

# CFD-basierte Optimierung der Kühlleistung eines Li-Ionen-Batteriemoduls

Marc S. Schneider, Daniel Grimmeisen

CASCATE GmbH, Stuttgart

## Zusammenfassung

Im Folgenden wird ein Prozess zur Optimierung der Kühlung eines Batteriemoduls beschrieben. Das Modell der Batteriezellen wurde in Simcenter Battery Design Studio erstellt. Die Simulation des Batteriemodells mitsamt Wärmeübergang in den Kühlkanal erfolgte in Simcenter STAR-CCM+. Für eine Sensitivitätsanalyse und die Optimierung der geometrischen Abmessungen des Kühlkanals wurde Simcenter HEEDS eingesetzt.

## Stichwörter:

Li-Ionen-Akku, Batterie, Kühlung, Designstudie, Battery Design Studio, STAR-CCM+, HEEDS

## 1 Einführung

Der rasche Aufschwung der Elektromobilität erfordert, dass die Industrie innovative Konzepte und eine schnelle Weiterentwicklung bestehender Energiespeicherkonzepte bereitstellt. Zur Energiespeicherung werden vornehmlich Lithium-Ionen-Akkus genutzt. Die Lebensdauer solcher Akkus hängt neben der Lade- und Entladetiefe auch von der Betriebstemperatur ab. Deshalb ist es unabdingbar, diese Akkus in ein Thermomanagement-System einzubetten. Numerische Designstudien können dazu beitragen, die Entwicklung von Batteriemodulen zu beschleunigen und die Anzahl teurer Prototypen und Versuche zu reduzieren.

## 2 Physikalische Beschreibung des Modells

Diese Arbeit analysiert den Anwendungsfall eines einzelnen Batteriemoduls im Kontext eines Thermomanagement-Systems. Abb. 1 stellt das Modell dar.

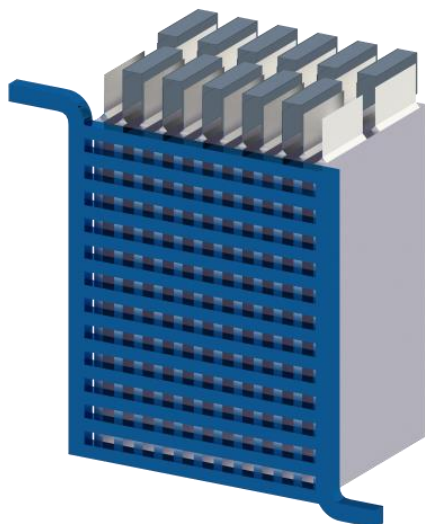
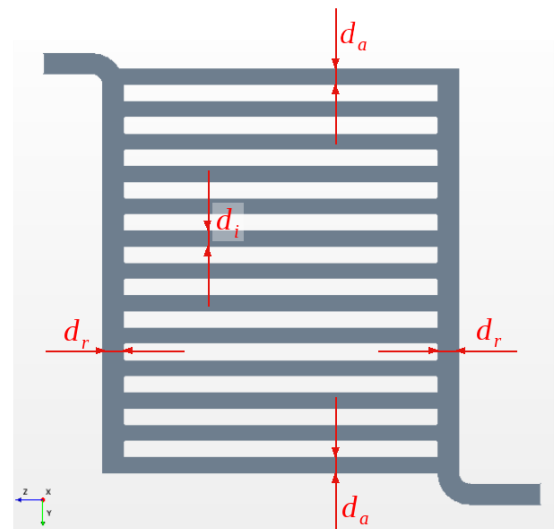


Abbildung 1:  
CAD-Modell des  
Setups beste-  
hend aus zwölf  
Batteriezellen  
und einem Kühl-  
kanal

Abbildung 2: Der  
Kühlkörper mit  
einigen wichtigen  
Maßen



Das Batteriemodul setzt sich aus zwölf baugleichen Batteriezellen in Pouch-Bauweise zusammen, welche in Reihe geschaltet sind. Die Eigenschaften jeder einzelnen Zelle sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Zellen sind in Reihe zu einem Modul zusammengeschaltet. Ein Abstand von 5 mm zwischen den Batteriezellen sorgt dafür, dass Änderungen der Batteriedicken infolge von Belastung und Alterung ausgeglichen werden können.

