

Abschlussbericht zur Studie
Klimafreundliche Kühlsysteme für den Straßengüterverkehr -
Marktüberblick und Dekarbonisierungspotenziale

Auftraggeber

Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
NOW GmbH

Auftragnehmer

Smart Mobility Institute
Hochschule Bremerhaven

Mai 2023

Autoren
Prof. Dr.-Ing. Benjamin Wagner vom Berg
Prof. Dr.-Ing. Uwe Arens
Uta Kühne
Jan-Patrick Stenau
Senad Hasanspahic
Mattes Leibenath

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	7
Zielstellung und Ausgangssituation	9
1. Status Quo Kühltransporte in Deutschland	10
1.1 Beschreibung der auf dem Markt befindlichen Fahrzeuglösungen und deren Unterschiede	10
1.2 Darstellung und Beschreibung der für temperaturgeführte Transporte eingesetzten Kühlfahrzeuge und deren Haupteinsatzbereiche.....	12
1.2.1 Fahrzeugvarianten und Einsatzbereiche	13
1.2.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen	14
1.2.3 Beschreibung der zum Einsatz kommenden Kühlsysteme inklusive Verortung am Kühltransporter	15
1.3 (Neu-)Zulassungszahlen von Kühlkraftwagen in Deutschland	16
1.3.1 Erfassung und Auswertung von (Neu-)Zulassungszahlen von Kühl-LKW in Deutschland	17
1.4 Einsatzbereiche und -branchen der Kühllogistik sowie Einsatzdauer der Kühlsysteme	21
1.4.1 Identifizierung der Einsatzbereiche und -branchen der Kühllogistik	21
1.4.2 Einsatzdauer und Einsatzorte der Kühlsysteme	24
1.4.3 Einsatzorte der Kühlsysteme	33
1.5 Fazit zum Status Quo	36
2. Technische, ökonomische und ökologische Analyse der aktuellen Kühlsysteme	37
2.1 Technische Analyse der aktuellen Kühlsysteme.....	37
2.1.1 Technischer Überblick zu den eingesetzten Kühlsystemen	37
2.1.2 Technischer Überblick zu Systemen zur Effizienzsteigerung und Minderung der Emissionen	40
2.1.3 Darstellung der häufig eingesetzten Kältemittel und möglicher Substitute	43
2.1.4 Erfassung der Treibhausgasemissionen von Kältemitteln.....	47
2.2 Ökonomische Analyse der aktuellen Kühlsysteme.....	50
2.2.1 Vorüberlegungen zur ökonomischen Analyse.....	50
2.2.2 Rahmenbedingungen für eine ökonomische Analyse	51
2.2.3 Ökonomische Berechnungen für aktuelle Kühlsysteme	56
2.3 Ökologische Analyse der aktuellen Kühlsysteme	59
2.4 Fazit zur technischen, ökonomischen und ökologischen Analyse der aktuellen Kühlsysteme...	63
3. Regulatorischer Rahmen	64
3.1 Zulassungs- und genehmigungsrechtliche Regelungen	64
3.2 Gefahrgutrechtliche Bestimmungen	67

3.3 Europäische Abgas- und CO ₂ -Gesetzgebung	69
3.4 Regularien zu Kältemitteln	76
4 Darstellung von Optionen für emissionsfreie Kühlsysteme und Bewertung des Technologiereifegrads	78
4.1 Technische Analyse emissionsfreier Kühlsysteme	78
4.1.1 Marktrecherche zu Entwicklern/Herstellern und der Funktionsweise von emissionsfreien Kühlaggregaten.....	78
4.1.2 Untersuchung der technischen Umsetzung in Bezug auf die mögliche Integration dieser Systeme in Kühllastkraftwagen	83
4.2 Ökonomische Analyse emissionsfreier Kühlsysteme	90
4.2.1 Ökonomische Berechnung für emissionsfreie Kühlsysteme	90
4.2.2 Ableitung von Annahmen für die Entwicklung des zukünftigen Preisgefüges bis 2025 bzw. 2030.....	94
4.3 Ökologische Analyse emissionsfreier Kühlsysteme.....	96
4.4 Betrachtung der Betankungs- und/oder Ladeinfrastruktur	103
4.4.1 Tankinfrastruktur für Brennstoffzellenfahrzeuge	104
4.4.2 Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeuge	105
4.4.3 Betrachtung einer ggf. notwendigen, gesondert spezifisch-eigenen Ladelösung für batterieelektrische Kühlsysteme.....	107
4.4.4 Marktrecherche nach ggf. bereits vorhandenen Lösungen für Ladeinfrastruktur	108
4.5 Fazit zur Darstellung von Optionen für emissionsfreie Kühlsysteme.....	110
5 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen	112
5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse	112
5.2 Ableitung ökologischer und ökonomischer Potentiale der Technologien zur Marktdurchdringung	113
5.3 Handlungsempfehlungen	115
5.4 Retrospektive Recherche von Förderprogrammen und Darlegung der möglichen Notwendigkeit von Förderprogrammen	121
5.5 Darlegung des möglichen Erfordernisses regulatorischer Anpassungen für den Markthochlauf	122
Literaturverzeichnis.....	125

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sattelzugmaschine mit Sattelanhänger ((BMDV - Lang-Lkw, 2022), eigene bearbeitete Darstellung)	13
Abbildung 2: Motorwagen mit Anhänger (BMDV - Lang-Lkw, 2022).....	13
Abbildung 3: Lang-Lkw Typ 2 - Sattelkraftfahrzeug mit Zentralachsanhänger (BMDV - Lang-Lkw, 2022)	14
Abbildung 4: Lang-Lkw Typ 3 - Lastkraftwagen mit Untersetzachse und Sattelanhänger (BMDV - Lang-Lkw, 2022)	14
Abbildung 5: Überwiegende Position aktueller Kühlaggregate am Auflieger eines Sattelzuges, Quelle: Eigene Darstellung.....	15
Abbildung 6: Positionierung der Komponenten an Motorwagen und Lastzügen, Quelle: Eigene Darstellung	15
Abbildung 7: Bestandsentwicklung LKW mit Isolierung und Kühlung für die Jahre 2016 bis 2021 (kumuliert) in Anlehnung an (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022a).....	18
Abbildung 8: Palettenbelegung in VDKL-Kühlhäusern in 2021 (Marktdaten und Statistiken, no date) 21	
Abbildung 9: Absatz Tiefkühlprodukte 10-Jahres-Vergleich (Marktdaten, 2022); Eigene Darstellung. 22	
Abbildung 10: Jährliche Absatzstatistik 2020/2021 Tiefkühlprodukte (Marktdaten, 2022); Eigene Darstellung	23
Abbildung 11: Altersverteilung der Kühlaufleger (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)	25
Abbildung 12: Marktverhältnis Hersteller Kühlaufleger (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)	26
Abbildung 13: Marktverhältnis Hersteller Kühlaggregate für Auflieger (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)	27
Abbildung 14: Altersverteilung der Kühlanhänger (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)	28
Abbildung 15: Marktverhältnis Hersteller Kühlanhänger (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)	28
Abbildung 16: Marktverhältnis Hersteller Kühlaggregate für Anhänger (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)	29
Abbildung 17: Altersverteilung der Motorwagen (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)	30
Abbildung 18: Marktverhältnis Hersteller Motorwagenaufbauten (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)	31
Abbildung 19: Altersverteilung der Wechselkoffer (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)	32
Abbildung 20: Marktverhältnis Hersteller Wechselkoffer (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)	32
Abbildung 21: Marktverhältnis Hersteller Kühlaggregate für Wechselkoffer (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)	33
Abbildung 22: Kühlsystem für mittlere bis schwere LKW sowie für Sattelaufleger mit Diesel-Straßenbetrieb und elektrischem Netzbetrieb (Stefan Bina, 2014).....	38
Abbildung 23: Kühlsystem für schwere LKW sowie für LKW mit Sattelaufleger mit elektrischem Straßen- und Netzbetrieb (Stefan Bina, 2014)	39
Abbildung 24: Kühlsystem für alle Fahrzeugklassen mit elektrischem Straßen- und Netzbetrieb (Stefan Bina, 2014).....	39
Abbildung 25: Kältemittel nach Anwendungsbereich und Global Warming Potential (Edgar Timm, no date)	45

Abbildung 26: Theoretische Betrachtung zu den THG-Emissionen der drei Kältemittel R 404 A, R 452 A und R 449 A für den Fahrzeugbestand 2020 von Nutzfahrzeugen mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“	49
Abbildung 27: Kilometer-Satz und Tages-Satz für die Diesel-SZM mit Diesel-/Elektro-Aggregat und für die Diesel-SZM mit dem Konzept „Rekuperationsachse + Kühlung“ (eigene Darstellung).....	57
Abbildung 28: Kilometer-Satz und Tages-Satz für den Diesel-Motorwagen mit Diesel-/Elektro-Aggregat und für den Diesel-Motorwagen mit dem Elektro-Aggregat und Hochvoltbatterie“ (eigene Darstellung)	58
Abbildung 29: Kilometer-Satz und Tages-Satz für einen Diesel-Lastzug mit Diesel-Elektro-Kühlaggregat und einem Diesel-Lastzug mit Elektro-Aggregat und Hochvoltbatterie sowie dem Konzept „Rekuperationsachse + Kühlung“	58
Abbildung 30: Abgasgrenzwerte für LKW und Busse seit 1990 (Umweltbundesamt, no date).....	70
Abbildung 34: Grundsätzlicher Aufbau eines wasserstoffbetriebenen Kühlsystems für Nutzfahrzeuge ((Abschlussbericht - Projekt H2Cool Prelude Anbahnung von Kühltransporten mit Wasserstoff-LKW, 2022), modifizierte Darstellung)	84
Abbildung 31: Schematischer Aufbau des Konzepts „Rekuperationsachse + Kühlung“ für Nutzfahrzeuge (eigene Darstellung).....	84
Abbildung 32: Integration des Konzeptes „Rekuperationsachse + Kühlung“ an einem Auflieger (Quelle: eigene Darstellung).....	85
Abbildung 35: Ausgangssituation aktueller Kühlaufleger	85
Abbildung 36: Komponentenintegration Konzept „Wasserstoff-Brennstoffzellen-Kühlsystem“ bei einem emissionsfreien Kühlaufleger und -anhänger	86
Abbildung 37: Ausgangssituation aktueller Kühl-Motorwagen	86
Abbildung 38: Komponentenintegration bei emissionsfreien Motorwagen	86
Abbildung 33: Skala der technologischen Einsatzreife (Technology Readiness Level – TRL), modifizierte Abbildung (Europäische Kommission, 2021)	88
Abbildung 39: Ladeszenarien mit seitens der AG 5 der „Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität“ empfohlenen Ladeleistungen (Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, and Arbeitsgruppe 5 „Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung“, 2021).....	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Art des Aufbaus von Kraftfahrzeugen der Klasse N1, N2 oder N3, Anhang 1 Tabelle 4 der Verordnung (EU) 2018/858 (EU-Verordnung 2018/858/EU, 2018)	11
Tabelle 2: Art des Aufbaus von Fahrzeugen der Klasse O, Anhang 1 Tabelle 5 der VERORDNUNG (EU) 2018/858 (EU-Verordnung 2018/858/EU, 2018)	12
Tabelle 3: Technischen Daten zu Kühllastwagen (‘BDF Wechselbrücke Maße’, no date)	15
Tabelle 4: Anzahl temperaturgeführte LKW und Anhänger für die Jahre 2016 – 2021 in Anlehnung an VDKL (Marktdaten und Statistiken, no date)	17
Tabelle 5: Bestandsentwicklung Anhänger mit Isolierung und Kühlung für die Jahre 2016 bis 2022 (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022a)	19
Tabelle 6: Anteil der Lastkraftwagen nach Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ am Gesamtbestand nach Aufbauarten (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022a, p. 24), Stand 01. Januar 2022	20
Tabelle 7: Anteil der Kraftfahrzeuganhänger nach Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ am Gesamtbestand nach Aufbauarten(Kraftfahrt-Bundesamt, 2022a, p. 46), Stand 01. Januar 2022	20
Tabelle 8: Kühlaufleger, zulässige Gesamtgewichte	25
Tabelle 9: Motorwagen, zulässige Gesamtgewichte.....	30

Tabelle 10: Verkehrsaufkommen (Gesamtverkehr) deutscher Lastkraftwagen mit der Aufbauart „Isolierter Kastenaufbau“ 2020 (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022c)	34
Tabelle 11: Güterbeförderung deutscher LKW nach Nahrungs- und Genussmitteln, 2021(Kraftfahrt-Bundesamt, 2022b, 2022d)	34
Tabelle 12: Güterbeförderung deutscher LKW nach Nahrungs- und Genussmitteln und Entfernungsbereichen, 2021 (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022d, fols 03a, 03b, 03c).....	35
Tabelle 13: Güterverkehr in den Jahren 2019 bis 2021 nach Verkehrsträgern und Güterabteilung „Nahrungs- und Genussmittel“ (Bundesamt für Güterverkehr, 2020, 2021, 2022); Eigene Darstellung	36
Tabelle 14: Sicherheitsklassen der Kältemittel gemäß ISO 817 (Edgar Timm, 2020).....	44
Tabelle 15: Kältemittel im Vergleich (Bode, 2021; Umweltbundesamt, 2022; R404A und alternative Kältemittel, no date)	45
Tabelle 16: GWP-Werte von in der Kühllogistik eingesetzten sowie zukünftigen Kältemitteln (Martin Schmied and Wolfram Knörr, 2013), siehe Kapitel „2.1.3 Darstellung der häufig eingesetzten Kältemittel und möglicher Substitute“	48
Tabelle 17: THG-Emissionen für verschiedene Kältemittel.....	48
Tabelle 18: Kostenbestandteile der ökonomischen Berechnungen für dieselbetrieben und emissionslose Kühl-Transporte	52
Tabelle 19: Energieverbräuche konventioneller temperaturgeführter Nutzfahrzeuge und der eingesetzten Kühlaggregate	60
Tabelle 20: WtW-THG-Emissionen Sattelzug und Motorwagen in kgCO ₂ e/100 km	60
Tabelle 21: WtW-THG-Emissionen Kühlaggregate im Dieselbetrieb in kgCO ₂ e/h	61
Tabelle 22: WtW-THG-Emissionen Kühlaggregate im elektrischen Betrieb in kgCO ₂ e/h	61
Tabelle 23: WtW-THG-Emissionen bezogen auf die Jahreseinsatzzeit für Kühlaggregate mit Diesel-/Elektrobetrieb	61
Tabelle 24: WtW-THG-Emissionen für N2- und N3-Nutzfahrzeuge mit Isolierwänden und Kühlung... ..	62
Tabelle 25: WtW-THG-Emissionen für O3- und O4-Anhänger mit Isolierwänden und Kühlung.....	63
Tabelle 26: Rechtsgrundlagen für die Zulassung und den Betrieb von Kühlkraftwagen und Kühlsysteme	67
Tabelle 27: Einzel- und Sammeleintragungen ausgewählter Gefahrgüter mit Bezug zur Wasserstofftechnologie	68
Tabelle 28: Unterklassen der Motorenklasse NRE laut Definition in Artikel 4 Absatz 1 Nummer 1 (EU-Verordnung 2016/1628/EU, 2016).....	75
Tabelle 29: Emissionsgrenzwerte der Stufe V für die Motorenklasse NRE laut Definition in Artikel 4 Absatz 1 Nummer 1 (EU-Verordnung 2016/1628/EU, 2016).....	76
Tabelle 30: Überblick über die Kilometer- und Tages-Sätze der Sattelzug-Konfigurationen.....	91
Tabelle 31: Überblick über die Kilometer- und Tages-Sätze der Motorwagen-Konfigurationen	92
Tabelle 32: Überblick über die Kilometer- und Tages-Sätze der Lastzug-Konfigurationen.....	93
Tabelle 33: Wasserstoffbereitstellung WtT-THG-Emissionen (gw) mit Umrechnung (S. Kühnel, F. Hacker, and W. Görz, 2018; Heneka and Mörs, 2022)	97
Tabelle 34: Energieverbräuche LKW und Kühlaggregate	97
Tabelle 35: WtW-THG-Emissionen FCEV in kgCO ₂ e/100 km	98
Tabelle 36: WtW-THG-Emissionen BEV in kgCO ₂ e/100 km.....	98
Tabelle 37: WtW-THG-Emissionen H ₂ -Kühlaggregate Sattelzug und Lastzug in kgCO ₂ e/h	99
Tabelle 38: THG-Emissionen bezogen auf die Jahreseinsatzzeit für Kühlaggregate mit Diesel-/Elektrobetrieb	100
Tabelle 39: THG-Emissionen bezogen auf die Jahreseinsatzzeit für Kühlaggregate mit dem Konzept “Rekuperationsachse + Kühlung” mit Netzbetrieb	100

Tabelle 40: THG-Emissionen bezogen auf die Jahreseinsatzzeit für Kühlaggregate mit dem Konzept “Wasserstoff-Brennstoffzelle” mit Wasserstoffbetrieb	101
Tabelle 41: THG-Emissionen bezogen auf die Jahreseinsatzzeit für Kühlaggregate mit dem Konzept “Wasserstoff-Brennstoffzelle” mit Netzbetrieb	101
Tabelle 42: WtW-THG-Emissionen in Abhängigkeit der Jahreslaufleistung für Diesel-LKW und BEV	102
Tabelle 43: WtW-THG-Emissionen in Abhängigkeit der Jahreslaufleistung für FCEV	102
Tabelle 44: WtW-THG-Emissionen bezogen auf den Nutzfahrzeugbestand für Diesel-LKW und BEV	103
Tabelle 45: WtW-THG-Emissionen bezogen auf den Nutzfahrzeugbestand für FCEV	103
Tabelle 46: Bewertung der Technologieoptionen (eigene Darstellung)	120

Abkürzungsverzeichnis

ADR	<i>Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road</i>
AEM	<i>Advanced Electric Machines, Advanced Electric Machines</i>
A-KM	<i>Auflieger-Kühlmaschinen</i>
ATP	<i>Accord relatif aux transports internationaux de denrées périssables et aux engins</i>
BAG	<i>Bundesamt für Güterverkehr</i>
BALM	<i>Bundesamt für Logistik und Mobilität</i>
BAST	<i>Bundesanstalt für Straßenwesen</i>
BDF	<i>Bundesverband des Deutschen Güterfernverkehrs e. V.</i>
BGL	<i>Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung</i>
BMDV	<i>Bundesministerium für Digitales und Verkehr</i>
BPW	<i>Bergische Achsen Kommanditgesellschaft</i>
CcH2	<i>cryo-compressed hydrogen</i>
CCS	<i>Combined Charging Standards</i>
CEE	<i>Commission on the Rules for the Approval of the Electrical Equipment</i>
CO ₂ e	<i>CO₂-Äquivalent</i>
daN	<i>Dekanewton</i>
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i>
DSLVL	<i>Bundesverband Spedition und Logistik e. V.</i>
dti	<i>Deutsches Tiefkühlinstitut e. V.</i>
DVGW	<i>Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches</i>
EG	<i>Europäische Gemeinschaft</i>
EU	<i>Europäische Union</i>
EZ	<i>Erstzulassung</i>
F&E	<i>Forschung und Entwicklung</i>
F-Gase	<i>fluorierte Gase</i>
GGBefG	<i>Gefahrgutbeförderungsgesetz</i>
GGVSEB	<i>Gefahrgutverordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, mit Eisenbahnen und auf Binnengewässern</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
HACCP	<i>Hazard Analysis and Critical Control Points</i>
HFKW	<i>teilweise halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe</i>
HVO	<i>Hydrotreated Vegetable Oil</i>
IAA	<i>Internationale Automobil-Ausstellung</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
KBA	<i>Kraftfahrt-Bundesamt</i>

km	Kilometer
KsNI	klimaschonende Nutzfahrzeuge und Infrastruktur
KV	Kombinierter Verkehr
LEZ	Low Emission Zone
LKWÜberlStVAusnV	Verordnung über Ausnahmen von straßenverkehrsrechtlichen Vorschriften für Fahrzeuge und Fahrzeugkombinationen mit Überlänge
MCS	Megawatt Charging System
MIV	motorisierter Individualverkehr
M-KM	Motorwagen-Kühlmaschinen
NCS	Night Charging System
NECP	National Energy and Climate Plans
NRMM	Non Road Mobile Machinery
ODP	Ozone Depletion Potential
OEM	Original Equipment Manufacturer
PV	Photovoltaik
sLH2	subcooled liquified hydrogen
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
TCO	Total Cost of Ownership
THG	Treibhausgase
TRL	Technology Readiness Level
TTW	Tank-to-Wheel
UVARs	Urban-Vehicle-Access-Regulations
VDKL	Verband Deutscher Kühllhäuser & Kühllogistikunternehmen e. V.
WE	Windenergie
WTW	Well-to-Wheel
ZEZ	Zero Emission Zone
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

Zielstellung und Ausgangssituation

Die Bundesregierung hat als Reaktion auf die Verabschiedung des Pariser Klimaschutzabkommens von 2015 das klare Ziel einer Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 ausgerufen. Damit soll ein Beitrag zur Begrenzung der globalen Klimaerwärmung auf 1,5-Grad bis zum Ende des laufenden Jahrhunderts geleistet werden. Das zu diesem Zweck verabschiedete Klimaschutzgesetz sieht bereits bis 2030 eine sektorübergreifende Senkung der Treibhausgasemissionen um 65 % gegenüber 1990 vor (*Klimaschutzgesetz: Klimaneutralität bis 2045, 2022*).

Der Verkehrssektor ist mit einem Anteil von circa 18 % der drittgrößte Verursacher von Treibhausgasemissionen (THG). Mit circa 38 Millionen t CO₂ pro Jahr entfällt ein Drittel der Emissionen im Verkehrsbereich auf Nutzfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht größer 3,5 t. Insbesondere der Schwerlastverkehr mit einem zulässigen Gesamtgewicht größer 26 t trägt erheblich zu den Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor bei. Trotz des relativ kleinen Anteils von circa 10 % am Gesamtbestand der Nutzfahrzeuge, verursacht der Schwerlastverkehr etwa die Hälfte der Emissionen im Nutzfahrzeugbereich (Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, 2020).

Aufgrund steigenden Verkehrsaufkommens, vor allem durch den zunehmenden Güterverkehr, sind die THG-Emissionen im Vergleich zu 1990 trotz verbesserter Fahrzeugeffizienz nicht zurückgegangen, sondern angestiegen. Auch die Nachfrage nach temperaturgeführten Frische- und Tiefkühlprodukten wächst kontinuierlich. Gründe hierfür sind beispielsweise im Lebensmittelbereich eine Veränderung der Ernährungsgewohnheiten, die Zunahme von Singlehaushalten und gesteigerte Anforderungen an die Produktqualität. Diese Entwicklung sorgt für einen dringenden Bedarf nach Lösungen für neue und umweltfreundliche Alternativen beim Gütertransport, die sowohl die Traktion als auch das Kühlaggregat betreffen. Während im Bereich der Nutzfahrzeuge für den konventionellen Straßengüterverkehr bereits erste Hersteller emissionsarme Fahrzeuge entwickeln und am Markt anbieten, besteht im Bereich der Entwicklung und Markteinführung klimafreundlicher temperaturgeführter Transportlösungen weiterhin ein erhöhter Handlungsbedarf. Vor diesem Hintergrund soll die vorliegende Studie einen Gesamtüberblick über die Potenziale temperaturgeführter Transportlösungen für einen Beitrag zur Klimaneutralität im Güterverkehr und der dafür notwendigen Handlungsempfehlungen liefern.

Zu der Erarbeitung von Handlungsempfehlungen im Rahmen dieser Studie erfolgt der folgende inhaltliche Aufbau:

1. Erarbeitung des Status Quo temperaturgeführter Transporte in Deutschland
2. Durchführung einer technischen, ökonomischen und ökologischen Analyse der aktuellen Kühlsysteme
3. Beschreibung des regulatorischen Rahmens für Kühllastwagen und Kühlsysteme
4. Durchführung einer technischen, ökonomischen und ökologischen Analyse emissionsfreier Kühlsysteme
5. Darstellung von Optionen für emissionsfreie Kühlsysteme und Bewertung des Technologiereifegrads
6. Ergebniszusammenfassung und Ableitung von Handlungsempfehlungen

Ziel soll es sein, die Bedeutung temperaturgeführter Transporte und die dafür notwendigen klimafreundlichen Nutzfahrzeuglösungen darzustellen und diese in die Maßnahmen für eine Transformation des Verkehrssektors zur Erreichung des Endziels Klimaneutralität zu integrieren.

1. Status Quo Kühltransporte in Deutschland

Mit der Erarbeitung des Status Quo erfolgt die Darstellung der Mengen der in Deutschland im Einsatz befindlichen Kühllastwagen und Kühlanhänger (-einheiten) sowie eine Einschätzung der durch sie realisierten Transportleistung klassifiziert nach EG-Fahrzeugklassen und der zum Einsatz kommenden Arten der Kühlsysteme.

Darüber hinaus soll ein Verständnis über die Einsatzbereiche und die Einsatzdauer von Kühllastwagen in der Logistik vermittelt werden. Der damit erarbeitete Ist-Zustand über den Einsatz von Kühllastwagen in Deutschland und die damit zusammenhängenden Klassifizierungen bilden einerseits die Basis für die darauf aufbauenden Untersuchungen innerhalb dieser Studie und andererseits erste Anhaltspunkte für die Platzierung von Maßnahmen förderpolitischer Entscheidungsträger. Die Varianten temperaturgeführter Nutzfahrzeuge und Fahrzeugkombinationen sowie die zum Einsatz kommenden Kühlsysteme sind sehr vielschichtig und erfordern daher eine eindeutige Spezifizierung. Insbesondere diesem Aspekt soll der folgende Abschnitt Rechnung tragen.

1.1 Beschreibung der auf dem Markt befindlichen Fahrzeuglösungen und deren Unterschiede

Die Aufbauart und der Zweck von Kraftfahrzeugen sind innerhalb der EG-Fahrzeugklassen bestimmt und ermöglichen somit eine EU-weite, einheitliche Gruppierung. Insbesondere für Hersteller sind diese Vorgaben und Anforderungen zur Zulassung der Fahrzeuge und das Erlangen der Typgenehmigung wichtig. Über die EG-Fahrzeugklassen wird die Zulassung bzw. Teilnahme einzelner Fahrzeuge am Straßenverkehr genauer geregelt. Die der Fahrzeugklassifizierung zugrundeliegende EG-Richtlinie ist die Verordnung (EU) 2018/858 des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 über die Genehmigung und die Marktüberwachung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 715/2007 und (EG) Nr. 595/2009 und zur Aufhebung der Richtlinie 2007/46/EG (EU-Verordnung 2018/858/EU, 2018).

Durch die Verordnung (EU) 2018/858 werden Fahrzeuge zur Güterbeförderung durch die Klasse N in Europa beschrieben:

„Die Klasse N umfasst vorwiegend für die Beförderung von Gütern ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge, unterteilt in:

- i) Klasse N1: Kraftfahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse von höchstens 3,5 t;
- ii) Klasse N2: Kraftfahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse über 3,5 t bis höchstens 12 t und
- iii) Klasse N3: Kraftfahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse über 12 t“ (EU-Verordnung 2018/858/EU, 2018)

Der Fokus dieser Studie liegt auf dem Einsatz von Kühl-LKW der EG-Fahrzeugklassen N2 und N3. Neben den Kraftfahrzeugen stehen innerhalb der Studie insbesondere die Anhänger bzw. Auflieger im Mittelpunkt der Untersuchungen. Diese werden in der Klasse O der Verordnung (EU) 2018/858 aufgeführt.

„Klasse O umfasst Anhänger, unterteilt in:

- i) Klasse O1: Anhänger mit einer zulässigen Gesamtmasse von höchstens 0,75 t;
- ii) Klasse O2: Anhänger mit einer zulässigen Gesamtmasse über 0,75 t bis höchstens 3,5 t;
- iii) Klasse O3: Anhänger mit einer zulässigen Gesamtmasse über 3,5 t bis höchstens 10 t und

iv) Klasse O4: Anhänger mit einer zulässigen Gesamtmasse über 10 t.“ (EU-Verordnung 2018/858/EU, 2018)

Maßgeblich für die Untersuchungen im Rahmen dieser Studie sind die Klassen O3 und O4. Diese beschreiben Anhänger und Sattelanhänger mit einer zulässigen Gesamtmasse größer als 3,5 t und größer als 10 t.

Innerhalb der EG-Fahrzeugklasse N und O erfolgt eine Unterscheidung nach der Art des Aufbaus dargestellt in Tabelle 1 und Tabelle 2.

Die Kennzeichnung erfolgt mittels eines Codes, der bei Fahrzeugen der Klassen N und O durch zwei Buchstaben wiedergegeben wird. Innerhalb der Forschungsstudie werden für die Fahrzeugklasse N die Aufbauarten mit den Codes BA, BB und BC betrachtet. Für die Fahrzeugklasse O sind dieses die Aufbauarten DA, DB, DC und DD.

Tabelle 1: Art des Aufbaus von Kraftfahrzeugen der Klasse N1, N2 oder N3, Anhang 1 Tabelle 4 der Verordnung (EU) 2018/858 (EU-Verordnung 2018/858/EU, 2018)

Ref.	Code	Bezeichnung	Begriffsbestimmung
4.1.	BA	Lastkraftwagen	Fahrzeug, das ausschließlich oder vornehmlich für das Befördern von Gütern ausgelegt und gebaut ist. Es kann auch einen Anhänger ziehen.
4.2.	BB	Van	Lastkraftwagen, bei dem sich das Führerhaus und der Ladebereich in derselben Einheit befinden.
4.3.	BC	Sattelzugmaschine	Zugfahrzeug, das ausschließlich oder vornehmlich für das Ziehen von Sattelanhängern ausgelegt und gebaut ist.
4.4.	BD	Straßenzugmaschine	Zugfahrzeug, das ausschließlich für das Ziehen von Anhängern außer Sattelanhängern ausgelegt und konstruiert ist.
4.5.	BE	Pick-up	Fahrzeug mit einer Höchstmasse bis 3 500 kg, in dem sich die Sitzplätze und der Ladebereich nicht in einem gemeinsamen Innenraum befinden.
4.6.	BX	Fahrgestell mit Führerhaus	Unvollständiges Fahrzeug mit lediglich Führerhaus (vollständig oder unvollständig), Fahrgestell-Längsträgern, Getriebe, Achsen, das dafür bestimmt ist, durch einen Aufbau vervollständigt zu werden, der auf den Bedarf des Verkehrsunternehmens zugeschnitten ist.

Tabelle 2: Art des Aufbaus von Fahrzeugen der Klasse O, Anhang 1 Tabelle 5 der VERORDNUNG (EU) 2018/858 (EU-Verordnung 2018/858/EU, 2018)

Ref.	Code	Bezeichnung	Begriffsbestimmung
5.1.	DA	Sattelanhänger	Anhänger, der ausgelegt und gebaut ist, um an eine Zugmaschine oder einen Dolly so angekuppelt zu werden, dass auf das Zugfahrzeug oder den Dolly eine beträchtliche Stützlast einwirkt. Die für eine Fahrzeugkombination zu verwendende Kupplung muss aus einem Zugsattelzapfen und einer Sattelkupplung bestehen.
5.2.	DB	Deichselanhänger	Anhänger mit mindestens zwei Achsen, darunter mindestens eine gelenkte Achse: a) ausgestattet mit einer (relativ zum Anhänger) senkrecht beweglichen Zugeinrichtung und b) der weniger als 100 daN Stützlast auf das Zugfahrzeug überträgt.
5.3.	DC	Zentralachsenanhänger	Anhänger, dessen Achse(n) nahe dem Schwerpunkt des (gleichmäßig beladenen) Fahrzeugs so angeordnet ist (sind), dass nur eine geringfügige Stützlast, die 10 % der größten Masse des Anhängers bzw. eine Last von 1 000 daN nicht übersteigt (es gilt der jeweils niedrigere Wert), auf das Zugfahrzeug übertragen wird
5.4.	DD	Starrdeichselanhänger	Anhänger, dessen Achse(n) nahe dem Schwerpunkt des (gleichmäßig beladenen) Fahrzeugs so angeordnet ist (sind), dass nur eine geringfügige Stützlast, die 10 % der größten Masse des Anhängers bzw. eine Last von 1 000 daN nicht übersteigt (es gilt der jeweils niedrigere Wert), auf das Zugfahrzeug übertragen wird

Alle Fahrzeugklassen wurden in die „Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) Anlage XXIX (zu § 20 Absatz 3a Satz 4) EG-Fahrzeugklassen“ übernommen.

Durch die Verordnung (EU) 2019/2144 über die „Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge im Hinblick auf ihre allgemeine Sicherheit und den Schutz der Fahrzeuginsassen und von ungeschützten Verkehrsteilnehmern, zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/858 des Europäischen Parlaments und des Rates [...]“ wurden Änderungen in der Verordnung (EU) 2018/858 bekanntgegeben. Die Unterteilung der Fahrzeugklassen bleibt davon aber unberührt (EU-Verordnung 2019/2144 vom 27. November, 2019).

1.2 Darstellung und Beschreibung der für temperaturgeführte Transporte eingesetzten Kühlfahrzeuge und deren Haupteinsatzbereiche

Zum Transport von temperaturempfindlichen Gütern werden Fahrzeuge mit isolierten Aufbauten und Anhängern sowie Aufliegern eingesetzt, die zumeist mit Kühlaggregate ausgestattet sind. Im Vergleich zu anderen Aufbauformen im Güterkraftverkehr sind jene zum Transport von gekühlten Produkten technisch aufwendiger gestaltet. Neben den benötigten Kühlaggregate, welche mit einer Kühl- und Heizfunktion ausgestattet sind, weist insbesondere der Aufbau wesentliche Unterschiede zu einem Trockenfrachtkoffer auf.

1.2.1 Fahrzeugvarianten und Einsatzbereiche

Temperaturgeführte Transporte werden in allen Entfernungsbereichen des Güterverkehrs durchgeführt. Laut Bundesamt für Logistik und Mobilität (BALM, ehemals BAG – Bundesamt für Güterverkehr ((BAG wird BALM, 2022)) unterteilen sich diese in die Bereiche:

Nahverkehr: Radius von bis zu 50 km um den Ausgangsort

Regionalverkehr: Entfernungen von 51 km bis 150 km vom Ausgangsort

Fernverkehr: Entfernungen ab 151 km vom Ausgangsort (Bundesamt für Güterverkehr, 2022, p. 14).

Für den Güternahverkehr/Verteilverkehr kommen aufgrund der besseren Manövrierbarkeit überwiegend Kleintransporter sowie Lastkraftwagen zwischen 5 t und 7,5 t sowie von bis zu 12 t zulässigem Gesamtgewicht (zGG) zum Einsatz. Im temperaturgeführten Transportsegment sind dies Motorwagen mit Kühlkoffer sowie Motorwagen als Lastzüge mit Anhänger (Drehschemel).

Für den Güterfernverkehr in Deutschland werden vorrangig Standardsattel- und Lastzüge (Gliederzüge) eingesetzt.

Der Regionalverkehr wird durch Motorwagen, Last- und Sattelzüge bedient. Die Entfernungsabgrenzung zwischen den einzelnen Verkehrsbereichen ist im Realeinsatz fließend und wird hauptsächlich für Zwecke der Verkehrsstatistik genutzt (Krieger, 2018).

Im Anwendungsgebiet der Kühlfahrzeuge wird der klassische Sattelzug am häufigsten eingesetzt. Hersteller bieten hier unterschiedliche Lösungen für die Anforderungen der Kunden an. Gängige Praxis sind drei Achsen am Auflieger, wie in Abbildung 1 dargestellt. Diese können auf bis zu eine Achse reduziert werden, um die Tauglichkeit für den Nah- und Verteilerverkehr in der Stadt zu erhöhen. Diese Fahrzeugkombinationen finden beispielsweise im Bereich der Lebensmittellogistik Anwendung.

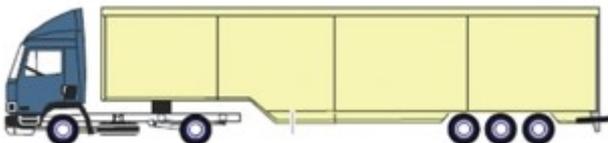


Abbildung 1: Sattelzugmaschine mit Sattelanhängen ((BMDV - Lang-Lkw, 2022), eigene bearbeitete Darstellung)

Bei der Kombination von Lastkraftwagen mit Anhänger werden verschiedene Varianten und Arten unterschieden. Eine übliche Form ist eine Kombination aus einem dreiachsigen Motorwagen mit Zweiachsanhänger (Tandemanhänger in Abbildung 2 dargestellt oder Drehschemel) und einem festen Kühlkofferaufbau.



Abbildung 2: Motorwagen mit Anhänger (BMDV - Lang-Lkw, 2022)

Eine zweite, aber seltenere Variante ist die gleiche Fahrzeugkombination mit einem Rahmen zur Aufnahme von Wechselbrücken. Diese Art bietet die Möglichkeit den Aufbau abzubrücken, um eine neue Wechselbrücke aufzunehmen. Die für Wechselbrücken geltenden Normen (*DIN - Wechselbehälter*, no

date) wurden durch den damaligen Bundesverband des Deutschen Güterfernverkehrs e. V. (BDF, heute Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e. V.), festgelegt. Wechselbrücken bieten insbesondere im Hinblick auf die Be- und Entladung eine erhöhte Flexibilität sowie geringe Wartezeiten und Fahrzeugstillstände, sodass sie häufig im Zusammenhang mit dem Kombinierten Verkehr und unterschiedlichen Verkehrsträgern eingesetzt werden. Obwohl Wechselbrückensysteme in verschiedenen Arten von Aufbauten zum Einsatz kommen können, sind sie in der (temperaturgeführten) Logistik nur wenig verbreitet (*Wissenswertes über BDF - Wechselsysteme, Länge, Breite, Höhe, Abmessungen, Innenhöhe, Abstellhöhe, no date*).

Grundsätzlich können auch Lang-Lkw der Typen 2 und 3, dargestellt in Abbildung 3 und Abbildung 4, zum Einsatz kommen. Diese Varianten von Lang-LKW mit einer Länge von bis zu 25,25 m dürfen im Dauerbetrieb auf einem ausgewiesenen sog. Positivnetz, dessen Strecken regelmäßig vom BMDV aktualisiert werden, fahren. Dies erfolgt im Rahmen der Änderungsverordnung zum Lang-Lkw (LKWÜberlStVAusV). Die Typen 2 und 3 sind nach § 3 der LKWÜberlStVAusV zusammengesetzte Formen aus dem Sattel- und / oder Lastzug. Sie unterscheiden sich zu den bereits genannten Varianten hauptsächlich in ihrer Gesamtlänge (*BMDV - Lang-Lkw, 2022*). Die Gewichtsgrenzen von Lang-LKW entsprechen denen herkömmlicher LKW von bis zu 40 t bzw. 44 t im Kombinierten Verkehr.



Abbildung 3: Lang-Lkw Typ 2 - Sattelkraftfahrzeug mit Zentralachsanhänger (*BMDV - Lang-Lkw, 2022*)



Abbildung 4: Lang-Lkw Typ 3 - Lastkraftwagen mit Untersetzachse und Sattelanhängen (*BMDV - Lang-Lkw, 2022*)

Lang-LKW wurden in einem fünfjährigen Feldversuch unter der wissenschaftlichen Begleitung durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) getestet. Dabei wurde festgestellt, dass im Durchschnitt zwei Lang-Lkw-Fahrten rund drei Fahrten mit konventionellen Lkw ersetzen. Bezogen auf eine Transportaufgabe ergaben sich Effizienzgewinne und Kraftstoffersparnisse zwischen 15 % und 25 % (*BMDV - Lang-Lkw, 2022*). Somit können sich aus dem Einsatz von Lang-Lkw positive Effekte, insbesondere auf die Umweltauswirkungen (Einsparung von CO₂-Emissionen) ergeben.

1.2.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Die Vorschriften zu den Abmessungen von Kühlfahrzeugen sind durch die Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) in § 32 „Abmessungen von Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen“ beschrieben.

Die zur Aufrechterhaltung der Kühlleistung erforderliche Isolierung an den Seitenwänden wirkt sich auf die Abmaße von Kühltransportkombinationen aus. Um auch bei Kühltransporten zu gewährleisten, dass drei genormte Europaletten quer oder zwei längs zueinander in den Auflieger oder Anhänger passen, hat der Gesetzgeber in § 32 Absatz 1 (4) eine Sonderregelung geschaffen, mit der isolierte Fahrzeuge im Güterverkehr eine gesetzlich zugelassene Breite von 2,60 m anstelle der sonst üblichen 2,55 m haben dürfen. So wird eine Innenbreite von mindestens 2,50 m ermöglicht.

In der nachfolgenden Tabelle sind alle relevanten Abmessungen der beiden hauptsächlich eingesetzten Varianten von Kühltransportern im Güterfernverkehr mit schweren Nutzfahrzeugen aufgeführt.

Tabelle 3: Technischen Daten zu Kühllastwagen ('BDF Wechselbrücke Maße', no date)

	Sattelzug		Gliederzug (BDF-Norm)	
	Zugeneinheit	Auflieger	Motorwagen	Anhänger
Länge außen	Variiert	13,68 m	6,25 m (7,45 m)	8,30 m (7,45 m)
Länge innen	Variiert	13,60 m	6,10 m (7,30 m)	8,15 m (7,30 m)
Breite außen	2,60 m		2,60 m	
Breite innen	2,44 m		2,44 m	
Höhe	4,00 m		4,00 m	
Ladehöhe	2,40 m		2,40 m	
Zulässiges Gesamtgewicht	40 t (44 t im KV)		40 t (44 t im KV)	
Zuladung	bis 24 t		bis 24 t	
Lastzuglänge	16,50 m		18,75 m	

Bei herkömmlichen Sattelzügen liegt die Nutzlast eines Sattelzuges mit einem zGG von 40 t bei 25 t. Die niedrige Nutzlast von 24 t bei Kühl-Sattelzügen resultiert aus der aufwendigen Isolierung und einem somit höheren Eigengewicht.

1.2.3 Beschreibung der zum Einsatz kommenden Kühlsysteme inklusive Verortung am Kühltransporter

Die Kategorien der eingesetzten Kühlaggregate werden in Motorwagen-Kühlmaschinen (M-KM) und Auflieger-Kühlmaschinen (A-KM) unterschieden. Die Verortung der Kühlaggregate ist je nach eingesetzter Fahrzeugart zumeist an der gleichen Position am Fahrgestell bzw. am Fahrzeugaufbau.

Bei Sattelaufliegern wird das Aggregat häufig an der Stirnseite verbaut.

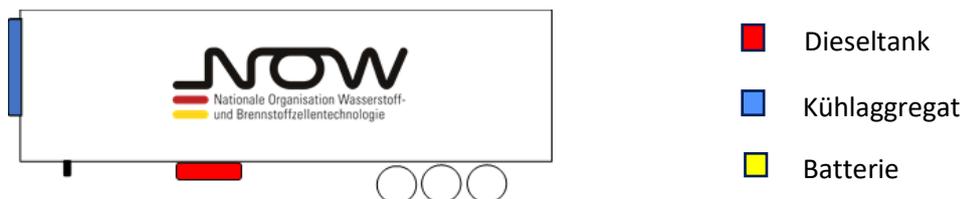


Abbildung 5: Überwiegende Position aktueller Kühlaggregate am Auflieger eines Sattelzuges, Quelle: Eigene Darstellung

Im Fall der Lastzüge befindet sich das Kühlaggregat (siehe Abbildung 6) in kleinerer Bauform bei dem Motorwagen oberhalb des Fahrerhauses in der Überdachmontage und teilweise auch in der Unterflurmontage. Bei den Anhängern erfolgt eine Montage des Kühlaggregats in der Variante Unterflur oder Stirnwand.

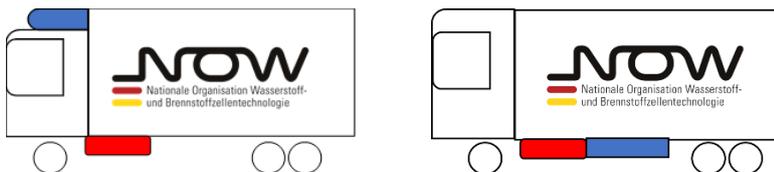


Abbildung 6: Positionierung der Komponenten an Motorwagen und Lastzügen, Quelle: Eigene Darstellung

Über das Kühlaggregat wird dem Inneren des Aufliegers oder des Kühlkoffers die gekühlte oder erwärmte Luft über Luftkanäle zumeist an der Decke des Fahrzeugs sowie an der Stirnwand zugeführt.

Dabei ist es möglich, sowohl Einkammer- als auch Mehrkammerkühlbereiche mit unterschiedlichen Temperaturzonen zu versorgen.

Im Zusammenhang mit dem Kühltransportmanagement steht die ständige Überwachungsmöglichkeit der Temperatur an oberster Stelle, um eine unterbrechungsfreie Kühlkette gewährleisten und nachweisen sowie im Schadensfall reagieren zu können. Hierzu werden verschiedene Maßnahmen ergriffen:

- Anzeigetafeln am Fahrzeugaufbau, an denen der Transporteur die Temperaturen in den einzelnen Kühlzonen individuell einstellen sowie zu- und abschalten kann,
- Temperaturanzeige im Fahrerhaus zur Überwachung durch den Fahrzeugführer
- Aufzeichnung und Archivierung der Temperatur u. a. über Sensorik und Temperaturschreiber nach EU-Verordnungen EG Nr. 178/2002 (EU-Verordnung 2002/178/EG, 2002) und EG Nr. 37/2005 (EU-Verordnung 2005/37/EG, 2005)
- Überwachung und Alarmierung von Temperaturabweichungen per GPS-Ortung
- Bereitstellung von Daten per Computer oder mobil über Smartphone

Beim Transport von Kühl- und Tiefkühlwaren ist zudem das ATP-Abkommen „Übereinkommen über internationale Beförderung leicht verderblicher Lebensmittel und über die besonderen Beförderungsmittel, die für diese Beförderungen zu verwenden sind“ (ATP - Accord relatif aux transports internationaux de denrees perissables et aux engins speciaux A utiliser pour ces transports) zu beachten. Das Abkommen regelt u. a. die folgenden Themen:

- Einteilung der Beförderungsmittel in Klassen entsprechend ihrer Eignung und Ausrüstung für den Transport leicht verderblicher Lebensmittel.
- Technische Anforderungen an Beförderungsmittel für leicht verderbliche Lebensmittel hinsichtlich der Wärmedämmung und der Ausrüstung mit einer Kühleinrichtung.
- Messmethoden zur Bestimmung der wärmedämmtechnischen Eigenschaften und zur Bestimmung der Leistung von Kühl- und Heizeinrichtungen.
- Festlegung der Transporttemperaturen in Abhängigkeit vom Lebensmittel.

Innerhalb der Klasseneinteilung und der technischen Anforderungen werden Angaben zu der Wärmedämmung und dem Temperaturbereich und der Art der Kühl- / Heizeinrichtung gemacht. Das ATP-Abkommen gilt insbesondere für den Langstreckentransport und ist bei grenzüberschreitenden gewerblichen Transporten von Kühl- und Tiefkühllebensmitteln ein Pflichtdokument, wird aber vermehrt auch in anderen Zusammenhängen gefordert (TÜV SÜD Industrie Service GmbH, 2020).

Grundsätzlich wird der Betrieb von Kühlaggregaten zwischen den beiden Modi kontinuierlicher Betrieb und Start-Stopp-Modus unterschieden. Der kontinuierliche Betrieb wird besonders bei Gütern eingesetzt, die einer dauerhaft einzuhaltenden Solltemperatur und einer strengen Temperaturkontrolle, wie bei Pharmaprodukten, unterliegen. Der Start-Stopp Modus kommt zum Einsatz, wenn es einer durchgehenden Kühlung von Gütern nicht bedarf. Beispiele hierfür sind Frischwaren, die bei Temperaturen um 2°C in den Wintermonaten ungekühlt transportiert werden und in den Sommermonaten teils einen kontinuierlichen Kühlbetrieb erfordern.

1.3 (Neu-)Zulassungszahlen von Kühllastkraftwagen in Deutschland

Im folgenden Abschnitt soll die Erfassung der (Neu-)Zulassungszahlen von Kühllastwagen in Deutschland sowie eine Abschätzung des bereits im Einsatz befindlichen Fahrzeugbestands erfolgen. Dabei wird gemäß der zuvor identifizierten Fahrzeugarten und -kombinationen differenziert. In diesem Sinne muss zwischen zugelassenen Motorwagen mit Kühlkofferaufbau und Kühlanhängern unterschieden werden. Für die Abbildung von Trends wurden neben Daten des Kraftfahrbundesamtes auch Daten von Verbänden hinzugezogen.

Die gewonnenen Daten dienen im späteren Verlauf insbesondere der Berechnung von Treibhausgasemissionen als Grundlage und tragen so zur Einordnung der Bedeutung von Kühltransportsystemen im Gesamtverkehrskontext bei.

1.3.1 Erfassung und Auswertung von (Neu-)Zulassungszahlen von Kühl-LKW in Deutschland

Für die Erfassung der (Neu-)Zulassungszahlen von temperaturgeführten LKW und Anhängern in Deutschland wurden unter anderem Marktdaten des Verbands Deutscher Kühlhäuser & Kühllogistikunternehmen e.V. (VDKL) sowie des Kraftfahrtbundesamtes ausgewertet.

Die innerhalb der Studie betrachteten Kraftfahrzeuge der Klassen N2 bis N3 werden in der folgenden Tabelle 4 aufgeführt und die Entwicklung über sechs Jahre dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass bei der Betrachtung der Klasse N2 aufgrund der Ursprungsquelle des VDKL auch Fahrzeuge zwischen 2 t und 3,5 t eingerechnet wurden.

Tabelle 4: Anzahl temperaturgeführte LKW und Anhänger für die Jahre 2016 – 2021 in Anlehnung an VDKL (Marktdaten und Statistiken, no date)

	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Anhänger	55.132	57.193	58.900	61.807	63.513	61.941
LKW						
> 10 t	6.363	6.599	6.897	7.253	7.505	7.536
5 t bis 10 t	6.750	7.531	8.181	8.758	9.302	9.137
2 t bis 5 t	10.379	10.112	9.799	9.512	9.161	8.459
Gesamt	78.624	81.435	83.777	87.330	89.481	87.073
Veränderung	2.815	2.811	2.342	3.553	2.151	-2.408
in %	3,71	3,58	2,88	4,24	2,46	-2,69

Insgesamt ist zwischen den Jahren 2016 und 2020 ein kontinuierlicher Anstieg der Anzahl temperaturgeführten Kraftfahrzeugen zu verzeichnen. Nur im Jahr 2021 ist im Vergleich zum Vorjahr 2020 ein Rückgang von rund 2,7 % zu erkennen. Dieser wird auf die anhaltende Corona-Pandemie und die damit einhergehenden Transportbeschränkungen zwischen einzelnen Ländern sowie einem Rückgang an Transportgütern und einem Mangel an Kraftfahrer:innen begründet. Den größten Teil der temperaturgeführten Fahrzeuge in den betrachteten Segmenten stellen die Anhänger dar, gefolgt von Fahrzeugen mit 2 bis 5 t. Letztgenannten Fahrzeuge nehmen jedoch zugunsten größerer Gewichtsklassen kontinuierlich ab.

Vergleichend zu den Marktdaten des VDKL wurden die Statistiken des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) zu den Fahrzeugzulassungen mit Stand zum 01. Januar 2022 ausgewertet. Hierfür wurde die Veröffentlichung FZ 25 mit dem Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) gewählt (*Marktdaten und Statistiken, no date*). Ausgewertet wurden Lastkraftwagen und Kraftfahrzeuganhänger mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ für die Jahre 2016 bis 2021. Das KBA weist bei der Einteilung nach Aufbauart auf eine statistische Ungenauigkeit hin, da die Hersteller nicht verpflichtet sind, bei der Typgenehmigung die Art des Spezialaufbaus anzugeben, womit nicht alle tatsächlich zugelassenen Fahrzeuge mit Spezialaufbauten ausgewiesen werden. Bei den Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes erfolgt die Einteilung der Nutzlasten der Fahrzeuge gegenüber den Marktdaten des VDKL wesentlich differenzierter. Für den Vergleich wurden die Daten der Klasse N2 > 3,5 t bis

12 t und N3 > 12 t verwendet, da die erste Nutzlastklasse der VDKL-Marktdaten auch Daten von Fahrzeugen kleiner als 3,5 t enthält. Abbildung 7 zeigt die Bestandsentwicklung laut KBA für LKW mit Isolierwänden und Kühlung der Klassen N2 und N3 für die Jahre 2016 bis 2021.

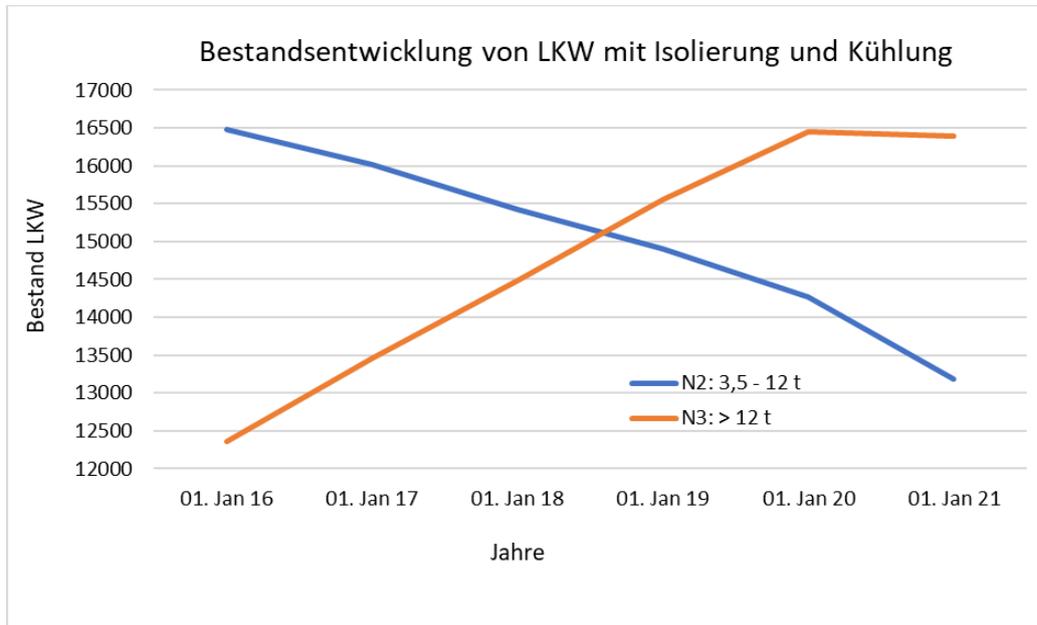


Abbildung 7: Bestandsentwicklung LKW mit Isolierung und Kühlung für die Jahre 2016 bis 2021 (kumuliert) in Anlehnung an (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022a)

In der Abbildung 7 wird deutlich, dass sich ab den Jahren 2018 / 2019 ein Trend zu schwereren und größeren LKW der Klasse N3 entwickelt hat. Diese Entwicklung ist vergleichbar zu den Daten des VDKL. Die Auswertung der Bestandsdaten ergab kumuliert für den betrachteten Zeitraum 2016 bis 2021 einen Gesamtbestand von 178.976 LKW mit Isolieraufbau und Kühlung in den Nutzlastklassen N2 und N3. Davon waren insgesamt 90.276 LKW der Klasse N2 (3.501 kg bis 12.000 kg) zugeordnet und 88.700 LKW der Klasse N3 (12.001 kg bis >26.000 kg). Eine Aufschlüsselung der einzelnen Nutzlastklassen zeigt, dass in der Klasse N2 hauptsächlich Fahrzeuge mit einer Nutzlast zwischen 7001 und 7500 kg (33.660 LKW) zum Einsatz kommen sowie mit einer Nutzlast zwischen 10.001 und 12.000 kg (32.674 LKW). In beiden Segmenten ist jedoch zwischen 2016 und 2021 ein Abwärtstrend zu verzeichnen, der sich mit 522 Fahrzeugen bei der Nutzlastklasse 7001 und 7500 kg auswirkt und mit 2157 LKW bei der Nutzlastklasse 10.001 und 12.000 kg. In der Klasse N3 besteht laut KBA mit 31.620 Fahrzeugen der größte Bestand in dem Nutzlastsegment zwischen 24.001 kg und 26.000 kg. In diesem Bereich ist in dem betrachteten Zeitraum ein Anstieg von 369 LKW zu verzeichnen. Den größten Anstieg (+ 2.135 LKW) im Bestand der Kühl-LKW der Klasse N3 haben jedoch Fahrzeuge mit einer Nutzlast zwischen 14.001 kg und 16.000 kg. Insgesamt zählt der Bestand zwischen 2016 und 2021 in diesem Segment 16.605 Fahrzeuge. Ein kontinuierlicher Bestand an Kühl-LKW ist in der Nutzlastklasse zwischen 16.001 kg und 18.000 kg festzustellen. Der Durchschnittsbestand liegt hier bei 3.322,83 Fahrzeugen jährlich und insgesamt über den betrachteten Zeitraum bei 19.937 LKW (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022a).

Bei der Auswertung der Anhänger/Auflieger mit Isolierwänden und Kühlung wurden die Daten des Kraftfahrtbundesamtes für die Klasse O3 „Anhängen mit einer zulässigen Gesamtmasse über 3,5 t bis höchstens 10 t“ und O4 „Anhängen mit einer zulässigen Gesamtmasse über 10 t“ herangezogen. Wie bei den Daten zu den LKW mit Isolieraufbau und Kühlung waren auch bei den Anhängern die Daten zu der Nutzlast in 1000 kg Schritten aufgeschlüsselt. Die kumulierten Daten sind in der nachfolgenden Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Bestandsentwicklung Anhänger mit Isolierung und Kühlung für die Jahre 2016 bis 2022 (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022a)

Anhänger mit Isolierung und Kühlung	Klasse O3 > 3,5 t - 10 t	Klasse O4 > 10 t
01. Jan 22	644	45554
01. Jan 21	671	44383
01. Jan 20	920	44357
01. Jan 19	928	43329
01. Jan 18	968	41010
01. Jan 17	985	40011
01. Jan 16	1006	38702

Der Gesamtbestand der Anhänger der Nutzklassen O3 und O4 betrug zum Stichtag 01. Januar 2022 819.139 Fahrzeuge. Aufgeschlüsselt auf die Nutzklassen ergeben sich 84.381 Anhänger für die Nutzkategorie O3 und 734.758 Anhänger für die Nutzkategorie O4. Anhänger mit einer Nutzlast von 26.001 kg und mehr verzeichnen in dem betrachteten Zeitraum laut KBA einen Gesamtbestand von 376.666 Fahrzeugen und stellen mit Abstand den größten Anteil dar. Innerhalb der Anhänger mit der Klasse O4 (Nutzlast < 10 t) entfallen 44.554 Anhänger auf den Typ „Mit Isolierwänden und Kühlung“. Zwischen 2016 und 2022 erfolgte in diesem Segment eine Zunahme von 6.852 temperaturgeführten Anhängern (+17,7%) (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022a). Wie bei den seitens des VDKL erhobenen Daten wird auch bei den Daten des KBA deutlich, dass Anhänger mit Isolierung und Kühlung einen wichtigen Anteil bei den temperaturgeführten Transporten ausmachen. Im Vergleich zum Gesamtfahrzeugbestand an Lastkraftwagen nach Aufbauarten mit Stand vom 1. Januar 2022 machen die Nutzfahrzeuge mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ einen Anteil von rund 1,5 % aus. Werden die „Sonstigen“ Aufbauarten herausgerechnet und ausschließlich die Gesamtanzahl an klar definierbaren Nutzfahrzeugen herangezogen, ergibt sich ein Anteil der Nutzfahrzeuge mit Isolierwänden und Kühlung von ungefähr 4 %.

Eine Aufschlüsselung des Anteils an Kühl- und Tiefkühl-Nutzfahrzeugen nach dem zulässigen Gesamtgewicht zeigt die Tabelle 6.

Tabelle 6: Anteil der Lastkraftwagen nach Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ am Gesamtbestand nach Aufbauarten (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022a, p. 24), Stand 01. Januar 2022

	Fahrzeugklassen			Gesamt	Anteil Kühlfahrzeuge (N2 und N3)
	N1	N2	N3		
Gesamt (ohne Sonstige)	3.045.598 (936.185)	267.773 (236.131)	236.221 (196.727)	3.549.592 (1.369.043)	503.994 (432.858)
Isolierter Aufbau mit Kühlung	24.257	12.831	16.590	53.695	29.421
Anteil zu gesamt in % (ohne Sonstige)	0,8 (2,6)	4,8 (5,4)	7,0 (8,4)	1,5 (3,9)	5,8 (6,8)

Werden nur die für die Studie relevanten Klassen N2 und N3 betrachtet, ergibt sich gegenüber dem Gesamtbestand ein Anteil von rund 6 % an LKW mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ und von rund 7 % nach Herausnahme der Aufbauart „Sonstige“.

Den berechneten Anteil der Kraftfahrzeuganhänger mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ am Gesamtbestand der Kraftfahrzeuganhänger nach Aufbauarten ist der Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Anteil der Kraftfahrzeuganhänger nach Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ am Gesamtbestand nach Aufbauarten (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022a, p. 46), Stand 01. Januar 2022

	Gesamtbestand an Anhängern (O1 bis O4)	Anteil Kühlanhänger (O3 und O4)	Aufteilung Kühlanhänger (Anhängerklassen)	
			O3	O4
Gesamt (ohne Sonstige)	8.098.107 (6.636.730)	819.139 (589.314)	84.381 (52.252)	734.758 (537.062)
Isolierter Aufbau mit Kühlung	46.210	46.210	656	45.554
Anteil zu gesamt in % (ohne Sonstige)	0,6 (0,7)	5,6 (7,8)	0,8 (1,3)	6,2 (8,5)

Im Vergleich zum Gesamtfahrzeugbestand an Kraftfahrzeuganhängern nach Aufbauarten mit Stand vom 1. Januar 2022 machen die Kraftfahrzeuganhänger mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ einen Anteil von rund 0,8 % aus. Werden die „Sonstigen“ Aufbauarten, die zwar einen erheblichen Anteil (1.458.129 Anhänger) ausmachen, aber nicht eindeutig zugeordnet werden können, herausgerechnet, ergibt sich ein Anteil der Kraftfahrzeuganhänger mit Isolierwänden und Kühlung von ungefähr 1,3 %. In der Tabelle 7 sind die jeweiligen Anteile am Gesamtbestand nach den in der Studie betrachteten Anhängerklassen O2 und O3 aufgeschlüsselt. Werden nur die für die Studie relevanten Klassen O3 und O4 betrachtet, ergibt sich gegenüber dem Gesamtbestand ein Anteil von rund 5,6 % an Anhängern mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ und von rund 7,8 % nach Herausnahme der Aufbauart „Sonstige“.

1.4 Einsatzbereiche und -branchen der Kühllogistik sowie Einsatzdauer der Kühlsysteme

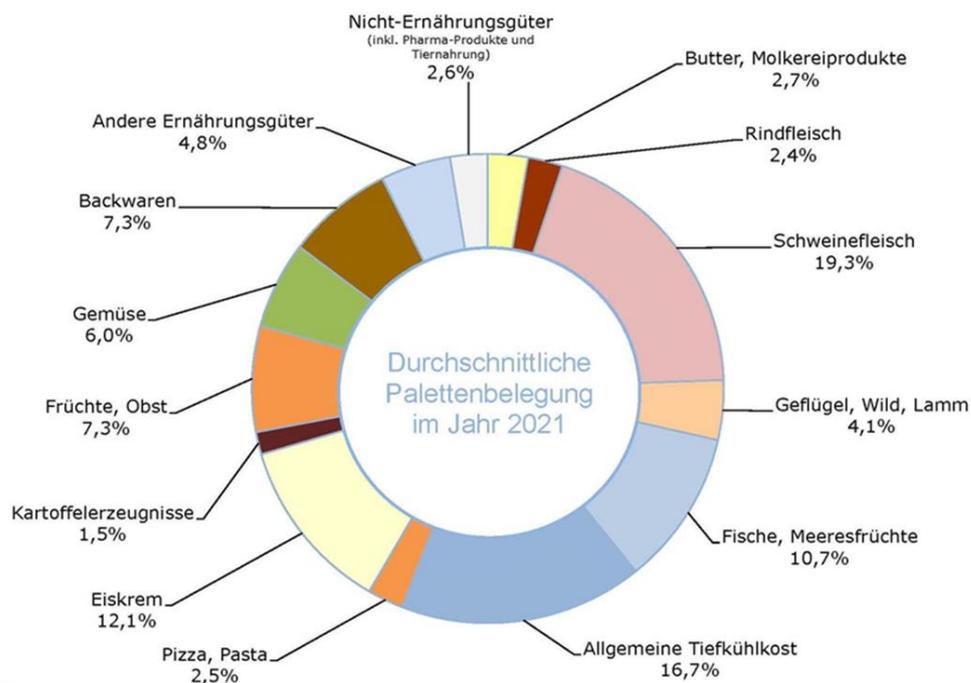
Nachdem der Bestand an Kühllastwagen und Kühlanhängern festgestellt wurde, werden im folgenden Abschnitt die Einsatzbereiche und -branchen der Kühllogistik sowie die Einsatzdauer der Kühlsysteme untersucht und dargestellt. Neben Daten von Verbänden und Instituten wurden zu diesem Zweck auch Auszüge aus Gebrauchtfahrzeugportalen herangezogen. In Ergänzung zum Alter der eingesetzten Kühllastwagen und -systeme wurden auch die Marktanteile der Hersteller von Kühllastwagen und Kühlanhängern am Gebrauchtfahrzeugmarkt veranschaulicht.

