

FAT 233



Spezifische Anforderungen an das
Heiz-Klimasystem elektromotorisch
angetriebener Fahrzeuge

Spezifische Anforderungen an das Heiz- Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge

Forschungsstellen:

TLK-Thermo GmbH, Braunschweig

Institut für Thermodynamik, TU Braunschweig

Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig

Autoren:

Dipl.-Ing. Martin Konz

Dr.-Ing. Nicholas Lemke

Dr.-Ing. Sven Försterling

Dipl.-Ing. Marjam Eghtessad

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) gefördert.

Vorwort FAT-Projekt „Elektrofahrzeug-Klimatisierung“

Gesteigerte Mobilitätsansprüche einer ständig wachsenden Weltbevölkerung bei knapper werdenden Ressourcen an fossilen Brennstoffen sowie zunehmende Anforderungen an die Luftqualität – insbesondere in Ballungsräumen – machen die Entwicklung und den forcierten Einsatz alternativer Antriebstechnologien in Fahrzeugen unerlässlich.

Dabei sind Elektrofahrzeuge als eine Zukunftstechnologie mit hohem Lösungspotenzial für die Bewältigung der genannten Herausforderungen anzusehen. Entscheidende Vorteile hinsichtlich der Umweltbelastung können Elektrofahrzeuge insbesondere in Kombination mit der Energiegewinnung aus erneuerbaren Quellen erzielen.

Bedingt durch den deutlich höheren Gesamtwirkungsgrad von Elektrofahrzeugen, bezogen auf den installierten Energieträger, fallen insgesamt weniger Energieverluste an. Diese hohe Effizienz des elektrischen Antriebs führt zu einem anderen Effekt, der eine neue, bis dato ungelöste Herausforderung darstellt.

Die gesamte in Elektrofahrzeugen zur Verfügung stehende Abwärme (von Elektromotor, Leistungselektronik, etc.) ist im Vergleich zu einem Verbrennungsmotor verschwindend gering. Für die Temperierung des Innenraums und die Gewährleistung der Verkehrssicherheit sind Zusatzgeräte notwendig, die einen nicht unerheblichen Energiebedarf (vor allem durch Heizung und Klimaanlage) haben. Diese Energie muss ebenfalls mitgeführt werden und ist im hohen Maße reichweitenrelevant. Durch die geringe Energiedichte der verfügbaren elektrischen Speicher, rückt die Reichweite des Fahrzeugs bei rein batterieelektrischen Antriebskonzepten sehr viel stärker in den Fokus als bei verbrennungsmotorischen Antrieben mit Tanks für flüssige Kraftstoffe.

Aufgrund der geschilderten Herausforderungen hat der FAT- Arbeitskreis 5 „Klimatisierung“ der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) das Projekt " Spezifische Anforderungen an das Heiz- Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge " formuliert und in Auftrag gegeben. Das Forschungsprojekt dient der Analyse, Bewertung und Erarbeitung von Heiz- Klimakonzepten von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen. Ziel war die Schaffung einer gemeinsamen Daten- und Informationsbasis.

Die Projektergebnisse vermeiden Mehrfacharbeiten und Parallelentwicklung und führen insgesamt zu verkürzten Entwicklungszeiten, einem schnelleren Transfer von Know-how, einer verbesserten Aufteilung von Entwicklungsaktivitäten zwischen OEM und Zulieferern und liefern die Grundlage für eine Anpassung der bestehenden technischen Regeln für Kfz an die speziellen Erfordernisse von Elektrofahrzeugen.

Durch die vorliegende Forschungsarbeit wurde zum ersten Mal das gemeinsame Verständnis der deutschen Fahrzeughersteller und –zulieferer hinsichtlich der Herausforderungen beim Heizen und Klimatisieren von batterieelektrischen Fahrzeugen dokumentiert.

Für den Erfolg der Forschungsarbeit war es notwendig, Kenntnisse aus unterschiedlichen Wissensbereichen zu kombinieren. Es wurden spezielle Erfahrungen aus den Bereichen Thermodynamik/Klimatisierung, Fahrzeugtechnik und Gesamtfahrzeugsimulation benötigt. Am Standort Braunschweig konnte mit dem Institut für Thermodynamik, dem Institut für Fahrzeugtechnik (beides Institute der Technischen Universität Braunschweig) und der TLK-Thermo GmbH ein Konsortium gefunden werden, das sich als Forschungsnehmer den Herausforderungen dieses Projektes gestellt hat. Für die geleistete Arbeit dankt der FAT-Arbeitskreis 5 „Klimatisierung“ Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Köhler (Institut für Thermodynamik), Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Küçükay (Institut für Fahrzeugtechnik), Herrn Dr.-Ing. W. Tegethoff (TLK-Thermo) und Dr.-Ing. N. Lemke (TLK-Thermo). Ebenfalls gedankt sei den Mitarbeitern der genannten Einrichtungen, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. M. Konz (TLK-Thermo), Herrn Dr.-Ing. S. Försterling (TLK-Thermo) und Frau Dipl.-Ing. Marjam Eghtessad (Institut für Fahrzeugtechnik).

Weiterhin gilt der Dank auch den Mitarbeitern des Arbeitskreises 5, die das Projekt initiiert und es durch Bereitstellung von Daten, sowie zahlreiche fruchtbare Diskussionen unterstützt haben.

Berlin, im Mai 2011

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Gliederung und Zielsetzung der Untersuchung.....	3
2.1	Gliederung der Studie.....	3
2.1	Ziele der Untersuchung.....	4
3	Literaturrecherche	5
3.1	Patente	5
3.2	Richtlinien und Normen.....	10
3.3	Fachbeiträge und Publikationen	13
4	Methodisches Vorgehen	15
4.1	Fahrzyklus.....	15
4.2	Reichweitenermittlung	16
4.3	Fahrgastraummodell.....	18
4.3.1	Solare Bestrahlung	19
4.3.2	Wärmestrahlung	19
4.3.3	Konvektiver Wärmestrom	20
4.3.4	Differentialgleichungssystem.....	21
4.4	Klimatisierungssystem	23
4.5	Referenzszenarien für die Konditionierung.....	24
4.5.1	Beheizung.....	25
4.5.2	Kühlung.....	25
4.6	Umgebungsrandbedingungen.....	26
5	Fahrzeugklassen.....	27
5.1	Definition der Fahrzeugklassen.....	27
5.2	Fahrzeugparameter	27
5.3	Rekuperationspotenzial.....	28
6	Simulation des Kundenbetriebs	30
6.1	3F-Methodik: Anforderungsermittlung im Kundenbetrieb.....	30
6.2	Fahrzeugmodell und Fahrer- /Fahrumgebungsstatistiken.....	31
6.3	Ergebnisse der Kundensimulation	33
7	Referenz für die Maßnahmenbewertung	37
7.1	Kühlfall.....	37
7.2	Heizfall.....	39
8	Maßnahmen zur Reichweitenerhöhung	41
8.1	Standmaßnahmen	41
8.1.1	Heizfall	41
8.1.2	Kühlfall.....	43
8.2	Reduzierung der thermisch relevanten Masse im Fahrgastraum.....	47

8.3	Umluftbetrieb.....	50
8.4	Wärmepumpe.....	54
8.5	Karosserie-Isolierung	55
8.6	Verschiebung.....	57
8.7	Maßnahmenkombinationen.....	58
9	Vergleich der Ergebnisse von Golf- und Smart-Klasse	61
	Literaturverzeichnis.....	66
	Abbildungsverzeichnis	69
	Anhang	74
A	Modellierung des Fahrgastraums	74
A.1	Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten.....	74
A.2	Parameter des Innenraummodells	76
B	Untersuchungsergebnisse für die Smart-Klasse	77
B.1	Referenz.....	77
B.1.1	Kühlfall.....	77
B.1.2	Heizfall.....	79
B.2	Maßnahmen zur Reichweitenoptimierung	80
B.2.1	Standmaßnahmen.....	80
B.2.1.1	Heizfall.....	80
B.2.1.2	Kühlfall.....	82
B.2.2	Thermische Massen.....	84
B.2.3	Umluft.....	85
B.2.4	Wärmepumpe	87
B.2.5	Karosserie-Isolierung.....	87
B.2.6	Verschiebung	88
B.2.7	Maßnahmenkombinationen	89

Kapitel 1

Zusammenfassung

Im Auftrag des Arbeitskreises 5 (Klimatisierung) der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) wurde die vorliegende Studie zur Bewertung und Optimierung von Reichweiten-Einflüssen beim Heizen und Klimatisieren von Elektrofahrzeugen durchgeführt.

In enger Absprache mit dem Arbeitskreis wurde die Untersuchung an zwei als mögliche Mobilitätskonzepte definierte Fahrzeugklassen durchgeführt. Diese wurden plakativ mit Golf-Klasse und Smart-Klasse benannt.

Zur Durchführung der Studie wurde ein Rechenmodell entwickelt, das zum Einen die Fahrwiderstände des Fahrzeuges berechnet und zum Anderen die Energieströme im Fahrgastraum beim Heizen und Klimatisieren ermittelt. Hiermit wurden der Energiebedarf und die Reichweite nach einer definierten Methodik bestimmt.

