



Thermomanagement in Elektrofahrzeugen

11

Heiner Hans Heimes, Achim Kampker, Christian Offermanns,
Mario Kehrer, Francesco Maltoni und Hendrik Löbbberding

Das Thermomanagement muss sich einer Vielzahl von Anforderungen stellen, um sowohl den Komfort für Passagiere gewährleisten zu können als auch die maximale Sicherheit bei der Reichweitenoptimierung zu erzielen. Daraus entstehende Herausforderungen im Energie- und Thermomanagement von Elektrofahrzeugen gilt es mit interdisziplinären Thermomanagementsystemen zu lösen. Es geht dabei nicht nur um die Gewährleistung thermischer Behaglichkeit im Innenraum wie im Verbrennungskraftfahrzeug, sondern auch darum, die Systeme des Antriebsstrangs innerhalb der Betriebstemperaturgrenzen zu halten. Durch die unterschiedlichen Anforderungen an die genannten Betriebstemperaturen,

H. H. Heimes

Mitglied der Institutsleitung, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: H.Heimes@pem.rwth-aachen.de

A. Kampker

Universitätsprofessor, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

C. Offermanns · M. Kehrer

Oberingenieur, Production Engineering of E-Mobility Components (PEM),
RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

E-Mail: c.offermanns@pem.rwth-aachen.de; m.kehrer@pem.rwth-aachen.de

F. Maltoni

Technical Specialist, FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

E-Mail: maltoni@fev.com

H. Löbbberding (✉)

Team Leader Battery Cell, FEV Europe GmbH, Aachen, Deutschland

E-Mail: loebberding@fev.com

© Der/die Autor(en) 2024

A. Kampker, H. H. Heimes (Hrsg.), *Elektromobilität*,

https://doi.org/10.1007/978-3-662-65812-3_11

203

die wechselnde Richtung der Wärmeströme, geringe Temperaturgradienten und die Relevanz für die Systemsicherheit kann das Thermomanagementsystem von Elektrofahrzeugen nur mit Hilfe interdisziplinärer Ansätze konsequenter Innovation gemeistert werden.

11.1 Herausforderungen des Thermomanagementsystems in Elektrofahrzeugen

Der Verbrennungsmotor funktioniert von tiefen bis zu sehr hohen Umgebungstemperaturen und muss ausschließlich gekühlt werden. Außerdem ist die abzuführende Wärme wegen der hohen Temperaturen einfach an ein Kühlmedium und dann an die Umgebungsluft zu übertragen. Die Menge der Abwärme genügt für die Heizung der Kabine und für die Nebenaggregate, ohne dass die Effizienz des Fahrzeugs darunter leiden muss. Die Ge triebetemperatur ist normalerweise höher als die Umgebungstemperatur, so dass deren Abwärme ebenfalls durch einen Wärmetauscher abgeführt werden kann. Das einzig verbleibende Problem besteht in der Kühlung der Kabine, die durch einen vom Motor angetriebenen Klimakompressor und Kältekreislauf – mit der Abnahme mechanischer Leistung im Fahrzeug – funktioniert.¹

Im Gegensatz dazu arbeitet die Traktionsbatterie in Elektrofahrzeugen bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen. Während besonders tiefen Temperaturen sinkt allerdings die Leistung, insbesondere beim Laden, wohingegen zu hohe Temperaturen sogar ein Sicherheitsrisiko darstellen. Die weiteren Komponenten – etwa der Elektromotor oder die Leistungselektronik im elektrischen Antriebstrang – funktionieren von tiefen bis zu unterschiedlich hohen Temperaturen und sind so effizient, dass die Abwärme kaum für eine Heizung des Kabinenraums ausreicht. Zum einen folgt daraus, dass die Klimatisierung der Kabine durch eine leistungsbedürftige Wärmepumpe erfolgen muss; zum anderen muss die Traktionsbatterie sowohl energieaufwendig erhitzt als auch gekühlt werden können, um im optimalen Betriebstemperaturfenster gehalten zu werden.