Abmaße	153 mm x 90 mm x 4,375 mm
Kapazität	10,03 Ah
Energie	36,7 Wh
Zellspannung	3,66 V
Kathodenmaterial	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid
Anodenmaterial	Synthetisches Graphit (SLP50)

Tabelle 1: Spezifikation der Batteriezellen

Die Kühlung des Moduls ist notwendig, weil hohe Temperaturen im Batteriemodul Zellalterung begünstigen und somit die Lebensdauer des Packs verringern würden. Der Kühlkanal (siehe Abb. 1 und 2) hat einen rechteckigen Querschnitt und wird von Wasser durchströmt. Das Batteriemodul wird mit einem Entladestrom von 40 A beaufschlagt. Das Modul hat eine Kapazität von etwa 10 Ah. Der Lastfall sieht eine Entladung von 100 % auf 50 % vor.

### 3 Numerische Behandlung

Zur Auslegung der Batteriezellen werden zwei Modelle aus Simcenter Battery Design Studio genutzt. Das *General Electrolyte Model* ermittelt den diffusiven Ionentransfer im Elektrolyt. Dieser bestimmt sich über eine Form der Arrhenius-Gleichung und ist somit temperaturabhängig. Das *Newman Tiedemann Gu Peukert Model* stellt den Zusammenhang zwischen elektrischer Last und thermischer Antwort her [1]. Hierzu wird die Batterie als Reihenschaltung aus Spannungsquelle und Widerstand betrachtet. Das Zell-Modell aus *Simcenter Battery Design Studio* wird anschließend in Simcenter STAR-CCM+ eingebunden.

Simcenter STAR-CCM+ [2] simuliert die Strömung und den Wärmetransport im Kühlkanal unter Berücksichtigung des Wärmestroms, der von den Batteriezellen abgegeben wird. Dafür wird ein Rechengitter aus ca. 75.000 Polyederzellen mit Prismenschichten verwendet. Die Strömung wird laminar angenommen und alle Wände außer der zwischen Batteriezellen und Kanal sind adiabatisch. Da nur die relativ langsam stattfindende Wärmeübertragung im Detail zeitlich aufgelöst werden muss, wird ein Zeitschritt von 2 Sekunden verwendet.

### 4 Sensitivitätsanalyse mit teilfaktorieller DOE

Die Sensitivitätsanalyse und die nachfolgende Optimierung wurden in Simcenter HEEDS durchgeführt. Zunächst wird in einer Sensitivitätsanalyse geklärt, welche Design-Parameter signifikanten Einfluss auf die Zielgrößen haben. Dabei kommen die folgenden Parameter in Frage (vgl. Abb. 2), wobei zuletzt jeweils der Buchstabe angegeben ist, unter dem der jeweilige Parameter in Abb. 3 zu finden ist:

- Die Breite der äußeren Kühlkanäle (der erste und der letzte),  $d_a$ , A
- Die Breite der inneren Kühlkanäle (alle anderen),  $d_i$ , B
- Die Breite der Rand-Kanäle (seitliche Begrenzung des Kühlkörpers),  $d_r$ , C
- Die Höhe der Kanäle,  $h$ , D
- Der Massenstrom am Einlass,  $\dot{m}$ , E
- Die Anzahl der Kühlkanäle,  $n$ , F

Die Zielgrößen sind:

- Die maximale Temperatur im Batteriemodul,  $T_{max}$ ,
- Der Temperaturunterschied zwischen der Durchschnittstemperatur der Batteriezelle mit der höchsten und der mit der niedrigsten Temperatur („maximaler Temperaturunterschied“),  $\Delta T_{avg}$
- Der Druckverlust zwischen Kühlwassereinlass und -auslass,  $\Delta p$

Die ersten beiden (temperaturbezogenen) Zielgrößen haben Auswirkung auf die Performance und die Lebensdauer des Batteriemoduls und sollten daher höhere Priorität bekommen als der Druckverlust, der nur Auswirkungen auf die Gestaltung des Kühlsystems hat.

Zur systematischen Untersuchung der Sensitivitäten der genannten Zielgrößen gegenüber den Parametern soll eine Design-of-Experiments-Studie (DOE) herangezogen werden. Eine vollfaktorielle DOE mit sechs Parametern und zwei Levels pro Parameter würde  $2^6 = 64$  Simulationen erfordern. Um die Rechenzeit zu reduzieren, wurde aber nur eine teilfaktorielle DOE (Teilfaktorplan) mit  $2^{6-2} = 2^4 = 16$  Simulationen gewählt. Das entspricht der Auflösungsklasse (Resolution) von 4. Dies bedeutet, dass die Haupteffekte (Effekte der einzelnen Parameter für sich allein betrachtet) unabhängig voneinander und unabhängig von allen Zwei-Faktor-Interaktionen sind. Allerdings sind die Haupteffekte mit Drei-Faktor-Interaktionen sowie auch alle Zwei-Faktor-Interaktionen gegenseitig miteinander vermengt, d.h. nicht unterscheidbar.

