

Prüfstand zur thermischen Charakterisierung von Batteriezellen und Validierung geplanter Kühlkonzepten

Gerhard Rizzo, Rouven Christen, Max Stöck

NTB Interstaatliche Hochschule für Technik
Werdenbergstrasse 4, CH-9471 Buchs
www.ntb.ch

Kurzzusammenfassung

Die Betriebstemperatur von Lithium-Ionen Batteriezellen hat einen massgebenden Einfluss auf deren Leistungsfähigkeit, Alterung und Zuverlässigkeit sowie auf die Betriebssicherheit der daraus aufgebauten Batteriesysteme. Je nach SOH, innerem Zellaufbau und anliegendem Lastprofil erwärmen sich die Zellen einer Batterie unterschiedlich stark. Zusätzlich hängt die Temperatur auch vom jeweiligen Kühlkonzept ab, welches eine möglichst homogene Temperaturverteilung gewährleisten sollte. Für den Entwickler von Batteriesystemen ist es somit von grossem Interesse sowohl das thermische Verhalten bzw. die thermischen Eigenschaften als auch lokale Wärmequellen einzelner Zellen zu kennen.

Die lokale Erwärmung einzelner Batteriezellen wird heutzutage meist mit Hilfe von Thermographie-Messungen ermittelt. Dazu wird die zu untersuchende Zelle in einem isothermen Versuchsraum aufgehängt und elektrisch belastet. Solche Messungen liefern hochauflösende Temperaturverteilungen, vernachlässigen allerdings, dass Zellen in realen Batteriesystemen grösstenteils sehr eng gepackt sind und in Fällen mit aktiver Kühlung, diese oftmals nur unsymmetrisch stattfindet.

Im Folgenden wird ein Prüfstand vorgestellt mit welchem der Einfluss lokaler Kühlzonen auf die Oberflächentemperatur- und Wärmestromverteilung der Zelle gemessen werden kann. Des Weiteren ist es möglich die thermischen Eigenschaften einzelner Batteriezellen zu ermitteln. Mit diesem Verfahren können die thermischen Randbedingungen gezielt beeinflusst und zeitgleich vermessen werden. Dazu werden auf der Zelloberfläche homogen verteilte Messstempel angebracht, mit welchen nicht nur Temperatur und Wärmestromdichte lokal gemessen, sondern diese über ein aktives Element auch individuell geregelt werden können. Hierdurch ist es möglich während des Betriebs gewisse Zonen der eingespannten Zelle auf konstanter Temperatur zu halten – d.h. zu kühlen – und synchron dazu den übertragenen Wärmestrom am jeweiligen Messpunkt zu erfassen. Die übrigen Bereiche der Zelle können auf einen festen Wärmestromdichtewert geregelt werden, womit eine durch den Einbau der Zelle bedingte thermische Isolierung simuliert wird.

Die Flexibilität der Messwerterfassung und die Möglichkeit beliebige Kühlvarianten im Betrieb nachzubilden zu können, bietet dem Entwickler die einzigartige Möglichkeit seine Konstruktionen auf die jeweils gewünschte Funktionalität hin zu verifizieren und Variationen des Kühlkonzepts unmittelbar regelungstechnisch – ohne zusätzliche apparative Änderungen – zu realisieren.

1. Einleitung

Lithium-Ionen Batterien gehören aktuell zu den vielversprechendsten kommerziell erhältlichen Batterietechnologien am Markt [1]. Sie weisen neben einer großen spezifischen Energie, eine hohe spezifische Leistung sowie einen ausgezeichneten Coulombschen Wirkungsgrad auf [2]. Zudem besitzen sie eine geringe Selbstentladung [3] und so gut wie keinen Memory Effekt [4]. In vielen Bereichen haben sich Lithium-Ionen Zellen gegenüber anderen Speichertechniken durchgesetzt. Leistungsfähige Notebooks und Mobiltelefone wären ohne Lithium-Ionen Batterien nicht denkbar und auch in der Elektromobilität können vernünftige Reichweiten nur mithilfe dieser Technologie realisiert werden.

Allerdings sind Lithium-Ionen Batterien in ihren Einsatzgrenzen etwas eingeschränkt. Sehr ausgeprägt ist beispielsweise ihre Temperaturempfindlichkeit, insbesondere bei tiefen Temperaturen. Aber auch zu hohe Betriebstemperaturen schaden den Zellen [5]. Betreibt man Lithium-Ionen Zellen ausserhalb des zulässigen Bereichs, oder für längere Zeit in unmittelbarer Nähe der Grenzwerte, so beschleunigen sich interne Alterungsprozesse, was unmittelbar zu einer reduzierten Lebensdauer und Zuverlässigkeit führt. Auch der Innenwiderstand einer Zelle erhöht sich durch diese Degradationsprozesse [6]. Damit einhergehend kommt es zu einer Herabsetzung der Betriebssicherheit des Gesamtsystems [7]. Es sind aber nicht nur die äusseren Bedingungen die negativen Einfluss auf die Zelle nehmen, auch der eigentliche Betrieb – d.h. die Strombelastung beim Laden und Entladen – führen zu einer Erwärmung aufgrund von Entropieänderungen und ohmschen Verlusten [8]. Unter bestimmten Bedingungen wird sogar ein endothermes Verhalten beobachtet [9].