1.4.1 Identifizierung der Einsatzbereiche und -branchen der Kühllogistik

Der nationale und internationale Transport von Kühl- und Tiefkühlprodukten ist gekennzeichnet von einer Vielzahl von unterschiedlichen Transportgütern. Hierzu zählen insbesondere die nachfolgenden Segmente:

- Lebensmittel und Pflanzen
- Gefahrgut
- Healthcare-Produkte sowie medizinische und Labor-Produkte
- Trockeneis- und Stickstofflogistik
- Abfälle und Schüttgüter

Aus den regelmäßigen Erhebungen des Verbands Deutscher Kühlhäuser & Kühllogistikunternehmen e. V. (VDKL) wird die Verteilung der transportierten Güter deutlich (Abbildung 8).



Quelle: VDKL

Abbildung 8: Palettenbelegung in VDKL-Kühlhäusern in 2021 (Marktdaten und Statistiken, no date)

Zu den statistischen Erhebungen des VDKL gehört auch die Auslastung der Kühlhäuser, die die VDKL-Mitglieder monatlich auf Grundlage der wichtigsten eingelagerten Kühl- und Tiefkühlgruppen melden.

Den größten Anteil der Erhebung im Jahr 2021 entfällt auf Fisch- und Fleischprodukte gefolgt von Tiefkühlkost. Weitere Produkte aus dem Bereich der Ernährungsgüter sind Obst und Gemüse, Backwaren und Molkereierzeugnisse. Nur ein sehr geringer Anteil in Höhe von 2,6 % entfiel auf Nicht-Ernährungsgüter inklusive Pharma-Produkte und Tiernahrung.

Laut dem Deutschen Tiefkühlinstitut e. V. (dti) hat sich von 1960 bis heute (2022) der Absatz von Tiefkühlkost in Deutschland vervierzigfacht. Die Tiefkühlindustrie ist gemessen am Gesamtumsatz somit die fünftgrößte Branche der Lebensmittelindustrie in Deutschland (*Marktdaten, 2022*). Das dti erstellt eine jährliche Absatzstatistik zu Tiefkühlprodukten in Deutschland sowie einen 10-Jahres-Vergleich. Die folgende Abbildung 9 zeigt eine zusammengefasste Übersicht über den Absatz der Tiefkühlprodukte in den Jahren 2011 und 2021.

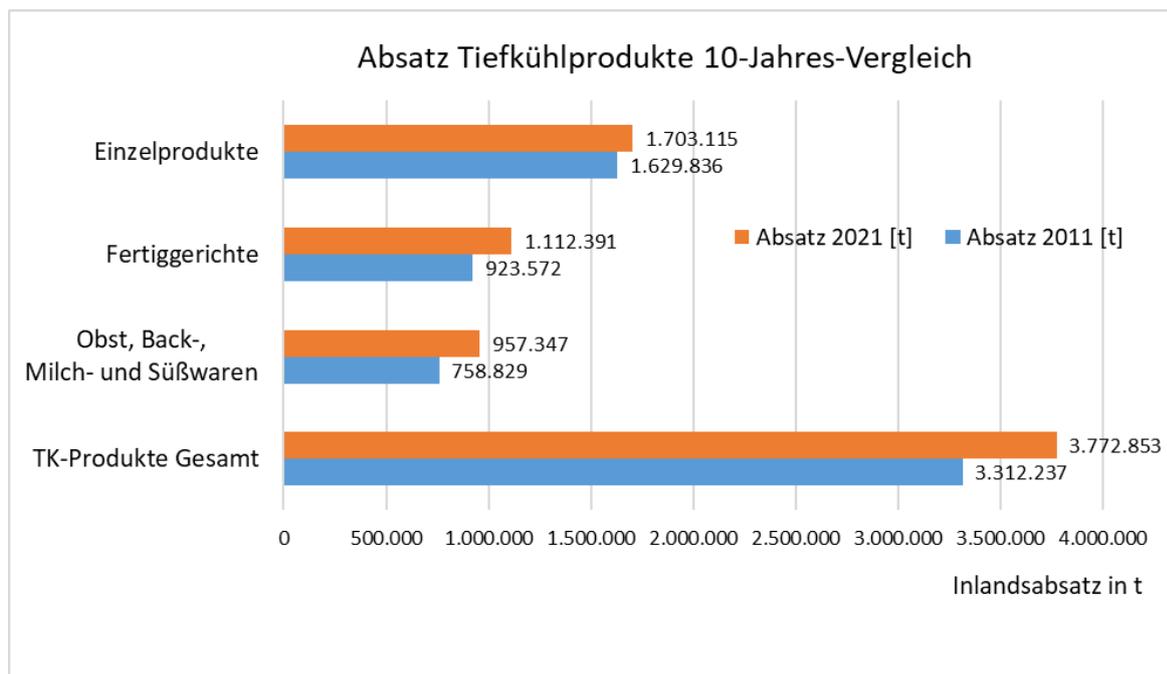


Abbildung 9: Absatz Tiefkühlprodukte 10-Jahres-Vergleich (*Marktdaten, 2022*); Eigene Darstellung

Die Darstellung zeigt den Lebensmittelabsatz in t für die beiden Bereiche Lebensmittelhandel (inklusive Heimdienste) und Außer-Haus-Markt (Gastronomie, Gemeinschaftsverpflegungen etc.). Dieser ist aufgeschlüsselt auf die drei Produktebenen Einzelprodukte (Gemüse, Fisch, Kartoffeln, Fleisch, Beilagen), Fertiggerichte (Gerichte, Pizza, Snacks) sowie Obst-, Back-, Milch- und Süßwaren. Auf allen Produktebenen konnten insgesamt Zuwächse an verkauften Tonnagen verzeichnet werden. Bei einzelnen Produkten hat sich insbesondere auf dem Außer-Haus-Markt ein leicht rückgängiger Absatz entwickelt. Über die Gesamtheit aller Tiefkühlprodukte lag der Absatzanstieg zwischen 2011 und 2021 bei 13,9 %. Diese positive Marktentwicklung zeigte sich ebenfalls bei der jährlichen Absatzstatistik für die Jahre 2020/2021 (Abbildung 10).

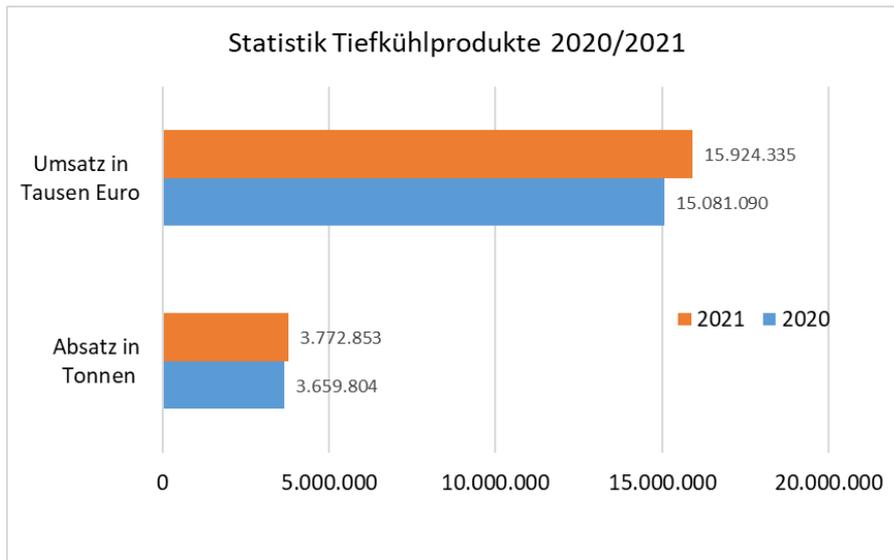


Abbildung 10: Jährliche Absatzstatistik 2020/2021 Tiefkühlprodukte (Marktdaten, 2022); Eigene Darstellung

Die Grafik zeigt den Absatz an Tiefkühlprodukten in Deutschland in t sowie den Umsatz in Tausend Euro. Von 2020 auf das Jahr 2021 konnte bei einer Absatzsteigerung von 3,1 % der Umsatz um 5,6 % erhöht werden, was die besondere Bedeutung der Tiefkühlprodukte für die Lebensmittelindustrie und somit auch für die Tiefkühllogistik hervorhebt.

In der Vergangenheit zeichnete sich bereits ab, dass der herkömmliche Lebensmitteleinzelhandel und Außer-Haus-Markt durch eine Zunahme des E-Food-Marktes ergänzt wird, der aus Wettbewerbsgründen neben dem Trockensortiment auch zunehmend Kühl- und Tiefkühlprodukte anbietet.

Neben diesen Ernährungsgütern werden in der Kühl- und Tiefkühllogistik in kleinerem Umfang auch Pflanzen und Blumen sowie Gefahrgut (gemäß ADR¹), wie Chemikalien, Farben, Lösungsmittel und Kleber sowie Kosmetika transportiert. In den Bereichen Healthcare, medizinische und Labor-Produkte für Pharma, Forschung und Biotechnologie sind dieses zudem tiefgekühlte bzw. gekühlte medizinische, diagnostische, biologische und Lebensmittel-Proben, tiefgekühlte bzw. gekühlte biologische Stoffe der Kategorie B nach UN 3373 (ansteckungsgefährliche Stoffe), menschliches und tierisches Gewebe, menschliches Blut (HACCP Standard²), Impfstoffe und Medikamente, Pharmazeutika, Studienmedikamente und Betäubungsmittel. Zudem kann den temperaturgeführten Transporten die Trockeneis- und Stickstofflogistik zugerechnet werden (Nollau and Neumeier, 2010).

Aus Nachhaltigkeitsgründen muss darauf hingewiesen werden, dass einige Transportgüter teilweise ohne unbedingte Notwendigkeit temperaturgeführt transportiert werden. Hierzu zählen beispielsweise Produkte wie Kartoffeln oder Olivenöl. Dies gilt auch für temperaturempfindliche Güter, wie Schokolade, die im Sommer gekühlt transportiert wird. Innerhalb des ATP-Übereinkommens werden, um ein Beispiel zu nennen, die Lebensmittel aufgeführt, die bei bestimmten Temperaturen zu transportieren sind. In diesem Zusammenhang ist vor dem Hintergrund des anhaltenden Klimawandels mit

¹ Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße

² HACCP: Hazard Analysis and Critical Control Points

International verbindliches Qualitätsmanagementsystem für die Produktion und den Umgang mit Lebensmittel zur Vermeidung von Gefahren im Zusammenhang mit Lebensmitteln, die zu einer Erkrankung oder Verletzung von Konsumenten führen können (präventive Maßnahme).

steigenden Temperaturen in den Sommermonaten und länger anhaltenden Hitzeperioden davon auszugehen, dass insbesondere temperaturempfindliche Güter künftig einen zunehmenden Anteil an den temperaturgeführt transportierten Gütern einnehmen könnten.

1.4.2 Einsatzdauer und Einsatzorte der Kühlsysteme

Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass ein Großteil der deutschen Logistikdienstleister Kühl- und Tiefkühltransporte sowohl in Deutschland als auch im europäischen Ausland durchführt. Somit wird ein umfangreicher grenzüberschreitender Verkehr in diesem Segment bestehen. Entsprechend erfolgt der Verkauf von Gebrauchtfahrzeugen beispielsweise über herstellereigene Plattformen in den deutschen und europäischen Niederlassungen.

Um Aussagen über die Einsatzdauer der Kühltransporter machen zu können, erfolgte eine umfangreiche Recherche und Analyse der Altersverteilung der Fahrzeuge auf bekannten Plattformen für Gebrauchtfahrzeuge. Zur Erfassung der Einsatzorte der Kühlsysteme wurden statistische Daten des Kraftfahrtbundesamtes sowie des Bundesamtes für Güterverkehr (neu: Bundesamt für Logistik und Mobilität) ausgewertet.

Einsatzdauer der Kühlsysteme

Die Datenlage zur Bewertung der Altersverteilung von Kühltransportern erfolgte auf der Basis der digitalen Gebrauchtwagenplattform mobile.de. Mit Stand Oktober 2022 wurden die dort aufgeführten deutschlandweiten Angebote ausgewertet. Hierdurch wird eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt der Erhebung wiedergegeben, die einen Einblick in die Altersverteilung der eingesetzten Kühlfahrzeuge und deren Hersteller geben soll. Diese ist jedoch nicht als Gesamtmarktbeurteilung, sondern als Stichprobe zu interpretieren.

Die Suchsystematik umfasste dabei die Erstzulassungen zwischen den Jahren 2000 und 2022 für die folgenden Kategorien:

- Kühlaufleger mit den zulässigen Gesamtgewichten
 - 18.001 – 26.000 kg
 - 26.001 – 32.000 kg
 - Ab 32.001 kg
- Kühlanhänger mit dem zulässigen Gesamtgewicht 18.001 – 26.000 kg
- Motorwagen mit den zulässigen Gesamtgewichten
 - 3.500 - 7.500 kg
 - 7.501 – 12.000 kg
 - 12.001 – 18.000 kg
 - 18.001 – 26.000 kg
 - 26.001 – 32.000 kg
- Wechselkoffer

Zudem erfolgte für alle vier Fahrzeugkategorien eine herstellerspezifische Auswertung der Altersverteilung sowohl für die Kühltransporter als auch für die Kühlaggregate.

Im Folgenden werden die Ergebnisse grafisch dargestellt und ausgewertet.

Altersverteilung Kühlaufleger

Die Aufteilung in die Gewichtsklassen der im Segment Kühlaufleger erfassten Fahrzeuge ist der Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 8: Kühlaufleger, zulässige Gesamtgewichte

Zulässiges Gesamtgewicht	Prozentzahl Kühlaufleger
18.001 - 26.000 kg	11,88 %
26.001 - 32.000 kg	20,31 %
Ab 32.0001 kg	67,82 %

Die Abbildung 11 zeigt die Altersverteilung der sich auf dem Gebrauchtmrkt befindlichen Angebote an Kühlauflegern.

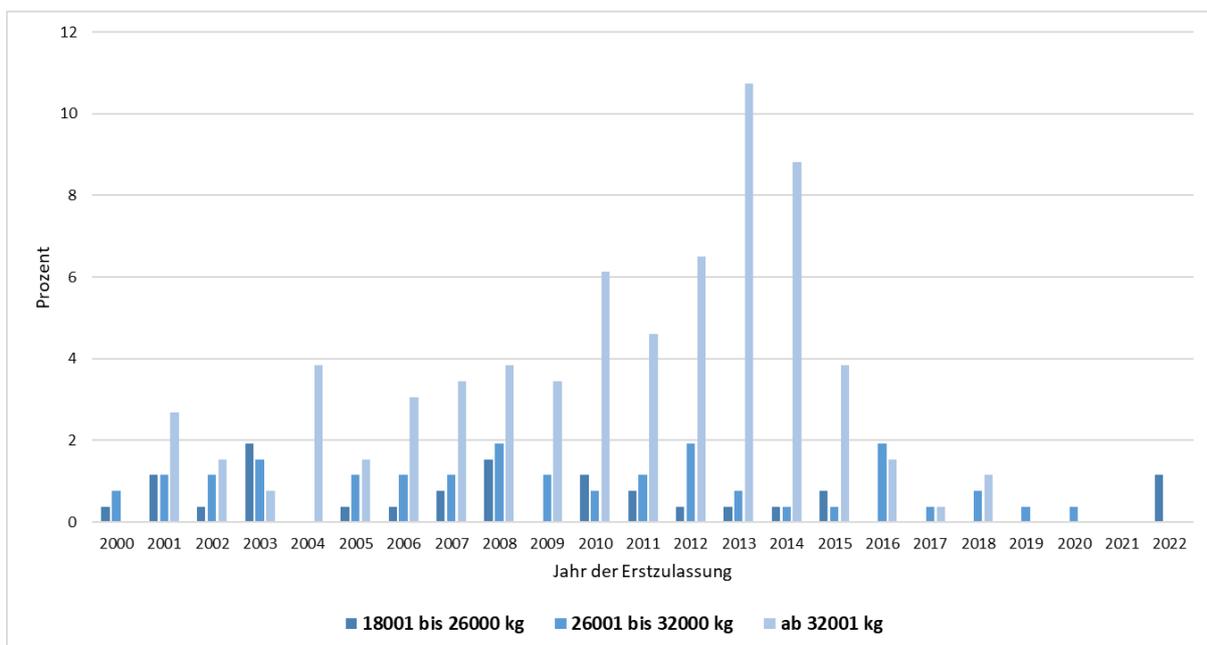


Abbildung 11: Altersverteilung der Kühlaufleger (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)

Die Abbildung 11 verdeutlicht, dass der Großteil des in der Momentaufnahme ausgewerteten Gebrauchtmrktes Kühlaufleger mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 32.000 kg abbildet. 54,24 Prozent dieser Gewichtsklasse wurden in dem Zeitraum zwischen 2010 und 2014 zugelassen und verfügen über ein Alter zwischen acht und zwölf Jahren. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Altersklasse zwischen 13 und 18 Jahren mit einem Anteil von 28,25 Prozent. Mit abnehmender Gewichtsklasse (< 32.000 kg) nimmt auch die Anzahl der Kühlaufleger auf dem Gebrauchtmrkt ab, jedoch sind alle drei Gewichtsklassen mit Ausnahmen in den Jahren 2004 und 2009 über den gesamten Zeitraum mit den Erstzulassungen von 2000 bis 2015 vertreten. Jüngere Fahrzeuge in den Altersklassen null bis fünf Jahre (EZ 2017 – 2022) sind Ausnahmen auf dem Gebrauchtmrkt, es ist jedoch ein vager Trend zu Kühlauflegern mit höheren Gewichtsklassen zu erkennen.

In Abbildung 12 und Abbildung 13 werden die prozentualen Marktanteile der Hersteller der betrachteten Kühlaufleger benannt sowie, soweit benannt, die Hersteller der verbauten Kühlaggregate.

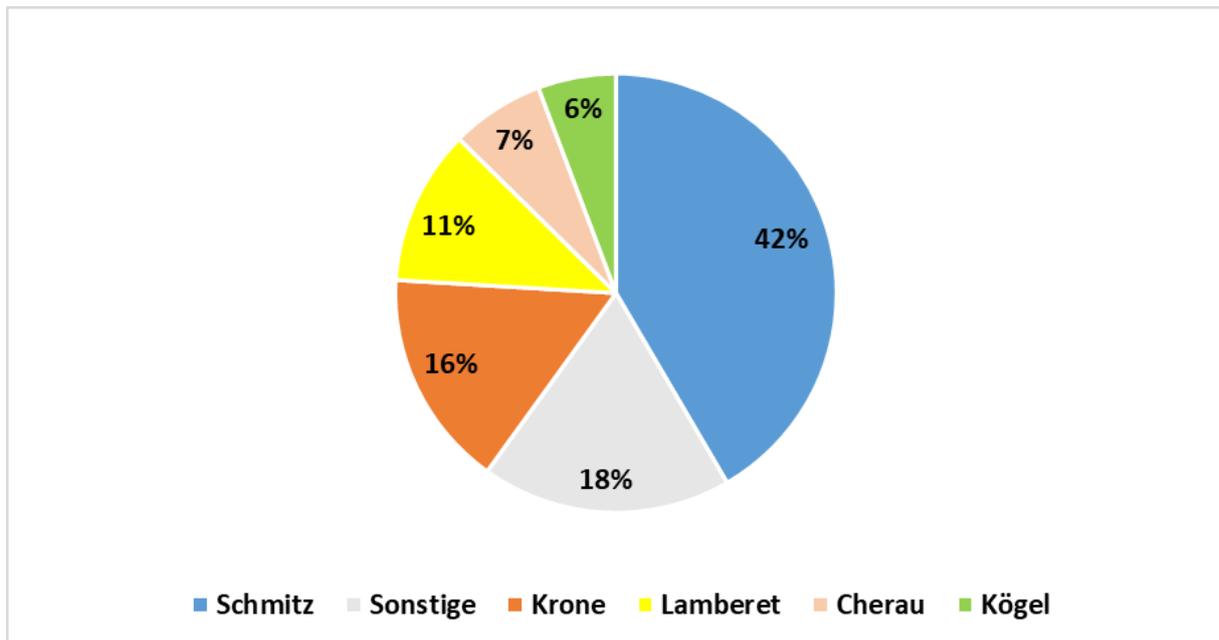


Abbildung 12: Marktverhältnis Hersteller Kühlaufleger (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)

Bei den Kühlauflegern ist der Hersteller Schmitz Cargobull AG mit einem Anteil von 42 % am häufigsten auf dem analysierten Gebrauchtmakrt vertreten. Schmitz Cargobull ist ein deutscher Hersteller von Auflegern, Anhängern und Aufbauten (Schmitz Cargobull, no date). Mit 16 % folgt das Fahrzeugwerk Bernhard Krone GmbH & Co. KG als deutscher Hersteller von Sattelauflegern und LKW-Anhängern (Fahrzeugwerk Bernard KRONE GmbH & Co. KG, no date). Diese Reihenfolge auf dem Gebrauchtmakrt spiegelt auch die Verteilung der Marktanteile auf dem europäischen Makrt für Aufleger und Anhänger wider. An dritter Stelle mit 11 % steht das französische Unternehmen Lamberet SAS. Cherau hat zwar ein großes Netzwerk, jedoch nur einen geringeren Marktanteil in Europa (15 %), was auch der Gebrauchtmakrt in Deutschland mit 7 % Anteil aufzeigt. Cherau ist in seinem Kühlaufleger-Kerngeschäft sehr innovativ und hat bereits einen wasserstoffbetriebenen Aufleger auf den Makrt gebracht (CHEREAU - Véhicules frigorifiques - Expert de la carrosserie frigorifique, no date), s. auch Kapitel „4.1 Technische Analyse emissionsfreier Kühlsysteme“. Das etwas kleinere Angebot an Kühlauflegern des Herstellers Kögel innerhalb dessen Gesamtportfolios erklärt den relativ geringen Marktanteil von 6 % auf dem deutschen Gebrauchtmakrt (Über Kögel - Because we care, no date). Neben diesen größeren Herstellern deuten die 18 % „Sonstige“ auf eine große Vielfalt an weiteren unterschiedlichen Herstellern von Kühlauflegern auf dem Gebrauchtmakrt in Deutschland hin.

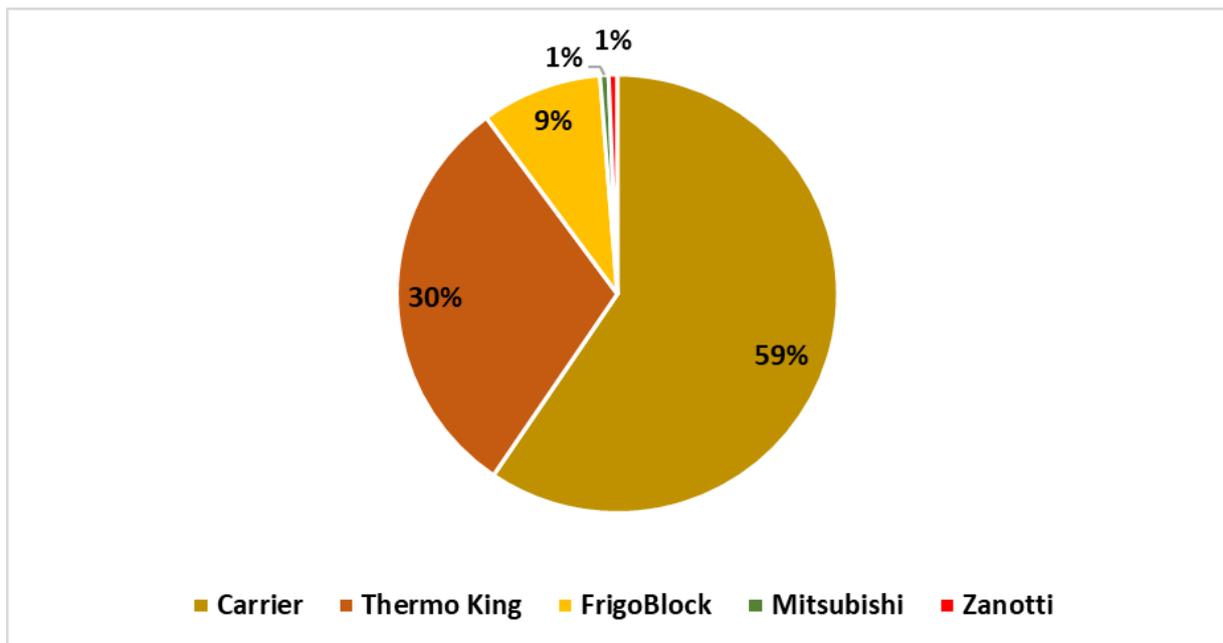


Abbildung 13: Marktverhältnis Hersteller Kühlaggregate für Auflieger (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)

Die Unternehmen Carrier und Thermo King sind beide US-amerikanische Hersteller von Kühlaggregaten, wobei Carrier Kälteanlagen für unterschiedliche Einsatzfelder herstellt und mit dem Unternehmen Carrier Transicold den Fahrzeugsektor abdeckt. Carrier ist mit 51 Fertigungsanlagen und 39 Entwicklungszentren in über 180 Ländern weltweit einer der größten Hersteller von Kühlaggregaten, was dem hohen Anteil von 59 % auf dem betrachteten Gebrauchtmrkt entspricht (*Über Carrier*, no date). Mit einem Anteil von 30 % auf dem ausgewerteten Gebrauchtmrkt ist Thermo King als zweitgrößter Hersteller vertreten. Frigoblock hat bei den ausgewerteten Systemen mit 9 % nur einen kleineren Anteil, was u. a. auf die Beschränkung auf vollelektrische Systemangebote zurückzuführen ist. Weitere Anbieter von Kühlaggregaten mit einem Anteil am deutschen Gebrauchtmrkt von jeweils nur 1 % sind Mitsubishi und Zanotti.

Altersverteilung Kühlanhänger

Die Altersverteilung von Kühlanhängern wurde für alle Angebote auf den deutschlandweit bekannten Gebrauchtfahrzeugangeboten von "mobile.de" und "truckscout24" mit einem zulässigen Gesamtgewicht zwischen 18.001 und 26.000 kg ausgewertet. Unterhalb dieser Gewichtsklasse existieren keine relevanten Angebote, da eine Nachfrage nach Kühlanhängern in der Klasse < 18.000 kg verschwindend gering ist.

In der Abbildung 14 sind die prozentualen Anteile nach Alter der gebrauchten Kühlanhänger über das Jahr der Erstzulassung aufgetragen.

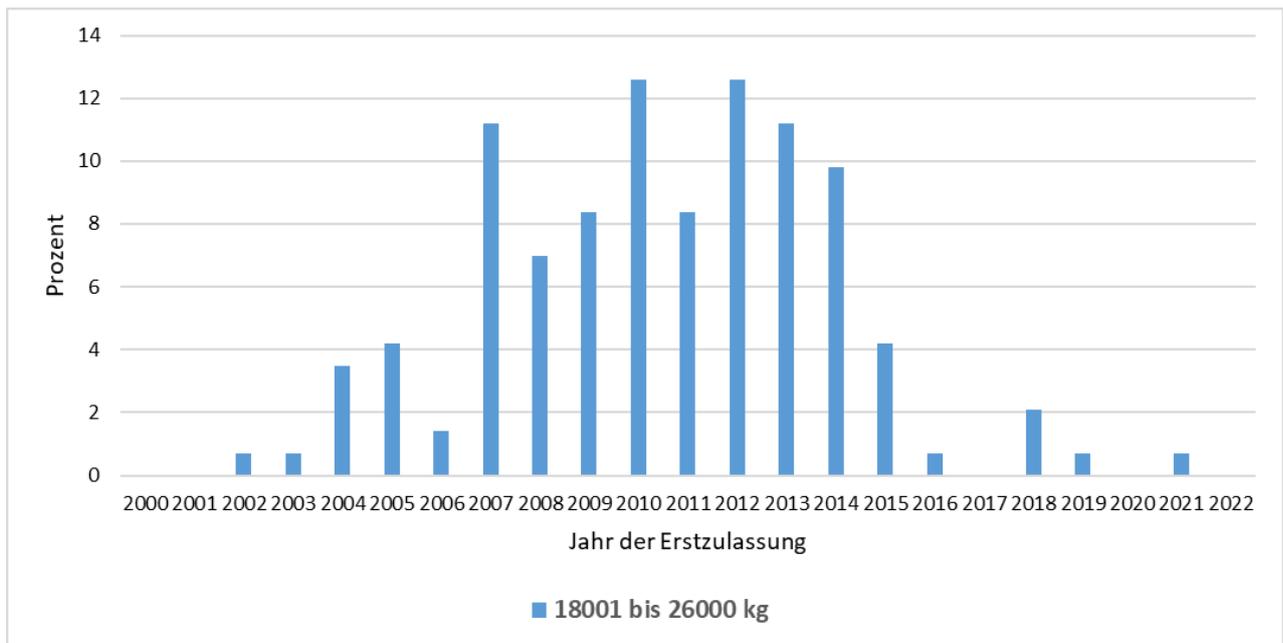


Abbildung 14: Altersverteilung der Kühlanhänger (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)

Die Verteilung der ausgewerteten Gebrauchtanhänger verdeutlicht eine Konzentration bei den Erstzulassungen zwischen 2007 und 2014. Daraus lässt sich schließen, dass Kühlanhänger nach einer Einsatzzeit zwischen acht und 15 Jahren Zugang zu dem Second Life-Markt erhalten. Den größten Anteil haben dabei Kühlanhänger mit den Altersklassen 10 und 12 Jahren. Dieser Zeitraum beim Übergang von dem First Life in das Second Life und einem damit möglichen Erwerb eines Neufahrzeuges zeigt sich auch grundsätzlich bei den ausgewerteten Kühlaufliegern, wobei Auflieger mit einem zGG zwischen 18 t und 26 t teilweise erst später auf dem Gebrauchtmart zu finden sind.

Bei den Kühlanhängern erfolgte ebenfalls anhand der Gebrauchtmartdaten eine Betrachtung der Marktanteile der Kühlanhängerhersteller und der Kühlaggregathersteller (Abbildung 15 und Abbildung 16).

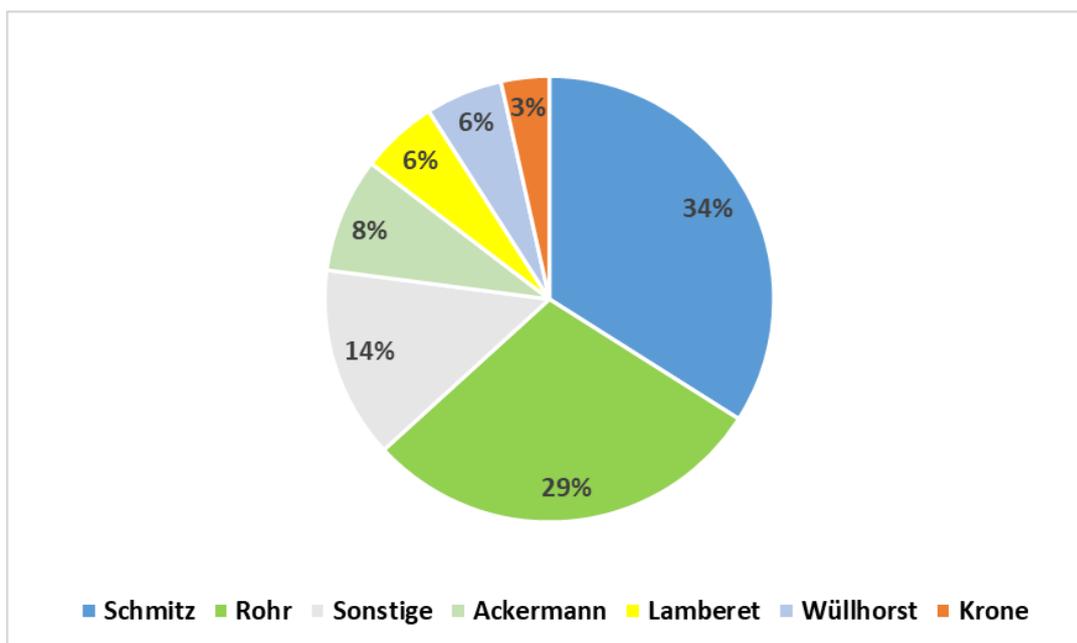


Abbildung 15: Marktverhältnis Hersteller Kühlanhänger (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)

Bei den Kühlanhängern zeigt sich eine größere Diversität hinsichtlich des Marktes der Hersteller als bei den Kühlaufliegern, wobei auch hier Schmitz Cargobull mit 34 % eine führende Position einnimmt. Mit einem Marktanteil von 29 % folgt knapp hinter Schmitz Cargobull das Unternehmen ROHR Spezialfahrzeuge GmbH, das als Tochtergesellschaft der Kässbohrer Transport Technik GmbH für die Kühllogistik temperaturgeführte Kofferfahrzeuge herstellt. Die Vielfalt bei den Kühlanhängern zeigt sich ebenso an dem hohen Marktanteil von 14 % sonstigen Herstellern und den beiden bisher noch nicht benannten Unternehmen Ackermann Fahrzeugbau (8 %) und Wüllhorst Fahrzeugbau (6 %). Beide Unternehmen sind in Deutschland ansässig und bieten zum Teil Speziallösungen für Kühlkofferaufbauten an. Neben den dargestellten Unternehmen werden in der Marktübersicht auch wieder die beiden Hersteller Lamberet und Krone aufgeführt.

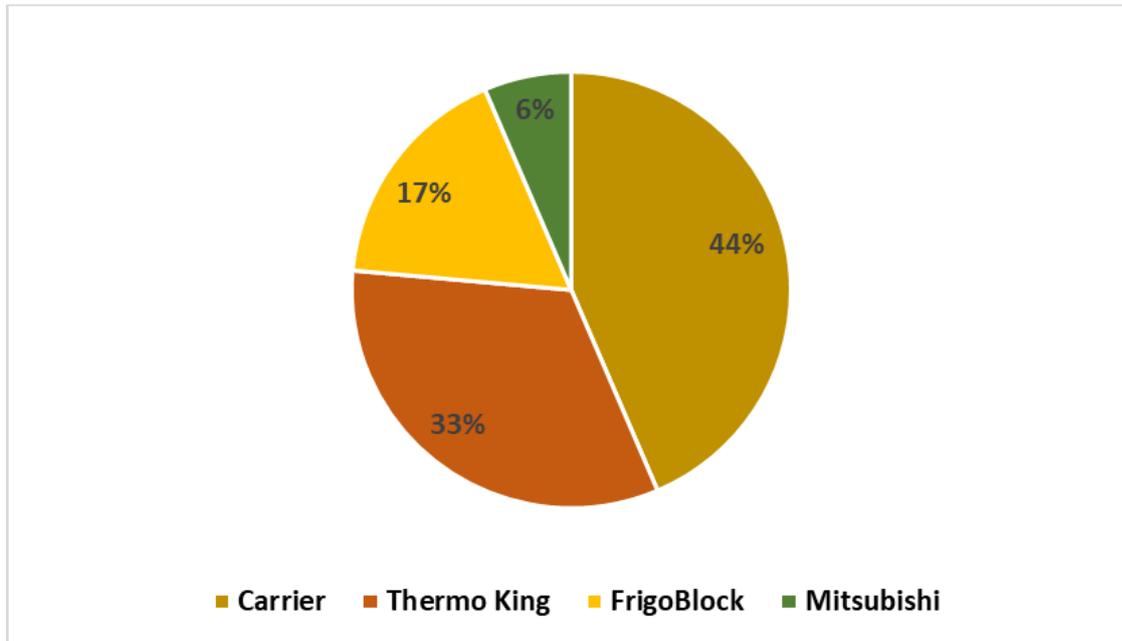


Abbildung 16: Marktverhältnis Hersteller Kühlaggregate für Anhänger (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)

Wie bei den Kühlaufliegern sind bei den Herstellern von Kühlaggregaten für Anhänger die gleichen Hersteller involviert. Marktführend ist bei den ausgewerteten Daten ebenfalls Carrier (44 %), jedoch mit einem kleineren Anteil als bei den Kühlaufliegern. Hier nehmen Thermo King mit 33 % und insbesondere Frigoblock mit 17 % einen größeren Marktanteil in Anspruch. Dies kann voraussichtlich zum Teil darauf zurückgeführt werden, dass Kühlanhänger im Zusammenhang mit Motorwagen eher im Nah- und Verteilverkehr eingesetzt werden, bei dem rein elektrische Kühlaggregate ein ideales Einsatzfeld haben. Dies deutet auch der höhere Marktanteil von 6 % des japanischen Herstellers Mitsubishi an, der in seinem Produktportfolio einen starken Fokus auf vollelektrische Kühlaggregate legt (Mitsubishi Heavy Industries Thermal Transport Europe, no date a).

Altersverteilung Motorwagen

Bei den Motorwagen konnten auf der Gebrauchtfahrzeugplattform die größte Anzahl an Kühlfahrzeugen ausgewertet werden. Die prozentuale Aufteilung in die einzelnen Gewichtsklassen ist der Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Motorwagen, zulässige Gesamtgewichte

Zulässiges Gesamtgewicht	Gesamtanzahl Motorwagen
3.500 – 7.500 kg	9,94 %
7.501 – 12.000 kg	32,53 %
12.001 – 18.000 kg	33,13 %
18.001 – 26.000 kg	23,49 %
26.001 – 32.000 kg	0,90 %

Entsprechend der unterschiedlichen im Angebot befindlichen Gewichtsklassen und der hohen Anzahl an Fahrzeugen zeigt sich in der Abbildung 17 ein sehr differenziertes Bild zu den Motorwagen.

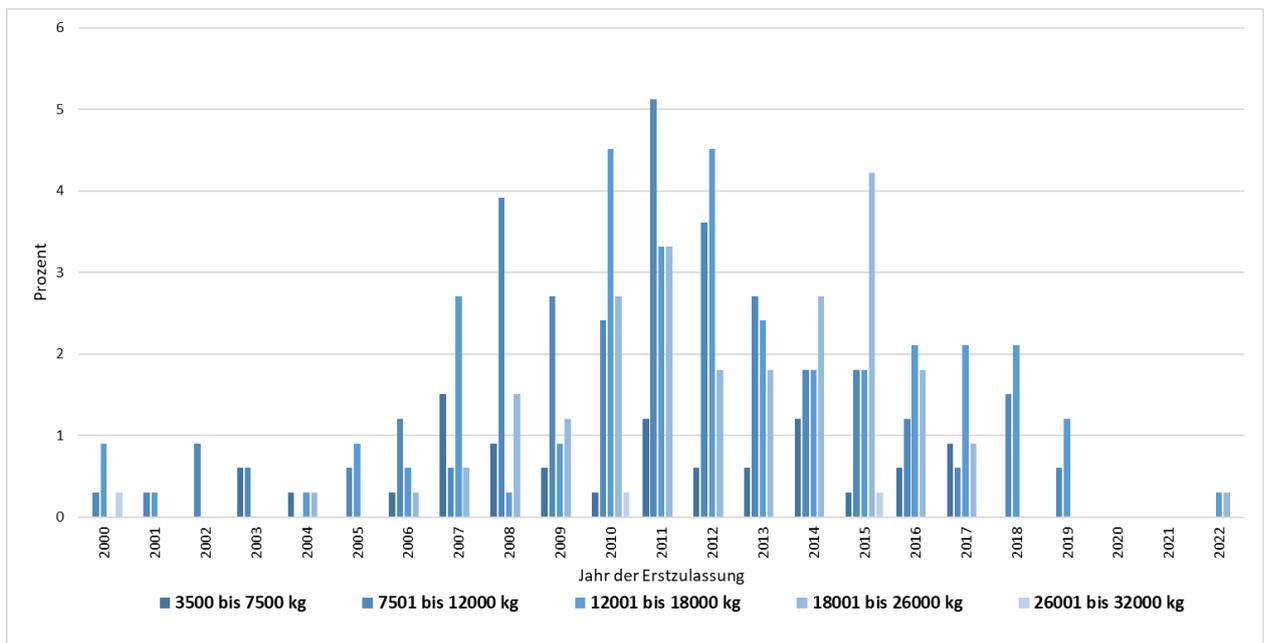


Abbildung 17: Altersverteilung der Motorwagen (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)

Motorwagen mit einem zGG von 12.001 kg bis 18.000 kg und einem zGG von 7.501 kg bis 12.000 kg sind im Second Life auf dem Gebrauchtmotorwagenmarkt am stärksten vertreten, gefolgt von der Klasse ab 18 t bis 26 t. Weniger stark ins Gewicht fallen bei der vorliegenden Auswertung die Gewichtsklasse zwischen 3,5 t und 7,5 t und vernachlässigbar sind auf dem Gebrauchtmotorwagenmarkt Motorwagen mit mehr als 26 t. In dem Erstzulassungsbereich zwischen 2007 und 2016 ist die höchste Anzahl an Fahrzeugen vorzufinden. Das Jahr 2011 und die entsprechende Altersklasse von elf Jahren ist am stärksten vertreten, gefolgt von den Altersklassen zehn und zwölf Jahre. Ein weiterer Peak ist mit 13 - 15 Jahren für EZ in den Jahren

2007 bis 2009 und für EZ in 2016 mit einem Fahrzeualter von 6 Jahren zu identifizieren. Diese Entwicklung des Second Life bei den Motorwagen ist vergleichbar mit denen der Kühlaufleger und der Kühlanhänger.

Die Auswertung der Marktanteile der Motorwagenhersteller hat eine Anzahl von 30 verschiedenen Herstellern ergeben. Da diese zu einem großen Teil nur im einstelligen Prozentbereich vertreten waren, wurde auf eine ganzheitliche Darstellung verzichtet und in der Abbildung 18 nur die Hersteller mit mehr als fünf Prozent Marktanteil aufgeführt. Die Hersteller mit Marktanteilen unter fünf Prozent wurden unter Sonstige zusammengefasst.

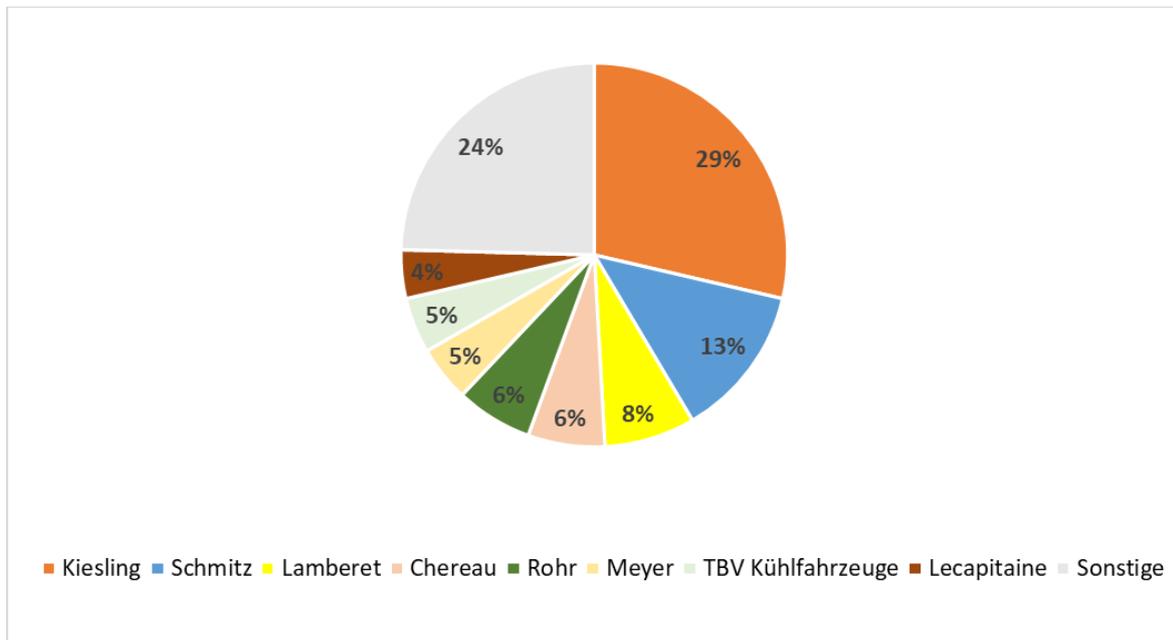


Abbildung 18: Marktverhältnis Hersteller Motorwagenaufbauten (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)

Durch die Zusammenfassung der sonstigen Hersteller in der Abbildung 18 machen diese in der Übersicht zwar einen großen Anteil aus, haben aber keine wesentlichen Marktanteile auf dem ausgewerteten Gebrauchtfahrzeugmarkt. Den größten Anteil mit 29 % nimmt der bisher noch nicht in Erscheinung getretene deutsche Hersteller Kiesling Fahrzeugbau GmbH ein. Das Unternehmen baut Kühltransporter und Vans der Gewichtsklassen 3,5 t bis 7,2 t zGG sowie Kühlfahrzeuge und Trucks der Klassen 7,5 t bis 26 t zGG. Die Kofferaufbauten sind dabei für eine Vielzahl an Fahrgestell-Hersteller passend (Kiesling, no date). Neben Kiesling sind erneut Schmitz Cargobull mit 13 % Marktanteil sowie die beiden französischen Hersteller Lamberet und Chereau vertreten. Die weiteren Unternehmen sind, mit Ausnahme des französischen Unternehmens Lecapitaine, in Deutschland ansässige Hersteller im Kühlfahrzeug- bzw. Motorwagenbau, häufig mit einem Schwerpunkt in der Fertigung von Speziallösungen.

Altersverteilung Wechselbrücken

Im Zuge der Betrachtung des Second Life der Kühlfahrzeuge wurden auch Wechselkoffersysteme mit aufgenommen, obwohl diese zahlenmäßig derzeit eine eher untergeordnete Rolle spielen. Die Abbildung 19 zeigt deren Verteilung über die Erstzulassungen.

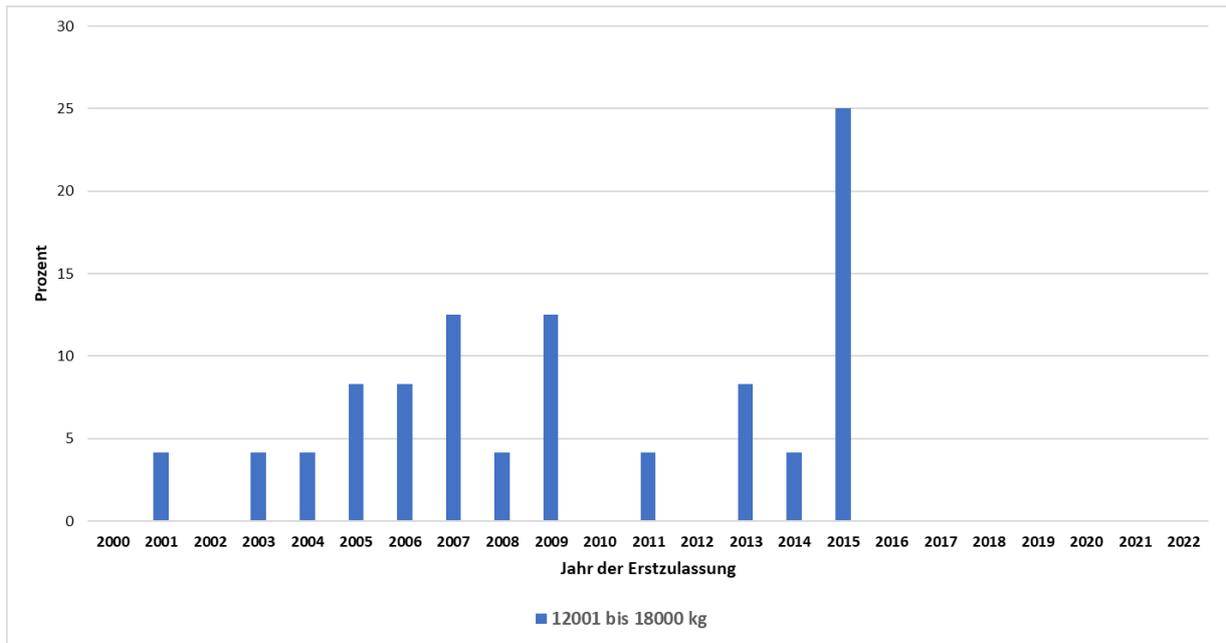


Abbildung 19: Altersverteilung der Wechselkoffer (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)

In der Abbildung 19 sind Wechselkoffer mit einem zGG von 12.001 kg bis 18.000 kg aufgeführt. Aufgrund der geringen Anzahl ist eine statistische Auswertung schwierig. Ein Peak ist mit 25 % bei der Erstzulassung 2015 zu verzeichnen. Diese Fahrzeuge sind mit einem Alter von ca. 7 Jahren in den Second Life eingetreten und damit etwas eher als die anderen betrachteten Kühlfahrzeuge. Mit jeweils 12,5 % sind zudem Wechselkoffer in den beiden EZ-Jahren 2007 und 2009 vertreten. Diese Altersklasse (13 und 15 Jahre) deckt sich auch mit Altersklassen der Kühlaufleger und -anhänger sowie der Motorwagen.

Die prozentualen Marktanteile der Hersteller von Wechselkoffersystemen sind in Abbildung 20 dargestellt. Mit 58 % ist hier Schmitz Cargobull das Unternehmen mit dem größten Marktanteil.

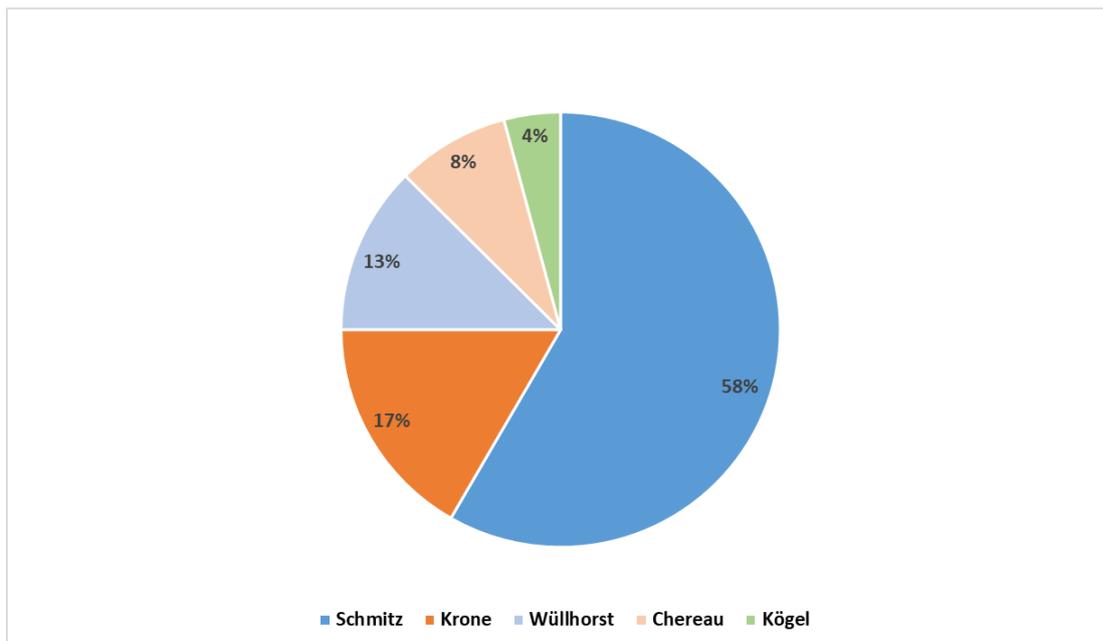


Abbildung 20: Marktverhältnis Hersteller Wechselkoffer (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)

Neben Schmitz Cargobull hat Krone, so wie bei den Kühlaufliegern, den zweitgrößten Marktanteil (17 %) im Gebrauchtfahrzeugsegment. Des Weiteren sind die Unternehmen Wüllhorst, Chereau und Kögel zu nennen.

Bei den Herstellern der Kühlaggregate von Wechselkoffersystemen sind auf dem Gebrauchtmart die bereits bekannten Marken Carrier, Thermo King und Frigoblock zu finden. Bei dieser Technologie hat jedoch Thermo King mit 63 % gegenüber Carrier mit 33 % den größeren Marktanteil.

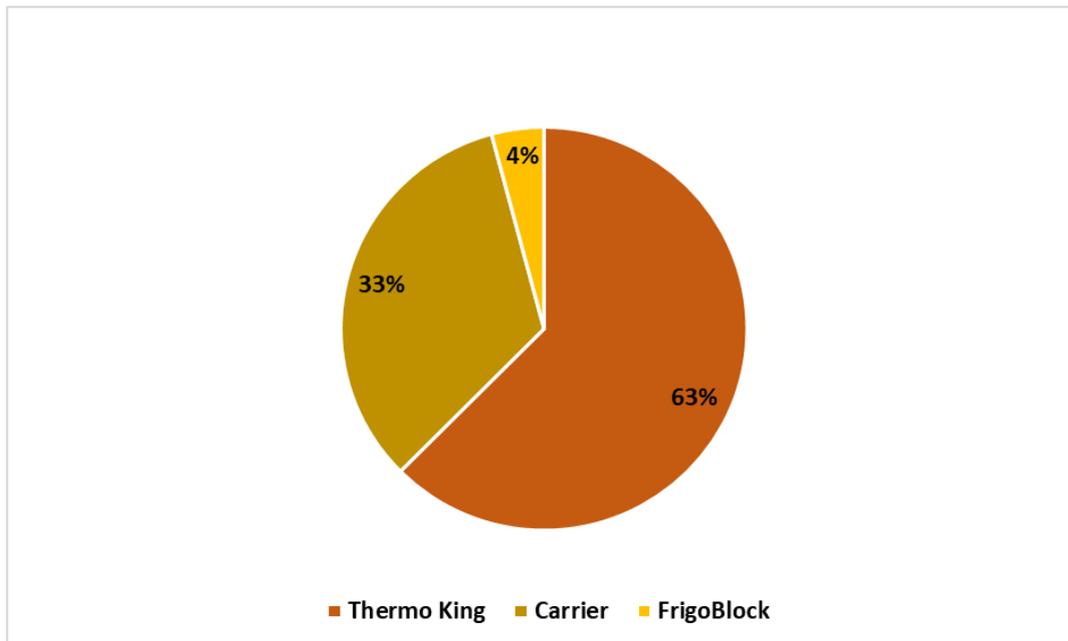


Abbildung 21: Marktverhältnis Hersteller Kühlaggregate für Wechselkoffer (Quelle: mobile.de, Stand Oktober 2022, eigene Darstellung)

1.4.3 Einsatzorte der Kühlsysteme

Zur Ermittlung der Einsatzorte deutscher Kühltransporter wurde innerhalb der Statistiken des KBA der Verkehr deutscher Lastkraftwagen nach dem Verkehrsaufkommen 2021 (Meldestand: 12. April 2022) untersucht (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022c). Die Jahresdaten weisen das Verkehrsvolumen deutscher Güterkraftfahrzeuge aus Last- und Leerfahrten auf, wobei die Anzahl der Fahrten, die zurückgelegte Entfernung, das Gütergewicht, die Beförderungsleistung und der Auslastungsgrad betrachtet werden. Um Aussagen zu temperaturgeführten Transporten treffen zu können, wurde eine weitere sachliche Gliederung u. a. nach zulässiger Gesamtmasse, Nutzlast, Fahrzeugarten, Aufbauarten und Emissionsklassen vorgenommen. Innerhalb der unterschiedlichen Aufbauarten wird in Bezug auf Lastkraftwagen mit einer Kühlfunktion die Aufbauart „Isolierter Kastenwagen“ genannt, die für die Datenauswertung herangezogen wurde.

Das Verkehrsaufkommen wird dabei auf die fünf Bereiche Gesamtverkehr, gewerblicher Verkehr, Werkverkehr, Binnenverkehr und grenzüberschreitender Verkehr aufgeteilt. Um innerhalb der Studie einen Überblick über die Gesamtheit der im Einsatz befindlichen Kühltransporte zu erlangen, wurden die Daten für den Gesamtverkehr ausgewählt. Zur Bewertung wurde der Gesamtverkehr mit der KBA-Statistik Inlandsverkehr mit der gleichen Aufbauart verglichen. Die Daten für den Inlandsverkehr sind ebenfalls in Gesamtverkehr, gewerblicher Verkehr und Werkverkehr unterteilt (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022b). Die erfassten Zahlen sind in der nachfolgenden Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Verkehrsaufkommen (Gesamtverkehr) deutscher Lastkraftwagen mit der Aufbauart „Isolierter Kastenaufbau“ 2020 (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022c)

Aufbauart	Fahrten mit Ladung		Fahrten ohne Ladung	
	Anzahl in 1.000	Zurückgelegte Entfernung in 1.000 km	Beförderte Gütermenge in 1.000 t	Ladevermögen in 1.000 t
Isolierter Kastenaufbau				
Verkehrsaufkommen	19 201,2	2 986 597,4	176 969,0	420 550,6
Inlandsverkehr	19 126,6	2 843 426,2	176 131,2	418 487,3

Die beiden Statistiken zeigen, dass bei den Fahrten mit Ladung sowohl in der Anzahl, den zurückgelegten Entfernungen als auch bei der beförderten Gütermenge nur ein kleiner Unterschied zwischen dem Gesamtverkehr in der Statistik Verkehrsaufkommen und dem Gesamtverkehr in der Statistik Inlandsverkehr besteht. Dies führt zu der Annahme, dass ein großer Teil der deutschen Kühltransporte im Binnenverkehr durchgeführt wird. Bei Betrachtung des Gesamtverkehrs der Statistik Verkehrsvolumen über alle Aufbauarten ergibt sich eine Anzahl von insgesamt 256.008,5 Fahrten mit Ladung. Der Anteil der Fahrten mit „isoliertem Kastenaufbau“ entspricht davon 7,5 Prozent. Ein Hinweis sollte an dieser Stelle auf die doch hohe Anzahl von Leerfahrten im temperaturgeführten Verkehr gegeben werden, die durch ein entsprechendes Transportmanagement reduziert werden könnten (s. auch Kapitel „5.3 Handlungsempfehlungen“). Während der Leerfahrten erfolgt normalerweise keine Kühlung. Ausnahmen treten jedoch auf, wenn die Abstände zwischen den unterschiedlichen Ladungsaufnahmen sehr kurz sind. Daher kann es trotz der Leerfahrten durch das Regulieren der Kühltemperatur ebenfalls zu vermehrten Emissionen kommen.

Neben der Betrachtung des Verkehrs deutscher Lastkraftfahrzeuge nach Verkehrsaufkommen und Inlandsverkehr für die Aufbauart „Isolierter Kastenaufbau“ wurde eine weitere KBA-Statistik zur Bewertung temperaturgeführter Transporte herangezogen. Ebenfalls in der Statistik zum Verkehr deutscher LKW werden Daten zu der Güterbeförderung im Jahr 2021 veröffentlicht (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022d). Hierbei handelt es sich um die transportierten Güterarten durch deutsche Güterkraftfahrzeuge. Die Gliederung der Güter erfolgt nach den 20 NST 2007-Abteilungen. NST-2007 ist ein einheitliches Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik basierend auf der Systematik der Wirtschaftszweige (Statistisches Bundesamt, 2008). In der NST-2007 Abteilung 04 werden Nahrungs- und Genussmittel aufgeführt. Diese gehören zu der zusammenfassenden Gliederung „Konsumgüter zum kurzfristigen Verbrauch, Holzwaren“. Ein großer Teil der dort aufgeführten Nahrungsmittel kann den temperaturgeführten Transporten zugeordnet werden, so dass die dazugehörige Statistik für den Gesamtverkehr ebenfalls mit ausgewertet und in der Tabelle 11 dargestellt wurde (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022d, fol. 7a). Zur Bewertung wurden, wie in der Tabelle 11, die Daten zu der Güterbeförderung im Jahr 2021 mit der KBA-Statistik Inlandsverkehr 2021 mit der gleichen Güterabteilung und für den Gesamtverkehr verglichen (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022b).

Tabelle 11: Güterbeförderung deutscher LKW nach Nahrungs- und Genussmitteln, 2021 (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022b, 2022d)

Güterabteilung	Fahrten mit Ladung		Beförderte Gütermenge in 1.000 t	Ladevermögen in 1.000 t
	Anzahl in 1.000	Zurückgelegte Entfernung in 1.000 km		
Nahrungs- und Genussmittel				
Verkehrsaufkommen	23 953,4	3 636 705,8	323 601,6	557 418,4
Inlandsverkehr	23 868,1	3 472 594,8	322 254,5	555 045,5

Wie bei der Auswertung der Daten zu der Aufbauart „Isolierter Kastenaufbau“, weisen auch die Daten zu der Güterabteilung „Nahrungs- und Genussmittel“ keine großen Unterschiede zwischen dem Gesamtverkehr und dem Inlandsverkehr auf. Die Differenzen bei der Anzahl, den Entfernungen und der Gütermenge sind auf weitere Nahrungs- und Genussmittel zurückzuführen, die neben den Frischeer-

zeugnissen transportiert werden. Hierzu zählen beispielsweise Stärke und Stärkeerzeugnisse sowie Tabakerzeugnisse. Darüber hinaus wurden Daten aus der KBA-Statistik „Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge - Güterbeförderung“ für weitere Untersuchungen zu den Einsatzorten temperaturgeführter Transporte hinzugezogen. In der Statistik werden die Daten für die einzelnen Güterabteilungen nochmals in unterschiedliche Entfernungsbereiche untergliedert. Hieraus wurden für den Gesamtverkehr der Güterabteilung „Nahrungs- und Genussmittel“ die Entfernungsbereiche „Nahbereich“ (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022d, fol. 03a), „Regionalbereich“ (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022d, fol. 03b) und „Fernbereich“ (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022d, fol. 03c) herausgefiltert und in der Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12: Güterbeförderung deutscher LKW nach Nahrungs- und Genussmitteln und Entfernungsbereichen, 2021 (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022d, fols 03a, 03b, 03c)

Güterabteilung	Fahrten mit Ladung		Beförderte Gütermenge in 1.000 t	Ladevermögen in 1.000 t
	Anzahl in 1.000	Zurückgelegte Entfernung in 1.000 km		
Nahrungs- und Genussmittel				
Nahbereich - Gesamtverkehr	6 670,8	172 310,3	87 615,1	149 306,7
Regionalbereich - Gesamtverkehr	8 955,0	846 687,7	117 590,4	198 612,8
Fernbereich - Gesamtverkehr	8 327,6	2 617 707,8	118 396,2	209 498,9

Die Tabelle 12 zeigt auf, dass die größte Anzahl an Fahrten mit Ladung im Segment „Nahrungs- und Genussmittel“ innerhalb des Regionalbereichs zwischen 51 km und 150 km stattfindet. An zweiter Stelle steht der Fernbereich mit mehr als 150 km Entfernung, gefolgt von dem Nahbereich mit bis zu 50 km Entfernung. Die Anzahl der Fahrten unterscheidet sich zwischen dem Regional- und dem Fernbereich um rund 627.000 Fahrten. Zwischen dem Nah- und dem Regionalbereich sind es rund 2.284.200 Fahrten. Die zurückgelegte Entfernung im Fernbereich ist ca. dreimal so groß wie im Regionalbereich. Auffallend ist, dass sowohl im Regional- als auch im Fernbereich annähernd die gleiche Gütermenge befördert wird, wobei das gesamte Ladevermögen in beiden Bereichen nahe beieinanderliegt. Dies lässt den Schluss zu, dass im Regionalbereich vermehrt auch LKW zum Einsatz kommen, die normalerweise im Fernbereich eingesetzt werden. An dieser Stelle möchten die Autor:innen der Studie zudem darauf hinweisen, dass auch bei dieser statistischen Auswertung deutlich wird, dass ein großer Teil der LKW-Fahrten mit einer gegenüber dem eigentlichen Ladevermögen verminderten Beladung erfolgt. Auch hier zeitigt sich wiederum ein enormes Optimierungspotential, dass auch aufgrund der Restriktionen seitens der Verloader nicht genutzt werden kann (s. Kapitel „5.3 Handlungsempfehlungen“).