Der Reichweiteneinfluss wurde anhand des Neuen Europäischen Fahrzyklus untersucht, wobei als Referenzzustand für den Heizfall ein unter freiem Himmel ausgekühltes bzw. für den Kühlfall ein der Solarstrahlung ausgesetztes Fahrzeug betrachtet wurde. In die Untersuchung wurden verschiedene Standmaßnahmen, Teil-Umluftbetriebsarten, der Einsatz einer Wärmepumpe sowie der Einfluss einer verbesserten Karosserie-Isolierung und einer optimierten Verschleibung untersucht. Weiterhin wurde der Einfluss der thermisch relevanten Massen des Fahrgastraums bewertet.

Von dem Referenzfahrzeug ausgehend, wurde zunächst die Reichweite mit konventioneller Beheizung bzw. Klimatisierung berechnet. Dafür wurden Referenzszenarien definiert, die als Ausgangspunkt für Optimierungsmaßnahmen genutzt wurden. Diese zeigten, dass die Reichweite für die definierten Fahrzeugklassen im Kühlfall bei hoher Außentemperatur und solarer Einstrahlung um bis zu 46 % und im Heizfall bei großer Kälte um 43 % reduziert sein können.

Über einen großen Außentemperaturbereich hinweg lassen sich bereits deutliche Reichweitensteigerungen erzielen, wenn das Fahrzeug optimal in der Standphase konditioniert wird. Hier stellte sich heraus, dass bereits eine außen angebrachte Frontscheibenverschattung zu signifikanten positiven Effekten führt. Auch der Teil-Umluftbetrieb erwies sich über den gesamten Außentemperaturbereich hinweg als vorteilhaft. Neben den Energieeinsparpotenzialen ließ sich ein deutlich gesteigerter Komfort nachweisen, jedoch sind die negativen Auswirkungen auf Luftqualität und Scheibenbeschlag zu berücksichtigen.

Für den Heizfall erwies sich der Einsatz einer Wärmepumpe als besonders effektiv. Es ließen sich Reichweitensteigerungen von bis zu 38 km erzielen, auf die Einfachheit des verwendeten Modells sei an dieser Stelle jedoch verwiesen. Für Karosserie-Isolierungen zeigte sich, dass nur eine Kombination mit einer entsprechenden Konditionierungsmaßnahme bereits in der Standphase zu Reichweitevorteilen führen kann. Hier konnte ein Reichweitevorteil von bis zu 4 km ausgewiesen werden.

Die Ergebnisse für die Golf-Klasse werden im vorliegenden Bericht ausführlich diskutiert. Für die Smart-Klasse sind die Resultate vergleichbar, so dass die Ergebnisse grafisch präsentiert werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass nur eine Kombination der betrachteten Einzelmaßnahmen zusammen mit einer intelligenten Regelstrategie zu einer nennenswerten Steigerung der Reichweite bei Elektrofahrzeugen führen kann. So konnte bei einer Außentemperatur von -20°C durch die sinnvolle Kombination von Einzelmaßnahmen die Reichweitenabnahme im Heizfall von 82 km auf 20 km begrenzt werden. Für den Kühlfall bei 35°C Außentemperatur konnte die Reichweitenabnahme durch das Klimatisieren von 88 km auf 26 km reduziert werden.

Kapitel 2

Gliederung und Zielsetzung der Untersuchung

2.1 Gliederung der Studie

Die vorliegende Studie „Spezifische Anforderungen an Heiz-Klimasysteme elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge“ gliedert sich in die folgenden sieben Hauptkapitel:

1. Literaturrecherche

Die Literaturrecherche (Kapitel 3) liefert einen Überblick über Patente, Richtlinien und Normen, die sich mit der Beheizung und Kühlung von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen befassen. Weiterhin werden relevante Fachbeiträge und Publikationen beleuchtet.

2. Methodisches Vorgehen

Kapitel 4 beschreibt die Berechnungsgrundlagen für die Reichweitenermittlung sowie das genutzte Fahrgastraummodell. Die der Untersuchung zugrundeliegenden Umgebungsrandbedingungen sowie der Fahrzyklus werden vorgestellt.

3. Fahrzeugklassen

Die Untersuchung wird anhand der in Kapitel 5 definierten beiden Fahrzeugklassen durchgeführt, die plakativ mit Golf- und Smart-Klasse benannt wurden.

4. Simulation des Kundenbetriebs

Im Kapitel 6 wird für die im Vorkapitel definierten Fahrzeugklassen der reale Kundenbetrieb mit dem für die Untersuchung gewählten Fahrzyklus in Hinblick auf den Energieverbrauch für den reinen Fahrbetrieb verglichen. Die Annahmen für die Simulation des Kundenbetriebs sowie deren zugrundeliegende Datenbasis werden vorgestellt.

5. Referenz für die Maßnahmenbewertung

Als Referenz für die Maßnahmenbewertung werden in Kapitel 7 die Reichweiten und Energieverbräuche sowie die erzielbaren Lufttemperaturen im Fahrgastraum für ein Fahrzeug ohne Modifikationen diskutiert. Dabei wird zwischen dem Heiz- und dem Kühlfall unterschieden.

6. Maßnahmen zur Reichweitenerhöhung

In Kapitel 8 werden verschiedene Maßnahmen bezüglich ihres Potenzials zur Reichweitenerhöhung untersucht. Dabei werden sowohl Maßnahmen betrachtet, die die Bedingungen im Fahrgastraum bereits vor Fahrtantritt beeinflussen wie auch sol-

che, die während des eigentlichen Fahrbetriebs wirksam sind. Zusammenfassend werden exemplarisch Maßnahmenpakete vorgestellt, die aus den verschiedenen Einzelmaßnahmen kombiniert worden sind.

7. Vergleich der Ergebnisse von Golf- und Smart-Klasse

Eine abschließende vergleichende Darstellung der Ergebnisse von Golf- und Smart-Klasse liefert Kapitel 9. Aufgrund der großen Ähnlichkeiten der erzielten Untersuchungsergebnisse werden hier ausschließlich etwaige Unterschiede zwischen den beiden Fahrzeugklassen erläutert.

2.1 Ziele der Untersuchung

Im Vergleich zu verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen der aktuellen Generation ist das im Elektrofahrzeug zur Verfügung stehende Abwärmeangebot nochmals reduziert, so dass für die Beheizung des Fahrgastraums andere Verfahren als die heute üblichen zum Einsatz kommen müssen.

Aufgrund des nicht unerheblichen energetischen Aufwands für die Beheizung ist die gewählte Beheizungsalternative in hohem Maße reichweitenrelevant, zumal die Energie aus dem mitgeführten Energiespeicher des Fahrzeugs zur Verfügung gestellt werden muss. Analoges gilt gleichfalls für die Klimatisierung des Fahrgastraums, die aus heutigen Fahrzeugen nicht mehr wegzudenken ist.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, eine Bewertung verschiedener Heiz- und Klimakonzepte hinsichtlich ihrer Reichweitenrelevanz für elektromotorisch angetriebene Fahrzeuge durchzuführen. Neben den Auswirkungen auf die Reichweite soll explizit auch die Auswirkung auf den Komfort im Fahrgastraum in die Bewertung einbezogen werden. Ausgehend von einem Referenzfahrzeug sollen verschiedene Einzelmaßnahmen hinsichtlich ihres Reichweitenpotenzials untersucht werden.

Kapitel 3

Literaturrecherche

Dieses Kapitel liefert zunächst eine Auflistung von Patenten, die das Thema Beheizung und Kühlung von elektrifizierten Fahrzeugen behandeln bzw. hierfür von Interesse sein könnten. Weiterhin werden Richtlinien und Normen vorgestellt, die zu beachten sind. Abschließend erfolgt eine knappe Darstellung von veröffentlichten Fachbeiträgen und Publikationen.

3.1 Patente

In die Recherche wurden sowohl Patente zu Energieverbrauch reduzierenden Maßnahmen für die Beheizung und Kühlung wie auch Konzepte zu Personen- und Betriebssicherheit berücksichtigt. Die nachstehende Auflistung stellt in chronologischer Reihenfolge relevante Patente in knapper Form vor. Die getroffene Auswahl erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit und soll einen Überblick über die wichtigsten Patente verschaffen.

- **Schutzrecht US 1994/5280852 (1994-01-25). Valeo Thermique Habitacle. Pr. FR 92 02178.**

Es wird ein Konzept zur Nutzung der Motorabwärme eines vollelektrifizierten Fahrzeugs zur Beheizung des Fahrgastraums dargestellt. Dabei wird die Abwärme des elektrischen Antriebsmotors mit einem Luftkühler abgeführt. Die Kühlluft wird in einem geschlossenen Luftkreislauf direkt in die Fahrzeugkabine eingebracht. Über einen PTC-Zuheizer kann elektrisch zugeheizt werden, über Ventile und Bypässe die Temperatur den Erfordernissen angepasst werden.

- **Schutzrecht US 1994/5275012 (1994-01-04). Ford Motor Company.**

Beschrieben wird die Regelung für ein elektrisches Fahrzeug mit einem programmierbaren Mikrocomputer sowohl zur Steuerung der Vorkonditionierung des Fahrzeugs vor der Verwendung als auch zur Regelung des typischen Klimaanlagebetriebs. Der Mikrocomputer reagiert auf eine Vielzahl von Nutzereingaben sowie Sensoreingängen. Seine Ausgänge dienen zur Regelung von Kompressordrehzahl, Kondensator- und Gebläselüfter sowie Umluftklappen in der HVAC-Unit.