Um diesen schädlichen Einflussgrößen entgegenwirken zu können, benötigt man in den meisten Fällen ein aktives Thermomanagementsystem. Dieses hat nicht nur die Aufgabe die intern erzeugte Wärme abzuführen, sondern auch dafür zu sorgen das Batteriesystem gegen äussere Einflüsse abzuschirmen. Dabei soll die Temperaturverteilung innerhalb des gesamten Batteriesystems möglichst gleichförmig sein. Unterschiedliche Temperaturen einzelner Zellen während des Betriebs – vermindert auch im Stillstand – führen zu einer ungleichen Alterung und somit zu unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften. Sind solche Zellen in einem Batteriesystem parallel geschaltet, kann dies schon bei einer Differenz von 20% des Innenwiderstandes zweier Zellen zu einer um etwa 40% schnelleren Alterung des Gesamtsystems führen [10].

Die Entwicklung eines adäquaten Thermomanagements setzt voraus, dass neben der Kenntnis der auftretenden Lastzyklen und der elektrischen Zelleigenschaften auch das thermische Verhalten aller verbauten Komponenten bekannt sein muss. Mit diesen Angaben können Wärmeerzeugung und Temperaturanstieg berechnet werden. Um zusätzlich die sich einstellende Temperaturverteilung im System zu bestimmen, muss man wissen wie und an welchen Stellen die Wärme die Zelle verlässt, und in welcher Art das Kühlsystem diese Wärme aufnimmt und abführt. Wärmeübertragung ist ein Wechselspiel zwischen Wärmeabgabe und Wärmeaufnahme. Die sich einstellende Temperatur ist das Ergebnis dieses Wärmeübergangsproblem [11]. Dabei ist zu beachten, dass der Wärmeübergang lokal auftritt und folglich auch örtlich aufgelöst bestimmt werden muss. Es wäre zwar möglich ein solches System analytisch bzw. durch Modellbildung und Simulation zu berechnen, der Aufwand wäre jedoch recht hoch. Insbesondere wird man in den meisten Fällen mit der Problematik konfrontiert, dass der komplizierte innere Aufbau einer Lithium-Ionen Zelle sowie die elektrochemisch-thermischen Kennwerte aller enthaltenen Teile unbekannt sind. Darüber hinaus müsste das Verhalten des Kühlsystems modelliert werden. In der Praxis kommt man deshalb in der Regel nicht umhin die Temperaturverteilung experimentell zu bestimmen.

Eine rationelle Möglichkeit die lokale Oberflächentemperatur grossflächig zu erfassen bietet die Thermographie-Messung. Dazu wird eine einzelne Lithium-Ionen Zelle oder ein entsprechendes Zellpaket in einem isothermen Versuchsraum platziert [12] oder befindet sich in unmittelbarer Laborumgebung [13], und das Temperaturfeld wird unter Last transient gemessen. Diese Methode weist allerdings eine wesentliche Schwäche auf: Wärme wird bei dieser Messmethode lediglich über die Anschlusskabel und durch freie Konvektion über die Zelloberflächen abgegeben bzw. aufgenommen. In einer Batterie sind die Zellen meist eng gepackt und über die Zellverbinder findet – aufgrund fehlender Temperaturdifferenz – kein Wärmeaustausch statt, wie in Abbildung 1 veranschaulicht. Hiervon ausgenommen sind die erste und letzte Zelle im Batteriemodul. Diese berühren grossflächig das Gehäuse und über die Anschlusskabel kann je nach Temperaturgradient zusätzlich Wärme übertragen werden.