Somit muss das Thermomanagementsystem in einem Elektrofahrzeug einen Kompromiss unter vier Zielgrößen abbilden: eine hohe Effizienz auf Systemebene und somit maximale Reichweite, vertretbare Kosten und eine optimale Bauraumnutzung.²

11.2 Thermomanagement der Elektromobilkomponenten

Das Thermomanagement in Elektrofahrzeugen lässt sich nach den wichtigsten Bereichen untergliedern, die ihre jeweiligen thermischen Anforderungen bezüglich des Heizens und Kühlens stellen. Dazu gehören das Batteriesystem, die Elektromotoren, Hochvoltkomponenten sowie der Fahrzeuginnenraum. Auf Basis der Einzel-

¹Vgl. Rao und Wang 2011, S. 4559ff.

²Vgl. Lajunen et al. 2020, S. 6027ff.

anforderungen kann ein gesamtheitliches, energetisch optimiertes Gesamtsystem abgeleitet und integriert werden.

11.2.1 Thermomanagement der Batterie

Für das Thermomanagement der Batterie sind die spezifischen Eigenschaften der Lithium-Ionen-Batterie von großer Bedeutung – sowohl aus der Performance- als auch aus der Sicherheitsperspektive:

- Das Eintreten von exothermen, selbstverstärkenden, chemischen Reaktionen, falls eine gewisse Temperatur der Batterie überschritten wird, was zu Brand- und Explosionsfällen führen kann – auch als „Thermal Runaway“ bezeichnet
- Bereits weit unterhalb dieser Temperaturgrenze ist die Batteriealterung bei höheren Betriebstemperaturen deutlich beschleunigt.
- Das unterschiedliche thermische Verhalten während des Entlade- und Ladevorgangs ist im Thermomanagement zu beachten.
- Das Eintreten schädlicher Konversionsreaktionen zusätzlich zu Interkalationsreaktionen an der Anode der Batterie während des Ladevorgangs bei niedrigen Temperaturen und hohen Strömen – auch „Lithium-Plating“ genannt
- Die optimale Betriebstemperatur zwischen 30 und 40 °C, da der interne Widerstand in diesem Bereich am kleinsten und somit auch die Wärmeentwicklung in der Batterie minimal ist

Um einen sicheren Fahrbetrieb zu ermöglichen, muss das Thermomanagement die höchste Zelltemperatur bei jedem Fahrzustand deutlich unterhalb der Grenze eines „Thermal Runaway“ halten. Dies muss unter Betrachtung des Kennfeldes des internen elektrischen Widerstands der Zellen erfolgen. Weil bei sehr tiefen Temperaturen der Widerstand mit abnehmender Temperatur steigt, wird dann auch die abrufbare Entladeleistung begrenzt. Dennoch muss das Thermomanagementsystem bei Gewährleistung der Sicherheit nicht überdimensioniert werden. Es gibt bereits Ansätze bei elektrischen Sportwagen, in denen die Leistungsbegrenzung für kurze Zeit ausgeschaltet und dafür zusätzliche Zellalterung in Kauf genommen wird. Die zusätzlich erzeugte Wärme wird nach der Leistungsspitze in der Masse der Batterie verteilt, so dass sie anschließend abkühlen kann (Abb. 11.1)³

Betrachtet man die Batteriealterung weiter, wird diese nicht alleine durch eine hohe Temperatur, sondern auch durch einen Temperaturgradienten innerhalb der Zellen und des Systems beschleunigt. Somit ist es ebenfalls Aufgabe des Thermomanagementsystems, die Temperatur homogen über die Zellen einzustellen, um die Langlebigkeit des Batteriesystems zu gewährleisten.

³Vgl. Arora 2018, S. 622ff.

