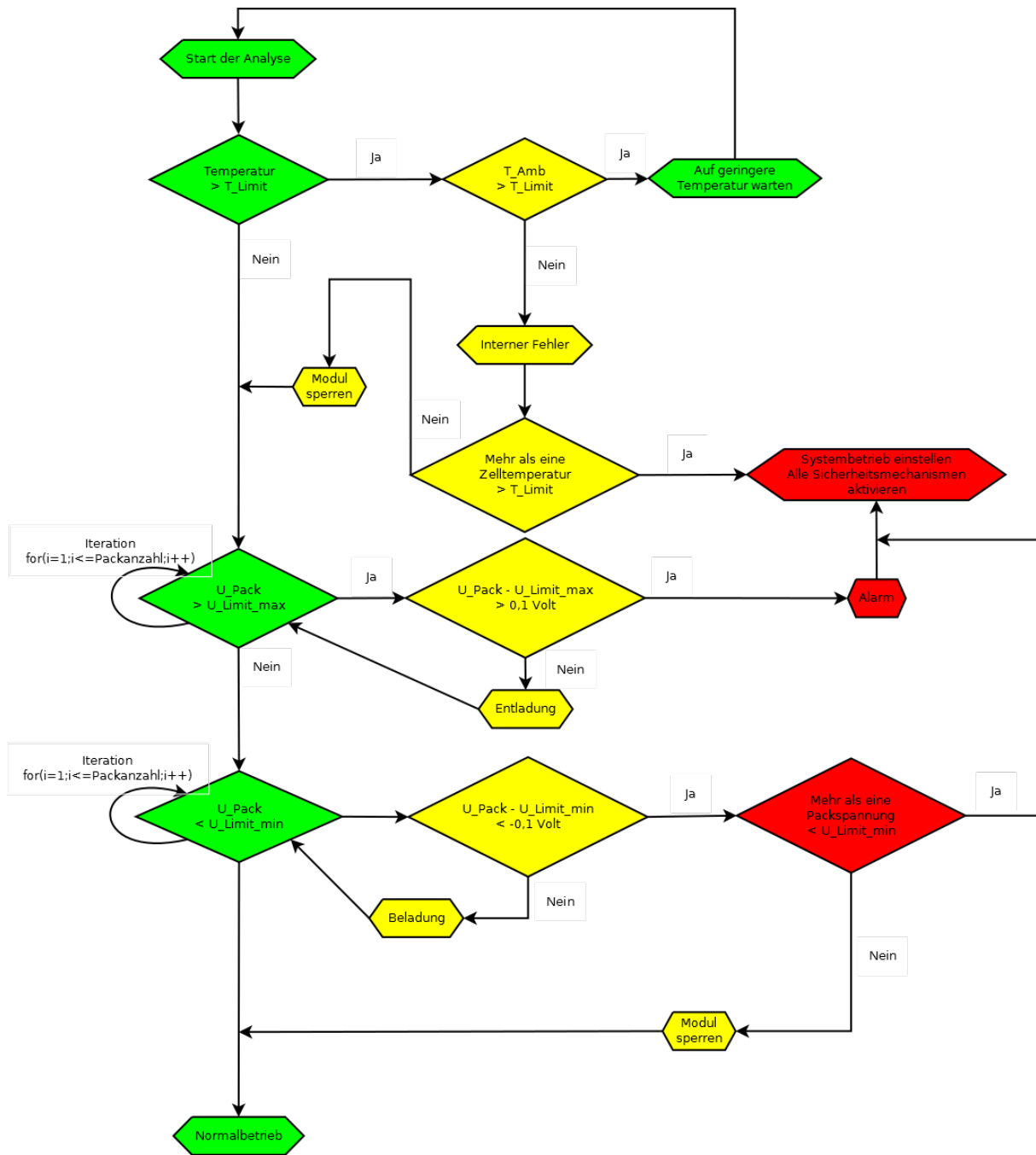


Abbildung 34: Sicherheitsablauf im Programmcode

5.13 Ausblick

Das in dieser Vorstudie gesetzte Ziel, zu zeigen, dass ein auf der M2PC-Topologie basierender Batteriemrichter funktionieren kann, wurde erreicht. Die Simulationen haben sehr erfreuliche Ergebnisse gezeigt und auch die Messungen – die in diesem frühen Stadium des Projekts natürlich noch nicht vollständig sein können – zeigen in die erhoffte Richtung. Mit der einfachen, bisher implementierten Steuerung kann der Batteriemrichter ein Inselnetz aufbauen und versorgen, nur wurden bisher noch nicht alle acht Submodule gleichzeitig angeschlossen. Der Steueralgorithmus funktioniert und schaltet die Submodule so, dass die SOCs gleichbleiben bzw. ausgeglichen werden.

Was im kommenden Projekt ansteht ist zum einen die Skalierung auf mehr Module in einem Strang, die Optimierung der Messung und Bestimmung der Batterieparameter sowie die Synchronisierung mit dem Netz. Dies alles sind lösbare Herausforderungen, da gezeigt werden konnte, dass das

Grundprinzip funktioniert. Die Bestimmung der Batterieparameter wird auf einem stochastischen Verfahren beruhen, dem sogenannten Particle Filter, welches weniger störungsanfällig und genauer ist als klassische Coulombzähler und neben dem SOC auch den SOH bestimmen kann. Weiterhin wird unser Kommunikationsbus weiterentwickelt, um die Submodule einfacher ansteuern zu können und die Parameterbestimmungen der verwendeten Batterien dezentral durchführen zu können. Dies entlastet die zentrale Steuerung und erlaubt eine größere Anzahl an Submodulen mit einem Prozessor gleicher Rechenleistung anzusteuern. Nicht zuletzt wird der dreiphasige Betrieb implementiert. Dabei versuchen wir auch einen Sicherheitsmechanismus zu entwickeln, der es erlaubt, den Umrichter sogar bei Ausfall eines ganzen Umrichterarmes weiter betreiben zu können. Zum anderen werden viele Messungen durchgeführt, die die außerordentlich hohe Effizienz des neuen Umrichters belegen sollen, die aber auch sein Störungsverhalten, seine EMV-Abstrahlungen und seine Fähigkeit, unterschiedliche Batterien zu managen untermauern sollen.

