

# Schlussbericht des Teilvorhabens

- öffentlich einsehbar -

Verbundvorhaben: CoolEV - Kühlsystem zur Optimierung der Energieeffizienz, Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit von Schnellladevorgängen und Antrieben in Elektrofahrzeugen

Teilvorhaben: Konzepte und Geschäftsmodelle zur Abwärmenutzung, Konzepte zur Ladelogistik

Wenn zur Wahrung berechtigter Interessen des Zuwendungsempfängers (ZE) oder Dritter oder aus anderen sachlichen Gesichtspunkten bestimmte Einzelheiten aus dem Bericht vertraulich zu behandeln sind (z. B. Wahrung der Priorität bei Schutzrechtsanmeldungen), so hat der ZE den Zuwendungsgeber (ZG) ausdrücklich darauf hinzuweisen.

Zuwendungsempfänger: Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff- Forschung Baden-Württemberg (ZSW)	Förderkennzeichen: 01MV19005D
Kontakt: Dennis Huschenhöfer	Tel.: +49 (0)711 7870-118  Email: dennis.huschenhoefer@zsw- bw.de
Laufzeit des Vorhabens:  von: 01.01.2020                      bis: 30.06.2023	
Datum Bericht: 11.12.2023	

## Inhalt

Allgemeine Hinweise:.....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
1. Kurzdarstellung.....	3
1.1. Aufgabenstellung.....	3
1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	3
1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	3
1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	4
Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden.....	4
Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste .....	4
1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
2. Eingehende Darstellung .....	5
2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele .....	5
Prozesssimulation von Kühlung und Abwärmenutzung eines Ladezyklus.....	6
Ladekurven und Kühlleistungsbedarf.....	19
Konzepte zur Abwärmenutzung .....	25
Schlussfolgerungen.....	29
2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	30
2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	30
2.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	30
2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	30
2.6. Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 der Nebenbestimmungen.....	31

## 1. Kurzdarstellung

Im Teilvorhaben wurden mögliche Abwärmenutzungskonzepte für Schnellladeinfrastruktur untersucht und eingeordnet. Dafür erfolgte sowohl eine Untersuchung der technischen Umsetzbarkeit als auch die quantitative Ermittlung der Abwärmemengen, die genutzt werden könnten. Dies ergab, dass die Nutzung von Abwärme, die bei Schnellladevorgängen anfällt, einen Beitrag zur Deckung lokaler Wärmelasten liefern kann.

### 1.1. Aufgabenstellung

Im Rahmen des Gesamtvorhabens wurde das Schnellladen von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen weiterentwickelt. Für die Abwärme, die bei den Ladevorgängen entsteht, zeigte sich bereits vor dem Projekt, dass eine externe Kühlmöglichkeit notwendig ist. Im Rahmen dieses Teilprojektes sollte untersucht werden wie die Abwärme wirtschaftlich weiterverwendet werden kann und welche technischen Anlagen dafür notwendig sind. Außerdem sollte der CO<sub>2</sub>-Reduktionsbeitrag der Abwärmenutzung untersucht werden.

### 1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt baute auf dem vorherigen Forschungsprojekt „FastCharge“ des Konsortiumsleiters Porsche auf. Ziel des Projektes war mit höheren Ladeleistungen die Ladezeiten zu reduzieren und dadurch die Attraktivität von E-Fahrzeugen zu steigern. Dabei zeigte sich, dass bereits dafür ein sehr aufwendiges fahrzeugseitiges Batterie-Kühlsystem zur Abfuhr der entstehenden Abwärme notwendig ist. In diesem Vorhaben sollte die mögliche Ladeleistung nochmals gesteigert werden um die Langstreckentauglichkeit von Elektrofahrzeugen zu verbessern. Da die für die Schnellladevorgänge prognostizierte Abwärme aber nicht mehr fahrzeugseitig abführbar wäre, sollte diese über eine Vorrichtung, die ebenfalls in diesem Gesamtvorhaben entwickelt wurde abgeführt werden.

Die Weiterverwendung der Abwärme sollte dabei zur Dekarbonisierung des Wärmesektors beitragen. Diesbezüglich bestand bei diesem zu Beginn des Vorhabens ein großer Rückstand. Das Teilvorhaben untersuchte den möglichen Beitrag durch Schnellladeinfrastruktur zur Klimaneutralität des Wärmesektors.

### 1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Beruhend auf Erhebungen des assoziierten Projektpartners sollte eine Analyse des gegenwärtigen Nutzungsverhaltens von Schnellladesäulen an Tank- und Rastanlagen an deutschen Autobahnen durchgeführt werden. Da sich im Laufe des Vorhabens herausgestellt hat, dass keine Bereitschaft für die Bereitstellung der Daten mehr bestand, wurde eine Alternative für die quantitative Bestimmung der entstehenden Abwärme entwickelt. Dies erwies sich als aufwendiger als ursprünglich geplant, da zunächst die notwendigen Daten erhoben und beschafft werden mussten. In Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern wurden Prognosen über zukünftiges Nutzungs- und Ladeverhalten erarbeitet. Darauf aufbauend und in Verbindung mit Daten aus einer Literaturrecherche sowie Daten, die im Laufe des Projekts beschafft wurden, wurde mit einer im Rahmen des Vorhabens entwickelten

Simulationsumgebung die entstehende Abwärme sowie die dafür und für die Ladevorgänge benötigte elektrische Energie quantitativ bestimmt. Parallel dazu wurden mögliche technische Lösungen zur effizienten Nutzung der Abwärme untersucht. Abschließend erfolgte eine Kosten-/Nutzen-Abschätzung.

Des Weiteren wurde der Partner, die Hochschule Esslingen, im Teilvorhaben „Konzepte zur Ladelogistik“ unterstützt.

#### **1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Das ZSW hat auf Erkenntnisse vorheriger Projekte in diesem Vorhaben aufgebaut. Dazu zählten das Projekt „QUARREE 100“. Dabei wurden erste Ansätze zur Nutzung der bei der Elektrolyse von Wasserstoff oder der Methanisierung entstehenden Abwärme im Rahmen einer „Tankstelle der Zukunft“, die Fahrzeuge sowohl mit Strom, Wasserstoff als auch mit Methan versorgen kann, diskutiert. Ein weiteres Projekt ist „LINOx BW“. Darin wurde unter anderem die Belastung der Ladesäulen auf die Energieinfrastruktur und die Möglichkeiten der Netzentlastung durch Lade- und Lastmanagementlösungen für unterschiedliche Anwendungsfälle ermittelt. In diesem Zusammenhang wurden bereits verschiedene Ladeszenarien betrachtet und mit Hilfe von Statistiken aussagekräftige Nutzungsprofile erstellt. In weiteren verschiedenen Forschungsarbeiten wurden die Anforderungen an Ladeinfrastrukturen anhand von Nutzungsprofilen unterschiedlicher Berufsgruppen oder das tageszeitabhängige Flottenladeverhalten unterschiedlicher Dienstleister quantitativ erhoben, analysiert und interpretiert. Auf die in diesem Vorhaben aufgebaut wurden.

#### **Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden**

„nicht zutreffend“

#### **Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste**

Zur Erstellung der Simulation wurden diverse Quellen im Rahmen einer Literaturrecherche gesichtet und teilweise verwendet. Die relevantesten werden hier mit Bezug auf die entnommenen Informationen aufgelistet:

- Vergleich der Kompressor-Polynome verschiedener Modelle und Kältemittel:
  - o Copeland: <https://webapps.emerson.com/online-product-information/#>, zuletzt abgerufen 20.06.2022
  - o Danfoss: <https://coolselectoronline.danfoss.com/>, zuletzt abgerufen 20.06.2022
- Verortung aktueller Ladeparks:
  - o interaktive Karte mit Ladeparks: <https://www.schnellladepark.app/live/index.php#>
- Marktanteil mit Batterieelektrischenautos:
  - o Daten vom Kraftfahrt-Bundesamt: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand\\_node.html](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html)
- Verkehrsfluss an Autobahnen & Bundesstraßen
  - o Zählstellen an Autobahnen/Bundesstraßen von Bundesanstalt für Straßenwesen: [https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Daten/2020\\_1/Jawe2020.html](https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Daten/2020_1/Jawe2020.html)
- Anzahl Raststätten nach OpenStreetMap Daten: <https://www.geofabrik.de/>

- Verwendete selbst adaptierbare Software für Simulationsarbeiten mit geeigneter Bibliothek für Modellierung von Kältemaschinen- / Wärmepumpenkreisläufen:
  - <https://www.simtechnology.com/cms/ipsepro/process-simulation-and-heat-balance-software>
  - <https://www.simtechnology.com/cms/ipsepro/model-libraries/refrigeration-process-library>
- Verwendete frei verfügbare Software zur Auslegung von Scrollkompressoren für die IPSEpro-Simulationsarbeiten:
  - <https://www.bitzer.de/websoftware/Calculate.aspx?cid=1699879658217&mod=ESC>
  - <https://www.danfoss.com/en/service-and-support/downloads/dcs/coolselector-2/#tab-overview>
  - <https://www.copeland.com/de-de/tools-resources/copeland-select-software>
- Temperaturniveaus möglicher Abwärmesenken:
  - Heizwärme modern (Flächenheizung): <https://www.vaillant.de/heizung/heizung-verstehen/tipps-rund-um-ihre-heizung/vorlauf-rucklauftemperatur/>, abgerufen am 22.07.2022
  - Fermenter Biogasanlage: „Wie viel Wärme steht wann zur Verfügung“, Sven Klingbeil, Biogas Journal, Sonderheft Gülle-Kleinanlagen, 2015
  - Gewächshaus-Heizung: Fallstudie Energieeffizienter Gemüseanbau – Kellermann heizt mit Kälte, Johnson Controls
  - Schwimmbad-Heizung: Monitoring Passivhaus-Hallenbad Lippe-Bad Lünen, Peper, S., Grove-Smith, J., Darmstadt, Passivehaus Institut, 2013
  - Kalte Nahwärme – Eine Schlüsseltechnologie für die Wärmewende? <https://www.energie-klimaschutz.de/kalte-nahwaerme-eine-schluesseltechnologie-fuer-die-waermewende/>

## 1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es fanden Teilnahmen an den angebotenen Veranstaltungen der Begleitforschung statt. Daran anknüpfend fanden Gespräche mit Unternehmen und anderen Forschungsinstituten statt.

## 2. Eingehende Darstellung

### 2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Tabelle 2.1: Verwendung

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
Ermittlung von Konzepten und Geschäftsmodellen zur Nutzung der an Schnellladesäulen für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge entstehenden Abwärme	Konzepte für mögliche Weiterverwertung von Abwärme wurden entwickelt und mit Simulationen untermauert

Beitrag zur Betrachtung der zukünftigen Ladelogistik unter Berücksichtigung der Schnittstellen Auto – Ladesäule – Smart Grid und Entwicklung von Konzepten zu Ladestraßen oder Zahlungsvorgängen insbesondere durch Prognose der Ankunftszeiten von batteriebetriebenen Elektroautos und Untersuchung möglicher Kommunikationsoptionen	Der Projektpartner, die Hochschule Esslingen, wurde bei ihrem Teilvorhaben unterstützt, so dass das entsprechende Arbeitspaket erfolgreich abgeschlossen werden konnte.
--	---

Im Rahmen des Teilvorhabens „Konzepte und Geschäftsmodelle zur Abwärmenutzung, Konzepte zur Ladelogistik“ des CoolEV Projekts, wurden unterschiedliche Konzepte untersucht, wie die beim Ultraschnellladen anfallende Verlustwärme als Nutzwärme weiterverwertet werden kann. Übergeordnetes Ziel war jedoch die zuverlässige und robuste Bereitstellung von ultraschnellem Laden mit einem hohen Komfort für den Kunden, um einen umfangreichen Umstieg auf die E-Mobilität mit rascher Marktdurchdringung zu begünstigen.

Im Verlauf des Projektes stellte sich heraus, dass für ultraschnelles Laden insbesondere Batterie-Temperaturen kleiner 10 °C für herkömmliche Personenkraftwagen und für Sportwagen aus dem Premiumsegment idealerweise sogar kleiner -10 °C vorteilhaft sind. Im Rahmen des CoolEV Projekts wurde eine hierfür maßgeschneiderte Ladesäulen-Technologie entwickelt. Darauf aufbauend fokussierte das Teilvorhaben „Konzepte und Geschäftsmodelle zur Abwärmenutzung, Konzepte zur Ladelogistik“ auf der simulationsgestützten Bewertung von entsprechend geeigneter Ladesäulen-Konzepte mit Nutzung der anfallenden Abwärmern in Form von niedrigen Übertragungstemperaturen. Ergänzend hierzu erfolgte eine erste Einschätzung der Wirtschaftlichkeit zu den bei geringen Übertragungstemperaturen anfallenden Abwärmemengen für Niedertemperatur-Heizzwecke.

Mit dem Ziel die über einen längeren Zeitraum in einem Ladepark (etwa an einer Raststätte) durch Ultraschnellladen verfügbaren Wärmemengen darzustellen, wurde zunächst der Ablauf eines einzelnen Ladezyklus simuliert. Dabei galt es eine Vielzahl von Parametern einzustellen, etwa das zu erreichende Temperaturniveau auf der Nutzerseite der zurückgewonnenen Abwärme, die Auslegung der Wärmepumpe oder die Größe von Pufferspeichern. Für einen Vergleich mit der konventionellen Kühlvariante, der freien Kühlung (Abgeben der Verlustwärme an die Umgebungsluft), muss diese mit den gleichen Rahmenbedingungen simuliert werden.

Die simulierten Daten eines Ladezyklus wurden in eine Langzeitsimulation eingebunden, welche einen Ladepark über einen simulierten Zeitraum von einem Jahr darstellt. Für die Anzahl und zeitliche Verteilung der am Ladepark aufgeladenen Autos wurden aus Verkehrsdaten die potentiellen Tankvorgänge an Raststätten ermittelt und die Durchdringung mit E-Fahrzeugen als Parameter vorgegeben.

Im folgendem Abschnitt werden die Ergebnisse des Vorhabens detaillierter ausgeführt.

### **Prozesssimulation von Kühlung und Abwärmenutzung eines Ladezyklus**

Zunächst erfolgte die technische Konzeption eines Ladezyklus. Dabei sollte in Absprache mit den CoolEV-Projektpartnern eine Kompressionskältemaschine zur Bereitstellung der beim Ultraschnellladen nötigen Kühlleistung eingesetzt werden, um eine zuverlässige und robuste Ultraschnelllade-Technologie mit hohem Komfort zu gewährleisten. In einem zweiten Schritt sollte im

Rahmen der Prozesssimulation geprüft werden, inwiefern sich die hierbei und unter dieser Prämisse entstehende Abwärme nutzen lässt sowie welche technischen und konzeptionellen Rahmenbedingungen für eine Abwärmeverwertung vorteilhaft sind.

