

# Vorkonditionierung von Elektrofahrzeugen zur Reichweitenerhöhung

Jannes Nerling, Florian Schaller, Oliver Arnhold

**Die begrenzte Reichweite von Elektrofahrzeugen wird durch die Klimatisierung der Fahrgastzelle zusätzlich reduziert. Aufgrund der hohen wirksamen thermischen Speicherkapazität der Fahrzeugmassen ist der Energiebedarf für Aufheiz- und Abkühlvorgänge der Fahrgastzelle verhältnismäßig hoch. Daher wurde am Reiner Lemoine Institut ein Simulationsmodell entwickelt, welches das Potential einer thermischen Vorkonditionierung der Fahrgastzelle zur Reichweitenerhöhung quantifiziert.**

## 1 Motivation

Neben hohen Anschaffungskosten und der unzureichenden Ladeinfrastruktur, ist die geringe Reichweite von E-Fahrzeugen ein wesentliches Hemmnis für potentielle Käufer [1]. Anders als bei konventionellen Fahrzeugen wird bei E-Fahrzeugen auch das Heiz- und Kühlsystem mittels elektrischer Energie der Traktionsbatterie betrieben, wodurch sich die Reichweite weiter reduziert. Eine naheliegende Maßnahme ist daher, den Wärme- und Kältebedarf während der Fahrt zu reduzieren, indem die Fahrgastzelle (FGZ) vor Fahrtbeginn, bei Anschluss an einen Ladepunkt, thermisch vorkonditioniert wird. Dadurch kann die elektrische Energie für den Aufheiz- bzw. Abkühlvorgang der Innenluft sowie der Fahrzeugmassen dem Stromnetz entnommen werden. Um zentrale Fragestellungen wie den maximalen Reichweitengewinn, die sinnvolle Vorkonditionierungsdauer und den zusätzlichen Energiebedarf durch eine thermische Vorkonditionierung (tvk) der FGZ beantworten zu können, hat das Reiner Lemoine Institut (RLI) umfangreiche thermische Messungen an einem E-Fahrzeug durchgeführt. Darauf aufbauend wurde ein Simulationsmodell entwickelt, welches die FGZ sowie das Heiz- und Kühlsystem des Fahrzeuges beinhaltet.

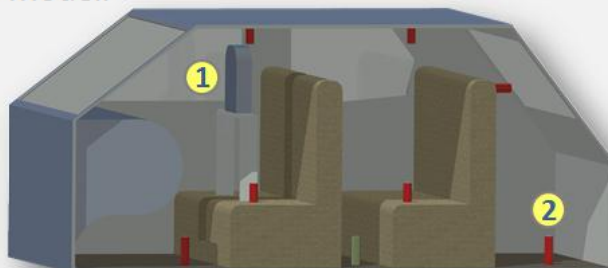
## 2 Simulationsmodell \ Methodik

Für die Modellierung der FGZ wurde eine Struktur mit vereinfachtem Schichtaufbau der Flächenelemente definiert. Neben den Umschließungsflächen haben zusätzliche thermische Speichermassen des Fahrzeuges (Interieur, Batterie, etc.) maßgeblichen Einfluss auf das thermische Verhalten der FGZ während der Aufheiz- und Abkühlvorgänge. Aufgrund der Komplexität der Umschließungsflächen und der Ungewissheit bezüglich der thermisch wirksamen Fahrzeugmassen kann die Modellierung der FGZ auf rein theoretischen Annahmen nur als eine erste Näherung angesehen werden. Da die Aussagekraft der Simulationsergebnisse maßgeblich von einer realitätsnahen Abbildung des FGZ-Modells abhängt, wurden Messungen an einem Nissan Leaf durchgeführt, die detailliertere Erkenntnisse über das