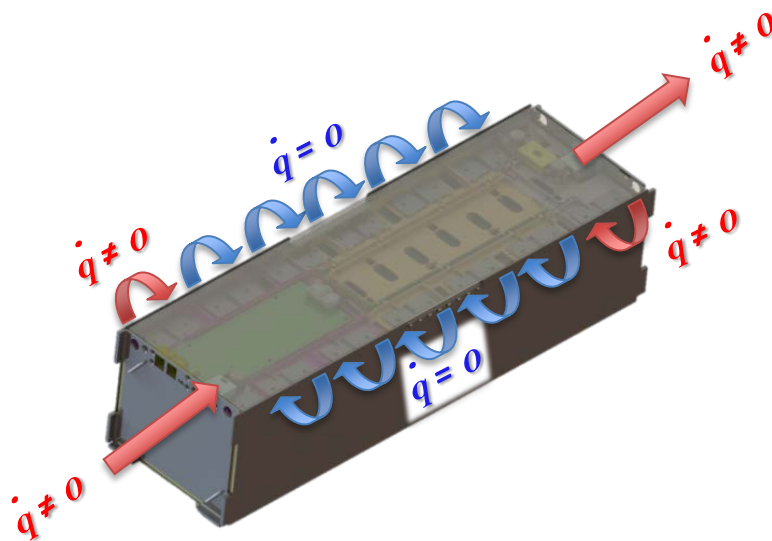


Abbildung 1: Wärmeströme in einem Modul eines Batteriepakets

In Batteriesystemen mit aktiven Kühllösungen treten noch weitere Wärmeflüsse – insbesondere in Richtung des Kühlmittels – auf. Dasselbe gilt auch für passive PCM-Wärmespeicher [14] und bei Wärmeverteilkonzepten mittels Wärmeleitplatten [15]. Je nach Konstruktion können sehr unsymmetrische Temperaturfelder verursacht werden. Eine andere Methode das thermische Verhalten eines Batteriesystems zu bestimmen, ist die kalorimetrische Messung. Dabei wird eine Lithium-Ionen Zelle zwischen temperierte Platten gespannt und mittels mehrerer lokal verteilter Temperatursensoren die Oberflächentemperatur gemessen [16]. Diese Methode bildet zwar eine allseitig grossflächige Kühlung recht gut nach, die übertragene Wärmemenge wird allerdings – wenn überhaupt – nur global erfasst [17]. Um die Verhältnisse der ersten und letzten Zelle eines Batteriepacks abzubilden, regelten Troxler et. al. [18] die linke und rechte Platte ihres Versuchsaufbau auf unterschiedliche Temperaturen. Es stellte sich ein gerichteter Temperaturverlauf innerhalb der eingespannten Zelle ein, welcher senkrecht zu den aktiven Schichten verläuft. Alle bisher veröffentlichten Versuchseinrichtungen erfassen jeweils nur Teilaspekte der tatsächlichen Verhältnisse im Batteriepaket. Sie bildeten zudem die realen Zustände meist nur unzureichend ab. Um ein neues Kühllkonzept zu validieren, kommt man bislang nicht umhin eine entsprechende Messeinrichtung zu konstruieren und aufzubauen.

Ein idealer Messaufbau sollte jedoch gewährleisten, dass die Einbauverhältnisse möglichst realitätsnahe nachgebildet werden. Dazu müsste es möglich sein, den übertragenen Wärmestrom

für bestimmte Zonen einer Lithium-Ionen Zelle aktiv zu regeln. In den Bereichen in denen kein Wärmeübergang stattfindet, wird der Wärmestrom auf null gehalten und in Zonen, in denen gekühlt werden soll, wird die Wärmestromdichte so geregelt, dass sich eine konstante Oberflächentemperatur einstellt. Idealerweise sollte sich die übertragene Wärmemenge auf möglichst kleinen Flächen individuell einstellen lassen, um eine sinnhafte Aussagefähigkeit zu erreichen. Zeitgleich muss die Oberflächentemperatur an der jeweiligen Stelle gemessen werden. Zudem sollte eine adäquate Versuchseinrichtung auch die über die Anschlusskabel fließenden Wärme erfassen und aktiv regeln können. Auf diese Weise wäre es möglich, schon in der Designphase Konstruktionslösungen auf ihre Wirksamkeit hin zu beurteilen, bevor ein erster Prototyp aufgebaut wird. Dies immer mit dem Ziel durch ein entsprechend gestaltetes Kühlsystem eine möglichst homogene Temperaturverteilung über die Zelle zu realisieren.

2. Versuchsaufbau

Die Messaufgabe eine örtliche Temperaturverteilung zu erfassen und zeitgleich den lokalen Wärmestrom zu regeln wird durch einzelne Messstempel realisiert. Diese werden in einer orthogonalen Matrix um die Zelle angeordnet, so dass – bis auf die Seite der Anschlusspole – die gesamte Zelloberfläche abgedeckt wird. In Abbildung 2 ist die untere Hälfte der Messeinrichtung zu sehen, in welche die zu vermessende Zelle eingelegt wird. Im vorliegenden Fall eine prismatische Lithium-Ionen Zelle mit den Aussenabmessungen 173 mm x 125 mm x 40 mm.