Kompressionskältemaschinen arbeiten ähnlich wie Wärmepumpen als Kreisprozess mit einem Kältemittel. Jedoch ist das primäre Ziel die Bereitstellung von Kälte (hier: zur Kühlung der Fahrzeugbatterie) und nicht die Erzeugung nutzbarer Wärme wie bei Wärmepumpen (z.B. für Heizzwecke). Die entstehende Abwärme wird i.d.R. an die Umgebung abgeführt. Das Kältemittel hat dabei nach der Expansion über ein Entspannungsventil eine geringere Temperatur als das Medium im externen Kühlkreislauf (des E-Fahrzeugs) und kann diesem so die Abwärme mittels eines Wärmetauschers entziehen. Das Kältemittel wird dabei verdampft und anschließend von einem Kompressor verdichtet, wodurch die Temperatur deutlich zunimmt. Das gasförmige, erhitzte Kältemittel muss die aufgenommene Wärme dann in einem weiteren Wärmetauscher, dem Kondensator, an ein anderes Medium abgeben. Bei der Freien Kühlung wird dafür die Umgebungsluft genutzt (siehe Abbildung 1). Die dabei eingesetzten Lüfter erfordern jedoch zusätzliche elektrische Energie. Die abgegebene Wärme kann nicht weiter genutzt werden und geht verloren. Vor der Kältemaschine ist im externen Kühlkreislauf des E-Fahrzeugs ein Kältepuffer vorhanden. Dieser führt bis zu einem gewissen Grad zur zeitlichen Entkopplung zwischen der Bereitstellung der benötigten Kühlleistung und der Abfuhr der entstehenden Abwärme. Dadurch kann die Kompressionskältemaschine auf eine geringere Kühlleistung ausgelegt werden, was die notwendige Größe von Kompressor und Wärmeübertrager reduziert. Der Kältepuffer wird als direkter Speicher simuliert, d.h. es kommt zu einer Vermischung des zugeführten Kühlmittels mit dem Speicherinhalt (kein Wärmeübertrager). Auf der Hochdruckseite des Kältekreises wird im Kondensator die Wärme an einen durch Ventilatoren erzwungenen Luftstrom übertragen.

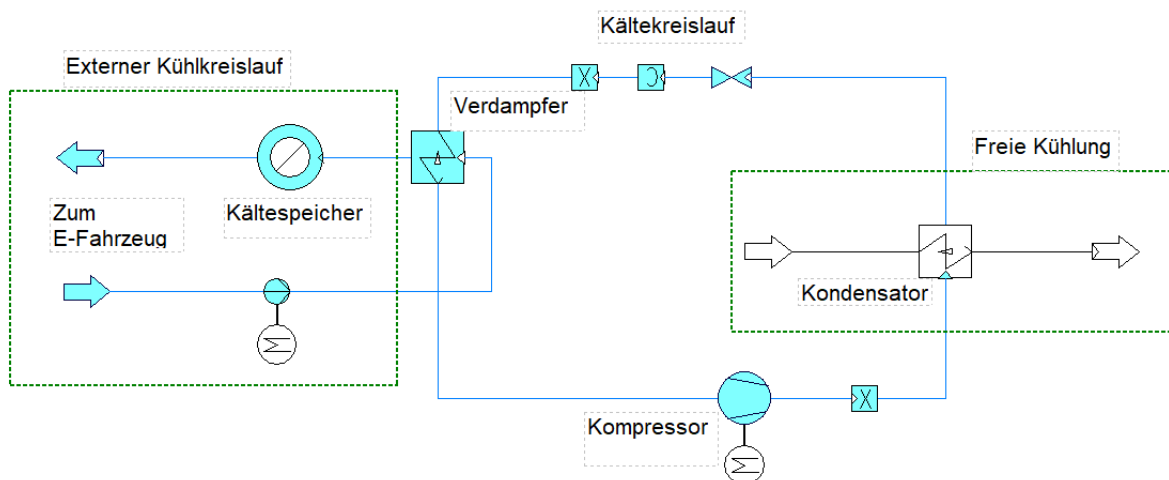


Abbildung 1: Fließbild der Freien Kühlung im Simulationsprogramm IPSEpro

Die Effizienz eines für CoolEV maßgeschneiderten Kältekreislaufes hängt nicht nur von dessen exakten Konfiguration und vom Kältemittel ab, sondern auch vom Temperaturniveau der Umgebung zur freien Kühlung. Im Sommer ist eine höhere Temperaturspreizung zw. Verdampfer und Kondensator erforderlich, so dass die Kältebereitstellung mehr Energie benötigt. Abhilfe können hier bspw. mehrstufige Prozesse schaffen, wobei sich der apparative Aufwand und somit auch Investitionskosten erhöhen.

Alternativ zur Verwendung der Freien Kühlung kann die Abwärme jedoch auch einem Niedertemperaturwärmekreislauf zugeführt werden (siehe Abbildung 2). Dabei arbeitet die Kältemaschine also zugleich als Wärmepumpe, welche die dem Kühlmedium entzogene Wärme auf ein nutzbares Temperaturniveau überführt. Somit wird nicht nur die benötigte Kälte, sondern auch nutzbare Niedertemperaturwärme mit ein und demselben Einsatz an elektrischer Energie bereitgestellt. Zusätzlich zum Kältespeicher des externen Kühlkreislaufts wird ein Wärmespeicher eingesetzt. Dieser nimmt die Wärme aus dem Abwärmewasserkreislauf auf und führt zu einer hydraulischen Entkopplung des Abwärmewasserkreislaufs und des nachgeschalteten Wärmeabnehmers. Weiterhin kann die Nutzung der Wärme zeitlich zu ihrem Aufkommen verschoben geschehen. Es handelt sich um einen indirekten Wärmespeicher, d.h. die Wärme wird dem Speicher per Wärmeübertrager zugeführt.

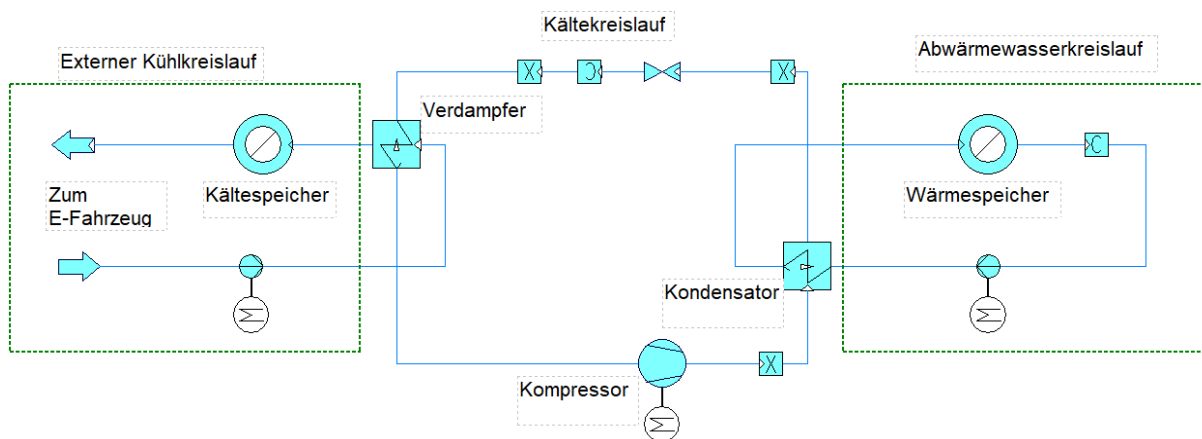


Abbildung 2: Fließbild mit Niedertemperatur-Abwärmenutzung im Simulationsprogramm IPSEpro

Der angedachte Kompressor ist drehzahlkonstant, läuft also bei festgelegten Verflüssigungs- und Verdampfungstemperaturen immer bei gleicher Leistung. Um dennoch die bereitgestellte Kühlleistung variieren zu können, wurden mehrere Möglichkeiten in Betracht gezogen. Modifikationen des Kältekreislaufs ermöglichen eine Minderung der im Verdampfer aufgenommenen Wärme bei gleichbleibender Kompressorleistung. Eine Variante hierfür ist der **Verdampfer-Bypass**. Hierbei wird ein Teil des Kältemittelstroms vor dem Verdampfer abgezweigt und nach dem Verdampfer mit dem dort vorliegenden überhitzten Dampf gemischt (siehe Abbildung 3).



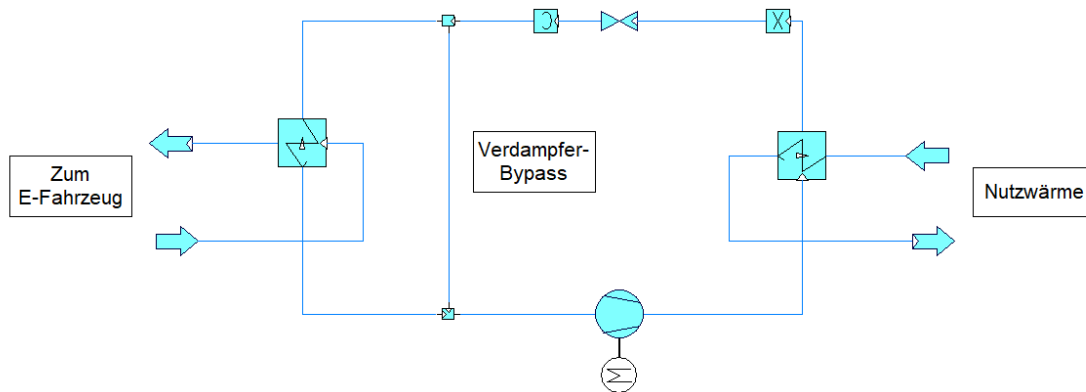


Abbildung 3: Fließbild mit Niedertemperatur-Abwärmenutzung und Verdampfer-Bypass im Simulationsprogramm IPSEpro

Es zeigt sich jedoch, dass diese Variante kaum eine Regelbarkeit der Kühlleistung ermöglicht. Da verhindert werden muss, dass flüssiges Kältemittel in den Kompressor eintritt, muss in dessen Saugleitung das Kältemittel als überhitzter Dampf vorliegen. Da das durch den Bypass geleitete Kältemittel jedoch im Nassdampfbereich liegt und einen hohen Flüssigkeitsanteil aufweist, kann nur ein sehr geringer Massenstrom dieses zweiphasigen Gemischs mit dem aus dem Verdampfer austretenden Dampf gemischt werden, damit das dem Kompressor zugeführte Kältemittel noch im Bereich des überhitzten Dampfes liegt. Daher kann die Effizienz dieses Systems nicht wesentlich verbessert werden.

Eine andere Variante ist der sogenannte **Heißgas-Bypass**. Hierbei wird eine Rückführung von der Druck- auf die Saugseite des Kompressors realisiert. Es muss eine Drossel vorgesehen werden, welche den hohen Druck wieder auf das Niveau der Saugseite reduziert. Ein Teil des gesamten Kältemittelstroms kann nun also dauerhaft nur durch den Kompressor zirkulieren. Infolgedessen reduziert sich der Massenstrom im restlichen System und somit die benötigte Stromaufnahme am Kältemittel-Kompressor. Durch die Rezirkulation im Bypass erhöht sich die Temperatur dieses Kältemittelstroms jedoch stark, falls die bei der Kompression freiwerdende Wärme nicht über den Kondensator abgeführt wird. Um diesen Temperaturanstieg zum Schutz des Kompressors zu vermeiden, wird von der Hochdruckseite flüssiges Kältemittel hinter dem Kondensator abgegriffen und mittels eines Nacheinspritzventils dem Heißgas-Bypass zugeführt. Das Kältemittel expandiert hierbei, was zu einer zusätzlichen Abkühlung führt. Über den Massenstrom dieses eingespritzten Kältemittels kann die Temperatur und der gewünschte Zustand (überhitzter Dampf) auf der Saugseite des Kompressors eingestellt werden.

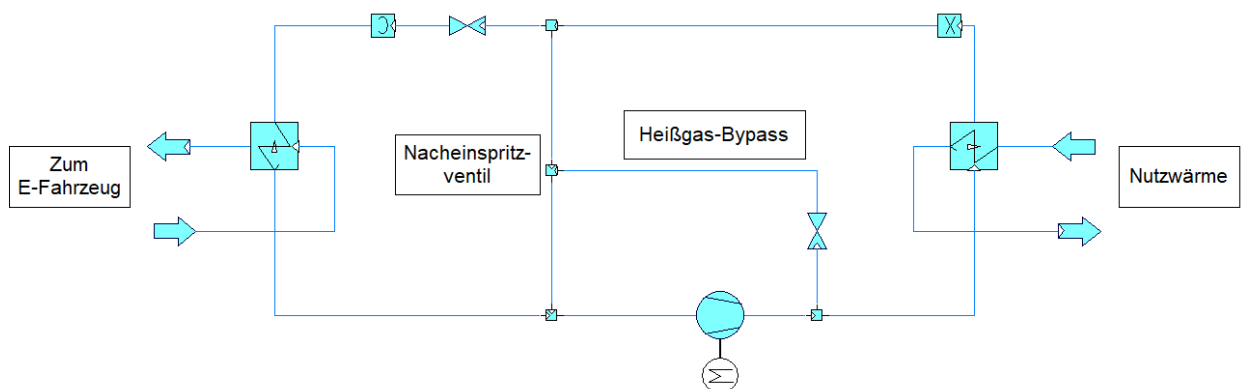


Abbildung 4: Fließbild mit Niedertemperatur-Abwärmenutzung und Heißgas-Bypass im Simulationsprogramm IPSEpro

Der Heißgas-Bypass ermöglicht eine weitgehende Einstellbarkeit der Kühlleistung bei konstanter Kompressorleistung. Generell ist diese Betriebsart jedoch nicht effizient.

Ein drehzahl-geregelter Kompressor kann hingegen eine geringere Kühlleistung liefern ohne in Vollast zu fahren. Die tatsächliche Tragweite dieser Mindereffizienz hängt jedoch davon ab, wie häufig und über welche Zeitspannen eine reduzierte Kühlleistung bereitgestellt wird. Falls dies nur bei An- und Abfahrvorgängen des Ladevorgangs der Fall ist, so wird das Kühlsystem im Großteil der Betriebszeit in Vollast laufen. Aber bei Ladevorgängen, welche über längere Zeit oder dauerhaft eine signifikant reduzierte Kühlleistung erfordern, wird deutlich mehr elektrische Energie vom Kompressor abgerufen als theoretisch notwendig wäre. Bei der Abwärmenutzung wird diese jedoch zumindest als Wärmeenergie nutzbar.