thermische Verhalten der FGZ lieferten. In **BILD 1** ist der vereinfachte Aufbau der FGZ und des Messaufbaus dargestellt. Anhand der Messungen konnten die Wärmedurchgangszahl (WDZ) der FGZ und die wirksame thermische Speicherfähigkeit der Fahrzeugmassen bestimmt werden. Die WDZ entspricht dem Wärmestrom, der sich im stationären Zustand in Abhängigkeit einer bestimmten Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Umgebung einstellt und spiegelt somit die wärmetechnischen Eigenschaften der Umschließungsflächen wider [2]. Anhand einer Aufheiz- oder Abkühlkennlinie kann die Zeitkonstante der FGZ bestimmt werden. Im Falle einer Abkühlkennlinie entspricht die Zeitkonstante der Zeit, die vergeht, bis die Temperatur in der FGZ bis auf 36,8 % ihrer Anfangstemperaturdifferenz zwischen FGZ und Umgebung abgesunken ist [3]. Anhand der Zeitkonstante und der WDZ kann die wirksame thermische Speicherfähigkeit der FGZ bestimmt werden [4].

Der Schichtaufbau des vereinfachten FGZ-Modells wurde anschließend an die Messergebnisse angepasst, so dass das thermische Verhalten des Simulationsmodells dem thermischen Verhalten der FGZ während der Messungen entsprach. Für die Implementierung des Heiz- und Kühlsystems sowie dessen Regelung wurden Komponenten aus der Bibliothek der verwendeten Simulationsumgebung (TRNSYS) genutzt.

Modell



Messung



- ① Heizlüfter als Wärmequelle
- ② Sensoren zur Bestimmung der Innentemperatur
- ③ Sensoren zur Bestimmung der Umgebungstemperatur

**BILD 1** Vereinfachter Aufbau der FGZ und schematische Darstellung des Messaufbaus (© RLI)

### 3 Ergebnisse der Simulation

In einem ersten Schritt wurde untersucht, welche Zeitdauer für eine tVK als maximal sinnvoll erachtet werden kann. Darauf aufbauend wurden die Reichweitengewinne und der zusätzliche Energiebedarf für eine tVK in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur sowie der solaren Einstrahlung bewertet. Die Reichweitengewinne wurden auf Basis der resultierenden Energiebedarfe während des Fahrbetriebes sowie der Reichweitenangaben (199 km im Neuen Europäischen Fahrzyklus) und der Batteriekapazität (24 kWh) des Nissan Leafs ermittelt. Die prozentualen Reichweitengewinne beziehen sich auf die Differenz zwischen erzielbarer Reichweite mit und ohne tVK. Darüber hinaus wurden für den Winterbetrieb unterschiedliche

Heizungstechnologien, PTC-Heizung und Wärmepumpe (WP), untersucht. Eine PTC-Heizung (PTC – Positive Temperature Coefficient) ist eine Elektroheizung, deren elektrische Leistungsaufnahme näherungsweise verlustfrei als Wärmeleistung abgegeben wird. Eine WP ist weitaus effizienter, da sie Wärme bei niedrigem Temperaturniveau der Umgebung entnimmt und sich hierdurch die elektr. Leistungsaufnahme, bei gleicher Wärmeleistung, reduziert.

### 3.1 Dauer der tVK

In **BILD 2** ist der Temperaturverlauf in der FGZ sowie die Heiz- und Gebläseleistung beispielhaft bei einer Umgebungstemperatur von  $-14^{\circ}\text{C}$  für die verschiedenen Simulationsphasen abgebildet. Bei dem betrachteten Szenario wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug über Nacht unter freiem Himmel steht und der Beginn der tVK in den frühen Morgenstunden stattfindet. Das Fahrzeug ist zu Beginn der tVK entsprechend ausgekühlt. Die Soll-Lufttemperatur von  $22^{\circ}\text{C}$  wird in etwa 20 Minuten erreicht. Anhand des zeitlichen Verlaufs der Heizleistung wird jedoch ersichtlich, dass es etwa 3,5 Stunden dauert bis die stationäre Heizleistung erreicht wird und auch die Fahrzeugmassen „thermisch aufgeladen“ sind. Zwar wird bei höheren Umgebungstemperaturen eine geringere Heizleistung benötigt, der zeitliche Verlauf und somit die Dauer bis zum Erreichen der stationären Heizleistung bleibt hingegen immer gleich, da sie durch die Zeitkonstante des Fahrzeuges definiert ist. Als maximal sinnvolle VK-Dauer wurden im Rahmen der Untersuchungen 2,5 Stunden definiert, da in der Zeitspanne zwischen 2,5 und 3,5 Stunden die Änderung der Heizleistung vernachlässigbar klein ist. Der Anstieg der Heizleistung zu Fahrbeginn ist im Wesentlichen dadurch begründet, dass die tVK im Umluftbetrieb stattfindet und im Fahrbetrieb von reinem Außenluftbetrieb ausgegangen wurde, welcher einen höheren Energiebedarf mit sich bringt.