Abschließend erfolgt innerhalb des Kapitels „1.4.3 Einsatzorte der Kühlsysteme“ eine Aufschlüsselung nach Güterabteilungen und eingesetztem Verkehrsträger. Hierfür wurden die „Marktbeobachtungen Güterverkehr“ des Bundesamtes für Güterverkehr (BAG; jetzt BALM – Bundesamt für Logistik und Mobilität) der Jahre 2019 bis 2021 (Jahresberichte) herangezogen (Bundesamt für Güterverkehr, 2020, 2021, 2022). In der untenstehenden Tabelle 13 sind die Daten für die Güterabteilung „Nahrungs- und Genussmittel“ und Verkehrsträger Straßengüterverkehr, Schienengüterverkehr und Binnenschifffahrt wiedergegeben. Zu den Tabellen müssen folgende Hintergrundinformationen gegeben werden:

1. Der Straßengüterverkehr bezieht sich auf deutsche Fahrzeuge, inklusive Dreiländerverkehr und Kabotage. Dieser beinhaltet nicht den Straßengüterverkehr ausländischer Fahrzeuge.
2. Der Schienengüterverkehr umfasst ausschließlich größere Unternehmen, die eine Transportleistung von mindestens 10 Mio. tkm insgesamt bzw. 1 Mio. tkm im Kombinierten Verkehr erbracht haben.
3. Die Binnenschifffahrt auf deutschen Wasserstraßen enthält deutsche, niederländische, belgische, schweizerische und sonstige Anteile.

Tabelle 13: Güterverkehr in den Jahren 2019 bis 2021 nach Verkehrsträgern und Güterabteilung „Nahrungs- und Genussmittel“ (Bundesamt für Güterverkehr, 2020, 2021, 2022); Eigene Darstellung

BAG-Jahresbericht 2021	Straßengüterverkehr 1			Schienengüterverkehr 2			Binnenschifffahrt 3		
Güterabteilung (NST - 2007)	2020 in Mio. t	2021 in Mio. t	Δ in %	2020 in Mio. t	2021 in Mio. t	Δ in %	2020 in Mio. t	2021 in Mio. t	Δ in %
Nahrungs- und Genussmittel	330,5	323,6	-2,1	2,2	2,0	-7,5	8,5	7,8	-8,3

BAG-Jahresbericht 2020	Straßengüterverkehr 1			Schienengüterverkehr 2			Binnenschifffahrt 3		
Güterabteilung (NST - 2007)	2019 in Mio. t.	2020 in Mio. t.	Δ in % 4	2019 in Mio. t	2020 in Mio. t	Δ in %	2019 in Mio. t	2020 in Mio. t	Δ in %
Nahrungs- und Genussmittel	338,1	330,5	-2,2	2,4	2,2	-8,4	8,1	8,5	4,9

Trotz der oben aufgeführten Informationen bzw. Einschränkungen wird in den beiden Tabellen deutlich, dass der Güterverkehr mit deutschen LKW fast ausschließlich über den Straßengüterverkehr und nur in sehr geringen Anteilen über den Schienengüterverkehr oder die Binnenschifffahrt erfolgt. Im Durchschnitt der drei Jahre wurden 330,7 Mio. t an Nahrungs- und Genussmitteln über den Straßenverkehr transportiert. Zwischen den Jahren 2019 und 2021 kam es dabei zu einem Rückgang der Transportleistungen um rund 4,3 %. Dieser Rückgang zeichnet sich bei den anderen beiden Verkehrsträgern insgesamt betrachtet ebenfalls ab. Insbesondere im Straßengüterverkehr wird davon ausgegangen, dass ein großer Teil der Aufkommensrückstände aufgrund zwischenzeitlicher Schließungen weiterer Teile des stationären Einzelhandels und der Gastronomie durch die COVID-19-Pandemie entstanden ist.

Die in den Tabellen ersichtliche starke Fokussierung des Güterverkehrs auf den Straßenverkehr sollte im Hinblick auf den Klimawandel und das Erfordernis zur Einsparung schädlicher THG-Emissionen zum Anlass genommen werden, um verstärkt Maßnahmen zur Verteilung der Güter auf weitere Verkehrsträger, insbesondere auf den Schienengüterverkehr, zu ergreifen. Für temperaturgeführte Transporte steht hierbei vor allem die Energieversorgung der Kühleinheit im Vordergrund, um die gesetzlich geforderte Einhaltung der Kühlkette nicht zu gefährden. (s. auch Kapitel "5.3 Handlungsempfehlungen")

1.5 Fazit zum Status Quo

Für die Aufnahme des Status Quo zu Kühltransporten in Deutschland wurde eine umfangreiche Menge an Daten und Quellen analysiert und ausgewertet. Die dargestellten Ergebnisse rechtfertigen die Aussage, dass temperaturgeführte Transporte und die damit im Zusammenhang stehenden Kühlfahrzeuge und Kühlsysteme einen nicht zu vernachlässigenden Anteil am Güterverkehrsaufkommen mit Nutzfahrzeugen auf den deutschen Straßen ausmachen. Im Bereich der für diese Studie relevanten Nutzfahrzeugklassen N2 und N3 stellt die Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ einen Anteil von rund 7 % am Gesamtbestand dieser Nutzfahrzeugklasse. Im Bereich der für diese Studie relevanten Anhängerklassen O2 und O3 entfällt auf Anhänger mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ ein Anteil von rund 7,8 % an der Gesamtanzahl der Anhänger dieser Klassen.

Ferner ermöglicht der Status Quo eine Einschätzung über die Einsatzbereiche von Kühlfahrzeugen, der Vertretung der unterschiedlichen Hersteller für Kühllastwagen und Kühlanhängern und die Altersverteilung von Kühllastwagen und Kühlanhängern bei dem Eintritt in den Second Life Markt. Insbesondere die detaillierte Darstellung der in Deutschland zugelassenen Nutzfahrzeuge in der Domäne der temperaturgeführten Logistik wird im weiteren Verlauf der Studie für eine Reihe von tiefergehenden Untersuchungen herangezogen.

Im Wesentlichen soll aufbauend auf die im Status Quo zusammengestellten Bestandszahlen eine Abschätzung des Einsparpotentials an Treibhausgasemissionen durch den Einsatz klimafreundlicher Nutzfahrzeuge in der temperaturgeführten Logistik erfolgen. Bevor jedoch diese Betrachtungen erfolgen

können, werden zunächst in einer auf den Status Quo aufbauenden technischen Analyse die eingesetzten Kühlsysteme und die auf die eingesetzten Kältemittel zurückzuführenden Einsparpotentiale an Treibhausgasemissionen erarbeitet.

2. Technische, ökonomische und ökologische Analyse der aktuellen Kühlsysteme

Die in temperaturgeführten Transporten eingesetzten Kühlsysteme können nach heutigem Stand der Technik nicht ohne den Einsatz von Kältemitteln betrieben werden. Kältemittel weisen im Verhältnis zum Treibhausgas CO₂ oft eine um das Vielfache höhere Treibhausgaswirksamkeit vor. Daher können sich bereits einfache und schnell umsetzbare Anpassungen der in Kühlsystemen eingesetzten Kältemittel positiv auf die Treibhausgasintensität temperaturgeführter Transporte auswirken. Inwieweit diese Potenziale auf die einzelnen zum Einsatz kommenden Kältemittel zutreffen, soll in einer technischen Analyse herausgestellt werden. Die technische Analyse wird den im Kapitel „Status Quo Kühltransporte in Deutschland“ erarbeiteten Status Quo zudem in Hinblick auf die bereits etablierten Technologien im Bereich der Kühltransporte erweitern. So soll eine Einschätzung zu weiteren Entwicklungsmöglichkeiten und alternativen Lösungen zur emissionsarmen Substitution ermöglicht werden.

Neben der technischen wurden im folgenden Abschnitt zudem ökologische und ökonomische Analysen zu den derzeit eingesetzten Kühlsystemen und den temperaturgeführten Transporten insgesamt vorgenommen. Diese erfolgten unter anderem auf Basis fundierter branchenspezifischer Leitfäden und Normen zur Berechnung ökonomischer und ökologischer Parameter im Bereich der Straßengüterlogistik und der darin eingesetzten Nutzfahrzeuge. Die ökonomische Analyse bildet unter anderem die Grundlage für eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit und der ökonomischen Hürden für den Einsatz klimafreundlicher Nutzfahrzeuflösungen in der temperaturgeführten Logistik.

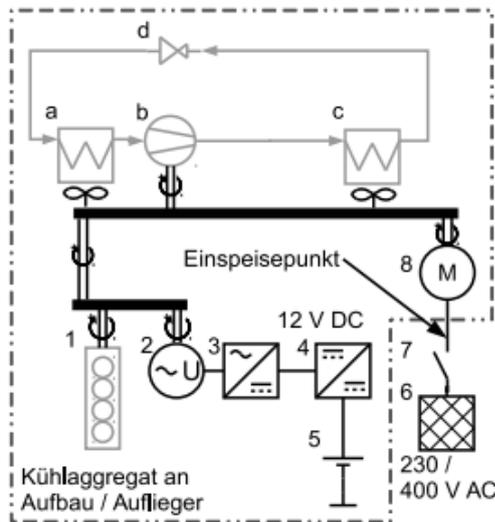
2.1 Technische Analyse der aktuellen Kühlsysteme

Neben einem Überblick zu den derzeit in temperaturgeführten Transporten eingesetzten Kühlaggregaten und Technologien erfolgt im Folgenden auch eine Zusammenstellung derzeit im Umlauf oder in der Entwicklung befindlicher Systeme und Ansätze zur Effizienzsteigerung und Minderung der Emissionen im Bereich der Kühltransporte sowie einer Darstellung der häufig eingesetzten Kältemittel und möglicher Substitute. Abgeschlossen wird die technische Analyse mit der Erfassung der Treibhausgasemissionen von Kältemitteln.

2.1.1 Technischer Überblick zu den eingesetzten Kühlsystemen

Der Großteil der im straßengebundenen Gütertransport eingesetzten Kühlaggregate sind mobile Kompressionskälteanlagen, deren Funktionsprinzip auf dem linksläufigen Kreisprozess bzw. thermodynamischen Kälteprozess basieren. Die Systemkomponenten bestehen prinzipiell aus einem Verdichter (Kältekompressor), einem Verdampfer und einem Kondensator sowie einer Drosseleinrichtung, dem Umgebungsluft sowie ein Kältemittel zugeführt wird. Der Betrieb der Anlagen kann in Straßen- und Netzbetrieb unterteilt werden, wobei der Straßenbetrieb dieselekttrisch erfolgt. Nachfolgend werden drei Varianten für den Betrieb und die Versorgung derzeit hauptsächlich eingesetzter Kühlaggregate beschrieben.

Die schematische Abbildung 22 zeigt den Aufbau eines typischen herkömmlichen Kühlaggregates für mittlere bis schwere LKW sowie für LKW mit Sattelaufleger. Das Aggregat ermöglicht den Straßenbetrieb mit Diesel sowie den elektrischen Netzbetrieb.



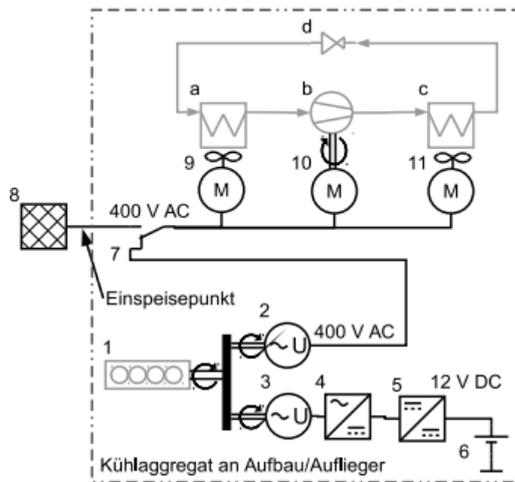
Betriebsmodi	Straßenbetrieb ☼ Netzbetrieb ⚡
Kühlsystemfrequenz	- Straßenbetrieb Netzbetrieb $f(f_{Netz}) = 50 \text{ Hz}$
Fahrzeug	☛ ☛☛ ☛☛☛

1. Diesel-VKM	5. Betriebsmodi-Schalter
2. Lichtmaschine	6. Drehstrommotor
3. Gleichrichter	a. Verdampfer
4. Laderegler	b. Kompressor
5. Starterakkumulator	c. Kondensator
6. Stromnetz 400-V-AC 50 Hz	d. Drossel

Abbildung 22: Kühlsystem für mittlere bis schwere LKW sowie für Sattelaufleger mit Diesel-Straßenbetrieb und elektrischem Netzbetrieb (Stefan Bina, 2014)

Das Kühlaggregat verfügt über eine integrierte Diesel-Verbrennungskraftmaschine (VKM), die den Kältekompressor direkt mechanisch antreibt. Für den Netzbetrieb ist ein zusätzlicher Drehstrommotor mit 230 V bzw. 400 V Drehstrom installiert. Die Versorgung des Dieselmotors im Kühlaggregat eines Sattelauflegers erfolgt mittels eines separaten Tanks am Auflieger. Bei Lastzügen wird das Motorwagenkühlaggregat über den Dieseltank des Fahrzeugs versorgt, während beim zugehörigen Anhänger die Versorgung über einen separaten Tank am Anhänger erfolgt.

Zwei Möglichkeiten des Aufbaus und Betriebs herkömmlicher Kühlaggregate für die beiden Betriebsmodi elektrischer Straßenbetrieb sowie Netzbetrieb zeigen die folgenden Abbildungen. Das Kühlsystem in Abbildung 23 verfügt über eine integrierte Diesel-Verbrennungskraftmaschine, die einen Synchrongenerator antreibt, der die Energie für den dieselektrischen Straßenbetrieb bereitstellt. Der Netzbetrieb erfolgt über das öffentliche Netz. Diese Kühlsysteme sind beispielsweise direkt für den Anbau an einen Sattelaufleger konzipiert.

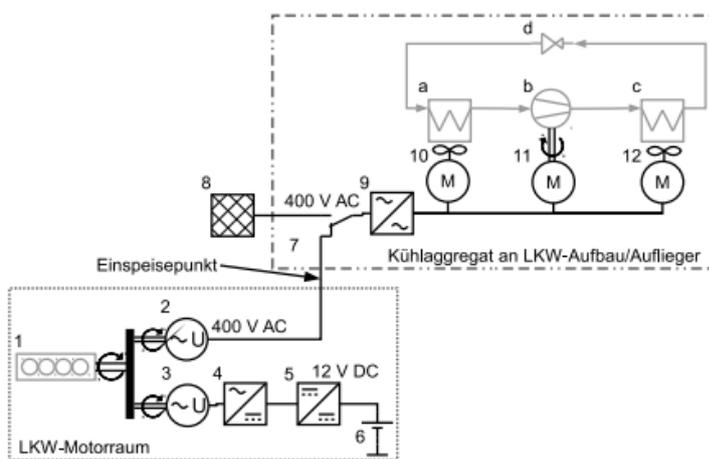


Betriebsmodi	Straßenbetrieb ⚡ Netzbetrieb ⚡
Kühlsystemfrequenz	Straßenbetrieb Netzbetrieb
	$f(n_{VKM}) = \text{konst (2 Drehzahlen)}$ $f(f_{Netz}) = 50 \text{ Hz}$
Generatortyp	Synchronmaschine

- | | | |
|-----------------------|------------------------------------|----------------|
| 1. Diesel-VKM | 7. Betriebsmodi-Schalter | a. Verdampfer |
| 2. Drehstromgenerator | 8. Stromnetz 400 V AC 50 Hz | b. Kompressor |
| 3. Lichtmaschine | 9. Drehstrommotor Verdampfer | c. Kondensator |
| 4. Gleichrichter | 10. Drehstrommotor Kältekompressor | d. Drossel |
| 5. Laderegler | 11. Drehstrommotor Kondensator | |
| 6. Starterakkumulator | | |

Abbildung 23: Kühlsystem für schwere LKW sowie für LKW mit Sattelaufleger mit elektrischem Straßen- und Netzbetrieb (Stefan Bina, 2014)

Die Abbildung 24 zeigt ebenfalls ein Kühlsystem für den elektrischen Straßen- und Netzbetrieb. Die Energie hierfür wird jedoch im elektrischen Straßenbetrieb über einen Drehstromgenerator bereitgestellt, der direkt mit der Verbrennungskraftmaschine des Motorwagens oder der Sattelzugmaschine verbunden ist. Über den integrierten Frequenzumrichter kann die Leistungsregelung der Kühlaggregate und somit der Temperaturregelung verfeinert werden, was zu einer gleichzeitigen Kraftstoffeinsparung führt.



Betriebsmodi	Straßenbetrieb ⚡ Netzbetrieb ⚡
Kühlsystemfrequenz	Straßenbetrieb Netzbetrieb
	$f(n_{VKM}) = \text{var}$ $f(f_{Netz}) = 50 \text{ Hz}$
Generatortyp	Asynchronmaschine

- | | | |
|-----------------------|------------------------------------|----------------|
| 1. LKW-VKM | 7. Betriebsmodi-Schalter | a. Verdampfer |
| 2. Drehstromgenerator | 8. Stromnetz 400 V AC 50 Hz | b. Kompressor |
| 3. Lichtmaschine | 9. Frequenzumformer (Inverter) | c. Kondensator |
| 4. Gleichrichter | 10. Drehstrommotor Verdampfer | d. Drossel |
| 5. Laderegler | 11. Drehstrommotor Kältekompressor | |
| 6. Starterakkumulator | 12. Drehstrommotor Kondensator | |

Abbildung 24: Kühlsystem für alle Fahrzeugklassen mit elektrischem Straßen- und Netzbetrieb (Stefan Bina, 2014)

Im Rahmen der technischen Analyse der aktuellen Kühlsysteme erfolgte eine umfangreiche Marktrecherche zu den angebotenen Kühlaggregate der Hersteller Carrier, Daikin/Zanotti, Frigoblock, Heifo / Mitsubishi, Krone/Liebherr, Schmitz-Cargobull und Thermo King. Innerhalb der Recherche wurde u. a. zwischen Motorwagen- und Auflieger-Variante, den Einbauorten, der Energieversorgung sowie nach technischen Daten wie dem Gewicht, der Leistungsklasse und den Abmessungen unterschieden. Die Hersteller Carrier, Heifo/Mitsubishi, Schmitz-Cargobull sowie Thermo King bieten hauptsächlich die selektrische Aggregate an. Schmitz-Cargobull hat hauseigene Kühlaggregate zur Bestückung der eigenen Auflieger entwickelt. Frigoblock fertigt derzeit hauptsächlich Elektro-Aggregate und Daikin/Mitsubishi überwiegend dieselbetriebene Aggregate. Bis auf Schmitz-Cargobull werden bei allen Herstellern Serien für Motorwagen und für Auflieger mit unterschiedlichen Montagevarianten gefertigt. Die Leistungsklassen (maximale Leistung) der angebotenen Systeme variieren von 4.360 Watt bis 19.100 Watt. Kühlaggregate für Motorwagen sind in allen Leistungsklassen vertreten, für Auflieger überwiegend mittlere und große Leistungsklassen.

2.1.2 Technischer Überblick zu Systemen zur Effizienzsteigerung und Minderung der Emissionen

Die Klimaziele der Europäischen Union und der Bundesregierung, die Notwendigkeit zur Reduktion von THG-Emissionen sowie zunehmende Betriebs- und Kraftstoffkosten haben die Kühlaggregate- Hersteller bereits seit mehreren Jahren zu einer Vielzahl an Maßnahmen veranlasst, um die Effizienz bestehender Systeme zu steigern und die Emissionen zu reduzieren. Zu den Maßnahmen zählen beispielsweise:

- Optimierung der Regelungs- und Steuerungsstrategien
- Verbesserung der Motorentechnik
- Senkung der Geräuschemissionen und des Kältemittelverbrauchs
- Solarintegration

Nachfolgend sollen einige der von den Herstellern von Kühlaufbauten und Kühlaufliegern durchgeführte technische Maßnahmen vorgestellt werden:

Thermo King – Green Tech Motoren, Mikrokanaltechnologie und E-Geräte

Das Unternehmen Thermo King setzt die seit Januar 2019 innerhalb der EU-Verordnung (EU) 2016/1628 (siehe Kapitel „3.3 Europäische Abgas- und CO₂-Gesetzgebung“) geltenden Regeln für NRMM (Non Road Mobile Machinery) Stufe V bereits proaktiv seit 2018 um. Innerhalb der Stufe V werden die Emissionsanforderungen für alle Kategorien von Motoren mit Selbst- und Fremdzündung in bestimmten Leistungsklassen festgelegt. Hierzu zählen auch die Verbrennungsmotoren von Kühlaggregate. Thermo King entspricht diesen Anforderungen mit den nach Stufe V zertifizierten Green Tech-Motoren mit Direkteinspritzung und reduzierter Nenndrehzahl. Alle neuen Motorvarianten sind für die Verwendung von B7-Kraftstoff und zum Teil für Biokraftstoff-HVO (mit Kohlenwasserstoff behandeltes Pflanzenöl) zugelassen (*Sorgen Sie bei Ihren Flotten für Konformität mit NRMM Stufe V – dank Verbrennungsmotoren von Thermo King*, 2019; Thermo King, 2020).

Thermo King setzt in Kühlaggregate der T-Serie bei den Kondensatoren / Wärmetauschern die sogenannte Mikrokanaltechnologie ein, die für eine geringere Kältemittelbefüllung und ein verringertes Leckagerisiko sorgt, sowie die Kraftstoffeffizienz erhöhen. Laut Thermo King wird damit der Kraftstoffverbrauch gegenüber der bisherigen T-Serie um 14 % und der Kältemittelbedarf um 33 % reduziert (Thermo King, 2017).

Im Segment der vollelektrischen Kühlaggregate bietet Thermo King die E-Serie (*E-200*, no date) für mittelgroße Lieferwagen und LKWs mit Elektro- und Verbrennungsmotor an. Mit der E-Serie ausgestattete Fahrzeuge erfüllen den sogenannten PIEK-Standard (*English - Piek-Keur*, no date) sowie die Stadtzugangsverordnungen (UVARs - Urban-Vehicle-Access-Regulations)(*Stadtzugangsverordnung in Europa - Home*, no date) für Geräuschpegel in Städten. Die angebotenen Kühlaggregate sind Plug-and-Play-Systeme, die keinen Hauptkompressor und kein Antriebskit benötigen und unabhängig von der Fahrzeugdrehzahl arbeiten. Zur Vergrößerung der Autonomie des Systems kann dieses optional mit einer Batterieeinheit ausgestattet werden.

Frigoblock – Inverter-Technologie

Frigoblock ist eine Marke von Thermo King und bietet rein elektrisch betriebene Kühlaggregate an, wodurch bereits vielfache Einsparungen im Kraftstoffverbrauch und bei den CO₂-Emissionen möglich sind. Zudem werden durch den Betrieb die Lärmemissionen massiv reduziert, was einem Einsatz im Stadtverkehr entgegenkommt. Frigoblock setzt bei vielen Kühlaggregaten die sogenannte Inverter-Technologie ein. Bei Transportkältemaschinen, die im elektrischen Straßenbetrieb abhängig von der Motordrehzahl des LKW arbeiten, variiert üblicherweise die Speisefrequenz, so dass bei der kontinuierlichen Kühlung größere Temperaturdifferenzen entstehen können. Über die Inverter-Technologie können mittels Frequenzumrichter die Frequenz und die elektrische Spannung und somit die Drehzahl der eingesetzten Elektromotoren nach Bedarf stufenlos geregelt werden. Der Inverter verringert somit die Leistungsschwankungen des Kühlaggregats bei sich ändernder Drehzahl. Dies ermöglicht dem Kälteaggregat die Solltemperatur mit einem geringeren Energiebedarf zu erreichen (Frigoblock, 2021).

Carrier - E-Drive

Bereits seit über 20 Jahren (Ursprung 1999) nutzt der Hersteller Carrier die E-Drive-Technologie in seinen Kühlaggregaten. Über das System wird der Dieselmotor und der Kältekompressor innerhalb des Antriebsstrangs voneinander getrennt, indem die mechanischen Getriebe und Riemenantriebe durch einen Generator ersetzt werden. Der Verbrennungsmotor treibt einen elektrischen Generator an, der wiederum den Kompressor mit elektrischer Energie versorgt. Über das Strommodul Eco-Drive kann das System zudem unabhängig von der Motordrehzahl betrieben und geregelt werden. Neben der Einsparung von Komponenten und damit einhergehender Wartungs- und Ausfallzeiten bzw. -kosten können Kühlmittelleckagen verringert, Kraftstoff eingespart und Multi-Temperaturleistungen ermöglicht werden (*E-Drive*, no date).

Celsineo – Plug & Play-Kältemodule

Der Kühlaggregathersteller Liebherr und der Hersteller von Kühlsattelaufliegern Krone haben gemeinsam das Kühlaggregat Celsineo für den Einsatz in Aufliegern entwickelt. Normalerweise verfügen Kühleinheiten über einen zentralen Kältekreislauf mit einer großen Menge an Kältemittel und einem großen technischen Komponentenaufwand zur Regelung. Über die drei Plug & Play-Kältemodule von Celsineo mit eigenständigen, individuell regelbaren Kältemittelkreisläufen und wenigen Komponenten wird die Kälteleistung aufgeteilt, die möglichen Regelstrategien vergrößert und die lastabhängige Temperatursteuerung verbessert. Dies ermöglicht den Einsatz eines Aggregates für verschiedene Kühlleistungsklassen bzw. Single-Temp-Anwendungen (z. B. Blumen, Frischware, Tiefkühlware). Durch das System kann die Kühleffizienz, auch durch die Reduktion von Temperaturspitzen während der Abtauzyklen, gesteigert, die Menge an Kältemittel reduziert und ein Kühlschaden bei Ausfall eines Moduls verhindert werden. Durch den modularen Aufbau ist eine schnelle Überprüfung und Reparatur durch Modultauch möglich sowie die Anpassung an neue zukunftsfähige Kältemittel (Frank Albers, 2019; *Celsineo*, no date).

Thermo King – Mild-Hybrid-Technologie

Thermo King hat mit der Modellreihe „Advancer Spectrum“ ebenfalls ein Kühlaggregat entwickelt, das Temperaturkonfigurationen für zwei unterschiedliche Kühlzonen mit Mehrfach-Temperaturmanagement und Sollwertsteuerung ermöglicht. Über den kontinuierlichen Modus erfolgt eine strenge Temperaturkontrolle für empfindliche Güter (z. B. Pharmazeutika, Frischwaren). Der „Cycle-Sentry-Modus“ bietet die Möglichkeit zur Kraftstoffeinsparung bei Produkten, die eine weniger strenge Temperaturkontrolle erfordern. Laut Hersteller können bis zu 30 % Kraftstoff eingespart werden. Das Kühlsystem ist kompatibel zu alternativen Stromquellen und Systemen von Thermo King, die z. B. eine Energierückgewinnung aus einer Rekuperationsachse (AxlePower) ermöglichen oder die Umschaltung zwischen Diesel- und Elektrobetrieb erfordern (HybridDrive) (Thermo King, 2022b).

Neben diesen Technologien arbeiten die Hersteller von Kühlaggregaten an Maßnahmen zur Reduzierung der Geräuschemissionen u. a. durch moderne Lüfertechnologien mit langsameren Drehzahlen und durch schallabsorbierende Schäume.

Eine weitere effektive Maßnahme zur Einsparung von Kraftstoff und zur Reduzierung von THG-Emissionen ist der Einsatz von Photovoltaik-Modulen innerhalb der Kühl-Logistik.

Solarintegration

Ein vielversprechender Ansatz zur Reduzierung des Einsatzes fossiler Ressourcen ist die Integration und Nutzung von Solarpanels auf dem Dach sowie an den Seiten eines (Kühl)-Motorwagens bzw. -Aufliegers. Dabei sind die nachfolgenden Anwendungen und Effekte denkbar:

- Speisung einer Hochvoltbatterie und Versorgung elektrischer Kühlaggregate
- Besondere Verwendung bei hohen Außentemperaturen mit starker Sonneneinstrahlung und maximal notwendiger Kühlung des Laderaumes
- Reichweitenverlängerung vollelektrischer LKW
- Versorgung des Strombedarfs einer Zugmaschine / eines LKW
- Senkung des Kraftstoffverbrauchs bei Hybrid-LKW

Das Unternehmen Sono Motors bietet beispielsweise entsprechende Lösungen für unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen in Verbindung mit einer intelligenten Steuerungselektronik an. Laut dem Unternehmen können mit der Integration von Solarpanels am Anhängerdach und an den Seiten eines Kühl-LKW bis zu 82 kWh pro Tag erzeugt und bis zu 50 % des jährlichen Energiebedarfs für den Betrieb des Kühlaggregates mit Solarenergie gedeckt werden (Sono Motors, no date). In diesem Zusammenhang plant Sono Motors gemeinsam mit dem Unternehmen Chereau S.A.S., einer französischen Tochter von The Reefer Group, die Ausstattung eines Kühlauflegers zur Untersuchung und Evaluierung der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit einer maßgeschneiderten Solarlösung für Serienfahrzeuge. Es wird erwartet, dass gegenüber dieselbetriebenen Kühlungen rund 3.400 Liter Kraftstoff und etwa neun t CO₂-Emissionen pro Jahr und Fahrzeug eingespart werden können (Sono Motors, 2022).

Der Ansatz zur Integration von Solarenergie in das vorhandene Kühlsystem wird überdies in mehreren Forschungsprojekten verfolgt. Bereits seit 2014 beschäftigt sich das DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme mit mobilen Photovoltaik Systemen im Bereich der temperaturgeführten Logistik zur Senkung von Energieverbrauch und Emissionen und zur Imagesteigerung der Logistikunternehmen. Über ein Ertragsprognose-Modell basierend auf realen Telemetriedaten wurden für Routen innerhalb Europas Einsparungen von Dieselkraftstoff für das Kühlaggregat in Höhe von rund 1.000 – 2.000 Litern berechnet. Durch eine optimierte Regelungsstruktur konnte auf einen zusätzlichen Batteriespeicher als weiteren Kostentreiber verzichtet werden (Martin Vehse, 2018).

Innerhalb des Forschungsprojektes „Lade-PV – Entwicklung von fahrzeugintegrierter Photovoltaik für das On-Board-Laden von Elektro-Nutzfahrzeugen“ hat das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE gemeinsam mit Industriepartnern und dem Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI leichte und robuste PV-Module für die nachträgliche Aufdachmontage auf LKW und die Vollintegration sowie Leistungselektronik entwickelt. Mit dem 3,5 Kilowatt Peak Hochvolt-Photovoltaik-System wurde ein 18-t-E-LKW ausgestattet. Mit dem über eine 800 Volt Traktionsbatterie direkt in das Bordnetz eingespeisten Strom konnten 5 bis 10 Prozent des LKW-Energiebedarfs gedeckt werden (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2021, no date). Neben der Versorgung des Bordnetzes kann über das System bei Kühl-LKW die Ladung elektrisch gekühlt und der Verbrauch an Diesel verringert werden. Für diese Anwendung sind besonders leichte PV-Module erforderlich, die die thermische Isolation nicht beeinträchtigen.

Zusätzlich zu den oben aufgeführten Anwendungen für die Solar-Integration in LKW und eine Verringerung der CO₂-Emissionen im Transportsektor können das Stromnetz und die Ladeinfrastruktur durch eine verbrauchsnahe Energieerzeugung entlastet und beim Bezug von Ladestrom Kosten eingespart werden.

Anwender der Solar-Technologie sind in Form von Entwicklungs- und Prototypenprojekten beispielsweise Scania zusammen mit Partnern, die über einen mit Solarzellen bestückten Trailer einen Hybrid-LKW mit Strom versorgen und je nach Standort bis zu 20 % Kraftstoff einsparen oder das Unternehmen Lamberet, das das Dach der Karosserie eines elektrischen 26-Tonner Renault Trucks D Z.E. mit 6 Solarzellen ausgestattet und als Hilfsstromquelle der Fahrzeugbatterien für den Betrieb des Kühlaggregates, der Ladebordwand, des Luftschleiers, der Deckenbeleuchtung, des Temperaturschreibers und der Ladeleitung des bordeigenen Hubwagens eingesetzt hat (Solarserver, 2020; Quentin Wiedemann, 2021). Der 26-Tonner Renault Trucks D Wide Z.E. kommt ebenfalls bei dem Schweizer Transportunternehmen Rhyner Logistik zum Einsatz, wobei das Kühlaggregat des Kühl-Transporters über eine PV-Anlage mit Strom versorgt wird (Tobias Schweikl, 2021).

2.1.3 Darstellung der häufig eingesetzten Kältemittel und möglicher Substitute

Kältemittel gewährleisten durch die Aufnahme und Abgabe von Wärme innerhalb eines Kühlkreislaufes die Aufrechterhaltung des Kühlprozesses. Bei der Wahl eines (alternativen) Kältemittels sollte das Produkt im Idealfall die folgenden Eigenschaften besitzen (Umweltbundesamt, 2014; Bode, 2021; Infraser, no date b):

- Geringes Global Warming Potential (GWP)
- Chemische Stabilität in einem möglichst breiten Temperaturbereich
- Kompatibilität mit anderen Materialien, die im System verwendet werden (Metalle, Elastomere, Öle)
- Keine oder geringe Toxizität
- Keine oder geringe Brennbarkeit
- Hohe volumetrische Kälteleistung
- Geringe Kosten
- Kommerzielle Verfügbarkeit
- Gefahrlose Handhabung

Je nach Einsatzgebiet des Kältemittels sind unterschiedliche Eigenschaften gefordert, wobei kein Kältemittel den Idealzustand abbildet. Im Hinblick auf die F-Gase-Verordnung (Kapitel „3.4 Regularien zu

Kältemitteln“) hat der GWP-Wert eine besondere Bedeutung bei der Auswahl eines Kältemittels erlangt. Der GWP-Wert gibt das Treibhauspotenzial der Kältemittel und damit ihren Beitrag zur Erwärmung insbesondere bodennaher Luftschichten wieder. Der Wert wird auch als CO₂-Äquivalent bezeichnet, da die Klimawirksamkeit von Kohlendioxid (GWP von CO₂ = 1) bei der Berechnung als Richt- und Bemessungsgröße dient.

Die ISO 817:2014 „Refrigerants — Designation and safety classification“ ordnet die Kältemittel entsprechend ihrer Entflammbarkeit und Toxizität in acht Sicherheitsgruppen ein (ISO 817:2014, 2014; Edgar Timm, 2020).

Tabelle 14: Sicherheitsklassen der Kältemittel gemäß ISO 817 (Edgar Timm, 2020)

Einstufung zur Toxizität und Brennbarkeit von Kältemitteln	Gering toxisch	Erhöht toxisch
Keine Flammausbreitung	A1	B1
Schwer entzündlich	A2L	B2L
Entzündlich	A2	B2
Hoch entzündlich	A3	B3

Kältemittel werden nach Art des Ausgangsstoffes in die folgenden Gruppen klassifiziert (Edgar Timm, 2020):

- Reinstoffe in Form von gesättigten Verbindungen
- Reinstoffe in Form von ungesättigten organischen Verbindungen
- Kältemittelgemische

In den Kühlaggregaten von Kühl- und Tiefkühl-Transporten kommen derzeit Kältemittelgemische zum Einsatz. Eine Recherche auf den Produktseiten der Hersteller von Kühlaggregaten für den Transportsektor ergab, dass insbesondere die Kältemittel R 452 A und R 410 A in Kühlaggregaten für Neufahrzeuge verwendet werden.

Nach Aussage des Unternehmens Thermo King wird das Kältemittel R 452 A als Standard bei allen Kühlgeräten für Lieferwagen, LKW und Sattelaufleger eingesetzt. In Datenblättern wird zum Teil noch das Kältemittel R 404 A mit aufgeführt (Thermo King, 2020). Die Produktseiten von Carrier Transigold verweisen ebenfalls auf das Kältemittel R 452 A. Der Hersteller Frigoblock setzt zumeist das Kältemittel R 410 A als Kühlfluid ein. Bei Zanotti/Daikin wird in den Datenblättern das Kältemittel R 452 A für LKW angegeben (AGENTUR BROGLIE, 2021). Mitsubishi Heavy Industries Thermal Transport Europe gibt in der Produktübersicht überwiegend die Kältemittel R 410 A sowie R 452 A an (Mitsubishi Heavy Industries Thermal Transport Europe, no date b).

Bei der Untersuchung des Second Life von Kühl- und Tiefkühl-Transportern (siehe Kapitel „1.4.2 Einsatzdauer und Einsatzorte der Kühlsysteme“) wurde überprüft, welche Art von Kältemitteln in gebrauchten Kühlaggregaten bzw. im Zusammenhang mit Gebrauchtfahrzeugen zum Einsatz kommen. Zumeist sind dieses die beiden Kältemitteln R 404 A sowie R 452 A.

Einen Überblick über die in der Kühl-Logistik eingesetzten Kältemittel und mögliche Alternativen zeigen die Abbildung 25 und zusammengefasst die Tabelle 15.

In der Abbildung 25 ist ein Überblick über verschiedene Kältemitteln nach Anwendungsbereich und GWP aufgezeigt. Es wird zwischen Kältemitteln für Wärmepumpen, Wasserkühlsätze und für die Bereiche Gewerbekälte, Transport und Klimasysteme unterschieden.

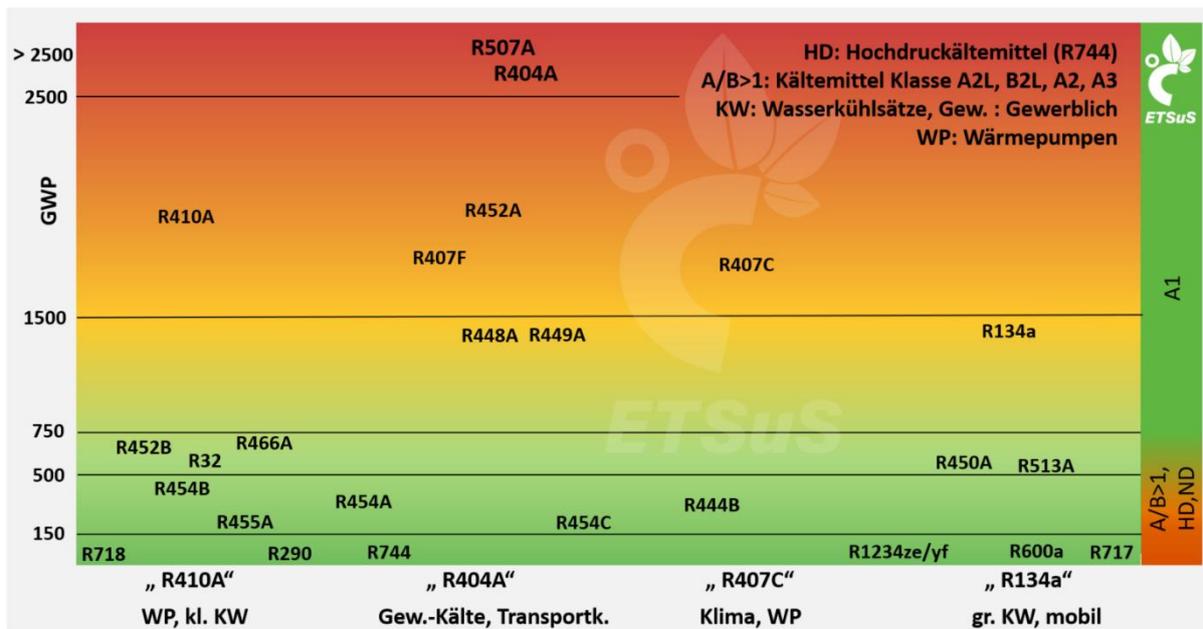


Abbildung 25: Kältemittel nach Anwendungsbereich und Global Warming Potential (Edgar Timm, no date)

Für den Transportsektor werden bei den Kältemitteln mit einem GWP-Wert < 2500 die Fluide R 452 A, R 407 F, R 448 A und R 449 A genannt. Im Übergang zu den Anwendungen Klimatisierung und Wärmepumpe das Kältemittel R 454 C, das einen sehr niedrigen GWP-Wert aufweist.

Tabelle 15: Kältemittel im Vergleich (Bode, 2021; Umweltbundesamt, 2022; R404A und alternative Kältemittel, no date)

Kältemittel	Zusammensetzung	GWP (AR4) (Solomon <i>et al.</i> , 2007)	GWP (AR5) (Alexander <i>et al.</i> , 2013)	Sicherheitsgruppe
R 404 A	R143A / R125 / R134A 52% / 44% / 4%	3922	3943	A1
R 407 F	R134A / R125A / R32 40% / 30% / 30%	1825	1674	A1
R 410 A	R32 / R125 50% / 50%	2088	1924	A1
R 448 A	R32/ R125/ R1234yf/ R1234ze(E)/ R134A	1387	1273	A1
R 449 A	R32/ R125/ R1234yf/ R134A	1397	1282	A1
R 452 A (Ersatz für R 404 A)	R32 / R125 / R1234yf 11% / 59% / 30%	2140	1945	A1
R 454 C	R1234yf / R32 78,5% / 21,5%	148 (Laboratory (CSL), 2010)	146	A2L

Die in der Tabelle dargestellten GWP-Werte beziehen sich auf den vierten (AR4) und fünften (AR5) Sachstandsbericht des IPCC³ bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren.

Das Kältemittel R 404 A ist ein Stoffgemisch aus drei Kältemitteln. Es ist der Sicherheitsgruppe A1 zugeordnet. Aufgrund seines hohen Global Warming Potentials (GWP) ist das Kältemittel von der F-Gase-Verordnung (siehe Kapitel „3.4 Regularien zu Kältemitteln“) betroffen und seit 2020 in Neuanlagen verboten. Bis 2029 dürfen bestehende Anlagen mit recyceltem Kältemittel nachgefüllt werden.

R 407 F ist ein Kältemittelgemisch, das mit einem mittleren GWP-Wert leicht unter den GWP-Werten von R 410 A und R 452 A liegt.

R 410 A ist ein synthetisches Kältemittel, das aus zwei Stoffen mit vergleichbaren Eigenschaften besteht. Es wurde als Ersatz für das Kältemittel R 22 entwickelt und ist zusammen mit dem Kältemittel R 134 A eines der am weitesten verbreiteten Fluide. Im Vergleich zu R 452 A verfügt es über ähnliche hohe GWP-Werte. Durch das Phase-Down-Szenario der F-Gase-Verordnung mit einer schrittweisen Mengenbeschränkung der Kältemittel mit hohen GWP-Werten wird von einer Mittelverknappung und Preissteigerung ausgegangen, von dem voraussichtlich das Kältemittel R 410 A betroffen sein wird. Derzeit wird diskutiert R 410 A durch R 32 als mögliche sogenannte „Drop-in-Lösung“⁴ zu ersetzen (Infraserv, no date a; A-500 - KM-Report Online-Edition, no date). R 32 ist jedoch hochentzündlich und dadurch mit besonderen Auflagen für den Anlagen- und Brandschutz verbunden (Bode, 2021).

Das Kältemittel R 448 A besteht als Kältemittelgemisch aus drei Komponenten mit unterschiedlichen Siedetemperaturen. R 448 A hat mit 1387 einen wesentlich niedrigeren GWP-Wert und eignet sich als Ersatz für R 404 A-Kälteanlagen. Es eignet sich besonders für Anwendungen bei niedrigen und mittleren Temperaturen (*R448A Kältemittel*, 2018).

R 449 A wurde als Low-GWP-Ersatz, u. a. für das Kältemittel R 404 A, entwickelt. Es bietet bei vergleichbarer Kälteleistung verbesserte Leistungseigenschaften und ermöglicht Energieeinsparungen. Der GWP-Wert von R 449 A liegt mit 1397 rund 65 % unterhalb des Wertes von R 404 A, trotzdem wird auch R 449 A von der F-Gase-Verordnung betroffen sein (*R449A Kältemittel*, 2017; Bode, 2021).

R 452 A wird bereits als Alternative für das Kältemittel R 404 A eingesetzt und erreicht eine vergleichbare Energieeffizienz. Durch einen GWP-Wert < 2000 ist es zwar klimafreundlicher als R 404 A, wird jedoch ebenfalls von dem Phase-Down-Szenario der F-Gase-Verordnung betroffen sein (Bode, 2021).

Das Kältemittel R 454 C ist eine Alternative für das Fluid R 404 A mit einem sehr geringen GWP-Wert von 148, wodurch es von der F-Gase-Verordnung nicht betroffen ist und als zukunftssicher gilt. R 454 C wird mit A2L in eine andere Sicherheitsklasse eingestuft, was erhöhte Brandschutz- und Sicherheitsmaßnahmen erfordert.

Die Auswahl und Eignung eines alternativen Kältemittels erfolgt nach physikalischen und chemischen sowie technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Hierbei werden der Normsiedepunkt und der kritische Druck des Fluids sowie die chemische Stabilität und sicherheitsrelevante Eigenschaften berücksichtigt. Aus wirtschaftlicher Sicht sind die volumetrische Kälteleistung, die Verfügbarkeit und der Preis maßgeblich. Der hauptsächliche Grund für die Suche nach alternativen Kältemitteln sind jedoch die F-Gase-Verordnung und die Umweltverträglichkeit des Produktes (Edgar Timm, 2020).

Die Umstellung oder auch Umrüstung des Kühlaggregates einer bestimmten Anwendungsaufgabe auf ein alternatives Kältemittel mit einem geringeren GWP-Wert ist häufig nicht 1:1 möglich, da aufgrund

³ IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

⁴ Drop-In-Kältemittel verfügen über vergleichbar Eigenschaften, wie das zu ersetzende Kältemittel. An der Kälteanlage sind nur wenige Änderungen bzw. Umrüstungen erforderlich.

unterschiedlicher Eigenschaften der Kältemittel, wie z. B. der Brennbarkeit, ein Austausch von Komponenten oder auch des Verdichteröls notwendig werden. Dabei kann die Effizienz und Kälteleistung durch Änderungen bei den Systemkomponenten angepasst bzw. verbessert werden.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Aspekte bleiben von den Elementen der chemischen Hauptgruppen im wesentlichen Wasserstoff, Kohlenstoff, Sauerstoff und Stickstoff als mögliche Stoffe für alternative Kältemittel übrig (Edgar Timm, 2020). Bei der Kombination dieser Elemente zu einem möglichst optimalen „Low-GWP-Kältemittel“ ergeben sich chemische und physikalische Randbedingungen hinsichtlich Brennbarkeit, Drucklage und Temperaturleit sowie sicherheitstechnische Regularien.

2.1.4 Erfassung der Treibhausgasemissionen von Kältemitteln

Ein großer Teil der in Kälteanlagen eingesetzten Kältemittel sind stark klimawirksame Gase. Gelangen diese durch Leckagen, Handhabungsfehler, Verluste oder Havarien in die Atmosphäre, werden Treibhausgas (THG)-Emissionen freigesetzt.

Die Klimawirksamkeit dieser Kältemittel lassen sich über die nachgefüllte Menge der Kältemittel und über ihren GWP⁵-Faktor ermitteln. Die innerhalb der Studie angewandte Vorgehensweise basiert auf den Empfehlungen des DSLV-Leitfadens „Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258“ (Martin Schmied and Wolfram Knörr, 2013, p. 31). Die Berechnung der THG-Emissionen der Kältemittel erfolgt anhand der Ermittlung der direkten und der gesamten Emissionen. Die direkten THG-Emissionen sind Tank-to-Wheel (TTW)-Emissionen, also unmittelbar erzeugte Emissionen durch Freisetzung in die Atmosphäre in Abhängigkeit des eingesetzten Kühlaggregattyps oder der Kühllast. Bei den gesamten Emissionen handelt es sich um Well-to-Wheel (WTW) -Emissionen, d. h. Gesamtemissionen inklusive der Herstellung des Kältemittels sowie der entsprechenden Transporte bis hin zur eigentlichen Nutzung des Kältemittels.

Die Berechnung erfolgte anhand folgender Formeln:

- (1) Direkte THG-Emissionen = Nachfüllmenge * GWP-TTW-Faktor
- (2) Gesamte THG-Emissionen = Nachfüllmenge * GWP-WTW-Faktor

Folgende Einheiten gelten:

Nachfüllmenge (Kältemittel): kg/Jahr/Auflieger

GWP-TTW-Faktor: kg CO_{2e}/kg

GWP-WTW-Faktor: kgCO_{2e}/kg

Direkte/gesamte THG-Emission: CO_{2e}

Die Tabelle 16 zeigt die TTW GWP-Werte sowie zum Teil die WTW GWP-Werte für die derzeit noch häufig in der Kühl-Logistik eingesetzten Kältemittel R 404 A, R 410 A und R 452 A. Beispielhaft werden die TTW-Werte für die zwei Kältemittel R 449 A und R 454 C mit einem geringeren GWP-Wert aufgeführt. Für die noch nicht so lange auf dem Markt befindlichen Kältemittel konnten keine Well-to-Wheel-Werte für die Berechnung der gesamten THG-Emissionen recherchiert werden.

⁵ GWP: Global Warming Potential

Tabelle 16: GWP-Werte von in der Kühllogistik eingesetzten sowie zukünftigen Kältemitteln (Martin Schmied and Wolfram Knörr, 2013), siehe Kapitel „2.1.3 Darstellung der häufig eingesetzten Kältemittel und möglicher Substitute“

Kältemittel, aktuell	GWP-Wert TTW	GWP-Wert WTW
R 404 A	3.920 (Martin Schmied and Wolfram Knörr, 2013, p. 32)	4.025 (Martin Schmied and Wolfram Knörr, 2013, p. 32)
R 410 A	2.088	2.177
R 452 A	2.140	nicht bekannt
Kältemittel, zukünftig	GWP-Wert TTW	GWP-Wert WTW
R 449 A	1397	nicht bekannt
R 454 C	148	nicht bekannt

Das Kältemittel R 452 A dient als direkter Ersatz für das ältere und klimaschädlichere Kältemittel R 404 A und führt beim TTW-Wert bereits zu einer GWP-Einsparung von 1780, was 45,41 % entspricht. Zwischen den beiden derzeit parallel im Einsatz befindlichen Kältemitteln R 452 A und R 410 A besteht bei den GWP-Werten (TTW) eine Differenz von 52 (2,43 %), so dass diese bereits sehr nahe beieinander liegen. Durch den Einsatz zukünftiger Kältemittel kann das klimaschädigende Potential der Fluide wesentlich verringert werden. Besonders deutlich wird dieses bei einer Berechnung der direkten und gesamten THG-Emissionen in Tabelle 17 anhand der Formeln (1) und (2).

Tabelle 17: THG-Emissionen für verschiedene Kältemittel

Kältemittel	TTW THG-Emissionen in kg CO ₂ e/kg	WTW THG-Emissionen in kg CO ₂ e/kg	Nachfüllmenge in kg/Jahr
R 404 A	1.960	2.012,5	0,5
R 410 A	1.044	1.038,5	0,5
R 452 A	1.070	nicht bekannt	0,5
R 449 A	698,5	nicht bekannt	0,5
R 454 C	74	nicht bekannt	0,5
R 404 A	3.920	4.025	1,0
R 410 A	2.088	2.177	1,0
R 452 A	2.140	nicht bekannt	1,0
R 449 A	1.397	nicht bekannt	1,0
R 454 C	148	nicht bekannt	1,0
R 404 A	5.880	6.037,5	1,5
R 410 A	3.132	3.265,5	1,5
R 452 A	3.210	nicht bekannt	1,5
R 449 A	2.095,5	nicht bekannt	1,5
R 454 C	222	nicht bekannt	1,5

Laut Aussagen eines Logistikdienstleisters⁶ lagen die jährlichen Nachfüllmengen im Rahmen der Wartung bei ca. 1,0 kg pro Aggregat. Da diese ebenfalls variieren können, wurden für die Berechnungen mit 0,5 kg/Jahr, 1,0 kg/Jahr und 1,5 kg/Jahr verschiedene Werte angenommen.

Durch den Ersatz des bisher häufig eingesetzten Kältemittels R 404 A durch die Alternative R 452 A kann bereits eine Reduktion der TTW-THG-Emissionen von rund 45,4 % erreicht werden. Wird das Kältemittel R 452 A durch R 449 A ersetzt, dann ergibt sich gegenüber R 404 A eine Verringerung der TTW-

⁶ Befragung im Rahmen der Studie

THG-Emissionen von ca. 64,4 %. Das Kältemittel R 454 C könnte sogar zu einer Reduktion der TTW-THG-Emissionen von ca. 96,2 % führen.

Theoretische Betrachtung zu den THG-Emissionen bezogen auf den Fahrzeugbestand

Um eine quantitative Verbindung zwischen den Emissionen, die durch Kältemittel verursacht werden, und dem Bestand an temperaturgeführten LKW herstellen zu können, wurde eine Berechnung mit der theoretischen Annahme durchgeführt, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt alle Nutzfahrzeuge mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ ein bestimmtes Kältemittel einsetzen. Zum gleichen Zeitpunkt wird dieses klimaschädliche Kältemittel durch ein Kältemittel mit einem geringeren GWP-Wert ersetzt.

Diese Annahme wurde auf den Fahrzeugbestand von Nutzfahrzeugen mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ aus dem Jahr 2020 mit den drei Kältemitteln R 404 A, R 452 A und R 449 A angewandt. Das weit verbreitete Kältemittel R 404 A ist seit 2020 aufgrund der F-Gase-Verordnung (siehe Kapitel „3.4 Regularien zu Kältemitteln“) in Neufahrzeugen verboten und wurde maßgeblich durch das Kältemittel R 452 A ersetzt. Ein möglicher Ersatz für das Kältemittel R 452 A ist das Kältemittel R 449 A. Die Berechnungen erfolgten für eine jährlich angenommene Nachfüllmenge von 1 kg Kältemittel.

Die Abbildung 26 zeigt die direkten THG-Emissionen für die aufgeführten drei Kältemittel zum Fahrzeugbestand im Jahr 2020 für die beiden Nutzklassen N2 und N3.

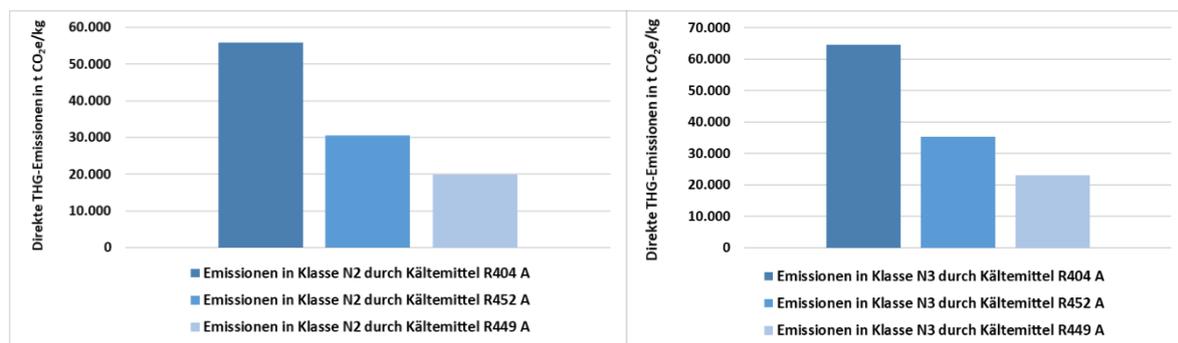


Abbildung 26: Theoretische Betrachtung zu den THG-Emissionen der drei Kältemittel R 404 A, R 452 A und R 449 A für den Fahrzeugbestand 2020 von Nutzfahrzeugen mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“

Durch das Kältemittel R 404 A werden in der theoretischen Annahme direkte THG-Emissionen in Höhe von insgesamt rund 120.380 t CO_{2e}/kg (N2: 55.907 t CO_{2e}/kg, N3: 64.472 t CO_{2e}/kg) verursacht. Der Ersatz von R 404 A durch das Kältemittel R 452 A würde bei dem gleichen Fahrzeugbestand zu einer Reduktion der Emissionen auf einen Wert von rund 65.717 t CO_{2e}/kg (N2: 30.521 t CO_{2e}/kg, N3: 35.196 t CO_{2e}/kg) führen. Würde R 452 A im gleichen Jahr durch R 449 A ersetzt werden, könnte der Wert gegenüber dem Wert von R 452 A erneut um 34,7 % auf Emissionen in Höhe von 42.900 t CO_{2e}/kg (N2: 19.924 t CO_{2e}/kg, N3: 22.976 t CO_{2e}/kg) vermindert werden.

Anhand dieser theoretischen Betrachtung kann verdeutlicht werden, dass Kältemittel für Kühlaggregate durchaus eine Bedeutung für die in die Atmosphäre abgegebenen THG-Emissionen haben. Das auf ein Bemessungsjahr durchgeführte Gedankenspiel führte durch den Austausch von klimaschädlichen Kältemittel durch Kältemittel mit einem geringeren GWP-Wert zu einer Gesamtreduktion der direkten THG-Emissionen von rund 64,4 %. Ein gezieltes und schnelles Vorantreiben des Austauschs und Verbotes von klimaschädlichen und der Freigabe emissionsverminderter Kältemittel bei temperaturgeführten Transporten ist somit sinnvoll.

2.2 Ökonomische Analyse der aktuellen Kühlsysteme

Der folgende Abschnitt beinhaltet eine ökonomische Analyse zu den aktuell in temperaturgeführten Transporten eingesetzten Kühllastwagen und Kühlsystemen. Eine ökonomische Betrachtung der derzeit zugelassenen und am Markt verfügbaren Technologien im Bereich der Kühltransporte ist insbesondere vor dem Hintergrund der Markteinführung klimafreundlicher Nutzfahrzeuge für den Einsatz in temperaturgeführten Transporten von Belang. So können auf dieser Basis von politischen Entscheidungsträgern künftig bspw. Anreize für eine Steigerung der Attraktivität klimafreundlicher Kühlsysteme erarbeitet werden, soweit aus den im Rahmen dieser Studie erarbeiteten ökonomischen Untersuchungen signifikante Kostendifferenzen zwischen konventionellen und vor dem Markteintritt stehenden alternativen Kühlsystemen hervorgehen.

2.2.1 Vorüberlegungen zur ökonomischen Analyse

Eine grundsätzliche theoretische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Kühl- und Tiefkühltransporten mit herkömmlich betriebenen Kühlaggregaten im Vergleich zu emissionslosen Systemen impliziert folgende Überlegungen:

- **Versorgungsinfrastruktur**
Die Betrachtung der Versorgungsinfrastruktur schließt die Bereitstellung von Lade- und Tankinfrastruktur auf weiten Teilen der logistischen Streckenführung sowie die Planung der gesetzlich vorgeschriebenen Ruhe- und Schlafzeiten der Fahrzeugführenden mit ein. Von der Versorgungsinfrastruktur direkt betroffen sind die Sicherstellung der Reichweiten sowie die Aufrechterhaltung der Kühlkette. Sowohl für Logistikdienstleister als auch für deren Kunden kann es durch eine fehlende /mangelhaft ausgebaute Infrastruktur für emissionslose Systeme zu wirtschaftlichen Nachteilen aufgrund der Neuplanung von Strecken- und Lenkzeiten (Personalplanung), Zeitverlusten durch Routenveränderungen und längere Tankstopps oder den Ausfall der Kühlkette mit ggf. nachfolgenden juristischen Konsequenzen kommen.
- **Praxiserfahrungen**
Gegenüber dieselektisch betriebenen Kühlsystemen existieren zu emissionslosen Systemen bisher kaum bis keine (Langzeit-)Erfahrungswerte. Dies betrifft sowohl die technischen Komponenten hinsichtlich Abnutzung, Laufleistung, Alter und einem möglichen Second Life der Fahrzeuge als auch die Erfahrungen im Dauereinsatz sowie Kurz- / Mittel- und Langstreckenbetrieb. Ferner fehlen Praxiserfahrungen hinsichtlich der Serviceintervalle und des Wartungsaufwandes sowie der damit verbundenen Kosten. Um diese als Kostentreiber auszuschließen, ist Planbarkeit durch ein ausreichend ausgebautes Werkstatt- und Service-Netz, Fachpersonal und mögliche Serviceverträge für die emissionslosen Kühlsysteme notwendig.
- **Anschaffungs- und Treibstoffkosten**
Die Anschaffungskosten von emissionslosen Kühlaggregaten sind derzeit aus unterschiedlichen Gründen nur schwer zu beziffern. Diese sind stark davon abhängig, welches Konzept (siehe Kapitel „4.1 Technische Analyse emissionsfreier Kühlsysteme“) für die Umsetzung gewählt wird und wie diese bei der Kostenstruktur des Gesamtsystems betrachtet werden. Für das Konzept „Rekuperationsachse + Kühlung“ kann ein bestehendes vollelektrisches Kühlaggregat zum Einsatz kommen und prinzipiell als einzelne Kostenart in der Kostenstruktur betrachtet werden. Um dieses jedoch emissionslos mit einem hohen Grad an Autonomie betrei-

ben zu können, sind weitere Komponenten, wie eine Hochvoltbatterie sowie eine Rekuperationsachse und Regelungs- sowie Steuerungssysteme erforderlich. Das Konzept „Rekuperationsachse + Kühlung“ befindet sich in mehreren Pilot- und Entwicklungsprojekten in der Umsetzung, jedoch bisher noch nicht in der Serienfertigung. Das Konzept „Wasserstoff-Brennstoffzelle“ erfordert ebenfalls ein elektrisches Kühlaggregat, das nur durch die Versorgung von Energie aus einer wasserstoffgespeisten Brennstoffzelle zu einem autonom betriebenen, emissionslosen Aggregat zur Kühlung wird. Dementsprechend gilt auch hier, sowohl das elektrische Kühlaggregat als auch alle anderen erforderlichen Komponenten bei den Anschaffungskosten mit zu berücksichtigen. Dieses wurde in die ökonomische Betrachtung der unterschiedlichen Kühlsysteme und bei der Kombination mit verschiedenen Zugfahrzeugen mit aufgenommen. Mit der Annahme, dass sich die derzeitige Situation auf dem Energiemarkt auch zukünftig nicht positiv auf konventionelle Energieträger auswirken wird und die CO₂-Einsparziele der Europäischen Union eine Entwicklung hin zu erneuerbaren oder beim Betrieb emissionslosen Energieträgern bewirkt, kann von einer Zunahme der Kosten für Kraftstoffe auf Basis konventioneller Energieträger ausgegangen werden. Dies betrifft somit sowohl Diesel-Kraftstoff als auch konventionell hergestellten Wasserstoff (z. B. grauen Wasserstoff) und Strom. Aufgrund der Novellierung des Klimaschutzgesetzes 2021 ist davon auszugehen, dass durch den vermehrten Einsatz erneuerbarer Energien im deutschen Strommix bis 2030 deutlich höhere THG-Minderungen erreicht werden (siehe Kapitel „4.3 Ökologische Analyse emissionsfreier Kühlsysteme“) (Heneka and Mörs, 2022). Dies kann zu einer Verringerung der Kosten für erneuerbar hergestellten Wasserstoff und für Strom im Allgemeinen führen und sich somit positiv auf die Wirtschaftlichkeit emissionsloser Kühlsysteme auswirken.

- Umweltfaktoren

Das Klimaschutzgesetz und die CO₂-Einsparziele der EU werden zu weiteren Sanktionen dieselbetriebener Fahrzeuge und Fahrzeugkomponenten und zunehmend zu Maßnahmen zur Unterstützung emissionsloser Fahrzeuge und Systeme führen. Bereits jetzt gibt es die Möglichkeit zur Sonderabschreibung (nach Artikel 2, § 7c Einkommensteuergesetz) von elektrisch betriebenen Nutzfahrzeugen, die in der ökonomischen Betrachtung gesondert berücksichtigt wurde. Eine Vielzahl europäischer Länder setzt auf städtische Zugangsbestimmungen unterstützt von Empfehlungen der EU. Neben „Low and Zero Emission Zones (LEZ und ZE)“ bzw. Umwelt- und Null-Emissions-Zonen gibt es u. a. städtische Mautsysteme, Durchgangsverkehrsverbote oder Nachtzuliefererverbote (*Stadtzugangsverordnung in Europa - Home*, no date). Hintergrund ist die Reduzierung der THG- und Feinstaub-Emissionen zur Verbesserung der Luftqualität in den Städten sowie die Verringerung der Lärm-Emissionen. Dies wird gerade auch auf der „Last Mile“ in den Städten vermehrt zu Verboten von dieselbetriebenen Liefer-Fahrzeugen und der Notwendigkeit eines Elektro- oder Wasserstoffantriebs führen, was auch für die Zusatzaggregate gelten wird.

2.2.2 Rahmenbedingungen für eine ökonomische Analyse

Die ökonomische Analyse der aktuellen sowie der emissionslosen Kühlsysteme erfolgte angelehnt an „TCO - Total Cost of Ownership“- Berechnungen, bei denen durch das Sammeln von Informationen, das Abschätzen und das Errechnen die Gesamtkosten eines Produktes ermittelt werden. Im Gegensatz zum gängigen TCO-Verfahren erfolgte dieses hier unter Auswahl bestimmter Kostenfaktoren und nicht über dem gesamten Lebenszyklus.