### *Randbedingungen der Simulationen*

Durch die Ladeeigenschaften des Elektrofahrzeugs, die Auslegung der fahrzeugseitigen Kühlinfrastruktur sowie verschiedene technische und physikalische Vorgaben ergeben sich Randbedingungen für das Abwärmenutzungssystem, die mit den Konsortialpartnern aufgestellt wurden. Diese werden im Folgenden aufgelistet.

Bezeichnung	Wert
<b>Ladeeigenschaften Personenkraftwagen – Variante 1</b>	
Ladebereich	20 – 80% SOC <sup>1</sup>
Ladeleistung	270 kW
Wärmeleistung	12 kW
Ladetemperaturen	30 – 40°C
Vorlauftemperatur Kühlung	5°C
Kühlmedium	Wasser / Wasser-Glykol
Kühlkreislauf Druck	< 4 bar
Schlauchdurchmesser	¾ Zoll
<b>Ladeeigenschaften Sportwagen – Variante 2</b>	
Ladebereich	20 – 80% SOC
Ladeleistung	400 kW
Wärmeleistung	27,5 kW
Vorlauftemperatur Kühlung	-15°C
Kühlmedium	Wasser + Propylen-Glykol 50:50
Volumenstrom	50l/min
<b>Umgebung</b>	
Umgebungstemperatur	Klimadaten des Standorts
<b>Daten zu Pumpen</b>	
Pumpenwirkungsgrad Wasser Bei 75l Volumenstrom	47,4%
Pumpenwirkungsgrad Propylen-Glykol/Wasser	26,9%

**Tabelle 2: Festgelegte Randbedingungen aufgestellt mit den Konsortialpartnern**

Folgende weitere Bedingungen sind für die Simulationsmodelle relevant:

Bezeichnung	Wert	Erläuterung
Delta-T Verdampfer-Kühlkreis	5K	Die Temperaturdifferenz im Verdampfer zwischen Kältemittel und Kühlmittel (kalt)

<sup>1</sup> State of Charge: Ladezustand der Batterie relativ zur Batteriekapazität

Delta-T Kondensator-Wasserkreis	5K	Die Temperaturdifferenz im Kondensator zwischen Kältemittel und Wasser (warm)
Überhitzung Verdampfer	5K	
Unterkühlung Kondensator	0K	
Kompressor-Effizienz	Leistungs-Modell	Ausführliche Erläuterung im weiteren Verlauf der Dokumentation
<b>Kältekreislauf</b>		
Minimaler Druck	~ 1 bar	Verhinderung von Unterdruckleckage
Zustand Kältemittel an Saugseite Kompressor	Überhitzter Dampf	Verhinderung von Tröpfchenbildung im Kompressor

**Table 3: Weitere Randbedingungen der IPSEpro-Simulation**

Neben den vorherigen Randbedingungen verbleiben einige Parameter des Niedertemperatur-Abwärmenutzungssystems, welche im Laufe des Vorhabens definiert wurden, da sie eine Auswirkung auf Effizienz, Energieertrag und Wirtschaftlichkeit verschiedener Lösungsvarianten besitzen.

Bezeichnung	Erläuterung
<b>Ladeeigenschaften</b>	
Batteriekapazität des E-Fahrzeugs	Bestimmt die Dauer eines Ladezyklus und damit die Wärmemenge
<b>Kältekreislauf</b>	
Kältemittel	Beeinflusst Effizienz des Kompressors
<b>Kühlkreislauf</b>	
Volumen Kältepuffer	Bestimmt die mögliche Pufferdauer bzw. Pufferleistung
Pufferleistung	Bestimmt Aufteilung der Kältekapazität zwischen Verdampfer und Kältepuffer
<b>Wasserkreislauf</b>	
Massenstrom	
Nutzwärmtemperatur	Bestimmt das Temperaturniveau im Wasserkreislauf
Volumen Wärmespeicher	Bestimmt wie schnell sich das Wasser im Speicher erwärmt, welche Energiemenge speicherbar ist
Wärmeverlust Wärmespeicher	
Verwendungszweck Abwärme	z.B. Heizwasser, Brauchwasser, Einspeisung in Wärmenetz, andere Prozesswärme

Tabelle 4: Variierbare Parameter der IPSEpro-Simulation

Es zeigte sich, dass in Abhängigkeit der gewählten Abwärmesenke (Freie Kühlung oder Niedertemperatur-Abwärmennutzung) bestimmte Parameter ausschlaggebend für die Ergebnisse der späteren Gesamtsimulation sind. Im Fall der Freien Kühlung sind die Umgebungstemperatur und die Ladeleistungen nur für den Ladevorgang des Fahrzeugs relevant. Bei Nutzung der Niedertemperatur-Abwärme muss beim Einsatz von Kälte- oder Wärmepuffern neben dem Ladevorgang auch der Zeitraum zur Temperierung der Puffer simuliert werden. Deswegen muss zusätzlich auch die Nutzwärmtemperatur einbezogen werden.

#### *Entwicklung eines generalisiertem Kompressor-Polynom*

Für die Simulation des Kältekreislaufs mit der Software IPSEpro wurde ein generalisiertes Modell für die Kompressor-Effizienz erarbeitet. Dafür wurden zunächst mögliche Kältemittel untersucht und bewertet:

Kältemittel	GWP	Bewertung relevanter Eigenschaft/Information
R410a	2088	verzeichnet im Temperaturbereich von 0 – 60°C einen großen Druckanstieg auf über 30 bar → hohe Kompressorleistung notwendig
R454B	466	verzeichnet im Temperaturbereich von 0 – 60°C einen großen Druckanstieg auf über 30 bar → hohe Kompressorleistung notwendig
R454C	148	zeotropes Kältemittel (verändert sich beim Phasenwechsel)
R290 (Propan)	3	nur Modell(e) eines Herstellers verfügbar
R600a (Isobutan)	3	keine Scroll-Kompressoren verfügbar
R744 (Ammonia)	1	keine Scroll-Kompressoren verfügbar
R1234ze	<1	keine Scroll-Kompressoren verfügbar

Tabelle 5: Erkenntnisse zu untersuchte Kältemittel

Anschließend wurden Scroll-Kompressoren namhafter Kompressor-Hersteller (Bitzer, Danfoss, Emerson/Copeland) mit den entsprechenden Kältemittel gewählt. Dabei ist zu erwähnen, dass nur wenige mit natürlichen Kältemitteln bzw. mit niedrigem Treibhauspotential (Global Warming Potential – GWP) verfügbar sind. Von obigen Herstellern bot nur Emerson Scroll-Kompressoren für R290 (Propan) an. Außerdem waren zum Zeitpunkt der Simulationsarbeiten für die im Projekt vorgesehene

Kühlleistung (0 bis 12 kW) nicht von allen Herstellern passende Modelle verfügbar. Viele Modelle sind überdimensioniert. Mangels verfügbarer Daten und Angaben wurden die IPSEpro-Simulationen mit Fixed-Speed Scroll-Kompressoren durchgeführt. Diese liefern einen konstanten Volumenstrom und damit bei festen Verdampfungstemperaturen sowie eine bestimmte, fixierte Kühlleistung. Variable-Speed Kompressoren wären dahingehend freier, benötigen aber einen Frequenzumrichter. Daher wurde auf die Simulation solcher Modelle in IPSEpro verzichtet.

Für die untersuchten Scroll-Kompressor-Modelle geben die Hersteller **Performance-Daten in Form von Polynomen** an. Es werden dabei zehn Koeffizienten für ein Polynom dritten Grades in Abhängigkeit von zwei Variablen gegeben (AHRI Standard 540). Die Eingabewerte sind die Verflüssigungs- und Verdampfungstemperaturen ( $t_o$  bzw.  $t_c$ ) des Kreislaufs, in dem der Kompressor eingesetzt wird. Mit den Koeffizienten kann bei gegebenen Temperaturen unter anderem die **Leistungsaufnahme des Kompressors** berechnet werden. Aus mehreren ähnlichen Polynomen verschiedener Modelle/Hersteller ist ein generalisiertes Leistungs-Polynom für Scroll-Kompressoren der Leistungsklasse von einer Kühlleistung (0 bis 12 kW) mittelbar.

Zur Entwicklung des generalisierten Kompressor-Polynoms auf Basis verschiedener Modelle und Kältemittel, wurden reale Daten herangezogen werden. Die Kompressor-Modelle zu den verwendeten Polynomen sind in folgender Tabelle verzeichnet. Die Daten wurden den Online-Auswahltools der Hersteller entnommen (Copeland: <https://webapps.emerson.com/online-product-information/#>, zuletzt abgerufen 20.06.2022, Danfoss: <https://coolselectoronline.danfoss.com/>, zuletzt abgerufen 20.06.2022).

Hersteller	Modell	Kältemittel
Copeland (Polynom von °F auf °C umgerechnet)	ZH16KCU-TFM	R290
Danfoss	HLH068T2	R410a
Danfoss	HLM068T2	R22
Danfoss	MLZ045T4B	R455a
Danfoss	SZ110-6	R134a

Die allgemeine Form des zehnteiligen Polynoms zur Berechnung der Leistungsaufnahme lautet:

$$P = c_1 + c_2 t_o + c_3 t_c + c_4 t_o^2 + c_5 t_c t_o + c_6 t_c^2 + c_7 t_o^3 + c_8 t_c t_o^2 + c_9 t_o t_c^2 + c_{10} t_c^3$$

Dabei steht  $t_o$  für die Verdampfungstemperatur und  $t_c$  für die Verflüssigungstemperatur des Kältekreislaufs. Die ausgesuchten Polynome sind außerdem nur für eine Unterkühlung von 0K im Kondensator und eine Sauggasüberhitzung von 10K gültig. Die Koeffizienten  $c_1$  bis  $c_{10}$  charakterisieren schließlich das Kompressormodell und wurden mittels der Least-Squares-Methode auf Basis der Herstellerpolynome bestimmt. Zur Simulation in IPSEpro wurde ein entsprechendes Kompressormodell programmiert, hinsichtlich seiner physikalischen Konsistenz geprüft und als Basis genutzt.

Koeffizient		Koeffizient	
C1	0,00012988	C6	4,02E-05
C2	-0,00064941	C7	-0,01623523
C3	7,46E-06	C8	0,0001866
C4	0,00324705	C9	-0,00020082

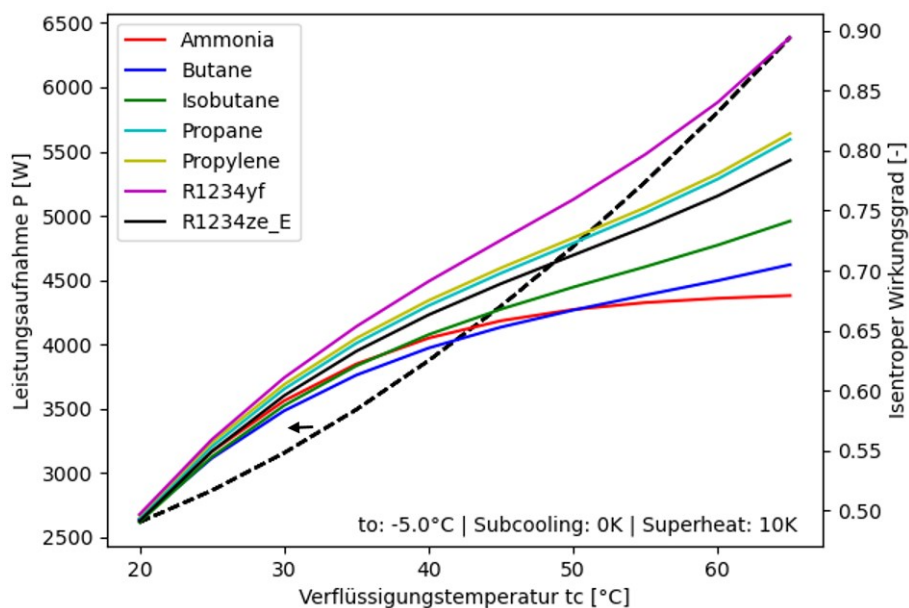


Im Folgenden wird das in Abbildung 5 dargestellte, gemittelte Polynom näher betrachtet. Dessen Koeffizienten sind in Tabelle 6 zu finden. Für verschiedene natürliche Kältemittel sowie zwei Hydrofluorolefine (HFO, ungesättigte Fluorkohlenwasserstoffe mit geringem GWP) wird die Kompressorleistung mit dem gemittelten Polynom berechnet und damit der isentrope Wirkungsgrad ermittelt. Dieser ergibt sich nach:

$$\eta = \frac{P_{real}}{P_{ideal}}$$

$P_{real}$  wird mit dem Leistungspolynom berechnet,  $P_{ideal}$  ist die in IPSEpro berechnete Kompressorleistung bei Vorgabe eines isentropen Wirkungsgrades von 100%. Über die ideale Kompressorleistung werden also die Eigenschaften des Kältemittels berücksichtigt.

In der Abbildung 7 ist für alle Kältemittel ein Anstieg des Wirkungsgrades mit der Verflüssigungstemperatur zu erkennen. Quantitativ stellen sich jedoch große Unterschiede zwischen den Kältemitteln heraus. Da das Leistungspolynom nur abhängig von Verdampfungs- und Verflüssigungstemperatur des Kältekreis ist, ergibt sich für die Leistungsaufnahme eine Kurve (gestrichelt).



