

Thermofluide zur Kühlung von Akkus

Das Thermomanagement von elektrischen Antrieben und stationären Anwendungen wird immer wichtiger. Die Immersionskühlung elektrischer Komponenten mit dielektrischen Thermoflüssigkeiten kann hier zukünftig eine große Rolle spielen.



Immersione Batteriekühlung mit einem dielektrischen Fluid

Thermofluide für die Immersionskühlung von Batterien in Elektroautos sind eine innovative Lösung, um die Temperaturkontrolle und die Effizienz von Batteriesystemen zu verbessern.

Immersionenkühlung

Bei dieser Methode werden die Batteriezellen direkt in ein thermisches Fluid eingetaucht, was eine sehr effektive Wärmeübertragung ermöglicht. Diese Kühlungsstrategie sorgt dafür, dass die Wärme, die während des Betriebs der Batterien entsteht, schnell und effizient abgeleitet wird. So lassen sich Überhitzung vermeiden und die Leistung der Batterien optimieren.

Die Thermofluide sind in der Regel dielektrisch, was bedeutet, dass sie kaum elektrisch leitend sind. Dies minimiert das Risiko von Kurzschlüssen und anderen elektrischen Problemen, die bei der Kühlung von Batterien auftreten könnten. Für die Immersionenkühlung können verschiedene Arten von Thermofluiden eingesetzt werden. Die wichtigsten Fluide sind synthetische Öle, spezielle Fluide auf Wasserbasis oder fluorierte Flüssigkeiten, die für ihre hervorragenden thermischen Eigenschaften bekannt sind. Durch die direkte Kühlung der Batteriezellen wird eine gleichmäßige Temperaturverteilung erreicht, was die Lebensdauer der Batterien verlängern kann. Weiterhin können Immersionenkühlungssysteme oft kompakter gestaltet werden, da sie

weniger Platz für Kühler und Lüfter benötigen. Die Thermofluide müssen den spezifischen Anforderungen der Anwendung entsprechen, einschließlich Temperaturbereich, chemischer Stabilität und Umweltverträglichkeit.

Die erhöhte Wärmeentwicklung der Akkus erfordert ein ausgeklügeltes Thermomanagement, wodurch auch aus Sicherheitsgründen die Batteriekühlung immer mehr in den Vordergrund rückt. Der optimale Temperaturbereich für eine Lithiumakkuzelle liegt zwischen 20 °C und 40 °C. Außerhalb dieses Temperaturintervalls kann es zu unerwünschten, temperaturabhängigen, elektrochemischen und mechanischen Nebenreaktionen kommen, welche die Lebensdauer und Kapazität der Zellen teils massiv reduzieren (Degradation). [1]

Die sogenannte Immersionskühlung – auch Tauchkühlung genannt – liefert hier die passende Antwort. Die Idee dahinter ist, zu kühlende elektrische Komponenten in direkten Kontakt mit einem dielektrischen Thermofluid zu bringen. Durch die elektrisch isolierende Natur dieser Flüssigkeiten können Isolatoren (gleichzeitig Wärmeübergangswiderstände), wie sie bei einer Kühlung mit Wasser notwendig sind, vermieden und so ein optimalerer Wärmeabtransport gewährleistet werden.

Im Fall des Akkus führt dies zu homogeneren und niedrigeren Zelltemperaturen sowohl beim Abkühlen als auch beim Erwärmen der Zellen. Damit einhergehend wird ein schnelleres und damit effektiveres Auf- und Entladen der Akkus, ohne zu überhitzen, ermöglicht und deren Betriebsdauer verlängert. Ein weiterer Vorteil ist der Schutz der Zellen vor dem „thermischen Durchgehen“ durch die flammenhemmende Wirkung der Kühlflüssigkeit. [2]

Dielektrische Kühlflüssigkeiten können ebenfalls verwendet werden, um Elektromotoren direkt zu kühlen und, je nach Bauart, auch zu schmieren. Dadurch sind höhere Dauerleistungen bzw. höhere Leistungsdichten möglich. Ebenso können der Inverter bzw. die Leistungselektronik und das Ladekabel direkt gekühlt werden. [3], [4]

Durch ihren direkten Kontakt zu vielfältigen Bauteilen und zunehmende Anforderungen an Effizienz und Umweltverträglichkeit müssen diese Flüssigkeiten einige Eigenschaften erfüllen [2] (siehe Übersicht im Kasten).