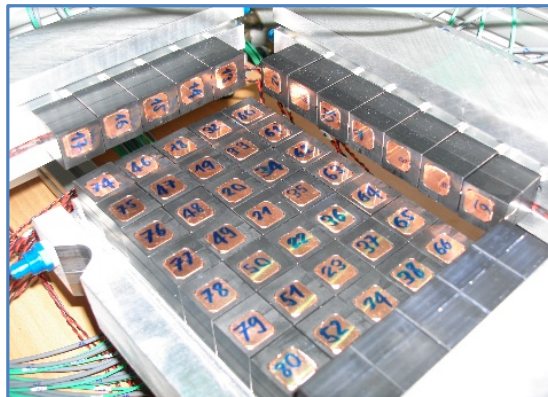


Abbildung 2: Untere Hälfte der Messeinrichtung – Messstempel rechtwinklig angeordnet

Die Messstempel sind identisch aufgebaut und haben jeweils eine aktive Messfläche von 15 x 15 mm². Die Aussenmasse eines Stempels beträgt 20 mm x 20 mm. Um die beiden Größen Temperatur und Wärmestrom aktiv regeln zu können, müssen diese zunächst erfasst werden. Die Temperaturmessung erfolgte mit Hilfe eines Thermoelements. Dieses ragt in ein 3 mm starkes Kupferplättchen, welches durch eine definierte Kraft auf die Zelloberfläche gedrückt wird, siehe Abbildung 3.

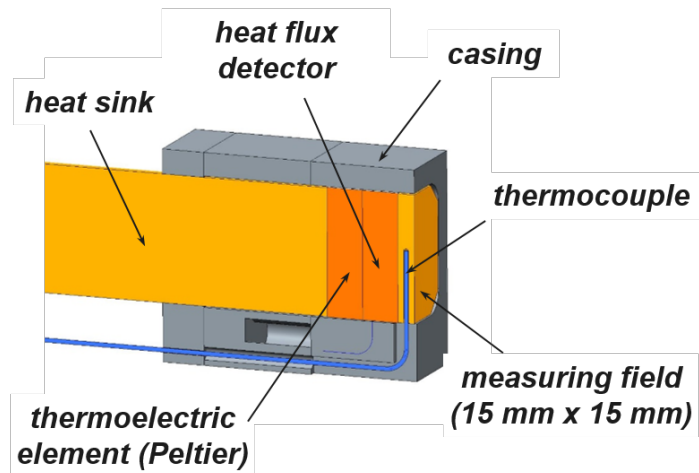


Abbildung 3: Aufbau eines Messstempels

Zur Messung des aktuellen Wärmestroms kommt ein thermoelektrischer Generator zum Einsatz. Dieser liefert ein der übertragenen Wärmestromdichte proportionales Signal. Die Wärmestromsensoren befinden sich im Messstempel unmittelbar nach dem Kupferplättchen der Temperaturmessung. Zur aktiven Beeinflussung des Wärmestroms wird ein Peltier-Element eingesetzt. Dieses ist im Messstempel direkt an den Wärmestromsensor gekoppelt und wird über eine Leistungselektronik analog angesteuert. Mit diesen drei Bauteilen und einer entsprechenden Regelung kann entweder die Oberflächentemperatur, oder die übertragene Wärmestromdichte an der jeweiligen Stelle auf einen konstanten Wert geregelt werden. Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass zur Abfuhr der Wärme – sei es von der Batterie oder dem Peltier-Element – eine Wärmesenke in Form eines wassergekühlten Aluminium-Blocks dient. In Abbildung 4 ist der komplette Versuchsaufbau zu sehen.

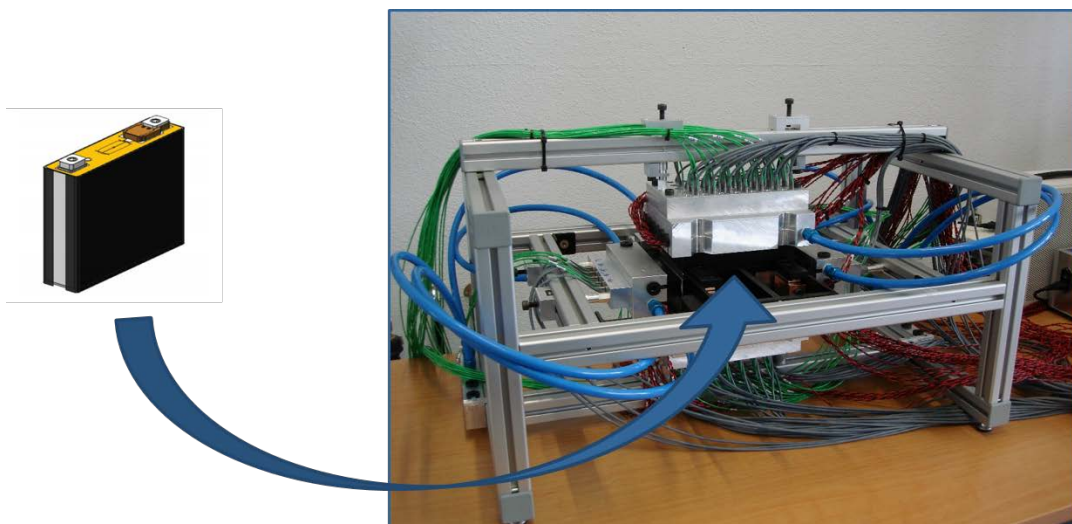


Abbildung 4: Kompletter Prüfstand zur thermischen Vermessung von Lithium-Ionen Zellen