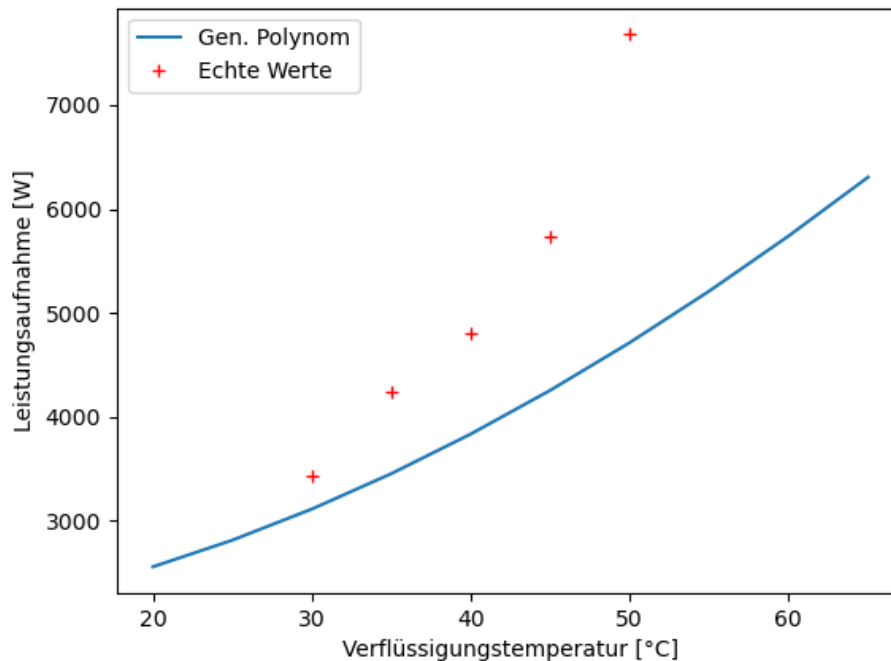
7: Isentroper Wirkungsgrad und Leistungsaufnahme mit gemitteltem Polynom

#### Vergleich generalisiertes Polynom mit tatsächlichen Werten

Es hat sich herausgestellt, dass die Kompressoren, auf deren Polynomen zur Leistungsaufnahme das generalisierte Polynom basiert, nur in genau einem Arbeitspunkt (also Wertepaar von Verflüssigungs- und Verdampfungstemperatur) die geforderte Kühlleistung liefern. Wenn die Temperaturen von diesem Punkt abweichen, wird die benötigte elektrische Leistung zwar korrekt berechnet, aber tatsächlich wird dieses Kompressormodell dann eine veränderte Kühlleistung zur Verfügung stellen.

Die Ursache hierfür ist, dass ein drehzahlkonstanter Kompressor einen festgelegten Massenstrom im Kältekreis umwälzt. Wenn die Verflüssigungstemperatur erhöht wird, steigt auch die Vorlauftemperatur zum Verdampfer. Bei gleichem Massenstrom reduziert sich jedoch die Wärmemenge, die vom Kältemittel aufgenommen werden kann. Eine Verbesserung kann mit einem drehzahlregeltem Kompressor erzielt werden.

Die folgende Darstellung zeigt erneut die Leistungsaufnahme nach dem generalisierten Kompressorpolynom und zusätzlich die Leistungsaufnahme verschiedener Kompressormodelle jeweils an dem Arbeitspunkt, an dem diese 12kW Kühlleistung liefern. Die Verdampfungstemperatur beträgt  $-10^{\circ}\text{C}$ .



8: Leistungsaufnahme bei variierender und konstanter Kühlleistung

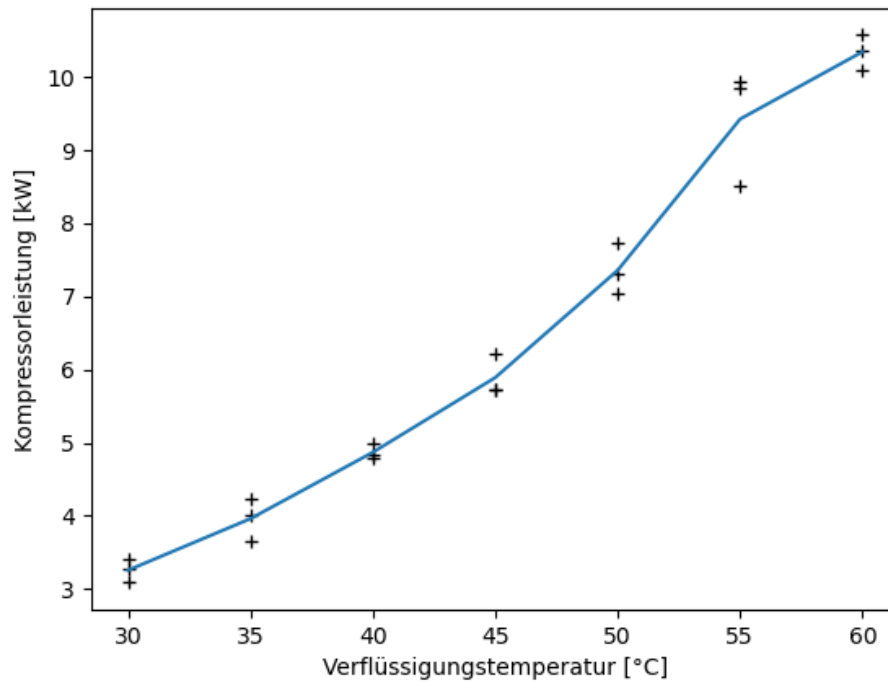
Anzunehmen, ein Kompressor würde über den gesamten Verlauf des generalisierten Polynoms eine Kühlleistung von 12 kW liefern können, zöge wie in der Abbildung deutlich sichtbar eine drastische Unterschätzung der tatsächlichen elektrischen Leistungsaufnahme nach sich.

#### *Tatsächliche Leistungsaufnahme bei konstanter Kühlleistung*

Da die Leistungsaufnahme wie im vorigen Abschnitt dargelegt bei konstanter Kühlleistung nicht mit einem einzelnen, generalisierten Polynom berechnet werden kann, wurden die Daten verschiedener Kompressormodelle herangezogen, welche bei den geforderten Verflüssigungs- und Verdampfungstemperaturen die nötige Kühlleistung liefern.

Ein Beispiel hierfür zeigt die nachfolgende Abbildung, welche für 12kW Kühlleistung bei variierenden Verflüssigungstemperaturen die aufgenommene Leistung der Kompressoren darstellt. Für jedes Temperaturniveau werden drei unterschiedliche Modelle herangezogen und die elektrische Leistung gemittelt. Für Modelle, welche nicht genau 12kW Kühlleistung liefern, wird die elektrische Leistung dafür linear interpoliert. Aufgrund der begrenzten Auswahl an Modellen variieren die genutzten Kältemittel von Punkt zu Punkt. Dies ermöglicht durch die Mittelung jedoch wiederum eine gewisse Verallgemeinerung der Resultate. Die Verdampfungstemperatur beträgt  $-10^{\circ}\text{C}$ .





9: Kompressorleistung bei 12kW Kühlleistung

In den meisten Fällen liegen die Kompressorleistungen verschiedener Modelle und Kältemittel bei einer Verflüssigungstemperatur nahe beieinander. Jedoch bedarf es für jede benötigte Kühlleistung eine erneute Recherche nach verfügbaren Modellen.

Um dennoch ein allgemeines Modell für die Kompressorleistung bei verschiedenen Kühlleistungen und Verflüssigungstemperaturen zu erhalten, wurde die Leistungsaufnahme weiterer Kompressoren für 8kW und 16kW Kühlkapazität ermittelt. Diese Werte zeigt die Abbildung 10. Um zu prüfen, ob ein allgemeines Modell sinnvoll ist, wurde die aufgenommene elektrische Leistung auf die jeweils bereitgestellte Kühlleistung bezogen (Abbildung **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Hier zeigte sich trotz weniger Ausreißer eine gute Übereinstimmung der bezogenen Kompressorleistung verschiedener Kühlkapazitäts-Level.

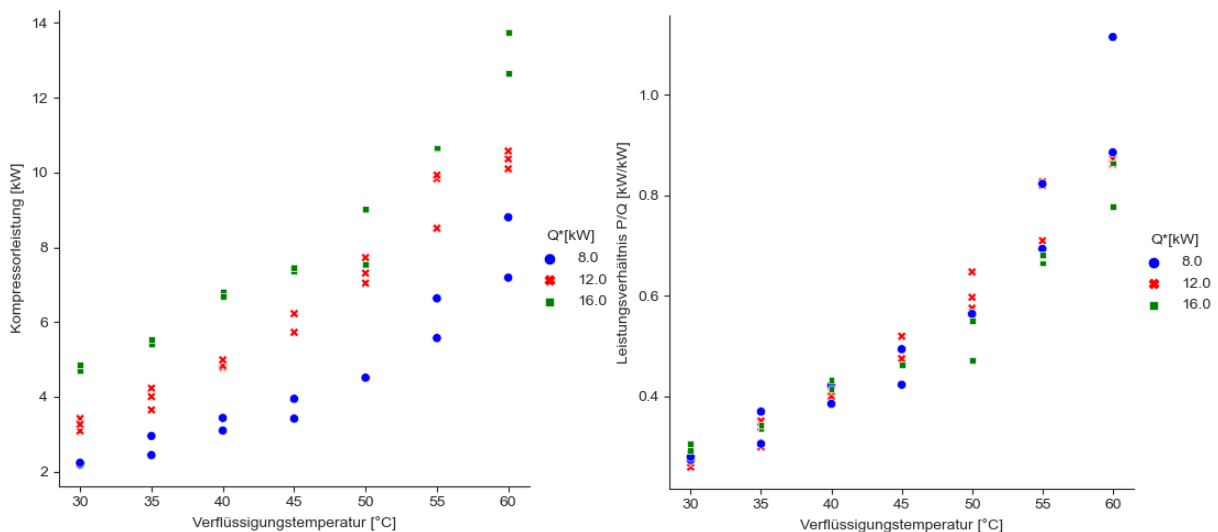


Abbildung 10: Abhängigkeit der Leistungsaufnahme bei unterschiedlichen Kühlleistungen (links) und des Verhältnisses der Kühlleistung zur bezogene Kompressorleistung in Abhängigkeit der Verflüssigungstemperatur (rechts)

Die Koeffizienten eines exponentiellen Modells für das Leistungsverhältnis ergeben sich mittels eines Least-Squares-Fit. Die resultierende Gleichung lautet:

$$\frac{P}{Q} = a e^{b t_c} \quad \text{mit } a = 0,08693985 \text{ und } b = 0,03839757$$

Dabei geht als einzige Einflussgröße die Verflüssigungstemperatur  $t_c$  in das Modell ein. Durch Vorgabe der Kühlleistung  $Q$  kann die elektrische Leistungsaufnahme des Kompressors berechnet werden. Abbildung 11 zeigt die sich daraus ergebende Kurven für verschiedene Kühlleistungen. Zum Vergleich sind die Datenpunkte aus Abbildung 10 eingeblendet.

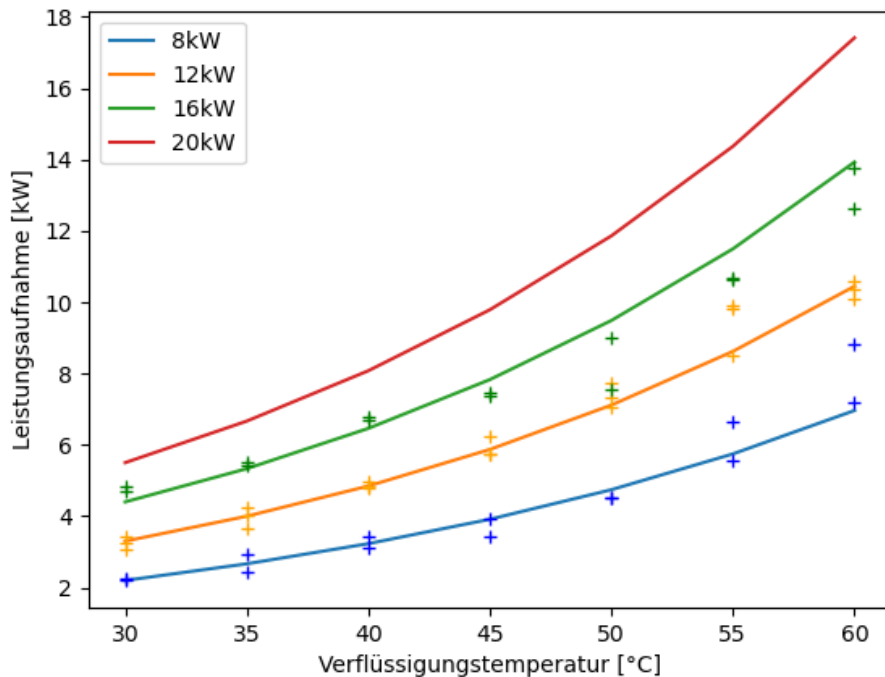


Abbildung 11: Leistungsaufnahme nach gefittetem Modell für  $t_o = -10^\circ\text{C}$

Für die analog berechneten Modellparameter für Verdampfungstemperaturen von  $-5^\circ\text{C}$  und  $-20^\circ\text{C}$  wurden ebenfalls die Parameter bestimmt:

Verdampfungstemperatur $t_o$ [°C]	Parameter a	Parameter b	Gültigkeitsbereich $t_c$ [°C]
-5	0,07133672	0,03869135	30 - 60
-10	0,08693985	0,03839757	30 - 60
-20	0,1510122	0,0347529	30 - 50

Tabelle 7: Modellparameter für Kompressorleistung

Die erarbeiteten generalisierten Modellparameter zeigen eine gute Übereinstimmung mit einzelnen Scroll-Verdichtern. Die Modelle können für die Simulation von Niedertemperatur-Abwärmekonzepten genutzt werden. Eine Abwärmennutzung macht jedoch nur Sinn, wenn ausreichend verwertbare Niedertemperatur-Abwärme ohne viel zusätzlichen apparativen Aufwand genutzt werden kann (siehe Abschnitt und das bei der gewählten Anzahl von Ladepunkten aus trotzdem zu Wartezeiten kommen würde).

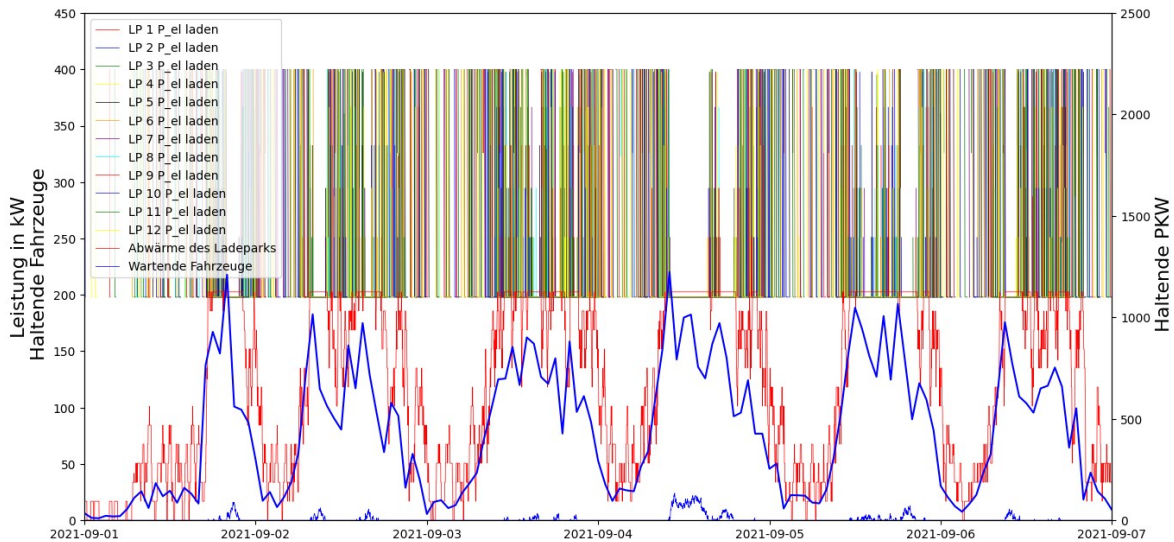


Abbildung 16: Exemplarisches Simulationsergebnis von sieben Tagen des Rasthofs Baden-Baden

Die quantitative Auswertung der Abwärme ergibt, dass bei einer mittleren Leistung von 147 kW eine Abwärme von 106 MWh für den September bzw. durchschnittlich 3,5 MWh pro Tag. Vergleichbare Werte ergaben die Simulationen für die anderen Raststätten.