- **Schutzrecht US 1994/5325912 (1994-07-05). Honda Giken Kogyo Kabushiki Kaisha. Pr. JP 3-312825.**

Es wird ein Klimatisierungssystem mit einem reduzierten Energieverbrauch während der Defrost-Phase für ein vollelektrifiziertes Fahrzeug beschrieben. In die Regelung der Klimaanlage sowie der Scheibenheizung ist mindestens ein Beschlagsensor integriert, um die auskondensierte Feuchtigkeit detektieren zu können.

- **Schutzrecht US 1994/5330385 (1994-07-19). Honda Giken Kogyo Kabushiki Kaisha. Pr. JP 3-320726.**

Dieses Patent beschreibt ein Klimatisierungssystem für ein vollelektrifiziertes Fahrzeug mit einer regelungstechnischen Überwachung der Fahrgastraumumgebung. Das Klimatisierungssystem wird z.B. abgeschaltet, wenn das Fahrzeug nicht besetzt ist oder wenn geöffnete Fenster oder Türen detektiert werden.
- **Schutzrecht US 1995/5386704 (1995-02-07). Valeo Thermique Habitacle. Pr. FR 92 04712**

Beschrieben wird ein Elektrofahrzeug mit einem Klimatisierungssystem, bei dem Verdampfer und Kondensator eines Kältekreislaufs in unterschiedlichen Luftkanälen positioniert sind. Durch eine entsprechende Luftklappenregelung wird ein Kühlen bzw. ein Aufheizen der in den Fahrgastraum einströmenden Luft erreicht.
- **Schutzrecht US 1995/5421169 (1995-06-06). Valeo Thermique Habitacle. Pr. FR 92 12741.**

Dargestellt wird eine Vorrichtung, die einen Kältekreislauf mit einem Verdampfer und einem Kondensator umfasst. Beide sind als Kältemittel-Wasser-Wärmeübertrager ausgeführt, die über einen komplexen Wasserkreislauf mit zwei Wasser-Luft-Wärmeübertragern (Frontend, Fahrgastraum) verbunden sind. Der Wasserkreislauf verfügt über zwei Pumpen sowie vier Schaltventile, die eine Umschaltung zwischen Klimatisierungs- und Heizbetrieb zulassen.
- **Schutzrecht US 1995/5477700 (1995-12-26). Zexel Corporation. Pr. JP 5-277659.**

Es wird ein Wärmepumpenprozess für ein vollelektrifiziertes Fahrzeug betrachtet, wobei der Fokus auf die Optimierung des Umschaltvorgangs von Kühl- auf Heizbetrieb insbesondere in Hinblick auf die Kältemittelverteilung im Kreislauf liegt.
- **Schutzrecht US 1995/5478274 (1995-12-26). Valeo Thermique Habitacle. Pr. Fr. 93 07652.**

Ein Belüftungs-, Heiz- und Klimatisierungsgerät insbesondere für vollelektrifizierte Fahrzeuge wird beschrieben, wobei insbesondere auf die Anordnung der Komponenten sowie die Luftführung im HVAC-Modul eingegangen wird.
- **Schutzrecht US 1996/5483805 (1996-1-16). Nissan Motor Co.. Pr. JP. 5-343671.**

Beschrieben wird eine Regelung für ein vollelektrifiziertes Fahrzeug, wobei diese insbesondere darauf ausgelegt ist, den Umschaltvorgang zwischen Heiz- und Klimatisierungsbetrieb zu optimieren. Hierbei werden Mindestzeiten für die beiden Betriebsarten definiert, um ein Oszillieren zwischen Heiz- und Kühlbetrieb zu verhindern. Des Weiteren erfolgt die Umschaltung nur bei niedrigen Drehzahlen des Verdichters.
- **Schutzrecht US 1996/5483805 (1996-1-16). Nissan Motor Co.. Pr. JP. 5-343671.**

Vorgestellt wird ein Heizsystem für ein vollelektrifiziertes Fahrzeug, das zum einen aus einer Wärmepumpe und zum anderen aus einem elektrischen Heizer besteht. Die Umschaltung zwischen den beiden alternativen Heizungen erfolgt je nach benötigter elektrischer Leistung.

- **Schutzrecht US 1996/5483807 (1996-01-16). Mercedes-Benz AG. Pr. DE 43 27 866.3.**
Dieses Patent stellt ein Wärmemanagementsystem für ein vollelektrifiziertes Fahrzeug vor. Das Wärmemanagementsystem besteht aus zwei gekoppelten Kreisläufen zur Klimatisierung des Fahrgastraums und zur Kühlung des Antriebssystems. Beide Kreisläufe verfügen über einen gemeinsamen Energiespeicher, der mittels eines Umschaltventils wechselweise in einen der beiden Kreisläufe eingebunden werden kann.
- **Schutzrecht US 1996/55050251 (1996-4-9). Valeo Climatisation. Pr. FR. 92 12739.**
Die Luftführung in einem HVAC-Modul eines vollelektrifizierten Fahrzeuges wird erläutert, in welche ein zusätzlicher Kühlmittel-Luft-Wärmeübertrager zur Kühlung des Antriebsmotors integriert ist. Die unterschiedlichen Betriebszustände und deren Regelung werden beschrieben.
- **Schutzrecht US 1996/5524446 (1996-6-11). Honda Giken Kogyo Kabushiki. Pr. JP. 3-312822, JPK 3-312823, JP 3-3312824, JP 4-011421.**
Vorgestellt wird ein Klimatisierungssystem für ein vollelektrifiziertes Fahrzeug. Die Anlage kann mittels dreier Wärmeübertrager sowohl im Klimatisierungs- als auch im Wärmepumpenbetrieb arbeiten.
- **Schutzrecht US 1996/5549153 (1996-8-27). Behr GmbH & Co. Pr. DE. 42 38 364.1.**
Ein Klimatisierungssystem zur Kühlung der Antriebskomponenten einschließlich der Batterie und zur Beheizung des Fahrgastraums für ein vollelektrifiziertes Fahrzeug wird dargestellt. Auf die vielfältigen Anforderungen an die Regelung des Klimatisierungssystems wird eingegangen.
- **Schutzrecht US 1997/5624003 (1997-04-29). Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha. Pr. JP. 4-330664, JP 5-162525.**
Eine Einrichtung zur Beheizung der Traktionsbatterie eines vollelektrifizierten Fahrzeuges wird vorgestellt. Die Einrichtung besteht aus einem Verbrennungsheizer sowie einem Abgaswärmeübertrager, um Wärme an die Batterie zu transferieren.
- **Schutzrecht US 1997/5647534 (1997-07-15). Mercedes-Benz AG. Pr. DE 44 33 836.8.**
Beschrieben wird ein Heizkonzept für den Fahrgastraum eines vollelektrifizierten Fahrzeuges mit luftgekühlter Traktionsbatterie durch Abgabe der Batterie- und Antriebskomponentenabwärme an einen Kühlkreislauf. In den Kühlkreislauf sind weitere zu kühlende und Wärme erzeugende Komponenten eingebunden.
- **Schutzrecht US 1997/5656916 (1997-08-12). Honda Giken Kogyo Kabushiki. Pr. JP. 6-201165.**
Dieses Patent beschreibt einen Regler für vollelektrifizierte Fahrzeuge, der den Betrieb von Klimatisierungseinrichtungen auf Anforderung auch während des Ladevorgangs ermöglicht. Zeitgleich mit der Beladung erfolgt so z.B. eine Konditionierung des Fahrgastraums.

- **Schutzrecht US 1998/5709102 (1998-01-20), Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. Pr. JP 7-028160.**

Es wird ein Wärmepumpenkreislauf mit entsprechenden Kreislauf- und Verschaltungskomponenten zur Kühlung, Heizung und Entfeuchtung eines Elektrofahrzeugs vorgestellt. Zum Einsatz kommen ein 4-Wege-Ventil und zwei mit Kältemittel durchströmte Wärmeübertrager im Heiz-Klimagerät.
- **Schutzrecht US 1998/5878589 (1999-05-09). Denso Corporation. Pr. JP 8-088557, JP 102965, JP 8-318240.**

Das Patent beschreibt eine Klimatisierungseinrichtung für vollelektrifizierte Fahrzeuge. Dabei wird Abwärme eines Innenraumheizers bei niedrigen Umgebungstemperaturen vom Kältekreislauf genutzt, um eine Mitteldruckeinspritzung in den Verdichter zu ermöglichen, die bei unveränderter Antriebsleistung die Heizleistung erhöht.
- **Schutzrecht US 1999/5971290 (1999-10-26). Honda Giken Kogyo Kabushiki Kaisha. Pr. JP 9-11085, Pr. JP 9-112086.**

Ein Wärmeübertragungssystem bestehend aus zwei gekoppelten Wasserkreisläufen zum Kühlen von Batterie und Motor sowie zum Beheizen des Fahrgastraums wird beschrieben.
- **Schutzrecht US 2000/6040561 (2000-03-21). General Motors Corporation.**