Entwicklung dielektrischer Thermofluide

Im Rahmen einer Kooperation zwischen ROWE MINERALÖLWERK und Argomotive zur Entwicklung von dielektrischen Thermofluiden wurden vielversprechende Produkte für die Immersionskühlung entwickelt und getestet.

Zu Beginn des Projektes wurde eine umfassende Analyse der Anforderungen an die Thermofluide durchgeführt, um die spezifischen Eigenschaften zu definieren, die benötigt werden. Danach erfolgte die Entwicklung von Prototypen und deren Testung unter realistischen Bedingungen, um die Eigenschaften der Thermofluide zu

bewerten. Durch die Auswertung der Versuchsergebnisse und systematische Anpassung des Entwicklungsprozesses erfolgte die Optimierung der Fluide. Die Produktentwicklung erfolgte unter Berücksichtigung von Sicherheits- und Umweltvorschriften, um sicherzustellen, dass die entwickelten Thermofluide den gesetzlichen Anforderungen entsprechen.

Nachstehend sind die Prüfmethodik und einige Versuchsergebnisse beispielhaft dargestellt.

Untersuchung von Thermofluiden

Die Zielstellung der Untersuchung und Bewertung von Thermofluiden für die Immersionskühlung ist die Effizienz und Sicherheit von Batteriesystemen zu verbessern. Dabei werden folgende

zentrale Fragestellungen berücksichtigt:

1. Thermische Eigenschaften:
 - Wärmeleitfähigkeit (hohe Wärmeleitfähigkeit)
 - Spezifische Wärmekapazität (hohe spezifische Wärmekapazität)
 - Viskosität (niedrige Viskosität)
2. Dielektrische Eigenschaften:
 - Elektrische Leitfähigkeit (kaum bis nicht elektrisch leitend)
3. Chemische Stabilität:
 - Korrosionsbeständigkeit (inert gegenüber angewandten Materialien der Batteriezellen und des Kühlsystems)
 - Thermische Stabilität (stabil bei hohen Temperaturen)
4. Umweltauswirkungen:
 - Ökologische Verträglichkeit (biologisch abbaubare oder weniger schädliche Chemikalien)

Diese Eigenschaften müssen dielektrische Kühlflüssigkeiten haben:

- Wärmeabfuhr
 - Hier geht es um die optimale Balance zwischen Dichte (ρ in kg/m^3), Wärmeleitfähigkeit (λ in $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, spezifischer Wärmekapazität (c in $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) und dynamischer Viskosität (μ in $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$). Aus diesen Parametern errechnet sich die sogenannte Mouromtseff-Zahl, mittels der man verschiedene Kühlflüssigkeiten vergleichen kann. Dabei gilt: Je höher diese Gütezahl bzw. die Dichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität und je geringer die Viskosität ist, desto besser ist die Wärmeabfuhr. Diese Gütezahl wird in Relation zu Wasser angegeben und errechnet sich aus folgender Formel:
$$Mo = \frac{\rho^a \cdot \lambda^b \cdot c^d}{\mu^e}$$
- Dielektrische Eigenschaften
 - niedrige elektrische Leitfähigkeit (in einem gewissen Bereich, um nicht leitfähig zu sein und statische Aufladung zu verhindern)
 - hohe Durchschlagfestigkeit
 - geringe Wasseraufnahme
 - niedriger dielektrischer Verlustfaktor
 - niedrige Permittivität
- Korrosionsbeständigkeit
 - vor allem gegenüber Kupfer
- Oxidationsstabilität
- Materialverträglichkeit
 - mit Elastomeren und Polymeren in Dichtungen, Ummantelungen, Gehäusen, usw.
- Pumpbarkeit
 - niedrigere Viskosität bedeutet kleinere Pumpenleistung
 - niedriger Pourpoint je nach Anwendung
- Umweltaspekte
 - biologische Abbaubarkeit
- Sicherheitsbedenken
 - höherer Flammpunkt birgt höhere Sicherheit
 - Toxizität