Zu erwähnen ist an dieser Stelle, dass auf Grund der Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge eine hohe elektrische Leistung allein für die Ladevorgänge an der Raststätte benötigt wird ( $12 \times 400 \text{ kW} = 4,8 \text{ MW}$ ).

Konzepte zur Abwärmenutzung).

Weiterhin ist ein Vergleich mit den Simulationsarbeiten zur Niedertemperatur-Abwärmenutzung und der Freien Kühlung, die im CoolEV Projekt in AP6 und AP7 entwickelt wurde, aus folgenden Gründen schwierig:

- Wenn ein drehzahlkonstanter Verdichter genutzt wird, so stellt sich im gesamten Jahr die gleiche Kondensationstemperatur ein. Um also auch bei Außentemperaturen von bis zu  $40^\circ\text{C}$  kühlen zu können, muss eine Kondensatortemperatur  $> 40^\circ\text{C}$  angestrebt werden. Im Winter wird sich dann jedoch ein Temperaturdelta von  $>40^\circ\text{C}$  über dem Wärmetauscher ergeben, bzw. im Winter wäre eine Kondensatortemperatur nahe  $0^\circ\text{C}$  zu bevorzugen (geringere Kompressorleistung).
- Ebenso wäre eine direkte Kühlung des Kühlmittels im Winter zu bevorzugen: wozu das Kühlmittel auf ca.  $0^\circ\text{C}$  mittels einer Kompressionskältemaschine abkühlen, wenn diese Temperaturen bisweilen selbst von der Außentemperatur erreicht werden?
- Wenn für die Freie Kühlung ein drehzahl geregelter Verdichter eingesetzt wird, so wird die Vergleichbarkeit zum Alternativkonzept Niedertemperatur-Abwärmenutzung darunter leiden (da dort ein drehzahlkonstanter Verdichter genutzt wird).

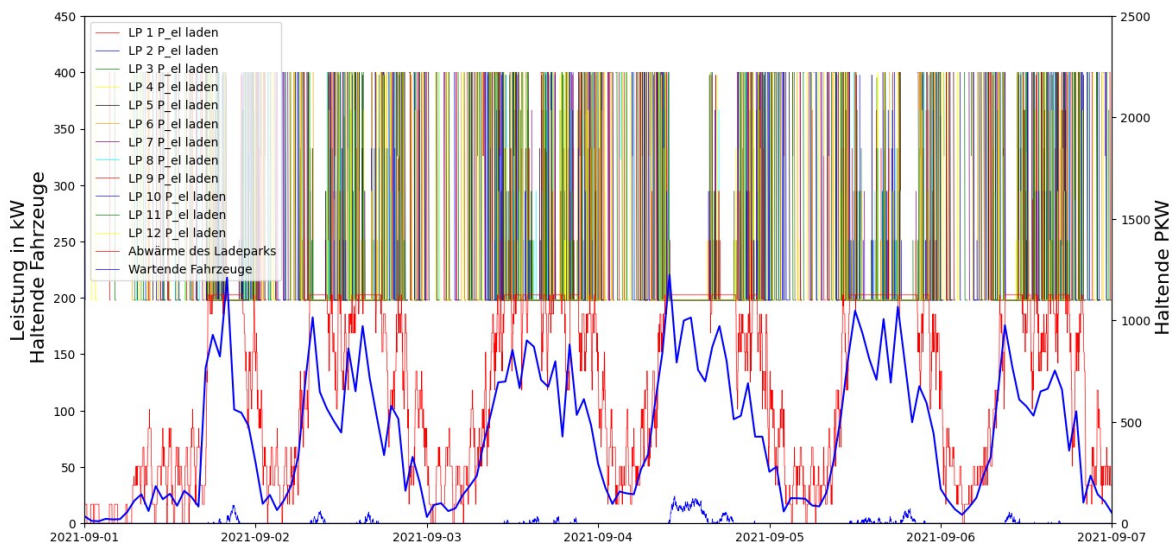
Daher wurde hierauf in der Folge verzichtet.

### Ladepkurven und Kühlleistungsbedarf

Die Ladeleistung von Elektrofahrzeugen folgt beim Aufladen der Batterie einer gewissen Ladekurve, d.h. es wird nicht dauerhaft von 0 bis 100% SoC (State of Charge) die maximale Ladeleistung abgerufen. Stattdessen sinkt diese typischerweise, je höher der Ladezustand der Batterie ist. Der genaue Verlauf ist eine Charakteristik des jeweiligen Elektrofahrzeug-Modells. Manche Verläufe zeigen einen

kontinuierlichen Abfall der Ladeleistung, bei anderen ist eine stufenweise Drosselung der Ladeleistung zu beobachten.

Der Kühlleistungsbedarf einer Batterie ist damit ebenfalls über die Ladedauer hinweg nicht konstant. Diese Tatsache wird in der späteren Ladeparksimulation beachtet. Um eine variable Kühlleistung trotz drehzahlkonstantem Kompressor bereitzustellen, wird ein angepasster Kältekreis mit Heißgas-Bypass simuliert (Siehe Abschnitt und das bei der gewählten Anzahl von Ladepunkten aus trotzdem zu Wartezeiten kommen würde.



**Abbildung 16: Exemplarisches Simulationsergebnis von sieben Tagen des Rasthofs Baden-Baden**

Die quantitative Auswertung der Abwärme ergibt, dass bei einer mittleren Leistung von 147 kW eine Abwärme von 106 MWh für den September bzw. durchschnittlich 3,5 MWh pro Tag. Vergleichbare Werte ergaben die Simulationen für die anderen Raststätten.

Zu erwähnen ist an dieser Stelle, dass auf Grund der Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge eine hohe elektrische Leistung allein für die Ladevorgänge an der Raststätte benötigt wird ( $12 \times 400 \text{ kW} = 4,8 \text{ MW}$ ).

Konzepte zur Abwärmenutzung).

Auch Fahrzeuge, die nicht im Leistungssegment des Ultraschnellladens liegen, können durch die Möglichkeit zum externen Kühlen profitieren. Einerseits kann dann die fahrzeuginterne Kühleinheit auf eine geringere Kühlleistung ausgelegt werden. Dadurch können Einsparungen beim Bauraum und dem Gewicht erzielt werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass sich das Ladeverhalten dieser Fahrzeuge verbessert. Durch die externe Kühlung der Batterie mit einer größeren Kühlleistung als interne Thermomanagementsysteme derzeit bereitstellen, könnte die Batterie besser temperiert und damit über einen längeren Zeitraum die maximale Ladeleistung aufrechterhalten werden. Dies resultiert in kürzere Ladezeiten der Nutzenden.

## Simulative Ermittlung zukünftiger Ladevorgänge

Um die zukünftigen Ladevorgänge an Raststätten simulativ zu ermitteln, wurde folgendes Konzept entwickelt:

1. Ermittlung der Anzahl der autobahnnutzenden Fahrzeuge
2. Bestimmung der räumlichen Grenzen der Tank- und Raststationen entlang den Autobahnen
3. Differenzierung der Fahrzeuge bzgl. Nutzung der Tank- und Raststationen
4. Festlegung der Marktdurchdringung von batterieelektrischen Fahrzeugen – insbesondere mit einer externen Kühlmöglichkeit
5. Verteilung der zu ladenden Energiemengen
6. Simulation der Ladevorgänge

### *Auswahl und Aufbereitung von Verkehrsdaten*

Es wurden Verkehrsdaten vom ADAC erworben, um daraus die Anzahl und zeitliche Verteilung von Tankvorgängen an Raststätten zu ermitteln. Anhand von Annahmen bzw. unterschiedlichen Szenarien zur zukünftigen Durchdringung der gesamten Fahrzeugflotte mit E-Fahrzeugen wird daraus die zeitliche Verteilung von Schnellladevorgängen an dem simulierten Ladepark ermittelt.

Als erstes wurden die relevante Regionen für die Datenauswahl bestimmt. Hierfür wurde untersucht wo aktuellen große Ladeparks liegen. Dazu wurde auf der Website <https://www.schnellladepark.app/live/index.php#> die interaktive Karte studiert. In Baden-Württemberg sind die relevanten Ladeparks insbesondere um Stuttgart, bei Heilbronn und Ulm. In Bayern im Raum München sowie an der A8 westlich von Augsburg (60 Ladesäulen). Ansonsten gibt es in Deutschland eine Konzentration von Ladeinfrastruktur im Ruhrgebiet mit einem Ladepark bei Kamen (52 Ladesäulen). Es wurde anhand der Daten des Kraftfahrt Bundesamt<sup>2</sup> die aktuelle Durchdringung von E-Fahrzeugen vom PKW-Bestand analysiert. Demnach hat Hamburg mit einem gemeinsamen Anteil der BEV und Plug-In Hybride von 5,5% an allen Kfz die höchste relative Durchdringung (absolut rund 44.700 Fahrzeuge, Stand 01.01.2023). Absolut führen NRW, Bayern und Baden-Württemberg. Für die Simulation werden auch Daten der Zählstellen, die sich an den Autobahnen befinden, verwendet. Diese werden von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) bereitgestellt<sup>3</sup>. Außerdem wurden Positionen von Raststätten nach OpenStreetMap Daten ermittelt. Dabei ergab die Auswirkung, dass in Baden-Württemberg 74 und in Bayern 125 vorhanden sind (Daten von Geofabrik). Auf Grund der vorherigen Daten wurde entsprechend der verfügbaren Mittel ein Zeitraum von 9 Monaten (August 2021 bis einschließlich April 2022) und räumlich gesehen in großen Teilen von Baden-Württemberg sowie im Westen von Bayern Verkehrsdaten von Fahrzeugbewegungen beschafft. In der folgenden Karte ist die Auswahl blau umrahmt dargestellt. Die orangeroten Punkte markieren Raststätten an Autobahnen und Bundesstraßen.

<sup>2</sup> „Bestand an Personenkraftwagen am 1. Januar 2023 nach Bundesländern und ausgewählten Kraftstoffarten“: [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2023/2023\\_b\\_umwelt\\_tabellen.html?nn=3525028&fromStatistic=3525028&yearFilter=2023&fromStatistic=3525028&yearFilter=2023](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2023/2023_b_umwelt_tabellen.html?nn=3525028&fromStatistic=3525028&yearFilter=2023&fromStatistic=3525028&yearFilter=2023), abgerufen am 10.05.2023

<sup>3</sup> „Automatische Dauerzählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen“: <https://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Verkehrszaehlung.html?nn=1817946>, abgerufen am 27.06.2023



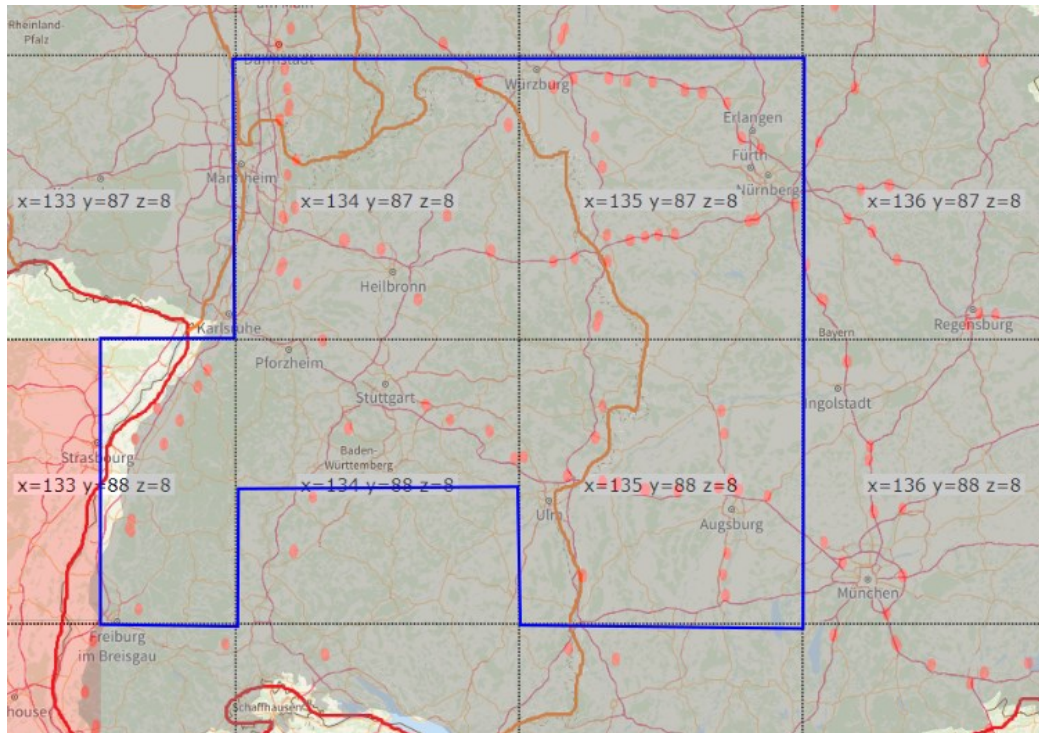


Abbildung 12: Geographische Begrenzung der beschafften Verkehrsdaten

Für die Weiterverarbeitung der Bewegungsdaten wurden über Open Street Map öffentlich verfügbare Informationen der Tank- und Raststationen entlang der Autobahnen abgerufen. Insbesondere handelt es sich dabei um die Geokoordinaten der Umrandung dieser Einrichtungen und deren offizielle Bezeichnung.