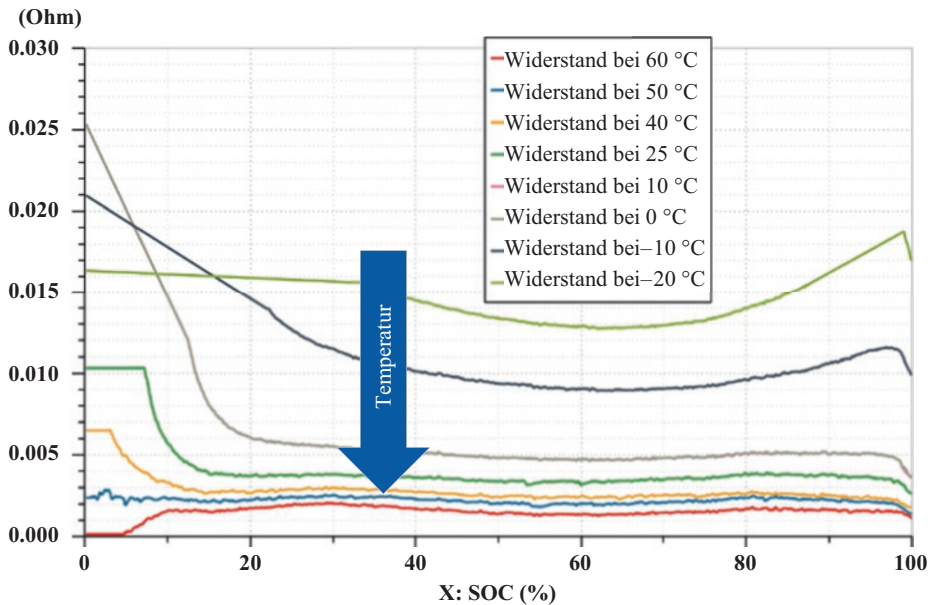


Abb. 11.1 Beispielhafte Temperatur- und Ladezustandsabhängigkeit des Innenwiderstands einer Pouch-Zelle. (Vgl. Heimes et al. 2019)

Der Wunsch der Nutzenden nach Schnellladevorgängen stellt die höchste Leistungsanforderung an das Thermomanagementsystem dar, denn der Innenwiderstand ist aufgrund des chemischen Aufbaus der Batterie beim Laden größer als beim Entladen. Auch muss die Wärme beim Laden kontinuierlich und nicht nur kurzzeitig abgeführt werden, da die Stromstärke für einen Großteil des Ladevorganges konstant hoch ist.

Um das Problem des Lithium-Platings zu beherrschen, ist eine effiziente und schnelle Heizung der Batterie bei tiefen Temperaturen auf mindestens 0 °C vor dem Ladevorgang notwendig. Da eine Wärmepumpe bei tiefen Temperaturen ineffizient ist, kommen – falls erforderlich – Heizmatten mit elektrischen Widerständen zum Einsatz.⁴ Die thermische Isolierung des Batteriegehäuses ist außerdem wichtig, falls die Zellen geheizt werden müssen.

Als Kühlsysteme sind die passive oder die aktive Luftkühlung für Systeme mit geringer Leistungsdichte verbreitet. Für die im Automotive-Bereich üblichen Leistungsklassen gibt es zudem die flüssige Kühlung und in einigen Sonderfällen die Immersionskühlung der Zellen in einer Flüssigkeit. Der Einsatz phasenwechselnder Materialien wird gelegentlich ebenfalls praktiziert, um Temperatur-Inhomogenitäten während der Aufheiz- und Abkühlphasen abzumildern.⁵

⁴Vgl. Arora 2018, S. 622ff.

⁵Vgl. Kim et al. 2019, S. 194f.

Die Integration des Kühlsystems bei einer Luftkühlung lässt sich durch verschiedenartige Konstruktionen realisieren. Anhand der Orientierung der Batteriezellen kann zwischen längs und quer umströmten Zellen unterschieden werden. Zudem kann die Ein- und Ausströmung des Fluids auf derselben Seite (U-förmige Strömung) oder auf gegenüberliegenden Seiten (Z-förmige Strömung) erfolgen. Aufgrund der Aufwärmung des Fluids bereits an den ersten Zellen ist die Kühlleistung zum Ende des Kühlkanals geringer. Dies muss bei der Auslegung berücksichtigt werden. Die begrenzte Anwendung dieser Bauform liegt in der vergleichsweise niedrigen maximalen Wärmeabfuhr des Kühlmediums „Luft“ begründet und ist für Hochleistungs-Elektrofahrzeuge oft ungeeignet (Abb. 11.2).