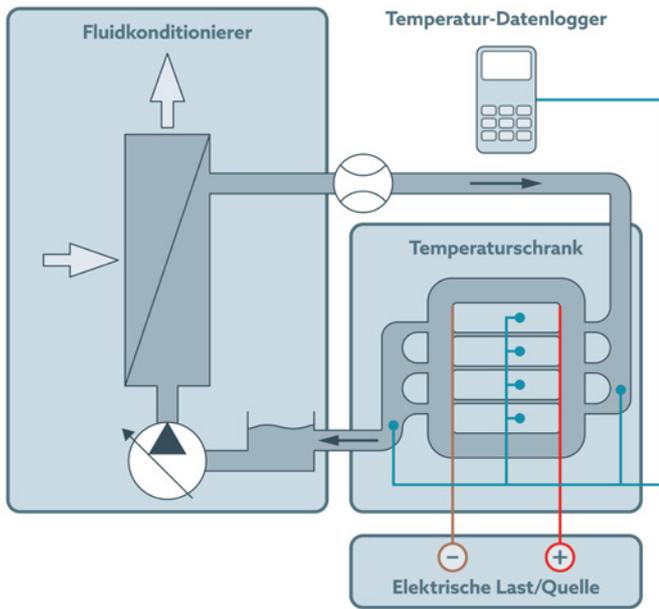


Abb. 1: Schematische Darstellung des Kühlflüssigkeitsprüfstandes

- Sicherheitsaspekte (Risiken wie Entflammbarkeit oder Toxizität)

Konzeption und Aufbau eines Prüfstandes

Um den Einfluss verschiedener Fluideigenschaften auf die Kühl- und Heizleistung verschiedener Flüssigkeiten zu testen, wurde ein Prüfstand konzipiert. Das Herzstück des Prüfstandes besteht aus einem immersionstemperiertem Akkupack in einem entsprechenden Edelstahl-Gehäuse (siehe Abb. 3 und 4), welches sich in einer Temperatorkammer befindet. Diese wird zur Temperierung der Umgebungsluft um den Akku genutzt. Weiterhin wird die zu testende dielektrische Flüssigkeit in einem Konditionierer temperiert, welcher sich im Wesentlichen aus einer Pumpe, Heizung und einem Kältekreislauf zusammensetzt (siehe Abb. 1 und 2). Der Temperatur-Datenlogger in Abbildung 1 wird am realen Prüfstand von einem Messsystem eines Motorenprüfstandes ersetzt, welches neben den Temperaturen auch den Volumenstromsensors auslesen kann. Zudem ist zwischen dem bidirektionalen Labornetzteil und dem Akku noch ein Batteriemanagementsystem geschaltet, welches unter anderem die Spannungen einzelner parallel geschalteter Zellblöcke überwacht.

Vergleichende Untersuchungen

Mit diesem Versuchsaufbau wurde ein Testprogramm für mehrere Flüssigkeiten durchgeführt. Dabei wurde der Akku mit Gehäuse, bzw. dessen Umgebungsluft, und die Flüssigkeit auf 20 °C temperiert und über die acht-stufige Pumpe ein konstanter Volumenstrom von ca. 22 L/min eingestellt. Mit Beginn des Tests wurde der Akku mit 2,5 C über 10 Minuten entladen. Die am Konditionierer eingestellte Zieltemperatur blieb bei 20 °C, gekühlt wurde dabei mit maximal 150 W. Die sich einstellenden maximalen Temperaturen wurden zwischen den Flüssigkeiten verglichen.

Zwischen dem Wechseln von Flüssigkeiten wird das System mit einem Lösungsmittel gespült, um sicher zu gehen, dass keine Rückstände der vorherigen Flüssigkeit im Kühlkreislauf



Abb. 2: Umgesetzter Aufbau des Prüfstandes mit bidirektionalem Labornetzteil, Temperatorkammer und Flüssigkeitskonditionierer (von links nach rechts)
 Das Gehäuse, die Zellhalter, Zellverbinder und Leistungs- sowie Sensorstecker wurden eigens für diesen Aufbau konstruiert, gefertigt oder angepasst (Abb. 3).
 Der Akku besteht aus 96 21700er BAK-Zellen (N21700CG-50) in einer 12s8p-Anordnung und wird über ein Batteriemanagementsystem mit einem bidirektionalem Labornetzteil mit Strom versorgt oder entladen. Diese Akkuzelle wurde wegen ihres vergleichsweise hohen Innenwiderstandes ausgewählt. Zur Aufnahme von Messwerten sind mittig an vier Zelloberflächen und zwei Stromschiene sowie am Ein- und Ausgang des Akkugehäuses Pt100-Elemente angebracht. Mit einem Volumenstromsensor lässt sich zusätzlich der Volumenstrom aufzeichnen. Bei jedem Test wird außerdem die benötigte Pumpenleistung für jede Flüssigkeit betrachtet. Überdies werden Spannungen und Ströme des Akkus über das Labornetzteil aufgenommen.

verbleiben. Anschließend wird das System mit der neuen Testflüssigkeit erst nochmals gespült und dann final für die Testdurchläufe befüllt.