Mittels Geodatenanalyse wird für jede einzelne Fahrt ermittelt, ob diese auf einer der untersuchten Autobahnen stattfindet, und wenn ja, ob die Nutzenden der ADAC-App eine Tank- und Raststation ansteuern oder an einer solchen vorbeifahren. Die einzelnen Fälle werden für alle aufgezeichneten Fahrten summiert und in einer Zeitreihe mit stündlicher Auflösung gespeichert. Für jede Tank- und Raststation entsteht so ein zeitaufgelöster Datensatz mit der Anzahl vorbeifahrender und anhaltender Nutzender.

Da nicht alle Straßenverkehrsteilnehmenden, welche auf deutschen Autobahnen unterwegs sind, die ADAC-App nutzen oder die Standortermittlung aktiviert haben, geben die ermittelten Zeitreihenwerte nur einen kleinen Anteil der Fahrten wieder.

Mit Hilfe von Zählstellendaten des BASt lassen sich die Zahlen von ADAC-Zeitreibendaten allerdings skalieren. Für jede untersuchte Tank- und Rastanlage werden die nächstgelegenen Zählstellen zur Rate gezogen und aus deren stündlich aufgelösten Zählwerten fahrzeuggruppenspezifisch (PKW, LKW, Bus, ...) mittlere Fahrzeugzahlen auf dem Autobahnabschnitt ermittelt, die dann zur Skalierung der ADAC-Daten genutzt werden.

So ergeben sich nun genauere Informationen darüber, wie viele Fahrzeuge Tank- und Rasthöfe ansteuern. Im Folgenden wird die Gruppe der PKWs näher betrachtet. Die Verteilung dieser Gruppe in Abhängigkeit der Tageszeit wird in der nachfolgenden Abbildung für einen Zeitraum im September 2021 exemplarisch gezeigt.

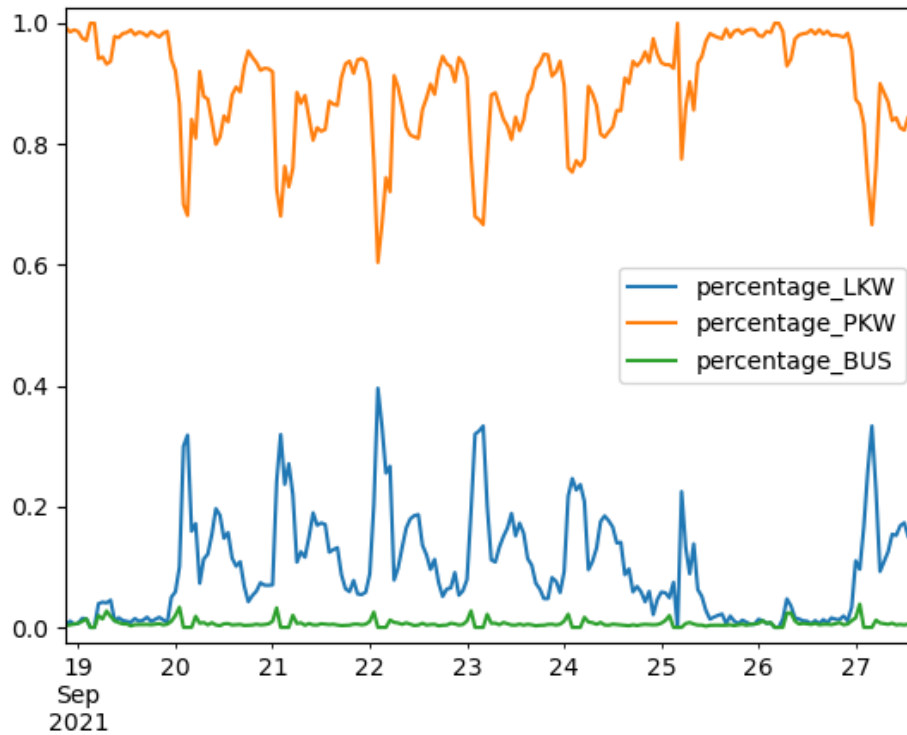


Abbildung 13: Verteilung der Nutzergruppen in Abhängigkeit der Tageszeit den September 2021

Bei der Analyse wurden verschiedene Annahmen getroffen: zum einen wurde auf Grund der rechenintensiven Auswertung der Daten (ca. 1,8 Milliarden Datenpunkte pro Monat). Darauf verzichtet, die Fahrtrichtung der Nutzenden in die Analyse miteinfließen zu lassen. Rasthöfe, die sich auf beide Fahrtrichtung aufteilen, werden demzufolge auch zusammengezählt. Exemplarisch wird in der Auswertung auf die A5 zwischen Karlsruhe und Freiburg eingegangen.

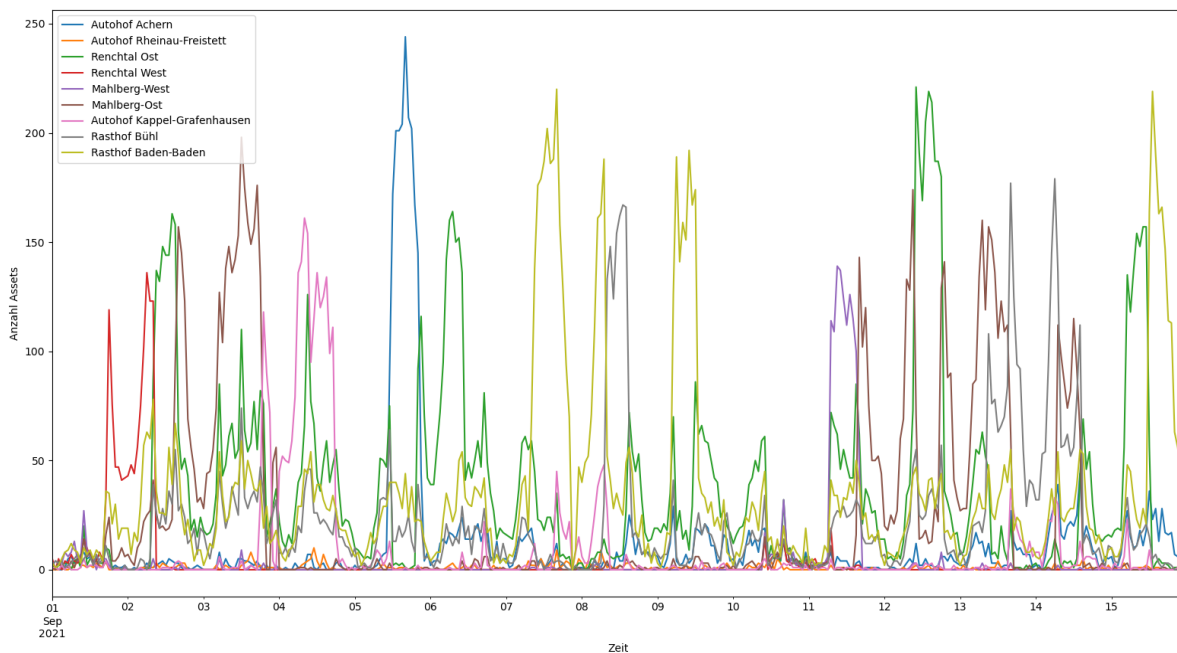


Abbildung 14: Anzahl der Fahrzeuge, die über die ADAC-App erfasst wurden

Anhand von Annahmen bzw. unterschiedlichen Szenarien zur zukünftigen Durchdringung der gesamten Fahrzeugflotte mit E-Fahrzeugen wird daraus die zeitliche Verteilung von Schnellladevorgängen an dem simulierten Ladepark ermittelt.

Bei der Verwendung der Daten ist zu beachten, dass man nur begrenzt vom aktuellen Fahrverhalten von konventionellen Fahrzeugen auf die Nutzung zukünftiger E-Fahrzeuge mit Ultraschnellladefunktion und insbesondere deren Ladevorgänge schließen kann. Gründe für Verfälschungseffekte sind:

- E-Fahrzeuge können zu Hause oder am Arbeitsplatz geladen werden  
-> E-Autos werden seltener an öffentlichen Ladesäulen geladen  
-> **Überschätzung** der Anzahl der Ladevorgänge
- konventionellen Fahrzeugen haben größere Reichweiten und müssen seltener tanken als E-Autos laden  
-> **Unterschätzung** der Anzahl der Ladevorgänge.

#### *Integration der Prozesssimulation in die Ladeparksimulation*

Um die in IPSEpro durchgeführte Prozesssimulationen mit der Python-basierte Ladeparksimulation zu verbinden, wurden im Vorhinein verschiedene Szenarien in der Prozesssimulation durchgerechnet. Aus den Ergebnissen wird eine Lookup-Table erstellt. Diese ermöglicht mit stationären Werten eine Langzeitsimulation durchzuführen. Hierfür muss ggf. nur zwischen vorhandenen Tabellenwerten interpoliert werden. Unter Berücksichtigung der bisherigen Implementierung der Ladeparksimulation, welche mit minütlichen Zeitschritten arbeitet und zu diesen jeweils die abgegebene Nutzwärme und die Kältepuffer-Temperatur berechnet, erfolgte die Integration der Simulationsergebnisse wie folgt:

1. IPSEpro werden die Eckdaten (elektrische Leistung, bereitgestellte Wärme und Kompressorwirkungsgrad) des Prozesses berechnet
2. Berechnung des instationären Verhaltens von Kältepuffer und Wärmespeicher wird in der Ladeparksimulation durchgeführt

#### *Durchführung der Ladeparksimulation*

Vor der Durchführung der Ladeparksimulation erfolgte eine Schätzung der erwarteten Wärmemengen. Hierfür wurden Annahmen aus dem Projekt FastCharge für 2030 verwendet. Eckdaten dafür sind, dass vom zukünftigen deutschen Elektrofahrzeugbestand in Höhe von 6 Millionen 55% der benötigten Lademengen an Schnelllader nachgeladen werden. Dafür sind 3 Schnellladungen pro Monat und pro Fahrzeug notwendig. Dies ergibt 119 Millionen Ladevorgänge pro Jahr. Basieren auf der ersten Variante (Personenkraftwagen) würden 958 GWh und bei der zweiten Variante (Sportwagen) 2022 GWh Abwärme auf einem Nutztemperaturniveau von 45 °C entstehen. Damit könnten etwa 68.000 bzw. 180.000 Wohneinheiten mit einer durchschnittlichen Wohnfläche von 150 m<sup>2</sup>, der Effizienzklasse A (50 kWh / m<sup>2</sup> a) bilanziell versorgt werden können.

Für die Ladeparksimulation war zunächst die Ankunftssimulation notwendig. Diese erfolgte mit den aufbereiteten Verkehrsdaten. Die nachfolgenden Ergebnisse sind auf Basis der Daten zum Rasthof Baden-Baden. Für jedes simulierte Fahrzeug wurde eine Lademenge, die nachgeladen werden sollte, bestimmt. Hierfür wurde Erkenntnissen aus der externen Arbeit von F. Reitmeier<sup>4</sup> verwendet. In dieser

---

<sup>4</sup> Masterarbeit „Dimensionierung von Tankstellen an der A96 bei vollständiger Elektrifizierung des derzeitigen deutschen PKW-Straßenverkehrs“, Reitmair, F., Dornbirn, Fachhochschule Vorarlberg, 2018



Arbeit wurden konventionelle Tankvorgänge aufgezeichnet. Die getankten Energiemengen wurden äquivalent zu ladende Energiemenge umgerechnet. Die kumulative Verteilung ist in Abbildung 15 dargestellt. Daraus wurde ein Verhalten der Nutzer\*innen geschlussfolgert, dass einer Normalverteilung entspricht. Eine solche Normalverteilung wurde auch für die Zufallsfunktion, die zur Bestimmung der Lademengen verwendet wurde, ausgewählt. Als Grenzen wurden dabei entsprechend den marktverfügbaren Elektrofahrzeugen jedoch 1 kWh als kleinster und 100 kWh als höchster Wert festgelegt.

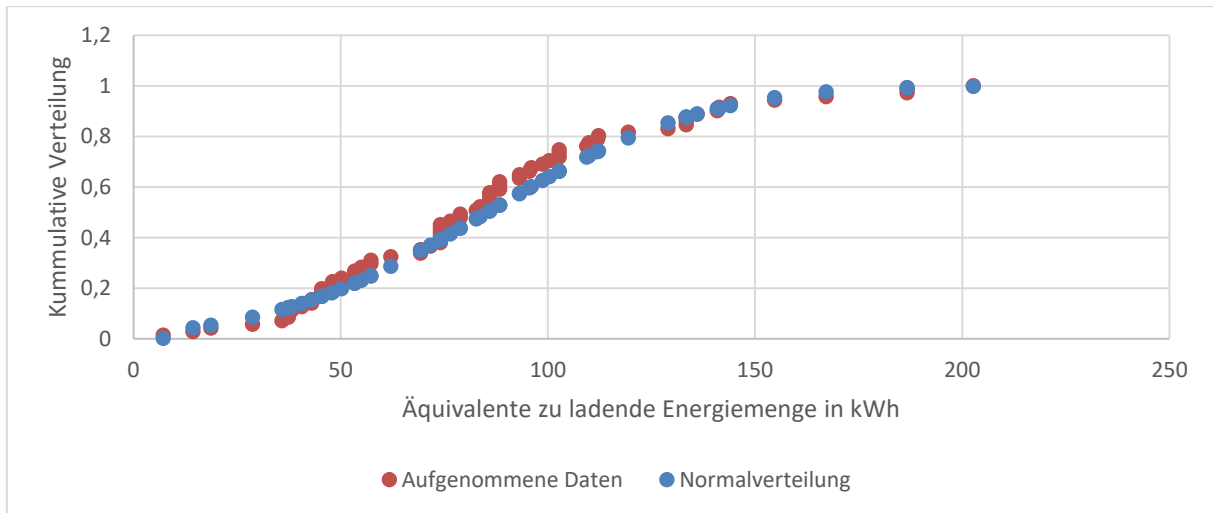


Abbildung 15: Gefittete Normalverteilung basieren auf den Daten aus der Masterarbeit

Anschließend erfolgte die Verteilung der Ladevorgänge auf 12 Ladepunkte. Es wurde angenommen, dass 5% der Ladevorgänge an einer Schnellladestation mit externer Kühlmöglichkeit stattfinden. Diese Größe entspricht der erwarteten Marktdurchdringung 2030.

Anhand der durchgeführten Ladeparksimulation (siehe Abbildung 16) ist ersichtlich, wie die Abwärme insbesondere tagsüber anfällt und das bei der gewählten Anzahl von Ladepunkten aus trotzdem zu Wartezeiten kommen würde.