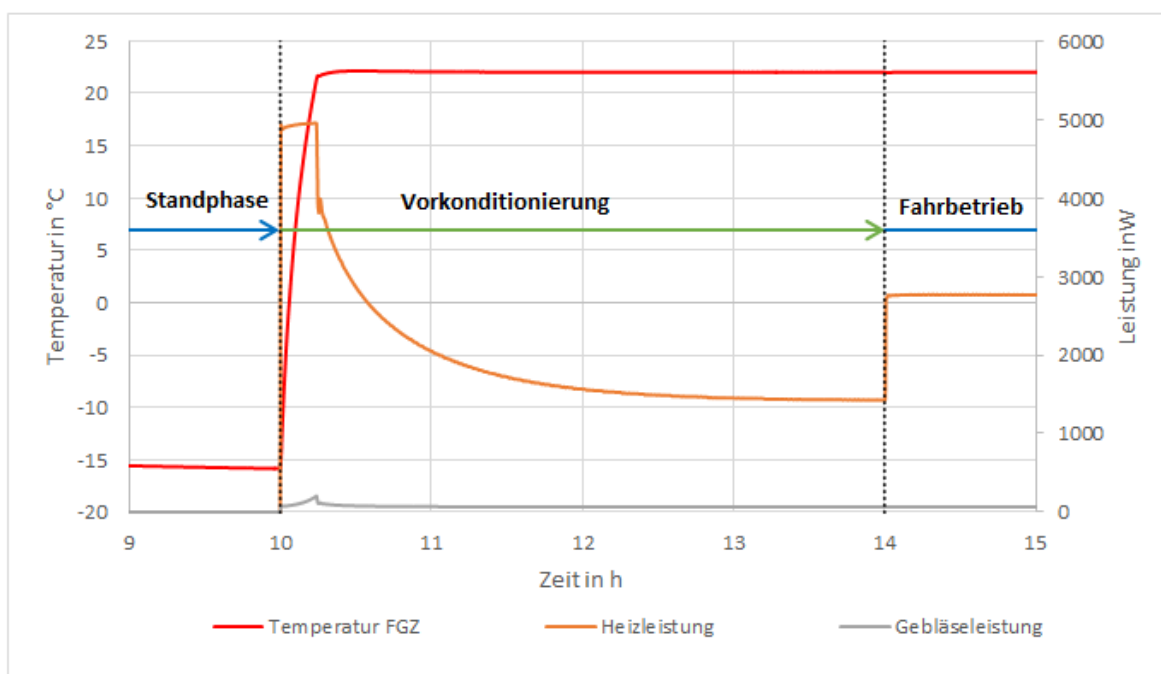
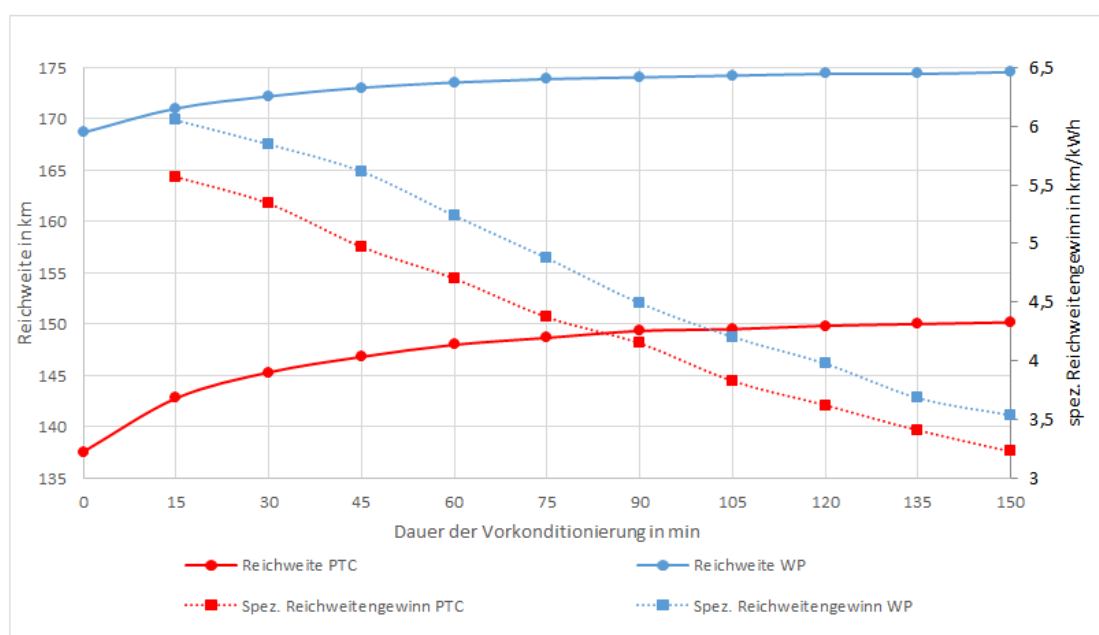