Um die Wiederholbarkeit der Messungen sicherstellen zu können, wurden mit zwei verschiedenen Flüssigkeiten pro Test jeweils mehrere Versuche sowie Versuche mit Spülvorgängen zwischen den Tests durchgeführt. Die Standardabweichungen beliefen sich auf unter 0,2K.

Durch zahlreiche Versuche ließ sich feststellen, dass die Viskosität die wichtigste Einflussgröße auf die Kühlung und die Pumpenleistung ist. Je geringer die Viskosität, desto niedriger war die maximale Akkutemperatur und desto kleiner war die nötige Pumpenleistung, um das Fluid mit konstanter Geschwindigkeit im Prüfstand zu zirkulieren (Tabelle). Der Pumpenleistung kommt deshalb eine hohe Bedeutung zu, da die Energie, die die Akkus zum Betreiben der Pumpe bereitstellen, nicht für andere Einsatzzwecke, z. B. zur Fortbewegung des Fahrzeugs, zur Verfügung steht.

In Abbildung 5 sind die gemittelten Temperaturen aller Messstellen an den Akkus für verschiedene Immersionsflüssigkeiten dargestellt. Aus diesem Diagramm lässt sich ableiten, welche Fluide besser zur Akkutemperierung geeignet sind. Diese Beobachtungen können im Vorfeld mit einer theoretischen Gütezahl abgeschätzt werden, wobei die Mouromtseff-Zahl (Mo) sich als geeignet herausstellte (siehe Kasten).

Während die Temperaturunterschiede zwischen den Fluiden nicht so groß wie die Differenzen der Gütezahlen sind, so gibt es zwischen den Immersionsflüssigkeiten dennoch sehr große Unterschiede in den Flammpunkten (Tabelle).

Der Flammpunkt spielt neben dem spezifischen Widerstand und der Durchschlagfestigkeit eine maßgebliche Rolle in Bezug auf die Betriebssicherheit und bei der Sicherheit im Falle des thermischen Durchgehens. Obwohl noch keine Standards existieren, werden teilweise 180 °C oder sogar 200 °C als Mindestflammpunkt für den Betrieb in Elektrofahrzeugen angenommen.

Zum Vergleich: Die Referenzflüssigkeit 4 (RF 4) besitzt bei 20 °C

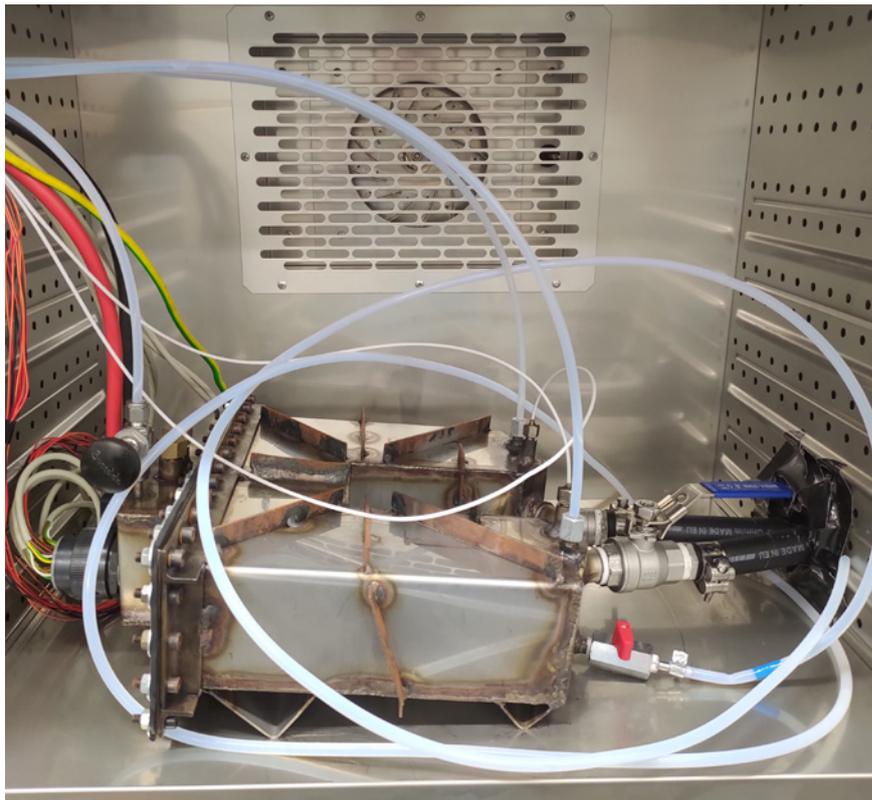


Abb. 4: Akkugehäuse in der Temperaturkammer mit Flüssigkeitszu- und Ableitungen, Entlüftungs- und Entleerungsschläuchen und Leistungs-, Sense- sowie Pt100-Kabeln