Bei Kühlung über einen sekundären Flüssigkeitskreislauf kann zwischen der Kühlung durch Kühlrippen, der Zwischenzellkühlung, der Immersionskühlung und der Bodenkühlung in Kanälen unterschieden werden. Während die Kühlrippen, die zwischen den Zellen montiert sind, mit einer besonders hohen Wärmekapazität die entstehende Wärme an einen Kühlfluss außerhalb der Zellen durch Wärmeleitung abgeben, werden bei der klassischen Bodenkühlung und der Zwischenzellkühlung Kanäle unter beziehungsweise zwischen den Zellen selbst von Fluid durchströmt und kühlen dadurch die Zellen effektiv.

Die Immersionskühlung stellt einen Spezialfall dar, der für besonders performante Anwendungen infrage kommt und durch die Immersion der elektrischen Zellen in eine nicht leitende Flüssigkeit technisch äußerst anspruchsvoll ist.⁶

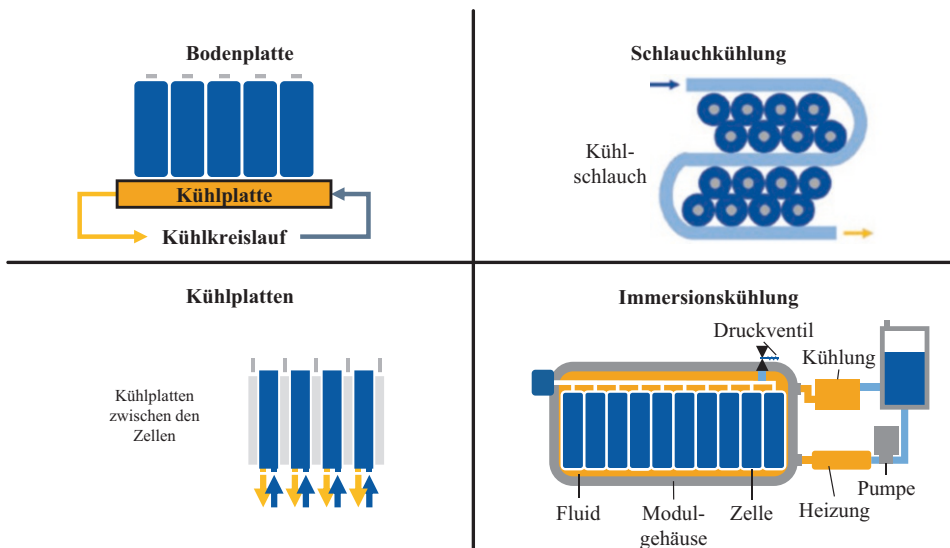


Abb. 11.2 Typische Kühlsystemkonfigurationen an Batteriesystemen mit Flüssigkeitskühlung. (I. A. a. Zeyen und Wiebelt 2013, S. 168)

⁶Vgl. Dubey et al. 2021, S. 2f.

11.2.2 Thermomanagement des Elektromotors

Die Anforderungen an die Temperatur in Elektromotoren sind hauptsächlich durch die Temperaturbeständigkeit der Wicklungsisolierung im Motor begrenzt. Die elektrischen Isolierstoffe dürfen im Betrieb die vorgeschriebenen Maximaltemperaturen nicht überschreiten. Bei Überschreitung droht eine schnelle Alterung oder ein gesamtheitliches Versagen, was zu einem Kurzschluss führen kann. Die üblichen Temperaturgrenzen liegen bei 120 bis 160 °C. Durch die nicht besonders hohe thermische Leitfähigkeit von Silizium-Eisen-Legierungen der Blechpakete im Elektromotor wird eine Kühlmediumtemperatur von typischerweise nicht mehr als 70 °C für eine ausreichende Wärmeabfuhr benötigt.