BILD 2 Temperaturverlauf der FGZ sowie der Heiz- und Gebläseleistung (© RLI)

### 3.2 Reichweitengewinn und Energiebedarf der tVK

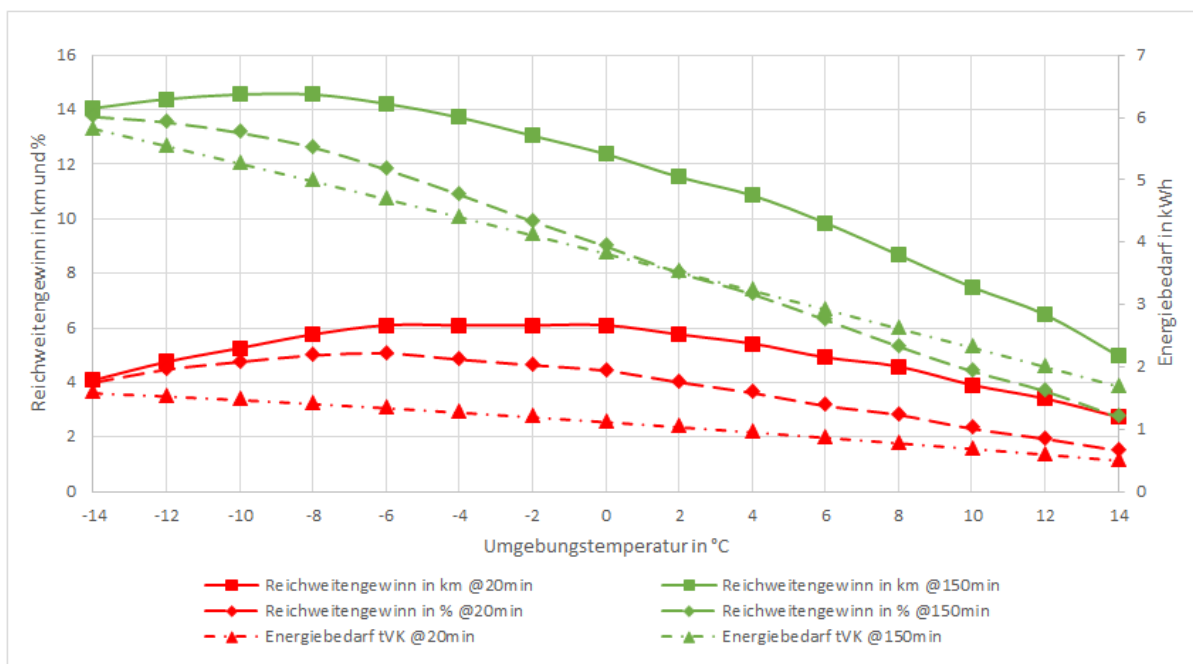
Wie bereits aus **BILD 2** hervorging, nimmt die Heizleistung im Verlauf der tVK exponentiell ab. Dies spiegelt sich ebenfalls in den Reichweitengewinnen in Abhängigkeit der VK-Dauer wider. **BILD 3** zeigt, dass sich die Reichweite mit zunehmender VK-Dauer nur noch geringfügig steigern lässt und der spez. Reichweitengewinn, d.h. der Reichweitengewinn in Abhängigkeit des zusätzlichen Energiebedarfs, mit zunehmender VK-Dauer abnimmt. Des Weiteren werden deutliche Unterschiede hinsichtlich der verwendeten Heizungstechnologie sichtbar. Bei einer WP ist das Potential einer Reichweitensteigerung deutlich geringer, da sich die Reichweite durch die Klimatisierung der FGZ im Vergleich zu einer PTC-Heizung auch ohne eine tVK deutlich weniger reduziert. Aufgrund des geringen elektrischen Energiebedarfs der WP fällt der spez. Reichweitengewinn jedoch höher aus als bei einer PTC-Heizung.