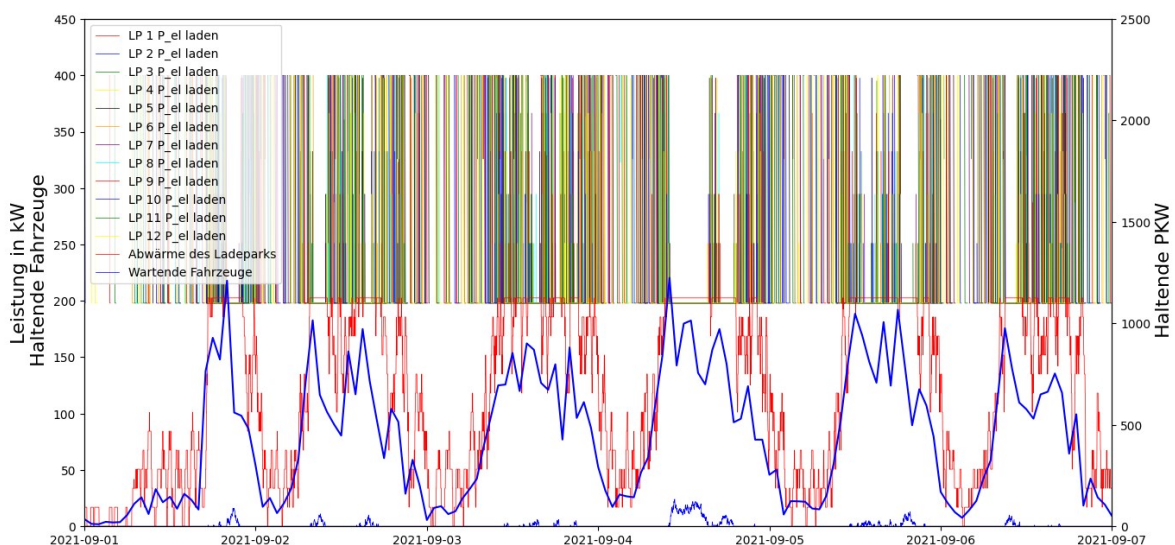


Abbildung 16: Exemplarisches Simulationsergebnis von sieben Tagen des Rasthofs Baden-Baden

Die quantitative Auswertung der Abwärme ergibt, dass bei einer mittleren Leistung von 147 kW eine Abwärme von 106 MWh für den September bzw. durchschnittlich 3,5 MWh pro Tag. Vergleichbare Werte ergaben die Simulationen für die anderen Raststätten.

Zu erwähnen ist an dieser Stelle, dass auf Grund der Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge eine hohe elektrische Leistung allein für die Ladevorgänge an der Raststätte benötigt wird ( $12 \times 400 \text{ kW} = 4,8 \text{ MW}$ ).

### **Konzepte zur Abwärmenutzung**

Ein weiteres Ziel des Teilvorhabens war, Konzepte für die Nutzung der mittels externer Kühlung gewonnenen Niedertemperatur-Abwärme zu entwickeln. Es galt also, Prozesse und Anwendungen zu finden, für welche die Kombination aus bereitgestellter Abwärmemenge und deren Temperaturniveau sinnvoll ist. Primäres Ziel des Projektes CoolEV war es eine einheitliche und übergeordnete Ladetechnologie für das Ultraschnellladen von Fahrzeugen zu entwickeln, die sich sowohl Sportwagen aus dem Premium-Segment als auch für herkömmliche Personenkraftwagen eignet. Früh im Projektverlauf zeigte sich, dass aufgrund der eingesetzten Li-Ionen-Batterietechnologie Batterie-Temperaturen kleiner  $10 \text{ °C}$  im Personenkraftwagensegment und kleiner  $-10 \text{ °C}$  im Sportwagenbereich angestrebt werden sollten. Daher stellte sich die Frage, inwiefern überhaupt Geschäftsmodelle und Konzepte zur Abwärmenutzung abgeleitet werden können. In der Folge werden die wesentlichen Merkmale des CoolEV-Ladekonzepts und mögliche Optionen zur Abwärmenutzung eingehender beschrieben.

### *Merkmale des Cool-EV-Ladekonzepts*

An dieser Stelle ist es geboten, auf wesentliche Merkmale des von den Ladebedingungen im CoolEV-Projekt bestimmten Kühlkonzepts hinzuweisen. Für das Bereitstellen von  $-10 \text{ °C}$  (bei Sportwagen) und  $+10 \text{ °C}$  (bei Personenkraftwagen) in der Batterie während des Ultraschnellladevorgangs müssen die von der Ladesäule ausgehenden Vorlauftemperaturen im Kühlkreislauf jeweils mindestens 5 K geringer eingestellt werden. Durch die geringe Vorlauftemperatur von  $-15 \text{ °C}$  zum E-Sportwagen hin, ergibt sich eine Verdampfungstemperatur von etwa  $-20 \text{ °C}$ . Beim Personenwagen-Ladekonzept hingegen liegt die Verdampfungstemperatur bereits bei  $-5 \text{ °C}$ .

Dabei soll die Möglichkeit des Ultraschnellladens dem Kunden stets zur Verfügung stehen, im Winter, wenn es außen kalt ist genauso wie im Sommer, wenn teils  $45 \text{ °C}$  im Schatten in Folge des Klimawandels zu erwarten sind. Dies ist, wie weiter oben erwähnt, aufgrund der niedrigen Verdampfungstemperatur des E-Sportwagen-Konzepts schwer umsetzbar und mit hohem Strombedarf verbunden. Die erforderliche elektrische Energie würde im Fall einer Abwärmenutzung zumindest weiterverwertet, bei der freien Kühlung hingegen geht sie als Teil der Abwärme an die Umwelt verloren.

Der Fokus liegt also auf einer robusten und zuverlässigen Ultraschnellladetechnologie mit freier Kühlung an die Umgebung. Als Zusatzoption kann eine Abwärmenutzung ins Auge gefasst werden, wenn diese wirtschaftlich und apparateseitig sinnvoll ist. Für ein rasches Technologie-Rollout ist jedoch eine einheitliche Lösung von Vorteil, die sowohl stand-alone als auch in einem Schnellladepark eingesetzt werden kann. Daher sollte jede Ladesäule über die Möglichkeit zur freien Kühlung an die Umgebung verfügen, um bei einer Beladung von bspw.  $50 \text{ kWh}_{\text{el}}$  rund  $5 \text{ kWh}_{\text{th}}$  (ca. 10 % der elektrisch gespeicherten Energie fallen als Abwärme an) Abwärme abzugeben. Eine einheitliche Ladesäulentechnologie für stand-alone und einen Ladepark setzt daher voraus, dass eine weitere Option zur Niedertemperatur-Abwärmeübertragung apparativ integriert wird, die jedoch nur dann zum

Einsatz kommt, wenn eine Abwärmenutzung möglich ist. Als Backup wird in jedem Fall die freie Kühlung benötigt.

Unter der Annahme, dass eine solche Option zur Niedertemperatur-Abwärmeübertragung wirtschaftlich und apparativ möglich wäre, muss ein Kälte-/Wärmepumpenprozess beim Sportwagen-Konzept also immer einen um 15 K erhöhten Temperaturhub bewältigen, um dasselbe Abwärme-Temperaturniveau wie im Fall des Personenkraftwagens zu erreichen. Damit ist auch die im Kälte-/Wärmepumpenprozess erreichbare maximale Temperatur geringer als im Personenkraftwagen-Konzept und der Bedarf an Kompressorleistung bei gleichem Nutzwärmetemperaturniveau deutlich größer.

Weitere Nachteile ergeben sich durch das Kühlmittel Propylen-Glykol/Wasser oder eines vergleichbaren Kühlmittels, welches für das Ultraschnellladen des E-Sportwagens für die Bereitstellung von solch niedrigen Vorlauftemperaturen in Richtung Batterie benötigt wird. Da nicht alle Dichtungen für dieses Kühlmittel geeignet sind, ist es wahrscheinlich das andere E-Fahrzeuge nicht die externe Kühlung an Ladesäulen nutzen können, welche das Sportwagen-Ladekonzept verfolgt. Dies schränkt die Nutzbarkeit dieses Konzepts stark ein. Weiterhin werden der Kühlmittelvor- und Rücklauf bei jedem Ladevorgang mit Fahrzeug voraussichtlich vom Kunden selbst an das Fahrzeug angekoppelt und wieder gelöst. Somit stellt sich die Frage nach einer hinreichend hohen Betriebssicherheit, um Schaden von der Umwelt, vom Bediener oder vom Fahrzeug fernzuhalten. Im Fall des Personenwagen-Ladekonzepts könnte auf ein rein wasserbasiertes Kühl-Konzept der Batterie gesetzt werden, wobei auch hier Fragen hinsichtlich Einfrierens im Winter oder auf der kalten Seite des Kälte-/Wärmepumpenverdampfers technisch geklärt werden müssen. Um eine Ladesäule für beide Kühlmedien bereitzustellen bedarf es bspw. zweier Verdampfer und zwei Schlauchverbindungen zum Fahrzeug (einmal Verdampfer mit Propylen-Glykol/Wasser als Kühlmittel und einmal Verdampfer mit Wasser als Kühlmittel). Ein dynamischer Wechsel des Kühlmittels abhängig von ankommenden E-Fahrzeug mit einem Kühlmittelkreis ist technisch nicht einfach zu bewerkstelligen. In diesem Fall müsste sowohl Ladesäulenseitig als auch im E-Fahrzeug vor und nach der Nutzung im Kühlmittelkreis vollständig evakuiert werden. Ansonsten würde das rein auf Wasser basierende Kühlkonzept kontaminiert werden.

#### *Anwendungsoptionen für Niedertemperatur-Abwärmenutzung*

Handelsübliche Wärmepumpen für die Bereitstellung von Heizenergie im Gebäudesektor erzeugen Nutzwärmetemperaturen von bis ca. 60 °C. Ab 55 °C bzw. eher ab 60 °C wird das Wachstum von Legionellenbesiedlungen in Brauchwassersystemen verhindert. Daher sind konventionelle Wärmepumpensysteme für Wohnimmobilien für solche Temperaturen konzipiert.

Wie bereits zuvor erläutert, ist eine Nutzung der Abwärme aus dem Ultraschnellladeprozess schwierig, da die verfügbaren Temperaturen auf der heißen Seite des Kältemittelkreislaufs (im Kondensator) i.d.R. bei ca. 30 °C (max. bei bis 45 °C, wenn hohe Außentemperaturen im Sommer vorherrschen) geringer sind als die im Markt etablierter Wärmepumpen. Weiterhin ist aufgrund der niedrigen Temperaturen von bis ca. -20 °C im Fall des Ultraschnellladens von E-Sportwagen und ca. 0 °C im Fall des Ultraschnellladens von E-Personenkraftwagen auf der kalten Seite des Kältemittelkreislaufs (im Verdampfer) das Temperaturniveau bereits sehr niedrig für eine nachgelagerte Abwärmenutzung. Somit ergibt sich ein hoher Aufwand für den Kompressor, um eine Erhitzung auf ein Brauchwasser-Temperaturniveau von ca. 60 °C zu erreichen. Anhand dieser Rahmenbedingungen wird eine Nutzung der entstehenden Abwärmen beim Ultraschnellladen für Brauchwasserzwecke nicht empfohlen.

Darüber hinaus können aber weitere Heizaufgaben mit den Abwärmern aus dem Ultraschnellladen erfüllt werden, wie die nachfolgende Auflistung zeigt. Dabei ist die mögliche Einbindung von Niedertemperatur-Abwärme immer an die Möglichkeiten vor Ort also an den jeweiligen Standort gebunden. Ob daraus tatsächlich ein Business-Case entsteht hängt zudem von der Auslastung der Ultraschnellladesäule oder vom entsprechenden Ladepark ab. Letztendlich entstehen pro Ultraschnellladevorgang rund 10 % Abwärme. Ob sich der apparative Mehraufwand für die Integration einer Abwärmenutzung lohnt muss von Fall zu Fall geprüft werden.

### Heizwärme modern (Flächenheizung)

Die gewonnene Abwärme kann lokal zum Beheizen von Wohn- oder Geschäftsräumen genutzt werden, beispielsweise für eine Raststätte oder (bei Ladeparks im städtischen Raum) für angrenzende Wohngebäude. Moderne Flächenheizungen (z.B. Fußbodenheizung) können aufgrund der großen Fläche der Heizkörper mit geringen Vorlauftemperaturen im Bereich von 40°C betrieben werden<sup>5</sup>. Ältere Heizkörper hingegen bedeuten deutlich höhere Vorlauftemperaturen aufwärts von 60°C bis zu 90°C. Diese Temperaturen sind im Kältekreis der Ladesäule nicht ohne große Effizienzeinbußen erreichbar, da der COP<sup>6</sup> durch die große Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer und Kondensator gering ist (COP < 2). In Kombination mit einer weiteren Wärmepumpe (zweistufiger Betrieb) oder einem Heizkessel können die erforderlichen Vorlauftemperaturen dennoch erreicht werden und die erforderliche Heizleistung eines Kessels durch die eingespeiste Abwärme reduziert werden (im Vergleich zum konventionellen Betrieb).

Nur bei einer entsprechend hohen Auslastung eines Ultraschnellladeparks wird eine direkte Nutzung der Niedertemperaturabwärme wirtschaftlich sinnvoll, da der apparative Mehraufwand in den Anschaffungskosten und auch während des Betriebs berücksichtigt werden muss.

### Kalte Nahwärme

Kalte Nahwärmenetze werden i.d.R. in einem Temperaturbereich von rund -5 bis 20 °C betrieben (je nach genutzter Wärmequelle, bspw. Erdsonden). Das Temperaturniveau ist für die Beheizung von Wohn- oder Geschäftsräumen deutlich zu gering, weshalb angeschlossene Gebäude über eine eigenständige Wärmepumpe verfügen und die kalte Nahwärme als Wärmequelle genutzt wird. Grundsätzlich kann mit einem Ultraschnellladepark also Niedertemperatur-Abwärme an ein kaltes Nahwärmenetz abgegeben werden. Ein zusätzlicher Pufferspeicher ist nicht unbedingt nötig, da die Pufferkapazität des Netzes diese Aufgabe übernehmen kann. Mit Einbußen bei der Ultraschnellladeschwindigkeit könnte der Kühlmittelkreislauf zur Batteriekühlung sogar direkt (also ohne Kalttemperaturkreislauf) an das kalte Nahwärmenetz angeschlossen werden. Dies muss jedoch im Einklang mit der Batterietechnologie stehen oder aber führt zu verlängerten Ladezeiten.