Durch den Trend der heutigen Motordesigns, mit besonders hohen Drehzahlen zu arbeiten, ist die Wärmeentwicklung während des Betriebs sehr hoch. Das limitiert die Dauerleistung elektrischer Maschinen oft auf 50 bis 60 % der möglichen Maximalleistung. Zur Effizienzsteigerung ist die Betrachtung neuartiger Kühlkonzepte unabdingbar.⁷

Eine hohe Betriebstemperatur beeinflusst ebenfalls die Motorleistung – aus zwei Gründen: Erstens steigt der elektrische Widerstand der Kupferwicklungen („Hairpins“), und zweitens verändern sich die magnetischen Eigenschaften der auf seltenen Erden basierenden Permanentmagnete, so dass die Stärke des magnetischen Feldes und somit das Drehmoment des Motors sinkt. Außerdem können sich die Permanentmagneten bei hohen Temperaturen entmagnetisieren.⁸

Über eine Mantelkühlung können elektrische Motoren extern über das Motorgehäuse gekühlt werden. Das Konzept ist in der Industrie durch die vergleichsweise einfache Implementierung weitverbreitet. Da die Aktivkomponenten nur indirekt gekühlt werden, reduziert sich jedoch die Effektivität der Kühlung. Prinzipiell kann zwischen einer Kühlung mit Flüssigkeiten und Gasen unterschieden werden. Zum Einsatz kommen Wasser, Öle und Wasser-Glykol-Gemische als Flüssigmedien sowie Luft oder Wasserstoff als Gase. Alternativ kann auch eine Phasenwechsel-Verdunstungskühlung zum Einsatz kommen. In Hochleistungsmotoren werden die Wickelköpfe teilweise außerdem mit Kühllöl bespritzt.⁹

Des Weiteren kann entstehende Wärme der aktiven Motorkomponenten direkt über eine Innenkühlung abgeführt werden. Die Anwendung ist kostenintensiver als eine externe Kühlung, erzeugt jedoch effektivere Kühlungsmöglichkeiten. Bei besonders kleinen und leistungsschwachen Motoren kann dabei eine passive Kühlung ausreichen. Die Wärmeabfuhr erfolgt durch natürliche Konvektion und Strahlung. Mit Hilfe der Implementierung einer Innenzirkulation von Kühlmedien durch eine Pumpe lässt sich eine aktive Kühlung durch erzwungene Konvektion erreichen. Die Kühlung ist weitaus effektiver, in der Konstruktion jedoch auch komplexer, und sie hat einen höheren Energieverbrauch. Mögliche Ansätze der aktiven Innenkühlung sind Kühlleitungen im Statorblech, eine Statornutkühlung

⁷Vgl. Gundabattini et al. 2021.

⁸Vgl. Yang et al. 2017, S. 108f.

⁹Vgl. Yang et al. 2017, S. 110f.

oder innengekühlte Hohldrähte der elektromagnetischen Spulen. Dies sind allerdings Konzepte, die sich noch im Entwicklungsstadium befinden.¹⁰

11.2.3 Thermomanagement der Hochvoltkomponenten

Die Leistungselektronik in Hochvoltkomponenten ist von einem sehr hohen Wirkungsgrad und somit von einer geringen Wärmeentwicklung gekennzeichnet, darf aber hohe Temperaturen nicht überschreiten. High-End-Halbleiter wie Siliziumcarbid weisen gute Wirkungsgrade bei höheren Temperaturen und Schaltfrequenzen auf. Galliumnitrid etwa hat einen geringeren Kühlungsbedarf durch hohe Effizienz bei hohen Spannungen und geringen Strömen. Die Anforderungen an das Thermomanagement sind hauptsächlich darauf gerichtet, die Temperaturen homogen und innerhalb der Betriebsgrenzen zu halten. In gängigen Kühlkonzepten wird das Kühlwasser entlang komplexer Heat-Sinks geleitet, um sicherzustellen, dass möglichst geringe Temperaturgradienten in den Platinen und Halbleitern entstehen, die zum Versagen oder zur Ermüdung führen könnten.

11.2.4 Thermomanagement des Fahrzeuginnenraums

Um die Behaglichkeit von Passagieren zu gewährleisten, die maßgeblich auf der empfundenen Temperatur, der Luftqualität und der Zugluft basiert, ist die Betrachtung des Thermomanagements im Fahrzeuginnenraum notwendig. Typische Zielwerte liegen zwischen 21 und 27 °C. Da die Klimatisierung des Innenraums bis zu 35 % des Energieverbrauchs beansprucht und dadurch die Reichweite eines Elektrofahrzeugs um bis zu 50 % reduzieren kann, ist ein energieeffizientes Thermomanagement im Innenraum von essenzieller Bedeutung.¹¹

Zur Erfüllung dieser thermischen Anforderungen im Innenraum kommen immer häufiger Wärmepumpen zum Einsatz. Diese können bei intelligenter Verschaltung sowohl zum Erhitzen als auch zum Kühlen genutzt werden, weisen jedoch einen signifikanten Leistungsbedarf auf. Zur Reduzierung des Leistungsbedarfs existieren Ansätze, bei denen der Umluftanteil sowie der Anteil der Umgebungsluft variiert werden.