**BILD 3** Reichweite und spezifischer Reichweitengewinn in Abhängigkeit der VK-Dauer bei 0°C. Die Reichweite ohne Klimatisierung der FGZ beträgt 199 km. (© RLI)

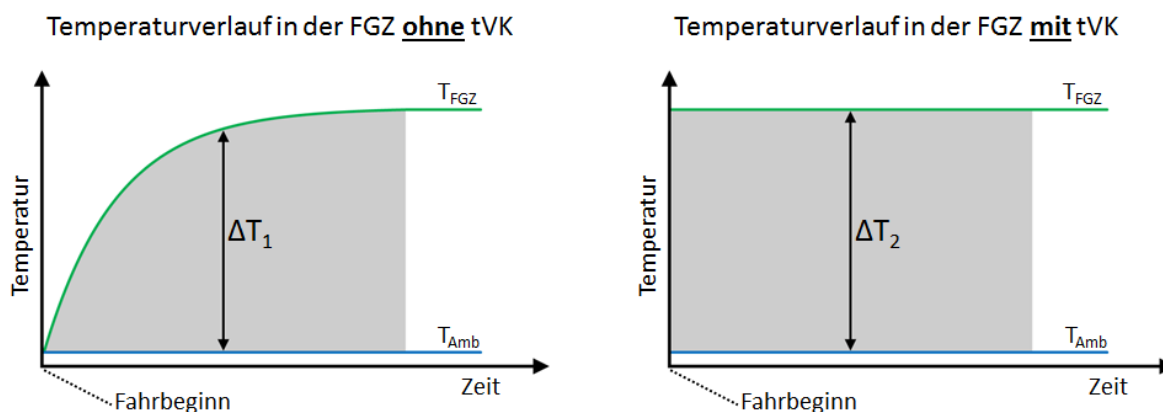
In **BILD 4** sind der Reichweitengewinn und der zusätzliche Energiebedarf durch eine tVK in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur abgebildet. Der maximale Reichweitengewinn liegt im Falle einer VK-Dauer von 2,5 Stunden bei etwa 14 % und verringert sich bei höheren Umgebungstemperaturen entsprechend. Der zusätzliche Energiebedarf ist mit bis zu 6 kWh aufgrund der langen VK-Dauer entsprechend hoch. Sofern lediglich 20 Minuten vorkonditioniert wird, liegt der maximale Reichweitengewinn bei etwa 5 % und der zusätzliche Energiebedarf bei bis zu 1,6 kWh. Weiterhin lässt sich den Kennlinien entnehmen, dass der Reichweitengewinn zunächst in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur, speziell bei einer VK-Dauer von 20 Minuten, ansteigt und sich in der Folge wieder verringert. Dies erscheint zunächst nicht plausibel, da zu erwarten ist, dass sich der Reichweitengewinn mit zunehmender Umgebungs-