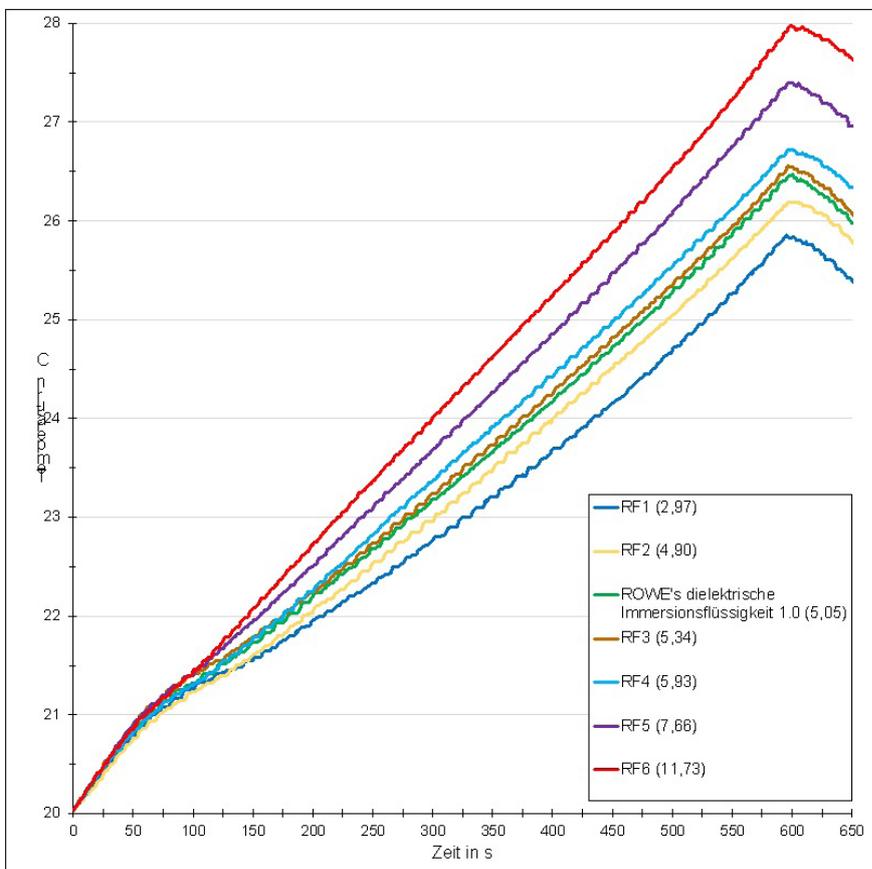


Abb. 5: Gemittelte Temperaturverläufe für den 20°C-Test und den zugehörigen Mouromtseff-Zahlen (Mo)

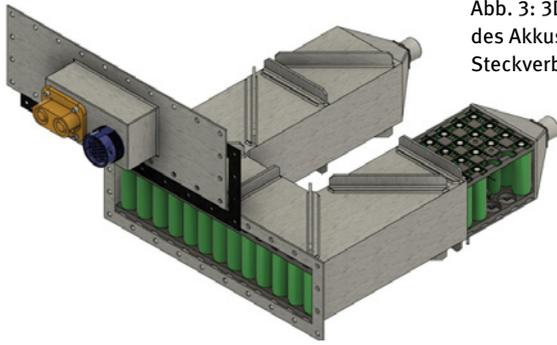


Abb. 3: 3D-Konstruktionsansicht des Akkus mit Zellen, Gehäuse und Steckverbindungen