Einen weiteren Ansatz bietet die aktive Zonierung des Fahrzeuginnenraums mit Hilfe einer Mehrzonenklimatisierung, um nur tatsächlich belegte Fahrzeugbereiche entsprechend zu klimatisieren und dadurch Energie einzusparen. Außerdem können leichte, elektrische Direktheizungen verwendet werden, die als Luftheritzer einfach zu regeln sind und einen kleinen Bauraum aufweisen. Die Anwendung als Flächenheizsystem in Kombination mit einem Lüftungssystem ist ebenfalls möglich und bietet den Vorteil, die

¹⁰Vgl. Gundabattini et al. 2021, S. 4f.

¹¹Vgl. Lajunen et al. 2020, S. 6027.

anfängliche Trägheit der Wärmepumpe zu überbrücken. Flächenheizsysteme als direkte Kontaktflächen im Bereich des Lenkrads sowie des Sitzes sind bereits weitverbreitet.

Eine Vorkonditionierung (Erwärmung oder Kühlung) der Kabine unter Ausnutzung des Ladestroms während des Ladevorgangs bietet ebenfalls die Möglichkeit, hohe Energieeinsparungen und eine subsequeunte Reichweitenerhöhung von bis zu 14 % während der anschließenden Fahrt zu erzielen.¹²

11.2.5 Gesamtsystembetrachtung des Thermomanagements

Die Gesamtsystemauslegung soll die unterschiedlichen Bedürfnisse der einzelnen Komponenten miteinander in Einklang bringen. Grundsätzlich ist eine Wärmequelle um 60 bis 70 °C aus dem Motor und der Leistungselektronik konstant vorhanden, während die Batterie und die Kabine andere Temperaturanforderungen haben, die sich stärker nach den Umgebungsbedingungen richten.

Aus diesem Grund werden üblicherweise zwei getrennte Kreisläufe vorgesehen. Der Motorkreislauf gibt durch einen Kühler Wärme zur Umgebungsluft ab. Die Traktionsbatterie und die Kabine teilen sich einen Kältekreislauf, der durch einen größeren Kompressor und Kondensator Wärme zur Umgebungsluft abgibt.

Die unterschiedlichen Solltemperaturen können durch zwei unterschiedliche Expansionsventile, jeweils für einen Evaporator, realisiert werden. Während der Evaporator für die Kabine immer Wärme mit der Luft austauscht, sind für die Batterie mehrere Möglichkeiten denkbar: zum einen die direkte Kühlung, bei der das Kältemittel innerhalb der Batterie verdampft, zum anderen die indirekte Kühlung, bei der die Kältemittel in einem „Chiller“ genannten Wärmetauscher mit einem Kühlmittel Wärme austauscht, das in die Batteriekühlkreisläufe einfließt.¹³ Solange die Kühlflüssigkeit aus zwei Phasen besteht, geschieht die direkte Verdampfung bei einer vom Systemdruck bestimmten, stabilen Temperatur, denn die Temperatur steigt bei überhitztem Dampf sehr steil an. Daher erzeugt die direkte Verdampfung Schwierigkeiten in der Regelung des Systems: Auf der einen Seite muss die Verdampfung vor dem Kompressor vollzogen werden, um ihn durch Tropfen nicht zu beschädigen; auf der anderen Seite darf der überhitzte Dampf zur Schonung der Batterie nicht zu heiß werden. Aus diesem Grund ist die indirekte Kühlung, in der der Kältekreislauf Wärme mit einem Kühlkreislauf austauscht, deutlich weiter verbreitet. Dadurch tauscht die Batterie Wärme bei einer annähernd stabilen Temperatur mit dem Kühlmedium aus. Die Implementierung ist mit mehreren Komponenten (Wärmetauscher und Pumpe) verbunden, gestaltet sich jedoch einfacher in der Umsetzung und bietet eine hohe Sicherheit im Betrieb.¹⁴

¹²Vgl. Lajunen et al. 2020, S. 6029.