Eine Zusammenfassung der angesetzten grundsätzlichen Kostenbestandteile der beiden betrachteten Fahrzeugtypen – Sattelzug und Lastzug – sind in der Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 18: Kostenbestandteile der ökonomischen Berechnungen für dieselbetrieben und emissionslose Kühl-Transporte

	Sattelzug	Lastzug
A Technische Angaben		
Anzahl der Reifen	12	12
Gesamtgewicht in t	40	40
Anzahl der Achsen	5	5
B Kalkulationsdaten		
Jahreslaufleistung/Kilometer	120.000	120.000
Jahresbetriebsstunden pro Kühlaggregat (dieselbetrieben/rein elektrisch)	1200/350	1200/350
Jahreseinsatzzeit (Tage)	245	245
Tageseinsatzzeit (Stunden)	9	9
Nutzungsdauer/Jahre	5(SZM)/8(Auflieger)	7 (MW)/8 (AH)
Reifenlaufleistung/Kilometer	312.500/475.000	312.500/475.000
Kraftstoffverbrauch je 100 km Fahrzeug (Diesel/Strom/Wasserstoff)	26l/106kWh/7,48kg	26l/106kWh/7,48kg
Kraftstoffverbrauch je h Auflieger/Anhänger (Diesel/Strom/Wasserstoff)	3,7l/8kWh/0,62kg	2,46l/5,3kWh/0,41kg
Kraftstoffpreis (Diesel/Strom/Wasserstoff)	1,71€/0,47€/9,25€	1,71€/0,47€/9,25€
C Kapitalwerte		
Kaufpreis	Abhängig vom Fahrzeug	Abhängig vom Fahrzeug
Kaufpreis Bereifung	6.170,00€	6.020,00€
Umlaufvermögen	Gesamtgewicht*500	Gesamtgewicht*500
betriebsnotwendiges Vermögen	Summe Kaufpreis/2	Summe Kaufpreis/2
D Kostenrechnung		
Variable Kostenrechnung		
Abschreibung (Abnutzung)	Kaufpreis/Nutzungsdauer/2	Kaufpreis/Nutzungsdauer/2
Kraftstoffkosten	Abhängig vom Fahrzeug	Abhängig vom Fahrzeug
Schmierstoffe/Öle	3% von Kraftstoffkosten Diesel	3% von Kraftstoffkosten Diesel
Reifenkosten	1466,88 €	1466,88 €
Reparatur	500 €	500 €
Wartung	Abhängig vom Fahrzeug	Abhängig vom Fahrzeug
km-abhängige Kosten	Summe Variable Kosten	Summe Variable Kosten
Zeitabhängige Fahrzeugkosten		
Abschreibung (Entwertung)	Kaufpreis/Nutzungsdauer/2	Kaufpreis/Nutzungsdauer/2
Kfz-Steuer (Diesel/Elektro/Wasserstoff)	929 €/373 €/373 €	929 €/373 €/373 €
Kfz-Haftpflichtversicherung	Abhängig vom Fahrzeug	Abhängig vom Fahrzeug
Kfz-Kaskoversicherung	Abhängig vom Fahrzeug	Abhängig vom Fahrzeug
Fahrzeugeinsatzkosten	Abhängig vom Fahrzeug	Abhängig vom Fahrzeug
Zeitabhängige (fixe) Kosten	Abhängig vom Fahrzeug	Abhängig vom Fahrzeug
Fahrzeugkosten insgesamt	Abhängig vom Fahrzeug	Abhängig vom Fahrzeug

Die ökonomische Berechnung wurde nach der folgenden Struktur modular aufgebaut:

- **Sattelzug**
 - Kostensätze Kühlaggregat Auflieger
 - Kostensätze Auflieger
 - Kostensätze Sattelzugmaschine
 - Vergleich Sattelzüge
 - Diesel-Sattelzug mit Diesel-/Elektro-Kühlaggregat
 - Diesel-Sattelzug mit Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung"
- **Motorwagen / Lastzug**
 - Kostensätze Motorwagen Kofferaufbau
 - Vergleich Motorwagen
 - Diesel-Motorwagen mit Diesel-/Elektro-Kühlaggregat
 - Diesel-Motorwagen mit Elektro-Kühlaggregat und Hochvoltbatterie
 - Kostensätze Kühlaggregat Lastzug
 - Kostensätze Motorwagen Anhänger Kofferaufbau
 - Vergleich Lastzug
 - Diesel-Motorwagen mit Diesel-/Elektro-Kühlaggregat plus Anhänger mit Diesel-/Elektro-Kühlaggregat
 - Diesel-Motorwagen mit Elektro-Kühlaggregat und Hochvoltbatterie und Anhänger mit Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung"

Der Hauptfokus der ökonomischen Betrachtung lag auf einem Vergleich der unterschiedlichen technischen Systeme und der sich daraus ergebenden Kostenunterschiede. Die in der Tabelle 18 aufgeführten Kostenarten bilden hierfür die Basis. Für die Vergleichbarkeit der Fahrzeugkombinationen wurden die Nutzungsdauer, die jährlichen Fahrleistungen, die Einsatztage sowie die täglichen Einsatzstunden mit den gleichen Werten angesetzt.

Nicht berücksichtigt wurden Kosten für das Fahrpersonal, die Verwaltung, Disposition, Gemeinkosten oder Verzinsung, die normalerweise in den jeweiligen, häufig sehr individuellen Berechnungen der Logistikdienstleister Eingang finden.

Der Kostenvergleich erfolgte anhand der berechneten Kilometer- und Tagessätze für die jeweilige technologische Kombination aus Zugmaschine und Kühlaggregat. Diese beiden Kostensätze bilden bei unternehmerischen Berechnungen die Basis für die Angebote an die Kunden. Der Kilometer-Satz errechnet sich aus den gesamten Fahrzeugkosten dividiert durch die Jahreslaufleistung des Fahrzeugs. Für die Berechnung des Tages-Satzes werden die gesamten Fahrzeugkosten durch die Jahreseinsatzzeit in Tagen dividiert. Sowohl die Jahreslaufleistung der Fahrzeuge als auch die Jahreseinsatzzeit werden für alle Fahrzeug-Konfigurationen gleich angesetzt.

Aufgrund der fehlenden Personal- und Allgemein-Kosten sind die Kilometer- und Tages-Sätze wesentlich niedriger als bei den Kalkulationen für Speditionsaufträge und können mit diesen nicht verglichen werden.

Nachfolgend wird ein Überblick über die Unterschiede einiger wesentlicher Kostenfaktoren gegeben, die innerhalb der ökonomischen Berechnung sowohl für die aktuellen als auch die emissionslosen Kühlaggregate gelten. Die aufgeführten Kostenfaktoren haben einen zentralen Einfluss auf die Ergebnisse:

1. Kaufpreis Kühlaggregat

Der Kaufpreis des Kühlaggregates fließt als wichtiger Kostenfaktor zusammen mit dem Kaufpreis für den Auflieger bzw. den Anhänger und mit dem Kaufpreis für die Sattelzugmaschine bzw. den Motorwagen in das betriebsnotwendige Vermögen ein. Der Kaufpreis für ein Diesel-/ Elektro-Aggregat konnte hierbei über die Hersteller abgefragt werden (*Abschlussbericht - Projekt H2Cool Prelude Anbahnung von Kühltransporten mit Wasserstoff-LKW*, 2022). Kaufpreise für Kühlaggregate inklusive der Komponenten, die für den emissionslosen Betrieb eines Kühl-Transporters erforderlich sind, sind derzeit auf dem Markt nicht bzw. nur bedingt erhältlich. Hier mussten Annahmen getroffen werden.

Für das in Kapitel „4.1 Technische Analyse emissionsfreier Kühlsysteme“ beschriebene Konzept „Rekuperationsachse + Kühlung“ werden neben dem vollelektrischen Kühlaggregat überschlüssig eine Rekuperationsachse sowie eine Hochvoltbatterie und Steuerungskomponenten in den Kaufpreis mit einkalkuliert. Es wurde trotz des Neuheitsgrades und Bestimmung des TRL in Kapitel „4 Darstellung von Optionen für emissionsfreie Kühlsysteme und Bewertung des Technologiereifegrads“ entschieden, die Rekuperationsachse innerhalb der ökonomischen und ökologischen Betrachtung bereits an dieser Stelle bei den aktuellen Systemen einzuordnen, da sie heute schon einen gewissen Verbreitungsgrad in der Praxis aufweist. Der Kaufpreis wird mit 50 % an Mehrkosten gegenüber einem konventionellen dieselelektrischen Kühlaggregat angesetzt. Rekuperationsachsen sowie Hochvoltbatterien sind bereits im Zusammenhang mit Elektro-Kraftfahrzeugen bekannt und werden auch vermehrt für den Einsatz in Lastkraftwagen genutzt.

Für das Konzept „Wasserstoff-Brennstoffzelle-Kühlsystem“ werden neben einem vollelektrischen Kühlaggregat überschlüssig Kosten für eine Brennstoffzelle, einen Drucktank sowie eine kleine Batterie und Steuerungskomponenten angesetzt. Diese Technologie befindet sich für den betrachteten Einsatz noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium und kann schwer beziffert werden, zumal die Kosten für Brennstoffzellen volatil sind. Daher werden die Kosten für das Kühlaggregat mit Zubehör mit 200 % an Mehrkosten gegenüber einem regulären dieselelektrischen Kühlaggregat angesetzt.

2. Kaufpreis Sattelzugmaschine und Motorwagen mit Kofferaufbau

Die Kaufpreise für die Sattelzugmaschine und den Motorwagen mit Kofferaufbau haben ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf das seitens des Logistikdienstleisters vorzuhaltende betriebsnotwendige Vermögen. Die Preise für konventionelle, dieselbetriebene Fahrzeuge basieren auf Erfahrungswerten aus der Praxis. Für den Motorwagen mit Isolierkofferaufbau werden gegenüber der Sattelzugmaschine rund 42 % an Mehrkosten angesetzt.

Bei den Kosten für eine elektrisch betriebene Sattelzugmaschine mit 40 t zGG wird mit rund dem 3,3-fachen (ca. 233 %) an Mehrausgaben gegenüber einem Diesel-Antrieb gerechnet. Für eine vergleichbare Sattelzugmaschine mit Wasserstoff-Antrieb werden im Vergleich zu einem Zugfahrzeug mit Elektro-Antrieb Mehrkosten in Höhe von 75 % einkalkuliert. Gegenüber der Diesel-Sattelzugmaschine liegen die Mehrausgaben des Brennstoffzellen-Fahrzeugs sogar bei rund 483 %.

In die Analyse zu den Anschaffungskosten für die elektrisch betriebenen Nutzfahrzeuge flossen die Möglichkeiten von Zuschüssen aus der KsNI-Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur für elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge (reine Batterieelektrofahrzeuge, von außen auflad-

bare Hybridelektrofahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge) ein (*KsNI - Förderung von Nutz- und Sonderfahrzeugen mit klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur*, no date; 'Klimafreundliche Nutzfahrzeuge', no date). Der Kaufpreis einer Sattelzugmaschine mit Elektro-Antrieb reduziert sich durch die Förderung um 56 % gegenüber dem ursprünglich angesetzten Wert. Bei der Sattelzugmaschine mit Wasserstoff-Antrieb ergibt sich eine Verminderung von 51,4 %. Die Unterschiede sind durch Kappungsgrenzen bei der Förderung bedingt. Bei den Motorwagen mit Isolierkofferaufbau und 40 t zGG wird im Verhältnis analog zu der Sattelzugmaschine gerechnet.

3. Steuerliche Vergünstigungen

Steuerliche Vergünstigungen, die in die ökonomische Berechnung mit aufgenommen wurden, betreffen ausschließlich Fahrzeuge mit einem emissionslosen Antrieb.

LKW mit einem Elektro-Antrieb und mit einem Wasserstoff-Antrieb sind von der Kraftfahrzeug-Steuer analog zu dem Steuerbefreiungssystem bei Elektro-Autos befreit (Bundesfinanzministerium, no date). Dies entspricht den Beschlüssen im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung, nach dem die Kraftfahrzeugsteuer stärker an den CO₂-Emissionen ausgerichtet und Elektro-PKW bis Ende 2030 vollständig von der Kfz-Steuer befreit werden (*Klimafreundliche, bezahlbare Mobilität*, 2020).

Weiterhin wird innerhalb der Kostenstruktur für elektrisch betriebene und wasserstoff-betriebene Kühl-Fahrzeuge von einer Befreiung von der Autobahnmaut ausgegangen. Zur Unterstützung des Markthochlaufs u. a. von Elektro-Fahrzeugen sieht das Bundesfernstraßenmautgesetz eine zeitlich gestaffelte Mautbegünstigung vor. Elektrisch betriebene Fahrzeuge, wie reine Batterieelektrofahrzeuge, von außen aufladbare Hybridelektrofahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge, werden zunächst unbefristet komplett von der Lkw-Maut befreit (*BMDV - Lkw-Maut*, 2022).

Innerhalb des Gesetzes zur weiteren steuerlichen Förderung der Elektromobilität und zur Änderung weiterer steuerlicher Vorschriften vom 12. Dezember 2019 wird im Artikel 2, § 7c eine „Sonderabschreibung für Elektronutzfahrzeuge und elektrisch betriebene Lastenfahrräder“ aufgeführt. Bei neuen Elektronutzfahrzeugen der EG-Fahrzeugklassen N1, N2 und N3, die ausschließlich durch Elektromotoren angetrieben werden, die ganz oder überwiegend aus mechanischen oder elektrochemischen Energiespeichern oder aus emissionsfrei betriebenen Energiewandlern gespeist werden, kann im Jahr der Anschaffung neben der Absetzung für Abnutzung eine Sonderabschreibung in Höhe von 50 Prozent der Anschaffungskosten in Anspruch genommen werden. Diese Sonderabschreibung wurde im Rahmen der Kostenberechnung als getrennter Faktor berücksichtigt und aufgrund der Beschränkung auf das Jahr der Anschaffung gesondert aufgeführt.

4. Kraftstoffkosten und Wartungskosten

In die km-abhängigen Kosten und damit in den km- und Tagessatz, anhand derer die unterschiedlichen Technologien miteinander verglichen werden, fließen die beiden Kostenarten Kraftstoffkosten und Kosten für die Wartung der Fahrzeuge mit ein.

Die Kraftstoffkosten sind hierbei ein wesentlicher von äußeren Einflüssen abhängiger Kostentreiber und geben innerhalb der Berechnung eine Momentaufnahme wieder. Der Dieselpreis in Höhe von 1,71 € geht aus einer Preisübersicht der cbt GmbH hervor (cbt GmbH, no date). Für den Strompreis wurde dabei auf ADAC als Quelle zurückgegriffen und ein Mittelwert gebildet (*Elektroautos: Ladestationen, Preise, Stromanbieter*, 2022). Der Preis für ein Kilogramm Wasserstoff setzt sich aus den von H2Mobility auf der Webseite H2.Live veröffentlichten Preisen für grauen und grünen Wasserstoff zusammen. (*H2.LIVE: Wasserstofftankstellen in Deutschland & Europa*, no date). Aufgrund der Vorsteuerabzugsberechtigung der Unternehmen wurden die Preise ohne Mehrwertsteuer angesetzt.

Die Wartungskosten nehmen innerhalb der ökonomischen Berechnung zwar nur einen kleinen Anteil ein, variieren allerdings für die dargestellten technologischen Varianten. Viele Speditionen lassen die Wartungen ihrer Fahrzeuge und der Kühlsysteme im Rahmen von Full Service Verträgen durchführen. Dieses Konzept bietet sich ebenfalls für emissionslose Kühlsysteme an. Als Ansatz für die Wartungskosten der dieselbetriebenen Kühlaggregate wurden die Erkenntnisse aus vorangegangenen Untersuchungen übernommen (*Abschlussbericht - Projekt H2Cool Prelude Anbahnung von Kühltransporten mit Wasserstoff-LKW*, 2022). Für die klimafreundlichen Aggregate wurden die Wartungskosten um 20 % bei vollelektrischen Systemen und um 10 % bei Wasserstoff-betriebenen Systemen gegenüber den Dieselpreisen reduziert.

2.2.3 Ökonomische Berechnungen für aktuelle Kühlsysteme

Nachfolgend werden die Ergebnisse der ökonomischen Berechnungen für die Fahrzeugvarianten Sattelzug, Motorwagen und Lastzug aufgeteilt in Kilometer- und Tages-Sätze für aktuell in Betrieb befindliche temperaturgeführte Lastkraftwagen dargestellt. Die den Vergleichen zugrundeliegenden und in Tabelle 18 zusammengefassten Annahmen gehen neben den bereits erläuterten Überlegungen auf fundierte Erfahrungswerte der an der Studie beteiligten Autoren und persönliche Korrespondenzen mit Speditionsunternehmen zurück.

Im Fernverkehr weisen Lastkraftwagen abhängig von ihrem Einsatzprofil eine durchschnittliche jährliche Fahrleistung zwischen 100.000 und 150.000 Kilometern auf. In einem Praxistest (Robert Domina, 2015) zwischen der Spedition Reinert und dem Magazin Transport wurden Fahrleistungen von rund 140.000 Kilometern jährlich für Kühllastwagen ermittelt. Für den Vergleich der Sattelzüge wurde im Rahmen dieser Studie eine Laufleistung von 120.000 Kilometern angenommen, die aus einem Vergleichstest von Sattelzugmaschinen eines Branchenmagazins (DVZ.de, no date) stammt.

Für SZM mit Diesel Antrieb wurden Fahrzeuge mit marktüblicher Ausstattung und Motorisierung gewählt. Bei den Antriebstechnologien Wasserstoff (Rathmann, 2021) und Elektro gestaltete sich die Preisfindung schwieriger, da für diese Fahrzeuge noch keine Preise bekannt oder von den Anbietern dieser Fahrzeuge offiziell herausgegeben werden. Daher wurden Annahmen auf Basis von in der Branche kursierenden Preisen getroffen.

Die Kaufpreise von Kühlaggregaten für Auflieger, Motorwagen und Anhänger können je nach Hersteller variieren, liegen aber weitestgehend nah beieinander. Für diese Studie wurden Werte aus vorherigen Projekten und auf Nachfrage bei einem lokalen Kühllogistiker in Bremerhaven herangezogen. Auf dieser Basis kann für Neugeräte mit Dieselantrieb mit Anschaffungskosten zwischen 20.000 und 30.000 Euro gerechnet werden.

Die Kosten pro Liter Diesel (cbt GmbH, no date) enthalten im Vergleich zum selben Zeitraum im Jahr 2021 eine Steigerung von 35 Cent (*Kraftstoffpreise im November 2021*, 2021). Gleiches gilt für die Kosten für AdBlue bei Dieselfahrzeugen, die mit 2,75 EUR je Liter im Vergleich zum Vorjahr 2021 eine signifikante Steigerung beinhalten (Katja Fastrich, 2022).

Für die Ladung von BEV werden im Durchschnitt hinsichtlich der Nutzung öffentlicher/privater Infrastruktur pro kWh zwischen 34 Cent (AC) und 49 Cent (DC) veranschlagt (*Elektroautos: Welche Ladesäule ist unterwegs die Richtige?*, 2022).

Der Kaufpreis für die Bereifung setzt sich aus Angeboten eines Onlinereifenhändlers (ReifenDirekt.de, no date) und dem Mittelwert aus dessen teuersten und günstigsten LKW-Reifen zusammen. Aufgrund unterschiedlicher Größen und Dimensionen auf den Achsen wurden diese zusammenaddiert und für alle Fahrzeuge als gleich angesetzt.

Für die Beitragskosten der Haftpflicht- und Vollkaskoversicherungen wurde das Lehrbuch für Kaufleute von Speditions- und Logistikdienstleistungen herangezogen. In der Praxis hängen diese Kosten individuell von dem Unternehmen ab. Die Höhe der Beträge wird auf Basis von Faktoren wie der Treue des Unternehmens bei der Versicherung und der Schadensquote berechnet. Bei einer Vollkaskoversicherung fallen die Versicherungsprämien für Fahrzeuge oder Aggregate mit Elektro- oder Wasserstoffantrieb aufgrund der höheren Anschaffungskosten höher aus.

Die Berechnungsgrundlage für die ökonomische Betrachtung stammt aus dem in der Ausbildung von Kaufleuten für Speditions- und Logistikdienstleistungen weit verbreiteten Lehrbuch „Leistungsprozesse Spedition und Logistik – Informationshandbuch“ (Voth and Hesse, 2017).

Mit den nun bekannten Informationen lassen sich verschiedene bereits in der gängigen Praxis in temperaturgeführten Transporten eingesetzte Fahrzeugkonfigurationen für die Kraftfahrzeugtypen Sattelzug, Motorwagen und Lastzug unter ökonomischen Gesichtspunkten miteinander vergleichen.

Vergleich unterschiedlicher Sattelzug-Konfigurationen

Die Abbildung 27 zeigt einen wirtschaftlichen Vergleich für die Fahrzeug-Konfigurationen Diesel-Sattelzug mit einem Diesel-/Elektro-Kühlaggregat und Diesel-Sattelzug mit dem Konzept „Rekuperationsachse + Kühlung“ unter den für die in temperaturgeführten Transporten üblichen Einsatzbedingungen.



Abbildung 27: Kilometer-Satz und Tages-Satz für die Diesel-SZM mit Diesel-/Elektro-Aggregat und für die Diesel-SZM mit dem Konzept „Rekuperationsachse + Kühlung“ (eigene Darstellung)

Der Kilometer-Satz für die Diesel-SZM mit dem Diesel-/Elektro-Aggregat am Auflieger liegt bei 1,14 € und der Tages-Satz bei 556,41 €. Für die Diesel-SZM mit dem Konzept „Rekuperationsachse + Kühlung“ liegt der Kilometer-Satz bei 1,09 € und der Tages-Satz bei 533,69 €. Die Kilometer- und Tages-Sätze dienen hierbei rein zum technologischen Vergleich der Systeme und enthalten daher nicht alle Komponenten der betriebswirtschaftlichen Berechnung eines Kundenangebotes.

Sowohl bei den Kilometer-Sätzen als auch bei den Tages-Sätzen zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit von den variablen Kosten (siehe Tabelle 18). Obwohl das unternehmensseitig notwendige Vermögen bedingt durch den höheren Kaufpreis bei dem Diesel-Sattelzug mit dem Konzept „Rekuperationsachse + Kühlung“ gegenüber dem Diesel-Sattelzug mit dem Diesel-/Elektro-Kühlaggregat höher ist, sind die Kilometer- und Tages-Sätze bei dieser technologischen Variante niedriger. Der Unterschied ergibt sich maßgeblich durch die geringeren Kraftstoffkosten und die geringeren Wartungskosten für den Betrieb des Konzepts „Rekuperationsachse + Kühlung“.

Vergleich unterschiedlicher Motorwagen Konfigurationen

Analog zum Vergleich der beiden Sattelzugkonfigurationen ist in Abbildung 28 ein wirtschaftlicher Vergleich für die Motorwagen Konfigurationen Diesel-Antrieb mit Diesel-/Elektro-Kühlaggregat und Diesel-Motorwagen mit dem Elektro-Kühlaggregat und Hochvoltbatterie unter in temperaturgeführten Transporten üblichen Einsatzbedingungen dargestellt.

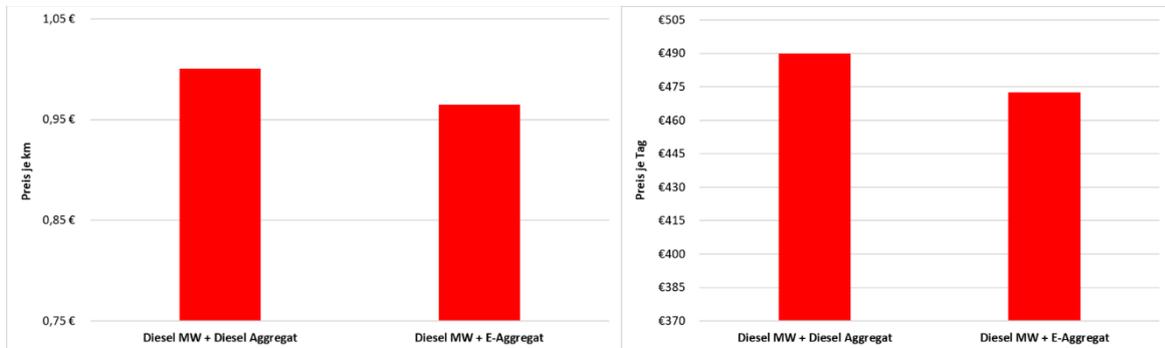


Abbildung 28: Kilometer-Satz und Tages-Satz für den Diesel-Motorwagen mit Diesel-/Elektro-Aggregat und für den Diesel-Motorwagen mit dem Elektro-Aggregat und Hochvoltbatterie“ (eigene Darstellung)

Der Kilometer-Satz für den Diesel-Motorwagen mit dem Diesel-/Elektro-Aggregat liegt bei 1,00 € und der Tages-Satz bei 489,96 €. Für den Diesel-Motorwagen mit dem Konzept Elektro-Aggregat und Hochvoltbatterie liegt der Kilometer-Satz bei 0,96 € und der Tages-Satz bei 472,62 €.

Bei den Diesel-Motorwagen liegen den Kilometer- und Tages-Sätzen der beiden Varianten die gleichen Randbedingungen wie bei dem Diesel-Sattelzug zugrunde. Die Variante Diesel-Motorwagen mit dem Elektro-Aggregat und Hochvoltbatterie ist auch hier aufgrund der geringeren Betriebskosten die günstigere Alternative. Allgemein sind die Kilometer- und Tages-Sätze des Diesel-Motorwagens im Vergleich zu dem Diesel-Sattelzug bedingt durch geringere unternehmensseitig notwendige Investitions- und variable Kosten etwas niedriger.

Vergleich unterschiedlicher Lastzug Konfigurationen

Die Vergleiche unterschiedlicher Fahrzeug-Konfigurationen der für diese Studie relevanten und in temperaturgeführten Transporten eingesetzten Fahrzeugtypen wird durch die Betrachtung des Lastzuges komplettiert. Dieser wird in Abbildung 29 in Form eines Lastzuges aus Diesel-Motorwagen mit Diesel-Elektro-Kühlaggregat am Motorwagen und am Anhänger und einem Lastzug bestehend aus Diesel-Motorwagen mit Elektro-Kühlaggregat und Hochvoltbatterie und dem Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung" am Anhänger gegenübergestellt.

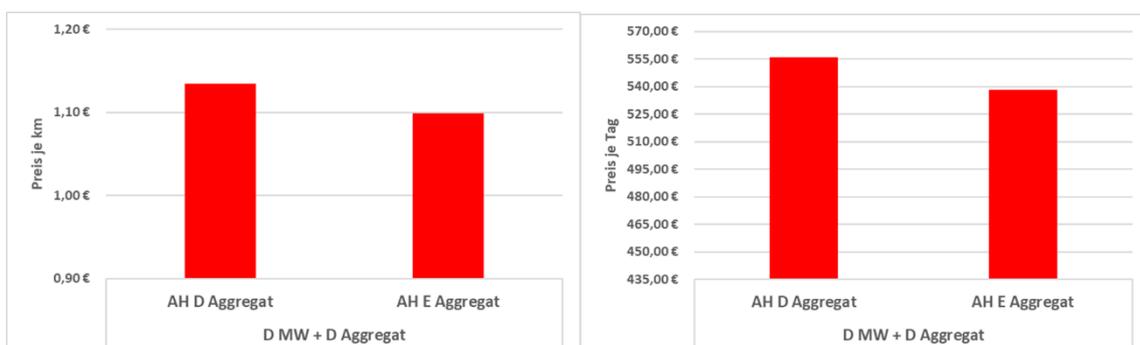


Abbildung 29: Kilometer-Satz und Tages-Satz für einen Diesel-Lastzug mit Diesel-Elektro-Kühlaggregat und einem Diesel-Lastzug mit Elektro-Aggregat und Hochvoltbatterie sowie dem Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung" am Anhänger gegenübergestellt.

Der Kilometer-Satz für den Lastzug mit Diesel-Elektro-Kühlaggregat liegt in dem vorliegenden Vergleich bei 1,13 € und der Tages-Satz bei 555,73 €. Dem stehen bei Verwendung eines Lastzugs mit Elektro-Kühlaggregat und Hochvoltbatterie ein Kilometer-Satz von 1,10 € und ein Tages-Satz von 538,12 € gegenüber.

An dieser Stelle muss abschließend festgehalten werden, dass in der Praxis weitaus höhere Kilometer- und Tagessätze in Erscheinung treten. Deutsche Speditionen rufen zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie Kilometersätze von 2 Euro und mehr aus. Für den Tag erheben Logistiker zwischen 750 bis 900 Euro (*Preisliste 2022 - 2023*, no date) für schwere Nutzfahrzeuge. Dies liegt unter anderem an steigenden Personalkosten und an variablen Kosten für die Kraftstoffe, bedingt durch stark steigende Diesel-, AdBlue- und Schmierstoff Preise. Die Abweichung zur Praxis liegt in erster Linie jedoch daran, dass in den hier dargestellten Kostenvergleichen keine Kosten für das Fahrpersonal, die Verwaltung, Disposition, Gemeinkosten oder Verzinsung berücksichtigt werden, da diese auf sehr individuelle Berechnungen der Logistikdienstleister zurückgehen.

2.3 Ökologische Analyse der aktuellen Kühlsysteme

Der folgende Abschnitt beinhaltet die Berechnung der Energieverbräuche und THG-Emissionen konventioneller temperaturgeführter Nutzfahrzeuge und der eingesetzten Kühlaggregate. Daraus werden die Einsparpotentiale an Emissionen abgeleitet, die sich für die Gesamtflotte an Nutzfahrzeugen mit Isolieraufbau und Kühlung der Klassen N2 und N3 sowie für Anhänger mit Isolieraufbau und Kühlung der Klassen O3 und O4 ergeben.

Als Grundlage für die Berechnungen der THG-Emissionen für die aktuellen temperaturgeführten Nutzfahrzeuge dienen die in diesem Abschnitt dargestellten Informationen und Annahmen in Kombination mit dem Leitfaden „Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258“ des DSLV - Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. (Martin Schmied and Wolfram Knörr, 2013). Mit Hilfe des Leitfadens können die Treibhausgasemissionen für Well-to-Wheel (WtW) anhand der folgenden Formel ermittelt werden:

$$(3) \quad G_w = F * g_w$$

mit

G_w = Well-to-Wheel-THG-Emissionen in kg CO₂-Äquivalente (CO₂e)

F = Gemessener Energieverbrauch (z. B. l, kg oder kWh)

g_w = Well-to-Wheel-THG-Emissionsfaktor von gemessenen Werten in kg CO₂e/l, kg CO₂e/kg oder kg CO₂e/kWh

Der Well-to-Wheel-THG-Emissionsfaktor g_w für Treibhausgasemissionen wird als CO₂-Äquivalent berechnet und kann für Diesel B7 der Tabelle 5 des Leitfadens entnommen werden. Dieser lautet:

$$g_w \text{ Diesel B7} = 3,15 \text{ kg CO}_2\text{e/l}$$

$$g_w \text{ Diesel B7} = 3,76 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$$

Die Ermittlung des WtW-THG-Emissionsfaktors für die Strombereitstellung aus dem deutschen Strommix erfolgte nach Studien des Öko-Instituts (S. Kühnel, F. Hacker, and W. Görz, 2018), der DVGW EBI (Heneka and Mörs, 2022) sowie des Instituts für Energie- und Umweltforschung und der Agora Energiewende (Hinrich Helms *et al.*, 2019). Für die ökologischen Berechnungen wurde der Mittelwert aus den Angaben der drei Veröffentlichungen zu den THG-Emissionen des deutschen Strommixes im Jahr 2020 genommen.

Aus den bereitgestellten Daten der betrachteten Studien erfolgte für 2020 eine Mittelwertbildung für die WtW-THG-Emissionen des deutschen Strommix in Höhe von 419,33 gCO₂e/kWh. Der THG-Emissionsfaktor für den deutschen Strommix wird daher mit

$$g_w \text{ Strommix}_{2020} = 0,42 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh}$$

in die Berechnungen der Treibhausgasemissionen aufgenommen.

Im Laufe der Studie erfolgen weitere ökologische Berechnungen unter Einsatz von Grünstrom, der rein durch Windenergie (On- und Offshore) erzeugt wird. Die Grundlagen für die Ermittlung des Grünstromes stammen aus Daten der drei Quellen Umweltbundesamt, IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change und necp EBI (Bruckner *et al.*, 2014; Heneka and Mörs, 2022; Lauf, Memmler and Schneider, 2022). Nach Mittelwertbildung ergibt sich für Grünstrom aus On- und Offshore-Windenergie ein WtW-THG-Emissionswert von

$$g_w \text{ Strom On- und Offshore-Windenergie} = 21,79 \text{ gCO}_2\text{e/kWh.}$$

Dies entspricht ungefähr 0,022 kgCO₂e/kWh.

Die innerhalb der ökonomischen Berechnungen ermittelten Energieverbräuche konventioneller temperaturgeführter Nutzfahrzeuge und der eingesetzten Kühlaggregate werden auch für die ökologische Berechnung angesetzt und sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 19: Energieverbräuche konventioneller temperaturgeführter Nutzfahrzeuge und der eingesetzten Kühlaggregate

Energieverbrauch F	Diesel B7	Strom
Sattelzugmaschine (SZM)	26 l/100 km	106 kWh/100 km
Kühlaggregat SZM	3,7 l/h	8 kWh/h
Motorwagen (MW)	26 l/100 km	106 kWh/100 km
Kühlaggregat MW/Lastzug	2,46/4,92 l/h	5,3/10,6 kWh/h

Die Berechnung der Treibhausgasemissionen in der konventionellen temperaturgeführten Logistik erfolgt in drei Schritten.

Schritt 1: Berechnung der Well-to-Wheel THG-Emissionen

Auf Basis der ermittelten Grundlagen erfolgte die Berechnung der WtW-THG-Emissionen für Sattel- und Lastzüge sowie für die Anhänger und die aktuellen Kühlsysteme.

In der Tabelle 20 werden die Ergebnisse der mit der Formel (3) berechneten WtW-THG-Emissionen für den Diesel-Sattelzug und den Diesel-Motorwagen dargestellt.

Tabelle 20: WtW-THG-Emissionen Sattelzug und Motorwagen in kgCO₂e/100 km

Diesel B7	Energieverbrauch F in l/100 km	WtW-THG-Emissionen in kg CO ₂ e/100 km
Sattelzugmaschine	26	81,90
Motorwagen	26	81,90

Für die weiteren Berechnungen wurde der Diesel-Energieverbrauch von Liter in Kilogramm mit dem Energiegehalt von 1 l Diesel = 0,8317 kg Diesel umgerechnet (Weinhold, 2016). Die Berechnung der WtW-THG-Emissionen der Kühlaggregate wurde anschließend mit dem Wert $g_w \text{ Diesel B7} = 3,76 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$ aus dem DSLV-Leitfaden fortgesetzt. Ein großer Anteil, der aktuell eingesetzten Kühl- und Tiefkühl-Transporter verfügen über Kühlaggregate, die mit Diesel und mit Strom betrieben werden

können, wobei die Haupteinsatzzeit mit Diesel erfolgt. Nachfolgend werden die WtW-THG-Emissionen für beide Betriebsarten berechnet.

Die Tabelle 21 zeigt die WtW-THG-Emissionen für den Betrieb der aktuellen Kühlaggregate mit Diesel.

Tabelle 21: WtW-THG-Emissionen Kühlaggregate im Dieselbetrieb in kgCO₂e/h

Dieselbetrieb B7	Energieverbrauch F in l/h	Energieverbrauch F in kg/h	WtW THG-Emissionen in kg CO ₂ e/h
Kühlaggregat Sattelzug	3,7	3,08	11,57
Kühlaggregat Lastzug	4,92	4,09	15,39

Die Tabelle 22 zeigt die WtW-THG-Emissionen für den Betrieb der aktuellen Kühlaggregate mit Strom. Hierbei wird die Annahme getroffen, dass das Kühlaggregat innerhalb des betrachteten Zeitraums über das Stromnetz betrieben wird.

Tabelle 22: WtW-THG-Emissionen Kühlaggregate im elektrischen Betrieb in kgCO₂e/h

Strombetrieb	Energieverbrauch F in kWh/h	WtW-THG-Emissionen dt. Strommix 2020 in kg CO ₂ e/h	WtW THG-Emissionen Strom aus WE-On und Off in kg CO ₂ e/h
Kühlaggregat Sattelzug	8	3,35	0,17
Kühlaggregat Lastzug	10,6	4,44	0,23

Zur Ermittlung der THG-Emissionen der Kühlaggregate im Strombetrieb wurde der jeweilige Energieverbrauch mit dem THG-Emissionsfaktor aus dem oben ermittelten Mittelwert des deutschen Strommixes 2020 multipliziert. Würde der Betrieb des Aggregates mit Grünstrom rein aus On- und Offshore-Windenergie erfolgen, könnten die WtW-THG-Emissionen für das Kühlaggregat des Sattelzuges und für die beiden Kühlaggregate des Lastzuges um jeweils rund 95 % je Betriebsstunde reduziert werden.

Schritt 2: Berechnung der THG-Emissionen nach Einsatzzeit der Kühlaggregate

Die Jahreseinsatzzeit der Kühlaggregate wird der ökonomischen Berechnung aus Kapitel „2.2 Ökonomische Analyse der aktuellen Kühlsysteme“ entnommen. Für Kühlaggregate mit der Möglichkeit des Diesel- und Elektrobetriebs werden 1.200 Stunden Jahreseinsatzzeit im Dieselbetrieb und 350 Stunden im Netzbetrieb angenommen.

Die Tabelle 23 gibt die THG-Emissionen eines Diesel-/Elektro-Kühlaggregates für den Diesel- und den Netzbetrieb wieder.

Tabelle 23: WtW-THG-Emissionen bezogen auf die Jahreseinsatzzeit für Kühlaggregate mit Diesel-/Elektrobetrieb

Diesel-/ElektroKühlaggregat	Jahreseinsatzzeit [h] Dieselbetrieb	Jahreseinsatzzeit [h] Netzbetrieb	WtW THG-Emissionen Diesel in kg CO ₂ e	WtW-THG-Emissionen dt. Strommix 2020 in kg CO ₂ e	WtW THG-Emissionen, Strom aus WE-On und Off in kg CO ₂ e
Kühlaggregat Sattelzug	1.200	350	13.884,73	1.174,04	61,00
Kühlaggregate Lastzug	2.400	700	18.462,94	1.555,6	80,82

Die Werte für die THG-Emissionen ergeben sich aus dem Produkt der Jahreseinsatzzeit der Kühlaggregate mit deren stündlichen Verbrauch an Diesel und Strom und den WtW THG-Emissionen für einen Liter Diesel bzw. einer Kilowattstunde Strom (Strommix₂₀₂₀).

Die Summe der WtW THG-Emissionen für den Betrieb mit Diesel und den Betrieb mit Strom aus dem deutschen Strommix ergeben 15.058,77 kg CO₂e für das Kühlaggregat des Sattelzuges und 20.018,54 kg CO₂e für die beiden Kühlaggregate des Lastzuges. Erfolgt der Strombetrieb anstatt mit Strom aus dem deutschen Strommix mit Grünstrom aus On- und Offshore-Windenergie, so ergeben sich für den Sattelzug 13.945,73 kg CO₂e und für den Lastzug 18.543,76 kg CO₂e.

Der Netzbetrieb der Kühlaggregate erzeugt rund 91,5 Prozent weniger WtW-THG-Emissionen als der Dieselbetrieb, trotz des derzeit noch recht hohen Anteils an konventionellen Energieträgern am deutschen Strommix. Würde der Netzbetrieb rein mit Strom aus On- und Offshore-Windenergie erfolgen, dann würden sich die THG-Emissionen nochmals um rund 95 Prozent reduzieren.

Schritt 3: Berechnung der THG-Emissionen auf die Laufleistung und den Bestand der temperaturgeführten Diesel-LKW

Die Bestandsdaten wurden der Statistik des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) zu dem Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten mit Stand zum 01. Januar 2022 entnommen. Hierfür wurde aus der Veröffentlichung FZ 25 Lastkraftwagen und Kraftfahrzeuganhänger mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ gewählt (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022a; *Marktdaten und Statistiken*, no date).

Zur Ermittlung der Well-to Wheel-THG-Emissionen von Diesel bezogen auf die Laufleistung wurden die in der ökonomischen Analyse erfasste Jahreslaufleistung für Sattel- und Lastzüge zu Grunde gelegt. Bei einer Laufleistung von 120.000 km/Jahr entstehen anhand der in Tabelle 21 ermittelten WtW-THG-Emissionen von Diesel B7 ein gesamter WtW-THG-Emissionswert von 98.280 kg CO₂e. Wird der von der Laufleistung abhängige Emissionswert auf den Bestand der Nutzfahrzeuge der Klassen N2 und N3 mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ bezogen, ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle 24 aufgeführten WtW-Emissionen in t CO₂e.

Tabelle 24: WtW-THG-Emissionen für N2- und N3-Nutzfahrzeuge mit Isolierwänden und Kühlung

KBA-Daten 01. Januar 2022	Bestand	WtW-THG-Emissionen Diesel in t CO ₂ e /Jahr
LKW mit Isolierwänden + Kühlung N2	12.831	1.261.030,68
LKW mit Isolierwänden + Kühlung N3	16.590	1.630.465,20

Kühl- und Tiefkühl-Transporte mit einer zulässigen Gesamtmasse über 12 t (N3) haben gegenüber der Nutzfahrzeugklasse N2 (zGG über 3,5 t bis höchstens 12 t) einen um rund 29,3 % höheren Anteil an den CO₂e-Emissionen.

Für Anhänger /Auflieger mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ zeigt die Tabelle 25 die bestandsabhängigen WtW-THG-Emissionen.

Tabelle 25: WtW-THG-Emissionen für O3- und O4-Anhänger mit Isolierwänden und Kühlung

KBA-Daten 01. Januar 2022	Bestand	WtW-THG-Emissionen Diesel in t CO ₂ e/Jahr
Anhänger mit Iso- lierwänden + Küh- lung O3	656	64.471,68
Anhänger mit Iso- lierwänden + Küh- lung O4	45.554	4.477.047,12

Der Bestand an O4-Anhängern mit einer zulässigen Gesamtmasse über 10 t ist deutlich größer als der Bestand an O3-Anhängern (3,5 t bis höchstens 10 t), was sich auch in den wesentlich höheren THG-Emissionen (69-fach) widerspiegelt.

2.4 Fazit zur technischen, ökonomischen und ökologischen Analyse der aktuellen Kühlsysteme

Kapitel „2. Technische, ökonomische und ökologische Analyse der aktuellen Kühlsysteme“ der vorliegenden Studie liefert einen detaillierten Überblick über den derzeitigen technologischen Stand der in temperaturgeführten Transporten eingesetzten Kühllastwagen und Kühlaufleger sowie der darin verbauten Kühlaggregate. Die von den Herstellern verfolgten Ansätze zur Reduzierung des Ressourceneinsatzes in temperaturgeführten Transporten werden ebenso erkennbar, wie die anhaltende Herausforderung der hohen GWPs derzeit eingesetzter Kältemittel. Bereits hier konnten starke Einsparpotentiale in Höhe von bis zu 77.480 t CO₂e pro Jahr durch die Substitution stark klimaschädlicher Kältemittel durch bereits existierende Alternativen identifiziert werden. Die technische Analyse liefert damit insbesondere die Grundlage für die Erarbeitung weiterer Entwicklungs- und Forschungsbedarfe.

Mit der ökonomischen Analyse wurden wiederum Benchmarks geschaffen, an der sich vor dem Markteintritt stehende klimafreundliche Kühlsysteme für unterschiedliche Nutzfahrzeugkonfigurationen messen lassen können. So konnte in Kapitel „2. Technische, ökonomische und ökologische Analyse der aktuellen Kühlsysteme“ dargestellt werden, dass die TCO für in Kühltransporten eingesetzte konventionelle Sattelzüge, Motorwagen und Lastzüge zwischen 1,00 € und 1,14 € pro Kilometer bzw. 489,96 € und 556,41 € pro Tag liegen. Durch die Anwendung des bereits ausgereiften und in der Praxis vielfach eingesetzten Systems der Verwendung einer Rekuperationsachse + Kühlung lassen sich die TCO beim Sattelzug auf 1,09 € anstatt 1,14 € pro Kilometer bzw. auf 533,69 € anstatt 556,41 € pro Tag senken. Durch die reine Betrachtung von allgemein gültigen Kostenfaktoren bei der keine individuellen unternehmensinternen Kostenstellen, wie Verwaltungs-, Personal- oder Gemeinkosten in die ökonomische Analyse eingeflossen sind, können die ermittelten Werte problemlos für einen objektiven Kostenvergleich mit in der Entwicklung befindlichen klimafreundlichen Systemen für temperaturgeführte Transporte herangezogen werden.

Mit einer ökologischen Analyse zu den in der temperaturgeführten Logistik eingesetzten konventionellen Nutzfahrzeugen wurde der vorliegende Abschnitt dieser Studie abgeschlossen. Dabei konnten signifikante Einsparpotentiale an THG-Emissionen identifiziert und quantifiziert werden. Die für diese Studie relevanten Nutzfahrzeuge mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ der Klasse N2 und N3 emittierten im Jahr 2022 THG-Emissionen von umgerechnet 2.891.496 t CO₂-e. Die in der temperaturgeführten Logistik eingesetzten Anhänger mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ und der Klassen O3 und O4 erhöhen die derzeit in der Kühllogistik emittierten THG-Emissionen um

weitere 4.541.519 t CO₂-e. Damit lässt sich das in der temperaturgeführten Logistik vorliegende Einsparpotential an THG-Emissionen auf insgesamt rund 7,43 Mio. t CO₂-e pro Jahr beziffern. Aufbauend auf diese ökologische Ausgangssituation können im weiteren Verlauf dieser Studie realistische Reduktionspotentiale durch die Simulation des Einsatzes von in der Entwicklung befindlicher klimafreundlicher Nutzfahrzeuflösungen dargestellt werden.

3. Regulatorischer Rahmen

Aufgabe dieses Kapitels ist die Beschreibung des regulatorischen Rahmens in Deutschland und Europa für Kühllastkraftwagen und Kühlsysteme. Insbesondere geht es um die Bearbeitung folgender Frage- bzw. Aufgabenstellungen:

- Wie werden die unterschiedlichen Kühlsysteme in der StVZO oder anderen relevanten nationalen oder europäischen Regularien/ Normen/ Standards eingeordnet?
- Sind bei Zulassung sowie Wartung und Betrieb spezielle Regularien für Kühlfahrzeuge/-anhänger gegenüber regulären Fahrzeugen zu beachten? Ergeben sich daraus Herausforderungen für klimafreundliche Kühlsysteme?
- Wie werden die Systeme bei den EU-Flottenzielwerten und VECTO betrachtet?
- Beschreibung der EU-Verordnung 2019/631 und deren Wirkung

Nachfolgend werden zunächst zulassungsrechtliche Regelungen für den Einsatz von Kühllastkraftwagen betrachtet. Ergänzend dazu werden gefahrgutrechtliche Bestimmungen im Hinblick auf mögliche Restriktionen durch die Verwendung von Wasserstoff als Energiequelle ausgewertet. Zum Schluss erfolgt eine Vorstellung relevanter europäischer emissionsrechtlicher Bestimmungen, die sich für Fahrzeuge und Kältemittel ergeben.

3.1 Zulassungs- und genehmigungsrechtliche Regelungen

Innerstaatliche und europäische Regelungen setzen den Rahmen für den Betrieb und den Einsatz von Kraftfahrzeugen auf öffentlichen Straßen. In Deutschland gehören insbesondere die folgenden Vorschriften dazu:

- **Straßenverkehrsgesetz**
Das Straßenverkehrsgesetz enthält die Grundlagen für den Betrieb und den Einsatz von Kraftfahrzeugen auf öffentlichen Straßen. Es sieht vor, dass Kraftfahrzeuge und ihre Anhänger für den Betrieb auf öffentlichen Straßen einer behördlichen Zulassung bedürfen. Diese wird nur erteilt, wenn für die Kraftfahrzeuge eine Betriebserlaubnis, eine Einzelgenehmigung oder eine EG-Typgenehmigung vorliegen. Weitere Regelungsinhalte betreffen z. B. Angelegenheiten der Haftpflicht, dem Fahrzeug- und dem Fahrerlaubnisregister. Überdies liefert es die rechtliche Grundlage für weitere Verordnungen.
- **Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung**
Die Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung ist eine Verordnung des Straßenverkehrsgesetzes. Sie enthält Einzelheiten zur Zulassung und konkretisiert den Begriff der Betriebserlaubnis. Überdies enthält sie technische Aspekte. Gegenwärtig werden die Inhalte der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung in andere Verordnungen überführt. So entstand beispielsweise die Fahrzeug-Zulassungs-Verordnung.

- Verordnung über die Zulassung von Fahrzeugen zum Straßenverkehr (Fahrzeug-Zulassungsverordnung - FZV)

Die Fahrzeug-Zulassungsverordnung gilt für alle Kraftfahrzeuge mit einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von mehr als 6 km/h und ihren Anhängern. Sie konkretisiert die Zulassungsvoraussetzungen aus dem Straßenverkehrsgesetz und bestimmt deren Voraussetzungen. Dazu gehören u. a. die Einzelgenehmigung und die Typgenehmigung.

Die Einzelgenehmigung ist „die behördliche Bestätigung, dass das betreffende Fahrzeug, System, Bauteil oder die selbstständige technische Einheit den geltenden Bauvorschriften entspricht; sie ist eine Betriebserlaubnis im Sinne des Straßenverkehrsgesetzes und eine Einzelbetriebserlaubnis im Sinne der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung“ (§ 2 Nr. 6 FZV). Die Einzelgenehmigung wird in der Regel von den örtlichen Zulassungsbehörden erteilt und bezieht sich u. a. auf bereits in Verkehr befindliche Kraftfahrzeuge.

Eine Typgenehmigung wird vom Kraftfahrtbundesamt erteilt und für Fahrzeuge und -teile ausgesprochen, die in Serie produziert werden. Die technischen Standards für die Erteilung einer Typgenehmigung sind u. a. in der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung und in europäischen Rechtsakten festgehalten.

Für in Serie produzierte Kraftfahrzeuge der Klassen M und N sowie deren Anhänger der Klasse O ist die Erteilung einer EU-Typgenehmigung möglich. Einzelheiten zum Verfahren und zu den technischen Mindeststandards enthalten u. a.

- VERORDNUNG (EU) 2018/858 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 30. Mai 2018 über die Genehmigung und die Marktüberwachung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 715/2007 und (EG) Nr. 595/2009 und zur Aufhebung der Richtlinie 2007/46/EG
- VERORDNUNG (EU) 2019/2144 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 27. November 2019 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge im Hinblick auf ihre allgemeine Sicherheit und den Schutz der Fahrzeuginsassen und von ungeschützten Verkehrsteilnehmern, zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/858 des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 78/2009, (EG) Nr. 79/2009 und (EG) Nr. 661/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Verordnungen (EG) Nr. 631/2009, (EU) Nr. 406/2010, (EU) Nr. 672/2010, (EU) Nr. 1003/2010, (EU) Nr. 1005/2010, (EU) Nr. 1008/2010, (EU) Nr. 1009/2010, (EU) Nr. 19/2011, (EU) Nr. 109/2011, (EU) Nr. 458/2011, (EU) Nr. 65/2012, (EU) Nr. 130/2012, (EU) Nr. 347/2012, (EU) Nr. 351/2012, (EU) Nr. 1230/2012 und (EU) 2015/166 der Kommission

Anhang I der VERORDNUNG (EU) 2019/2144 enthält eine Auflistung aller UN-Regelungen, die für die Erteilung einer EU-Typgenehmigung zu berücksichtigen sind. Für Kraftfahrzeuge der Klassen M und N wird auf folgende spezifische Regelungen verwiesen:

- Elektrische Sicherheit
„Regelung Nr. 100 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an den Elektroantrieb [2015/505]“
- Sicherheit von Wasserstoff
„Regelung Nr. 134 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) — Einheitliche Bestimmungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeugbauteilen hinsichtlich der sicherheitsrelevanten Eigenschaften von mit Wasserstoff und Brennstoffzellen betriebenen Fahrzeugen (HFCV) [2019/795]“

Die Einzelgenehmigung von Kraftfahrzeugen kommt z. B. für bestehende Kraftfahrzeuge in Frage, die umgebaut oder verändert werden. Vor Erteilung der Betriebserlaubnis werden im Allgemeinen Sachverständige mit der Begutachtung beauftragt. Dazu werden im Allgemeinen folgende technische Spezifikationen herangezogen:

- Elektroantrieb
VdTÜV-Merkblatt MB FZMO 764 - Elektrofahrzeuge im Einzelgenehmigungsverfahren (Ausgabe: 2021-08-18)
- Wasserstoffantrieb
VdTÜV-Merkblatt MB FZMO 766 - Fahrzeuge mit Wasserstoffsystemen im Einzelgenehmigungsverfahren (Ausgabe: 2021-08-11)

(*Fahrzeuge mit Wasserstoffsystemen im Einzelgenehmigungsverfahren, 2021; Elektrofahrzeuge im Einzelgenehmigungsverfahren, 2021*). Dieses Merkblatt enthält unter anderem Angaben zum Personenschutz, zu den Anforderungen an Wasserstoff- und Hochvoltsysteme, zu der funktionalen und elektrischen Sicherheit und Anforderungen an Bauteile und Behälter von Wasserstoffsystemen und deren Einbau sowie weitere übergeordnete Vorgaben. Es gilt für alle Kraftfahrzeuge der Klassen M und N.

Eine Zusammenfassung der für die Zulassung und den Betrieb von Kühllastkraftwagen und Kühlsystemen zu berücksichtigenden technischen Anforderungen unter Einsatz von Wasserstoff enthält Tabelle 26.

Tabelle 26: Rechtsgrundlagen für die Zulassung und den Betrieb von Kühlkraftwagen und Kühlsysteme

		Rechtsgrundlage
Zulassung	Neufahrzeuge	§ 3 FZV i. V. m. §§ 19 bis 21 der StVZO
	Umbauten	§ 3 der FZV i. V. m. § 19 Abs. 3 und § 21 der StVZO
Genehmigung	EU-Typgenehmigung z. B. für Serienfahrzeuge	VERORDNUNG (EU) 2018/858, Anhang II
		VERORDNUNG (EU) 2019/2144
		UNECE-Regelung 100 UNECE-Regelung 134
	Einzelgenehmigung z. B. bei Umbauten	VdTÜV Merkblatt Nr. 764 VdTÜV Merkblatt Nr. 766

3.2 Gefahrgutrechtliche Bestimmungen

Die Beförderung von Wasserstoff, Lithium-Batterien oder Brennstoffzellen ist mit Risiken für Mensch und Umwelt verbunden. Daher unterliegen dieser Güter dem Gefahrgutrecht. Für den Verkehrsträger Straße sind folgende Rechtsgrundlagen zu berücksichtigen:

- Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter (Gefahrgutbeförderungsgesetz – GGBefG)
Das GGBefG definiert u. a. gefährliche Güter und bestimmt die Verantwortlichkeit für die Beförderung. Überdies ist es die Grundlage für konkretisierende Verordnungen.
- Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, mit Eisenbahnen und auf Binnengewässern (Gefahrgutverordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, mit Eisenbahnen und auf Binnengewässern - GGVSEB)
Die GGVSEB präzisiert die Verantwortlichkeiten, indem den Transportbeteiligten spezifische Pflichten zugewiesen werden. Gleichzeitig verweist die GGVSEB im Hinblick auf innerstaatliche und innereuropäische Beförderungen auf die Einhaltung des „Übereinkommen vom 30. September 1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR)“.

Das ADR enthält umfangreiche Bestimmungen zur sicheren Beförderung gefährlicher Güter. Dazu gehören u. a. die Einteilung der Güter zu spezifischen Gefahrklassen, Kennzeichnungs- und Bezeichnungsvorschriften sowie Vorschriften für Bau und Zulassung von Fahrzeugen für die Gefahrgutbeförderung. Zentraler Bestandteil des ADR-Regelwerks ist die Gefahrgutliste. Sie liefert eine Zusammenstellung der zu berücksichtigenden Anforderungen für jedes Gefahrgut. Als Ordnungsprinzip gilt die UN-Nummer, die aus einer vierstelligen Zahl und dem vorangehenden Buchstabenkürzel UN besteht und das jeweilige Gut weltweit einheitlich spezifiziert.

Im Zusammenhang mit der Wasserstofftechnologie kommen mit Bezug auf das ADR-Regelwerk mehrere Gefahrgüter in Frage. Eine Auflistung der zugehörigen UN-Nummern enthält Tabelle 27.

Tabelle 27: Einzel- und Sammeleintragungen ausgewählter Gefahrgüter mit Bezug zur Wasserstofftechnologie

UN-Nummer	Benennung und Beschreibung
UN 1049	WASSERSTOFF, VERDICHTET
UN 1966	WASSERSTOFF, TIEFGEKÜHLT, FLÜSSIG
UN 3090	LITHIUM-METALL- BATTERIEN
UN 3091	LITHIUM-METALL- BATTERIEN IN AUSTRÜSTUNGEN oder LITHIUM-METALL- BATTERIEN, MIT AUSTRÜSTUNGEN VERPACKT
UN 3166	FAHRZEUG MIT ANTRIEB DURCH ENTZÜNDBARES GAS oder FAHRZEUG MIT ANTRIEB DURCH ENTZÜNDBARE FLÜSSIGKEIT oder BRENNSTOFFZELLEN- FAHRZEUG MIT ANTRIEB DURCH ENTZÜNDBARES GAS oder BRENNSTOFFZELLEN- FAHRZEUG MIT ANTRIEB DURCH ENTZÜNDBARE FLÜSSIGKEIT
UN 3171	LITHIUM-METALL- BATTERIEN IN AUSTRÜSTUNGEN oder LITHIUM-METALL- BATTERIEN, MIT AUSTRÜSTUNGEN VERPACKT
UN 3468	WASSERSTOFF IN EINEM METALLHYDRID-SPEICHERSYSTEM oder WASSERSTOFF IN EINEM METALLHYDRID-SPEICHERSYSTEM IN AUSTRÜSTUNGEN oder WASSERSTOFF IN EINEM METALLHYDRID_ SPEICHERSYSTEM, MIT AUSTRÜSTUNGEN VERPACKT
UN 3480	LITHIUM-IONEN-BATTERIEN
UN 3481	LITHIUM-IONEN-BATTERIEN IN AUSTRÜSTUNGEN oder LITHIUMIONEN-BATTERIEN, MIT AUSTRÜSTUNGEN VERPACKT
UN 3528	VERBRENNUNGSMOTOR MIT ANTRIEB DURCH ENTZÜNDBARE FLÜSSIGKEIT oder BRENNSTOFFZELLEN- MOTOR MIT ANTRIEB DURCH ENTZÜNDBARE FLÜSSIGKEIT oder VERBRENNUNGSMASCHINE MIT ANTRIEB DURCH ENTZÜNDBARE FLÜSSIGKEIT oder MASCHINE MIT BRENNSTOFFZELLENMOTOR MIT ANTRIEB DURCH ENTZÜNDBARE FLÜSSIGKEIT
UN 3529	VERBRENNUNGSMOTOR MIT ANTRIEB DURCH ENTZÜNDBARES GAS oder BRENNSTOFFZELLENMOTOR MIT ANTRIEB DURCH ENTZÜNDBARES GAS oder VERBRENNUNGSMASCHINE MIT ANTRIEB DURCH ENTZÜNDBARES GAS oder MASCHINE MIT BRENNSTOFFZELLENMOTOR MIT ANTRIEB DURCH ENTZÜNDBARES GAS
UN 3536	LITHIUMBATTERIEN, IN GÜTERBEFORDERUNGSEINHEITEN EINGEBAUT,

Nicht alle der in Tabelle 27 aufgeführten Gefahrgüter sind bei der Umrüstung auf Wasserstofftechnologie zu berücksichtigen. Vielmehr sieht das ADR-Regelwerk Ausnahmen von der Anwendung unter folgenden Bedingungen vor:

- Freistellungen in Zusammenhang mit der Beförderung von Gasen (ADR 1.1.3.2)
Gase in Brennstoffbehältern zur Nutzung für den Antrieb oder zum Betrieb einer ihrer Einrichtungen (z. B. Kühlanlage) sind vollständig von den Bestimmungen des ADR befreit. Voraussetzung ist eine Volumenbeschränkung der Brennstoffbehälter auf eine Energiemenge mit einem Energieäquivalent von 54 000 MJ. Für Wasserstoff wird ein Energiegehalt von 11 MJ/Nm³ zugrunde gelegt (ADR 1.1.3.2 Nr. a).

Eine weitere Ausnahme gibt es für Gase, die für den Betrieb notwendiger Einrichtungen mitgeführt werden. Kühlapparate werden als Beispiel explizit genannt.

- Freistellungen im Zusammenhang mit der Beförderung flüssiger Brennstoffe (ADR 1.1.3.3)
Flüssige Brennstoffe in Behältern zur Nutzung für den Fahrtrieb und für erforderliche Einrichtungen sind vom ADR-Regelwerk vollständig befreit, sofern folgende Voraussetzungen gegeben sind (ADR 1.1.3.3 Nr. a):
 - Der Brennstoff wird aus dem Behälter direkt dem Fahrzeugmotor oder der Einrichtung zugeführt und
 - der Behälter entspricht den gesetzlichen Vorschriften und
 - das Behältervolumen ist nicht größer als 1500 Liter je Beförderungseinheit. Dazu zählen das Fahrzeug und Anhänger.
- Freistellungen im Zusammenhang mit der Beförderung von Einrichtungen zur Speicherung und Erzeugung elektrischer Energie (ADR Nr. 1.1.3.7)
Energiespeichersysteme im Fahrzeug für den Fahrtrieb oder den Antrieb einer Einrichtung sind vom ADR-Regelwerk vollständig ausgenommen. Hierzu zählen z. B. Lithiumbatterien, Metallhydrid-Speichersysteme und Brennstoffzellen. Das bedeutet, dass alle technischen Einrichtungen zur Erzeugung elektrischer Energie, die zum Antrieb der Fahrzeuge erforderlich sind, nicht von den gefahrgutrechtlichen Regelungen betroffen sind.

Unter Berücksichtigung der aufgeführten Freistellungsmöglichkeiten ist zusammenfassend festzustellen, dass bei einer Umrüstung der Kühllastkraftwagen und der Kühlsysteme auf Elektroantrieb oder Wasserstofftechnologien grundsätzlich keine gefahrgutrechtlichen Restriktionen bestehen. Anders verhält es sich jedoch, wenn Kühllastkraftwagen oder Kühlsysteme selbst Gegenstand einer Beförderung werden.

3.3 Europäische Abgas- und CO₂-Gesetzgebung

Die Europäische Union legt die Anforderungen für die Emission von Luftschadstoffen und klimaschädlichem Kohlendioxid (CO₂) für den Straßenverkehr fest. Grundsätzlich wird zwischen folgenden Regelungsmechanismen unterschieden:

- Luftschadstoffemissionen

Für die Straßenfahrzeuge mit Verbrennungsmotoren gelten bereits seit dem Jahr 1970 einheitliche Regelungen zur Begrenzung der Luftschadstoffe im Abgas. Ziel dieser Regelungen ist es, Gesundheitsbelastungen durch Abgasemissionen zu vermeiden. Dazu werden fahrzeugspezifische Höchstwerte für den Schadstoffausstoß von Diesel- und Ottomotoren festgelegt und geeignete Prüfmethoden bestimmt. Durch fortlaufende Anpassung der Regelungen wurden die Emissionswerte für Personenkraftwagen (PKW) sowie leichte und schwere Nutzfahrzeuge in den vergangenen Jahren kontinuierlich abgesenkt. Abbildung 30 zeigt die Entwicklung der Schadstoffemissionsnormen seit 1990 am Beispiel der Lastkraftwagen und Busse.