Ein solche Verknüpfung ist nur bei einer örtlichen Nähe von Ladepark und kaltem Nahwärmenetz zielführend. Kalte Nahwärmenetze werden in besiedelten Arealen entstehen. Üblicherweise parken dort Fahrzeuge über einen längeren Zeitraum. Ein Ultraschnellladen ist nicht zwingend erforderlich. Es sollten sich in Zukunft daher nur wenig wirtschaftlich sinnvolle Möglichkeiten ergeben.

---

<sup>5</sup> „Vorlauftemperatur: Fußbodenheizung & Heizanlage richtig einstellen“:

<https://www.vaillant.de/heizung/heizung-verstehen/tipps-rund-um-ihre-heizung/vorlauf-rucklauftemperatur/>, abgerufen am 22.07.2022

<sup>6</sup> COP: Coefficient of Performance. Verhältnis von abgegebener Nutzleistung (Kälte oder Wärme) zu aufgewandter elektrischer Leistung.

### Fermenter in Biogasanlagen

Biogasanlagen müssen für die Gärprozesse im Fermenter eine Temperatur von etwa 40 °C sicherstellen (auch im Winter). Typischerweise wird das erzeugte Biogas vor Ort in einem BHKW verbrannt und der Fermenter mit der dabei entstehenden Wärme geheizt. Da für die verbleibende Abwärme aus dem BHKW nicht immer Verbraucher lokal verfügbar sind und das Aufbauen von Wärmeverteilernetzen kostenintensiv ist, kommen teilweise auch sogenannte Satteliten-BHKW zum Einsatz. Diese befinden sich näher an den Wärmeverbrauchern und werden über eine Gasleitung von der Biogasanlage versorgt. In diesem Fall kann die vom Fermenter benötigte Wärme durch die Ladesäulenabwärme bereitgestellt werden. Nach Klingbeil<sup>7</sup> beträgt der Wärmebedarf einer 75-kW (90 kW<sub>th</sub>) Biogasanlage 55 kW, zur Spitzenlast im Winter bis zu 74 kW.

Dieses Konzept ist nur im ländlichen Raum anwendbar. Es ist fraglich, ob dort Ladeparks mit nennenswerter Abwärmeleistung entstehen werden. Zudem muss die räumliche Nähe zu der Biogasanlage gegeben sein, da es bei längeren Transportwegen der Ladepark-Abwärme zu Verlusten kommen kann. Weiterhin sind Wärmeleitungen, wie oben erwähnt, teuer. Für Biogasanlagen in der Nähe von Autobahnraststätten mit angeschlossenem Schnellladepark stellt dieser Anwendungsfall jedoch prinzipiell eine sinnvolle Verwertungsstrategie der Ladesäulen-Abwärme dar.

### Beheizung von Gewächshäusern

Gewerbliche Gewächshäuser sind als Nutzer der anfallenden Abwärme grundsätzlich geeignet. Zur Temperierung von Gewächshäusern werden insbesondere im Winter beträchtliche Energiemengen benötigt. In einer Fallstudie<sup>8</sup> zur effizienten Beheizung von mehreren Gewächshäusern mit der Abwärme von Kältemaschinen werden jährlich 4 – 5 GWh Heizwärme erzeugt, das entspricht durchschnittlich einer Wärmeleistung von etwa 500 kW. In jener Anwendung wird eine Vorlauftemperatur von 65°C für die Beheizung der Gewächshäuser implementiert. Da Gewächshäuser typischerweise eine Innentemperatur zwischen 20-30°C aufweisen, ist eine so hohe Vorlauftemperatur prinzipiell für die Wärmeabgabe nicht notwendig. Die tatsächlich benötigte Nutzwärmetemperatur hängt demnach von der technischen Umsetzung des Heizsystems ab.

Die räumliche Nähe von Erzeuger und Verbraucher ist auch hier zu beachten. Eine Synergie von Schnellladepark und Gewächshäusern ist ein mögliches Szenario, etwa bei einem Autobahnladepark mit nahegelegenen Gemüseanbau. Allerdings muss beachtet werden, dass geringere Vorlauftemperaturen aus dem Schnellladepark zu einer verstärkten Umwälzung und damit zu einem höheren Stromverbrauch führen werden, um dieselbe Wärmemenge, die üblicherweise mit 65°C bereitgestellt wird, verfügbar zu machen. Dieser Aspekt sollte bei einer Betrachtung des Business-Cases berücksichtigt werden.

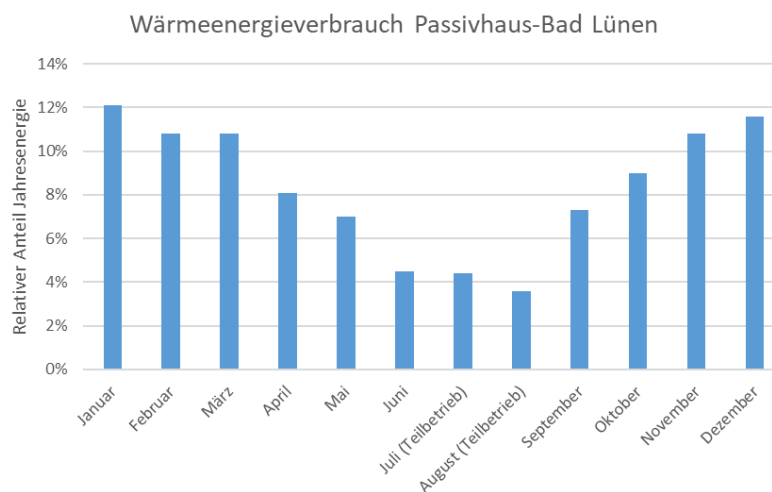
### Beheizung von Schwimmbädern

Schwimmbäder eignen sich gut als Abwärmenutzer, da sie ganzjährig (Hallenbäder) Wärmeenergie auf einem vergleichsweise geringen Temperaturniveau benötigen. Das Passivhaus-Schwimmbad in Lünen wurde im Rahmen einer Studie des Darmstädter Passivhaus Instituts einem detaillierten Monitoring

<sup>7</sup> „Wie viel Wärme steht wann zur Verfügung“, Sven Klingbeil, Biogas Journal, Sonderheft Gülle-Kleinanlagen, 2015

<sup>8</sup> Fallstudie Kellermann, Johnson Controls, [https://www.johnsoncontrols.com/de\\_de/-/media/jci/be/germany/solutions-by-industry/files/bts\\_case\\_study\\_kellermann\\_de.pdf](https://www.johnsoncontrols.com/de_de/-/media/jci/be/germany/solutions-by-industry/files/bts_case_study_kellermann_de.pdf), zuletzt abgerufen am 22.07.2022

unterzogen und sein Betrieb ist damit gut dokumentiert<sup>9</sup>. Das Bad verfügt über fünf Becken mit einer Wasserfläche von insgesamt 850 m<sup>2</sup>, wobei die gesamte Energiebezugsfläche des Bades 3912 m<sup>2</sup> beträgt. Der Wärmebezug im von April 2012 bis März 2013 betrug insgesamt 1009,3 MWh. Abbildung 17 zeigt die Verteilung des Wärmeverbrauchs über das Jahr. Die Beckentemperatur liegt im Bereich von 28 - 32°C, die Lufttemperatur ebenfalls um 32°C. Das Passivhausbad wurde während des Monitoring-Zeitraums aus verschiedenen Gründen noch nicht bei vollumfänglicher Energieeffizienz betrieben, wodurch die Autoren der Studie ein weiteres Einsparungspotenzial von bis zu 100 kWh / (m<sup>2</sup> a) sehen. Zugleich ist das Hallenbad in Lünen als Passivhaus ein Sonderfall. Die meisten Bäder weisen einen deutlich höheren Wärmebedarf auf. In der Studie wird im Mittel eine Verminderung der Heizenergie von 67% angeführt, wobei die Bandbreite der Vergleichsverbräuche sehr groß ist.



17: Verteilung des Wärmeenergieverbrauchs, von Peper und Grove-Smith, 2013 adaptiert

Das geforderte Temperaturniveau in Schwimmbädern eignet sich gut für die Nutzung der Schnellladeabwärme, da durch den geringen Temperaturhub ein hoher COP erzielt wird. Eine Nachbarschaft von Ladepark und Schwimmbad ist denkbar. Allerdings bleiben Gäste in einem Schwimmbad i.d.R. länger als ein Ultraschnellladevorgang dauert. Somit stellt sich die Frage nach der Sinnhaftigkeit bzw. ob nicht ein Ladepark mit langsameren Ladegeschwindigkeiten und somit einfacheren technischen Rahmenbedingungen besser wäre.

### Schlussfolgerungen

Die Simulationen zeigten wieviel Abwärme von Schnellladevorgängen abfallen und weiter genutzt werden könnte. Hierfür ist eine entsprechend hohe Marktdurchdringung dieser Technologie notwendig. Deswegen wäre eine Normierung insbesondere hinsichtlich dem verwendeten Kühlmedium hin zum Fahrzeug und den dazu gehöriegen Temperaturlevel sinnvoll. Daran anschließend zeigte die Betrachtung verschiedener Anwendungsmöglichkeiten, dass Abwärme auf einem höheren Temperaturniveau effizienter genutzt werden kann. Quantitativ reicht die Abwärme der Ladevorgänge bei der untersuchten Variante zur Versorgung einer Raststätte und könnte so andere Wärmequellen ersetzen sowie deren Kosten vermeiden. Es könnten im Vergleich zu einer Gasheizung bis zu 21,4 t CO<sub>2</sub> (202 g CO<sub>2</sub>/kWh<sup>10</sup>) im untersuchten Monat vermieden werden. Bei Einspeisung in ein Nahwärmenetz könnte ein Teil der Grundlast gedeckt werden. Mögliche Erlöse sind von Verhandlungen mit dem

<sup>9</sup> Monitoring Passivhaus-Hallenbad Lippe-Bad Lünen, Peper, S., Grove-Smith, J., Darmstadt, Passivehaus Institut, 2013

<sup>10</sup> „CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe“, Kristina Juhrich, Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt, 2022



jeweiligen Wärmenetzbetreiber abhängig. Es gibt jedoch keine Abnahmeverpflichtung für einen Wärmenetzbetreiber und insofern keinen gesicherten Markt für Abwärme.

## 2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im wichtigsten Positionen des Vorhabens waren die Personalausgaben mit 179.622 € (inkl. Overhead) und die Beschaffungsausgaben in Höhe für die Softwarelizenz zur technischen Simulation des Abwärmegewinnung und die historischen Floating Car Data mit insgesamt 15.914 €. Diese Ausgaben waren grundsätzlich vor dem Vorhaben bereits so vorgesehen. Auf Grund gestiegener Kosten im Vergleich zu den Angeboten mussten im kleinen Maßstab Mittel umgewidmet werden.

Der Einsatz der beschafften Software und Daten erfolgte wie geplant für die Durchführung der Simulationen.

## 2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der Beitrag zum Verbundvorhaben war relevant, um die Möglichkeiten für einen nachhaltigeren Betrieb von Schnellladestationen mit externer Kühlmöglichkeit aufzuzeigen. Mögliche zukünftige Geschäftsmodelle für die Ladestationen können beispielsweise von der Weiterverwertung der Abwärme profitieren. Hierfür wurden die beantragten Mittel in angemessener Weise verwendet.

## 2.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die kostengünstige oder sogar gewinnbringende Abfuhr von Wärme beim Schnellladevorgang von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen ist zunächst für die Betreiber von Tank- und Rastanlagen interessant. Durch die mittels Simulation quantitativ bestimmte Abwärme können sich auch gesellschaftliche und energiepolitische Interessen für eine mögliche Einspeisung der erzeugten Abwärme in Wärmenetze ergeben. In diesem Zusammenhang sind konstruktive Beiträge zur Energiewende in Deutschland und im internationalen Umfeld mögliche.

**Tabelle 2.8: Verwertung Teilvorhaben**

<b>Projektergebnis/ Inhalt</b>	<b>Nutzen/ Verwertung</b>
Technische Simulation des Abwärmeweiternutzung	Weiternutzung für Studien zu Wasserstofftankstellen
Quantitative Untersuchung der Abwärmennutzung	Ermöglicht realistische Einordnung des Marktpotentials von Schnellladeinfrastruktur mit externer Kühlung

## 2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Laufe des Projektes zeigte sich, dass die für PKW angestrebten hohen Ladeleistungen für entsprechend schnelle Ladevorgänge mit technischen Hürden verbunden sind. Hierzu zählen organisatorische (Reduzierung der Ladezeiten) und chemische (Verhalten der Batteriezellen bei Schnellladevorgängen).

Bzgl. den organisatorische Aspekten wurden während des Vorhabens zum einen durch andere Stellen neue Erkenntnisse im Bereich der Festkörperbatterien bekannt. Es wurden von verschiedenen Herstellern Lösungen für PKWs auf Basis von Festkörperbatterien beworben. Diese PKWs hätten auf Grund höherer Energiedichten Vorteile bei der Langstreckentauglichkeit. Eine Schnellladung mit sehr hohen Leistungen wäre beim Wegfall von sonst notwendigen Ladepausen nicht mehr notwendig<sup>11</sup>. Jedoch besitzen Festkörperbatterien aktuell noch Nachteile gegenüber den gängigen Lösungen, wie deren Leistungsdichte<sup>12</sup>. Zum anderen wurde Plänen für ein Batteriewechselsystem mit dazugehöriger Infrastruktur bekannt<sup>13</sup>. Durch kurze Wechselzeiträumen steigt die Langstreckentauglichkeit ebenfalls. Hierbei ist man aktuell aber auf ein geschlossenes Netzwerk beschränkt, da es keinen herstellerübergreifenden Standard gibt.

## 2.6. Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 der Nebenbestimmungen

Tabelle 2.9: Veröffentlichungen Teilvorhaben

Titel	Datum	Ort (Zeitungsname, ISBN, ggf. Link etc.)	Inhalt (kurz)
Abwärmepotential von Schnellladeinfrastruktur an Raststätten	geplant		In der Veröffentlichung soll der Mehrwert einer Abwärmenutzung in Verbindung mit einer Schnellladeinfrastruktur aufgezeigt werden. Hierfür wurde eine zeitlich aufgelöste Simulation einer Raststätte durchgeführt und verschiedene Wärmesenken untersucht.

<sup>11</sup> <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/verkehr/feststoffbatterien-machen-sie-das-e-auto-fuer-die-zukunft/>, abgerufen am 03.11.2023

<sup>12</sup> <https://www.heise.de/hintergrund/Batterien-fuer-Elektroautos-Hat-Solid-State-noch-eine-Chance-7158791.html>, abgerufen am 03.11.2023

<sup>13</sup> „Nio ET7: Der Tesla-Jäger im ADAC Test“: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/markenmodelle/nio/nio-et7/>, abgerufen am 03.11.2023