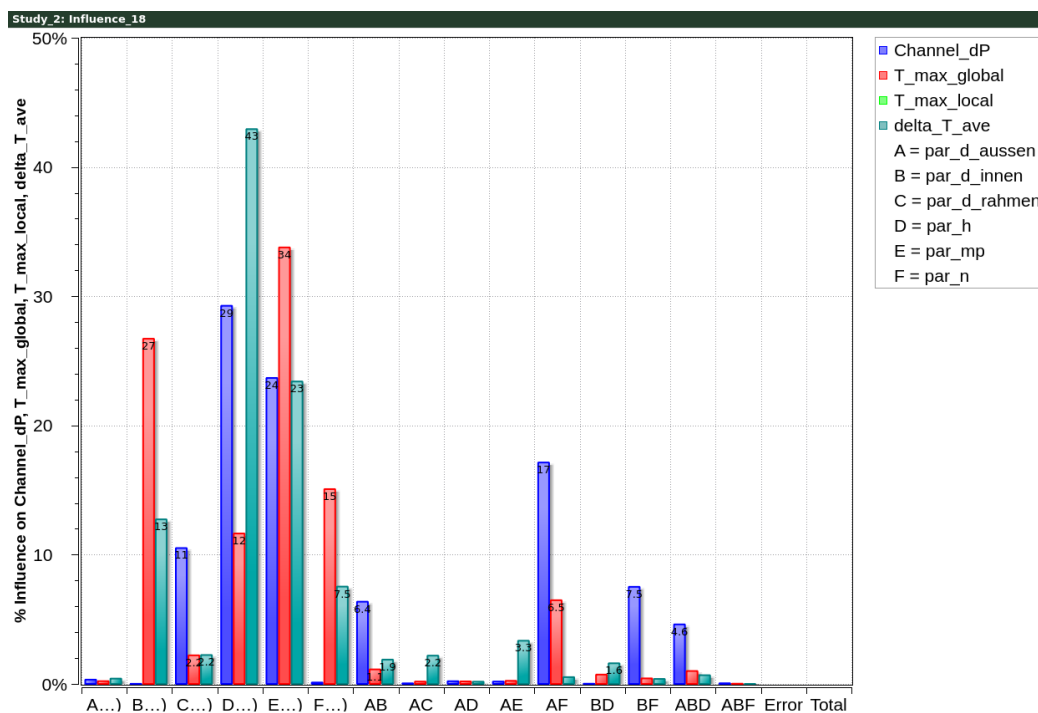


Abbildung 3 Einflüsse der 6 Parameter A bis F und einiger Mehrfaktor-Kombinationen auf die drei Zielgrößen aus teilfaktorieller DOE-Studie

Aus Abbildung 3 ist zu entnehmen, dass der Parameter A (Breite der äußeren Kühlkanäle) einen vernachlässigbaren Einfluss auf alle Zielgrößen hat. Außerdem hat Parameter C (Breite der Rand-Kanäle) auf die Temperatur-Zielgrößen vernachlässigbaren und auf den Druckverlust nur geringen Einfluss. Die anderen Parameter haben signifikanten Einfluss auf eine oder mehrere Zielgrößen. Bei den Zwei-Faktor-Interaktionen sind nur in Bezug auf den Druckverlust größere Auswirkungen erkennbar.

## 5 Optimierungstudie

Basierend aus den Erkenntnissen aus der Sensitivitätsanalyse werden nur die Parameter B, C, E und F für die Optimierungstudie genutzt. Die Reduktion von sechs auf vier Parameter bedeutet eine Verkleinerung des Designraums um zwei Dimensionen und macht es einfacher, mit einer überschaubaren Anzahl an Simulationen zu einem zufriedenstellenden Optimum zu gelangen. Die Optimierung erfolgte in Simcenter HEEDS mit dem SHERPA-Algorithmus [4], der sowohl lokale als auch globale Suche mit gradientenbasierten und stochastischen Verfahren kombiniert.