Abgasgrenzwerte für LKW und Busse (Fahrzeuge ab 2.610 kg; Grenzwerte für die Typ- und Serienprüfungen)

	vor EURO I	EURO I	EURO I		EURO II	EURO III	EURO IV	EURO V	EEV	EURO VI	EURO III	EURO IV	EURO V	EEV	EURO VI	EURO VI
Richtlinie/Verordnung	88/77 EWG	91/542/ EWG	91/542/ EWG		91/542/ EWG	99/96/EG Stufe A	99/96/EG Stufe B1	99/96/EG Stufe B2	99/96/EG Stufe C	EG 582/2011, Anhang XV Diesel-Fzg.	99/96/EG Stufe A	99/96/EG Stufe B1	99/96/EG Stufe B2	99/96/EG Stufe C	EG 582/2011, Anhang XV Diesel-Fzg.	EG 582/2011, Anhang XV Otto-Fzg.
Typprüfung	–	ab 01.07.1992	–	neue Fzg.-Typen	ab 01.10.1995	ab 01.10.2000	ab 01.10.2005	ab 01.10.2008	–	ab 31.12.2012	ab 01.10.2000	ab 01.10.2005	ab 01.10.2008	–	ab 31.12.2012	ab 31.12.2012
Serienprüfung	ab 01.10.1990	–	ab 01.10.1993	alle Fzg.	ab 01.10.1996	ab 01.10.2001	ab 01.10.2006	ab 01.10.2009	ab 01.07.2000	ab 31.12.2013	ab 01.10.2001	ab 01.10.2006	ab 01.10.2009	ab 01.07.2000	ab 31.12.2013	ab 31.12.2013
in g/kWh																
	Grenzwerte für den 13-Stufen-Test				Grenzwerte für die ESC- und die ELR-Prüfung				WHSC	Grenzwerte für die ETC-Prüfung				WHTC		
CO	11,2	4,5	4,9		4	2,1	1,5	1,5	1,5	1,5	5,45	4	4	3	4	4
HC	2,4	1,1	1,23		1,1	0,66	0,46	0,46	0,25	–	0,78	0,55	0,55	0,4	–	–
THC	–	–	–		–	–	–	–	–	0,13	–	–	–	–	–	–
NO_x	14,4	8	9		7	5	3,5	2	2	0,4 ^{a)}	5	3,5	2	2	0,46 ^{a)}	0,46 ^{a)}
CH₄	–	–	–		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,5
NMHC	–	–	–		–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,16
NH₃ (in ppm)	–	–	–		–	–	–	–	–	10	–	–	–	–	10	10
Methan	–	–	–		–	–	–	–	–	–	1,6	1,1	1,1	0,65	–	–
Partikelmasse^{b)}	–	0,36*	0,4*		0,15	0,10; 0,13 ^{d)}	0,02	0,02	0,02	0,01	0,16; 0,21 ^{e)}	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01
Partikelzahl^{f)} (in Anzahl/kWh)	–	–	–		–	–	–	–	–	8,0 x 10 ¹¹	–	–	–	–	6,0 x 10 ¹¹	^{g)}
Rauchtrübung	–	–	–		–	0,8	0,5	0,5	0,15	–	–	–	–	–	–	–

Ab EURO II Grenzwert für alle Fzg. = Grenzwert für neue Fahrzeugtypen
 Messungen für EURO I und II erfolgen im 13-Stufen-Test.
 Messungen für EURO III bis VI erfolgen im ESC- und ELR-Verfahren bzw. ETC-Test.
 *Auf den Grenzwert für die Partikelemission wird bei Motoren mit einer Leistung von höchstens 85 kW ein Koeffizient von 1,7 angewandt.
 a) Der Wert des zulässigen NO_x-Anteils am NO_x-Grenzwert kann zu einem späteren Zeitpunkt festgelegt werden.
 b) Gilt nur für Fahrzeuge mit Erdgasmotoren
 c) Gilt bei der ETC-Prüfung nicht für mit Gas betriebene Motoren in den Stufen A, B1 und B2
 d) Für Motoren mit einem Hubraum von unter 0,75 dm³ je Zylinder und einer Nennleistungsdrehzahl von über 3000 U/min
 e) Bis zum 31.12.2012 wird eine Messprozedur für die Partikelzahlmessung für Otto- und Diesel-Lkw (Euro VI, WHSC- und WHTC-Zyklen) festgelegt.
 f) Vor dem 31. Dezember 2012 wird ein Grenzwert für die Partikelzahl eingeführt.
 EEV: Enhanced Environmentally Friendly Vehicle
 ESC: European Stationary Cycle
 ELR: European Load Response Test
 ETC: European Transient Cycle
 WHSC: World Harmonized Stationary Cycle
 WHTC: World Harmonized Transient Cycle
 Quelle: Umweltbundesamt, www.umweltbundesamt.de/verkehr/index.htm

Abbildung 30: Abgasgrenzwerte für LKW und Busse seit 1990 (Umweltbundesamt, no date)

- Ausstoß klimaschädlicher Gase

Mit der Begrenzung der CO₂-Emissionen durch Fahrzeuge wird das Ziel verfolgt, den Ausstoß klimaschädlicher Gase zu reduzieren. Im Unterschied zur Abgasgesetzgebung werden dazu keine fahrzeugspezifischen Festlegungen getroffen, sondern es werden Zielwerte, für die von einem Hersteller in einem Jahr neu zugelassenen Fahrzeuge definiert. Bei Nichteinhaltung drohen dem Hersteller Strafzahlungen. Auf der anderen Seite sehen die Regelungen Anreize für die Zulassung emissionsarmer oder -freier Fahrzeuge vor. Für Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge gilt dieses Instrument bereits seit 2015, für schwere Nutzfahrzeuge dagegen erst seit 2019.

Da diese Studie auf die klimaschädlichen Gase ausgerichtet ist, wird nachfolgend konkreter auf die jeweiligen Regelungen eingegangen.

Verordnung (EU) 2019/631

Mit der im April 2019 verabschiedeten EU-Verordnung (EU) 2019/631 erfolgt innerhalb Europas die Regulierung der CO₂-Emissionen für PKW und leichte Nutzfahrzeuge. Die seit dem 1. Januar 2020 geltende Regelung hat die Vorgängerregelung für Pkw, (Verordnung (EU) 443/2009) und für leichte Nutzfahrzeuge (Verordnung (EU) 510/2011) abgelöst.

Gegenwärtig gelten folgende CO₂-Flottengrenzwerte für PKW und leichte Nutzfahrzeuge:

- PKW

Die Flottengrenzwerte haben für einen festgelegten Zeitraum Gültigkeit. Gleichzeitig werden die Messverfahren definiert, die zur Bestimmung herangezogen werden. Es gelten folgende Obergrenzen für die Flotte:

- Von 2020 - 2024: 95 g CO₂ / km für die Gesamtflotte
- Von 2025 – 2029: Minderung von 15 % gegenüber 2021
- ab 2030: Minderung von 37,5 % gegenüber 2021

- Leichte Nutzfahrzeuge
 - Von 2020 - 2024: 147 g CO₂ / km
 - Von 2025 – 2029: Minderung von 15 % gegenüber 2021
 - ab 2030: Minderung von 31 % gegenüber 2021

Die Flottengrenzwerte bezieht sich auf den Durchschnitt aller in der Europäischen Union in einem Jahr zugelassenen Fahrzeuge. Jedem Fahrzeughersteller wird auf Basis des jeweiligen durchschnittlichen Fahrzeuggewichts ein eigener Flottengrenzwert zugeteilt.

Neben den Flottengrenzwerten enthält die EU-Verordnung (EU) 2019/631 weitere Elemente. Dazu gehören u. a. Anreize für Null- und Niedrigemissionsfahrzeugen, die Verteilung der Flottengrenzwerte auf die Hersteller, Strafen für Überschreitungen der Flottengrenzwerte sowie Festlegungen zu CO₂-Emissionen im Realbetrieb und weitere Öko-Innovationen.

Verordnung (EU) 2019/1242

Flottenzielwerte für schwere Nutzfahrzeuge gibt es seit 2019. Die Hersteller sind verpflichtet, die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2025 auf mindestens 15 % unterhalb der Werte einer Vergleichsflotte abzusenken, die auf den Werten der Jahre 2019/2020 beruht. Mit Beginn des Jahres 2030 reduziert sich der Grenzwert ein weiteres Mal. Der CO₂-Flottenzielwert ist dann mindestens 30 % geringer als der entsprechende Wert der Vergleichsflotte. Aktuell ist von einer deutlichen Absenkung der CO₂-Emissionen für schwere Nutzfahrzeuge auszugehen (European Commission, 2023). Der Vorschlag der Kommission sieht folgende Veränderungen vor:

- Bis 2030: Absenkung auf 45 %
- Bis 2035: Absenkung auf 65%
- Bis 2040: Absenkung auf 90 %

Zum Geltungsbereich gehören neue schwere Nutzfahrzeuge der Klassen N2 und N3 mit den folgenden Merkmalen:

- a. Lastkraftwagen mit einer Achskonfiguration von 4x2 und einer technisch zulässigen Gesamtmasse in beladenem Zustand von mehr als 16 t;
- b. Lastkraftwagen mit einer Achskonfiguration von 6x2;
- c. Sattelzugmaschinen mit einer Achskonfiguration von 4x2 und einer technisch zulässigen Gesamtmasse in beladenem Zustand von mehr als 16 t; und
- d. Sattelzugmaschinen mit einer Achskonfiguration von 6x2

Die genannten Fahrzeugklassen entsprechen den Fahrzeugklassen aus Anhang II der Richtlinie 2007/46/EG. In den dort aufgeführten Begriffsbestimmungen für Fahrzeugklassen und Fahrzeugtypen werden LKW mit Kühlaufbauten oder Kühlanhängern nicht explizit benannt (*Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge (Rahmenrichtlinie) (Text von Bedeutung für den EWR)*, 2007).

Die Verordnung enthält Anreize für emissionsfreie und -arme Nutzfahrzeuge (Artikel 5).

Es ist eine Ausweitung des Geltungsbereichs auf weitere schwere Nutzfahrzeuge sowie Busse und Anhänger / Auflieger geplant. Mit dem Jahr 2025 wird es für Hersteller eine Berichtspflicht über die Einhaltung der ihnen auferlegten spezifischen Flottenzielwerte geben. Zudem müssen die Fahrzeughersteller bei Nichteinhaltung der Zielwerte Geldstrafen zahlen (Lewicki, 2021).

Die Bestimmung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs schwerer Nutzfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 3500 kg erfolgt durch ein spezifisches Verfahren, das unter der Bezeichnung "Vehicle Energy Consumption Calculation Tool" (VECTO) bekannt und in der EU-Verordnung (EU) 2017/2400 beschrieben ist. VECTO ist seit dem 1. Januar 2019 für neue LKW bestimmter Fahrzeugklassen verpflichtend.

Fahrzeughersteller müssen bei der Genehmigungsbehörde einen Antrag auf Erteilung einer Lizenz zum Betrieb des Simulationsinstrumentes stellen und diesem u. a. eine Beschreibung der Verfahren zur Bestimmung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs beilegen (EU-Verordnung 2017/2400/EU, 2017). Die LKW-Hersteller führen die Prüfungs- und Zertifizierungsprozesse für jeden produzierten LKW nach geregelten Vorgaben und unter Begleitung externer Prüforganisationen selbstständig durch und geben die erfassten Daten in das Simulationstool ein, so dass für jeden hergestellten LKW ein eigener VECTO-Wert und ein eigenes Zertifikat ermittelt wird.

Die Eingabedaten umfassen standardisierte Parameter, wie verschiedene Verwendungsprofile (Langstrecke, regionale Verwendung, Stadtverkehr und Baugewerbe), Fahrverhalten, Nutzlasten und Fahrzeugauslegung sowie Fahrzeugparameter, wie Fahrzeugtyp, Achskonfiguration, Fahrzeuggewicht, Motorkenndaten, Aerodynamik (Luftwiderstand), Rollwiderstand der Reifen und Getriebewirkungsgrad (Continental, no date). So müssen beispielsweise die Luftwiderstände verschiedener Kabinenvarianten eines LKW-Modells oder die unterschiedlichen Kraftstoffverbräuche und damit CO₂-Ausstöße je nach Motor-, Getriebe- oder Achs-Varianten erfasst werden.

Bei den betroffenen Fahrzeugen handelt es sich u. a. um:

- LKW mit einer 4x2 und 6x2-Achskonfiguration und einem zulässigen Gesamtgewicht von > 16 t (Januar 2019),
- LKW mit einem zulässigen Gesamtgewicht > 7,5 t (Januar 2020)
- Fahrzeuge (starr und Zugmaschine) mit einer 6x4- und 8x4-Achsenkonfiguration für alle Gewichte (Juli 2020)(Continental, no date)

VECTO weist folgende Schwächen auf:

- VECTO arbeitet teilweise mit standardisierten Werten (z. B. Standard-Transportauftrag, Standard-Streckenprofil, Standard-Aufbau). Damit können individuelle Fahr-, Beladungs- und Einsatzsituationen, die je nach Einsatzart, Fahrzeugmasse, Auslastung und Streckenprofil zu unterschiedlichen Kraftstoffverbräuchen führen, nicht abgebildet werden.
- Technische Systeme, die den Kraftstoffverbrauch und somit den CO₂-Ausstoß vermindern (z. B. Tempomaten, Optimierungen an Trailer und Aufbauten, Start-Stopp-Funktionen, Routenplanung) bleiben unberücksichtigt.

Seit dem 01. August 2022 gilt zudem die Durchführungsverordnung (EU) 2022/1362 der Kommission vom 1. August 2022 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf die Leistung von schweren Anhängern im Hinblick auf deren Einfluss auf die CO₂-Emissionen, den Kraftstoff- und Energieverbrauch und die emissionsfreie Reichweite von Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Durchführungsverordnung (EU) 2020/683 (Durchführungsverordnung (EU) 2022/1362, 2022).

In dieser Verordnung sind die Prinzipien und Verfahrensweisen für die zukünftigen Anforderungen an die CO₂-Zertifizierung von Anhängern beschrieben. Festgelegt werden u. a. der Zertifizierungs- und der Datenbereitstellungsprozess. Die CO₂-Zertifizierung ist mit Wirkung zum 01. Januar 2024 und einer sechsmonatigen Übergangsfrist für alle neu zugelassenen Anhänger nachzuweisen. Folgende Fahrzeuge sind betroffen (*ZKF-Workshop zur kommenden CO₂-Zertifizierung von Anhängern, 2022*):

- Klassen O3 und O4,
- Anhänger mit einer technisch zulässigen Gesamtmasse größer oder gleich 8.000 kg,
- Anhänger mit einem geschlossenen Aufbau (Curtain-Sider, Kofferaufbau, Kühllaufbau mit/ohne Kühlaggregat, offener Kasten mit Plane),
- ein-, zwei- oder dreiachsige Fahrzeuge
- in der Bauform Sattelanhänger (Code DA), Zentralachsanhänger (Code DC) oder Deichselanhänger (Code DC).

Bei einer Nichteinhaltung der Anforderungen zur CO₂-Zertifizierung können die Genehmigungsbehörden die Zulassung des Anhängers verweigern.

Bisher gibt es nur wenige Erkenntnisse zu den CO₂-Emissionen und anderen Emissionen von konventionell betriebenen Kühlaggregaten. Daher werden Erfahrungen einzelner Unternehmen und Verbände zitiert:

- Das portugiesische Unternehmen AddVolt bietet Umrüstungen von dieselbetriebenen Kühlaggregaten für Nutzfahrzeuge auf einen Elektroantrieb an. In einem Langzeittest hat das Unternehmen den Energieverbrauch sowie die CO₂-Emissionen von Kühlmaschinen ermittelt, wofür in mehreren Fahrzeugen separate Tanks für Motor und Kühleinheit verbaut wurden. Laut Aussage von AddVolt verbrauchen Diesel-Kühlaggregate zwischen drei und fünf Litern Treibstoff pro Betriebsstunde, was je nach Fahrzeug und Auslastung einem zusätzlichen Verbrauch von etwa 500 Litern im Monat entspricht und einem jährlichen CO₂-Ausstoß von rund 13 t. Transportkältemaschinen, die über separate Dieselaggregate betrieben werden, erfüllen gemäß AddVolt maximal die Abgasnorm EURO 2 (Addvolt, 2018). Die Herstellung des elektrifizierten Antriebs des Unternehmens wurde vom TÜV Rheinland gemäß ISO 9001:2015 zertifiziert. In Deutschland arbeitet AddVolt bei der Umrüstung von Fahrzeugen und Trailern mit dem Unternehmen Kiesling zusammen.
- In der Online-Ausgabe der Zeitschrift „Transport“ wies der Vorsitzende des Industriebeirates (Andreas Schmid, FRIGOBLOCK GmbH) des Verbands für temperaturgeführte Transportlogistik und die Kühlfahrzeugindustrie TRANFRIGORROUTE darauf hin, dass Motoren, die gemäß NRMM (Non Road Mobile Machinery) zertifiziert sind, nicht mehr den heutigen Emissionsstandards entsprechen und weit hinter den Grenzwerten von Euro 6 liegen (*Strom wäre eine Lösung - Kühlaggregate, 2018*).
- Das Unternehmen BPW (Bergische Achsen Kommanditgesellschaft) gibt in dem gleichen Artikel der Zeitschrift „Transport“ an, dass für den Einsatzbereich der City-Logistik ein dieselgetriebenes Kühlaggregat das 4,5-fache an Feinstaub und NO_x ausstoße als ein Sattelzug. BPW hat ein neues Generator-Achsmodul für Trailer (ePower) entwickelt, das über die Energierückgewinnung Kühlaggregate mit Strom versorgt. Hierbei arbeitet BPW mit Thermo King zusammen (bpw.de, no date).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit der Einrichtung von CO₂-Flottenzielwerten durch die jeweiligen Verordnungen der Europäischen Union wirksame Instrumente zur kontinuierlichen Reduktion klimaschädlicher Gase zur Verfügung stehen. Durch die Ausweitung auf andere Fahrzeugklassen und die verpflichtende Einführung eines Simulationswerkzeugs sind weitere Verbesserungen zu erwarten. Der bestehende Rechtsrahmen bietet den Herstellern Anreize für die Herstellung emissionsfreier bzw. -armer Fahrzeuge. Diese können genutzt werden, um die Potentiale in der Kühllogistik zu nutzen.

Neben der Betrachtung der Emissionen von Nutzfahrzeugen ist es wichtig, die Emissionen derjenigen Systeme zu betrachten, die mit den Nutzfahrzeugen verbunden sind. Dazu zählen die Kühlaggregate.

Innerhalb der EU-Verordnung 2016/1628 wird die Abgasgesetzgebung für mobile Maschinen und Geräte geregelt. Genauer ist es eine Verordnung über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte. Die Verordnung 2016/1628 ist seit dem 01. Januar 2017 gültig und ersetzt die bis dahin gültige Richtlinie 97/68/EG. Gegenüber der 97/68/EG muss die 2016/1628 nicht in nationales Recht umgesetzt werden (Emissionsgesetzgebung für Mobile Maschinen: EU Stufe V – Fact Sheet, 2017). In der EU-Regulierung werden diese Maschinen mit „Non-Road Mobile Machinery“ benannt und im Sprachgebrauch mit NRMM abgekürzt.

Die Emissionsregulierung mobiler Maschinen und Geräte erfolgte gegenüber Straßenfahrzeugen deutlich später, obwohl diese eine weitere nicht unerhebliche Quelle motorischer Emissionen darstellen.

Die Verordnung enthält Angaben zu den Motorkategorien, Emissionsgrenzwerten für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel, Einführungszeitpunkten, Anforderungen an die Haltbarkeit sowie zu verwaltungsmäßigen und technischen Anforderungen, die sich u. a. auf die Marktüberwachung und die EU-Typgenehmigung von mobilen Maschinen der Abgasstufe V beziehen (EU-Verordnung 2016/1628/EU, 2016; *Maschinen und Geräte*, 2019).

Mit dem Ausdruck „nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte“ werden laut EU-Verordnung folgende Zwecke verfolgt: „Mobile Maschinen, transportable Ausrüstungen oder Fahrzeuge mit oder ohne Aufbau oder Räder, die nicht zur Beförderung von Personen oder Gütern auf der Straße bestimmt sind; hierzu gehören auch Maschinen und Geräte, die auf dem Fahrgestell von Fahrzeugen angebaut sind, die für die Beförderung von Personen oder Gütern auf der Straße bestimmt sind.“

Einige der in Artikel 4 der Verordnung definierten Motorenklassen sind nachfolgend zusammengefasst:

- NRE: Motoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte;
- NRG: Motoren mit einer Bezugsleistung über 560 kW, die ausschließlich zum Einsatz in Generatorsätzen bestimmt sind;
- NRSh: Handgehaltene Fremdzündungsmotoren mit einer Bezugsleistung kleiner 19 kW;
- NRS: Fremdzündungsmotoren mit einer Bezugsleistung kleiner 56 kW, ohne NRSh Motoren;
- IWP/IWA: Motoren die ausschließlich in Binnenschiffen zum Antrieb (IWP) oder als Hilfsaggregat (IWA) eingesetzt werden;
- RLL/RLR: Motoren, die ausschließlich in Lokomotiven (RLL) oder Triebwagen (RLR) für den Antrieb eingesetzt werden;
- SMB: Fremdzündungsmotoren, die ausschließlich zum Einsatz in Motorschlitten bestimmt sind.

Die Verordnung EU 2016/1628 enthält keine direkten Angaben zu Motoren, die für Kühlfahrzeuge oder Kühlaggregate zum Einsatz kommen. Bei der Verortung der Kühlaggregate an den LKW und Auflieger/Aufbauten wird zumeist zwischen der Stirnwand- bzw. Frontmontage, der Überdachmontage und der Unterflurmontage unterschieden. Bei der Unterflurmontage wird das Kühlaggregat häufig direkt mit Chassis bzw. Fahrgestell des Fahrzeugs bzw. des Aufliegers oder Anhängers verbunden, so dass diese Aggregate laut Definition des Ausdrucks „nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte“ innerhalb der EU-Verordnung (EU) 2016/1628 mitberücksichtigt werden. Die an der Stirnwand und Überdach montierten Kühlaggregaten sind direkt mit dem Auflieger bzw. den Aufbauten verbunden, die wiederum eine Verbindung zu dem Fahrgestell haben, so dass auch hier von einer Gültigkeit der Verordnung ausgegangen werden kann. Die Einordnung dieser Aggregate fällt in die Motorenklasse NRE, die nachfolgend gemäß EU-Verordnung genau definiert wird:

Motorenklasse NRE:

„a) Motoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, die dazu bestimmt und dafür geeignet sind, sich — auf der Straße oder auf andere Weise — zu bewegen oder bewegt zu werden, sofern sie nicht gemäß Artikel 2 Absatz 2 ausgeschlossen und nicht in einer der anderen unter den Nummern 2 bis 10 dieses Absatzes aufgeführten Klassen inbegriffen sind,

b) Motoren, die eine Bezugsleistung von weniger als 560 kW haben und die anstelle von Stufe-V-Motoren der Klassen IWP, IWA, RLL oder RLR eingesetzt werden.“ (EU-Verordnung 2016/1628/EU, 2016)

Die Motoren der Klasse NRE werden in die folgenden Unterklassen eingeteilt.

Tabelle 28: Unterklassen der Motorenklasse NRE laut Definition in Artikel 4 Absatz 1 Nummer 1 (EU-Verordnung 2016/1628/EU, 2016)

Klasse	Art der Zündung	Drehzahl	Leistungsbereich (kW)	Unterklasse	Bezugsleistung
NRE	CI	variabel	$0 < P < 8$	NRE-v-1	Höchste Nutzleistung
			$0 \leq P < 19$	NRE-v-2	
			$19 \leq P < 37$	NRE-v-3	
			$37 \leq P < 56$	NRE-v-4	
			$56 \leq P < 130$	NRE-v-5	
			$130 \leq P \leq 560$	NRE-v-6	
			$P > 560$	NRE-v-7	
	alle	konstant	$0 < P < 8$	NRE-c-1	Nennwert der Nutzleistung
			$0 \leq P < 19$	NRE-c-2	
			$19 \leq P < 37$	NRE-c-3	
			$37 \leq P < 56$	NRE-c-4	
			$56 \leq P < 130$	NRE-c-5	
			$130 \leq P \leq 560$	NRE-c-6	
			$P > 560$	NRE-c-7	

Für die Emissionsstufe V und die in Tabelle 28 dargestellten Unterklassen gelten die nachfolgenden Emissionsgrenzwerte

Tabelle 29: Emissionsgrenzwerte der Stufe V für die Motorenklasse NRE laut Definition in Artikel 4 Absatz 1 Nummer 1 (EU-Verordnung 2016/1628/EU, 2016)

Emmissionsstufe	Motorenunterklasse	Leistungsbereich kW	Art der Zündung	CO	HC	NO ₂	PM Klasse	PN	A
				g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	#/kWh	
Stufe V	NRE-v-1 / NRE-c-1	0 < P < 8	CI	8,00	(HC + NO _x ≤ 7,50)		0,40	-	1,10
Stufe V	NRE-v-2 / NRE-c-2	0 ≤ P < 19		6,60	(HC + NO _x ≤ 7,50)		0,40	-	1,10
Stufe V	NRE-v-3 / NRE-c-3	19 ≤ P < 37		5,00	(HC + NO _x ≤ 4,70)		0,015		1,10
Stufe V	NRE-v-4 / NRE-c-4	37 ≤ P < 56		5,00	(HC + NO _x ≤ 4,70)		0,015		1,10
Stufe V	NRE-v-5 / NRE-c-5	56 ≤ P < 130	alle	5,00	0,19	0,40	0,015	1 * 10 ¹²	1,10
Stufe V	NRE-v-6 / NRE-c-6	130 ≤ P ≤ 560		3,50	0,19	0,40	0,015		1,10
Stufe V	NRE-v-7 / NRE-c-7	P > 560		3,50	0,19	3,50	0,045		-

Eine weitere Einteilung der NRE-Motorenklasse sieht die Emissionsgrenzwerte für Motoren mit einer besonderen Zweckbestimmung gemäß Artikel 34 Absatz 5 vor, die jedoch keine Motoren zum Einbau in Kühlaggregate einschließt.

3.4 Regularien zu Kältemitteln

Die Wirkung, der Konstruktionsaufwand aber auch der Energieaufwand einer Kälteanlage ist maßgeblich von der Auswahl des Kältemittels abhängig. Das Kältemittel nimmt Wärme bei niedrigem Druck und niedriger Temperatur auf und gibt diese bei höheren Drücken und Temperaturen ab. Während dieses Prozesses kommt es im Allgemeinen zu einer Änderung des Aggregatzustandes (DIN 8960:1998-11, 1998; DIN EN 378-1:2021-06, 2021).

Auf dem Markt ist eine Vielzahl unterschiedlicher Kältemittel erhältlich. Zur Unterscheidung dient eine Nomenklatur, die aus einer Buchstaben-Zahlenkombination besteht, aus der sich die Zusammensetzung ergibt. Ein vorangestelltes „R“ („Refrigerant“) weist auf die Verwendung als Kältemittel hin (DIN 8960:1998-11, 1998).

Jedes Kältemittel verfügt über spezifische Eigenschaften. Die Anforderungen sind dabei sehr hoch. Insbesondere die thermodynamischen Eigenschaften sollen das Kältemittel in die Lage versetzen, bei allen Betriebstemperaturen und bei möglichst geringer Druckabsenkung ausreichend stark zu verdampfen und nicht einzufrieren. Des Weiteren soll die Verdampfungswärme möglichst hoch sein, um mit möglichst kleinem Volumenstrom eine bestimmte Kälteleistung erzielen zu können. Weitere Eigenschaften kommen hinzu. So sollen sie möglichst nicht brennbar oder explosiv sein, keine gesundheitsgefährdenden Eigenschaften besitzen oder ökologisch unbedenklich sein. Da es kaum ein Kältemittel gibt, das alle Eigenschaften gleichermaßen erfüllt, werden die jeweiligen Vor- und Nachteile in der Praxis gegeneinander abgewogen.

Im Rahmen dieser Studie stehen die ökologischen Eigenschaften der Kältemittel im Mittelpunkt der Betrachtung. Kältemittel können sich schädigend auf die Ozonschicht auswirken und das Klima nachhaltig schädigen. Aufgrund dessen wurden in den vergangenen Jahrzehnten auf internationaler und europäischer Ebene Regelungen getroffen, um das Inverkehrbringen und die Verwendung ozonabbauender und klimaschädigender Kältemittel zu begrenzen. Insbesondere folgende Regelungen der Europäischen Union sind in diesem Zusammenhang von Bedeutung:

- Verordnung (EG) 1005/2009

Die Verordnung zielt darauf ab, den Einsatz ozonschädigender Stoffe zu begrenzen. Grundlage für die Bewertung ist das Ozonabbaupotential (ODP für Ozone Depletion Potential). Es ist ein Maß für die Fähigkeit, die Ozonschicht zu schädigen. Je höher der ODP-Wert eines Kältemittels ist, desto stärker ist dessen schädigende Wirkung auf den Abbau der Ozonschicht. Der ODP-Wert ist ein Verhältniswert, der sich aus dem Vergleich mit dem Kältemittel R 11 Fluortrichlormethan ergibt. Im Allgemeinen verfügen chlor- und bromhaltige Kohlenwasserstoffe über ein hohes ODP.

Auf der Grundlage dieser Verordnung gibt es ein Verwendungsverbot für voll- und teilhalogenierte Kältemittel. Ein prominentes Beispiel ist das Kältemittel R 134a Tetrafluorethan.

- Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (F-Gas-Verordnung)

Die F-Gas-Verordnung gilt seit 2015. Sie dient dem Klimaschutz und zielt daher darauf ab, die Emission klimaschädlicher Gase zu verringern. Als Maß wird das Klimaerwärmungspotential (GWP für Global Warming Potential) herangezogen, das sich aus der vergleichenden Betrachtung mit dem Kohlendioxid ergibt (Artikel 2 Nr. (6) Verordnung (EU) Nr. 517/2014).

Das übergeordnete Ziel der F-Gas-Verordnung ist die stetige europaweite Senkung des Treibhauspotenzial von Kältemitteln. Dieses Ziel soll im Wesentlichen durch die folgenden drei Maßnahmen erreicht werden:

- Schrittweise Beschränkung der am Markt verfügbaren Mengen an teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW) bis zum Jahr 2030 ("Phase down"). Durch Festlegung von Quoten kommt es zu einer künstlichen Verknappung, die zu Preisanstiegen führt und die Notwendigkeit zum Umstieg fördert.
- Verwendungs- und Inverkehrbringungsverbote für fluorierte Treibhausgase mit einem GWP von 2500 oder mehr. Zu den Verboten zählen fluorierte Treibhausgase mit einem Treibhausgaspotential (GWP) von 2.500 oder mehr, die zur Wartung oder Instandhaltung von Kälteanlagen mit einer Füllmenge von 40 t CO₂-Äquivalent oder mehr eingesetzt werden. Das Verbot gilt ab dem 01.01.2020. Entsprechende aufgearbeitete oder recycelte Kältemittel dürfen für Wartung und Instandhaltung noch bis Ende 2029 eingesetzt werden und sind ab dem 01. Januar 2030 verboten. Zudem ist das Inverkehrbringen bestimmter Anlagen, die im Anhang III der Verordnung aufgeführt sind, zu unterschiedlichen Gültigkeiten ebenfalls verboten.
- Vermeidung absichtlicher Freisetzungen durch den Anlagenbetreiber. Für Kälteanlagen in Kühlkraftfahrzeugen und -anhängern bedeutet dies u. a. eine zeitnahe Reparatur von Leckagen und Undichtigkeiten.

Die EU-Kommission veröffentlichte am 05. April 2022 einen Entwurf für eine neue F-Gas-Verordnung, die eine weitere Verschärfung bis hin zu einem Ausstieg aus der Verwendung fluorierte Treibhausgase ankündigt (*Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über fluorierte Treibhausgase, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2019/1937 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 517/2014, 2022; EU legislation to control F-gases, no date*).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass insbesondere mit der F-Gas-Verordnung ein geeigneter regulativer Rahmen geschaffen wurde, der zu einer stetigen Reduzierung der CO₂-Emissionen in den europäischen Staaten führt. Es ist daher anzudenken, inwiefern dieser Rahmen argumentativ dazu genutzt werden kann, den Umstieg auf emissionsfreie oder -ärmere Antriebe in der Kühllogistik zu befördern.

4 Darstellung von Optionen für emissionsfreie Kühlsysteme und Bewertung des Technologiereifegrads

Die Logistikbranche ist stark kostengetrieben, wodurch nachhaltige, technologische Lösungen, welche i.d.R. kostspieliger sind, meist eine geringere Kundenakzeptanz haben. Daher ist eine wesentliche Herausforderung, die bereits bestehenden und neu entwickelte Konzepte zur Einsparung von Emissionen weiterzuentwickeln, zu erproben und schließlich auf dem Markt zu etablieren. Eine zunehmende Nutzung dieser Technologien und deren Vorteile bei der Reduktion von THG- und Lärm-Emissionen wird insgesamt und gerade auch im städtischen Bereich zu einer Erhöhung der Akzeptanz und einer Imageverbesserung des Logistiksektors führen.

Aufgabe dieses Kapitels ist es, technologische Optionen für die Reduktion von Emissionen mittels emissionsfreier Kühlsysteme darzustellen, einzuordnen und anhand einer ökonomischen und ökologischen Analyse zu bewerten. Insbesondere geht es um die Bearbeitung folgender Frage- bzw. Aufgabenstellungen:

- Welche emissionsfreien Kühlsysteme sind in der Entwicklung bzw. am Markt bereits verfügbar?
- Wie werden diese Systeme technisch funktional umgesetzt und in die Kühl-Fahrzeuge integriert?
- Welche Erkenntnisse können aus der ökonomischen Analyse konventioneller Kühlsysteme gegenüber emissionsfreien Systemen gewonnen werden?
- Welche ökologischen Einsparungseffekte bei den THG-Emissionen werden durch emissionsfreie Kühlsysteme erreicht.
- Wie gestaltet sich die Betankungs- oder Ladeinfrastruktur?

4.1 Technische Analyse emissionsfreier Kühlsysteme

Auf dem Fahrzeugmarkt, sowohl bei Automobilen als auch bei Nutzfahrzeugen, steigt die Angebotsvielfalt an Fahrzeugen mit emissionsfreien Antriebstechnologien. In der Publikation „Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßengüterverkehr“ der NOW stehen bei den Nutzfahrzeugherstellern klimaneutrale Antriebe auf Basis von Batterie und Brennstoffzelle im Mittelpunkt der Antriebsstrategien. Bis 2030 sollen laut Prognose der Nutzfahrzeughersteller rund drei Viertel der Neuzulassungen im schweren Straßengüterverkehr emissionsfrei sein (NOW GmbH, 2023).

Diese Entwicklung deutet darauf hin, dass auch mit Nutzfahrzeugen verbundene energieintensive Anwendungen, wie bei den Kühl- und Tiefkühl-Transporten, in diesen Prozess mit aufgenommen werden.

4.1.1 Marktrecherche zu Entwicklern/Herstellern und der Funktionsweise von emissionsfreien Kühlaggregaten

Im Rahmen der Entwicklung klimafreundlicher und emissionsfreier Kühl- und Tiefkühl-Transporte haben Nutzfahrzeug- und Kühlaggregat-Hersteller seit 2019/2020 erste Prototypen-Modelle auf den Markt gebracht. Die Strategie hierbei ist das Sammeln von Erfahrungen hinsichtlich der Fertigung und des Betriebs emissionsfreier Kühlsysteme. Um einen möglichst langen autonomen Betrieb und angemessene Reichweiten zu ermöglichen, werden kombinierte Lösungen angestrebt, bei der das Kühlaggregat mit weiteren Komponenten des Sattelzuges oder des Motorwagens zusammenarbeitet. Dies

trifft insbesondere auf das Konzept „Rekuperationsachse + Kühlung“ zur Versorgung eines Kühlaggregates zu. Die Kombination aus Achsgenerator, Hochvoltbatterie und Kühlaggregat ermöglichen dabei den emissionsfreien Betrieb der Kälteanlage. Bei dem Konzept „Wasserstoff-Brennstoffzellen-Kühlsystem“ sind der Wasserstofftank, die Brennstoffzelle und eine kleiner dimensionierte Batterie wichtige Komponenten für einen möglichst unabhängigen und langfristigen Betrieb des Kühl-Systems. Beide Konzepte haben ihre Vor- und Nachteile hinsichtlich Verfügbarkeit, Reichweite, Komponentenvielfalt, Dimensionen und Gewicht. Wichtig ist, dass die Konzepte möglichst unabhängig von dem Antrieb der Zugmaschine bzw. des Motorwagens arbeiten und eine weitgehend autonome und vor allem sichere Energieversorgung für die Kühlung bereitstellen können.

In das Prinzip „emissionsfreies Kühlaggregat“ kann grundsätzlich auch die Kombination aus einem rein elektrischen Kühlaggregat mit einem Elektro-LKW oder einem Hybrid-LKW aufgenommen werden, der das Kühlaggregat mit Energie versorgt. Ein Beispiel hierfür ist das vollelektrische Kühlaggregat FK2 von Frigoblock, das insbesondere für den Nahverkehr entwickelt und kompatibel mit E- und Hybrid-LKW genutzt werden kann (Karkoszka, 2021; Frigoblock, no date). Nachfolgend erfolgt eine Vorstellung der bisher entwickelten Prototypen-Modelle zur (nahezu) autonomen Betriebsweise der Kühlaggregate von Aufliegern, Anhängern oder Kofferaufbauten.

Konzepte mit Rekuperationsachse + Kühlung

Entwicklungen zur Versorgung eines Kühlaggregates über eine Kopplung aus Generator-Achse und Hochvoltbatterien werden derzeit von mehreren Kühlaggregat-Herstellern zumeist zusammen mit den Herstellern von Aufliegern und Anhängern verfolgt.

Das Konzept setzt sich aus einem Energierückgewinnungs- und Speichersystem zusammen, mit dessen Hilfe ein vollelektrisches Kühlaggregat mit Energie versorgt werden kann. Die Energierückgewinnung erfolgt über eine Energieachse, die mit einem Generator verbunden ist und im Betrieb die Bewegungsenergie in einer Hochvoltbatterie speichert. Eine weitere Form der Rekuperation erfolgt durch die bei Bremsvorgängen aufgenommene kinetische Energie. Die Energieachse kann dabei die Auflieger- bzw. Anhängerachse sein. Die in den Hochvoltbatterien gespeicherte Energie wird zum Betrieb des Kühlaggregates während des Betriebs genutzt. Während der Standzeiten kann ein autonomer Betrieb durch die Versorgung der Kühleinheit aus den aufgeladenen Hochvoltbatterien erfolgen. Bei längeren Standzeiten können die Hochvoltbatterien sowie auch direkt das Kühlaggregat netzgebunden aufgeladen bzw. betrieben werden.

Das skizzierte System kann wesentlich zur Einsparung von CO₂e beitragen, indem es den Kraftstoffverbrauch und die Feinstaubemissionen senkt. Im rein elektrischen Betrieb der Kühlaggregate entstehen keine direkten Schadstoffemissionen und auch die Geräuschemissionen während des Betriebs werden verringert. Der Vorteil niedriger Geräuschemissionen wird durch Kühlaggregate mit einem elektrischen Antrieb im Allgemeinen erreicht.

Carrier Transicold – Vector eCool

Carrier hat für Sattelauflieger das System „Vector eCool“ bestehend aus Generator-Achse, Hochvoltbatterie und elektrischem Kühlaggregat der Vector-Serie entwickelt. Das Trailerachsen-System ist für ein bis drei Achskombinationen verfügbar. Bei einem 3-Achsen-System befindet sich die Generator-Achse mittig. Es werden vier Betriebsmodi unterschieden:

1. Fahrbetrieb: Die Generator-Achse versorgt das Kühlaggregat mit Energie oder die Hochvoltbatterie, falls das Aggregat ausgeschaltet ist.
2. Netzbetrieb: Die Hochvoltbatterie wird über das Stromnetz geladen und versorgt die Kälteeinheit.
3. Batteriebetrieb: Die Hochvoltbatterie versorgt autonom das Kühlaggregat mit gespeicherter Energie.
4. Ladebetrieb: Im Ruhemodus wird die Hochvoltbatterie über das Netz aufgeladen. Im Betriebsmodus ab einer Geschwindigkeit von 20 km/h wird die Hochvoltbatterie durch die Generator-Achse aufgeladen.

Die Energiebereitstellung erfolgt vom Generator an die 400 V-Hochvoltbatterie mit Hochspannungs-Wechselstrom mit 50 Hz. Die Hochvoltbatterie kann netzgebunden mit einem dreiphasigen CEE-Stecker mit 400 V / 50 Hz geladen werden. Die netzgebundene Ladezeit der Hochvoltbatterie (Kapazität 19,2 kWh) beträgt bei 80 %-Ladung eine Stunde und 20 Minuten und bei voller Ladung zwei Stunden. Die Hochvoltbatterie kann das Kühlaggregat im autonomen Betrieb ohne Generator-Achse für bis zu sechs Stunden mit Energie versorgen (Carrier, 2021; *Vector eCool – Elektrisches System für Kühltransporte*, no date). Der eCool wird mit dem Stromversorgungssystem des Unternehmens AddVolt angeboten. AddVolt hat ein motorunabhängiges Plug-in-Elektrosystem für den Transportmarkt entwickelt (*Homepage*, no date).

Kögel Cool – PurFerro quality mit SAF-HOLLAND

Das Unternehmen Kögel hat gemeinsam mit SAF-Holland einen Tiefkühlauflieger der Baureihe Kögel Cool - PurFerro quality vollelektrifiziert. Zum Einsatz kommt dabei ein vollelektrisch betriebenes Kühlaggregat und die Rekuperationsachse TRAKr des Herstellers SAF-HOLLAND und des britischen Motoren-Hersteller AEM (Advanced Electric Machines). AEM liefert für die Rekuperationsachse eine E-Maschine, die ohne Seltene Erden und Kupfer auskommt (*SAF TRAKr: E-Maschine ohne Seltene Erden*, 2021). Als Vorteile der technischen Lösung benennt das Unternehmen Kögel keine Schadstoffemissionen, die Vermeidung von Geräuschemissionen und einen geringeren Verschleiß. Zudem werden die Lärmemissionen reduziert, was nächtliche Lieferfahrten in Innenstädten ermöglicht, die Fahrzeugdispositionen flexibilisiert und zudem die Schlafqualität der LKW-Fahrer:innen erhöht.

Krone – eCool Liner mit Celsineo und Trailer Dynamics

Der Trailer-Hersteller Krone hat erste Schritte für den nachhaltigen Betrieb seiner Kühl-Auflieger und die nachhaltige Versorgung des Kühlaggregates unternommen. So wurde unter anderem in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Trailer Dynamics der Trailer eCool Liner aufgebaut (Fahrzeugwerk Bernard KRONE GmbH & Co KG, 2022). Innerhalb des eCool Liners wird der elektrische Antrieb mit dem vollelektrischen Kühlaggregat Celsineo (siehe Kapitel „2.1.2 Technischer Überblick zu Systemen zur Effizienzsteigerung und Minderung der Emissionen“) zur emissionsfreien Kühlung des Transportgutes kombiniert (*eCool Liner*, no date). Eine andere Variante stellt der Krone eCool Liner mit dem vollelektrischen Kühlaggregat Carrier Vector HE 19 dar (Fahrzeugwerk Bernard KRONE GmbH & Co KG, 2022).

Trailer Dynamics entwickelt elektrifizierte Achsen, die in unterschiedlichen Trailer-Konfigurationen eine der freilaufenden Achsen ersetzt und den Sattelzug im normalen Fahrbetrieb, beim Anfahren oder bei Steigungen unterstützt. Freie Energie-Ressourcen können zur direkten Unterstützung des Dieselantriebs der Sattelzugmaschine genutzt werden. Bei batterieelektrischen Sattelzugmaschinen bewirkt der eTrailer eine Reichweitenerhöhung. Die Steuerung der elektrischen Antriebsachse erfolgt durch die Übertragung der Kräfte am Königszapfen an die so genannte „Vehicle Control Unit“. Über den

elektrischen Antriebsstrang kann durch Bremsvorgänge Energie zurückgewonnen werden (*Trailer Dynamics GmbH - Technologie*, no date).

Lamberet - SR2-e

Der SR2-e Multi-Temperatur-Kühlaufleger ist ein Entwicklungsprojekt des französischen Herstellers Lamberet. Der Energiebedarf des Kühlaggregates wird dabei über ein Batteriepaket gedeckt, das über Rekuperation mit Hilfe der elektrischen Generatorachse „TRAKr“ von SAF-HOLLAND oder über das stationäre Stromnetz aufgeladen werden kann (Quentin Wiedemann, 2021). Die Generatorachse „TRAKr“ wurde von SAF-HOLLAND gemeinsam mit dem britische Motoren-Hersteller AEM (Advanced Electric Machines) entwickelt. (*SAF TRAKr: E-Maschine ohne Seltene Erden*, 2021)

Schmitz Cargobull – Sattelkoffer S.KOe Cool Smart

Das Produktportfolio von Schmitz Cargobull beinhaltet den S.KO Cool Smart Sattelkoffer für temperaturgeführte Transporte. Mit dem S.KOe Cool Smart hat Schmitz Cargobull ein Fahrzeug mit einer elektrifizierten Schmitz Cargobull Trailerachse, dem rein elektrisch betriebenen Kühlgerät S.CUe mit integrierter Leistungselektronik und einem Batteriesystem entwickelt. (*Schmitz Cargobull Sattelkoffer S.KOe im Praxistest*, 2021; *Produkte*, no date).

Thermo King und BPW – Advancer AxlePower

Der Kühlaggathersteller Thermo King hat gemeinsam mit BPW Bergische Achsen KG das intelligente Energierückgewinnungssystem „Advancer AxlePower“ entwickelt. Das von der Zugmaschine unabhängige System kombiniert die „ePower“-Rekuperationsachse von BPW mit einem vollelektrischen oder hybriden Kühlaggregat von Thermo King und einer Batteriespeichertechnologie. Die Achse ist mit zwei Generatoren ausgestattet, die für doppelte Leistung und Ausfallsicherheit sorgen sollen. Ein intelligentes Energiemanagement stellt sicher, dass dem Kühlsystem immer genug Batteriereserven zur Verfügung stehen, v. a. auf längeren Strecken oder in Staus. Der autonome Betrieb des Kühlaggregates kann für mindestens zwei Stunden aufrechterhalten werden. Es werden zwei Optionen für unterschiedliche Reichweiten und Anwendungen angeboten (Thermo King, 2022a; bpw.de, no date).

Konzepte mit einem Wasserstoff-Brennstoffzellen-Kühlsystem

Hinsichtlich der Elektrifizierung der Antriebsachsen und somit der elektrischen Versorgung der Kühlaggregate existieren, wie obenstehend beschrieben, bereits mehrere Entwicklungsbeispiele. Hier gilt es, durch Felduntersuchungen die Systeme zu optimieren und auf dem Markt zu etablieren sowie die Serienreife vorzubereiten. Modell-Prototypen zur Versorgung eines Kühlaggregates über eine Wasserstoff-Brennstoffzelle wurden bisher von zwei Unternehmenskonsortien mit französischen Kühltransport-Herstellern entwickelt. Auf dem deutschen Markt gibt es hierzu noch keine Lösungen.

FresH2 – Fuel-Cell-Trailer

Das französische Pilotprojekt „FresH2 – Fuel-Cell-Trailer“ ist eine gemeinsame Entwicklung der Unternehmen Lamberet, Carrier Transicold, Bosch und dem Transportunternehmen STEF. Hierfür wurde ein Sattelaufleger von Lamberet der SR2-Serie mit einem elektrischen Multitemperatur-Kühlaggregat der Serie Vector HE 19 von Carrier Transicold und einer direkten Versorgung durch eine 30 kW Wasserstoff-Brennstoffzelle ausgerüstet. Das Projekt wurde von Bosch als Zulieferer für Wasserstoffkomponenten initiiert und durch ein französisches Zukunftsinvestitionsprogramm unterstützt. Durch die direkte Versorgung des Kühlaggregates wird auf eine Pufferbatterie als Zwischenspeicher verzichtet, wodurch u. a. Kosten und Gewicht eingespart werden. Für die Testphase mit der Spedition STEF wurde

die Brennstoffzellentechnik in der Größe eines Palettenkastens auf der unteren linken Trailerseite befestigt. Für die Serienfertigung ist eine Verkleinerung der Brennstoffzellentechnik zur Befestigung an der Stirnseite des Aufliegers geplant. Die 350 bar Wasserstofftanks befinden sich auf der rechten Trailerseite und verfügen über eine Kapazität von 10 kg H₂ (*Fresh2 Hydrogen Fuel Cell Refrigerated Transport Project Enters Road Testing Phase, 2021*).

Carrier Kühlaggregat mit Wasserstoff-Integration

Die Weiterentwicklung des Fresh2-Systems erfolgte durch Carrier Transigold gemeinsam mit den Unternehmen Bosch und PowerCell Sweden AB. Hierfür wurde das Wasserstoff-Brennstoffzellen-Kühlsystem speziell für die Integration in das serienmäßige Gehäuse des Vector-Transportkühlaggregates entwickelt. Der herkömmliche Dieselmotor des Aggregates wird dabei durch die Brennstoffzelle und eine 48-Volt-Autobatterie von Bosch ersetzt. Die Batterie verbindet die Brennstoffzelle direkt mit dem Kühlaggregat, wodurch eine separate Pufferbatterie überflüssig wird. Das integrierte Brennstoffzellensystem wurde auf der IAA-Transportation 2022 vorgestellt (*Carrier Transicold präsentiert neues Vector-Konzept mit Wasserstoff-Integration für die Transportkühlung auf der IAA Transportation, 2022*).

Chereau - Hydrogen refrigerated semi-trailer

Innerhalb des Projektes „ROAD - Hydrogen refrigerated semi-trailer“ hat der französische Kühlaufleger-Hersteller Chereau gemeinsam mit mehreren Partnern, u. a. Carrier Transigold und Malherbe (Speidition) einen wasserstoffbetriebenen Sattelaufleger entwickelt. Ziel des dreijährigen Projektes (2016 – 2019) war es, eine neue Generation von Kühlauflegern durch die Reduzierung von Umweltbelastungen und die Verbesserung der Betriebsbedingungen (Ergonomie und Sicherheit) zu entwickeln. In diesem Zusammenhang wurde neben der Energieversorgung des Kühlaggregates durch eine Brennstoffzelle u. a. auch die Aerodynamik, die Isolierung und das Gewicht des Trailers verbessert. Die Wasserstoffversorgung des Kühlaggregates erfolgte über eine 11 kW Brennstoffzelle und einen 350 bar H₂-Tank mit 14 kg Inhalt. Dieser wurde, wie bei dem Fresh2-Projekt an der unteren Trailerseite befestigt (Chereau, 2019).

Innerhalb des Nachfolgeprogramms „FROM ROAD TO REAL“ setzt Chereau die Innovationen aus dem ROAD-Projekt in vier neuen Baureihen um. Eine davon ist die Baureihe „CHEREAU HYDROGEN POWER H2“. Bei diesen Kühlauflegern werden die Brennstoffzelle, die Akkueinheit und die H₂-Tanks zwischen den Längsträgern am Fahrgestell untergebracht. Das Ziel von Chereau ist es, bis 2030 25 % der Produktion auf die HYDROGEN POWER H2-Technologie umzustellen (Chereau, no date).

Hyundai – Xcient Fuel Cell

Das Unternehmen Hyundai bietet das Modell Xcient Fuel Cell sowohl mit einem Trockenkoffer als auch mit einem Kühlkoffer als Aufbaulösung an. Die Auslegung der Kühlkoffer erfolgt kundenspezifisch, wobei eine Variante für Tiefkühltransporte möglich ist. Dabei können Einzonen- oder Zweizonen-Kühlungen realisiert werden. Seitens Hyundai Hydrogen Mobility wurde das Schweizer Unternehmen GK Grünfelder als erster Aufbauhersteller zertifiziert. Die Xcient LKW sind mit zwei parallel verbauten Brennstoffzellen mit einer Leistung von je 95 kW und einer 73,2 kWh-Hochvoltbatterie ausgestattet. Die mit 34,5 kg Wasserstoff beladenen sieben Wasserstoffbehälter sind derzeit hinter der Fahrerkabine am Aufbau befestigt und ermöglichen je nach Einsatzbedingungen eine Reichweite von ca. 400 km. Wie die Energieversorgung der Tiefkühlbauten erfolgt und ob hier eine Verbindung zu dem Antrieb des Xcient Fuel Cell erfolgen kann, ist aktuell nicht aufgeführt. (GK Grünfelder AG, 2021; Hyundai, no date)

4.1.2 Untersuchung der technischen Umsetzung in Bezug auf die mögliche Integration dieser Systeme in Kühlkraftwagen

Ziel der in diesem Kapitel stattfindenden Untersuchungen zu der möglichen Integration, der in Kapitel " 4.1.1 Marktrecherche zu Entwicklern/Herstellern und der Funktionsweise von emissionsfreien Kühl- aggregaten" beschriebenen Systeme in unterschiedliche Ausprägungen von Kühlkraftwagen ist es, hierfür ein grundlegendes technisches Verständnis zu schaffen und dabei unterschiedliche Varianten zu diskutieren.

Wesentliche Gesichtspunkte, die dabei berücksichtigt werden, sind:

- Ein autonomer Betrieb des emissionsfreien Systems.
- Eine Integration in bestehende Technologieeinheiten, wie z. B. unterschiedliche Sattelzugmaschinen.
- Die Berücksichtigung sicherheitstechnischer Aspekte, die insbesondere wasserstoffbetriebene Systeme betreffen.

Die Informationsbasis bilden Erfahrungen aus vorangegangenen Untersuchungen und Projekten und den oben stehend beschriebenen (prototypischen) Lösungen der Hersteller (*Abschlussbericht - Projekt H2Cool Prelude Anbahnung von Kühltransporten mit Wasserstoff-LKW, 2022*).

Grundlage zur Bewertung des Konzepts "Rekuperationsachse + Kühlung" in Kühltransporten

Das Prinzip der Rekuperation wird bereits seit Jahrzehnten eingesetzt, um z. B. Energie in ein Stromnetz zurückzuspeisen, wie es bei Schienenfahrzeugen oder Oberleitungsbussen erfolgt (Paschotta, no date). Heutige BEV-PKW sind mit der Möglichkeit zur Rekuperation von Energie ausgestattet, indem der Antriebsmotor beim Bremsvorgang vom Elektro- in den Generatorbetrieb wechselt. Der Erfahrungswert mit diesen Systemen und der technologische Reifegrad kann somit als hoch eingestuft werden. Gleiches gilt für den Einsatz von Rekuperationsachsen in BEV-LKW, für die der Schritt von der experimentellen Entwicklung in die Fertigung unter Wettbewerbsbedingungen aufgrund bestehender langjähriger Erfahrungen bei den Herstellern bereits erfolgt.

Grundlage zur Bewertung des Konzepts „Wasserstoff-Brennstoffzelle“ in Kühltransporten

Der grundsätzliche, schematische Aufbau eines wasserstoffbetriebenen Kühlsystems ist der Abbildung 31 zu entnehmen. Die Darstellung gilt ausschließlich für komprimierten, gasförmigen Wasserstoff und nicht für kryokomprimierten Wasserstoff oder für Flüssigwasserstoff-Speichersysteme.

Das Brennstoffzellensystem unterteilt sich in einen Hochdruck- und einen Mittel- bzw. Niederdruckbereich. Der Hochdruckbereich besteht neben dem aufgeführten Wasserstoff-Druckbehälter und einem Druckregler aus den Hochdruckleitungen sowie am Druckbehälter aus einem Füllanschluss mit Rückschlagventil in der Füllleitung, einer Entlüftungseinrichtung und Sicherheitseinrichtungen. Der Mittel- bzw. Niederdruckbereich besteht im Wesentlichen aus dem Brennstoffzellensystem mit dem Brennstoffzellenstapel und der Luftzufuhreinheit sowie einem Überdruckventil. Zur Überwachung des Systems ist eine Leckageüberwachungseinrichtung erforderlich (*Fahrzeuge mit Wasserstoffsystemen im Einzelgenehmigungsverfahren, 2021*).

Zum Betrieb der Brennstoffzelle muss der Hochdruck des Wasserstofftanks (350 bar / 700 bar) über einen Druckminderer auf den Betriebsdruck der Brennstoffzelle reduziert werden. Ein vorgeschaltetes

Dosierventil als Durchflussbegrenzer steuert den Zulauf des Wasserstoffs zur Brennstoffzelle. Die seitens der Brennstoffzelle an die Batterie abgegebene elektrische Energie liegt in Form einer Gleichspannung (DC) vor. Um diese an das mit einer dreiphasigen Wechselspannung (AC) betriebene Kühlaggregat abzugeben, ist ein Wechselrichter erforderlich.

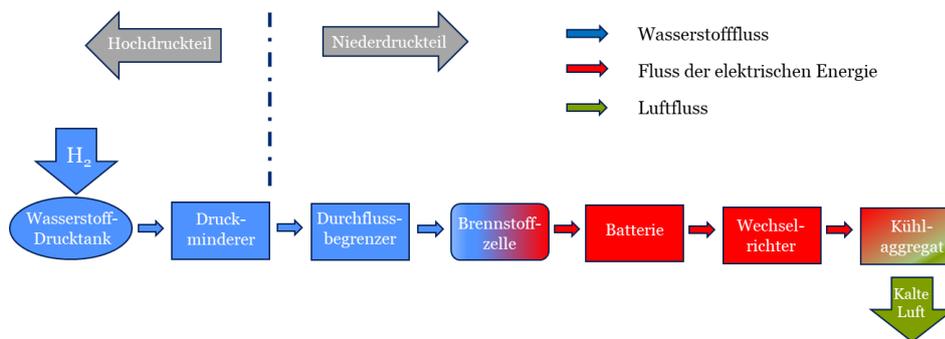


Abbildung 31: Grundsätzlicher Aufbau eines wasserstoffbetriebenen Kühlsystems für Nutzfahrzeuge ((Abschlussbericht - Projekt H2Cool Prelude Anbahnung von Kühltransporten mit Wasserstoff-LKW, 2022), modifizierte Darstellung)

Grundsätzlich wäre es möglich, das vollelektrische Kühlaggregat mit einem Einspeisepunkt für Energie aus Solarpanels zu versehen. Hierdurch könnte bei gegebenen Wetterverhältnissen der Wasserstoffverbrauch reduziert und somit die autonome Betriebsdauer verlängert werden. Der Einbau einer Generator-Achse in das Konzept Wasserstoff-Brennstoffzelle wäre ggf. eine Möglichkeit zur Absicherung des autonomen Betriebs, insbesondere hinsichtlich der derzeit noch wenig ausgebauten Wasserstoff-Tankinfrastruktur, würde aber die Komponentenkosten stark erhöhen und eine Hochvoltbatterie mit einer höheren Kapazität erfordern.

Integration des Konzepts Rekuperationsachse + Kühlung in temperaturgeführte Nutzfahrzeuge

Konzepte mit einer integrierten Rekuperationsachse wie sie bereits oben beschrieben wurden bestehen im Wesentlichen aus drei miteinander kommunizierenden Hauptkomponenten - der Generatorachse, der Hochvoltbatterie und dem zumeist vollelektrischen Kühlaggregat - sowie aus Regelungs- und Steuerungstechnik zur Steuerung unterschiedlicher Betriebsmodi. Der Schematische Aufbau des Konzepts ist in Abbildung 32 dargestellt.

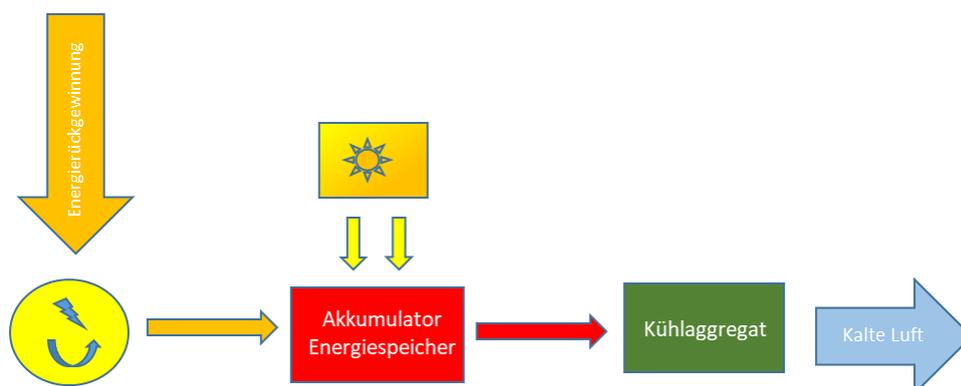


Abbildung 32: Schematischer Aufbau des Konzepts „Rekuperationsachse + Kühlung“ für Nutzfahrzeuge (eigene Darstellung)

Je nach Betriebsmodi versorgt die Generator-Achse die Hochvoltbatterie und somit das Kühlaggregat mit Energie. Im Stillstand bei z. B. Be- und Entladevorgängen oder während der gesetzlichen Ruhezeiten kann die Hochvoltbatterie über das Netz mit Energie versorgt werden.

Ist die Hochvoltbatterie aufgeladen, kann diese als Puffer- bzw. Speicherkomponente das Kühlaggregat autonom über einen bestimmten Zeitraum betreiben. Grundsätzlich wäre es möglich, diesen Zeitraum durch die Integration von Solarpanels zu verlängern.

Bei der Integration der Generatorachse kann eine herkömmliche Achse eines Sattel- oder Lastzuges durch die Rekuperationsachse ersetzt werden. Wie der Abbildung 33 zu entnehmen ist, wird bei Aufliegern in der Regel die mittlere Achse eines 3-Achsen-Systems ausgetauscht. Bei Anhängern von Motorwagen bestehen bislang noch keine Erfahrungen mit einer Rekuperationsachse.



Abbildung 33: Integration des Konzeptes "Rekuperationsachse + Kühlung" an einem Auflieger (Quelle: eigene Darstellung)

Die Hochvoltbatterie wird zwischen der Rekuperationsachse und dem Kühlaggregat in das Fahrgestell des Aufliegers integriert. Die Systeme sind mit entsprechender Elektronik für das Energiemanagement ausgerüstet, so dass die Batteriereserven effizient auf den Bedarf des Kühlaggregates abgestimmt werden können. Der Einsatz von Trailer mit dem Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung" bietet sich aufgrund der kürzeren Entfernungen und der vielseitigen Auflademöglichkeiten vor allem im Bereich der City-Logistik und des Verteilverkehrs an. Die Nutzung im Fernverkehr ist ebenfalls möglich und erfordert für diesen Anwendungsfall eine gut ausgebaute Ladeinfrastruktur mit Schnellladesystemen, da im Fernverkehr nur in geringerem Maße auf das Zwischenladen im Depot oder auf Ladeinfrastrukturen auf Betriebshöfen zurückgegriffen werden kann. Das Rekuperationsachsen-System kann so ausgelegt werden, dass es in bestehende Trailerarchitekturen integriert wird und unabhängig von dem jeweiligen Zugfahrzeug ist. Rekuperationsachsen stellen zudem eine Möglichkeit dar, die Reichweite von BEV-Antrieben zu erhöhen.

Integration des Wasserstoff-Brennstoffzellen-Systems in temperaturgeführte Nutzfahrzeuge

Nachfolgend werden zwei Anwendungsbeispiele für Auflieger und Anhänger für die Integration des wasserstoffbetriebenen Kühlaggregates im Vergleich zu dem herkömmlichen Diesel-System vorgestellt.



Abbildung 34: Ausgangssituation aktueller Kühlaufleger

Die in Abbildung 34 dargestellte Ausgangssituation hinsichtlich der Komponentenintegration aktueller Kühlaufleger und -anhänger wurde in Kapitel „1.1 Beschreibung der auf dem Markt befindlichen Fahrzeuglösungen und deren Unterschiede“ erläutert. Für emissionsfreie Kühlaufleger sind grundsätzlich die folgenden Varianten zur Integration der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Einheit möglich. Eine davon abweichende Integration wird dabei nicht ausgeschlossen.

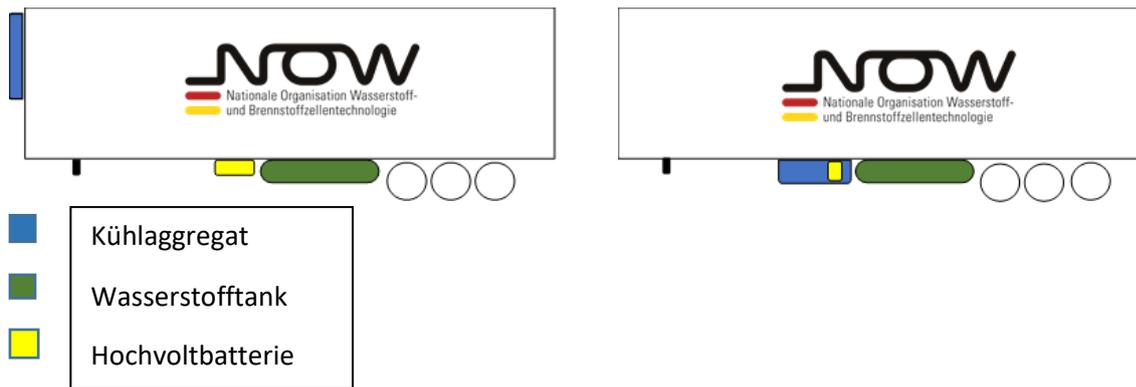


Abbildung 35: Komponentenintegration Konzept "Wasserstoff-Brennstoffzellen-Kühlsystem" bei einem emissionsfreien Kühlaufleger und -anhänger

Die Position des Kühlaggregates (blau) wird voraussichtlich in den meisten Fällen an der Stirnwand des Aufliegers oder Anhängers erfolgen. Eine weitere Möglichkeit ist die Positionierung des Kühlaggregates im Unterflurbereich. Diese Variante bietet sich bei Sattelzugmaschinen als FCEV an, um einer eventuellen Kollision zwischen den Wasserstofftanks des FCEV, die derzeit an der Rückseite des Fahrerhauses verbaut sind, und dem Kühlaggregat vorzubeugen (siehe Diskussion am Ende des Kapitels 4.1.2). Bei beiden Darstellungen wird davon ausgegangen, dass die Brennstoffzelle in das Gehäuse des Kühlaggregates integriert wird. Die Integration ist grundsätzlich möglich, da die Komponenten für ein Diesel-Aggregat, wie z. B. der Diesel-Motor, entfernt werden und Platz für neue Komponenten schaffen. In dem Gehäuse kann bei entsprechender Miniaturisierung neben der Brennstoffzelle auch die Batterie (gelb) untergebracht werden. Um Platz zu sparen, bietet sich diese Variante für die Unterflurmontage, aber auch für die Stirnwandmontage an. Der Wasserstofftank (grün) wird am Rahmen unterhalb des Aufliegers / Anhängers montiert.