Die Datenerfassung erfolgt mit Hilfe eines PXIe System von National Instruments. Über mehrere Messkarten zur Temperatur- und Spannungsmessung werden die verschiedenen Sensorsignale der insgesamt 87 Messstempel erfasst. Die Ansteuerung der Peltier-Elemente erfolgt über Digital-Output Karten sowie einer nachgeschalteten Leistungsverstärkung. Um die Zelle im belasteten Betrieb zu vermessen kann die Lithium-Ionen Zelle mit Ladeströmen von bis zu 220 A und Entladeströmen von bis zu 400 A beaufschlagt werden. Hierfür stehen eine Spannungsquelle von Delta Elektronik und eine elektrische Last von Höcherl & Hackl zur Verfügung. Die gesamte Ansteuerung des Prüfstands, wie auch die diversen Regelkreise sind in LabView implementiert und können über einen Personal Computer bedient werden.

3. Ergebnisse und Diskussion

Für die Entwicklung eines adäquaten Thermomanagementsystem müssen wie bereits erwähnt die zu erwartenden Lastzyklen, die elektrischen Zelleigenschaften sowie das thermische Verhalten aller verbauten Komponenten bekannt sein. Zusätzlich muss man wissen, wie und an welchen Stellen die dissipierte Wärme die Zelle verlässt. Um die letztgenannte Frage beantworten zu können, wurde eine prismatische 60 Ah Lithium-Ionen Zelle mit 2C Lade- bzw. Entladestrom zyklisch belastet und die Oberflächentemperatur auf 25 °C konstant geregelt. Die Umschaltung von Lade- auf Entladevorgang und umgekehrt, erfolgte jeweils bei der unteren und oberen Zellgrenzspannung. Insgesamt wurden 4½ Zyklen gefahren. Die sich im Gleichgewichtszustand einstellende Wärmestromdichteverteilung ist in Abbildung 5 zu sehen. Da die Erfassung der Wärmeströme, die über die Messleitungen fließen, noch nicht in den aktuellen Versuchsaufbau integriert ist, sind in Abbildung 5 noch keine Wärmestromdichtepfeile an den Polen eingezeichnet.

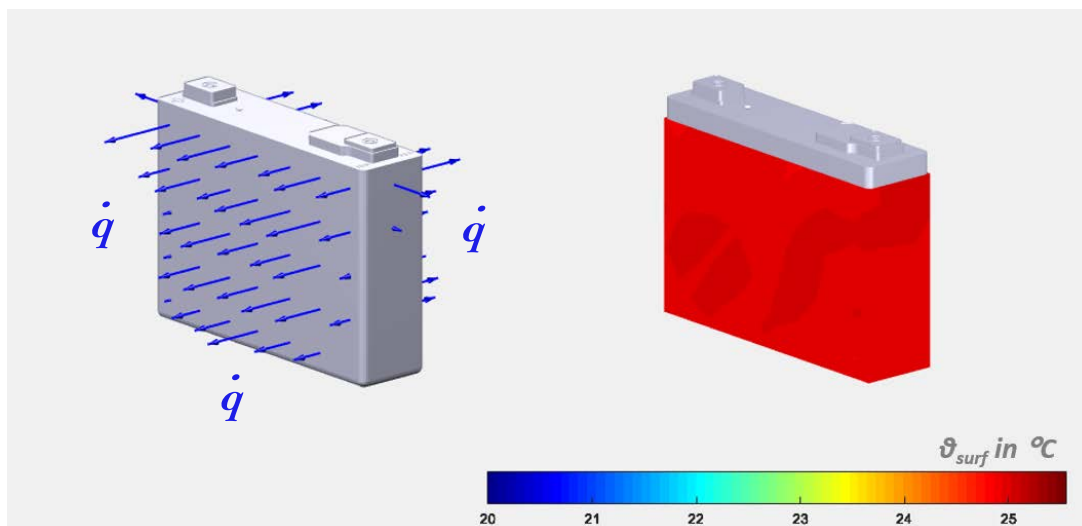


Abbildung 5: Wärmestromdichteverteilung im stationären Zustand bei konstanter Oberflächentemperatur