Die maximalen, minimalen und Baseline-Werte für die Parameter sind in Tabelle 2 angegeben. Die Zielgrößen der Optimierung sind wie in Abschnitt 4 beschrieben, wobei die Werte jeweils mit dem Wert aus der Baseline-Simulation normiert werden. Alle Zielgrößen sollen minimiert werden. In die Performance-Funktion gehen die beiden Temperaturen als quadratischer Faktor mit einem Gewicht von 1 ein, während der Druckverlust linear, dafür aber mit Gewicht 2 berücksichtigt wird.

Unter diesen Voraussetzungen hat die Performance-Funktion in HEEDS ein negatives Vorzeichen, und das Optimum ist das Design, das zur größten (d.h. am wenigsten negativen) Performance führt.

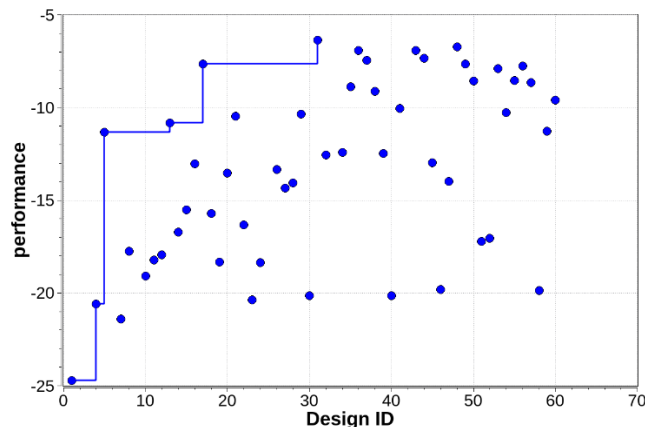


Abbildung 4: Die einzelnen Designs und ihre Performance

Dem Optimierer wurden 60 Simulationen erlaubt. Eine Übersicht über die Performance der einzelnen Simulationen zeigt Abbildung 4. Dort steht jeder Punkt für eine Simulation der Optimierungsstudie. Die horizontale Achse gibt die fortlaufende Nummer des Designs an. Die vertikale Achse zeigt die Performance (Optimum = größter (am wenigsten negativer) Wert). Die Linien verbinden das Baseline-Design links unten mit den nachfolgenden besten Designs. Das insgesamt beste Design der Studie ist Nummer 31. Danach wurden noch einige weitere Designs mit nur minimal schlechterer Performance gefunden. Die Parameter des optimalen Designs sind ebenfalls in Tabelle 2 aufgelistet. Es fällt auf, dass die Parameter für das Optimum am Rand der Wertebereiche liegen. Dies deutet darauf hin, dass durch weiter gefasste Wertebereiche ein noch besseres Design gefunden werden könnte. Allerdings sind die geometrischen Parameter durch geometrische Randbedingungen begrenzt, sodass eine Variation über die angegebenen Grenzwerte hinaus bei den meisten Parametern nicht möglich ist.

	$d_i$ [mm]	$h$ [mm]	$\dot{m}$ [kg/s]	$n$	$T_{max}$ [°C]	$\Delta T_{avg}$ [K]	$\Delta p$ [Pa]
Minimum	3	3	0.5	6			
Maximum	9	11	2.5	14			
Auflösung	13	9	9	9			
Baseline	6	7	1.5	11	51,78	3,79	3,58
Optimum	9	11	0.5	14	51,46	1,89	0,33

Tabelle 2: Wertebereiche der Parameter und Werte der Zielgrößen (für Baseline und Optimum)

## 6 Fazit

Für das Batteriemodul wurde ein Modell für CFD-Simulationen mit Simulation des Batterieverhaltens und Wärmeübertragung zum Kühlkanal aufgebaut. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurden die relevanten Einflussfaktoren bestimmt, und im Laufe der Optimierung wurde durch Variation dieser Werte ein neues Design gefunden, welches in allen Zielgrößen bessere Werte aufweist als das Ausgangs-Design.

## 7 Referenzen

- [1] Newman, J. und Tiedemann, W., "Potential and Current Distribution in Electrochemical Cells: Interpretation of the Half-Cell Voltage Measurements as a Function of Reference-Electrode Location," *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 104, No. 7, (July 1993): 1961–1968
- [2] Siemens PLM Software: *User Guide STAR-CCM+ v2019.3*
- [3] Ferziger, J.H. und Perić, M: *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3rd rev. ed., Springer Verlag, 2002
- [4] Red Cedar Technology: *SHERPA – An Efficient and Robust Optimization/Search Algorithm*, available online: <http://www.redcedartech.com/pdfs/SHERPA.pdf>