¹³Vgl. Wang et al. 2018, S. 401ff.

¹⁴Vgl. Jaguemont und van Mierlo 2020, S. 19f.

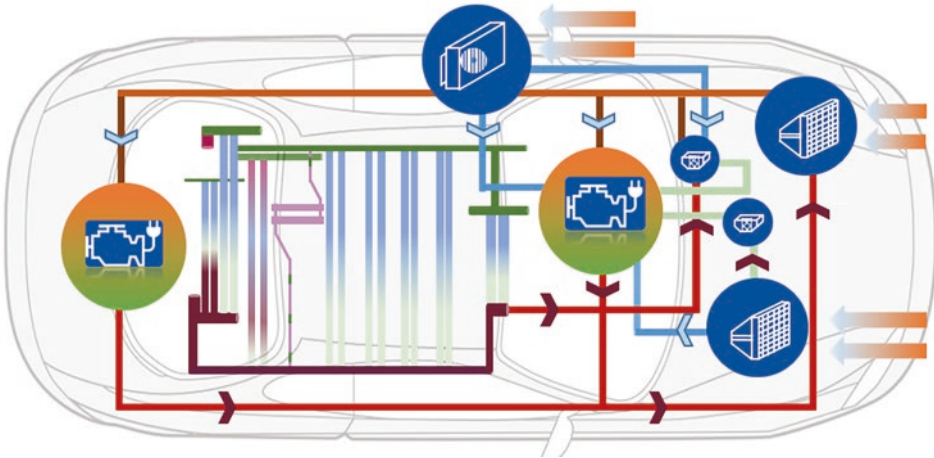


Abb. 11.3 Schema des Thermomanagementsystems mit optimierten Betriebsmodi. (Vgl. Wienkötter 2019)

11.3 Bauraum der Thermomanagement-Komponenten

Die zentralen Elemente, die im Fahrzeug integriert werden müssen, sind die Kühler, die bei unterschiedlichen Temperaturen Wärme abgeben. Sie werden üblicherweise getrennt und nebeneinander positioniert, damit sie vom Fahrtwind durchströmt werden. Die Pumpen und Wärmetauscher, Befüllungs- und Überdruckventile, Sensorik und Steuerungseinheiten werden immer häufiger in integrierten Kühlmodulen realisiert und geliefert, damit diese vor dem Einbau im Fahrzeug überprüft werden können und möglichst kompakt sind (Abb. 11.3).

11.4 Computerbasierte Systemmodellierungsansätze des Thermomanagements

Die Modellierung des Thermomanagements mit Hilfe von computerbasierten Simulationen bildet einen wichtigen Bestandteil in der heutigen Auslegung von Systemen. Insbesondere die Simulation von Batteriesystemen stellt eine Herausforderung dar.

Das zentrale Problem liegt in der Kopplung zwischen den elektrischen Größen (Spannung, Strom, SoC, Innenwiderstand) der Batteriezellen und weiteren Komponenten sowie der resultierenden Wärmeentwicklung. Dies kann durch elektrisch-thermische Modelle simuliert werden, wobei zum Beispiel der Innenwiderstand der Zelle aus anderen elektri-

schen Variablen und der Temperatur abgeleitet wird, so dass sich die Wärmeentwicklung aus dem Zellwiderstand berechnen lässt.¹⁵

Dazu wird auf Basis von SoC und Stromstärke die reversible Wärme der chemischen Reaktionen berechnet, die von der Umwandlung und Interkalation der chemischen Komponenten und letztlich vom Ladezustand abhängig ist. Durch die Anwendung elektrothermischer Simulationen des Batteriesystems können Komponenten dimensioniert und die Lebensdauer des Systems optimiert werden. Darüber hinaus ist der Input der Simulation von hohem Wert für die darauf aufbauende Auslegung und Regelung des Thermomanagements.