Bei dieser thermischen Zellcharakterisierung ist sehr deutlich zu erkennen, dass die wesentliche Wärmeabgabe über die beiden grossen Seitenflächen erfolgt. Am Boden und an den schmalen Stirnflächen findet nur wenig Wärmeübergang statt. Besonders auffällig sind allerdings die hohen Werte in der Nähe der Pole, insbesondere im oberen Bereich der schmalen Stirnflächen. Hierfür

gibt es eine kausale Erklärung: Wärme fließt begünstigt entlang des Pfades mit geringstem Wärmewiderstand. Wenn also Wärme bevorzugt an den Polen abgegeben wird, muss der Weg vom Ort der Wärmeentstehung zu den Polen einen niedrigen thermischen Gesamtwiderstand aufweisen. Da eine gute elektrische Leitfähigkeit auch immer eine hohe Wärmeleitfähigkeit mit sich bringt, ist nachvollziehbar, dass ein Grossteil der dissipierten Wärme entlang des elektrischen Strompfades abgeleitet wird. Interessanterweise findet trotz schlechterer Wärmeleitfähigkeit senkrecht zu den aktiven Schichten [19] die grösste Wärmeübertragung genau in diese Richtung – also über die grossen Seitenflächen – statt.

Eine optimierte Kühlung müsste demzufolge auf den beiden grossen Seitenflächen Wärme abführen. In Abbildung 6 ist ein solches Kühlkonzept umgesetzt. Sehr deutlich ist die daraus resultierende gleichmässige Oberflächentemperaturverteilung im linken Bild zu erkennen.

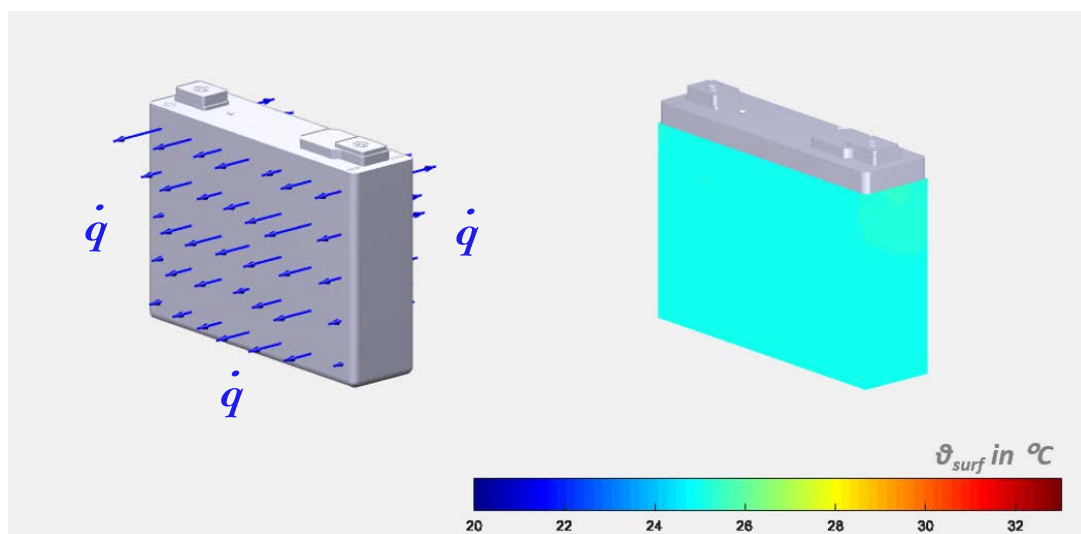


Abbildung 6: Kühlkonzept - Wärmeabfuhr über die beiden grossen Seitenflächen

Zum Vergleich soll eine in der Praxis übliche Kühllösung gegenübergestellt werden. Kühlt man die o.g. Lithium-Ionen Zelle ausschliesslich von unten, wie in Abbildung 7 zu sehen, so sind sehr deutlich die nicht unerheblichen Temperaturgradienten von den Polen zum Zellboden hin zu erkennen.