Für die Integration der Komponenten in einen emissionsfreien Motorwagen werden die nachfolgenden drei Varianten vorgestellt. Die Abbildung 36 zeigt die aktuelle Ausgangssituation bei den temperaturgeführten Motorwagen.



Abbildung 36: Ausgangssituation aktueller Kühl-Motorwagen

Die Ausgangssituation hinsichtlich der Komponentenintegration aktueller Kühl-Motorwagen wurde in Kapitel „1.1 Beschreibung der auf dem Markt befindlichen Fahrzeuglösungen und deren Unterschiede“ beschrieben.

Die Komponentenintegration eines Wasserstoff-Brennstoffzellen-Systems kann bei den Motorwagen wie nachfolgend beschrieben erfolgen. Eine davon abweichende Integration wird dabei nicht ausgeschlossen.



Abbildung 37: Komponentenintegration bei emissionsfreien Motorwagen

Die Integration des Kühlaggregats kann weiterhin in der Überdach- sowie der Unterflurmontage erfolgen. Im Vergleich zum Sattelaufleger wird bei Motorwagen derzeit davon ausgegangen, dass das Kühlaggregat voraussichtlich nicht mit einer eigenen Brennstoffzelle ausgestattet wird. Das Konzept "Wasserstoff-Brennstoffzellen-System" bietet sich hier im Wesentlichen nur in Kombination mit einem FCEV an. Die Versorgung des Kühlaggregats erfolgt dann über den erzeugten Strom der Brennstoffzelle des Motorwagens. Die Batterie wird am Rahmen des Fahrgestells montiert. Die Integration der Wasserstofftanks erfolgt zwischen dem Fahrerhaus und dem Kühlaufbau (*XCIENT Fuel Cell*, no date).

Sicherheitskritische Betrachtung

Die sicherheitskritische Betrachtung erfolgt hinsichtlich des Schutzes von Personen, die hauptsächlich in Verbindung mit den Wasserstoff-betriebenen Fahrzeugen agieren sowie hinsichtlich konstruktiver Maßnahmen zum Schutz der Komponenten. Die Bewertung erfolgt anhand der technischen Anforderungen gemäß VdTÜV-Merkblatt 766 "Fahrzeuge mit Wasserstoffsystemen im Einzelgenehmigungsverfahren" und hat als Auszug aus dem Merkblatt keinen Anspruch auf Vollständigkeit (*Fahrzeuge mit Wasserstoffsystemen im Einzelgenehmigungsverfahren*, 2021). Bei der Bewertung wird davon ausgegangen, dass die Komponenten seitens der Hersteller in Bezug auf die Betriebsbedingungen, wie hohe Temperaturen oder Drücke, ausgelegt werden.

1. Grundsätzlich ist die Installation von gasführenden Teilen in geschlossenen Räumen oder in Einbaubereichen, in denen sich das Gas ansammeln und ein zündfähiges Gemisch bilden könnte, nicht gestattet. Hierzu zählen beispielsweise der Fahrgastraum, der Motorraum oder der Gepäckraum. Gasführende Komponenten sind neben dem Wasserstofftank und der Brennstoffzelle u. a. auch die Versorgungsleitungen. In diesem Zusammenhang kann es sein, dass auch der Einbau von wasserstoffführenden Komponenten in den Laderaum des Kühlaufbaus ausgeschlossen ist. In diesem Fall besteht ggf. die Gefahr der Verschiebung von Lasten (siehe Punkt 7).
2. Die unter 1. aufgeführten Regelungen gelten auch für alle unter hohem Druck stehenden Bauteile und deren Verbindungen. Es darf bei deren Versagen keine Gefährdung der Fahrzeuginsassen oder Dritter erfolgen.
3. Die Vorschriften der Gefahrgutlagerung (max. 4,5 kg oder 50 Nm³) legen die maximale Größe der Wasserstoffbehälter fest. Dies entspricht ungefähr fünf Druckgasflaschen mit 50 l Volumen bei 200 bar Fülldruck. Bei 350 bar oder 700 bar Fülldruck ändert sich die Dichte des Wasserstoffs, womit das Fassungsvermögen des Druckbehälters erhöht werden kann. Die Vorschriften der Gefahrgutlagerung bleiben davon unberührt erhalten.
4. Wasserstoffbehälter müssen in Bezug auf Fahrzeugkollisionen in geschützten Bereichen eingebaut werden. Zum Schutz müssen konstruktive Maßnahmen ergriffen werden.
5. Für den Fall eines Front- oder Heck-Unfalls müssen die Mindestabstände des Wasserstoffspeichersystems inklusive wasserstoffführender Bauteile und Leitungen zur vorderen äußeren Begrenzung 420 mm und zur hinteren äußeren Begrenzung des Fahrzeugs 300 mm betragen.
6. Für den Fall eines Seitenaufpralls muss der Mindestabstand des Wasserstoffspeichersystems inklusive wasserstoffführender Bauteile und Leitungen zur seitlich rechten und linken äußeren Begrenzung des Fahrzeugs 200 mm betragen.

- Das Wasserstoffsystem ist so einzubauen, dass es vor Beschädigungen geschützt ist, wie z. B. durch bewegliche Fahrzeugteile, Anprall von Gegenständen, Splitt, Be- und Entladung oder durch die Verschiebung von Lasten. Die Bauteile des Behälters müssen z. B. durch Teile des Rahmens oder des Aufbaus vor der Berührung mit möglichen Hindernissen auf dem Boden geschützt werden. Dies dürfen jedoch keine energieabsorbierenden Elemente des Fahrzeugs sein. Die gesetzliche Bodenfreiheit und die Rampenwinkel müssen bei der Integration eingehalten werden. Dies ist insbesondere für den Fall zu beachten, wenn wasserstoffführende Komponenten im Unterflurbereich verbaut werden. Zudem dürfen Komponenten im Dachbereich nicht der Gefahr des Zusammenstoßens mit Brücken, Tunneldurchfahrten oder anderen Unterführungen ausgesetzt werden.

Innerhalb des VdTÜV-Merkblatts werden weitere Sicherheitsthemen aufgeführt, die zusätzlich berücksichtigt werden müssen, wie beispielsweise Aspekte der elektrischen und der Funktionsicherheit, die Gefahr von gefrierenden Kondensaten, die freie Zugänglichkeit für z. B. Dichtheitsprüfungen, die Erwärmung durch äußere Temperatureinflüsse z. B. bei der Überdachmontage, die Berücksichtigung der Fahrdynamik oder die Beachtung von Rettungs- und Bergungsarbeiten.

Bewertung Technologiereifegrad

Zur Bewertung des Technologiereifegrades der beiden Konzepte “Rekuperationsachse + Kühlung” und “Wasserstoff-Brennstoffzellen-System” erfolgt eine Orientierung an dem seitens der Europäischen Kommission veröffentlichten Definitionen und Kriterien zur Bewertung von Schlüsseltechnologien (Key Enabling Technologies) zur Finanzierung von Forschung und Innovation anhand des TRL – Technology Readiness Level (Europäische Kommission, 2021).

Die untenstehende Abbildung 38 zeigt die einzelnen Stadien der Technologieentwicklungsphase und ihre jeweilige Terminologie.

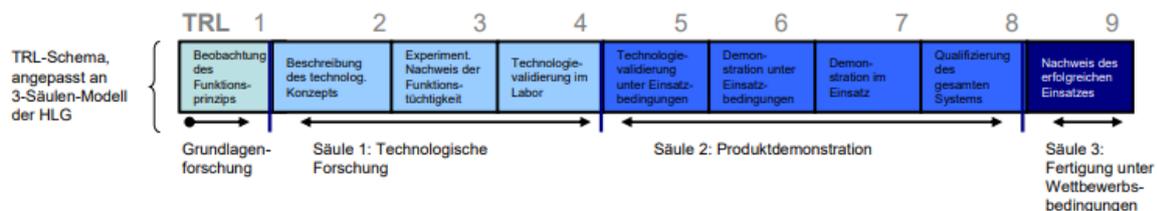


Abbildung 38: Skala der technologischen Einsatzreife (Technology Readiness Level – TRL), modifizierte Abbildung (Europäische Kommission, 2021)

Die Skala ist in neun TRL-Level eingeteilt, wobei TRL 1 die Grundlagenforschung umfasst, TRL 2 - 4 die technologische Forschung (Säule 1) und TRL 5 bis 8 die Produktdemonstration (Säule 2). Die 3. Säule mit dem TRL 9 kennzeichnet die Fertigung unter Wettbewerbsbedingungen.

Bewertung Technologiereifegrad “Rekuperationsachse mit Kühlung”

Die Kombination einer Rekuperationsachse mit einer Hochvoltbatterie und einem Kühlaggregat kann sehr gut auf die bestehenden Erfahrungen mit Rekuperation in BEV aufbauen. Der Fokus der Entwicklung wird daher insbesondere auf der Auslegung und dem Zusammenspiel der Komponenten hinsichtlich Leistungsbedarf, Optimierung der Betriebsmodi und Einsatzbereiche liegen. Unabhängig davon ist das Konzept “Rekuperationsachse + Kühlung” in Bezug auf die Kühlung von Produkten ein noch recht junges Anwendungsfeld und die bisherigen Systeme liegen je nach Entwicklungsstand zwischen dem

Bereich der Produktdemonstration und der Markteinführung. Die Bewertung des Technologiereifegrades orientiert sich an der in Abbildung 38 dargestellten Skala der technologischen Einsatzreife. Aufgrund der bestehenden Erfahrungen mit der Rekuperations-Technologie erfolgt eine Einstufung innerhalb der Technology Readiness Level TRL 7 bis TRL 9. Die TRL 7 und 8 sind der Säule 2 "Produktdemonstration" zugeordnet und umfassen das Feld "Demonstration im Einsatz" und das Feld "Qualifizierung des gesamten Systems". Der TRL 9 ist bereits der Säule 3 "Fertigung unter Wettbewerbsbedingungen" zugeordnet und beschreibt das Feld "Nachweis des erfolgreichen Einsatzes".

Bewertung Technologiereifegrad Konzept "Wasserstoff-Brennstoffzellen-System"

Die Bewertung des Konzepts "Wasserstoff-Brennstoffzelle" orientiert sich wie bei dem Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung" ebenfalls an den Stadien der Technologieentwicklungsphasen und dem TRL-Schema in Abbildung 38. Bisher gibt es sowohl im Segment der wasserstoffbetriebenen PKW als auch der LKW noch relativ wenige Langzeiterfahrungen ('Wasserstofffahrzeuge', no date). Hersteller von FCEV bei LKW können somit nur auf wenige Erfahrungswerte, z. B. aus der grundsätzlichen Nutzung von Brennstoffzellen-Systemen, zurückgreifen. Im Bereich der mittleren und schweren Nutzfahrzeuge ist der Einsatz von Wasserstoff-Brennstoffzellen aufgrund der höheren Reichweiten und somit der Möglichkeit von Langstreckenfahrten, der kürzeren Betankungszeiten und aufgrund der höheren Zuladung gegenüber batteriebetriebenen LKW durchaus sinnvoll. Die Verwendung von Wasserstoff-Brennstoffzellen-Systemen bei der Kühlung von Produkten hat den immensen Vorteil eines autonom arbeitenden Systems, dass auch während der Be- und Entladungsvorgänge oder der Ruhezeiten unabhängig vom Stromnetz, emissionsfrei und geräuscharm betrieben werden kann.

Bisher existieren zwei französische Trailer-Hersteller, die in Zusammenarbeit mit einem Kühlaggregat-Hersteller das Konzept "Wasserstoff-Brennstoffzelle" zur Kühlung bei temperaturgeführten Transporten in Forschungs- und Demonstrationsvorhaben umgesetzt haben. Der "FresH2"-Auflieger von Lamberet wurde 2022 vorgestellt und kann voraussichtlich noch der Säule 1 "Technologische Forschung" (TRL 4) zugeordnet werden, da bisher keine Validierung der Technologie unter Einsatzbedingungen bekannt ist. Der im Projekt „ROAD - Hydrogen refrigerated semi-trailer“ zwischen 2016 bis 2019 entwickelte Trailer von Chereau wurde innerhalb des Forschungsvorhabens zwar getestet, jedoch liegen noch keine Langzeiterfahrungen vor. Chereau setzt auf Basis der Projekterkenntnisse derzeit eine Baureihe mit wasserstoffbetriebenen Kühl-Trailern um und möchte bis 2030 ein Viertel der Produktion auf Wasserstoff-Trailer umstellen. Diese Informationen lassen vermuten, dass innerhalb des Forschungsprojektes eine Technologievalidierung unter Einsatzbedingungen erfolgte (TRL 5), aber noch kein weiterer Einsatz unter Realbedingungen.

Die Erfahrungen mit dem Konzept "Wasserstoff-Brennstoffzelle" sind derzeit noch sehr fragmentarisch vorhanden und liegen gegenüber dem Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung" im niedrigeren Entwicklungs- und Erprobungsstand. Entwicklungen von deutschen Trailer-Herstellern werden angestrebt und bedürfen, vergleichbar zu den französischen Herstellern, einer finanziellen Förderung, um breitenwirksam auf dem nationalen und internationalen Markt Fuß fassen zu können.

Diskussion

Ein wesentlicher Aspekt bei der Entwicklung eines emissionsfreien Kühltransportsystems ist es, einen möglichst hohen Grad an Autonomie zu erreichen, der bei unterschiedlichen Einsatzbereichen im Nah- und Fernverkehr sowie bei regionalen Einsätzen im Stadtverkehr aufrechterhalten werden kann. Hierbei tragen die Auslegung und Auswahl der Systemkomponenten sowie deren gegenseitige Abstimmung

mung einen wesentlichen Anteil. Insbesondere bei den Konzepten mit einem Wasserstoff-Brennstoffzellen-Kühlsystem besteht auf diesem Gebiet noch viel Entwicklungsbedarf, der derzeit in Deutschland nicht abgedeckt ist.

Prinzipiell macht es Sinn, bei der Auswahl und Integration von Komponenten für emissionsfreie Kühlsysteme auf eine Kompatibilität mit der Sattelzugmaschine oder dem Antrieb des Motorwagens zu achten. So kann im Bedarfsfall eine Unterstützung seitens der Zugmaschine als Energielieferant erfolgen. Dies gilt beispielsweise auch, wenn eine batteriebetriebene Sattelzugmaschine die Energie für ein Kühlsystem mit Brennstoffzelle liefert.

Andersherum kann bei bestimmten Konstellationen, wie z. B. mit einer batteriebetriebenen Sattelzugmaschine, das emissionsfreie Kühlsystem unter Umständen, z. B. bei geringerem Kühlbedarf im Winter oder bei Produkten ohne eine Notwendigkeit der Dauerkühlung, die Zugmaschine hinsichtlich längerer Reichweite unterstützen.

Im Kontext des gegenseitigen Technologieabgleichs und aufgrund der besonderen Anforderungen des aktuellen H₂-Tankstellennetzes sollte darauf geachtet werden, dass der Wasserstofftank einer FCEV-Zugmaschine die gleiche Druckstufe (350/700 bar) besitzt wie der Wasserstoffdrucktank des Brennstoffzellen-Kühlsystems.

Bei der Kombination einer wasserstoffbetriebenen Sattelzugmaschine mit Wasserstofftanks an der Rückseite des Fahrerhauses und einem Auflieger mit einem stirnseitig angebrachten Kühlaggregat ist unbedingt auf die Gefahr der Kollision zu achten. Lösungen für dieses Problem könnten eine Verlegung des Sattelvormmaßes nach hinten und somit eine Verlängerung des Sattelzuges sein. Ggf. müssen zur Unterstützung des Hochlaufens emissionsfreier Nutzfahrzeuge seitens des Gesetzgebers entsprechende Sonderregelungen hinsichtlich der Fahrzeugabmessungen geschaffen werden, die es bzgl. der zugelassenen Breite von Kühltransportern bereits gibt (siehe Kapitel „1.1 Beschreibung der auf dem Markt befindlichen Fahrzeuglösungen und deren Unterschiede“).

4.2 Ökonomische Analyse emissionsfreier Kühlsysteme

Für die ökonomische Analyse der emissionsfreien Kühlsysteme gelten die gleichen Überlegungen und Rahmenbedingungen wie für die ökonomische Analyse der aktuellen Kühlsysteme im Kapitel „2.2 Ökonomische Analyse der aktuellen Kühlsysteme“. Im Rahmen dieses Kapitels soll eine Grundlage zum Vergleich konventioneller und klimafreundlicher Kühlsysteme unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten geschaffen werden.

4.2.1 Ökonomische Berechnung für emissionsfreie Kühlsysteme

Nachfolgend werden die Ergebnisse der ökonomischen Berechnungen aufgeteilt in Kilometer- und Tages-Sätze für die in der Entwicklungs- und Erprobungsphase befindlichen emissionsfreien temperaturgeführten Lastkraftwagen im Vergleich zu den Ergebnissen der aktuell im Betrieb befindlichen Fahrzeugkonfigurationen dargestellt. Hierdurch kann eine direkte Gegenüberstellung und ökonomische Auswertung erfolgen. Es werden die Ergebnisse für den Sattelzug, den Motorwagen und den kompletten Lastzug dargestellt.

Neben den in Kapitel „2.2 Ökonomische Analyse der aktuellen Kühlsysteme“ aufgeführten aktuellen Fahrzeugkonfigurationen werden die emissionsfreien Systeme durch die nachfolgenden Konstellationen erweitert:

Sattelzug

Die Diesel-Sattelzugmaschine wird um das Konzept "Wasserstoff-Brennstoffzelle-Kühlsystem" ergänzt und ist somit am Auflieger lokal emissionsfrei.

Die wasserstoffbetriebene Sattelzugmaschine wird mit den Konstellationen

- Diesel-/Elektro-Kühlaggregat (H2 SZM + Diesel Aggregat)
- Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung" (H2 SZM + E-Aggregat)
- Konzept „Wasserstoff-Brennstoffzelle-Kühlsystem“ (H2 SZM + H2-Aggregat)

berechnet.

Die batteriebetriebene Sattelzugmaschine wird in den Ausführungen

- Diesel-/Elektro-Kühlaggregat (E SZM + Diesel-Aggregat)
- Konzept „Rekuperationsachse + Kühlung“ (E SZM + E-Aggregat)
- Konzept „Wasserstoff-Brennstoffzelle-Kühlsystem“ (E SZM + H2-Aggregat)

ökonomisch betrachtet.

Einen Überblick über die Kilometer- und Tages-Sätze der drei verschiedenen Antriebssysteme ist in der Tabelle 30 zusammengefasst.

Tabelle 30: Überblick über die Kilometer- und Tages-Sätze der Sattelzug-Konfigurationen

	Diesel SZM + Diesel Aggregat [€]	Diesel SZM + E-Aggregat [€]	Diesel SZM + H2-Aggregat [€]
km-Satz	1,14	1,09	1,23
Tages-Satz	556,41	533,69	600,91
	FCEV SZM + Diesel Aggregat [€]	FCEV SZM + E-Aggregat [€]	FCEV SZM + H2-Aggregat [€]
km-Satz	1,44	1,39	1,51
Tages-Satz	703,00	680,29	737,21
	BEV SZM + Diesel Aggregat [€]	BEV SZM + E-Aggregat [€]	BEV SZM + H2-Aggregat [€]
km-Satz	1,03	0,98	1,10
Tages-Satz	503,39	480,68	537,59

Die vergleichende Darstellung der unterschiedlichen Sattelzug-Konfigurationen zeigt, dass zum jetzigen Zeitpunkt sowohl die Kilometer-Sätze als auch die Tages-Sätze bei den FCEV-Varianten die höchsten Werte aufzeigen. Dies gilt vor allem für die Konfigurationen, bei denen ein Wasserstoff-Antrieb in der SZM eingebaut ist und mit unterschiedlichen Kühlaggregat-Varianten kombiniert wird. Aber auch bei den Sattelzugmaschinen mit einem Diesel- oder Batterie-Antrieb, die mit dem Konzept „Wasserstoff-Brennstoffzellen-Kühlsystem“ kombiniert werden, sind die Kosten gegenüber den anderen Varianten am höchsten.

Der ausschlaggebende Kostenfaktor für diese hohen Kilometer- und Tages-Sätze bei den FCEV-Varianten sind die derzeit noch sehr hohen geschätzten Anschaffungskosten für die wasserstoffbetriebene Sattelzugmaschine und für das Wasserstoff-Brennstoffzellen-Kühlsystem. Diese liegen um 140 % höher gegenüber dem Diesel-Sattelzug mit Diesel-/Elektro-Aggregat und um 77 % gegenüber dem Batterie-Sattelzug mit dem Konzept "Rekuperationsachse mit Kühlung". Bei den Anschaffungskosten für die Brennstoffzellen-Sattelzugmaschine als auch für die batteriebetriebene Sattelzugmaschine wurde eine mögliche Förderung durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur mitberücksichtigt. Die Kosten für das Konzept "Wasserstoff-Brennstoffzelle-System" basiert auf Erfahrungswerten und Annahmen. Neben den Anschaffungskosten stellen die Kosten für Wasserstoff als Treibstoff

einen weiteren wichtigen Einflussfaktor dar. Insbesondere der zumeist durch Dampfreformierung aus Erdgas erzeugte, graue Wasserstoff ist preislich sehr volatil und derzeit sehr teuer.

Der Diesel-Sattelzug mit dem Konzept „Wasserstoff-Brennstoffzelle-Kühlsystem“ hat im Vergleich zu der BEV-Konfiguration mit dem gleichen Konzept höhere Kilometer- und Tages-Sätze obwohl ein höheres betriebsnotwendiges Vermögen für die Anschaffung eines batteriebetriebenen Sattelzugs erforderlich ist. Dies ergibt sich durch die hohen Kraftstoffkosten und die Autobahnmaut, die bei Batterie-LKW nicht anfällt sowie höhere Kraftfahrzeug-Steuer und Ausgaben für Schmierstoffe und Öle.

Motorwagen

Der Diesel-Motorwagen wird um das Konzept “Wasserstoff-Brennstoffzelle-Kühlsystem” ergänzt und ist somit am Kofferaufbau lokal emissionsfrei.

Der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Motorwagen wird mit den Konstellationen

- Diesel-/Elektro-Kühlaggregat (H2 Motorwagen + Diesel Aggregat)
- Konzept “Rekuperationsachse + Kühlung” (H2 Motorwagen + E-Aggregat)
- Konzept „Wasserstoff-Brennstoffzelle-Kühlsystem“ (H2 Motorwagen + H2-Aggregat)

berechnet.

Der batteriebetriebene Motorwagen wird in den Ausführungen

- Diesel-/Elektro-Kühlaggregat (E Motorwagen + Diesel-Aggregat)
- Konzept „Rekuperationsachse + Kühlung “ (E Motorwagen + E-Aggregat)
- Konzept „Wasserstoff-Brennstoffzelle-Kühlsystem“ (E Motorwagen + H2-Aggregat)

ökonomisch betrachtet.

Einen Überblick über die Kilometer- und Tages-Sätze der verschiedenen Motorwagen-Konfigurationen ist in der Tabelle 31 zusammengefasst.

Tabelle 31: Überblick über die Kilometer- und Tages-Sätze der Motorwagen-Konfigurationen

	Diesel Motorwagen + Diesel Aggregat [€]	Diesel Motorwagen + E-Aggregat [€]	Diesel Motorwagen + H2-Aggregat [€]
km-Satz	1,00	0,96	1,04
Tages-Satz	489,96	472,62	508,51
	FCEV Motorwagen + Diesel Aggregat [€]	FCEV Motorwagen + E-Aggregat [€]	FCEV Motorwagen + H2-Aggregat [€]
km-Satz	1,25	1,21	1,28
Tages-Satz	609,87	592,53	628,43
	BEV Motorwagen + Diesel Aggregat [€]	BEV Motorwagen + E-Aggregat [€]	BEV Motorwagen + H2-Aggregat [€]
km-Satz	0,91	0,87	0,95
Tages-Satz	445,60	428,27	464,16

Die ökonomischen Berechnungen der Motorwagen-Konfigurationen zeigen sowohl bei den km-Sätzen als auch bei den Tages-Sätzen ein mit den Sattelzug-Konfigurationen vergleichbares Ergebnis wobei der FCEV Motorwagen unabhängig von der Art des Kühlaggregates die höchsten Preise bei den Kilometer- und den Tages-Sätzen aufweist. Nachfolgend an zweiter Stelle steht der Diesel-Motorwagen, die günstigste Variante bildet derzeit der Motorwagen mit Elektroantrieb ab.

Motorwagen sind unabhängig von der Konstellation in allen Kilometer- und Tages-Sätzen günstiger als die Sattelzug-Varianten. Für Sattelzüge benötigt der Logistikdienstleister u. a. aufgrund des Kaufpreises ein höheres betriebsnotwendiges Vermögen. Zudem sind die Fahrzeugeinsatzkosten bei allen Varianten etwas höher.

Lastzug

Die Gestaltung der ökonomischen Berechnungen für den Lastzug umfasst die drei Antriebsvarianten Diesel, BEV und FCEV mit den jeweils drei verschiedenen Kühlaggregatvarianten sowohl für den Motorwagen als auch für den Anhänger. Der Diesel-Lastzug wird gegenüber den Berechnungen in Kapitel „2.2 Ökonomische Analyse der aktuellen Kühlsysteme“ um das Konzept “Wasserstoff-Brennstoffzelle-Kühlsystem” am Motorwagen und am Anhänger ergänzt und ist somit am Anhänger lokal emissionsfrei.

Aufgrund der Komplexität der Kombinationsmöglichkeiten wird in der Tabelle 32 ein Überblick über die Kilometer- und Tages-Sätze der drei verschiedenen Antriebssysteme für die Lastzug-Konfiguration dargestellt. Das Kühlaggregat ist bei den Anhänger-Konfigurationen mit “KA” abgekürzt.

Tabelle 32: Überblick über die Kilometer- und Tages-Sätze der Lastzug-Konfigurationen

	Diesel Motorwagen								
	Diesel Kühlaggregat			E-Kühlaggregat			H2-Kühlaggregat		
	Anhänger [€]								
	Diesel KA	E-KA	H2-KA	Diesel KA	E-KA	H2-KA	Diesel KA	E-KA	H2-KA
km-Satz	1,13	1,10	1,17	1,10	1,06	1,13	1,17	1,13	1,20
Tages-Satz	555,73	538,12	572,89	538,12	520,51	555,28	572,89	555,28	590,04
	FCEV Motorwagen								
	Diesel Kühlaggregat			E-Kühlaggregat			H2-Kühlaggregat		
	Anhänger [€]								
	Diesel KA [€]	E-KA	H2-KA	Diesel KA	E-KA	H2-KA	Diesel KA	E-KA	H2-KA
km-Satz	1,35	1,32	1,39	1,32	1,28	1,35	1,39	1,35	1,42
Tages-Satz	662,13	644,52	679,29	644,52	626,91	661,68	679,29	661,68	696,45
	BEV Motorwagen								
	Diesel Kühlaggregat			E-Kühlaggregat			H2-Kühlaggregat		
	Anhänger [€]								
	Diesel KA	E-KA	H2-KA [Diesel KA	E-KA	H2-KA	Diesel KA	E-KA	H2-KA
km-Satz	1,03	0,99	1,06	0,99	0,95	1,02	1,06	1,02	1,10
Tages-Satz	502,38	484,77	519,53	484,77	467,16	501,92	519,53	501,92	536,69

Bei allen drei Lastzug-Konfigurationen mit Diesel-, Elektro- und Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb schneidet die Konfiguration mit dem Konzept “Rekuperationsachse + Kühlung” unabhängig davon, welches Kühlaggregat beim Motorwagen oder beim Anhänger verbaut wurde, bei den Kilometer-Sätzen und bei den Tages-Sätzen am günstigsten ab. Die Variante mit dem Konzept “Wasserstoff-Brennstoffzelle-System” ist auch bei dem Lastzug in allen Konfigurationen die derzeit noch teuerste Ausführung.

Werden an dieser Stelle nur die emissionsfreien Varianten betrachtet, so ergeben sich folgende Unterschiede:

1. Motorwagen mit Elektro-Antrieb und Anhänger mit dem Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung" als Kühlsystem ergibt im Vergleich zu dem Wasserstoff-Brennstoffzellen-Motorwagen und Anhänger mit dem gleichen Konzept eine Differenz von 34,7 % bei den Kilometer-Sätzen und eine Differenz von 34,2 % bei den Tagessätzen.
2. Motorwagen mit Elektro-Antrieb und Anhänger mit dem Konzept "Wasserstoff-Brennstoffzelle-System" bei den Kühlaggregate ergibt im Vergleich zu dem Wasserstoff-Brennstoffzellen-Motorwagen und Anhänger mit dem gleichen Konzept eine Differenz von 29,1 % bei den Kilometersätzen und eine Differenz von 29,8 % bei den Tagessätzen.

Um die starken Varianzen hinsichtlich Batterie- und Brennstoffzellentechnik bei allen betrachteten Varianten bei den Kilometer- und Tages-Sätzen anzunähern und damit auch den dringend erforderlichen Umstieg auf emissionsfreie Antriebe sowohl bei den Zugmaschinen als auch bei den Kühlaggregate in Deutschland voranzutreiben, sind insbesondere bei den Konfigurationen mit den Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieben noch weiterführende Forschungs- und Demonstrationsprojekte auch mit Blick auf eine Kostenreduktion erforderlich. Die Weiterverfolgung der Brennstoffzellentechnologie erscheint grundsätzlich auch aufgrund des größeren Anwendungsspektrums (z.B. Kühltransporte über lange Strecken) als sinnvoll.

4.2.2 Ableitung von Annahmen für die Entwicklung des zukünftigen Preisgefüges bis 2025 bzw. 2030

Mit der Feststellung, dass durch die Novellierung des Klimaschutzgesetzes 2021 der Anteil der Erneuerbaren Energien bis 2030 am deutschen Strommix stark ansteigen wird – Heneka & Mörs gehen konservativ gesehen von mindestens 65 % aus (Heneka and Mörs, 2022) – kann angenommen werden, dass sich hiermit auch die Kosten für erneuerbar hergestellten Wasserstoff und für Strom im Allgemeinen verringern werden. Diese Entwicklung wird sich in den kommenden Jahren positiv auf die Wirtschaftlichkeit emissionsfreier Kühlsysteme auswirken und die Nachfragen steigern.

Da die derzeitigen Konzepte für emissionsfreie Kühlaggregate sich noch im Entwicklungs- und Prototypen-Status befinden, ist es schwierig, konkrete Aussagen zu dem Preisgefüge zu tätigen.

Innerhalb der ökonomischen Analyse in Kapitel „2.2 Ökonomische Analyse der aktuellen Kühlsysteme“ wurde bereits darauf eingegangen, dass sich ein emissionsfreies System, das möglichst autonom betrieben werden kann, aus mehreren technischen Komponenten zusammensetzt, die bei der Analyse des Preisgefüges berücksichtigt werden müssen. Bei dem Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung" sind dieses neben dem vollelektrischen Kühlaggregate die Generator-Achse und die Hochvoltbatterie sowie Steuerungs- und Regelungstechnik. Bei dem Konzept "Wasserstoff-Brennstoffzelle-System" kommen neben dem Kühlaggregate die Brennstoffzelle, der Wasserstoffdrucktank mit den wasserstoffführenden Leitungen sowie eine Batterie und weitere Steuerungs- und Regelungstechnik zum Einsatz.

Bisher wurde davon ausgegangen, dass ein herkömmliches Kühlaggregate, das sowohl mit Diesel als auch elektrisch betrieben werden kann, rund 30.000,- € für einen Sattelzug und rund 20.000,- € für einen Motorwagen kostet. Für das Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung", welches ein vollelektrisches Kühlaggregate mit umfasst, wurden für den Sattelzug Mehrkosten in Höhe von 50 % angenommen. Für das Konzept "Wasserstoff-Brennstoffzelle" wurden Mehrkosten in Höhe von 200 % gegenüber dem Diesel-/Elektro-Aggregate veranschlagt.

Diese Annahmen basieren darauf, dass mit dem Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung" bereits erste schwere Nutzfahrzeuge ausgestattet und erprobt werden. Zudem ist das Konzept mit der Rekuperationsachse und einer Hochvoltbatterie aus dem Einsatz in batteriebetriebenen Kleinfahrzeugen erprobt und es kann dabei auf gewisse Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Während auf der IAA⁷ 2018 Trailer-Generator-Achsen noch absolutes Neuland waren, wurden diese auf der IAA 2022 gleich von mehreren Anbietern vorgestellt. Daher wird davon ausgegangen, dass dieses Konzept für schwere batteriebetriebene LKW und für Kühltransporter bis spätestens 2025 in die Serienproduktion mit aufgenommen wird und sich das Preisgefüge entsprechend der Nachfrage anpassen wird. Der von BPW und Paul Nutzfahrzeuge entwickelte Kleintransporter BAX mit einer Generator-Achse von BPW zeigt diesen Entwicklungstrend bereits auf (*BAX - Der neue elektrische LKW, no date*).

Das Konzept "Wasserstoff-Brennstoffzelle-System" ist bisher nur bei zwei französischen Herstellern von Kühlaufliegern im Rahmen von Forschungsprojekten getestet worden. Ein Kühlaggregat mit einer ins Gehäuse integrierten Wasserstoff-Brennstoffzelle und Batterie wurde bisher von einem Hersteller auf der IAA Transportation 2022 vorgestellt. Auf diesem Gebiet besteht u. a. hinsichtlich der einzusetzenden Brennstoffzellen, deren Miniaturisierung, dem abzusichernden Kühlleistungsbedarf und der Integration in das Gesamtkonzept Kühl-Trailer noch wesentlich mehr Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Die Kostenanalyse und Kostenkalkulation von Unternehmen, die Aus- und Umrüstungen auf Wasserstoff-Brennstoffzellen-Systeme anbieten, ist derzeit noch sehr individuell auf das jeweilige Fahrprofil und den Einsatzzweck des Fahrzeuges ausgelegt. Dies erschwert es, eine Entwicklung des Preisgefüges vorherzusagen. Auch hier gilt, dass die Kombination aus Klimaschutzziele, die Zunahme von Erneuerbaren Energien auf dem Strommarkt und zunehmende Restriktionen für Verbrennungsmaschinen die Entwicklung mit steigender Nachfrage vorantreiben wird und sich somit auch die Preise dem Niveau von derzeitigen "Rekuperationsachsen"-Systeme annähern werden.

Da die Systeme aus mehreren größeren Einzelkomponenten bestehen, wird die Preisentwicklung der Einzelkomponenten einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung des Gesamtkonzeptes haben. In den vergangenen mehr als zehn Jahren sind die Preise auf dem Weltmarkt für Batterien für BEV stark gesunken. Das Unternehmen Bloomberg NEF untersucht seit 2010 den Rohstoffmarkt für Batterien und konnte zwischen 2013 und 2021 einen Rückgang der Preise um rund 80,7 Prozent feststellen. Von 2021 auf 2022 kam es jedoch erstmals zu einem Anstieg der Preise für Batterien. So erhöhte sich der Durchschnittspreis für Lithium-Ionen-Batteriepakete im Jahr 2022 auf 151 Dollar pro Kilowattstunde, während es im Vorjahr noch 141 Dollar waren. Die Preise beziehen sich dabei auf einen Durchschnitt, in den neben Elektroautos auch andere Elektrofahrzeuge, Busse und stationäre Speicher eingehen. Die Preise für ein Batteriepaket bei reinen Elektroautos lagen 2022 bei durchschnittlich 138 Dollar/kWh. Die Gründe für diese Preisentwicklung waren u. a. steigende Rohstoffpreise und die allgemein hohe Inflation. Für Europa kamen zudem noch die Importkosten für die Einfuhr der Batterien aus Asien hinzu. Eine teilweise Kompensation des Kostendrucks konnte durch günstigere Batteriematerialien bei anderen Batteriekonzepten erreicht werden, jedoch nicht bei Lithiumeisenphosphat-Batteriepaketen, die in Elektro-Autos verbaut sind und sich von 2021 auf 2022 um 27 Prozent verteuerten.

Unabhängig davon hat trotz der gestiegenen Preise die Nachfrage nach Batterien nochmal deutlich zugenommen. Bloomberg NEF geht für die nächsten Jahre von etwa konstanten Batteriepreisen aus und prognostiziert für 2024 u. a. aufgrund höherer Lithiumförderraten sogar wieder einen Rückgang der Preise. Bis 2026 wird erwartet, dass die durchschnittlichen Preise für Batteriepakete sogar auf unter 100 Dollar pro Kilowattstunde fallen, was sich auf die Markteinführung günstigerer Elektro-Autos auswirken dürfte ('Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of \$151/kWh', 2022). Im Hinblick auf die zukünftige Preisentwicklung der beiden innerhalb der Studie betrachteten

⁷ IAA: Internationale Automobil-Ausstellung

Konzepte wird vor allem das Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung" von der erwarteten Konstanz und dem zukünftigen Rückgang bei der Preisentwicklung der Batterietechnologie profitieren.

Laut einer Studie von Roland Berger zu den "Potenzialen der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg" spielt der Mobilitäts- und Verkehrssektor für die weitere Marktentwicklung im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen und zur Erreichung der Klimaziele auch in Deutschland eine zentrale Rolle. Auf Basis der Annahmen zum europäischen Markt geht Roland Berger von einem starken Wachstum der FCEV in Deutschland aus mit rund 660.000 Pkw, 4.800 Busse und LKW sowie 39.000 leichten Nutzfahrzeugen bis 2030 und in 2050 von rund 8 Mio. Pkw, 26.000 Busse, 250.000 LKW sowie 510.000 leichten Nutzfahrzeugen. Diese Entwicklung und der rasche Markthochlauf sind jedoch nur möglich, wenn entsprechende Produktionskapazitäten in Deutschland und Europa geschaffen werden und Produkte bereitgestellt werden, die reif für die kommerzielle Serienfertigung und zu wettbewerbsfähigen Preisen verfügbar sind (Uwe Weichenhain *et al.*, no date). Ausgehend von dieser Prognose, die insgesamt für Europa eine Zunahme des Anteils an FCEV voraussagt, kann mit einem erhöhten Bedarf an wasserstoffführenden Komponenten in den nächsten fünf bis zehn Jahren gerechnet werden. Es wird daher davon ausgegangen, dass auch das Konzept "Wasserstoff-Brennstoffzellen-System" in naher Zukunft durch Skaleneffekte von stark abnehmenden Preisen für Brennstoffzellen und Wasserstoff-Drucktanks profitieren wird.

4.3 Ökologische Analyse emissionsfreier Kühlsysteme

In Erweiterung der bereits durchgeführten ökologischen Berechnungen für die aktuellen Systeme werden nun die Berechnungen für emissionsarmen Systeme durchgeführt, um die konkreten THG-Einsparungspotentiale auf Basis der neuen Technologien zu quantifizieren. Dabei werden die Gesamtsysteme (Traktion + Kühlung) betrachtet und zur Vergleichbarkeit gelten die gleichen Berechnungsgrundlagen wie für die ökologische Analyse der aktuellen Kühlsysteme in Kapitel „2.3 Ökologische Analyse der aktuellen Kühlsysteme“.

Mit Hilfe des DSLV-Leitfadens können auch für die emissionsfreien Systeme die Treibhausgasemissionen für Well-to-Wheel (WtW) anhand der folgenden Formel ermittelt werden:

$$(3) \quad G_w = F * g_w$$

G_w = Well-to-Wheel-THG-Emissionen in kg CO₂-Äquivalente (CO₂e)

F = Gemessener Energieverbrauch (z. B. l, kg oder kWh)

g_w = Well-to-Wheel-THG-Emissionsfaktor von gemessenen Werten in kg CO₂e/l, kg CO₂e/kg oder kg CO₂e/kWh

Für die Wasserstoffbereitstellung werden die WtT-Emissionsfaktoren der folgenden Herstellungsverfahren berücksichtigt:

- On-Site-Elektrolyse mit Offshore-Windenergie (WE-Off) / grüner H₂
- On-Site-Elektrolyse mit Onshore-Windenergie (WE-On) / grüner H₂
- Mittelwert aus grünem Onshore-Windenergie und grauem Wasserstoff Dampfreformierung (grauer Wasserstoff)
- Dampfreformierung mit Erdgas / grauer H₂
- On-Site-Elektrolyse mit dem deutschen Strommix

Die in der Tabelle 33 aufgeführten Werte für die Wasserstoffbereitstellung aus On- und Offshore-Windenergie (WE) und aus der Dampfreformierung von Erdgas stammen aus einer Veröffentlichung von Heneka *et al.* und geben Werte für das Jahr 2020 wieder (Heneka and Mörs, 2022). Der Wert

Wasserstoffbereitstellung aus dem deutschen Strommix ist aus einer Veröffentlichung von Kühnel et al. und gibt eine Prognose für das Jahr 2025 wieder. Bei den Werten handelt es sich um Well-to-Tank-Angaben, da Wasserstoff emissionsfrei verbrennt bzw. durch die Brennstoffzelle verwertet wird. Untenstehend werden die berechneten Werte auch als Well-to-Wheel-Werte dargestellt, um den Vergleich mit den anderen Kraftstoffen zu vereinfachen.

Tabelle 33: Wasserstoffbereitstellung WtT-THG-Emissionen (gw) mit Umrechnung (S. Kühnel, F. Hacker, and W. Görz, 2018; Heneka and Mörs, 2022)

Herstellungsverfahren	g CO ₂ /kWh H ₂	kg CO ₂ /kWh H ₂	kg CO ₂ /kg H ₂
On-Site Elektrolyse (Windenergie Offshore) grüner H ₂	9	0,009	0,300
On-Site Elektrolyse (Windenergie Onshore) grüner H ₂	16	0,016	0,533
Mittelwert aus grün (Windenergie Onshore) und grauer H ₂	171	0,171	5,699
Dampfreformierung (Erdgas) grauer H ₂	310	0,31	10,332
On-Site-Elektrolyse (Strommix D)	824	0,824	27,464

Bei der Umrechnung der Werte wurde der Energiegehalt von Wasserstoff mit 33,33 kWh/kg angesetzt.

Schritt 1: Berechnung der Well-to-Wheel THG-Emissionen

Auf Basis der ermittelten Grundlagen erfolgte die Berechnung der THG-Emissionen für Sattelzüge Motorwagen sowie für die Anhänger und die emissionsfreien sowie aktuellen Kühlsysteme.

Zur Veranschaulichung werden in der Tabelle 34 die Energieverbräuche der Fahrzeuge und Kühlaggregate dargestellt:

Tabelle 34: Energieverbräuche LKW und Kühlaggregate

Energieverbrauch F	Diesel B7	Strom	Wasserstoff
Sattelzugmaschine (SZM)	26 l/100 km	106 kWh/100 km	7,48 kg/100 km
Kühlaggregat SZ	3,7 l/h	8 kWh/h	0,62 kg/h
Motorwagen (MW)	26 l/100 km	106 kWh/100 km	7,48 kg/100 km
Kühlaggregat MW/Lastzug	2,46/4,92 l/h	5,3/10,6 kWh/h	0,41/0,82 kg/h

In der Tabelle 35 werden die Ergebnisse der mit der Formel (1) berechneten WtW-THG-Emissionen für die Sattelzugmaschine und den Motorwagen mit Wasserstoff-Brennstoffzelle bezogen auf 100 km dargestellt.

Tabelle 35: WtW-THG-Emissionen FCEV in kgCO₂e/100 km

FCEV	Energieverbrauch F in kg/100 km	WtW-THG-Emissionen grün WE-Off in CO ₂ e/100 km	WtW-THG-Emissionen grün WE-On in CO ₂ e/100 km	WtW-THG-Emissionen grün (WE-On)/grau in CO ₂ e/100 km	WtW-THG-Emissionen grau Dampfref. in CO ₂ e/100 km	WtW-THG-Emissionen Strommix in kg CO ₂ e/100 km
Sattelzugmaschine	7,48	2,24	3,99	42,63	77,29	205,43
Motorwagen	7,48	2,24	3,99	42,63	77,29	205,43

Innerhalb der ökonomischen Berechnung wurde der Wasserstoffverbrauch für die Sattelzugmaschine und den Motorwagen mit den gleichen Werten angesetzt, so dass die Ergebnisse für den Betrieb mit den unterschiedlich hergestellten Wasserstoffvarianten gleich sind.

Die geringsten WtW-THG-Emissionen über der gesamten Wertschöpfungskette entstehen beim Einsatz von grünem Wasserstoff aus Offshore- und Onshore-Windenergie unter Berücksichtigung der Herstellung als On-Site-Elektrolyse. Durch die Nutzung von über die Dampfreformierung von Erdgas hergestellten grauen Wasserstoff erhöht sich der THG-Wert gegenüber der Nutzung von Wasserstoff aus Offshore-Windenergie um das 34,5-fache. Bei der Wasserstoffherstellung mit dem deutschen Strommix sind die WtW-THG-Emissionen der FCEV-Fahrzeuge sogar um das 91,7-fache höher als bei der Nutzung von grünem Wasserstoff aus Offshore-Windenergie.

Die derzeit in Deutschland aufgebauten Wasserstoff-Tankstellen bieten zumeist grauen Wasserstoff und teilweise bereits grünen Wasserstoff an (*H2.LIVE: Wasserstofftankstellen in Deutschland & Europa*, no date). Daher erfolgte eine weitere Berechnung mit einem Mix aus grau und grün hergestelltem Wasserstoff, dessen WtW-THG-Emissionen bei den Nutzfahrzeugen um 44,8 Prozent geringer sind als bei rein grauem Wasserstoff.

Zur Berechnung der WtW-THG-Emissionen der BEV LKW wurde entsprechend zu Kapitel „2.3 Ökologische Analyse der aktuellen Kühlsysteme“ der Mittelwert aus den Angaben der drei Veröffentlichungen Kühnel et al. (S. Kühnel, F. Hacker, and W. Görz, 2018), Heneka et al. (Heneka and Mörs, 2022) und Helms et al. (Hinrich Helms et al., 2019) zu den THG-Emissionen des deutschen Strommixes im Jahr 2020 als Grundlage genommen.

Nachfolgend werden in der Tabelle 36 die Ergebnisse der mit der Formel (1) berechneten WtW-THG-Emissionen für die Sattelzugmaschine und den Motorwagen mit Elektro-Antrieb bezogen auf 100 km dargestellt. Diese sind wie bei den FCEV für die Sattelzugmaschine und den Motorwagen gleich.

Tabelle 36: WtW-THG-Emissionen BEV in kgCO₂e/100 km

BEV	Energieverbrauch F in kWh/100 km	WtW-THG-Emissionen dt. Strommix 2020 in kg CO ₂ e/100 km	WtW THG-Emissionen, Grünstrom aus WE-On und Off in kg Co ₂ e/100 km
Sattelzugmaschine	106	44,45	2,31
Motorwagen	106	44,45	2,31

Zwischen den WtW-THG-Emissionen berechnet nach dem deutschen Strommix 2020 und den Werten berechnet mit grünem Strom aus On- und Offshore-Windenergie liegt eine Differenz von 42,14 kg CO₂e pro 100 km, die durch die Nutzung ökologisch hergestellten Stroms eingespart werden können.

Für die Berechnung der WtW-THG-Emissionen der Kühlaggregate wurde der innerhalb der ökonomischen Berechnungen angenommene Energieverbrauch der Aggregate als Grundlage genommen. In Kapitel „2.2 Ökonomische Analyse der aktuellen Kühlsysteme“ wurden die THG-Emissionen bereits für ein mit Diesel und Strom betriebenes Kühlaggregat berechnet. Nachfolgend werden die Ergebnisse für ein wasserstoffbetriebenes Aggregat aufgeführt.

Die Tabelle 37 zeigt die WtW-THG-Emissionen für Wasserstoff-Kühlaggregate, die mit Wasserstoff aus unterschiedlichen Herstellungsprozessen betrieben werden.

Tabelle 37: WtW-THG-Emissionen H₂-Kühlaggregate Sattelzug und Lastzug in kgCO₂e/h

Wasserstoff	Energieverbrauch F in kg/h	WtW-THG-Emissionen grün WE-Off in kg CO ₂ e/h	WtW-THG-Emissionen grün WE-On in kg CO ₂ e/h	WtW-THG-Emissionen grün (WE-On)/grau in kg CO ₂ e/h	WtW-THG-Emissionen grau Dampfref. in kg CO ₂ e/h	WtW-THG-Emissionen Strommix in kg CO ₂ e/h
Kühlaggregat Sattelzug	0,62	0,19	0,33	3,53	6,41	17,03
Kühlaggregate Lastzug	0,82	0,25	0,44	4,67	8,47	22,52

Die errechneten Emissionen gelten jeweils für den stundenweisen Betrieb des Aggregates. Zur Ermittlung der THG-Emissionen wurde der jeweilige Energieverbrauch mit dem THG-Emissionsfaktor der unterschiedlichen Wasserstoff-Herstellungsprozesse multipliziert. Bei dem Lastzug wird mit zwei Kühlaggregaten gerechnet, von denen eines am Kofferaufbau des Motorwagens und eines am Anhänger verbaut ist.

Schritt 3: Berechnung der THG-Emissionen nach Einsatzzeit der Kühlaggregate

Die Jahreseinsatzzeit der Kühlaggregate wird der ökonomischen Berechnung aus Kapitel „2.2 Ökonomische Analyse der aktuellen Kühlsysteme“ entnommen. Für Kühlaggregate mit der Möglichkeit des Diesel- und Elektrobetriebs werden 1.200 Stunden Jahreslaufleistung im Dieselbetrieb und 350 Stunden im Netzbetrieb angenommen. Für Kühltrailer mit dem Konzept „Rekuperationsachse + Kühlung“ werden rein 350 Stunden angesetzt, in denen das Kühlaggregat sich beispielsweise auf dem Betriebs- hof oder im Depot im Netzbetrieb befindet. Bei Fahrzeugen, die über das Konzept „Wasserstoff-Brennstoffzellen-System“ verfügen, wurde eine Jahreslaufleistung mit Wasserstoff in Höhe von 1.200 Stunden angesetzt. Zudem wurden 350 Stunden Netzbetrieb für Aufenthalte im Betriebs- hof oder in Depots vorgesehen.

Zum direkten Vergleich werden in den nachfolgenden Tabelle 38 bis Tabelle 41 die Berechnungsergebnisse für alle betrachteten Konfigurationen dargestellt. Der betrachtete Lastzug besteht aus einem Motorwagen und einem Anhänger mit jeweils getrennten Kühlaggregaten. Bei der Berechnung der betriebsbedingten THG-Emissionen der Kühlaggregate werden die von dem Kraftstoff- / Stromverbrauch des Kühlaggregates abhängigen WtW-THG-Emissionen mit der jeweiligen Jahreseinsatzzeit multipliziert. Die Kühlaggregate des Lastzuges haben gegenüber den Kühlaggregaten des Sattelzuges aufgrund der geringeren Kühlleistung einen geringeren Verbrauch.

Die Tabelle 38 gibt die THG-Emissionen eines Diesel-/Elektro-Kühlaggregates über die Jahreseinsatzzeit für den Diesel- und den Netzbetrieb wieder. Die Gesamtemissionen belaufen sich für das Kühlaggregat des Sattelzuges auf ca. 15 t CO₂e und für die beiden Kühlaggregate des Lastzuges auf ca. 20 t CO₂e.

Tabelle 38: THG-Emissionen bezogen auf die Jahreseinsatzzeit für Kühlaggregate mit Diesel-/Elektrobetrieb

Diesel-/Elektro-Kühlaggregat	Jahreseinsatzzeit [h] Dieselbetrieb	Jahreseinsatzzeit [h] Netzbetrieb	WtW THG-Emissionen Diesel in kg CO ₂ e	WtW-THG-Emissionen dt. Strommix 2020 in kg CO ₂ e	WtW-THG-Gesamtemissionen in kg CO ₂ e
Kühlaggregat Sattelzug	1.200	350	13.884,73	1.174,04	15.058,77
Kühlaggregate Lastzug	2.400	700	18.462,94	1.555,6	20.018,54

Bei Kühltrailern, die mit dem Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung" ausgerüstet sind, wird davon ausgegangen, dass die Generator-Achse das Kühlaggregat über weite Strecken des Fahrbetriebes mit Energie versorgt. Wird die Hochvoltbatterie, die das Kühlaggregat mit Energie speist, über den Netzbetrieb geladen, erfolgt auch die Versorgung des Kühlaggregats mit Strom aus dem Netz.

Die Tabelle 39 zeigt, dass die dabei entstehenden WtW-THG-Emissionen durch den Einsatz von Erneuerbaren Energien, hier in Form von On- und Offshore-Windenergie, sehr stark reduziert werden können.

Ungeachtet der Tatsache, dass das Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung" in Lastzügen noch nicht verbaut wurde, soll es bei den Berechnungen der WtW-THG-Emissionen mitberücksichtigt werden.

Tabelle 39: THG-Emissionen bezogen auf die Jahreseinsatzzeit für Kühlaggregate mit dem Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung" mit Netzbetrieb

Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung"	Jahreseinsatzzeit [h] Netzbetrieb	WtW-THG-Emissionen dt. Strommix 2020 in kg CO ₂ e	WtW THG-Emissionen, Strom aus WE-On und Off in kg CO ₂ e
Kühlaggregat Sattelzug	350	1.174	61,00
Kühlaggregate Lastzug	700	1.555,6	80,82

Das Konzept "Wasserstoff-Brennstoffzellen-System" wurde bislang im Rahmen technologischer Forschung bzw. erster Produktdemonstration bei zwei französischen Herstellern von Kühlaufliegern untersucht. Es wird nicht ausgeschlossen, dass das Konzept auch als Versorgungseinheit für die Kühlaggregate von Lastzügen zum Einsatz kommen kann. Die diesbezüglichen Berechnungen unterteilen sich in die beiden Anwendungen Wasserstoffbetrieb und Netzbetrieb.

Die Tabelle 40 gibt die THG-Emissionen eines mit Wasserstoff betriebenen Kühlaggregates über die Jahreseinsatzzeit für unterschiedliche Wasserstoffbereitstellungen wieder. Sie zeigt auf, dass der Wasserstoffbetrieb mit aus Offshore-Windenergie und Onsite hergestelltem Wasserstoff die geringsten WtW-THG-Emissionen verursacht. Die höchsten Emissionen entstehen, wenn der eingesetzte Wasserstoff mit Energie aus dem deutschen Strommix hergestellt wird.

Tabelle 40: THG-Emissionen bezogen auf die Jahreseinsatzzeit für Kühlaggregate mit dem Konzept "Wasserstoff-Brennstoffzelle" mit Wasserstoffbetrieb

Konzept "Wasserstoff-Brennstoffzelle"	Jahreseinsatzzeit [h] Wasserstoffbetrieb	WtW-THG-Emissionen grün WE-Off in kg CO _{2e}	WtW-THG-Emissionen grün WE-On in kg CO _{2e}	WtW THG-Emissionen grün (WE-On) /grau in kg CO _{2e}	WtW-THG-Emissionen grau Dampfref. in kg CO _{2e}	WtW-THG-Emissionen Strommix in kg CO _{2e}
Kühlaggregat Sattelzug	1.200	223,18	396,76	4.240,38	7.687,23	20.433,16
Kühlaggregate Lastzug	2.400	302,37	537,55	5.745,03	10.414,96	27.683,63

In der Tabelle 41 ist der mögliche Netzbetrieb des Konzepts "Wasserstoff-Brennstoffzelle-System" dargestellt. Vergleichbar zu den Berechnungsergebnissen des Konzeptes "Rekuperationsachse + Kühlung" hängen auch hier die WtW-THG-Emissionen stark von der Zusammensetzung des eingesetzten Stroms ab.

Tabelle 41: THG-Emissionen bezogen auf die Jahreseinsatzzeit für Kühlaggregate mit dem Konzept "Wasserstoff-Brennstoffzelle" mit Netzbetrieb

Konzept "Wasserstoff-Brennstoffzelle"	Jahreseinsatzzeit [h] Netzbetrieb	WtW-THG-Emissionen dt. Strommix 2020 in kg CO _{2e}	WtW THG-Emissionen, Strom aus WE-On und Off in kg CO _{2e}
Kühlaggregat Sattelzug	350	1174,04	61,00
Kühlaggregate Lastzug	700	1.555,6	80,82

Die Werte in den obenliegenden Tabellen zeigen, dass Kühlaggregate, die mit Wasserstoff hergestellt aus Onsite On- und Offshore-Windenergie betrieben werden, die geringsten jährlichen WtW-THG-Emissionen erzeugen. Die höchsten WtW-THG-Emissionen entstehen beim Betrieb von Kühlaggregaten mit aus dem deutschen Strommix hergestellten Wasserstoff gefolgt von Diesel betriebenen Kühlaggregaten.

Eine Hochrechnung der Ergebnisse zu den WtW-THG-Emissionen auf den Bestand an Anhängern bzw. Aufliegern mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ ist schwierig, da die Unterteilung der Klassen O3 und O4 nicht eindeutig einem Auflieger oder dem Anhänger eines Lastzuges zugeordnet werden können.

Die Ergebnisse der ökologischen Untersuchungen zeigen, dass durch den Einsatz von emissionsfreien Antrieben bei temperaturgeführten Transporten ein Vielfaches an WtW-THG-Emissionen gegenüber Diesel betriebenen Fahrzeugen eingespart werden kann. Dies trifft insbesondere für Fahrzeuge zu, die mit Wasserstoff hergestellt aus On- und Offshore-Windenergie betrieben werden. Sehr nah beieinander und unterhalb der WtW-THG-Emissionen eines Diesel-Fahrzeuges liegen BEV-Kühlfahrzeuge, die mit Energie aus dem deutschen Strommix und FCEV-Fahrzeuge, die mit einem Mix aus grünem und grauem Wasserstoff betrieben werden. Die WtW-THG-Emissionen von FCEV-Kühltransportern mit der Energieversorgung aus grauem Wasserstoff liegen vergleichbar hoch, wie die eines Diesel-Kühltransporters. Aus Klimaschutzgründen nicht vertretbar ist derzeit insbesondere der Einsatz von FCEV-Fahrzeugen mit einer Energieversorgung aus Wasserstoff, der mit dem deutschen Strommix hergestellt wurde. Hier liegen die WtW-THG-Emissionen um das 2,5-fache über den WtW-THG-Emissionen eines dieselbetriebenen Fahrzeugs. Dieser Umstand wird sich erst in den kommenden Jahrzehnten mit einem zunehmenden Anteil an Erneuerbaren Energien am deutschen Strommix ändern (A. Klein *et al.*, 2021; *Transfrigoroute*, no date).

Schritt 4: Berechnung der THG-Emissionen auf den Bestand der temperaturgeführten LKW

Die Bestandsdaten wurden, wie im Kapitel „2.2 Ökonomische Analyse der aktuellen Kühlsysteme“ beschrieben, aus der Veröffentlichung FZ 25 des KBA für Lastkraftwagen und Kraftfahrzeuganhänger mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ entnommen. In einem ersten Schritt wurden die WtW-THG-Emissionen der unterschiedlichen LKW auf die Jahreslaufleistung berechnet.

Zur Ermittlung der WtW-THG-Emissionen von BEV und FCEV bezogen auf die Laufleistung wurden die in der ökonomischen Analyse erfasste Jahreslaufleistung in Höhe von 120.000 km für Sattel- und Lastzüge zu Grunde gelegt und mit den Ergebnissen für die Diesel-Fahrzeuge verglichen.

Die Tabelle 42 zeigt den Vergleich zwischen den jährlichen WtW-THG-Emissionen von Diesel-LKW und von BEV.

Tabelle 42: WtW-THG-Emissionen in Abhängigkeit der Jahreslaufleistung für Diesel-LKW und BEV

Diesel BEV	Jahreslaufleistung [km]	WtW-THG-Emissionen Diesel in kg CO ₂ e	WtW-THG-Emissionen dt. Strommix 2020 in kg CO ₂ e	WtW-THG-Emissionen, Grünstrom aus WE-On und Off in kg CO ₂ e
Sattelzug und Lastzug	120.000	98.280	53.334,96	2.771,14

In der Tabelle 43 sind die jährlichen WtW-THG-Emissionen für FCEV in Abhängigkeit des Wasserstoff-Herstellungsprozesses aufgeführt.

Tabelle 43: WtW-THG-Emissionen in Abhängigkeit der Jahreslaufleistung für FCEV

FCEV	Jahreslaufleistung [km]	WtW-THG-Emissionen H2 grün WE-Off in kg CO ₂ e	WtW-THG-Emissionen H2 grün WE-On in kg CO ₂ e	WtW-THG-Emissionen H2 grün (WE-On) / grau in kg CO ₂ e	WtW-THG-Emissionen H2 grau Dampref. in kg CO ₂ e	WtW-THG-Emissionen H2 Strommix in kg CO ₂ e
Sattelzug und Lastzug	120.000	2.692,53	4.786,72	51.158,08	92.742,72	246.516,15

Die Werte der beiden Tabellen verdeutlichen erneut, dass die WtW-THG-Emissionen bei FCEV, die mit Wasserstoff hergestellt aus On- und Offshore-Windenergie betrieben werden, die niedrigsten Emissionswerte aufweisen. Die WtW-THG-Emissionen eines BEV, der mit Strom aus dem deutschen Strommix versorgt wird, ähneln denen eines FCEV, das mit einem Mix aus grünem Onshore-Windenergie-Wasserstoff und grauem Wasserstoff betrieben wird. Die Werte des Diesel-LKW liegen rund 5.500 kg CO₂e über den Werten eines mit grauem Wasserstoff betriebenen FCEV. Mit sehr großem Abstand zu den anderen Konfigurationen liegen die Werte eines mit Wasserstoff hergestellt aus dem Strommix betriebenen Kühl-Lastkraftwagens.

Nachfolgend werden nun die auf die Laufleistung bezogenen WtW-THG-Emissionen auf den Bestand der Nutzfahrzeuge mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ projiziert und für die einzelnen Varianten jeweils für den Gesamtbestand berechnet. Hieraus ergeben sich die in Tabelle 44 und Tabelle 45 aufgeführten WtW-THG-Emissionen in t CO₂-Äquivalent, die eine Einordnung der Technologien hinsichtlich ihrer Klimawirkung bei einem theoretischen „sortenreinen“ Bestand ermöglichen.

Tabelle 44: WtW-THG-Emissionen bezogen auf den Nutzfahrzeugbestand für Diesel-LKW und BEV

KBA-Daten 01. Januar 2022	Bestand	WtW-THG-Emissionen Diesel in t CO ₂ e	WtW-THG-Emissionen dt. Strommix 2020 in t CO ₂ e	WtW THG-Emissionen, Strom aus WE-On und Off in t CO ₂ e
LKW mit Isolieraufbau + Kühlung N2	12.831	1.261.030,68	684.340,87	35.556,46
LKW mit Isolieraufbau + Kühlung N3	16.590	1.630.465,20	884.826,99	45.973,16

Tabelle 45: WtW-THG-Emissionen bezogen auf den Nutzfahrzeugbestand für FCEV

KBA-Daten 01. Januar 2022	Bestand	WtW-THG-Emissionen H ₂ grün WE-Off in t CO ₂ e	WtW-THG-Emissionen H ₂ grün WE-On in t CO ₂ e	WtW-THG-Emissionen H ₂ grün (WE-On) / grau in t CO ₂ e	WtW-THG-Emissionen H ₂ grau Dampref. in t CO ₂ e	WtW-THG-Emissionen H ₂ Strommix in t CO ₂ e
LKW mit Isolieraufbau + Kühlung N2	12.831	34.547,86	61.418,42	656.409,37	1.189.981,90	3.163.048,67
LKW mit Isolieraufbau + Kühlung N3	16.590	44.669,08	79.411,71	848.712,61	1.538.601,80	4.089.702,86

Bezogen auf den Fahrzeugbestand von temperaturgeführten LKW der Klassen N2 und N3 stoßen Dieselfahrzeuge rund das 36-fache mehr an CO₂e-Emissionen aus als LKW, die mit grünem Wasserstoff aus Offshore-Windenergie betrieben werden. Bei einem FCEV, der mit einem Mix aus grünem und grauem Wasserstoff betrieben wird, können die WtW-THG-Emissionen gegenüber dem Diesel-LKW um rund 48 % sowohl für N2- als auch für N3-LKW reduziert werden. Demgegenüber liegen die WtW-THG-Emissionen von Diesel-Kühlfahrzeugen im Vergleich zu den FCEV, die mit grauem Wasserstoff betrieben werden, mit einer Emissionsminderung von knapp 5,6 % sehr nah beieinander. Ähnlich verhält es sich im Vergleich zwischen einem mit aus dem deutschen Strommix betriebenen Kühlfahrzeug und den THG-Emissionen eines Fahrzeugs, dass mit einem Mix aus grünem und grauem Wasserstoff betrieben wird. Hier liegen die prozentualen Emissionsminderungen bei rund 4,1 %. Das mit Wasserstoff aus dem deutschen Strommix betriebene FCEV liegt auch hier in weitem Abstand zu den anderen LKW. Gegenüber dem Diesel-Fahrzeug liegen die WtW-THG-Emissionen bei dem 2,5-fachen Wert.