Tabelle 1: Gegenüberstellung der verschiedenen Flüssigkeiten

Flüssigkeit	Mo in %	Maximale Akkutemperatur in °C	Pumpenleistung in W	Viskosität in mm ² /s (20 °C)	Flammpunkt in °C
RF 1	14,1	25,9	63,7	6,1	135
RF 2	10,6	26,2	110,1	12,0	157
ROWE	10,4	26,5	110,5	13,8	203
RF 3	8,5	27,4	171,3	18,5	182
RF 4	7,0	28,0	246,7	39,1	218

eine kinematische Viskosität von ca. 39 mm²/s und einen Flammpunkt von 218 °C, während die mit ca. 6 mm²/s deutlich dünnflüssige und somit besser kühlende Referenzflüssigkeit 1 (RF 1) einen Flammpunkt von nur 135 °C besitzt. Die Immersionsflüssigkeit von ROWE zeigte trotz eines hohen Flammpunkts von über 200 °C sehr gute Kühleigenschaften bei einer niedrigen Pumpenleistung durch eine niedrige Viskosität. Bei den weiter oben genannten wichtigen Aspekten

für eine Immersionsflüssigkeit, z. B. der Korrosionsbeständigkeit oder Oxidationsstabilität, erwies sich das ROWE-Kühlmittel ebenfalls als hervorragendes Kühlmedium.

Zusammenfassung

Das Thermomanagement von elektrischen Antrieben und stationären Anwendungen wird in Zukunft an Bedeutung gewinnen, unter anderem durch stetig steigende Ladeleistungen und dem Ziel, Effizienzen weiter zu steigern. Die Immersionskühlung elektrischer Komponenten mit dielektrischen Thermoflüssigkeiten kann hier zukünftig eine große Rolle spielen.

Der Einsatz von dielektrischen Kühlflüssigkeiten hilft, die Effizienz und Lebensdauer von Batterien zu erhöhen, indem sie Überhitzung verhindern und eine gleichmäßige Temperaturverteilung gewährleisten. Dies ist besonders wichtig, da hohe Temperaturen die Leistung und Lebensdauer von Batterien negativ beeinflussen können [5].

Darüber hinaus können dielektrische Kühlflüssigkeiten auch in anderen Anwendungen wie der Elektronik- und Maschinenkühlung eingesetzt werden, wo eine sichere und effektive Wärmeableitung erforderlich ist. [6]

Es gibt verschiedene Arten von dielektrischen Kühlflüssigkeiten, die auf unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen basieren, und die Auswahl der richtigen Flüssigkeit hängt von den spezifischen Anforderungen der Anwendung ab.

Die vergleichenden Untersuchungen am Thermomanagement-Prüfstand der Argomotive GmbH haben vielversprechendes Potential der neuentwickelten Thermofluide von ROWE Mineralölwerk GmbH gezeigt. Diese Fluide erfüllen alle Anforderungen an die Immersionskühlung hinsichtlich des Wärmemanagements und sind für verschiedene Anwendungen wie z. B. für batterieelektrische Antriebe, Elektronik, Maschinen und Rechentechnik geeignet.

Die im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen ROWE MINERALÖLWERK GmbH und Argomotive GmbH entwickelten dielektrischen Thermofluide sind innovative Lösungen, welche die Effizienz und Sicherheit von batterieelektrischen Anwendungen erheblich verbessern. —

Quellen:

- [1] Heimes, H.H.; Kampker, A.; Offermanns, C.; Kehler, M.; Maltoni, F.; Löbbarding, H.: Thermomanagement in Elektrofahrzeugen. In: Elektromobilität, 3. Aufl., 2024, S. 203–213
- [2] Jander, N. N.: Erarbeitung und Bewertung der Anforderungen an die neuen Fluide für Thermomanagementsysteme von batterieelektrischen Fahrzeugen; Dresden, 2022, Diplomarbeit
- [3] Gahagan, M.: All-In-One e-Fluid Technology To Cool Inverter, e-Motor and Provide EV Gear Lubrication; Lubrizol, 2024, Webinar
- [4] Manthey, N.: Huber+Suhner presents liquid-cooled charging cable for Tesla NACS; Veröffentlichung vom 11.10.2023, Abruf: 25.11.2024 <https://www.electrive.com/2023/10/11/huber-suhner-presents-liquid-cooled-charging-cable-for-tesla-nacs/>
- [5] Zikoridse, G.; Jander, N. N.; Perspektiven für alternative Antriebe bei Baumaschinen, Tagungsband 9. Fachtagung Baumaschinentechnik, Dresden 29.–30.09.2022
- [6] <https://www.rowe-oil.com/de/ueber-rowe/forschung-und-entwicklung/thermofluide>

Die Autoren



Prof. Dr.-Ing. Gennadi Zikoridse, Geschäftsführer Argomotive GmbH



Dipl.-Ing. (FH) Nick Noel Jander, Projektingenieur Argomotive GmbH



Dr. Stefan Berger, Head of R&D ROWE MINERALÖLWERK GmbH