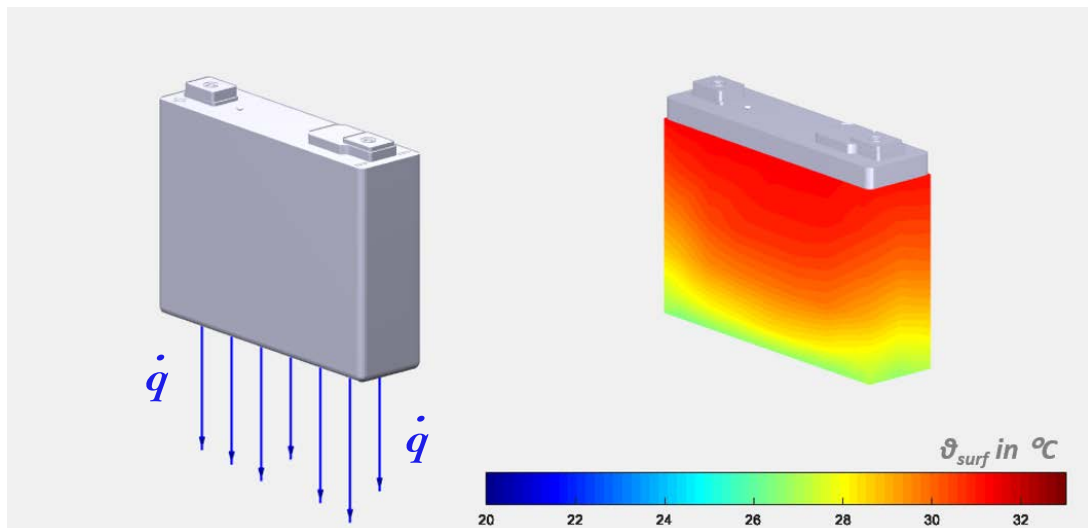


Abbildung 7: Temperaturverteilung bei Kühlung am Zellboden

Die Wärmeentstehung findet zwar – wie auch bei den anderen Kühlvarianten – über das Volumen der aktiven Schichten verteilt statt. Da die Kühlung jedoch nur auf einer Seite erfolgt, muss die gesamte Wärmemenge dorthin fließen. Dieser Umstand führt dazu, dass sich an den Zellanschlüssen die höchste Temperatur einstellt und diese nach unten zum Boden hin abnimmt.

4. Ausblick

Die vorgestellte Messapparatur ermöglicht Untersuchungen an Einzelzellen unter realitätsnahen thermischen Bedingungen, wie sie in existierenden Batteriesystem auftreten. Es können beliebige Kühlvarianten im Betrieb nachgebildet werden. Auf diese Weise hat der Entwickler die Möglichkeit seine Konstruktionen auf versuchstechnischem Wege zu verifizieren. Variationen des Kühlkonzepts können unmittelbar regelungstechnisch – ohne zusätzliche apparative Änderungen – umgesetzt werden.

Der neue Prüfstand ermöglicht aber auch Lithium-Ionen Zellen thermisch zu charakterisieren, ohne ihren detaillierten inneren Aufbau zu kennen. Die Stoffwerte der inneren Schichten müssen bei diesem Verfahren nicht bekannt sein. Die Zelle wird als Black-Box betrachtet und das Oberflächentemperaturfeld wird unter verschiedenen Belastungen und Kühlvarianten vermessen. Daraus kann ein Ersatzmodell abgeleitet werden, welches das thermische Zellverhalten nachbildet.

Mit Hilfe dieses Ersatzmodells ist es möglich verschiedene Ausführungen eines Thermomanagementsystems zunächst auf Modulebene zu simulieren, bevor ein erster Prototyp gebaut wird. Eine zusätzliche experimentelle Validierung der finalen Konstruktion erlaubt weitere Verbesserungen des Modells. In einem letzten Schritt kann das thermische Verhalten eines geplanten Batteriepakets – aufgebaut aus einzelnen Modulen – per Simulation beurteilt werden. Die beschriebene Methodik wird in Abbildung 8 nochmals sinnbildlich veranschaulicht.