4.4 Betrachtung der Betankungs- und/oder Ladeinfrastruktur

Um Klimaneutralität in Deutschland und Europa zu erreichen, muss parallel zum Ausbau einer emissionsfreien Mobilität die hierfür notwendige Betankungs- und Ladeinfrastruktur aufgebaut werden. Insbesondere für den Schwerlastverkehr sind Lösungen notwendig, da sich die Fahrzeuganzahl hier seit 1999 mehr als verdoppelt hat und die CO₂-Emissionen im Schwerlastbereich um 29 % angestiegen sind (*Mehr Ladestationen für E-Lkw | EnBW, 2022*).

In die Betrachtung der Betankungs- und Ladeinfrastruktur wurde hier das bestehende Betankungsnetz für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge und die Ladeinfrastruktur für Elektro-Fahrzeuge sowie die zukünftigen Planungen aufgenommen. Neben den aufgeführten Betankungs- und Ladeinfrastrukturen sollten in die zukünftigen Planungen auch entsprechende Tankinfrastrukturen auf Betriebshöfen von Logistikdienstleistern mit aufgenommen werden.

4.4.1 Tankinfrastruktur für Brennstoffzellenfahrzeuge

Auf der Webseite H2.Live der H2 Mobility Deutschland GmbH & Co. KG (*H2.LIVE: Wasserstofftankstellen in Deutschland & Europa*, no date) kann der aktuelle Stand des Ausbaus der Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur in Deutschland und den angrenzenden Ländern verfolgt werden. Mit Stand vom März 2023 zeigt sich die folgende Betankungsinfrastruktur:

- 700 bar-Druckstufe: 162 eröffnete und 41 in der Realisierung befindliche H₂-Tankstellen
- 350 bar-Druckstufe: 51 eröffnete und 39 in der Realisierung befindliche H₂-Tankstellen

Die 700 bar-Druckstufe wird aktuell hauptsächlich von PKW und vereinzelt von Nutzfahrzeugen, wie Müllsammelfahrzeugen getankt. Mit 350 bar-Technologie fahren bei den heute verfügbaren Modellen im Wesentlichen Busse und Nutzfahrzeuge. Alleine in Deutschland sind derzeit 93 Wasserstoff-Tankstellen für die 700 bar Betankung und einige wenige H₂-Tankstellen für die 350 bar-Druckstufe in Betrieb. Die Betankungsinfrastruktur ist demnach bei weiterer Verfolgung der 350 bar-Technologie für Nutzfahrzeuge der Klassen N2 und N3 nicht hinreichend ausgebaut.

Es gibt neben den Aktivitäten von H2 Mobility weitere Initiativen und Vereinbarungen zum Ausbau der Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur. Einige davon werden hier kurz vorgestellt:

- Der Fahrzeughersteller Nikola Energy und der Energieversorger E.ON Hydrogen planen im Rahmen eines Joint Venture die gesamte Wertschöpfungskette der Wasserstoffindustrie abzudecken. Hierzu zählt neben dem Aufbau einer (grünen) stationären und mobilen Betankungsinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge in Europa auch die Bereitstellung von FCEV-Fahrzeugen und deren Wartung. Anfang 2023 will das Joint Venture den Betrieb aufnehmen (*electrive.net*, 2022).
- Im Mai 2021 haben die Daimler Truck AG und Shell New Energies NL B. V. eine Vereinbarung zum Ausbau eines (grünen) H₂-Tankstellennetzes zwischen den Produktionsstandorten Rotterdam, Köln und Hamburg und der Herstellung von schweren FCEV-LKW abgeschlossen. Ab 2024 soll der Betrieb von Tankstellen starten und ab 2025 die Kundenübergabe erster FCEV-Nutzfahrzeuge erfolgen. Der benannte Korridor soll ab 2025 bereits eine Länge von 1.200 km und ab 2030 insgesamt 150 Tankstellen sowie 5000 schwere Brennstoffzellen-Fahrzeuge von Mercedes-Benz umfassen (*IWR*, 2021).
- Das Next Mobility Accelerator Consortium der Unternehmen Paul Nutzfahrzeuge GmbH, Energiehändler MaierKorduletsch Gruppe und die Shell Deutschland GmbH bauen gemeinsam eine Wertschöpfungskette von der Wasserstoffproduktion, über die Bereitstellung von FCEV-LKW bis zum Service aus (*Next Mobility Accelerator Consortium für grünen Wasserstoff H2 - next-mobility.eu*, no date).

Seitens der Bundesregierung erfolgt eine Förderung emissionsfreier Nutzfahrzeuge und Omnibusse, um den Umstieg auf eine klimaneutrale Mobilität zu beschleunigen. Anfang 2022 waren rund 43.400 batteriebetriebene LKW in Deutschland registriert. Um diese Entwicklung voranzutreiben, ist eine entsprechende Ladeinfrastruktur für LKW erforderlich, insbesondere vor dem Hintergrund, dass seitens der EU der Aufbau eines Schnellladennetzes für LKW von den Mitgliedsstaaten gefordert wird. Bis 2025 soll danach an den jeweiligen Hauptverkehrsachsen alle 60 Kilometer eine Ladestation mit einer Kapazität von 1,4 Megawatt errichtet werden (*Mehr Ladestationen für E-Lkw | EnBW*, 2022). Ob dieser Ausbau für einen signifikanten Technologiewechsel auf Hintergrund der aktuell eingesetzten Fahrzeugzahlen ausreichend ist, erscheint sehr zweifelhaft.

4.4.2 Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeuge

Im Oktober 2022 hat die Bundesregierung den „Masterplan Ladeinfrastruktur II“ als neue Gesamtstrategie sowohl für die PKW- als auch für die LKW-Ladeinfrastruktur vorgelegt. Zur Koordination und Abstimmung der Maßnahmen wurde eine ressortübergreifende „Interministerielle Steuerungsgruppe Ladeinfrastruktur“ (ISLa) gebildet. Die Planung der Ausbauaktivitäten und Umsetzung der Maßnahmen wird dabei von der „Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur“ (NLL) unter dem Dach der NOW GmbH unterstützt. (*Bundesregierung beschließt Masterplan Ladeinfrastruktur II*, 2022)

Ab 2025 gelten auch für schwere Nutzfahrzeuge die CO₂-Flottengrenzwerte, womit der Druck für den Hochlauf der Elektromobilität im LKW-Sektor und der Aufbau der passenden Ladeinfrastruktur erhöht wird. Verschiedene Untersuchungen und Studien beschäftigen sich mit dem Aufbau und mit Standorten einer Ladeinfrastruktur, den Ladeszenarien und Ladeleistungen für LKW. Nachfolgend wird eine Auswahl vorgestellt:

- Die „Nationale Plattform Zukunft der Mobilität“ hat in der AG 5 (Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung) einen Bericht zu der „Ladeinfrastruktur für batterieelektrische LKW“ ausgearbeitet. Innerhalb des Berichtes wurden auf Basis des Combined Charging Standards (CCS) Ladeszenarien für das Depot-Laden und das öffentliche Laden entwickelt sowie mögliche Standorte und die Wirtschaftlichkeit betrachtet. (Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, and Arbeitsgruppe 5 „Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung“, 2021)
- In dem von der „Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur“ vergebenen Gutachten „Einfach laden an Rastanlagen“ wurden Kriterien und Aspekte für die Auswahl, Bewertung, Planung und Auslegung des Netzanschlusses für E-LKW-Lade-Hubs entlang des Autobahnnetzes erarbeitet. (Stefan Kippelt and Marco Greve, 2022)
- Im Auftrag des Europäischen Automobilherstellerverbandes ACEA hat das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI eine Studie zu dem Thema „Wie sieht eine europäische Ladeinfrastruktur für Batterie-Lkw aus?“ erarbeitet. Innerhalb der Studie wurde auf Basis von Langstrecken-Halteorten und regionalen Halteorten eine Empfehlung für eine künftige Ladeinfrastruktur für BEV-LKW ausgesprochen (P. Plötz and D. Speth, 2021; *Wie sieht eine europäische Ladeinfrastruktur für Batterie-Lkw aus?*, 2021).
- Innerhalb des Projektes „HoLa - Hochleistungsladen im LKW-Fernverkehr“ werden an vier Standorten entlang einer Demonstrationsstrecke zwischen Berlin und dem Ruhrgebiet je zwei Hochleistungsladepunkte mit dem Megawatt Charging System (MCS) und dem CCS-System aufgebaut und im realen Logistikbetrieb erprobt. Das Verbundvorhaben mit 13 Konsortialpartnern und 8 assoziierten Partnern ist eines der zentralen Technologie- und Erprobungsprojekte des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) und soll wesentliche Erkenntnisse zum Einsatz von BEV-Nutzfahrzeugen im Fernverkehr liefern (*Hochleistungsladen im Lkw-Fernverkehr: Projekt HoLa*, no date).

Aktuell bestehen noch Unsicherheiten, welche Technologien sich in welchem Marktumfang durchsetzen werden und wie groß der Bedarf an einer wirtschaftlich betreibbaren Ladeinfrastruktur ist. Diese Faktoren haben einen maßgeblichen Anteil an dem geplanten Infrastrukturaufbau. Die AG 5 der „Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität“ unterscheidet in ihrem Bericht zwischen dem privaten Depot-Laden und dem öffentlichen Laden von Nutzfahrzeugen. Der erste initiale Aufbau eines öffentlichen Ladenetzes sollte auf Basis des Standards CCS-Technologie mit Zwischenlösungen bis zur Einfüh-

rung des MCS-Standards erfolgen. Dabei soll die Umstellung auf MCS insbesondere an stark frequen-
 tierten Ladeorten gleich mit vorbereitet werden und eine Abwärtskompatibilität auf die Nutzung von
 CCS-Steckern Typ 2 erhalten bleiben. Das Depot-Laden und die Ausstattung von Betriebshöfen mit ent-
 sprechender finanzieller Förderung wurde als prioritär erachtet, gefolgt von Logistikhöfen und öffent-
 lichen Ladepunkten (siehe Abbildung 39).

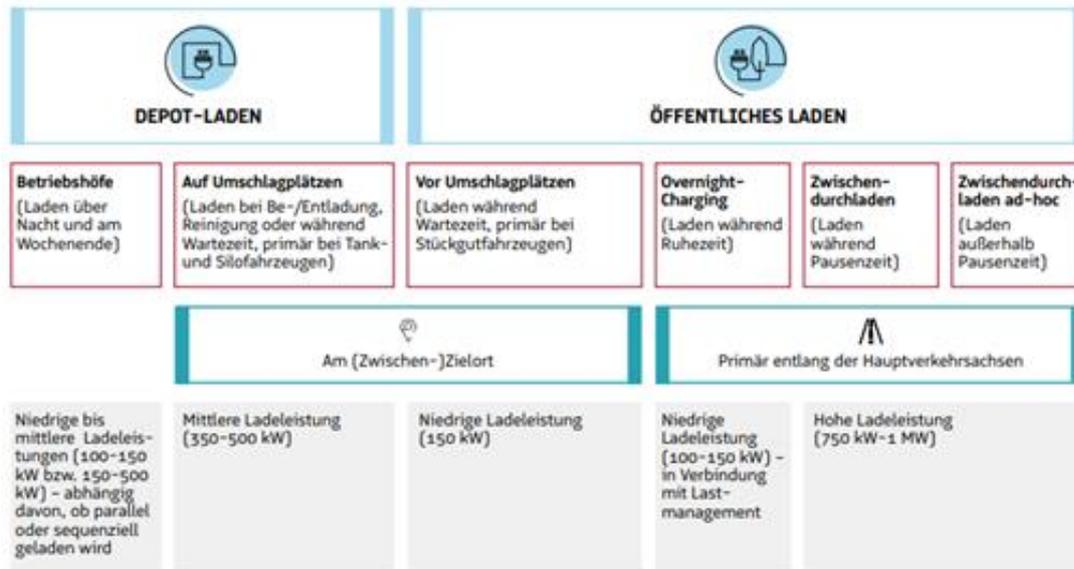


Abbildung 39: Ladeszenarien mit seitens der AG 5 der „Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität“ empfohlenen Ladeleistungen (Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, and Arbeitsgruppe 5 „Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung“, 2021)

Beim öffentlichen Laden werden besondere Herausforderungen hinsichtlich der Standorte, neuer möglicher Flächen und der Wirtschaftlichkeit gesehen. Zudem wird ein standardisierter Anschlusspunkt der Ladebuchse an batteriebetriebenen LKW empfohlen, um die Stellplatzplanung darauf auszurichten. Dieser Aspekt müsste auch im Hinblick auf die Ladung von Hochvoltbatterien für das Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung" oder für die direkte Ladung von elektrischen Kühlaggregaten mitgedacht werden. Für ein zeitlich genau planbares und verlässliches Transportmanagement empfiehlt die AG 5 ein Reservierungssystem für öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur. Hinsichtlich der Netzanschlüsse sieht die AG 5 den Mittelspannungsbereich im Vordergrund ggf. mit der Zulassung eines statischen und dynamischen Lastmanagements und an Standorten mit sehr hohen Ladeleistungen Puffersysteme, wie z. B. Batteriespeicher, sowie Eigenstromerzeugung zum Abfangen von Lade-Peaks.

Innerhalb des für die „Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur“ erstellten Gutachtens „Einfach laden an Rastanlagen“ wurde die erforderliche Ausstattung von drei prototypischen Lade-Hubs entlang des Autobahnnetzes sowie deren zeitliche Entwicklung von 2027 bis 2035 betrachtet. Unterschieden wurde zwischen international bedeutsamen Verkehrsachsen, Standorten mit mittlerem Verkehrsaufkommen sowie bislang unbewirtschafteten Rastplätzen mit geringerer zu erwartender Nachfrage. Der Netzanschluss der Lade-Hubs hängt von der erforderlichen Leistung und den örtlichen Gegebenheiten ab und bedingt sowohl den Anschluss an ein existierendes Mittelspannungsnetz als auch an ein Hochspannungs-Umspannwerk. Die zeitliche Entwicklung zeigt auf, dass besonders verkehrsreiche Strecken bereits 2030, spätestens ab 2035 an das Hochspannungsnetz angeschlossen werden müssen. Dies gilt ab 2035 auch für den größten Teil des Streckennetzes sowie für Lade-Hubs auf Nebenstrecken, wobei Gestaltungsmöglichkeiten bestehen. Ein Austausch mit mehreren Netzbetreibern innerhalb des Gutachtens hat ergeben, dass diese LKW in ihren langfristigen Ausbauplanungen für die Elektromobilität

bisher nicht berücksichtigen. Eine Einbindung der Netzbetreiber in den Ausbauprozess der Ladeinfrastruktur ist daher unabdingbar (Stefan Kippelt and Marco Greve, 2022).

Unterstützend zu dem Aufbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur haben die Unternehmen Traton Group (Scania, MAN, Volkswagen Truck & Bus, Navistar und RIO), Daimler Truck und Volvo Group die Gründung eines Joint Ventures vereinbart. Vorgesehen sind der Aufbau und Betrieb eines öffentlichen Hochleistungs-Ladenetzes für batterieelektrische, schwere Fernverkehrs-LKW und Reisebusse in Europa. Mit einer Investitionssumme von 500 Mio. Euro sollen 1.700 Hochleistungs-Ladepunkte mit Ökostrom an und in der Nähe von Autobahnen sowie an Logistik-Hubs und an Abladestellen innerhalb von 5 Jahren nach der Gründung des Joint Venture errichtet und betrieben werden. Das Konsortium verweist darauf, dass der Ausbau der Ladeinfrastruktur eine gesamteuropäische Vision ist und trans-europäische Verkehrskorridore mit berücksichtigen muss und somit den internationalen Fernverkehr, der in großen Teilen über Deutschland fließt. Bei der Installation von PKW-Ladehubs sollen auch Megawatt-Charger für LKW mit aufgebaut werden (*Die Zukunft unter Strom – wie eine europäische Infrastruktur für den Straßengüterfernverkehr möglich ist*, 2022).

CCS eignen sich für niedrige bis mittlere Ladeleistungen (zwischen 100 und 500 kW) auf Betriebshöfen während des Wochenendes oder über Nacht sowie im öffentlichen Bereich auf z. B. Rastplätzen als "Overnight-Charging" während der Ruhezeiten von mindestens 9 bis 11 Stunden. Das Übernachtsladen wird auch als "Night Charging System – NCS" bezeichnet. Zudem kann das CCS bei etwas längeren Aufenthalten auf Umschlagplätzen zum Einsatz kommen. Grundsätzlich kann dieses System von Nutzfahrzeugen mit einem geringeren Leistungsbedarf, z. B. im regionalen Nahverkehr oder in der City-Logistik genutzt werden.

Das Megawatt Charging System soll ab ca. 2023 verfügbar sein und Ladeleistungen im Endzustand von bis zu 4,5 MW (bis zu 3.000 A/1.250 V) bieten. MCS eignet sich für Anwendungen mit einem hohen Leistungsbedarf (nominale Ladeleistung ab 2027 mit vs. 750 kW, später mit 900 kW) z. B. beim Laden, während der gesetzlich vorgeschriebenen Pausenzeiten von 45 Minuten nach 4,5 Stunden Fahrzeit oder für das Zwischendurchladen, um z. B. einen weiteren Streckenabschnitt zu absolvieren. Für Nutzfahrzeuge mit größeren Hochvoltbatterien oder im Langstreckenverkehr ohne die Möglichkeit des Depot-Ladens bietet sich die MCS-Technologie an (Seibt, 2022; Semih Tetik, no date).

4.4.3 Betrachtung einer ggf. notwendigen, gesondert spezifisch-eigenen Ladelösung für batterieelektrische Kühlsysteme

Die Betrachtung einer ggf. notwendigen, gesondert spezifisch-eigenen Ladelösung ergibt sich aus den aktuell im Einsatz befindlichen Lösungen zu batterieelektrischen Kühlsystemen. 4.4 Betrachtung der Betankungs- und/oder Ladeinfrastruktur (Deutsche Kommission Elektrotechnik *et al.*, 2021; *Megawatt Charging System: Normung unterstützt die globale Elektrifizierung des Schwerlastverkehrs*, 2021) Je nach Einsatzgebiet und Anwendungsfall würde sich für das Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung" prinzipiell sowohl das CCS-System zum Aufladen der Hochvoltbatterie während der Ruhezeiten eignen als auch das MCS-System, wenn diese Nutzfahrzeuge für den Langstreckenbetrieb zum Einsatz kommen sollen. Die derzeitigen Ladesysteme für die Hochvoltbatterie z. B. des Vector eCool von Carrier Transigold verfügen jedoch über einen dreiphasigen CEE-Stecker zum Laden an Starkstrom mit 400 V / 50 Hz Drehstrom. Dies ermöglicht eine Ladeleistung von bis zu 22 kW. Der CEE-Stecker kann nicht an Ladesäulen mit der CCS-Technologie adaptiert werden. Systeme mit einem CEE-Stecker können somit nur über einen entsprechenden Starkstrom-Anschluss, wie er häufig auf Betriebshöfen oder in Depots vorkommt, geladen werden. Eine breitenwirksame Umsetzung des Systems "Rekuperationsachse +

Kühlung“ mit der Option auf einen internationalen Langstreckeneinsatz mit wenig Depotlademöglichkeiten erfordert somit grundsätzliche Überlegungen zu den Steckersystemen insbesondere auch hinsichtlich öffentlicher Lademöglichkeiten. Es wäre bspw. grundsätzlich möglich, die Hochvoltbatterie an der von NomadPower (siehe Kapitel „4.4.4 Marktrecherche nach ggf. bereits vorhandenen Lösungen für Ladeinfrastruktur“) entwickelten Ladesäule mit CEE-Technologie zu laden. Die Klimaziele in Deutschland sowie in der EU sehen eine zügige Reduktion von THG-Emissionen sowie den Ausbau von emissionsfreien Antrieben vor. Hinzu kommen Kosten durch die CO₂-Steuer und die Diskussion zur Abschaffung der Verbrenner-Technologie. Es ist also absehbar, dass zunehmend Logistikdienstleister auf alternative Antriebe umsteigen, sofern sie verfügbar und verlässlich sind. Dies gilt für batterieelektrische Trailer mit dem System “Rekuperationsachse + Kühlung” quasi schon heute. Bei Kombination mit z. B. einer batteriebetriebenen Zugmaschine würde dies zum jetzigen Stand in bestimmten Anwendungsfällen eine doppelte Ladeinfrastruktur erfordern. Mögliche Lösungen dieses Problems sind, das System zur Aufladung der Hochvoltbatterie des Konzepts “Rekuperationsachse + Kühlung” an die jetzigen bzw. die zukünftigen Lade-Standards für BEV anzupassen oder eine direkte Starkstromverbindung von der Zugmaschine zum Kühlaggregat zu legen.(s. auch Kapitel „5.3 Handlungsempfehlungen“)

Bei Motoren mit Verbrennungskraftmaschine erfolgt diese Verbindung über einen Generator, der von dem Motor der Zugmaschine angetrieben wird. Dieser Fall wäre allerdings gegenüber dem NomadPower-Ladesystem nicht emissionsfrei. Handelt es sich um eine batteriebetriebene Sattelzugmaschine, so kann während der Ruhepausen die Aufladung der SZM-Batterie auch zur Versorgung des Kühlaggregates über ein Starkstromkabel genutzt werden.

Bei Sattelzugmaschinen mit Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb ist eine direkte Starkstrom-Verbindung zum Kühlaggregat des Trailers ggf. ebenfalls möglich, je nach Größe und Leistung der verbauten Batterie.

Eine gesonderte Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur für das Konzept “Wasserstoff-Brennstoffzellen-System” wird an dieser Stelle als nicht notwendig angesehen. Es sollte grundsätzlich darauf geachtet werden, dass der Wasserstofftank einer FCEV-Zugmaschine die gleiche Druckstufe (350/700 bar) besitzt wie der Wasserstoffdrucktank des Brennstoffzellen-Kühlsystems, um unterschiedliche Anforderungen an die Verfügbarkeit der H₂-Tankstelle zu vermeiden. (s. auch Kapitel „5.3 Handlungsempfehlungen“)

4.4.4 Marktrecherche nach ggf. bereits vorhandenen Lösungen für Ladeinfrastruktur

Im Folgenden werden exemplarisch zwei bereits vorhandene Ladelösungen für den hier adressierten Einsatzbereich vorgestellt. Das System von Nomad Power adressiert dabei speziell die in Kapitel „4.4.3 Betrachtung einer ggf. notwendigen, gesondert spezifisch-eigenen Ladelösung für batterieelektrische Kühlsysteme“ adressierte mögliche Erfordernis einer gesonderten Ladeinfrastruktur für die Kühlsysteme.

Heliox Energy

Auf dem Gebiet der Schnelllade-Infrastruktur bietet das niederländische Unternehmen Heliox Energy Komplettlösungen mit mobilen, flexiblen und stationären Schnellladestationen für LKW, Busse, Autos und leichte Nutzfahrzeuge mit Elektro-Antrieb sowie für die Bereiche Marine, Hafentechnik und Bergbau an. Das Produktportfolio für batteriebetriebene LKW umfasst mobile Ladestationen für Depots, Werkstätten oder andere mobile Anwendungen mit 40 kW Ladeleistung und einem DC-Ladeanschluss mit einem CCS-Stecker Typ2. Für den Einsatz entlang der Autobahn und im öffentlichen Raum werden modular erweiterbare Schnelllade-Sockelsysteme mit Bedieneinheit in den Leistungsbereichen von

100 kW, 150 kW und 300 kW angeboten. Bei 150 kW liegt die geschätzte Ladezeit für eine Entfernung von 100 km bei acht Minuten. Das "Rapid Charging"-System ist ebenfalls mit einem CCS-Stecker Typ 2 ausgestattet. Mit dem Heliox Megawatt-System reagiert das Unternehmen auf den wachsenden Markt an vollelektrischen Nutzfahrzeugen und bietet ein dynamisches, mehrstufiges Lademodell an, das nach Bedarf erweitert werden kann. Das Modell kann in mehrere miteinander verbundenen Einheiten aufgeteilt werden und so z. B. einen batteriebetriebenen LKW mit 1 MW und 1000 A in wenigen Minuten, drei Fahrzeuge gleichzeitig mit jeweils 360 kW und 350 A oder sechs LKW gleichzeitig mit 180 kW schnellladen. Das Lade-System ist für den MCS-Einsatz vorbereitet und kann darüber die ersten beiden Szenarien (MCS Stufe 2) im Schnelllade-Modus bedienen (*Heliox | Schnelladelösungen für Elektrofahrzeuge*, no date).

Das Unternehmen Heliox ist Konsortialpartner innerhalb des "HoLa - Hochleistungsladen LKW-Fernverkehr"-Projektes und wird u. a. an zwei Logistikzentren jeweils zwei 600 kW-Ladesäulen (Depot Charging) einrichten, die zum Megawatt-Laden erweitert werden sollen (*Megawatt-Projekte: HoLa*, no date).

NomadPower

Das niederländische Unternehmen NomadPower hat mit Unterstützung des Trans-European Transport Network (TEN-T)-Programms ein Stromversorgungsnetz für temperaturgeführte Transporte für den Einsatz an Parkplätzen und auf Raststätten entwickelt. Der Fokus von NomadPower liegt bei Transportunternehmen, die im internationalen Langstrecken-Fernverkehr mit mehreren Einsatztagen und Übernachtungen aktiv sind. Das Stromversorgungsnetz soll den Fahrern der Kühltransporter ermöglichen, die Kühlaggregate während der Ruhe- und Pausenzeiten mit Strom, anstatt mit Dieselmotoren zu betreiben.

Im Rahmen des TEN-T-Programms hat NomadPower das Unternehmen CE Delft gebeten, die Kostenvorteile und den Umwelteffekt des NomadPower-Systems zu bewerten. Die im Jahr 2015 durchgeführte Studie „Electrical trailer cooling during rest periods“ beschreibt die Einsatzmöglichkeiten und die damit verbundenen Umweltvorteile der Stellplatzstromversorgung im Kühlfernverkehr. Zu dem Untersuchungszeitpunkt wurde für Europa insgesamt festgestellt, dass 50-100 Millionen Stunden Dieselmotorenverbrauch auf Parkplätzen durch die Nutzung von Strom ersetzt werden können. Hierdurch könnten laut der Studie 130-260 Millionen Liter Diesel und 290-580 kt CO₂-Emissionen eingespart werden. Weiterhin würden pro Jahr NO_x-Emissionen in Höhe von 2,36 – 4,73 kt und 280 – 560 t Feinstaub-Emissionen reduziert werden. In Abhängigkeit, der durch NomadPower festgelegten Strompreise wurden für die Transportunternehmen Kostenreduktionen durch das Einsparen des Dieselmotorenverbrauches errechnet. Die Emissionsminderungen und die Kosteneinsparungen sind dabei von den Umgebungstemperaturen, den Betriebsmodi und der Art des zu kühlenden Produkts abhängig (M. Otten, 2015a, 2015b; M. Otten, M. Hoen, and E. den Boer, 2015). Neben der Reduktion von Emissionen werden durch die strombasierten Ladestationen vor allem die Lärm-Emissionen eines dieselmotorenbetriebenen Kühlaggregates während der Ruhe- und Nachtzeiten vermindert.

Das Stromversorgungsnetz von NomadPower basiert auf Ladestationen für Kühlaggregate von temperaturgeführten Transporten sowie für batteriebetriebene Lastkraftwagen. Das Unternehmen bietet sowohl sockelgebundene Ladesysteme für Kühlaggregate an Raststationen als auch Wallboxen für den Einsatz in Vertriebszentren und Kühlhäusern. Das Sockel-Ladesystem verfügt über zwei CEE 32 A/400 V Drehstrom-Anschlüsse für 5-polige Steckervarianten. Die Ladekapazität beträgt jeweils 22 kW. Das Wallbox-System verfügt ebenfalls über den europäischen Standardanschluss für Drehstrom und kann bis zu 4 CEE-Anschlüsse mit der gleichen Konfiguration bereitstellen. Für den Fall, dass das Kühlaggregat über 220 V oder einen vierpoligen Anschluss verfügt, kann ein Adapter genutzt werden. Der Kaufpreis des Sockelsystems beträgt 3.950,- € und für die Wallbox 3.250,- € (*Shop - NomadPower*, no date).

Für den Zugang zu den Systemen, die Kontrolle und die Bezahlungsfunktion bietet NomadPower eine mobile App sowie eine Webseite an. Eine Aktivierung der Stromanschlüsse ist zudem per Telefon möglich.

Derzeit betreibt das Unternehmen Ladeinfrastruktur an über 50 LKW-Parkplätzen und Vertriebszentren in sieben europäischen Ländern. Die Ladestationen werden mit "grünem" Strom versorgt. Die Kosten für den Stromverbrauch werden auf der NomadPower-Webseite aufgeführt und betragen für Deutschland 0,65 € pro kWh (Stand März 2023). NomadPower betreibt weitere Ladestationen, u. a. in den Ländern Niederlande, Belgien, Italien, Spanien, Frankreich, Schweden und England.

Auf ihrer Webseite verweist NomadPower auf den EU-Parkstandard für Safe and Secure Truck Parking Areas (SSTPAs), den die Europäische Kommission (EK) in 2018 eingeführt hat. Dieser enthält sowohl Sicherheits- als auch Servicepunkte. Im April 2022 wurde seitens der EK weitere Maßnahmen auf dem Weg zu einem EU-Parkstandard vorgeschlagen. Diese beinhalten u. a. Angaben zu der Stromversorgung auf Rastplätzen, die bis zum 31.12.2026 Kühlfahrzeug-kompatible Elektroladestationen vorsehen (*Neue Vorschriften für sichere Lkw-Parkplätze, no date*).

4.5 Fazit zur Darstellung von Optionen für emissionsfreie Kühlsysteme

Mit der Darstellung von Optionen für emissionsfreie Kühlsysteme wurde aufbauend auf den in Kapitel „2.1 Technische Analyse der aktuellen Kühlsysteme“ beschriebenen derzeitigen technologischen Stand von Kühlsystemen ein ausführlicher Überblick zu potenziellen klimafreundlichen Alternativlösungen für eine Reduzierung der THG-Emissionen in der temperaturgeführten Logistik geschaffen.

Innerhalb der zu diesem Zweck erfolgten Marktrecherche zu Entwicklern und Herstellern sowie der Funktionsweise von emissionsfreien Kühlaggregaten wurden mit den Konzepten „Rekuperationsachse + Kühlung“ in batteriebetriebenen LKW und „Wasserstoff-Brennstoffzellen-Kühlsystem“ zwei wesentliche Ansätze identifiziert, die derzeit von diversen Herstellern in Hinblick auf eine Markteinführung entwickelt und in ersten Pilotanwendungen erprobt werden. Für die technische Umsetzbarkeit und einer Anwendung dieser Systeme in der Kühllogistik liefert der vorangegangene Abschnitt Integrationsvorschläge die den Gesichtspunkten eines autonomen Betriebs des emissionsfreien Systems, einer Integration in bestehende Technologieeinheiten und der Berücksichtigung sicherheitstechnischer Aspekte, die insbesondere wasserstoffbetriebene Systeme betreffen Rechnung tragen. Die Beschreibung der jeweiligen Technologiereifegrade dieser Systeme liefert zudem Anhaltspunkte zum weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Im Anschluss wurden in diesem Abschnitt analog zum Vorgehen im Kapitel „2.2 Ökonomische Analyse der aktuellen Kühlsysteme“, in dem bereits die ökonomische Betrachtung bestehender Kühlsysteme erfolgt ist, die zuvor identifizierten emissionslosen Kühlsysteme einer ökonomischen Analyse unterzogen und den bestehenden gegenübergestellt. Bei dem derzeit vorliegenden technologischen und kostentechnischen Entwicklungsstand weisen sämtliche betrachteten Konfigurationen der in der temperaturgeführten Logistik einsetzbaren FCEV der Nutzfahrzeugklasse N2 und N3 höhere Kilometer und Tagessätze auf als vergleichbare BEV oder konventionelle LKW. Dagegen können unter den untersuchten emissionsfreien Systemen Nutzfahrzeugkombination aus BEV und Diesel-, Elektro- und H2-Aggregaten bereits die Kilometer- und Tagessätze von Dieselnutzfahrzeugen derselben Konfiguration unterbieten. Dies konnte u.a. auf den Wegfall von Mautkosten und geringeren Wartungskosten und steuerlichen Abgaben zurückgeführt werden. Unter rein ökonomischen Gesichtspunkten sind FCEV aufgrund ihrer im Vergleich zu BEV höheren Anschaffungskosten noch im Nachteil. Allerdings können sie im Vergleich zu Diesel-LKW bereits von den gleichen Vorteilen im Bereich der laufenden Kosten profitieren wie BEV. Daher ist mit fortschreitender Markteinführung von FCEV im Bereich der Kühllogistik mit

schweren Nutzfahrzeugen und den damit verbundenen Skaleneffekten zugunsten der Anschaffungskosten mit Gesamtkostenvorteilen gegenüber konventionellen Nutzfahrzeugen zu rechnen.

Mit der ökologischen Analyse emissionsfreier Kühlsysteme wurde in diesem Abschnitt eine Abschätzung der THG-Minderungspotentiale in der temperaturgeführten Logistik vorgenommen. Grundlage hierfür bildete die bereits in Kapitel „2.3 Ökologische Analyse der aktuellen Kühlsysteme“ erfolgte ökologische Betrachtung bestehender Kühlsysteme. Dabei wurde festgestellt, dass die THG-Einsparungen signifikant vom Erzeugungsverfahren des eingesetzten Stroms und Wasserstoffs abhängen. Während durch in der temperaturgeführten Logistik eingesetzte und mit aus Offshore-Windenergie erzeugtem Wasserstoff betriebene FCEV 97,3 % der durch Diesel-Nutzfahrzeuge der Klasse N2 und N3 emittierten THG-Emissionen eingespart werden können, reduziert sich diese Einsparung bei Verwendung von Wasserstoff, der mit der Dampfreformierung gewonnen wurde auf 5,6 %. Mit auf Basis des deutschen Strommix₂₀₂₀ erzeugten Wasserstoffs würden sich die Emissionen sogar um das 2,5-Fache erhöhen. Ein ähnlicher, wenn auch nicht so gravierender, Zusammenhang lässt sich auch für BEV beobachten. Hier schwankt die mögliche THG-Minderung in einem Bereich zwischen 97,2 % bei Nutzung von Strom aus On- und Offshore Windenergie und 45,7 % bei der Nutzung des deutschen Strommix₂₀₂₀. Dies zeigt nochmal deutlich, wie wichtig zeitgleich zum Markthochlauf klimaneutraler Nutzfahrzeuglösungen der Ausbau erneuerbarer Energien für ein Erreichen der Treibhausgasneutralität im Verkehrssektor ist.

Abschließend erfolgte in diesem Abschnitt der Studie eine Betrachtung der Betankungs- und Ladeinfrastruktur. Dabei wurde zusätzlich zur Quantifizierung der bereits vorhandenen und in der Planung befindlichen Tankanlagen für FCEV eine Marktanalyse zum technischen Stand der Strom-Lade- und H₂-Betankungs-Technologie durchgeführt.

Kapitel 4 schließt damit den Hauptteil dieser Studie ab und ermöglicht nun den Übergang zur Ergebniszusammenfassung und der Formulierung von Handlungsempfehlungen für einen Beitrag zum Gelingen der Dekarbonisierung des Kühl-Logistiksektors.

5 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Auf Basis der Ergebnisse der Studie gilt es zunächst festzustellen, dass der Bereich der temperaturgeführten Transporte eine hohe Relevanz für den gesamten Logistiksektor in Deutschland hat. Mit einem jährlichen Umsatz vom 15,924 Mrd. EURO (3,773 Mio. t) (*Aufwärtstrend: Absatz von Tiefkühlkost steigt 2021, no date*) ist der Markt für Tiefkühlprodukte ein erheblicher Wirtschaftsfaktor im Bereich Ernährung, der durch Änderungen der Ernährungs- und Konsumgewohnheiten, z.B. durch einen steigenden E-Foodsektor weiter im Wachstum begriffen ist.

Somit wird auch das Volumen temperaturgeführter Transporte weiter steigen. Dieser Anstieg wird auch tendenziell durch eine fortschreitende Klimaerwärmung und damit einhergehende Klimaanpassungsmaßnahmen zusätzlich unterstützt. So werden Energieaufwände für die Kühlung ggf. steigen und immer mehr Waren temperaturgeführt transportiert werden müssen.

Mit einer Anzahl von 75.631 Fahrzeugen im Jahr 2022 trägt die Kühltransportlogistik schon heute einen hohen Anteil von 5,72% am Gesamtgüterverkehr in Deutschland bei. Hieraus leitet sich eine entsprechende Wirkung auf das Verkehrsaufkommen sowie auf die THG-Emissionen des Verkehrssektors ab. Ein großer Teil der Transporte wird heute noch auf der Straße durchgeführt. Eine stärkere Verlagerung dieser Transporte auf andere Modi wie die Schiene wäre grundsätzlich wünschenswert und möglich, es ist aber davon auszugehen, dass das Aufkommen der temperaturgeführten Straßentransporte, u.a. aus oben genannten Gründen, weiterhin wächst. Die Betrachtung der Option Schiene erfolgt gleichwohl nochmals gesondert im nachfolgenden Kapitel „5.3 Handlungsempfehlungen“ zu den Handlungsempfehlungen.

Wesentliche Anstrengungen im Rahmen der Erreichung der Klimaziele der Bundesregierung müssen daher dahingehend erfolgen, für Kühltransporte auf der Straße Technologien in der Entwicklung zu fördern und schnell in der Praxis zu etablieren, die den Ausstoß von THG-Emissionen auf ein Minimum reduzieren. Im Bereich der notwendigen Kältemittel, die grundsätzlich ein sehr hohes GWP-Potential haben, lassen sich mit dem Ersatz weniger belastender Kältemittelalternativen, wesentliche Effekte erzielen. Ein konsequenter Austausch des Kältemittels R 452 A durch das Kältemittel R 449 A hätte bezogen auf den Nutzfahrzeugbestand 2020 von LKW der Klassen N2 und N3 mit der Aufbauart „Mit Isolierwänden und Kühlung“ bspw. ein Reduktionspotential von 77.480 t TTW-THG-Emissionen.

Mit den elektrischen Kühlaggregaten existieren bereits heute technische Möglichkeiten, die Kühlung zumindest partiell mit (grünem) Strom durchzuführen. Diese Möglichkeiten reichen aktuell jedoch nicht aus, um alle Varianten von Kühltransporten mit den unterschiedlichen Bedarfen zu bedienen, sowie die Kühlung über die gesamte Transportkette durchgehend zu gewährleisten. Hier spielen dieselbasierte Systeme immer noch eine zentrale Rolle, insbesondere wenn neben der Kühlung auch die Traktion berücksichtigt wird. Die folgenden Technologien sind im Wesentlichen geeignet, dieselbasierte Systeme komplett zu ersetzen und die THG-Emissionen auf ein Minimum zu reduzieren:

- Elektrische Rekuperationsachse
- Batteriebasierte Kühlsysteme
- Brennstoffzellenbasierte Kühlsysteme
- Solarbasierte Stromerzeugung am Trailer

In der Erweiterung um die Antriebssysteme der Fahrzeuge stehen batterieelektrische (BEV) und brennstoffzellenbasierte (FCEV) Fahrzeuge im Fokus.

Diese neuen Technologien sind sehr vielfältig, für unterschiedliche Anwendungsfälle geeignet und mit unterschiedlichen Technologiereifegraden behaftet. Es gilt daher diese Technologien zunächst (weiter) zu entwickeln, zur Serienreife zu führen und einen flächendeckenden Einsatz in der Praxis zu forcieren. Im Folgenden werden die hiermit in Zusammenhang stehenden Herausforderungen sowie konkrete Maßnahmen zur Umsetzung diskutiert.

5.2 Ableitung ökologischer und ökonomischer Potentiale der Technologien zur Marktdurchdringung

Die ökologischen und ökonomischen Potentiale von klimafreundlichen Kühlsystemen zur Marktdurchdringung sind grundsätzlich als vielversprechend zu bewerten. Die oben dargestellten Technologien haben ein hohes Potential, die THG-Emissionen von Kühltransporten signifikant zu reduzieren und somit einen Fortbestand der davon abhängigen Industrien auch in Konformität zu den zukünftigen CO₂-Zielen zu gewährleisten. Gleichwohl herrschen zunächst ähnliche Voraussetzungen wie dies auf der Ebene der emissionsarmen Antriebssysteme gilt.

Hier gilt es zuallererst das sog. "Henne-Ei-Problem" anzusprechen, dass die Abhängigkeit von emissionsarmen Technologien basierend auf Batterie- oder Brennstoffzellensystemen im Fahrzeug von der zugehörigen Infrastruktur adressiert. Ohne die notwendige Infrastruktur sind weder FCEV noch BEV in der Logistik einzusetzen. Der Aufbau dieser neuen Infrastrukturen ist kostspielig und zudem zeitintensiv, da entsprechende Flächen gefunden und aufwendige Genehmigungsverfahren durchlaufen werden müssen. Zudem kann konstatiert werden, dass der Aufbau der Infrastruktur für den Straßengütertransport weit hinter dem Stand des klimafreundlichen motorisierten Individualverkehrs (MIV) zurückliegt. Dies gilt sowohl für die elektrische (Schnell-) Ladeinfrastruktur als auch für Wasserstofftankstellen. In diesem Zusammenhang ist auch hervorzuheben, dass Infrastruktur für PKW und LKW völlig losgelöst voneinander betrachtet werden müssen und weitestgehend keine Kompatibilität hinsichtlich der Nutzung besteht. Die Kompatibilität ist bei der elektrischen Ladeinfrastruktur aufgrund der Größe der Stellplätze nahezu ausgeschlossen und bei Wasserstofftankstellen sehr eingeschränkt aufgrund der unterschiedlichen Druckstufen (und der Stellplatzgröße). Diese Feststellungen sind bei der grundsätzlichen Entscheidung zu BEV und FCEV zu berücksichtigen.

Wird in diesem Zusammenhang jedoch nur das Kühlsystem ohne den Antriebsstrang fokussiert, so stellt sich hier eine gesonderte bzw. ggf. günstigere Situation dar. Bereits heute existierende und im Einsatz befindliche elektrische Kühlsysteme lassen sich mit einer niederschweligen Ladeinfrastruktur betreiben. Hierfür wird lediglich wie oben ausgeführt ein 400 V Drehstrom-Anschluss bzw. nur ein Starkstromanschluss benötigt, der in den meisten Gebäudeinfrastrukturen heute schon vorhanden ist. Für das Laden unterwegs könnten ebenfalls niederschwellige Lademöglichkeiten, z.B. an Raststätten, aufgebaut werden, die sich zur Ladeinfrastruktur für BEV insofern wesentlich unterscheiden, dass sie eine deutlich geringere Ladeleistung als bspw. CCS- oder MCS-Schnellladesysteme erfordern. Eine weiterführende Diskussion hierzu befindet sich in Kapitel „5.3 Handlungsempfehlungen“.

Die in Kapitel „3. Regulatorischer Rahmen“ aufgeführte Durchführungsverordnung (EU) 2022/1362 der Europäischen Kommission, in der die zukünftigen Anforderungen an die CO₂-Zertifizierung von Anhängern (inklusive Kühlaufbau mit/ohne Kühlaggregat) beschrieben sind, die EU-Verordnung 2016/1628 zur Abgasgesetzgebung für mobile Maschinen und Geräte (u. a. Kühlaggregate) sowie die als F-Gase-Verordnung bekannte Verordnung (EU) Nr. 517/2014 für Kältemittel in Kälteanlagen machen sichtbar, dass temperaturgeführte Transporte vermehrt in den Fokus der nationalen und internationalen Gesetzgebung rücken. Anhand der in den Kapiteln „2.1.2 Technischer Überblick zu Systemen zur Effizienz-

steigerung und Minderung der Emissionen“ und Kapitel “4.1.1 Marktrecherche zu Entwicklern/Herstellern und der Funktionsweise von emissionsfreien Kühlaggregaten“ aufgezeigten Aktivitäten der Hersteller von Kühlaggregaten und Kühl- sowie Tiefkühl-Transportern wird deutlich, dass bei den Unternehmen und auch bei den Kunden ein Handlungsbedarf in Richtung emissionsreduzierter und emissionsfreier Systeme erkannt wurde. Dies resultiert zum einen aus den Fristen zur Umsetzung und Einhaltung der CO₂-Flottenziele sowohl für schwere Nutzfahrzeuge als auch für Kühlanhänger und zum anderen aus zunehmenden Betriebs- und Kraftstoffkosten, die durch effizienzsteigernde Maßnahmen und die “Umstellung” auf andere Kraftstoffarten reduziert werden können.

Dass das ökonomische und vor allem auch das ökologische Potential emissionsfreier Systeme sehr groß ist und durch geeignete Maßnahmen weiter ausgebaut werden kann, zeigen die Ergebnisse der Untersuchungen innerhalb der Kapitel „4.2 Ökonomische Analyse emissionsfreier Kühlsysteme“ und Kapitel „4.3 Ökologische Analyse emissionsfreier Kühlsysteme“ dieser Studie. Sattelzugkonfigurationen mit einer batteriebetriebenen Sattelzugmaschine und dem Konzept “Rekuperationsachse + Kühlung” als Kühl-Trailer weisen im Vergleich zu Diesel- und Wasserstoff-Systemen die geringsten Kilometer- und Tages-Sätze auf. Begünstigende Faktoren sind hierbei die derzeitige staatliche Förderung des Fahrzeugkaufs sowie steuerliche Vergünstigungen bei der Kfz-Steuer der Sattelzugmaschine, Sonderabschreibungsmöglichkeiten und der Wegfall der Autobahnmaut. Aber auch die geringeren Kraftstoff- und Wartungskosten führen zu einer Verringerung der Gesamtkosten. Sattelzüge mit einem Wasserstoffantrieb und dem Konzept “Wasserstoff-Brennstoffzelle-System” für den Kühl-Trailer haben innerhalb der Berechnung gegenüber den anderen beiden Varianten trotz Förderung der Anschaffung der Sattelzugmaschine und staatlicher Vergünstigungen wie bei den BEV die höchsten Kilometer- und Tages-Sätze. Ungünstige Faktoren sind hier die hohen Anschaffungskosten bei der Sattelzugmaschine, Annahmen hinsichtlich der Kosten für das Wasserstoff-Brennstoffzellen-Kühlsystem sowie relativ hohe Kraftstoffkosten, wobei die Reichweite mit einem Kilogramm Wasserstoff gegenüber einem Liter Diesel etwas höher ist. Insbesondere der heute vorherrschende und zumeist durch Dampfreformierung aus Erdgas erzeugte, graue Wasserstoff ist derzeit sehr teuer. “Grüner” Wasserstoff kann perspektivisch wesentlich günstiger angeboten werden und sollte durch geeignete Maßnahmen stark gefördert werden.

Zukünftig kann davon ausgegangen werden, dass die Kosten für den Betrieb von Diesel-Fahrzeugen aufgrund der Zunahme der CO₂-Steuer, abgasreduzierender Maßnahmen und voraussichtlich auch höheren Abgaben bei Steuer und Versicherung zunehmen werden. Hinzu werden ein Imageverlust gegenüber Kunden kommen sowie auch Anforderungen an eine ökologische Distribution insbesondere von Großkunden, die im Fokus der Gesellschaft stehen.

Um die Kosten für FCEV-Systeme zu verringern, die gerade in der Logistik mit schweren Nutzfahrzeugen gegenüber BEV-Systemen Vorteile haben (Reichweite und Zuladung), sind Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen notwendig, u. a. um das Zusammenspiel der Komponenten des Kühlsystems sowie in Verbindung mit dem gesamten Sattel- oder Lastzug zu verstehen und auf dieser Basis die Komponenten preisgünstig und effizient auszulegen. Das ökonomische Potential hinsichtlich der Preisentwicklung für Batterien und Brennstoffzellen ist abhängig von der steigenden Nachfrage nach emissionsfreien Systemen und wird als positiv angesehen.

Aus ökologischer Sicht bieten lokal emissionsfreie Systeme hinsichtlich der WtW-THG-Emissionen, bei denen die gesamte Vorkette des Herstellungsprozesses des eingesetzten Kraftstoffes mitberücksichtigt wird, einen sehr großen Vorteil gegenüber Diesel-Kühltransportern. Sowohl bei batteriebetriebenen LKW und Kühlaggregaten, die mit Strom aus On- und Offshore-Windenergie versorgt werden als auch bei wasserstoffbetriebenen LKW und Kühlaggregaten, die mit Wasserstoff hergestellt aus On-

oder Offshore-Windenergie betrieben werden, liegen die WtW-THG-Emissionen um ein Vielfaches unter dem Wert des Diesel-Kühlfahrzeugs. Dieses gilt für beide Varianten auch dann noch, wenn BEV mit Strom aus dem deutschen Strommix 2020 bzw. FCEV mit einem Mix aus grünem und grauem Wasserstoff betrieben werden.

Dies verdeutlicht, dass das ökologische Potential temperaturgeführter Transporte durch den Einsatz von grünem Strom und grünem Wasserstoff besonders hoch ist. Bei dem weiteren Ausbau der Lade- und Tankinfrastruktur sollte demnach die Wasserstoffherzeugung vor Ort durch Elektrolyse sowie die Installation von Solaranlagen auf Gebäudedächern oder Freifeldanlagen mitgedacht werden. Sinnvoll könnte es dabei auch sein, das Potential umliegender Windenergie- oder Solarparks für die Versorgung der Lade- und Tankinfrastruktur oder die Elektrolyse von Wasserstoff zu prüfen. Zusätzlich sollten auch hinsichtlich des immensen Gesamtbedarfs an "grüner" Energie bei der angestrebten Dekarbonisierung aller Sektoren das Thema Wasserstoffimport intensiv vorangetrieben werden, um die zukünftige Energieversorgung sicherzustellen.

5.3 Handlungsempfehlungen

Die folgenden Handlungsempfehlungen umfassen ein weites Spektrum an Wirkungsbereichen und Maßnahmen, um die Emissionen, die aus Kühltransporten resultieren, mit dem Ziel Klimaneutralität zu reduzieren. Hierzu gehören im Wesentlichen Handlungsempfehlungen auf den Ebenen Infrastruktur und Technologieentwicklung für emissionsarme Antriebe. Die darauf basierende Reduzierung der Emissionen von Kühltransporten sind der Klimastrategie der Verminderung zuzuordnen, da sie im Wesentlichen auf eine Verminderung der Emissionen im fokussierten Straßengüterverkehr durch den Einsatz von batterieelektrischen und brennstoffzellenbasierten Systemen abzielen. Daneben gibt es im Transport jedoch auch die wesentlichen Klimastrategien der Verlagerung und der Vermeidung, die eingangs auch für Kühltransporte in aller Kürze betrachtet werden sollen.

Strategie Verlagerung von Transporten

Die Verlagerung von Transporten auf umweltverträgliche Verkehrsträger ist eine der wesentlichen Strategien im Rahmen der Emissionsreduktion. Im Landverkehr stellen die Binnenschifffahrt und der Schienentransport die wesentlichen Zielmodi für einen emissionsarmen Transport dar. Da bei Kühltransporten auch aus Energieeffizienzgründen die Transportzeiten möglichst gering gehalten werden sollten, fällt das Binnenschiff als Verkehrsträger weitgehend aus.

Durch eine Verlagerung von der Straße auf die Schiene lassen sich deutliche Emissionseinsparungen erzielen. Je nach Transportgut und Entfernung lassen sich laut BMDV (ehemals BMVI) Energieeinsparungen pro Kilometer von bis zu 75 % ermöglichen, weiterhin kann als Antriebsenergie im Wesentlichen (grüner) Strom genutzt werden, was die THG-Emissionen zusätzlich signifikant im Vergleich zu Diesel-LKW mindert (W. Knörr *et al.*, 2016). Beim Transport über die Schiene ist im speziellen Fall die wesentliche Herausforderung, dass die Kühlkette aufrecht erhalten bleibt. Da der Transport per Schiene in der Regel immer innerhalb eines kombinierten Verkehrs in Verbindung mit dem LKW erfolgt, muss das Kühltransportsystem auf beiden Verkehrsträgern einsatzfähig sein, um einen Umschlag der gekühlten Ware von einem Ladungsträger auf einen anderen zu vermeiden. Weiterhin muss eine entsprechende Ladeinfrastruktur zur elektrischen Versorgung der Kühlsysteme aufgebaut werden.

Für den Transport auf der Schiene sind zur Aufrechterhaltung der Kühlkette damit zum einen entsprechende für den kombinierten Verkehr geeignete Transportsysteme sowie eine adäquate Ladeinfrastruktur notwendig.

Eine hierfür geeignete Lösung ist bspw. die SWS Power Box der Firma SWS Power Solutions, die in Zusammenarbeit mit der VTG GmbH aus Hamburg entwickelt wurde. Bei dieser Lösung werden vorrangig bestehende Containertragwagen mit einer sogenannten PowerBox ausgestattet. Dabei wird ein Generator am Radsatz (\varnothing 920 mm) des Containertragwagens montiert, um eine Rekuperationsleistung von bis zu 17.5 kW zu erzeugen. Die Montage der Box erfolgt auf den bereits angebrachten Containerzapfen und den Adapterplatten. PowerBox gilt als Ladeguthilfsmittel im kombinierten Verkehr (ILU-Code)⁸ und daher ist keine weitere Zertifizierung erforderlich. Zusätzlich verfügt jede PowerBox über ein Remote Monitoring, um die wichtigsten Daten zu Betriebszustand und Einsatz über ein übersichtliches Cockpit abzurufen (QR-Code oder URL). Das System stellt damit eine sehr geeignete und tragfähige Lösung für den Container-basierten kombinierten Kühltransport dar (*VTG Ramps Up Its SWS-PowerBox Temperature-Controlled Transports*, 2021). Der Einsatz dieser Systeme sollte forciert und ggf. gefördert werden, da in der Verlagerung auf die Schiene grundsätzlich ein sehr hohes THG-Einsparpotential liegt. Neben der Versorgung der Kühlaggregate während des Schienentransports ist auch eine Ladeinfrastruktur an den Terminals aufzubauen und ggf. auch staatlich zu fördern. Weiterführende Überlegungen zu Erfordernissen und Ausprägungen der Ladeinfrastruktur folgen im weiteren Verlauf dieses Kapitels.

Strategie der Vermeidung von Transporten

Wesentliche Strategien der Vermeidung liegen darin, die Verkehrsnachfrage (insbesondere auf der Straße) zu reduzieren und sie zielen daher u.a. auf Einflussfaktoren wie volkswirtschaftlich erbrachte Güter und Dienstleistungen, Wirtschaftswachstum, sektorale Strukturen, geografische Ausdehnung der Lieferanten und Empfänger etc. ab.

Diese Aspekte sollen hier aufgrund der Komplexität der Abhängigkeiten nicht diskutiert werden und die Transportbedarfe, die sich aus dem Wirtschaften und dem Aufbau der betroffenen Industrien ergeben, werden als fix notiert. Gleichwohl gibt es verschiedene Ansätze, die sich insbesondere aus dem Einsatz digitaler Technologien ergeben, die ein enormes Potential zur Vermeidung von Transporten und damit zur signifikanten Reduktion von Emissionen haben. Hierzu gehören neben dem effizienten Einsatz von digitalen Transportmanagement- und Dispositionssystemen insbesondere auch digitale Frachtenbörsen. Laut KBA lag der Anteil der Leerfahrten von LKW 2021 im deutschen Inlandsverkehr bei 37,6 % (Kraftfahrt-Bundesamt, 2022b). Auch wenn diese Leerfahrten tlw. mit ausgeschalteter Kühlung erfolgen, zeigt sich hier ein enormes Potential der Vermeidung von Transporten. Die häufig nur teilweise Auslastung von Transporten bietet weitere mögliche Ansatzpunkte, um zusätzliche Transporte und somit THG-Emissionen zu vermeiden. Eine Frachtenbörse mit hoher Marktdurchdringung stellt bspw. die Frachtenbörse Timocom dar (*TIMOCOM - Der Marktplatz für die Logistikbranche*, no date).

Ein wesentliches Problem stellen in diesem Zusammenhang die häufig insbesondere auch im Lebensmittelbereich seitens der Verlager vertraglich festgelegten Exklusivladungsgebote und Rückladungsverbote dar. Diese verhindern faktisch eine Optimierung der Auslastung und die Nutzung von Frachtenbörsen seitens der Logistiker, die dadurch auch wirtschaftliche Einbußen in Kauf nehmen müssen. Eine konkrete Handlungsempfehlung in diesem Zusammenhang stellt daher das Verbot von solchen vertraglich geforderten Rückladungsverböten und Exklusivladungsgeboten in geeigneten Gesetzen und Richtlinien des Transportrechts dar. Eine direkte Verknüpfung mit dem Gebot der Einsparung von THG-Emissionen bzw. den entsprechenden Klimagesetzen erscheint hier sinnvoll und tragfähig.

⁸ <https://www.ilu-code.eu/de/>

Aufbau Lade- und Tankinfrastruktur

Wie eingangs festgestellt, ist die Diskussion geeigneter Versorgungsmöglichkeiten von Kühlsystemen stark abhängig von der Lade- und Tankinfrastruktur für zukünftige emissionsarme Antriebe und damit auch von der Diskussion zur Technologieoffenheit. Die diskutierten Optionen sind im LKW-Bereich im Wesentlichen batterieelektrische Fahrzeuge und brennstoffzellenbasierte Fahrzeuge. Weitere in der aktuellen Wahrnehmung weniger präferierte Technologien sind elektrische Oberleitung und der Wasserstoffverbrennungsmotor. Durchaus diskutiert wird jedoch auch wieder der Einsatz von E-Fuels im Straßenverkehrsbereich. Da die Kühlsysteme in dieser Diskussion nur eine untergeordnete Rolle spielen, soll daher der Fokus auf die Darstellung der unterschiedlichen Optionen für Kühltransporte gelegt werden, um damit Handlungsempfehlungen bzw. Entscheidungen auf der übergeordneten Ebene zu stützen. Eng damit verbunden ist auch die Diskussion zu möglichen Stecker- und Anschlussystemen zur Übertragung elektrischen Stroms (s. unten).

Werden zunächst die brennstoffzellenbasierten Kühlsysteme betrachtet, so ist hier die Handlungsempfehlung hinsichtlich möglicher Druckstufen oder Aggregatzustände des Wasserstoffs für die Versorgung des Kühlaggregates relativ eindeutig. Es sollte die Druckstufe bzw. der Aggregatzustand gewählt werden, der sich auch bei den Antriebssystemen durchsetzen wird, um die Erfordernis unterschiedlicher Tanksysteme für Motorwagen/Zugmaschine und Kühlsystem zu vermeiden. Wird die Situation auf Basis der aktuell verfügbaren Fahrzeuge bewertet, so scheinen sich Tanksysteme mit einer Druckstufe von 350 bar im LKW-Bereich durchzusetzen. Diese kommen bspw. im Hyundai Xcient (*Hyundai Hydrogen Mobility*, no date) oder auch im Hyzon (*Hyzon Motors - Zero Emission, Hydrogen-Powered Vehicles*, 2023) zum Einsatz. Gleichwohl empfiehlt H2 Mobility als führender H₂-Tankstellenbetreiber in Deutschland weiterhin die Evaluation aller möglichen Optionen. Diese vier Optionen sind nach H2 Mobility (H2Mobility, 2021):

- Gasförmiger Wasserstoff (350 bar und 700 bar),
- Wasserstoff in flüssigem Zustand (sLH₂),
- Kryokomprimierter Wasserstoff (Cch₂)

Von zentraler Bedeutung ist in diesem Zusammenhang auch die letztliche Entscheidung der großen deutschen/europäischen Truck-Hersteller. Hier werden tlw. im Rahmen der Technologieoffenheit BEV und FCEV als sich ausschließende Optionen diskutiert.

Bezüglich der Ladeoptionen für BEV werden im LKW-Bereich neben der CCS-Technik (Combined Charging System) auch die MCS-Ladetechnik (Megawatt Charging System) präferiert und sind bereits im Ausbau. Beide Techniken zeichnen sich durch hohe Ladeleistungen aus, die für BEV im LKW-Bereich zwingend notwendig sind. Grundsätzlich wäre es denkbar, diese Ladetechniken auch im Bereich der elektrischen Kühlsysteme einzusetzen. Allerdings sind sowohl für die Hochvoltbatterie des Konzeptes "Rekuperationsachse + Kühlung" als auch für ein vollelektrisches Kühlaggregat an sich deutlich geringere Ladeleistungen notwendig als für die Traktion, was die heute gängige Ladung über 400 V Drehstrom bzw. Starkstrom demonstriert.

An dieser Stelle muss abgewogen werden, welche Einsatzzwecke mit dem Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung" verfolgt werden und ob der Batteriebetrieb des Systems zur Versorgung des Kühlaggregates während der Ruhezeiten ausreichend ist oder ob eine zusätzliche Ladeoption vorgehalten werden muss. Für letzteren Fall wären zwei Ladeplätze erforderlich, die entweder aus CCS/MCS-Ladetechnik bestehen, wofür die derzeitige CEE-Hochvoltbatterie-Ladetechnik angepasst werden müsste, oder die aus CCS/MCS-Ladetechnik für die Zugmaschine und der CEE-Ladetechnik rein für die Hochvoltbatterie bzw. das Kühlaggregat bestehen.

Hierdurch würde sich eine Nutzungskonkurrenz bzgl. der Ladeinfrastruktur zwischen Kühlsystem und Antriebssystem ergeben bzw. wären zwei ggf. unterschiedliche Ladeplätze für ein Kühlfahrzeug vorzuhalten. Auf dem Hintergrund der schon bestehenden Herausforderungen beim Ausbau der Ladeinfrastruktur auf die CCS/MCS-Ladetechnik wäre voraussichtlich weiterhin das Laden der Hochvoltbatterien und das Betreiben der elektrischen Kühlsysteme über Starkstrom die sinnvollere Alternative, da sie zum einen bereits etabliert ist und zum anderen die notwendige Ladeinfrastruktur relativ niederschwellig zu errichten ist. An den Logistikstandorten können normale Starkstromanschlüsse vorgehalten werden. In Ergänzung existieren bereits Systeme am Markt wie die in Kapitel „4.4 Betrachtung der Betankungs- und/oder Ladeinfrastruktur“ genannten Ladesysteme speziell für Kühlaggregate von NomadPower (*NomadPower, no date*), die sowohl für den Ausbau einer privaten als auch einer öffentlichen Ladeinfrastruktur geeignet sind. Die Kosten pro Ladesäule 3.950,- € ohne MwSt. liegen dabei um ein Vielfaches unter den Kosten der genannten CCS- und MCS-Ladesysteme. Weiterhin werden Wallboxen mit bis zu 4 CEE 32 A/400 V Anschlüssen für Kühltrailer zu einem Preis von 3.250,- € ohne MwSt. angeboten, die sich für den Einsatz in Vertriebszentren und Kühlhäusern eignen. Selbstverständlich bedeutet eine flächendeckende Verfolgung der Technologiestrategie der Starkstromversorgung der Kühlaggregate und der Hochvoltbatterien grundsätzlich den Aufbau einer zusätzlichen Ladeinfrastruktur. Zudem sind in Verbindung mit BEV nach wie vor zwei Ladeplätze erforderlich. Jedoch können die Ladeplätze auch für die Kühlaggregate anderer Nutzfahrzeuge eingesetzt werden. Die Ausbautintensität kann aber ggf. über eine Anpassung der Fahrzeugtechnologie reduziert wird.

Weiterentwicklung Fahrzeugtechnologie

In Hinsicht auf zukünftige emissionsarme Gesamtsysteme (Antrieb und Kühlung) ließe sich mit Verfolgung der Starkstromstrategie zur Versorgung des elektrischen Kühlaggregats bzw. zur Ladung der vorgeschalteten Batterie kombiniert mit einer Anpassung der Zugmaschinen die Notwendigkeit für einen erhöhten oder zusätzlichen Ausbaubedarf der Infrastruktur erheblich entschärfen. So könnte für die Entwicklung von BEV und FCEV im Lkw-Bereich ein Starkstromanschluss direkt an der Zugmaschine/Motorwagen (obligatorisch) vorgesehen werden, so dass die Energieversorgung des Kühltrailers immer auch über die elektrische Zugmaschine erfolgen kann.