Präsentiert wird ein Zuheizung-Regelungssystem für das Klimatisierungskonzept eines Elektro- oder Hybridfahrzeugs. Ein elektrischer Heizer wird mittels eines pulsweitenmodulierten Signals gesteuert, um bedarfsgerecht den Fahrgastraum zu heizen. Zusätzlich kann über diesen elektrischen Heizer elektrisch gebremst werden, wenn regeneratives Bremsen nicht erwünscht ist und mechanisches Bremsen nicht erforderlich ist. Des Weiteren kann über den elektrischen Heizer eine Hochspannungskondensatorbank entladen werden.
- **Schutzrecht US 2000/6082128 (2000-06-04). DaimlerChrysler Corporation.**

Ein kombiniertes Wärmepumpen-Klimaanlagenkonzept, das eine Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb erlaubt, wird beschrieben. Vorgestellt wird eine Drosselanlage, die den bidirektionalen Kältemittelstrom von den Wärmeübertragern in einen unidirektionalen Kältemittelstrom zur Drosselanlage umwandelt. Damit sollen komplizierte Verrohrungen und Ventile, wie sie konventionell für den Umschaltbetrieb von Kälteanlagen notwendig sind, vermieden werden. Sammler- und Filterfunktionen sind in dieses Konzept ebenfalls integriert.
- **Schutzrecht US 2000/6138466 (2000-10-31). Daimler Chrysler Corporation.**

Eine Klimatisierungseinrichtung für die Traktionsbatterie vollelektrifizierter Fahrzeuge wird vorgestellt, die als Wärmequelle für den Wärmepumpenkreislauf des Fahrzeuges dient. Die Anbindung erfolgt über einen Sekundärkreislauf.
- **Schutzrecht US 2001/6178760 (2001-01-30). Denso Corporation. Pr. JP 10-271202.**

Beschrieben wird eine Klimaanlage für ein Elektrofahrzeug mit Sekundärbatterie sowie ein Regelungskonzept für die Scheibenenteisung. Ein äußerer Wärmeübertrager

wird für Heizzwecke als Verdampfer betrieben. Angeschlossen an eine Ladestation wird eine Sekundärbatterie erst dann aufgeladen, wenn der Scheibenenteisungsprozess abgeschlossen ist.

- **Schutzrecht WO 2008/127527 A1 (2008-03-12). Tesla Motors, Inc. Pr. US 11.04.2007.**

Es wird ein Thermomanagement-System für Elektrofahrzeuge dargestellt, das mit einem Wärmeübertrager arbeitet. Dieser bedient einen Kühlkreislauf zur Batteriekonditionierung, einen Kühlkreislauf zur Konditionierung des Fahrgastraums und einen möglichen weiteren Kühlkreislauf zur Kühlung des Antriebsmotors und der Leistungselektronik. Für die Beheizung des Fahrgastraums wird das Kühlsystem für den Antriebsstrang eingekoppelt. Reicht die Wärme nicht aus, kann über einen PTC-Heizer zugeheizt werden. Der Wärmeübertrager wird von einer Kompressionskälteanlage als Verdampfer genutzt, um die gewünschte Kühlleistung zur Verfügung zu stellen.

- **Schutzrecht US 2009/7552705B2 (2009-06-30). The Gates Corporation. Pr. US 2008/0217083A1.**

Beschrieben wird ein Start/Stop-System für Fahrzeuge mit Bremsenergieerückgewinnung über einen riemengetriebenen Generator. Die zurückgewonnene Bremsenergie kann für das Heizen des Fahrzeuges, die Klimatisierung des Fahrgastraums und das Starten des Verbrennungsmotors (Start/Stop-Betrieb) genutzt werden.

- **Schutzrecht DE102008017329A1 (2009-10-08). Daimler AG.**

Es wird ein Verfahren zum Betreiben eines Klimatisierungssystems für Kraftfahrzeuge bei ausgeschalteter Zündung dargelegt. Dazu wird ein elektrischer Kältemittelverdichter per gesondertes Steuersignal beim Öffnen des Fahrzeugs aktiviert. Durch dieses Komfortöffnen soll insbesondere im Sommer eine beschleunigte Ent- und Belüftung des Fahrgastraums erreicht werden.

- **Schutzrecht US 2009/0256523 A1 (2009-10-15). Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha.**

Ein Ladesystem wird vorgestellt, das neben der elektrischen Stromversorgung auch die thermische Konditionierung der Batterie durch von außen angeschlossene Luftversorgungsschläuche ermöglicht.

- **Schutzrecht US 2010/0012295 A1 (2010-01-21). GM Global Technology Operations, Inc.**

Beschrieben wird ein HVAC und Batterie-Thermomanagement-System für ein Fahrzeug mit Generator und Batteriesystem. Über ein 3-Wege- und ein 4-Wege-Ventil werden die Betriebsmodi Batterieheizen, Fahrgastraumbeheizung und kombiniertes Heizen für verschiedene Fahrzustände geschaltet.

- **Schutzrecht US 2010/0012295 (2010-01-21). GM Gloal Technology Operations Inc.**
Ein Verfahren für das thermische Management von Innenraum- und Batteriekonditionierung wird beschrieben. Die systemische Verschaltung der Konditionierungseinrichtungen wird vorgestellt.
- **Schutzrecht DE 10 2009 035 329 A1 (2010-01-21). Daimler AG.**
Dieses Patent beschreibt ein Verfahren zur Kühlung der Batterie. Der Batteriekühlkreislauf ist dabei als Sekundärkreislauf zum Kältekreislauf ausgeführt. Die Steuerung des Verdichters des Kältekreislaufs erfolgt in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und der Fahrzeuggeschwindigkeit.
- **Schutzrecht DE 102009035329A1 (2010-02-11). Daimler AG.**
Es wird eine über einen Wasserkreislauf gekühlte Batterie vorgestellt. Die in der Batterie entstehende Wärme wird an den Wasserkreislauf übertragen. Der Wasserkreislauf ist über einen Wärmeübertrager thermisch an einen Kältemittelkreislauf gekoppelt. Der Wasserkreislauf kann kältemittelseitig mittels eines Absperrventils abgekoppelt werden. Ferner ist im kältemittelseitigen Pfad des Wasserkreislaufs ein zusätzliches Expansionsventil für das Kältemittel vorgesehen.

3.2 *Richtlinien und Normen*

Nachfolgend werden Richtlinien und Normen beschrieben, die für die Klimatisierung und die Reichweitenermittlung von Interesse sind. In die Betrachtung werden ausdrücklich auch zum jetzigen Zeitpunkt nur für konventionelle Fahrzeuge gültige Richtlinien und Normen aufgenommen. Hier werden insbesondere die DIN 1946, Teil 3 hinsichtlich der Klimatisierung von Personenkraftwagen sowie die gültige EU-Verordnung 672/2010/EG für die Scheibenenteisung und -trocknung näher vorgestellt.

- **DIN 1946, Teil 3**
In DIN 1946, Teil 3 wird die Klimatisierung von Personenkraftwagen und Lastkraftwagen beschrieben. Mindestanforderungen an die Lüftung, Heizung und Klimatisierung von Fahrzeugkabinen werden wegen der unterschiedlichen Bauarten der Fahrzeuge getrennt spezifiziert. Maßnahmen zur Entfeuchtung und Enteisung sowie Hygiene-Anforderungen werden nicht berücksichtigt.
Die mittlere Lufttemperatur im Innenraum wird in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur definiert. Diese weist ein Minimum von 22 °C bei einer Außenlufttemperatur von ca. 20 °C auf, siehe Abbildung 1. Bei Außenlufttemperaturen von über 20 °C sollte eine höhere Innenraumtemperatur eingestellt werden, bei niedrigeren Außenlufttemperaturen ist die Innenraumtemperatur aus Komfortgründen anzuheben. Eine Temperaturschichtung von 2 K bis maximal 12 K zwischen Kopf- und Fußraum ist vorzusehen. Die Oberflächentemperaturen in der Fahrgastkabine sollten der Hauttemperatur nahe kommen. Weitere Behaglichkeitseinflüsse, wie Strömungsgeschwindigkeiten, Geräusche, Luftdruck, Sonneneinstrahlung etc. werden quantifiziert.
Des Weiteren werden in DIN 1946, Teil 3 Richtwerte und Hinweise zur Klimatisierung von Fahrzeuginnenräumen vorgegeben. So ist für den Winterfall bei Außenluft-

betrieb mit einer Umgebungstemperatur von -20°C nach spätestens 30 Minuten eine mittlere Lufttemperatur von 20°C im Fahrgastraum zu erreichen. In Sonderfällen, wie z.B. bei verbrauchsarmen Fahrzeugen, zu denen auch Elektrofahrzeuge gezählt werden können, ist eine mittlere Lufttemperatur von mindestens 15°C ausreichend. Im Sommerfall wird bei einer Umgebungstemperatur von 40°C und einer Einstrahlung von 1000 W/m^2 eine Abkühlung der mittleren Lufttemperatur auf kleiner 25°C nach spätestens 30 Minuten gefordert. Analog zum Winterfall wird unter Sonderbedingungen nach 30 Minuten eine Temperatur von 30°C als akzeptabel eingestuft.