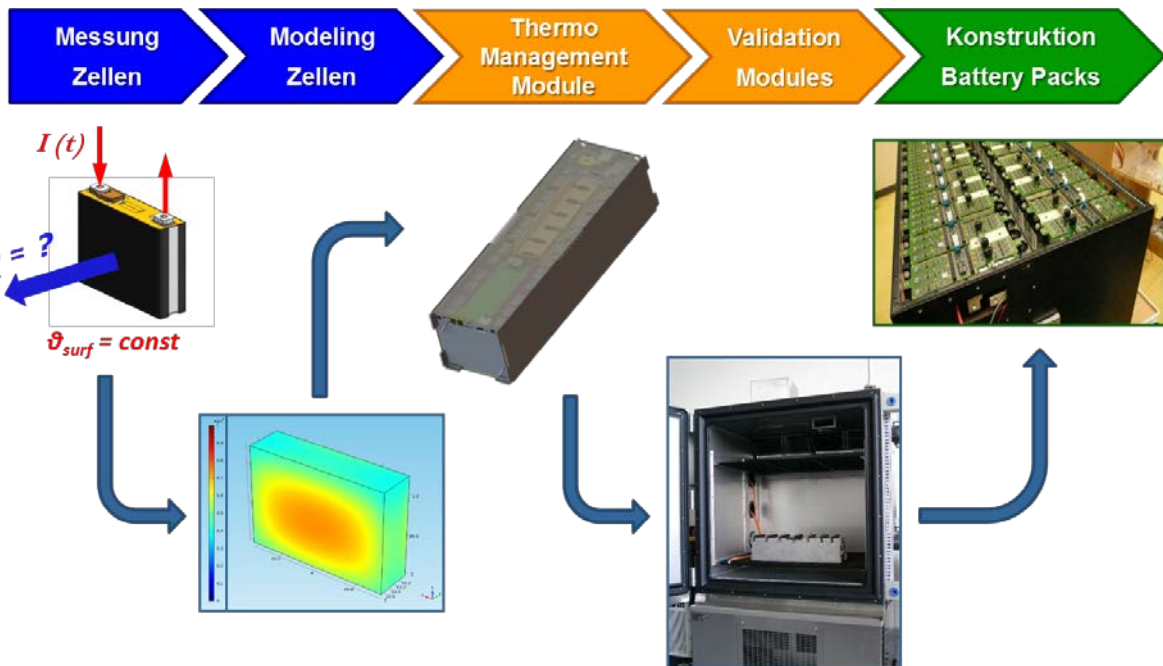


Abbildung 8: Methodik zur Modellierung, Validierung und Konstruktion eines Lithium-Ionen Batteriepakets

Literaturverzeichnis

- [1] R. van Noorden, „A Better Battery - Chemists are reinventing rechargeable cells to drive down costs and boost capacity,“ *Nature*, Bd. 507, pp. 26-28, 2014.
- [2] R. Kohlrausch, *Handbuch Lithium-Ionen Batterien*, Berlin Heidelberg: Springer, 2013.
- [3] T. B. Reddy, *Linden's Handbook of Batteries*, 4th Edition, New York: McGraw-Hill, 2010.
- [4] T. Sasaki, Y. Ukyo und P. Novák, „Memory effect in a lithium-ion battery,“ *Nature Materials*, Bd. 12, pp. 569-575, 2013.
- [5] T. Waldmann, M. Wilka, M. Kasper, M. Fleischhammer und M. Wohlfahrt-Mehrens, „Temperature dependent ageing mechanisms in Lithium-ion batteries - A Post-Mortem study,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 262, p. 129e135, 2014.
- [6] I. Bloom, S. A. Jones, E. G. Polzin, V. S. Battaglia, G. L. Henriksen, C. G. Motloch, R. B. Wright, R. G. Jungst, H. L. Case und D. H. Doughty, „Mechanisms of impedance rise in high-power, lithium-ion cells,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 111, p. 152-159, 2002.
- [7] D. Andrea, *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*, Norwood: Artech House, 2010.
- [8] D. Bernardi, E. Pawlikowski und J. Newman, „A general energy balance for battery systems,“ *Journal of Electrochemical Society*, Bd. 132, Nr. 1, pp. 5-12, 1985.

- [9] K. Chen, G. Unsworth und X. Li, „Measurements of heat generation in prismatic Li-ion batteries,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 261, pp. 28-37, 2014.
- [10] R. Gogoana, M. B. Pinson, M. Z. Bazant und S. E. Sarma, „Internal resistance matching for parallel-connected lithium-ion cells and impacts on battery pack cycle life,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 252, pp. 8-13, 2014.
- [11] H. D. Baehr und K. Stephan, Wärme- und Stoffübertragung, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [12] C. Veth, D. Dragicevic und C. Merten, „Thermal characterizations of a large-format lithium ion cell focused on high current discharges,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 267, pp. 760-769, 2014.
- [13] C. Lin, S. Xu, Z. Li, B. Li, G. Chang und J. Liu, „Thermal analysis of large-capacity LiFePO₄ power batteries for electric vehicles,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 294, p. 633-642, 2015.
- [14] Z. G. Qu, W. Q. Li und W. Q. Tao, „Numerical model of the passive thermal management system for high-power lithium ion battery by using porous metal foam saturated with phase change material,“ *Int. Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 39, pp. 3904-3913, 2014.
- [15] K. Hussam, N. John, C. Marcello, G. Yann, W. Ryn, T. Jonathan, S. Martin und N. Julian, „Analysis of heat-spreading thermal management solutions for lithium-ion batteries,“ *Proceeding of International Engineering Congress & Exposition - IMECE2011 - Denver*, Bd. 63662, pp. 421-427, 2011.
- [16] M. Xiao und S.-Y. Choe, „Theoretical and experimental analysis of heat generations of a pouch type LiMn₂O₄/carbon high power Li-polymer battery,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 241, pp. 46-55, 2013.
- [17] S. Drake, M. Martin, D. Wetz, J. Ostanek, S. Miller, S. Heinzl und A. Jain, „Heat generation rate measurement in a Li-ion cell at large C-rates through temperature and heat flux measurements,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 285, pp. 266-273, 2015.
- [18] Y. Troxler, B. Wu, M. Marinescu, V. Yufit, Y. Patel, A. J. Marquis, N. P. Brandon und G. J. Offer, „The effect of thermal gradients on the performance of lithium-ion batteries,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 247, pp. 1018-1025, 2014.
- [19] H. Maleki, S. Hallaj, R. J. Selman, R. B. Dinwiddle und H. Wang, „Thermal Properties of lithium-ion battery and components,“ *Journal of the Electrochemical Society*, Bd. 146, p. 1999, 947-954.