Für BEV mit Kühl-Trailer wäre diese Lösung insofern attraktiv, da nur ein Ladeanschluss erforderlich wäre. Der Ladestrom der BEV-Batterie könnte direkt von der Zugmaschine über ein Starkstromkabel und entsprechende Wechselrichter an das Kühlaggregat weitergegeben werden. Es ist zu überlegen, ob diese Variante auch zum Aufladen der Hochvoltbatterie beim Konzept „Rekuperationsachse + Kühlung“ eingesetzt werden könnte. Die Standzeiten des Trailers ohne Zugmaschine mit laufendem Kühlaggregat sind in diesem Fall durch die eigene Batterie limitiert, sofern kein Starkstromladeanschluss zur Verfügung steht.

Gleichwohl erscheint diese Idee auf dem Hintergrund des notwendigen Ausbaus der Lade- und Tankinfrastruktur sowohl aus technologischen als auch ökonomischen Gründen als sehr interessant. Hier sollte eine entsprechende Abstimmung in den einschlägigen Gremien mit den Fahrzeugherstellern (Trailer und LKW) erfolgen und eine gemeinsame Strategie entwickelt werden. Gleichzeitig müsste die Festlegung der daraus abgeleiteten Standards zu Steckern und Ladesystemen idealerweise mindestens auf EU-Ebene vorangetrieben werden, um Insellösungen und Inkompatibilitäten zu vermeiden und einen barrierefreien emissionsarmen Güterverkehr in Europa sicherzustellen.

Eine Weiterverfolgung des bereits etablierten Starkstromanschlusses der Kühlaggregate würde sowohl heutige als auch zukünftige Aktivitäten für emissionsarme Kühlverkehre begünstigen und könnte die Flottenumstellung insgesamt beschleunigen. Eine schnelle Entscheidung bzw. Festlegung würde die Planungs- und Investitionssicherheit sowohl für Fahrzeughersteller als auch für Logistiker erhöhen.

Hinsichtlich der Energieversorgung der Aggregate gilt festzustellen, dass zunächst die Technologien von großer Bedeutung sind, die eine autarke Versorgung des Kühlaggregats mit Eigenstrom und damit unabhängig von jeglicher Lade- oder Tankinfrastruktur begünstigen. Hierzu gehören im Wesentlichen, wie bereits beschrieben, das Konzept "Rekuperationsachse + Kühlung" und solarbasierte Technologien. Diese Technologien können auch kombiniert werden und ergänzen sich insofern sehr gut, dass solarbasierte Systeme (sofern Sonneneinstrahlung vorliegt) auch eine Energieversorgung während der Standzeiten ermöglichen. Hierdurch wird nicht nur der notwendige Aufbau der Lade- und Tankinfrastruktur, sondern auch die Bereiche Energieerzeugung und -transport wesentlich entlastet. Diese Systeme sollten daher sowohl in der technologischen Umsetzung als auch in der Förderung (s. auch Kapitel „5.4 Retrospektive Recherche von Förderprogrammen und Darlegung der möglichen Notwendigkeit von Förderprogrammen“) priorisiert behandelt werden.

Gleichwohl haben beide autarken Systeme auch Schwächen, die immer eine ergänzende Energieversorgung notwendig machen. Solarbasierte Systeme können nur Strom bei ausreichender Sonneneinstrahlung liefern und der autarke Betrieb des Konzeptes "Rekuperationsachse + Kühlung" hängt vom Fahrbetrieb bzw. der maximalen Dauer des Batteriebetriebs bei der Versorgung des Kühlaggregates ab. Die aufgezeigte Möglichkeit der Stromversorgung durch die Zugmaschine ist insofern limitiert, dass BEV und FCEV selbst einen hohen Energiebedarf haben und die Speicherkapazität der Technologien (insbesondere bei BEV) und damit die Reichweite der Fahrzeuge begrenzt ist. Für viele Anwendungsfälle bspw. auf der Fernstrecke und bei hohen Tonnagen muss der Trailer über eine gesicherte Energieversorgung unabhängig von der Zugmaschine verfügen. Das ist zusätzlich auch in Standzeiten erforderlich, wo der Trailer von der Zugmaschine abgekoppelt ist.

Es wird daher zukünftig notwendig sein, die Entwicklung batteriebasierter und brennstoffzellenbasierter Kühltrailer mit Blick auf die Entwicklungsrichtung bei den Antriebstechnologien ggf. parallel voranzutreiben. Beide Technologien sind grundsätzlich geeignet und verfügen über entsprechende Reifegrade, die Marktreife und Marktdurchdringung in relativ kurzer Zeit ermöglichen. Abhängig von den Einsatzanforderungen ergänzen sich beide Technologien und haben spezifische Vor- und Nachteile. Hinsichtlich der Energiedichte und zusätzlichen Batteriegewichte haben brennstoffzellenbasierte Systeme grundsätzlich Vorteile bei hohen Lasten und langen Strecken. Es gilt jedoch immer zu berücksichtigen, dass beide Systeme gänzlich unterschiedliche Infrastrukturen benötigen. Hier ist die Frage, ob ein paralleler Aufbau der Infrastruktur sinnvoll ist. Anders als im Pkw-Bereich ist die Ladeinfrastruktur für LKW noch relativ gering ausgebaut, so dass zum jetzigen Zeitpunkt auf Basis der bisherigen Strategie der Technologieoffenheit noch eine klare Entscheidung zugunsten einer Technologievariante getroffen werden könnte. Dies bedingt jedoch im Wesentlichen eine Abstimmung zwischen LKW-OEM, Infrastrukturbetreiber und Staat (EU) als koordinierende Stelle. Die Strategie für die Trailer-Hersteller ist von dieser Entscheidung abhängig. Im Folgenden werden nochmals alle möglichen Varianten inkl. der aktuellen Varianten mit fossilen Technologien in einer Matrix gegenübergestellt und bewertet.

Tabelle 46: Bewertung der Technologieoptionen (eigene Darstellung)

	Diesel(-Elektro) - Kühlaggregat	Rekuperationsachse + Batterie + Kühlung	Wasserstoff-Brennstoff- zellen-Kühlsystem
Traktion fossil (Diesel inkl. LNG, CNG etc.)	Geringe CO ₂ -Reduktion möglich, schnellstmögliche Substitution	Heute bereits im Einsatz, Brückentechnologie, er- möglicht zumindest CO ₂ - arme Kühlung, ggf. Kom- bination mit nieder- schwelliger Ladeinfra- struktur	Nicht sinnvoll
BEV	Nicht sinnvoll	Hohes Potential für CO ₂ - arme Kühltransporte, ho- her TLR, leistungsstarke Ladeinfrastruktur erforder- lich, ggf. nicht alle Be- darfe abdeckbar. Bei Nah- u. Regional-ver- kehr + Nutzung Ladeinfra- struktur in Logistikzen- tren heute schon einsetz- bar	Sinnvoll nur dann, wenn Starkstromladung am Kühlaggregat verfolgt wird, da sonst unter- schiedliche und kosten- intensive Energieinfra- struktur für Traktion und Kühlung
FCEV	Nicht sinnvoll	Sinnvoll nur dann, wenn Starkstromladung am Kühlaggregat verfolgt wird, da sonst unter- schiedliche und kostenin- tensive Energieinfrastruk- tur für Traktion und Küh- lung	Hohes Potential für CO ₂ -arme Kühltrans- porte, relativ hoher TLR, erfordert H ₂ -Tankinfra- struktur, Abdeckung al- ler heutigen Bedarfe inkl. Fernstrecke + hohe Transportgewichte möglich.

Die Gegenüberstellung der Technologieoptionen gibt eine gute Übersicht über die Varianten, die heute schon umsetzbar sind (grün gekennzeichnete Abschnitte in Tabelle 46) und mit hoher Geschwindigkeit forciert werden sollten.

Die gelb markierten Optionen ermöglichen eher im mittelfristigen Zeithorizont CO₂-arme Kühltransporte. Hier gibt es geringere Unterschiede in TLR und in Leistungsfähigkeit, die es abzuwägen gilt. Es herrscht grundsätzlich eine hohe Abhängigkeit von übergeordneten Entscheidungen bzgl. der Technologien BEV/FCEV und der zugehörigen Ladeinfrastruktur. Diese Entscheidungen sind daher möglichst schnell zu treffen und umzusetzen.

Die rot markierten Optionen sollten entweder schnellstmöglich durch die grünen und gelben Optionen substituiert werden, da sie kein (bzw. ein sehr geringes) CO₂-Einsparungspotential haben. Der Umstieg von diesel-elektrischen Kühlaggregaten auf die drei benannten Konzepte spielt hier eine Schlüsselrolle und sollte daher mit verschiedenen Maßnahmen im Rahmen der Förderung (s. Kapitel „5.4 Retrospektive Recherche von Förderprogrammen und Darlegung der möglichen Notwendigkeit von Förderprogrammen“) und Regulierung (s. Kapitel „5.5 Darlegung des möglichen Erfordernisses regulatorischer Anpassungen für den Markthochlauf“) forciert werden.

5.4 Retrospektive Recherche von Förderprogrammen und Darlegung der möglichen Notwendigkeit von Förderprogrammen

Zunächst gilt es festzustellen, dass Bund, Ländern und EU bereits heute große Anstrengungen auf Basis verschiedener politischer Maßnahmen im Verkehr auf den Weg gebracht haben, um auch im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge die Verminderung von CO₂ Emissionen voranzutreiben. Eine umfangreiche Liste dieser Maßnahmen inkl. der Förderprogramme wurde u.a. vom Umweltbundesamt in der Studie "Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen" zusammengestellt (C. Heidt *et al.*, 2019, p. 133).

Zwei Förderprogramme sollen an dieser Stelle nochmals einer gesonderten Betrachtung auch in Hinblick auf die zukünftige Notwendigkeit von Förderprogrammen unterzogen werden.

Die KSNI-Richtlinie zur "Förderung von Nutz- und Sonderfahrzeugen mit klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur" des BALM (*KsNI - Förderung von Nutz- und Sonderfahrzeugen mit klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur*, no date) fördert sowohl Fahrzeuge mit Elektroantrieb als auch die zugehörige Infrastruktur sowie Machbarkeitsstudien. Mit diesen drei Säulen bietet das Programm grundsätzlich eine gute Grundlage zur Einführung emissionsarmer Antriebstechnologien. Mit 80% der Förderung der Mehrkosten wird ein sehr hoher Fördersatz bei den Fahrzeugen angesetzt, der die Möglichkeiten in Bezug auf die EU-Subventionsrichtlinien bereits ausreizt. Gleichwohl gilt es festzustellen, dass die Mehrkosten für interessierte Logistiker bspw. bei der Anschaffung eines FCEV trotz dieses hohen Fördersatzes aktuell immer noch bei ca. 130.000 € ggü. einem vergleichbaren Dieselfahrzeug liegen (Benjamin Wagner vom Berg *et al.*, 2022). Dies stellt aufgrund der generell geringen Margen und knappen Kostenkalkulation bei den Frachtraten weiterhin eine enorme Hürde dar. Zusätzliche Mehrkosten trotz ähnlich hoher Fördersätze entstehen bei der Infrastruktur. Gleichzeitig sind aufgrund der Limitationen und knappen Auswahl bestehender emissionsarmer Fahrzeuge diese in der Regel nicht im 1:1-Austausch für dieselbasierte Systeme einsetzbar. Eine tiefgreifende Untersuchung der Anwendungsfälle und ggf. deren Anpassung an die neuen Technologien ist daher in der Regel immer noch notwendig. Hierfür sind die Machbarkeitsstudien grundsätzlich ein gutes Instrument, jedoch mit der Kappungsgrenze von 150 TEUR für die zuwendungsfähigen Ausgaben und einer max. Förderquote von 50 % in ihrer Attraktivität und Nutzbarkeit limitiert. Das Förderprogramm ist mit seinen Bausteinen und seinen Bestandteilen grundsätzlich auch für die Zukunft als sehr sinnvoll und notwendig anzusehen. Es sollte aber in einem weiteren Schritt neben den Antriebssystemen explizit auch für emissionsarme (Kühl-)Trailer geöffnet und aktiv beworben werden. Hier sollte die Breite der Förderung von den bereits schon bewährten Systemen mit Rekuperationsachse und Kühlung bis bspw. zu innovativen brennstoffzellenbasierten Systemen gestreckt werden. So ließen sich ggf. niederschwellig und sehr schnell Effekte erzielen. Die Förderquoten könnten für die unterschiedlichen Technologien differenziert werden. In diesem Zusammenhang lässt sich auch mit Blick auf den Pkw-Bereich generell konstatieren, dass bei entsprechender Förderhöhe und bestehender Verfügbarkeit der Technologie der Staat signifikante Impulse für eine beschleunigte Marktdurchdringung emissionsarmer Technologien setzen kann.

Das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) der NOW GmbH ist ebenfalls ein Förderprogramm auf Bundesebene, das über verschiedene Förderaufrufe und Unterprogramme Fahrzeuge und Infrastruktur innerhalb der namensgebenden Technologien fördert. Auch die Entwicklung tragfähiger Strukturen und Netzwerke auf regionaler Ebene werden hierbei über das zugehörige Hyland-Programm adressiert. Die gesonderte Förderung von F&E-Projekten ermöglicht gerade auch für OEM, die Kosten für die Fahrzeugentwicklung zu reduzieren und so ggf. die Entwicklung emissionsarmer Fahrzeuge erst zu ermöglichen. F&E-Projekte adressieren neben vielen anderen Bereichen auch explizit den Bereich Nutzfahrzeuge und somit grundsätzlich auch Weiterentwicklungen

im Bereich Trailer. Auch dieses Programm hat zukünftig seine Berechtigung, da wie oben festgestellt, erst die Verfügbarkeit ausgereifter Technologie eine starke Marktdurchdringung ermöglicht. Hier sollten seitens des Fördergebers im Sinne des hier adressierten Themas innovative brennstoffzellenbasierte Kühlsysteme zukünftig priorisiert werden. Dabei können auch solche Trailersysteme mitgedacht werden, die Energiedienstleistungen für das Antriebssystem ermöglichen (s. Kapitel „4.1 Technische Analyse emissionsfreier Kühlsysteme“). Eine Ausweitung auf batterieelektrische oder auch bspw. solarbasierte Systeme, die emissionsarme Kühltransporte ermöglichen, erscheint in diesem Zusammenhang sinnvoll. Die heutige Praxis innerhalb des Programms, in Abhängigkeit des eingeschätzten Technologiereifegrades die Höhe der Förderquote zu reduzieren, sollte insofern übergedacht werden, dass auch Vorhaben mit einem hohen TLR die maximal mögliche Förderung erhalten, sofern dies wettbewerbs- und subventionsrechtlich zulässig ist. Dies würde die notwendige Technologieverfügbarkeit und den Markthochlauf beschleunigen.

Anhand der (exemplarischen) Diskussion zweier wichtiger Förderprogramme soll die weitere Notwendigkeit von Förderung im Bereich emissionsarmer Fahrzeugsysteme unterstrichen werden. Drei wesentliche Maßnahmen sind hier für den Bereich Kühltransporte nochmals hervorzuheben:

1. Erweiterung der KSNI um die Förderung der Anschaffung von emissionsarmen (Kühl-)Trailersystemen aller (inkl. bereits etablierter) Technologievarianten.
2. Fokussierung der Förderung von F&E-Projekten auf die Entwicklung innovativer emissionsarmer (Kühl-)Trailersysteme.

5.5 Darlegung des möglichen Erfordernisses regulatorischer Anpassungen für den Markthochlauf

Während Förderprogramme grundsätzlich den sog. Pull-Maßnahmen zugeordnet werden, indem Anreize geschaffen werden, sind im regulatorischen Bereich auch die sog. Push-Maßnahmen zu verorten, die mit einem Zwang verbunden sind. Die härteste Form der Push-Maßnahmen sind Verbote. Im Folgenden werden alle spezifischen Maßnahmen auf regulatorischer Ebene abschließend subsumiert, die sich meist spezifisch aus den gewonnenen Erkenntnissen dieser Studie ableiten lassen, sofern sie noch nicht in Kapitel „5.3 Handlungsempfehlungen“ und „5.4 Retrospektive Recherche von Förderprogrammen und Darlegung der möglichen Notwendigkeit von Förderprogrammen“ bereits benannt wurden. Weitere regulatorische Maßnahmen finden sich wiederum in der bereits benannten Studie des Umweltministeriums (C. Heidt *et al.*, 2019, p. 133).

Steuer und Maut

Die naheliegendsten regulatorischen Maßnahmen im Verkehrsbereich liegen in den Bereichen Maut und Besteuerung. Sie sind immer dann für eine Beschleunigung des Markthochlaufs geeignet, wenn sie den Logistikern finanzielle Vorteile durch den Wechsel auf eine THG-sparende Technologie verschaffen.

Für die Maut ergeben sich aus den betrachteten Fällen konkrete Hinweise insbesondere auch hinsichtlich der verschiedenen Kombinationen von Fahrzeug und Trailer. Seit dem 01.01.2019 sind in der Erweiterung der Mautbefreiung elektrische (inkl. brennstoffzellenbetriebene) LKW generell von der Mautpflicht befreit. (*Lkw-Maut - FAQ*, no date) werden in der Mautberechnung nur Emissionen des Motorwagens / der Sattelzugmaschine und nicht auf der Ebene Auflieger / Trailer berücksichtigt. Würde die Mautpflicht dahingehend angepasst, dass das Gesamtsystem betrachtet wird, könnten sehr schnell zusätzliche CO₂-Einsparungseffekte auch jenseits des Einsatzes FCEV/BEV abgeschöpft werden.

So wäre eine tlw. Mautbefreiung des Gesamtsystems auch bei konventionellem Antriebsstrang denkbar, wenn der Trailer mit elektrischem Kühlaggregat, mit Rekuperationsachse, Solarsystem, batterie- oder brennstoffzellenbasierter Energieversorgung ausgestattet ist. Die Höhe der Mautbefreiung wäre für die aufgezählten Systeme sinnvollerweise in Abhängigkeit von ihrem THG-Einsparpotential zu differenzieren.

Hinsichtlich des regulatorischen Instruments der Besteuerung sind folgende Ansätze denkbar:

- Teilweise Kfz-Steuerbefreiung von Trailern, die mit elektrischem Kühlaggregat, mit Rekuperationsachse, Solarsystem, batterie- oder brennstoffzellenbasierter Energieversorgung ausgestattet sind. Der Umfang der Steuerbefreiung wäre für die aufgezählten Systeme sinnvollerweise wiederum in Abhängigkeit von ihrem THG-Einsparpotential zu differenzieren. Eine Betrachtung des Gesamtsystems (inkl. Antrieb) erscheint hier schwieriger als bei der Mautbefreiung, da die Einsatzflexibilität der Fahrzeuge durch eine starre Einstufung nicht mehr gegeben wäre.
- Grundsätzlich erscheint auch die CO₂-Bepreisung weiterhin als wirksames Instrument der Regulierung. Auch hiermit ließen sich bei Berücksichtigung der Trailer bzw. genannten Technologievarianten ein positiver Effekt auf den Markthochlauf erzielen.

Die Grundlagen für die Einstufung der genannten Technologien nach THG-Emissionen könnte sowohl im Rahmen der Maut- als auch der Steueranpassungen VECTO for Trailer (s. Kapitel „3.3 Europäische Abgas- und CO₂-Gesetzgebung“) liefern, wenn eine Anpassung von VECTO auf die genannten Technologievarianten erfolgen würde. In diesem Rahmen wäre auch zu überlegen, ob VECTO zumindest in einem gewissen Umfang die betrachteten Systemgrenzen von einer WTW- auf eine Cradle-to-Grave-Betrachtung ausweitet, um auch die THG-Emissionen im Rahmen der Fahrzeugproduktion sowie des Recyclings einzuschließen. Dies wäre allerdings mit einem erheblichen Aufwand verbunden.

Verbote

- Die EU-Flottengrenzwerte (s. Kapitel „3.3 Europäische Abgas- und CO₂-Gesetzgebung“) stellen kein direktes Verbot dar, sind aber das zentrale Instrument, um den Markthochlauf emissionsarmer Fahrzeugtechnologien zu beschleunigen sowie die Fahrzeuge mit fossilen Technologien zu begrenzen. Grundsätzlich ist hier auch eine Ausweitung auf Kühl-Trailer denkbar und mit restriktiven Werten ließe sich der Markthochlauf emissionsarmer Technologien beschleunigen.
- Weitergehend könnte, wie im Pkw-Bereich, im LKW-Bereich über eine zeitliche Zielmarke nachgedacht werden, ab der die Produktion von Neufahrzeugen mit (fossilem) Verbrennungsmotor verboten wird. Wird diese Überlegung auf den Bereich Kühlung beschränkt, so wäre hier das Verbot von dieselbasierten Kühlaggregaten sehr sinnvoll zu diskutieren. Ein Verbot könnte ggf. deutlich schneller als im Antriebsbereich erfolgen, da elektrische Kühlaggregate am Markt grundsätzlich schon etabliert sind und für die Energieversorgung verschiedene Varianten möglich sind. Weitere zeitliche Zielmarken könnte Altfahrzeuge hinsichtlich ihrer Zulassung im Straßenverkehr betreffen, um diese sukzessive aus dem Verkehr zu ziehen.
- Die sehr unterschiedliche Klimawirkung der Kältemittelvarianten zeitigt ein hohes Potential zur THG-Reduktion in diesem Bereich (s. Kapitel „2.1 Technische Analyse der aktuellen Kühlsysteme“). Hier sollten sehr kurzfristig alle Anstrengungen unternommen werden, dass bei bestehenden Systemen ein Austausch der Kältemittel mit der jeweils am wenigsten belastenden Alternative forciert wird und für neu entwickelte Geräte der Einsatz des Kältemittels mit den geringsten Belastungen (z.B. R 454 C) obligatorisch wird. In diesem Rahmen bietet die F-Gase Verordnung bereits den geeigneten regulatorischen Rahmen, um diese Maßgaben EU-weit durchzusetzen. (s. Kapitel „3.4 Regularien zu Kältemitteln“)

- Am Beispiel der Lang-LKW (s. Kapitel „1.2.1 Fahrzeugvarianten und Einsatzbereiche“) wurde verdeutlicht, dass abweichende Abmessungen von Fahrzeugen von der StVZO durchaus relevant sein können, um den Einsatz von klimafreundlichen Transportalternativen zu ermöglichen. Dies kann auch zukünftig im Rahmen der in Kapitel „4.1.2 Untersuchung der technischen Umsetzung in Bezug auf die mögliche Integration dieser Systeme in Kühlkraftwagen“ aufgezeigten Technologiealternativen notwendig sein. Entsprechende Sonderbestimmungen oder Änderungen im Rahmen der StVZO sollten grundsätzlich wohlwollend und beschleunigt umgesetzt werden, um den Einsatz klimafreundlicher Transportalternativen zu begünstigen und nicht zusätzlich zu erschweren.
- Ein weiteres Mittel im Rahmen der Verbote eher auf kommunaler Ebene wären Fahrverbote z. B. innerhalb von sog. Zero-Emission-Zones in Stadtgebieten oder auch die Einführung von emissionsabhängigen Straßennutzungsgebühren und ähnliche Maßnahmen (s. auch Kapitel „2.2.1 Vorüberlegungen zur ökonomischen Analyse“), mit denen sich der Markthochlauf von emissionsarmen Fahrzeugen zusätzlich forcieren ließe. Diese Maßnahmen wurden bspw. auch von der Enquete-Kommission der Bremischen Bürgerschaft vorgeschlagen. Auch der in diesem Rahmen verfasste Enquete-Bericht enthält zahlreiche weitere Maßnahmenvorschläge auf kommunaler, Landes- und Bundesebene für die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs, die im Kontext dieser Studie von Relevanz sind (Martin Michalik, 2021).

Es lässt sich abschließend konstatieren, dass sich im Bereich der Kühltransporte ein hohes Potential bietet, um signifikant THG-Emissionen im Sektor Verkehr einzusparen. Diese Potentiale sind im Bereich Kühlung tlw. schneller und einfacher zu realisieren, als dies im Bereich Traktion der Fall ist. Es wurden eine Reihe von Maßnahmen vorgeschlagen, die die Realisierung dieser Potentiale stark begünstigen können. Diese sollten konsequent und nicht nur im Sinne der bundesdeutschen Zielmarken 65% Reduktion der THG-Emissionen (2030) und Klimaneutralität (2045) sondern auch auf dem Hintergrund noch verfügbarer CO₂-Budgets schnellstmöglich umgesetzt werden.

Literaturverzeichnis

A. Klein *et al.* (2021) *STREAM Freight Transport 2020, ce.nl*. Available at: https://ce.nl/wp-content/uploads/2021/03/CE_Delft_190325_STREAM_Freight_Transport_2020_FINAL.pdf (Accessed: 18 March 2023).

A-500 - KM-Report Online-Edition (no date) *bitzer.de*. Available at: https://www.bitzer.de/shared_media/html/a-500-501/de-DE/index.html (Accessed: 28 February 2023).

Abschlussbericht - Projekt H2Cool Prelude Anbahnung von Kühltransporten mit Wasserstoff-LKW (2022). Bremerhaven: Hochschule Bremerhaven.

Addvult (2018) *Pressemeldung: Transportkältemaschinen endlich emissionsfrei - AddVolt bietet eine unkomplizierte Umrüstung von Diesel- auf Elektroantrieb*, *PortalDerWirtschaft.de*. Available at: <https://www.portalderwirtschaft.de/pressemitteilung/313062/transportkaeltemaschinen-endlich-emissionsfrei-addvolt-bietet-eine-unkomplizierte-umruetzung-von-diesel-auf-elektroantrieb.html> (Accessed: 1 March 2023).

AGENTUR BROGLIE (2021) *Transport Kühlung*. Available at: <http://www.zanotti.de/downloads/21-transportkuehlung.html> (Accessed: 28 February 2023).

Alexander, L. *et al.* (2013) 'Climate change 2013: The physical science basis, in contribution of Working Group I (WGI) to the Fifth Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)', in *Climate Change 2013: The physical science basis*, p. 1535.

Aufwärtstrend: Absatz von Tiefkühlkost steigt 2021 (no date) *tiefkuehlkost.de*. Available at: <https://www.tiefkuehlkost.de/tk-fuer-alle/aktuelles/presse/pressemitteilungen/pm-2022-004-marktdaten-2021> (Accessed: 23 March 2023).

BAG wird BALM (2022) *Bundesamt für Logistik und Mobilität*. Available at: https://www.balm.bund.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/2022/BALM_Disclaimer.html (Accessed: 27 February 2023).

BAX - Der neue elektrische LKW (no date). Available at: <https://www.bax.de/de/start> (Accessed: 20 March 2023).

'BDF Wechselbrücke Maße' (no date) *SDG Modultechnik GmbH*. Available at: <https://sdg-modultechnik.de/service/bdf-system-lexikon/wechselbruecke-masse/> (Accessed: 27 February 2023).

Benjamin Wagner vom Berg *et al.* (2022) *CO₂-freie Hafen- und Logistikprozesse durch Wasserstofftechnologie am Beispiel der Stadt Brake (Unterweser) – Wesermarsch (H2BrakeCO₂)*. Abschlussbericht. HyLand, NOW.

BMDV - Lang-Lkw (2022) *bmdv.bund.de*. Available at: <https://bmdv.bund.de/DE/Themen/Mobilitaet/Gueterverkehr-Logistik/Lang-Lkw/lang-lkw.html> (Accessed: 27 February 2023).

BMDV - Lkw-Maut (2022). Available at: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Strassenverkehr/lkw-maut.html> (Accessed: 11 March 2023).

Bode, M. (2021) 'Kältemittel: Definition, Einsatz und Überblick', *Deutsche-Thermo.de*, 5 July. Available at: <https://www.deutsche-thermo.de/wiki/kaeltemittel/> (Accessed: 28 February 2023).

bpw.de (no date) *Energiegewinnung am Trailer*, *bpw.de*. Available at: <https://www.bpw.de/produkte/achse-fahrwerk/epower> (Accessed: 1 March 2023).

Bruckner, T. *et al.* (2014) 'Technology-specific Cost and Performance Parameters', *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Preprint].

Bundesamt für Güterverkehr (2020) 'Marktbeobachtung Güterverkehr Jahresbericht 2019'. Available at: <https://www.balm.bund.de/DE/Themen/Verkehrswirtschaft/Marktbeobachtung/Jahresberichte/jahresberichte.html> (Accessed: 28 February 2023).

Bundesamt für Güterverkehr (2021) 'Marktbeobachtung Güterverkehr Jahresbericht 2020'. Available at: <https://www.balm.bund.de/DE/Themen/Verkehrswirtschaft/Marktbeobachtung/Jahresberichte/jahresberichte.html> (Accessed: 28 February 2023).

Bundesamt für Güterverkehr (2022) 'Marktbeobachtung Güterverkehr Jahresbericht 2021'. Available at: <https://www.balm.bund.de/DE/Themen/Verkehrswirtschaft/Marktbeobachtung/Jahresberichte/jahresberichte.html> (Accessed: 28 February 2023).

Bundesfinanzministerium (no date) *Kfz-Steuer-Rechner*, *Bundesministerium der Finanzen*. Available at: https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Service/Apps_Rechner/KfzRechner/KfzRechner.html (Accessed: 1 March 2023).

Bundesregierung beschließt Masterplan Ladeinfrastruktur II (2022) Die Bundesregierung informiert | Startseite. Available at: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/masterplan-ladeinfrastruktur-2133696> (Accessed: 1 March 2023).

C. Heidt *et al.* (2019) 'Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen'. Edited by Umweltbundesamt.

Carrier (ed.) (2021) 'Vector eCool'. Available at: <https://www.shareddocs.com/hvac/docs/2000/Public/OC/Vector-eCool-english.pdf> (Accessed: 5 March 2023).

Carrier Transicold präsentiert neues Vector-Konzept mit Wasserstoff-Integration für die Transportkühlung auf der IAA Transportation (2022) Carrier. Available at: <https://www.carrier.com/truck-trailer/de/de/news/news-article/carrier-transicold-demonstrates-new-vector-concept-with-hydrogen-integration-for-road-transport-refrigeration--at-iaa-transportation-show--german-.html> (Accessed: 5 March 2023).

cbt GmbH (no date) *Durchschnittlicher wöchentlicher Dieselpreis in Deutschland bis Februar 2023*, *cbt-gmbh.com*. Available at: https://cbt-gmbh.com/ekz/EKZ_woche.pdf (Accessed: 1 March 2023).

Celsineo (no date). Available at: <https://www.celsineo.com/> (Accessed: 5 March 2023).

Chereau (ed.) (2019) 'PRESSE kit - Pressekonferenz ROAD'.

Chereau (no date) *Entdecken Sie unsere innovativen Produktreihen, Der Spezialist für Kühlaufbauten*. Available at: <https://www.chereau.com/unsere-innovierenden-baureihen.php> (Accessed: 5 March 2023).

CHEREAU - *Véhicules frigorifiques - Expert de la carrosserie frigorifique (no date) Le spécialiste de la carrosserie frigorifique*. Available at: <https://www.chereau.com/accueil.php> (Accessed: 28 February 2023).

Continental (ed.) (no date) 'Infographic: CO₂ emissions regulation, VECTO tool, fuel consumption'. Available at: <https://www.continental-tires.com/transport/fleetsolutions/co2-regulations-vecto/infographic> (Accessed: 24 March 2023).

Deutsche Kommission Elektrotechnik *et al.* (eds) (2021) 'Technischer Leitfaden - Ladeinfrastruktur Elektromobilität'. Available at: <https://www.dke.de/resource/blob/988408/87ed1f99814536d66c99797a4545ad5d/technischer-leitfaden-ladeinfrastruktur-elektromobilitaet---version-4-data.pdf>.

Die Zukunft unter Strom – wie eine europäische Infrastruktur für den Straßengüterfernverkehr möglich ist (2022) TRATON. Available at: <https://traton.com/de/newsroom/aktuelle-themen/die-zukunft-unter-strom.html> (Accessed: 15 March 2023).

DIN - *Wechselbehälter (no date) din.de*. Available at: <https://www.din.de/de/meta/suche/62730!search?query=Wechselbeh%C3%A4lter> (Accessed: 27 February 2023).

DIN 8960:1998-11 (1998) *DIN 8960:1998-11 Kältemittel - Anforderungen und Kurzzeichen, din.de*. Available at: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/fnkae/veroeffentlichungen/wdc-beuth:din21:5146119> (Accessed: 1 March 2023).

DIN EN 378-1:2021-06 (2021) *DIN EN 378-1:2021-06 Kälteanlagen und Wärmepumpen - DGWZ, Deutsche Gesellschaft für wirtschaftliche Zusammenarbeit*. Available at: <https://www.dgwz.de/normen/din-en-378-1> (Accessed: 1 March 2023).

Durchführungsverordnung (EU) 2022/1362 (2022) *Durchführungsverordnung (EU) 2022/1362 der Kommission vom 1. August 2022 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf die Leistung von schweren Anhängern im Hinblick auf deren Einfluss auf die CO₂-Emissionen, den Kraftstoff- und Energieverbrauch und die emissionsfreie Reichweite von Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Durchführungsverordnung (EU) 2020/683 (Text von Bedeutung für den EWR), OJ L*. Available at: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2022/1362/oj/deu (Accessed: 1 March 2023).

DVZ.de (no date) *Wettstreit der 500er*. Available at: <https://www.dvz.de/rubriken/management-recht/nfz-und-flottenmanagement/detail/news/wettstreit-der-500er.html>.

E-200 (no date) Thermo King. Available at: <https://europe.thermoking.com/de/direct-drive/e-series/e-200/> (Accessed: 1 March 2023).

eCool Liner (no date). Available at: <https://www.trailerdynamics.de/product/ecool-liner> (Accessed: 5 March 2023).

Edgar Timm (2020) 'Kältemittel – Ein Überblick: Thermo- dynamische, sicherheits- und umwelt- relevante Herausforderungen'. ki-portal.de. Available at: https://www.ki-portal.de/wp-content/uploads/2020/05/KI_2020_05_Wissenschaft.pdf (Accessed: 27 February 2023).

Edgar Timm (no date) *Alternative Kältemittel*. Available at: <http://etsus.de/Technologieberatung/Kaeltetechnik/Alternative-Kaelttemittel/> (Accessed: 13 March 2023).

E-Drive (no date) *Carrier*. Available at: <https://www.carrier.com/truck-trailer/de/de/products/de-truck-trailer/E-Drive/> (Accessed: 5 March 2023).

electrive.net (2022) *E.ON und Nikola feilen an Ökosystem für H2-Lkw in Europa | H2.LIVE*. Available at: <https://h2.live/news/2710/> (Accessed: 1 March 2023).

Elektroautos: Ladestationen, Preise, Stromanbieter (2022) ADAC. Available at: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/elektroauto-ladesaeulen-strompreise/> (Accessed: 23 March 2023).

Elektroautos: Welche Ladesäule ist unterwegs die Richtige? (2022) *Verbraucherzentrale.de*. Available at: <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/emobilitaet/elektroautos-welche-ladesaeule-ist-unterwegs-die-richtige-52632> (Accessed: 1 March 2023).

Elektrofahrzeuge im Einzelgenehmigungsverfahren (2021). Fahrzeug und Mobilität 764. Köln: TÜV Media GmbH. Available at: <https://www.tuev-media.de/tuev-verband-regelwerk/tuev-verband-merkblaetter/fahrzeug-und-mobilitaet/3981/mb-fzmo-764-elektrofahrzeuge-im-einzelgenehmigungsverfahren-ausgabe-2021-08-18> (Accessed: 27 May 2023).

Emissionsgesetzgebung für Mobile Maschinen: EU Stufe V – Fact Sheet (2017). Frankfurt/Main: VDMA e.V. Available at: https://www.vsbm.ch/resources/2017-05-15_VDMA_EU_Stufe_V_Fact_Sheet_DE3.pdf (Accessed: 1 March 2023).

English - Piek-Keur (no date) *Piek*. Available at: <https://www.piek-international.com/english/?page=home> (Accessed: 10 March 2023).

EU legislation to control F-gases (no date). Available at: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/fluorinated-greenhouse-gases/eu-legislation-control-f-gases_en (Accessed: 1 March 2023).

Europäische Kommission (ed.) (2021) 'Eine europäische Strategie für Schlüsseltechnologien – Eine Brücke zu Wachstum und Beschäftigung'. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2012:0341:FIN:DE:PDF> (Accessed: 15 March 2023).

European Commission (2023) *Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Regulation (EU) 2019/1242 as regards strengthening the CO₂ emission performance standards for new heavy-duty vehicles and integrating reporting obligations, and repealing Regulation (EU) 2018/956, 2023/0042/COD*. Available at: https://eur-lex.europa.eu/procedure/EN/2023_42 (Accessed: 22 May 2023).

EU-Verordnung 2002/178/EG (2002) *Verordnung (EG) Nr. 178/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. Januar 2002 zur Festlegung der allgemeinen Grundsätze und Anforderungen des Lebensmittelrechts, zur Errichtung der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit und zur Festlegung von Verfahren zur Lebensmittelsicherheit, OJ L*. Available at: <http://data.europa.eu/eli/reg/2002/178/oj/deu> (Accessed: 5 March 2023).

EU-Verordnung 2005/37/EG (2005) *Verordnung (EG) Nr. 37/2005 der Kommission vom 12. Januar 2005 zur Überwachung der Temperaturen von tief gefrorenen Lebensmitteln in Beförderungsmitteln sowie Einlagerungs- und Lagereinrichtungen* Text von Bedeutung für den EWR, OJ L. Available at: <http://data.europa.eu/eli/reg/2005/37/oj/deu> (Accessed: 5 March 2023).

EU-Verordnung 2016/1628/EU (2016) *Verordnung (EU) 2016/1628 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. September 2016 über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 1024/2012 und (EU) Nr. 167/2013 und zur Änderung und Aufhebung der Richtlinie 97/68/EG* (Text von Bedeutung für den EWR), OJ L. Available at: <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/1628/oj/deu> (Accessed: 1 March 2023).

EU-Verordnung 2017/2400/EU (2017) *Verordnung (EU) 2017/2400 der Kommission vom 12. Dezember 2017 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Bestimmung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs von schweren Nutzfahrzeugen sowie zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Verordnung (EU) Nr. 582/2011 der Kommission* (Text von Bedeutung für den EWR.), OJ L. Available at: <http://data.europa.eu/eli/reg/2017/2400/oj/deu> (Accessed: 1 March 2023).

EU-Verordnung 2018/858/EU (2018) *Verordnung (EU) 2018/858 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 über die Genehmigung und die Marktüberwachung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 715/2007 und (EG) Nr. 595/2009 und zur Aufhebung der Richtlinie 2007/46/EG* (Text von Bedeutung für den EWR.), OJ L. Available at: <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/858/oj/deu> (Accessed: 27 February 2023).

EU-Verordnung 2019/2144 vom 27. November (2019) *Verordnung (EU) 2019/2144 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. November 2019 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge im Hinblick auf ihre allgemeine Sicherheit und den Schutz der Fahrzeuginsassen und von ungeschützten Verkehrsteilnehmern, zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/858 des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 78/2009, (EG) Nr. 79/2009 und (EG) Nr. 661/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Verordnungen (EG) Nr. 631/2009, (EU) Nr. 406/2010, (EU) Nr. 672/2010, (EU) Nr. 1003/2010, (EU) Nr. 1005/2010, (EU) Nr. 1008/2010, (EU) Nr. 1009/2010, (EU) Nr. 19/2011, (EU) Nr. 109/2011, (EU) Nr. 458/2011, (EU) Nr. 65/2012, (EU) Nr. 130/2012, (EU) Nr. 347/2012, (EU) Nr. 351/2012, (EU) Nr. 1230/2012 und (EU) 2015/166 der Kommission* (Text von Bedeutung für den EWR), OJ L. Available at: <http://data.europa.eu/eli/reg/2019/2144/oj/deu> (Accessed: 27 February 2023).

Fahrzeuge mit Wasserstoffsystemen im Einzelgenehmigungsverfahren (2021). Fahrzeug und Mobilität 766. Köln: TÜV Media GmbH.

Fahrzeugwerk Bernard KRONE GmbH & Co KG (2022) *Krone: „Mission Beyond Zero“*. Available at: <https://www.krone-trailer.com/news/krone-mission-beyond-zero/> (Accessed: 5 March 2023).

Fahrzeugwerk Bernard KRONE GmbH & Co. KG (no date) *Fahrzeugwerk Bernard KRONE GmbH & Co. KG*. Available at: <https://www.krone-trailer.com/> (Accessed: 28 February 2023).

Frank Albers (2019) *CELSINEO - das Produkt*, *krone-trailers.com*. Available at: <https://www.krone-trailer.com/news/celsineo-neue-technologie-fuer-den-kuehltransport/celsineo-das-produkt/> (Accessed: 5 March 2023).

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2021) *E-LKW mit vollintegrierter Photovoltaik nimmt Fahrt auf - Fraunhofer ISE*, *Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE*. Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2021/e-lkw-mit-vollintegrierter-photovoltaik-nimmt-fahrt-auf.html> (Accessed: 28 February 2023).

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (no date) *Lade-PV – Entwicklung von fahrzeugintegrierter Photovoltaik für das On-Board-Laden von Elektro-Nutzfahrzeugen - Fraunhofer ISE*, *Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE*. Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/lade-pv.html> (Accessed: 28 February 2023).

Fresh2 Hydrogen Fuel Cell Refrigerated Transport Project Enters Road Testing Phase (2021) *Carrier*. Available at: <https://www.carrier.com/truck-trailer/en/eu/news/news-article/fresh2-hydrogen-fuel-cell-refrigerated-transport-project--enters-road-testing-phase.html> (Accessed: 5 March 2023).

Frigoblock (2021) *Frigoblock Inverter-Technologie*, *frigoblock.com*. Available at: https://thermokingzapp.com/assets/original/FB10006_Inverter_Technology_10-2021_DE.pdf (Accessed: 1 March 2023).

Frigoblock (no date) *FK 2*. Available at: <https://www.frigoblock.com/de/produkte/fk-serie/fk-2/> (Accessed: 5 March 2023).

GK Grünenfelder AG (2021) *GK erhält Zertifikat für innovativen Fahrzeugbau*. Available at: <https://www.gk-gruenenfelder.com/news/mit-zertifikat-fuer-innovativen-fahrzeugbau-ausgezeichnet/> (Accessed: 22 May 2023).

H2.LIVE: Wasserstofftankstellen in Deutschland & Europa (no date) *H2.LIVE*. Available at: <https://h2.live/> (Accessed: 1 March 2023).

H2Mobility (ed.) (2021) 'Wasserstoffbetankung von Schwerlastfahrzeugen – die Optionen im Überblick'. Available at: https://h2-mobility.de/wp-content/uploads/sites/2/2021/10/H2M_Ueberblick_BetankungsoptionenLNFSNF_TankRast_2021-10-21.pdf (Accessed: 10 March 2023).

Heliox | Schnelladelösungen für Elektrofahrzeuge (no date). Available at: <https://de.heliox-energy.com/> (Accessed: 15 March 2023).

Heneka, M. and Mörs, F. (2022) *Ökologische Bewertung der Wasserstoffbereitstellung*. DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie DWGW / ebi.

Hinrich Helms *et al.* (2019) *Klimabilanz von Elektroautos*. Agora Verkehrswende.

Hochleistungsladen im Lkw-Fernverkehr: Projekt HoLa (no date). Available at: <https://www.hochleistungsladen-lkw.de/hola-de/> (Accessed: 14 March 2023).

Homepage (no date) *Addvolt*. Available at: <https://addvolt.com/> (Accessed: 5 March 2023).

Hyundai (no date) 'Hyundai Hydrogen Mobility - Unser Truck', *Hyundai Hydrogen Mobility*. Available at: <https://hyundai-hm.com/unser-truck/> (Accessed: 22 May 2023).

Hyundai Hydrogen Mobility (no date) *Hyundai Hydrogen Mobility*. Available at: <https://hyundai-hm.com/> (Accessed: 12 March 2023).

Hyzon Motors - Zero Emission, Hydrogen-Powered Vehicles (2023) *Hyzon Motors*. Available at: <https://www.hyzonmotors.com> (Accessed: 12 March 2023).

Infraserv (no date a) *Kältemittel R 410A: Eigenschaften & Alternativen*. Available at: <https://www.infraserv.com/de/leistungen/facility-management/expertenwissen/f-gase/kaeltemittel/spezifische-kaeltemittel/r-410a.html> (Accessed: 28 February 2023).

Infraserv (no date b) *Verwendung, Neuregelung & Verbot von Kältemittel - Infraserv.com*. Available at: <https://www.infraserv.com/de/leistungen/facility-management/expertenwissen/f-gase/kaeltemittel/> (Accessed: 28 February 2023).

ISO 817:2014 (2014) *ISO*. Available at: <https://www.iso.org/standard/52433.html> (Accessed: 28 February 2023).

IWR (2021) *Wasserstoff-Tankstellen: Daimler und Shell treiben Ausbau für Brennstoffzellen-LKW voran, IWR*. Available at: <https://www.iwr.de/news.php?id=37424> (Accessed: 1 March 2023).

Karkoszka, M. (2021) 'Frigoblock stellt die FK2-Kältemaschine für elektrische Transportkühlung und nachhaltige Lieferungen vor'.

Katja Fastrich (2022) *AdBlue-Preis: Warum der Diesel-Zusatz weiter teuer ist, ADAC*. Available at: <https://www.adac.de/news/adblue-preis-gestiegen/> (Accessed: 1 March 2023).

Kiesling (no date) *Kiesling Kühltransporter | Kühlfahrzeuge | Kühlaufbauten*. Available at: <https://www.kiesling.de/> (Accessed: 28 February 2023).

Klimafreundliche, bezahlbare Mobilität (2020) *Die Bundesregierung informiert | Startseite*. Available at: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/kfz-steuer-1759368> (Accessed: 11 March 2023).

'Klimafreundliche Nutzfahrzeuge' (no date) *NOW GmbH*. Available at: <https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderprogramme/klimafreundliche-nutzfahrzeuge/> (Accessed: 10 March 2023).

Klimaschutzgesetz: Klimaneutralität bis 2045 (2022) *Die Bundesregierung informiert | Startseite*. Available at: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (Accessed: 13 March 2023).

Kraftfahrt-Bundesamt (2022a) *Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) Stand 01. Januar 2022*. FZ25. Kraftfahrt-Bundesamt.

Kraftfahrt-Bundesamt (2022b) *Kraftfahrt-Bundesamt - Inlandsverkehr*. Available at: https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscherLastkraftfahrzeuge/vd_inlandsverkehr/vd_inlandsverkehr_node.html (Accessed: 28 February 2023).

Kraftfahrt-Bundesamt (2022c) 'Kraftfahrt-Bundesamt - Verkehrsaufkommen'. Available at: https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscherLastkraftfahrzeuge/vd_Verkehrsaufkommen/vd_verkehrsaufkommen_node.html?yearFilter=2021 (Accessed: 28 February 2023).

Kraftfahrt-Bundesamt (ed.) (2022d) 'Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD) - Güterbeförderung - Jahr 2021'. Available at: https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/deutscherLastkraftfahrzeuge/vd_Gueterbefoerderung/vd_gueterbefoerderung_node.html;jsessionid=10044C3C41BA6F9DBA1D8E1133DFD84C.live21303 (Accessed: 28 February 2023).

Kraftstoffpreise im November 2021 (2021) *clever-tanken.de*. Available at: https://www.clever-tanken.de/news/Kraftstoffpreise_November_2021 (Accessed: 1 March 2023).

Krieger, P.D.W. (2018) *Definition: Güterfernverkehr*, <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/gueterfernverkehr-33427>. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. Available at: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/gueterfernverkehr-33427/version-256953> (Accessed: 27 February 2023).

KsNI - Förderung von Nutz- und Sonderfahrzeugen mit klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur (no date) *balm.bund.de*. Available at: <https://www.balm.bund.de/DE/Foerderprogramme/KlimaschutzundMobilitaet/KSNI/KSNI.html> (Accessed: 1 March 2023).

Laboratory (CSL), N.C.S. (2010) *NOAA CSL: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010*. Available at: <https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2010/> (Accessed: 28 February 2023).

Lauf, T., Memmler, M. and Schneider, S. (2022) 'Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2021'. Edited by Umweltbundesamt, (50/2022).

Lewicki, P. (2021) *Schwere Nutzfahrzeuge*, Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/schwere-nutzfahrzeuge> (Accessed: 1 March 2023).

'Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of \$151/kWh' (2022) *BloombergNEF*, 6 December. Available at: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/> (Accessed: 20 March 2023).

Lkw-Maut - FAQ (no date) *Bundesamt für Logistik und Mobilität*. Available at: https://www.balm.bund.de/DE/Service/FragenAntwortenFAQ/FragenAntwortenLKWMAut/fragenantwortenlkwmaut_node.html (Accessed: 5 March 2023).

M. Otten (2015a) 'Potential of electric trailer cooling during rest periods'. 1, Brussels, December. Available at: <https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/04/PresentationCEDelft1NomadPower1December.pdf> (Accessed: 16 March 2023).

M. Otten (2015b) 'Potential of electric trailer cooling during rest periods'. 2, Brussels, December. Available at: <https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/04/PresentationCEDelft2NomadPower1December.pdf> (Accessed: 16 March 2023).

M. Otten, M. Hoen, and E. den Boer (2015) 'Electric trailer cooling during rest periods - Analysis of emissions and cost'. Available at: https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/04/CE_Delft_4G39_Electric_trailer_cooling_FINAL.pdf (Accessed: 16 March 2023).

Marktdaten (2022) *tiefkuehlkost.de*. Available at: <https://www.tiefkuehlkost.de/tk-fuer-alle/aktuelles/marktdaten1> (Accessed: 27 February 2023).

Marktdaten und Statistiken (no date) VDKL. Available at: <https://www.vdkl.de/leistungen/marktdaten-und-statistiken/> (Accessed: 27 February 2023).

Martin Michalik (2021) 'Abschlussbericht der Enquetekommission "Klimaschutzstrategie für das Land Bremen"'. Available at: https://www.bremische-buergerschaft.de/presse/EK/Abschlussbericht_Enquetekommission_Bremen.pdf (Accessed: 18 March 2023).

Martin Schmied and Wolfram Knörr (2013) *DSLVL-Leitfaden Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik*. Bonn: DSLV Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V. Available at: http://178.63.40.151/dslv/web.nsf/id/li_fdih9a3thv.html (Accessed: 1 March 2023).

Martin Vehse (2018) 'PVThermoTruck', *DLR Event*, 5 April. Available at: <https://event.dlr.de/hmi2018/pvthermotruck/> (Accessed: 28 February 2023).

Maschinen und Geräte (2019) *Umweltbundesamt*. Umweltbundesamt. Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/maschinen-geraete> (Accessed: 1 March 2023).

Megawatt Charging System: Normung unterstützt die globale Elektrifizierung des Schwerlastverkehrs (2021) *dke.de*. Available at: <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/mobility/news/megawatt-charging-system-elektrifizierung-schwerlastverkehr> (Accessed: 15 March 2023).

Megawatt-Projekte: HoLa (no date) *heliox*. Available at: <https://de.heliox-energy.com/megawatt-projekte/hola-electric-truck-charging> (Accessed: 15 March 2023).

Mehr Ladestationen für E-Lkw | EnBW (2022) *enbw.com*. Available at: <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/e-lkw-ladestationen.html> (Accessed: 14 March 2023).

Mitsubishi Heavy Industries Thermal Transport Europe (no date a) *MTTE - TRANSPORTKÜHLUNG IM UMBRUCH, MTTE*. Available at: <https://mhi-tte.com/de/> (Accessed: 28 February 2023).

Mitsubishi Heavy Industries Thermal Transport Europe (no date b) *Produkte, MTTE*. Available at: <https://mhi-tte.com/de/produkte> (Accessed: 28 February 2023).

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (ed.) (2020) 'Werkstattbericht Antriebswechsel Nutzfahrzeuge'. Available at: https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/12/NPM_AG1_Werkstattbericht_Nutzfahrzeuge.pdf (Accessed: 13 March 2023).

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, and Arbeitsgruppe 5 „Verknüpfung der Verkehrs- und Energienetze, Sektorkopplung" (2021) *Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Lkw*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Available at: <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/2download/ladeinfrastruktur-fuer-batterieelektrische-lkw/> (Accessed: 1 March 2023).

Neue Vorschriften für sichere Lkw-Parkplätze (no date) *nomadpower.eu*. Available at: <https://nomadpower.eu/de/neue-vorschriften-fuer-sichere-lkw-parkplaetze> (Accessed: 16 March 2023).

Next Mobility Accelerator Consortium für grünen Wasserstoff H2 - next-mobility.eu (no date) *next-mobility.eu*. Available at: <https://www.next-mobility.eu/> (Accessed: 1 March 2023).

Nollau, H.-G. and Neumeier, M. (2010) *Logistikfallstudien und Risikomanagement*. 1., Auflage. Lohmar Köln: Eul (Reihe: Economy and Labour, Bd. 15).

NomadPower (no date). Available at: <https://nomadpower.eu/de> (Accessed: 12 March 2023).

NOW GmbH (ed.) (2023) 'Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Strassengüterverkehr'. Available at: <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/wp-content/uploads/2023/02/Marktentwicklung-klimafreundlicher-Technologien-im-schweren-Strassengueterverkehr.pdf> (Accessed: 5 March 2023).

P. Plötz and D. Speth (2021) 'Truck Stop Locations in Europe - Final report'. Edited by Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI and for Systems and Innovation Research ISI.

Paschotta, R. (no date) *Rekuperation*. Available at: <https://www.energie-lexikon.info/rekuperation.html> (Accessed: 14 March 2023).

Preisliste 2022 - 2023 (no date) *Spedition • Sommer & Elso GmbH*. Available at: <https://www.sommer-elso.com/preisliste.php> (Accessed: 1 March 2023).

Produkte (no date) *cargobull.com*. Available at: <https://www.cargobull.com/de/produkte> (Accessed: 5 March 2023).

Quentin Wiedemann (2021) *PRESSEMITTEILUNG*. Saint-Cyr/Menthon, Frankreich. Available at: https://www.lamberet.fr/de/upload_presse/Lamberet_Solutrans_Presse_DE_10112021.pdf (Accessed: 28 February 2023).

R404A und alternative Kältemittel (no date) *bitzer.de*. Available at: https://www.bitzer.de/shared_media/html/a-540/de-DE/369886219369931019.html (Accessed: 28 February 2023).

R448A Kältemittel (2018) *cold.world*. Available at: <https://cold.world/de/know-how/r448a-kaltemittel> (Accessed: 28 February 2023).

R449A Kältemittel (2017) *cold.world*. Available at: <https://cold.world/de/know-how/r449a-kaeltemittel> (Accessed: 1 March 2023).

Rathmann, M. (2021) *Markteintritt für 2022 geplant: Hyundai liefert H2-Lkw nach Deutschland, Eurotransport*. Available at: <https://www.eurotransport.de/artikel/markteintritt-fuer-2022-geplant-hyundai-liefert-h2-lkw-nach-deutschland-11190135.html> (Accessed: 1 March 2023).

ReifenDirekt.de (no date) *Lkw-Reifen günstig online kaufen, ReifenDirekt.de*. Available at: <https://www.reifendirekt.de/LKW-Reifen.html#> (Accessed: 1 March 2023).

Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge (Rahmenrichtlinie) (Text von Bedeutung für den EWR) (2007) *OJ L*. Available at: <http://data.europa.eu/eli/dir/2007/46/oj/deu> (Accessed: 1 March 2023).

Robert Domina (2015) *bestof9.eu: Ein Blick zwischendurch auf die Kühlaggregate, Transport Die Zeitung für den Güterverkehr*. Available at: <https://transport-online.de/node/1686> (Accessed: 1 March 2023).

S. Kühnel, F. Hacker, and W. Görz (2018) *Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr*. Berlin: Öko-Institut e. V.

SAF TRAKr: *E-Maschine ohne Seltene Erden* (2021). Available at: <https://safhol-land.com/ch/de/news/artikel/saf-trakr-electric-axle-that-is-rare-earth-free> (Accessed: 5 March 2023).

Schmitz Cargobull (no date). Available at: <https://www.cargobull.com/de> (Accessed: 28 February 2023).

Schmitz Cargobull *Sattelkoffer S.KOe im Praxistest* (2021). Available at: https://www.cargobull.com/de/presse/2021/fahrzeuguebergabe_scoe_tip_ah_cornelissen (Accessed: 1 March 2023).

Seibt, T. (2022) *Megawatt-Akku im Lkw: Riesenbatterie: Elektro-Truck mit 1.000 kWh, auto motor und sport*. Available at: <https://www.auto-motor-und-sport.de/elektroauto/designwerk-schweiz-megawatt-akku-elektrischer-lkw/> (Accessed: 18 March 2023).

Semih Tetik (no date) *Megawatt Charging System (MCS), Charin*. Available at: <https://www.charin.global/technology/mcs/> (Accessed: 22 May 2023).

Shop - NomadPower (no date). Available at: <https://shop.nomadpower.eu>.

Solarserver (2020) *Photovoltaik setzt Lkw unter Strom - Solarserver und spart Sprit, Solarserver*. Available at: <https://www.solarserver.de/2020/10/07/photovoltaik-setzt-lkw-unter-strom/> (Accessed: 28 February 2023).

Solomon, S. *et al.* (2007) 'Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC', in, p. 996.

Sono Motors (2022) *Cooperation with CHEREAU, Sono Motors*. Available at: <https://sonomotors.com/en/press/press-releases/sono-motors-and-chereau-sign-contract/> (Accessed: 28 February 2023).

Sono Motors (no date) *Solar Integration, Sono Motors*. Available at: <https://sonomotors.com/en/solar-integration/> (Accessed: 28 February 2023).

Sorgen Sie bei Ihren Flotten für Konformität mit NRMM Stufe V – dank Verbrennungsmotoren von Thermo King (2019) *Thermo King*. Available at: <https://europe.thermoking.com/de/sorgen-sie-bei-ihren-flotten-fuer-konformitaet-mit-nrmm-stufe-v-dank-verbrennungsmotoren-von-thermo-king/> (Accessed: 5 March 2023).

Stadtzugangsverordnung in Europa - Home (no date) *Urban Vehicle Access Regulations & Low Emission Zones*. Available at: <https://de.urbanaccessregulations.eu/> (Accessed: 10 March 2023).

Statistisches Bundesamt (2008) *Verkehr NST-2007*. Wiesbaden, p. 44. Available at: <https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/Verkehr/gueterverzeichniss-verkehr.html> (Accessed: 28 February 2023).

Stefan Bina (2014) *Ökonomische und ökologische Relevanz von alternativen Energieformen im straßengebundenen gekühlten Güter- und Personentransport*. Masterarbeit. TU Graz. Available at: dilib.tugraz.at/download.php?id=5f3123c43cf88&location=browse.

Stefan Kippelt and Marco Greve (2022) *Einfach laden an Rastanlagen - Auslegung des Netzanschlusses für E-Lkw-Lade-Hubs*. Berlin: Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur.

Strom wäre eine Lösung - Kühlaggregate (2018) *Transport Die Zeitung für den Güterverkehr*. Available at: <https://transport-online.de//node/1759> (Accessed: 1 March 2023).

Thermo King (ed.) (2017) 'T-Serie'. Available at: <http://thermoking-hockenheim.de/wp-content/uploads/2018/06/T-Serie.pdf> (Accessed: 5 March 2023).

Thermo King (ed.) (2020) 'T-Serie'. Available at: https://europe.thermoking.com/wp-content/uploads/2019/07/TK80.21_T-Series-08-2020-DE_V1.0.pdf (Accessed: 5 March 2023).

Thermo King (2022a) *AxlePower Brochure*. Available at: https://thermokingzapp.com/assets/original/TK80081_AxlePower_Brochure_09-2022_DE_V1.0_LR_Spread.pdf (Accessed: 5 March 2023).

Thermo King (ed.) (2022b) 'Spectrum Brochure'. Available at: https://thermokingzapp.com/assets/original/TK80080_Spectrum_Brochure_12-2022_DE_V2.0_LR-spread.pdf (Accessed: 5 March 2023).

TIMOCOM - Der Marktplatz für die Logistikbranche (no date) *TIMOCOM*. Available at: <https://www.timocom.de/> (Accessed: 12 March 2023).

Tobias Schweikl (2021) *Elektrifizierter Kühltransport: Mehr Reichweite dank Photovoltaik - Elektromobilität (E-Mobilität) | News | LOGISTRA - Fachmagazin für Nutzfahrzeug-Fuhrpark und Lagerlogistik (Intralogistik, Flurförderzeuge, Lagertechnik, Lkw)*. Available at: <https://logistra.de//node/63525> (Accessed: 28 February 2023).

Trailer Dynamics GmbH - Technologie (no date). Available at: <https://www.trailerdynamics.de/technologie> (Accessed: 5 March 2023).

Transfrigoroute (no date) *Transfrigoroute*. Available at: <https://www.transfrigoroute.de/> (Accessed: 18 March 2023).

TÜV SÜD Industrie Service GmbH (ed.) (2020) 'ATP Informationsblatt'. Available at: <https://www.tuvsud.com/de-de/-/media/de/industry-service/pdf/broschueren-und-flyer/is/real-estate/technische-gebaeudeausrustung-und-aufzuege/raumluftechnik-klimatechnik/atp-informationsblatt.pdf> (Accessed: 5 March 2023).

Über Carrier (no date) *Carrier*. Available at: <https://www.carrier.com/truck-trailer/de/de/about/factsheet/> (Accessed: 28 February 2023).

Über Kögel - Because we care (no date) *Kögel Trailer*. Available at: <https://www.koegel.com/company/> (Accessed: 28 February 2023).

Umweltbundesamt (2014) *Kohlenwasserstoffe sicher als Kältemittel einsetzen - Entwicklung einer Strategie zum vermehrten Einsatz von Kohlenwasserstoff-Kältemitteln als Beitrag zum deutschen Klimaschutzziel unter Berücksichtigung des Energieziel*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, p. 175. Available at: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_30_2014_kohlenwasserstoffe_sicher_als_kaeltemittel_einsetzen.pdf (Accessed: 28 February 2023).

Umweltbundesamt (2022) *Treibhauspotentiale (Global Warming Potential, GWP) ausgewählter Verbindungen und deren Gemische gemäß Viertem Sachstandsbericht des IPCC bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren*, Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/treibhauspotentiale-global-warming-potential-gwp> (Accessed: 28 February 2023).

Umweltbundesamt (no date) 'Abgasgrenzwerte für LKW und Busse'. Available at: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/420/bilder/dateien/5_tab_grenzwerte-lkw.pdf (Accessed: 11 March 2023).

Uwe Weichenhain *et al.* (no date) *Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie in Baden-Württemberg*. Februar 2020: Roland Berger GmbH.

Vector eCool – Elektrisches System für Kühltransporte (no date) Carrier. Available at: <https://www.carrier.com/truck-trailer/de/de/products/de-truck-trailer/trailer/vector-ecool/> (Accessed: 5 March 2023).

Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über fluorierte Treibhausgase, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2019/1937 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (2022). Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022PC0150&from=EN> (Accessed: 1 March 2023).

Voth, M. and Hesse, G. (2017) *Leistungsprozesse Spedition und Logistik: Informationshandbuch*. 13. Auflage. Köln: Bildungsverlag EINS.

VTG Ramps Up Its SWS-PowerBox Temperature-Controlled Transports (2021) Railvolution. Available at: <https://www.railvolution.net/news/vtg-ramps-up-its-sws-powerbox-temperature-controlled-transports> (Accessed: 1 March 2023).

W. Knörr *et al.* (2016) 'Studie - Verkehrsverlagerungspotenzial auf den Schienengüterverkehr in Deutschland'. Edited by Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Available at: https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS-Wissenschaftliche-Untersuchungen/studie-verkehrsverlagerungspotenzial-schienengueterverkehr.pdf?__blob=publicationFile.

'Wasserstofffahrzeuge' (no date) H2.LIVE. Available at: <https://h2.live/wasserstoffautos/> (Accessed: 14 March 2023).

Weinhold, K. (2016) 'Umrechnungstabelle Energie'. Available at: https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2016/01/Umrechnungstabelle_Energie.pdf (Accessed: 21 March 2023).

Wie sieht eine europäische Ladeinfrastruktur für Batterie-Lkw aus? (2021) Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Available at: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2021/presseinfo-11-europaeische-ladeinfrastruktur-fuer-batterie-lkw.html> (Accessed: 1 March 2023).

Wissenswertes über BDF - Wechselsysteme, Länge, Breite, Höhe, Abmessungen, Innenhöhe, Abstellhöhe (no date) mls-online.de. Available at: <http://mls-online.de/de/service/wissenswertes/wissenswertes-ueber-bdf-wechselsysteme.html> (Accessed: 27 February 2023).

XCIENT Fuel Cell (no date) HYUNDAI Truck & Bus. Available at: <https://trucknbus.hyundai.com/global/en/products/truck/xcient-fuel-cell> (Accessed: 20 March 2023).

ZKF-Workshop zur kommenden CO2-Zertifizierung von Anhängern (2022). Friedberg: Zentralverband Karosserie- und Fahrzeugtechnik e.V. Available at: <https://www.zkf.de/aktuelles/news-detail-seite/workshop-zur-kommenden-co2-zertifizierung-von-anhaengern> (Accessed: 1 March 2023).