temperatur generell verringert. Speziell bei tiefen Temperaturen ist die Zeitdauer bis zum Erreichen der Soll-Lufttemperatur **ohne** tVK und reinem Außenluftbetrieb sehr lang und beträgt bei -14°C bis zu 50 Minuten. Dies führt auch ohne eine tVK zu einer Energieeinsparung im Fahrbetrieb, da die Wärmeverluste (speziell der Fensterflächen) durch Transmission und Strahlung zu Beginn der Fahrt aufgrund der geringeren Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Umgebung niedriger ausfallen, **BILD 5**. Diese „ungewollte“ Energieeinsparung führt wie eine tVK ebenfalls zu einem Reichweitengewinn. Je länger es dauert, bis die Solltemperatur in der FGZ erreicht wurde, desto höher fällt die Energieeinsparung durch geringere Wärmeverluste aus. Das heißt, das Potential der tVK zur Reichweitenerhöhung wird in Fällen sehr niedriger Umgebungstemperaturen reduziert, wodurch sich die Kennlinienverläufe in **BILD 4** erklären lassen.



**BILD 4** Reichweitengewinn und Energiebedarf einer PTC-Heizung bei einer Soll-Lufttemperatur von 22°C (© RLI)

Sofern eine energieeffiziente WP als Heizungstechnologie für die Fahrzeugklimatisierung eingesetzt wird, reduzieren sich die Reichweitengewinne um etwa die Hälfte verglichen mit einer PTC-Heizung. Im Sommer liegt das Potential einer Kompressionskälteanlage (KKA) für die Kühlung der FGZ, ähnlich wie beim Einsatz einer WP im Winter, bei etwa 5 %. Bei den Sommerszenarien wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug über mehrere Stunden in der Sonne steht und zu Beginn der tVK stark aufgeheizt ist. In **Tabelle 1** sind die Reichweitengewinne und die dafür notwendigen Energiebedarfe für die betrachteten Winter- und Sommerszenarien zusammenfassend dargestellt.



**ohne thermischer Vorkonditionierung:**

$$\Delta T_1(t) < \Delta T_2(t) \quad (\dot{Q}_V = U \cdot A \cdot \Delta T)$$

- + Verringerter Energiebedarf zu Fahrbeginn durch geringere Wärmeverluste ( $\dot{Q}_V$ ) über die Umschließungsflächen.
- Höherer Energiebedarf durch Aufheizung der Luft- und Fahrzeugmassen.

**mit thermischer Vorkonditionierung:**

$$\Delta T_2(t) > \Delta T_1(t) \quad (\dot{Q}_V = U \cdot A \cdot \Delta T)$$

- Höherer Energiebedarf zu Fahrbeginn durch höhere Wärmeverluste ( $\dot{Q}_V$ ) über die Umschließungsflächen.
- + Verringerter Energiebedarf da Luft- und Fahrzeugmassen bereits aufgeheizt sind.