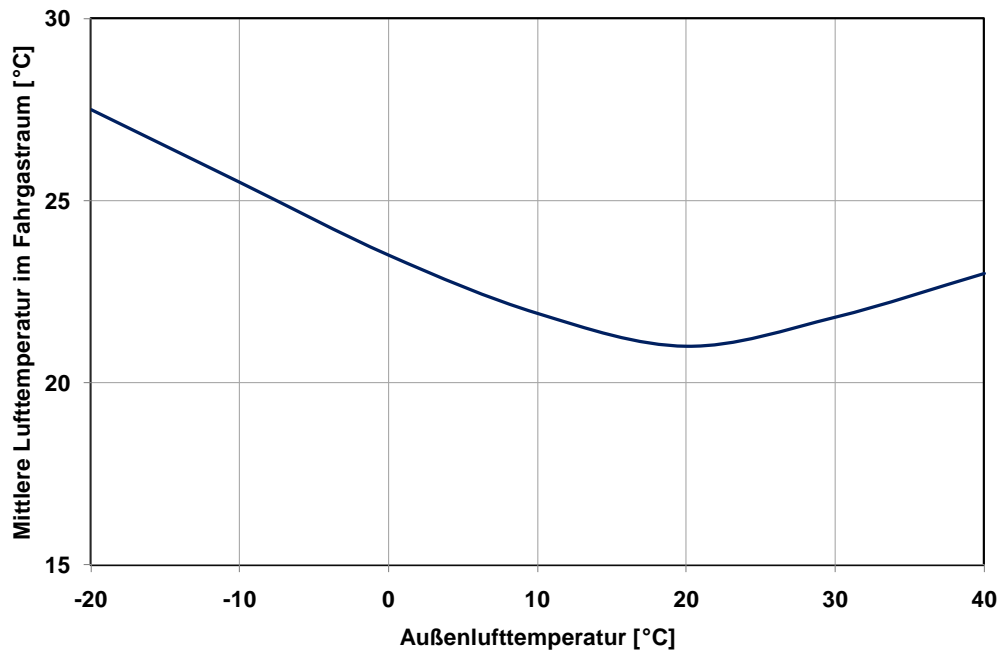


Abbildung 1: Anzustrebende mittlere Lufttemperatur zur Aufrechterhaltung des Komforts im Fahrgastraum in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur

- **FMVSS 103**

Die Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS) umfassen Vorschriften für Mindestanforderungen an Baugruppen, die zum Betrieb von Fahrzeugen in den USA zur Anwendung kommen. Die näher betrachtete Vorschrift FMVSS 103 beschreibt das Testverfahren zur Bewertung von Enteisung und Beschlagfreiheit der Frontscheibe.

Gemäß FMVSS 103 wird das Fahrzeug zur Vorkonditionierung für mindestens 14 Stunden in einer Kältekammer auf $0^{\circ}\text{F} \pm 5^{\circ}\text{F}$ (ca. -18°C) durchtemperiert. Anschließend werden auf die Frontscheibe gleichmäßig ca. 440 g/m^2 Wasser aufgetragen. Das so vorbereitete Fahrzeug muss vor dem Start der Enteisungseinrichtung noch weitere 30 Minuten in der Kältekammer verweilen. Anschließend beginnt der Enteisungstest mit dem Start des Motors bei einer konstanten Drehzahl von 1500 U/min . Die Testdauer beträgt 40 Minuten und die Temperatur in der Kältekammer darf während der Prozedur 10°F (ca. -12°C) nicht übersteigen. In 5 Minuten-Intervallen werden die freigelegten Bereiche dokumentiert. Als Entscheidungskriterium zur Beurteilung der Enteisungsleistung werden die enteisten Bereiche betrachtet. Innerhalb von 20 Minuten muss ein kritischer Bereich im Fahrersichtbereich zu 80% eisfrei sein, nach 40 Minuten müssen 95% der gesamten Frontscheibe enteist sein.

- **EU-Verordnung 672/2010/EG**

Die EU-Verordnung 672/2010/EG regelt die Typgenehmigung von Entfrostsungs- und Trocknungsanlagen von Fahrzeugen der Klasse M1 im Geltungsbereich der Europäischen Union hinsichtlich der allgemeinen Sicherheit. Die Klasse M1 beschreibt Fahrzeuge zur Personenbeförderung mit höchstens 8 weiteren Sitzplätzen neben dem Fahrersitzplatz (Richtlinie 2007/46/EG Anhang II). Jedes Fahrzeug der Klasse M1 mit einer Windschutzscheibe muss mit einer Anlage zur Entfernung von Reif und Eis auf der Außenseite und zur Entfernung von Feuchtigkeitsbeschlag auf der Innenseite ausgestattet sein.

Die Entfrostsungsanlage muss 20 Minuten nach Versuchsbeginn einen kritischen Bereich auf der Fahrerseite zu 80 % entfrosten haben. Nach 25 Minuten muss ein vergleichbarer Bereich auf der Beifahrerseite entfrosten sein. Nach 40 Minuten müssen 95 % eines größer definierten Sichtbereichs frostfrei sein. Damit sind die Anforderungen an die Entfrostsungsanlage für den europäischen Raum vergleichbar mit denen in der FMVSS 103 beschriebenen Anforderungen für den amerikanischen Raum. Allerdings unterscheiden sich die Versuchsbedingungen teilweise. Die Prüftemperatur für die 672/2010/EG darf herstellereitig mit -18°C oder -8°C festgelegt werden. Die aufgetragenen Eismengen entsprechen mit 440 g/m^2 denen der FMVSS 103.

Zur Prüfung der Scheibentrocknungsanlage wird der Prüfraum auf -3°C temperiert und das Fahrzeug über 10 Stunden vorkonditioniert. Der Feuchtigkeitsbeschlag wird mit Hilfe eines Dampferzeugers aufgebracht, der bei -3°C mindestens 70 g/h für jeden vom Hersteller angegebenen Sitzplatz erzeugen kann. Der Dampferzeuger wird für 5 Minuten betrieben. Anschließend nehmen ein oder zwei Beobachter im Fahrzeug Platz, wobei die Verdampfungsleistung je Beobachter um 70 g/h zu reduzieren ist. Eine Minute nachdem die Beobachter Platz genommen haben beginnt die Prüfung. 10 Minuten nach Prüfbeginn müssen 90 % eines fahrerseitigen Sichtbereiches A (gemäß ECE 43, Anhang 18) und 80 % eines erweiterten Sichtbereichs B getrocknet sein.

Für Hybrid- und Elektrofahrzeuge ist zu beachten, dass der Motor sowohl für die Scheibenenteisung als auch für die Scheibentrocknung nicht betrieben werden muss, sofern die Anlage die Anforderungen an die Entfrostsung auch ohne laufenden Motor erfüllen kann.

- **ADR 15**

Ziel der Australian Design Rule 15 (ADR 15) ist die Definition von Standards für Scheibentrocknungseinrichtungen für Australien. Die ADR 15 ist analog zur 672/2010/EG zu betrachten. Die Anforderungen und der Prüfablauf sind ähnlich, die definierten Sichtbereiche und der geforderte Scheibentrocknungsanteil unterscheiden sich jedoch.

- **VDI 6032**

In der VDI-Richtlinie 6032 werden die Hygiene-Anforderungen an die Lüftungstechnik in Fahrzeugen zur Personenbeförderung definiert. Mit Hygiene ist hierbei eine weitgehende Fernhaltung von partikelförmigen Stoffen und Mikroorganismen, Teilen von Mikroorganismen und deren Zerfalls- und Stoffwechselprodukten aus der Lüftungs- bzw. Luftbehandlungsanlage von Fahrzeugen gemeint. Ferner ist ein Wartungsplan für die Lüftungs- bzw. Luftbehandlungsanlage zur Aufrechterhaltung der Hygiene-Anforderungen definiert.

- **EN 13447**
In der Europäischen Norm EN 13447 werden wichtige Termini zur Elektromobilität festgelegt. Der Begriff Elektrofahrzeug wird definiert sowie verschiedene Bauarten elektrisch angetriebener Straßenfahrzeuge differenziert. Ferner werden Fahreigenschaften wie z.B. Höchstgeschwindigkeit, 30-Minuten-Höchstgeschwindigkeit, Anfahrvermögen am Hang und Beschleunigungsvermögen definiert.
- **EN 1987, Teil 1**
Die Europäische Norm EN 1987, Teil 1 regelt die Anforderungen an die bordeigenen elektrochemischen Energiespeicher, die die Sicherheit für die Benutzer und die direkte Fahrzeugumgebung gewährleisten.
- **EN 1821, Teil 1**
In der Europäischen Norm EN 1821, Teil 1 werden die in EN 13447 definierten Fahreigenschaften näher beschrieben sowie Prüfverfahren zur Messung der Fahreigenschaften einschließlich deren Durchführung definiert. Ferner werden Kriterien für das Laden bzw. das Ladeende der Batterie festgelegt.
- **EN 1986, Teil 1**
Die Europäische Norm EN 1986, Teil 1 legt die Prüfmethode fest, mit denen Reichweite und Energieverbrauch von elektrisch angetriebenen Straßenfahrzeugen zu messen sind.
Als Prüfzyklus wird der NEFZ herangezogen, der aus vier Grundzyklen und einem Überlandzyklus besteht (siehe auch Abbildung 2, Seite 15). Zur Bestimmung der Reichweite wird der Prüfzyklus so lange wiederholt durchfahren, bis das Fahrzeug nicht mehr in der Lage ist, den Anforderungen der Bezugskurve bis 50 km/h zu entsprechen, oder bis eine Anzeige an der Armaturentafel dazu auffordert, das Fahrzeug anzuhalten. Die bis zum Fahrtende zurückgelegte Strecke entspricht der Reichweite des Elektrofahrzeugs.
Der Energieverbrauch entspricht dem Verbrauch für das Durchfahren von sieben Grundzyklen oder zwei Überlandzyklen, er wird in Kilowattstunden pro Kilometer angegeben.
- **VDI 2078**
Die VDI 2078 enthält eine Beschreibung von Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Kühllast klimatisierter Räume und Gebäude. Als Kühllast wird dabei die kalorische Leistung bezeichnet, die zu einem bestimmten Zeitpunkt über die Raumluft aus dem Raum abgeführt werden muss, um die vorgegebenen Luftzustandswerte einzuhalten.