Durch detaillierte 3-D-Simulationen werden die lokalen Zelltemperaturen und notwendige Wärmeabfuhr berechnet sowie die strömungsdynamischen Eigenschaften des Kühlmediums im Kontakt mit den Zellen bestimmt. Die Ergebnisse werden im Anschluss als Randbedingungen in typischerweise 1-D-Systemsimulationen verwendet. Dabei liegt der Fokus auf der Auswahl der Nebenaggregate und der Dynamik des Systems. Der digitale Zwilling des Thermomanagements kann nun mit der Steuerungs-Software der Steuerungseinheit gesteuert werden, um die Funktionalität sowie extreme Bedingungen und Lastfälle zu überprüfen. Die Entwicklung einer Steuerungslogik und deren Validierung wird auf diese Weise enorm erleichtert.

Für die Ermittlung der Randbedingungen wie beispielsweise Spitztemperatur, Kühlbedarfe des Elektromotors und den Hochvoltkomponenten kann analog vorgegangen werden. Mit Hilfe detaillierter elektrisch-thermischer Modelle der Komponenten lässt sich zunächst die Wärmeentwicklung berechnen. Auf dieser Basis können adäquate Kühlkonzepte ausgewählt und in die Randbedingungen in die 1-D-Systemsimulation integriert werden.

Literatur

Teil II: Elektrofahrzeugspezifische Systeme

- Arora, S.:** *Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies.* In: Journal of Power Sources, Jg. 400, 2018, S. 621–640
- Dubey, P; Pulugundla, G; Srouji, A. K.:** *Direct Comparison of Immersion and Cold-Plate Based Cooling for Automotive Li-Ion Battery Modules.* In: Energies, Jg. 14, 2021, Nr. (5)Nr.
- Gundabattini, E; Mystkowski, A; Idzkowski, A; R., R. S; Solomon, D. G.:** *Thermal Mapping of a High-Speed Electric Motor Used for Traction Applications and Analysis of Various Cooling Methods – A Review.* In: Energies, Jg. 14, 2021, Nr. 5, S. 1472
- Heimes, H; Kampker, A; Mohsseni, A; Maltoni, F; Biederbeck, J.:** *Cell Tab Cooling System for Battery Life Extension.* In: IEEE ITherm Conference, Jg. 18, 2019, S. 1125–1133
- Jaguemont, J; van Mierlo, J.:** *A comprehensive review of future thermal management systems for battery-electrified vehicles.* In: Journal of Energy Storage, Jg. 31, 2020, S. 101551

¹⁵Vgl. Siczek 2019.

- Kim, J; Oh, J; Lee, H.:** *Review on battery thermal management system for electric vehicles.* In: Applied Thermal Engineering, Jg. 149, 2019, S. 192–212
- Lajunen, A; Yang, Y; Emadi, A.:** *Review of Cabin Thermal Management for Electrified Passenger Vehicles.* In: IEEE Trans. Veh. Technol., Jg. 69, 2020, Nr. 6, S. 6025–6040
- Rao, Z; Wang, S.:** *A review of power battery thermal energy management.* In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Jg. 15, 2011, Nr. 9, S. 4554–4571
- Siczek, K. J.:** *Modeling of Batteries: Next-Generation Batteries with Sulfur Cathodes* Elsevier, 2019, S. 201–218
- Wang, Y; Gao, Q; Wang, G; Lu, P; Zhao, M; Bao, W.:** *A review on research status and key technologies of battery thermal management and its enhanced safety.* In: Int J Energy Res, Jg. 42, 2018, Nr. 13, S. 4008–4033
- Wienkötter, M.:** *Die Batterie: Ausgeklügeltes Thermomanagement, 800 Volt Systemspannung,* 04.09.2019a
- Yang, Y; Bilgin, B; Kasprzak, M; Nalakath, S; Sadek, H; Preindl, M; Cotton, J; Schofield, N; Emadi, A.:** *Thermal management of electric machines.* In: IET Electrical Systems in Transportation, Jg. 7, 2017, Nr. 2, S. 104–116
- Zeyen, M. G; Wiebelt, A.:** *Thermisches Management der Batterie.* In: Korthauer, R. (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 165–175

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