6 Fazit

Die Vorstudie untersucht eine neuartige Technologie, die verwandt ist zu den bisher eingesetzten (auf IGBTs und Speicherkondensatoren basierenden) Multilevel-Convertern für die Hoch- und Mittelspannungsebene, die verwendet werden um AC-Spannungen zu verändern (oder eine AC-DC-Konvertierung zu erreichen) und im bisher ausschließlich von PWM-basierten Umrichtern besetzten Feld für Batteriesysteme zur Anbindung von Batterien an DC-Spannungen eingesetzt werden soll.

Der neue Batterieumrichter vereint die Vorzüge beider Systeme oder übertrifft sie sogar. Gerade diese günstige Kombination nützlicher Eigenschaften, wie sie der vorgeschlagene Batterieumrichter aufweist, führt zu vielen einzelnen Vorteilen, deren Summe den bisherigen Systemen weit überlegen ist. Insbesondere sind hierbei nochmals die folgenden Eigenschaften zu nennen:

- Die Möglichkeit Ring- oder Sterntopologien von Umrichterarmen zur Anwendung zu bringen, die mit mehrphasigem oder einphasigem Wechselstrom oder sogar mit DC gespeist werden können.
- Die modulare Erweiterbarkeit der Multilevelstruktur, die auch einen einfachen Austausch defekter Module oder Batterien gestattet und dabei gleichzeitig zulässt, dass die eingesetzten Batteriemodule unterschiedliche Eigenschaften und Kapazitäten aufweisen.
- Die Möglichkeit auch viele Multilevelsysteme in einem gemeinsamen AC- oder DC-Bus zu parallelisieren.
- Der extrem geringe Platz- und Volumenbedarf der Leistungselektronik.
- Die hohe Flexibilität des Systems, die dadurch erreicht werden kann, dass sämtliche Konfigurationsänderungen rein softwarebasiert erfolgen können.
- Der extrem hohe Wirkungsgrad, der auch im Teillastbereich kaum abfällt und damit zu Energieeinsparungen führt.
- Die prinzipbedingt extrem hohen Leistungsreserven, die speziell dieses System von bisherigen Batterie-Umrichter-Kombinationen stark unterscheiden.
- Der wesentlich reduzierte Fertigungsaufwand im Vergleich zu bisherigen Systemen, da sämtliche Bauelemente als SMD-Bauteile ausgeführt sein können.
- Die hohe Ausfallsicherheit aufgrund der Redundanz