Energiebedarf für Aufheizung der Luft- und Fahrzeugmassen

>

Energiebedarf aufgrund höherer Wärmeverluste

**BILD 5** Vergleich der Energieeinsparpotentiale mit und ohne tVK (© RLI)

	Winter (+14 °C bis -14 °C ; 125 W/m <sup>2</sup> )		Sommer (21-33 °C ; 400-850 W/m <sup>2</sup> )
	PTC	WP (COP = 2,5)	KKA (COP = 2,5)
	<b>Vorkonditionierungsdauer: 2,5 Stunden</b>		
Reichweitengewinn in km	5 - 14,5	2 - 7,5	2 - 7,5
Reichweitengewinn in %	2,7 - 14	1 - 5	1,2 - 5
Energiebedarf in kWh	1,7 - 6,4	0,8 - 2,7	0,7 - 2,4
Reichweitengewinn in km/kWh	2,4 - 3,4	2,8 - 3,6	3 - 3,4
	<b>Vorkonditionierungsdauer: 20 Minuten</b>		
Reichweitengewinn in km	2,5 - 6	1 - 3	1 - 2,5
Reichweitengewinn in %	1,5 - 5	0,5 - 1,8	0,6 - 1,5
Energiebedarf in kWh	0,5 - 1,6	0,2 - 0,7	0,2 - 0,54
Reichweitengewinn in km/kWh	2,6 - 5,9	3,4 - 6,2	4,1 - 6,3

**Tabelle 1** Übersicht der Ergebnisse (© RLI)

## 4 Fazit und Ausblick

Die vom RLI vorgestellten Simulationsergebnisse zeigen das Potential der thermischen Vorkonditionierung (tVK) der Fahrgastzelle (FGZ) zur Reichweitenerhöhung von E-Fahrzeugen. Der Reichweitengewinn hängt dabei stark von den Umgebungsbedingungen (Temperatur und Globalstrahlung) und der Dauer der Vorkonditionierung (VK) ab. Im Winterbetrieb zeigen sich darüber hinaus deutliche Unterschiede beim Reichweitengewinn in Abhängigkeit der betrachteten Heizungstechnologie.

Neben einem Reichweitengewinn von bis zu 14 % ist die Komforterrhöhung durch tVK hervorzuheben. So konnte anhand des Simulationsmodells gezeigt werden, dass das Erreichen der Solltemperatur im Fahrbetrieb ohne tVK bei extremen Umgebungsbedingungen im Winter bis zu 50 Minuten und im Sommer bis zu 54 Minuten andauern kann. Mit einer tVK von bereits 20 Minuten kann die Raumluft in den meisten Fällen auf 22°C konditioniert werden, wengleich die Kontaktflächen zwischen Passagieren und Fahrzeug noch nicht die Solltemperatur erreicht haben. Der spezifische Reichweitengewinn ist in diesem Zeitraum mit bis zu 6 km/kWh besonders hoch, daher kann eine begrenzte VK-Dauer auch aus ökonomischen Gründen empfohlen werden. Bei einer VK-Dauer von etwa 2,5 Stunden sinkt der spezifische Reichweitengewinn auf unter 3 km/kWh. In Abhängigkeit der geplanten Fahrt muss demnach im Einzelfall bewertet werden, ob ein maximaler Reichweitengewinn den erhöhten Energiebedarf rechtfertigt bzw. notwendig ist. Am RLI werden diese Erkenntnisse zur Optimierung der Topologie und Betriebsführung von SmartGrids genutzt. Eine Implementierung der hier gezeigten Methodik in Dispositionswerkzeuge größerer Fahrzeugflotten ist angestrebt.

## 5 Literaturhinweise

- [1] Vogt, M.; Bongard, S.: Treiber und Hemmnisse bei der Anschaffung von Elektroautos. Frankfurt a. M.: Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW), 2015
- [2] Großmann, H.: Pkw-Klimatisierung - Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2013
- [3] Fraaß, M.: Raumverhalten. In E. Bollin, Automation regenerativer Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009
- [4] Häupl, P.: Lehrbuch der Bauphysik. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013

## Danksagung

Vielen Dank an Norman Pieniak, Alexander Wanitschke, Stephen Bosch, Prof. Dr.-Ing. Bendel und der Beuth Hochschule für Technik Berlin für ihre Beiträge zu dieser Veröffentlichung.

Die Ergebnisse wurden im Zuge des Projektes „MSG-EUREF“ erzielt, welches im Rahmen des Schaufenster Elektromobilität durch die Bundesregierung gefördert wird.