3.3 Fachbeiträge und Publikationen

In den folgenden Abschnitten werden relevante Fachbeiträge und Publikationen bezüglich der Beheizung und Klimatisierung von Elektrofahrzeugen sowie deren Einfluss auf den Energieverbrauch vorgestellt. In diesem Zusammenhang bleibt anzumerken, dass bisher nur eine geringe Anzahl von Veröffentlichungen zu diesem Thema erschienen ist.

Großmann [24] stellt in seinem Buch die PKW-Klimatisierung umfassend dar. Er beschreibt die klimatischen Einflüsse auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen und erläutert passive Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Bedingungen des Fahrgastraums. Der Einfluss der Fahrzeugfarbe auf den Temperaturanstieg im Fahrgastraum wird diskutiert und darauf verwiesen, dass die obere Klarlackschicht zu einem dem Treibhauseffekt ähnlichen Phänomen führt, dem aber durch die Zumischung von Partikeln im Lack entgegengewirkt werden kann. Er weist ferner darauf hin, dass Karosserieisolierungen nur mit weiteren flankierenden Maßnahmen, wie z.B. reflektierenden Scheiben, unter verschiedenen Umgebungsbedingungen zu Energieeinsparungen führen können.

Farrington et al. [19] führen Berechnungen zur Reichweite vollelektrifizierter und hybrid betriebener PKW durch. Dazu werden unterschiedliche charakteristische klimatische Bedingungen des geographischen Bezugsraums USA herangezogen und sowohl der Heiz- als auch der Klimatisierungsfall betrachtet. Basierend auf dem Ergebnis, dass die Reichweite voll elektrifizierter Fahrzeuge durch Klimatisierung und Heizung um bis zu 40% herabgesetzt werden kann, werden Maßnahmen diskutiert, die die aufzubringende Kühlleistung reduzieren und so die Reichweite vergrößern können. In diesem Zusammenhang werden modifizierte Verschleißungen, die Erhöhung des Umluftanteils und die Notwendigkeiten des thermischen Komforts genannt.

Burke [6] betrachtet Reichweiten vollelektrifizierter Fahrzeuge experimentell wie auch mit Hilfe der Simulation. Er sieht das wesentliche Verbesserungspotential in der Weiterentwicklung der Batterien. Chan [8] untersucht den Energiebedarf einzelner Komponenten eines Elektrofahrzeuges. Er kommt dabei zu dem Schluss, dass die Leistungselektronik eine zentrale Rolle in der zukünftigen Weiterentwicklung und Reichweitenverbesserung von Elektrofahrzeugen spielen wird. Sondermann et al. [37] diskutieren den Einfluss des Batteriekühlungskonzepts auf die Reichweite von vollelektrifizierten Fahrzeugen.

Betz et al [4] betrachten alternative Innenraumheizkonzepte für vollelektrifizierte Fahrzeuge. Dabei wird der Stand der Technik von elektrisch wie brennstoffbetriebenen Zuheizern diskutiert und darauf basierend Konzepte zur Innenraumbeheizung abgeleitet.

Larminie und Lowry [31] geben einen sehr breiten Überblick zu allen Themenaspekten von vollelektrifizierten Fahrzeugen, unter anderem auch über die Reichweitenberechnung.

Das 11. Karlsruher Kfz-Klima-Symposium befasste sich mit dem Thema „*Klimatisierung bei elektrischer Mobilität*“ [47]. Großmann berichtete dort u.a. über elektrisch beheizbare Seitenscheiben, die mit einer elektrischen Anschlussleistung von 180 W/m^2 seiner Meinung nach energetisch sinnvoller seien als eine erhöhte Außenlufttrate im Umluftbetrieb. Ferner ging er auf Modifikationen des Kältekreislaufes ein. Durch extern geregelte Kompressoren wird in weiten Bereichen der Reheat-Betrieb vermieden, was zu Energie-Einsparungen führt. Weiter weist er auf Untersuchungen hin, die dem Einsatz von Ejektoren ein hohes Energieeinsparpotenzial zusprechen. Györög berichtete von integrierten Verdampferjektoren, die die Kompressorleistung deutlich reduzieren können. Die vom Antriebsmotor entkoppelte Kompressordrehzahl bei elektrischen Verdichtern ist beim Einsatz von Ejektoren besonders vorteilhaft. Puntigam stellte die Integration von verschiedenen Wärmequellen in den Kältekreislauf dar, der neben der Kühlung und Entfeuchtung auch der Aufheizung der Zuluft dient. Puntigam berichtete weiterhin von deutlich mehr Regelparametern in elektrischen Antriebssträngen. Jung stellte den Energiebedarf für Elektrofahrzeuge für den europäischen Nutzungsraum dar mit Bezug auf die FAT Klimastudie [20]. Er stellt passive und aktive Maßnahmen zur Reichweitensteigerung vor.

Kapitel 4

Methodisches Vorgehen

Im Rahmen der Studie soll der Einfluss verschiedener Maßnahmen zur Beheizung und Klimatisierung auf die Reichweite eines Elektrofahrzeugs untersucht werden. Das methodische Vorgehen wird im Folgenden erläutert. Neben der Untersuchung des zugrundeliegenden Fahrzyklus werden die Berechnungsgleichungen für die Reichweitenermittlung sowie das für die Komfortbewertung erforderliche Fahrgastraummodell vorgestellt. Weiterhin wird auf die Modellierung des Klimatisierungssystems einschließlich der Klimaregelung eingegangen. Abschließend werden die in der Berechnung genutzten Referenzvarianten für die Konditionierung im Heiz- und Kühlfall, sowie die berücksichtigten Umgebungsrandbedingungen vorgestellt.

4.1 Fahrzyklus

Gemeinsam mit dem Arbeitskreis 5 der Forschungsvereinigung Automobiltechnik wurde festgelegt, alle Untersuchungen mittels des für die PKW-Zulassung in Europa maßgebenden Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) durchzuführen, der ebenfalls als Zyklus für die Reichweitenermittlung von Elektrofahrzeugen gemäß EN 1986 genutzt wird (siehe Seite 13).

Abbildung 2 zeigt für einen NEFZ das über der Zeit aufgetragene Geschwindigkeitsprofil, welches aus vier identischen innerstädtischen Zyklen und einem außerstädtischen Zyklus zusammengesetzt ist. Die zurückgelegte Gesamtfahrstrecke beträgt rund 11 km bei einer durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit von ca. 33,5 km/h.

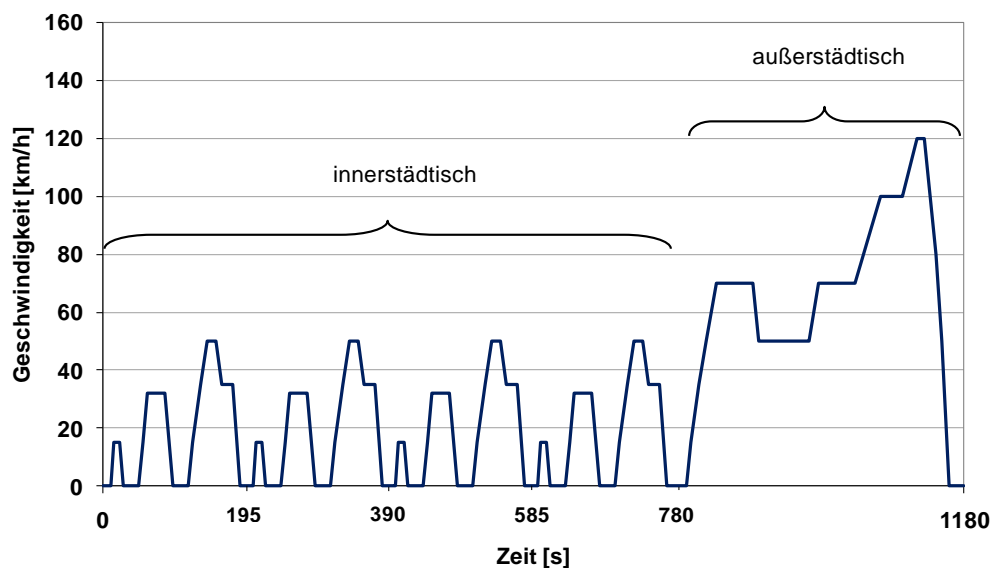


Abbildung 2: Geschwindigkeitsprofil des NEFZ

4.2 Reichweitenermittlung

Über eine Längsdynamikbetrachtung wird zunächst die erforderliche Antriebsleistung für das Durchfahren eines NEFZ bestimmt. Bei instationärer Fahrt setzt sich die Antriebsleistung aus den Leistungen zur Überwindung der Rad-, Steigungs-, Luft- sowie Beschleunigungswiderstände zusammen. Der Radwiderstand wird dabei vereinfachend dem Rollwiderstand gleichgesetzt. Für die aufzubringende momentane Antriebsleistung soll gelten:

$$P_A = (F_{Ro} + F_{St} + F_L + F_B) \cdot v_F \quad (4.1)$$

mit:

P_A	Antriebsleistung [W]	F_L	Luftwiderstand [N]
F_{Ro}	Rollwiderstand [N]	F_B	Beschleunigungswiderstand [N]
F_{St}	Steigungswiderstand [N]	v_F	Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]

Um die Geschwindigkeit des Fahrzeugs zu ändern, muss der Beschleunigungswiderstand überwunden werden. Neben der translatorischen Beschleunigung der Fahrzeugmasse muss dabei eine rotatorische Beschleunigung der sich drehenden Fahrzeugteilmassen erfolgen, die jedoch nachfolgend nicht weiter berücksichtigt werden soll. Die einzelnen Teilwiderstände werden wie folgt bestimmt:

$$F_{Ro} = f \cdot m_F \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (4.2)$$

$$F_{St} = m_F \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (4.3)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot c_w \cdot A \cdot (v_F \pm v_W)^2 \quad (4.4)$$

$$F_B = m_F \cdot a_F \quad (4.5)$$

Darin bedeuten:

f	Rollwiderstandsbeiwert [-]	c_w	Luftwiderstandsbeiwert [-]
m_F	Fahrzeugmasse [kg]	A	Stirnfläche [m ²]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]	v_W	Windgeschwindigkeit [m/s]
α	Steigungswinkel [°]	a_F	Beschleunigung [m/s ²]
ρ_L	Dichte Luft [kg/m ³]		

Die zeitliche Integration der momentanen Antriebsleistung liefert den Energiebedarf für die Fortbewegung des Fahrzeugs, zunächst ohne Berücksichtigung der Energierückgewinnung durch Rekuperation. Unter Berücksichtigung des Gesamtwirkungsgrades der Antriebsenergiebereitstellung kann daraus die der Batterie zu entnehmende Energiemenge berechnet werden. Vereinfachend wird der Gesamtwirkungsgrad für die durchgeführten Untersuchungen als konstant und damit betriebspunktunabhängig angenommen.

$$E_{A,ideal} = \int P_A(t) dt \quad (4.6)$$

$$E_{A,real} = E_{A,ideal} \cdot \eta_{gesamt} \quad (4.7)$$

mit:

$E_{A,ideal}$	Antriebsenergiemenge ohne Verluste [J]
$E_{A,real}$	Antriebsenergiemenge einschließlich Wirkungsgradkette [J]
η_{gesamt}	Gesamtwirkungsgrad der Antriebsenergiebereitstellung [-]

Im Fall der Rekuperation (siehe Kapitel 5.3) wird die in die Batterie zurückgespeiste Energiemenge vereinfachend als konstanter prozentualer Anteil der maximal rückgewinnbaren Energiemenge angenommen. Unter Berücksichtigung der zusätzlich für die Beheizung und Kühlung erforderlichen Energiemenge ergibt sich der für das Durchfahren eines kompletten Zyklus erforderliche Energieverbrauch zu:

$$E_{Zyklus} = E_{A,real} - E_{Rekuperation} + E_{Klimatisierung} \quad (4.8)$$

Darin bedeuten:

E_{Zyklus}	Energiemenge für das Durchfahren des Fahrzyklus [J]
$E_{Rekuperation}$	rekuperierte Energiemenge während des Fahrzyklus [J]
$E_{Klimatisierung}$	für die Klimatisierung erforderliche Energiemenge [J]

Die erzielbare Reichweite entspricht der maximalen Strecke, die mit der in der Batterie gespeicherten Energiemenge unter den gegebenen Randbedingungen zurücklegbar ist. Diese berechnet sich unter der Annahme eines gleichmäßigen Energieverbrauchs über den Fahrzyklus zu:

$$S_{Reichweite} = \frac{E_{Batterie}}{E_{Zyklus}} \cdot S_{Zyklus} \quad (4.9)$$

$S_{Reichweite}$	Reichweite [km]
$E_{Batterie}$	Energieinhalt der vollständig geladenen Batterie [J]
S_{Zyklus}	Fahrtstrecke bei Durchfahrt genau eines Zyklus [km]

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass das konditionierte Fahrzeug (siehe Kapitel 4.5) den Ausgangspunkt einer jeden Zyklusfahrt darstellt. Somit fließen entsprechende Mehraufwände für die Klimatisierung zur Erzielung eines stationären Fahrgastraumzustandes je Zyklus wiederholt in die Reichweitenermittlung ein. Nicht berücksichtigt werden hingegen bei der Reichweitenermittlung etwaige energetische Aufwände für die Konditionierung selbst. Diese werden als aus anderer Quelle, wie z.B. dem Stromnetz, zur Verfügung gestellt angenommen.

Der Verbrauch für ein Elektrofahrzeug wird an dieser Stelle in kWh/Zyklus oder in kWh/100 km angegeben. Eine Vergleichbarkeit mit der für konventionell angetriebene Fahrzeuge gebräuchlichen Einheit l/100 km ermöglicht eine Umrechnung über den Energieinhalt des Flüssigkraftstoffs. Je Liter Diesel kann mit einem Energieinhalt von rund 10 kWh/l gerechnet werden, je Liter Superbenzin mit ca. 8,5 kWh/l.

4.3 Fahrgastraummodell

Das Fahrgastraummodell dient der Ermittlung der erforderlichen Heiz- und Kühlleistung für die Erzielung einer definierten Fahrgastraumtemperatur bei unterschiedlichen Umgebungsrandbedingungen, eine Komfortbewertung soll nicht vorgenommen werden. Bei der Modellierung wurden folgende Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

- Der Fahrgastraum wird als ein homogenes Luftvolumen mit einer einheitlichen Lufttemperatur betrachtet. Diese Annahme hat sich für die vorzunehmende energetische Analyse als ausreichend erwiesen [3].
- Der Fahrgastraum wird von den Karosseriefächern Dach, Seitenwände, Spritzwand und Boden begrenzt, die als reine Blechhaut ohne Innenverkleidung betrachtet werden. Die Verschiebungen werden in Front-, Heck- und rechte sowie linke Seitenscheiben untergliedert. Jedes Bauteil wird im Berechnungsmodell als konzentrierter Masseknoten betrachtet.
- Alle Einbauten werden zu einem einzigen konzentrierten Masseknoten zusammengefasst. Dieser bildet Sitze, Armaturenbrett, Dachhimmel, Tür- und Seitenverkleidungen sowie Bodenauslegware ab.
- Je Insasse wird ein Wasserdampfeintrag von 30 g/h berücksichtigt [24], die Schweißabgabe oder etwaige Feuchtigkeit der Kleidung werden nicht betrachtet. Der Wärmeeintrag je Insasse wird pauschal mit 100 W angenommen [34].
- Für die Untersuchung wird von dem im Straßenverkehr typischerweise zu beobachtenden Fall ausgegangen, dass ein Fahrzeug mit einem Insassen besetzt ist.

Eine schematische Darstellung der berücksichtigten Wärmeströme durch Strahlung und Konvektion im Fahrgastraum zeigt Abbildung 3. Im Folgenden werden die wesentlichen mathematischen Beziehungen zur Beschreibung des thermischen Fahrgastraumverhaltens vorgestellt. Dabei wird zunächst auf die berücksichtigten Wärmetransportmechanismen eingegangen.

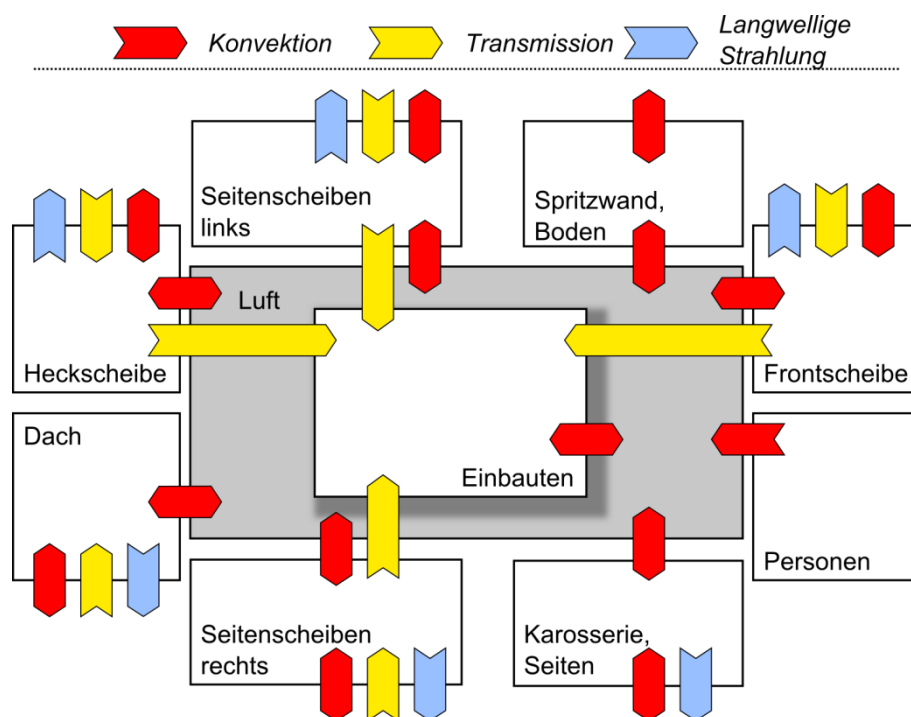


Abbildung 3: Berücksichtigte Wärmeströme sowie Bilanzräume des Fahrgastraummodells

4.3.1 Solare Bestrahlung

Die auf das Fahrzeug treffende kurzwellige Solarstrahlung wird von den äußeren Umschließungsflächen des Fahrgastraums anteilig absorbiert. Zudem gelangt Solarstrahlung durch die Verschiebungen in den Fahrgastraum und wird von den Einbauten zu einem großen Teil absorbiert. Bei den durchgeführten Untersuchungen wird immer von einer senkrecht über dem Fahrzeug stehenden Strahlungsquelle ausgegangen, der Tagesgang der Sonne wird nicht berücksichtigt.