7 Quellenverzeichnis

1. Chang, F., Zheng, Z., Li, Y.: A novel hybrid energy storage topology and its control algorithm. In: 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe), pp. 1–9
2. Jason Deign: Storage Is Still Too Costly for Most of Europe—Except Islands. While storage struggles to compete on the European mainland, islands offer “huge potential.”, <http://www.greentechmedia.com/articles/read/storage-too-costly-for-the-mainland-grid-but-effective-for-islands>
3. Kenney, B., Darcovich, K., MacNeil, D.D., Davidson, I.J.: Modelling the impact of variations in electrode manufacturing on lithium-ion battery modules. *Journal of Power Sources* 213, 391–401 (2012)
4. T. Baumhöfer, M. Brühl, S. Rothgang, D. U. Sauer: Production Caused Variation in Capacity Aging Trend and Correlation to Initial Cell Performance (2014)
5. Santhanagopalan, S., White, R.E.: Quantifying Cell-to-Cell Variations in Lithium Ion Batteries. *International Journal of Electrochemistry* 2012, 1–10 (2012)
6. Schuster, S.F., Brand, M.J., Campestrini, C., Gleissenberger, M., Jossen, A.: Correlation between capacity and impedance of lithium-ion cells during calendar and cycle life. *Journal of Power Sources* 305, 191–199 (2016)
7. Donghwa Shin, Poncino, M., Macii, E., Naehyuck Chang: A Statistical Model-Based Cell-to-Cell Variability Management of Li-ion Battery Pack. *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.* 34, 252–265 (2015)
8. Goetz, S.M., Peterchev, A.V., Weyh, T.: Modular Multilevel Converter With Series and Parallel Module Connectivity: Topology and Control. *IEEE Trans. Power Electron.* 30, 203–215 (2015)
9. Lesnicar, A., Marquardt, R.: An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range. In: 2003 IEEE Bologna Power Tech, pp. 272–277
10. Ceglia, G., Guzman, V., Sanchez, C., Ibanez, F., Walter, J., Gimenez, M.I.: A New Simplified Multilevel Inverter Topology for DC–AC Conversion. *IEEE Trans. Power Electron.* 21, 1311–1319 (2006)
11. Chakraborty, S., Simões, M., Kramer, W.: *Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems: A Sourcebook of Topologies, Control and Integration*. Springer London, London (2013)
12. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: Technische Anschlussbedingungen TAB 2007. für den Anschluss an das Niederspannungsnetz, https://www.vde.com/de/fnn/dokumente/documents/tab_2007_bundesmusterwortlaut_juli2007.pdf
13. Karlsruher Institut für Technologie: Kurz-Checkliste für Li-Ionen-Heimspeicher, https://www.kit.edu/downloads/KIT_Li-Ionen_Checkliste.pdf
14. Karlsruher Institut für Technologie: Sicherheitsleitfaden Li-Ionen-Hausspeicher, https://www.competence-e.kit.edu/img/Sicherheitsleitfaden_Li-Ionen_Hausspeicher_11_2014.pdf
15. Forum Netztechnik / Netzbetrieb im VDE (FNN): Anschluss und Betrieb von Speichern am Niederspannungsnetz, https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/documents/fnn_th_speicher_2013-06.pdf

8 Anhänge

Vortrag zur IBESA Studie