Für den von einer äußeren Umschließungsfläche absorbierten Strahlungswärmestrom gilt:

$$\dot{Q}_{Absorption,i} = \alpha_i \cdot E_{hor} \cdot A_{\perp,i} \quad (4.10)$$

mit:

$\dot{Q}_{Absorption,i}$	vom Bauteil i absorbiertes Wärmestrom [W]
α_i	Absorptionskoeffizient [-]
E_{hor}	solare Bestrahlungsstärke auf einer horizontalen Fläche [W/m ²]
$A_{\perp,i}$	projizierte Bauteilfläche senkrecht zur Strahlungsquelle [m ²]

Der Transmissionskoeffizient der Verschiebung, der vom Einfallswinkel der Solarstrahlung auf die jeweilige Fläche abhängig ist, wird vereinfachend für alle Flächen als konstant angenommen [7]. Die transmittierte und von den Einbauten absorbierte Strahlungswärme berechnet sich aus der Summe der Teilwärmeströme über die einzelnen Verschiebungsflächen zu:

$$\dot{Q}_{Strahlung,Einb} = \alpha_{Einb} \cdot \sum_i [\tau_i \cdot E_{hor} \cdot A_{\perp,i}] \quad (4.11)$$

Darin bedeuten:

$\dot{Q}_{Strahlung,Einb}$	von den Einbauten absorbiertes Wärmestrom [W]
α_{Einb}	Absorptionskoeffizient der Einbauten [-]
τ_i	Transmissionskoeffizient [-]
$A_{\perp,i}$	projizierte Verschiebungsfläche senkrecht zur Strahlungsquelle [m ²]

Als Verschiebungsflächen werden die Front-, Heck- sowie die Seitenscheiben berücksichtigt. Der Absorptionskoeffizient der Einbauten wird vereinfachend gleich eins gesetzt und somit angenommen, dass die gesamte auftreffende Strahlung von den Einbauten absorbiert wird.

4.3.2 Wärmestrahlung

An dieser Stelle wird ausschließlich der langwellige Strahlungsaustausch der Umschließungsflächen des Fahrgastraums mit dem umgebenden Himmel betrachtet. Der Strahlungsaustausch zwischen den einzelnen Fahrgastraum-Bauteilen selbst bleibt unberücksichtigt, weil dessen modelltechnische Umsetzung dem hier verfolgten vereinfachten Modellierungsansatz widersprechen würde.

Die Strahlungstemperatur des Himmels wird vereinfachend mit der Umgebungstemperatur gleichgesetzt. Der Wärmestrom infolge des langwelligen Strahlungsaustausches für eine Umschließungsfläche ergibt sich aus:

$$\dot{Q}_{Str.,Himmel,i} = \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot A_i \cdot (T_H^4 - T_i^4) \quad (4.12)$$

mit:

$\dot{Q}_{Str.,Himmel,i}$	Abgestrahlter Wärmestrom bei Strahlungsaustausch mit dem Himmel [W]
ε_i	Emissionskoeffizient des Bauteils [-]
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante [46]
A_i	Bauteilfläche [m ²]
T_H	Temperatur des Himmels [K]
T_i	Temperatur des Bauteils [K]

4.3.3 Konvektiver Wärmestrom

Für die Ermittlung des konvektiven Wärmestroms von der Innenraum- oder Außenluft an eine Bauteilfläche i soll im Weiteren die zu nutzende Bauteiloberflächentemperatur mit der Bauteiltemperatur gleichgesetzt werden. Allgemein gilt die folgende Beziehung:

$$\dot{Q}_{Konvektion} = \alpha_i \cdot A_i \cdot (T_{Luft} - T_i) \quad (4.13)$$

Darin bedeuten:

α_i	Wärmeübergangskoeffizient [W/(m ² K)]
A_i	Wärmeübertragungsfläche [m ²]
T_{Luft}	Temperatur der Luft
T_i	Temperatur der Bauteiloberfläche

Die Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten erfolgt in Anlehnung an [36]. Der äußere Wärmeübergangskoeffizient wird in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit, der innere in Abhängigkeit vom Belüftungsvolumenstrom für die Klimatisierung ermittelt:

$$\alpha_{außen} = C_{außen} \cdot w^{0,8} \quad (4.14)$$

$$\alpha_{innen} = C_{innen} \cdot \dot{V}_L^{0,5} \quad (4.15)$$

$C_{außen/innen}$	Koeffizient [-]
w	Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]
\dot{V}_L	Belüftungsvolumenstrom [m ³ /h]

Die auf diese Art berechneten Wärmeübergangskoeffizienten werden jeweils noch gegebenenfalls über einen Minimalwert begrenzt (vgl. Kapitel A.1). Die in [36] für die unterschiedlichen Bauteilflächen ermittelten Koeffizienten sind dem Anhang zu entnehmen.

Hingewiesen sei darauf, dass der innere Wärmeübergangskoeffizient infolge der oben beschriebenen Annahme des opaken Wandaufbaus, der lediglich ein Karosserieblech vorsieht, zusätzlich korrigiert wird. Auf diese Weise wird der Wärmeleitwiderstand der inneren Wand-

verkleidung, die im Modell den Einbauten zugeschlagen wurde, gedanklich berücksichtigt. Der Korrekturfaktor wurde derart bestimmt, dass der Wärmedurchgangskoeffizient der Wandung einen Wert von 2,3 W/(m²K) bei Betrachtung des stehenden Fahrzeugs annimmt.

4.3.4 Differentialgleichungssystem

Über das im Folgenden beschriebene Differentialgleichungssystem des Fahrgastraums lässt sich die zeitliche Änderung der Temperaturen formulieren. Im Einzelnen werden die Einbauten, die Bauteile der Umschließungsfläche sowie das Luftvolumen betrachtet.

Einbauten

Als Einbauten werden alle im Fahrgastraum angeordneten Komponenten wie Sitze, Instrumententafel und Heckablage, aber auch Dachhimmel, Tür- und Seitenverkleidungen sowie Bodenauslegware verstanden. Sie werden im Modell durch einen einzelnen konzentrierten Masseknoten repräsentiert, dessen Wärmekapazität durch die Materialeigenschaften der Einbauten bestimmt ist.

Die Energiebilanz für die Einbauten berücksichtigt die konvektive Wärmeübertragung zwischen Innenraumluft und Einbauten sowie den Wärmeeintrag durch transmittierte Solarstrahlung. Hieraus lässt sich die zeitliche Temperaturänderung der Einbauten ermitteln:

$$\frac{d\vartheta_{\text{Einbauten}}}{dt} = \frac{\dot{Q}_{\text{Konvektion}} + \dot{Q}_{\text{Strahlung}}}{C_{\text{Einbauten}}} \quad (4.16)$$

mit:

$\vartheta_{\text{Einbauten}}$	Temperatur der Einbauten [K]
$C_{\text{Einbauten}}$	Gesamt-Wärmekapazität der Einbauten [J/K]
$\dot{Q}_{\text{Konvektion}}$	Wärmestrom durch Konvektion [W]
$\dot{Q}_{\text{Strahlung}}$	Wärmestrom durch Solarstrahlung [W]

Die Bestimmung des konvektiven Wärmestroms wird in Kapitel 4.3.3 beschrieben, die Ermittlung des Wärmestroms durch die absorbierte Solarstrahlung in Kapitel 4.3.2.

Bauteile der Umschließungsfläche

Zu den Bauteilen der äußeren Umfassungsfläche des Fahrgastraums werden die Karosserieflächen und die Verschiebungen gezählt. Die zeitliche Temperaturänderung des jeweiligen Bauteils ergibt sich aus der Energiebilanz zu:

$$\frac{d\vartheta_{\text{Bauteil}}}{dt} = \frac{\dot{Q}_{\text{Konvektion,außen}} + \dot{Q}_{\text{Konvektion,innen}} + \dot{Q}_{\text{Absorption}} + \dot{Q}_{\text{Strahlung,Himmel}}}{C_{\text{Bauteil}}} \quad (4.17)$$

Darin bedeuten:

$\vartheta_{\text{Bauteil}}$	Temperatur des jeweiligen Bauteils [K]
C_{Bauteil}	Wärmekapazität des jeweiligen Bauteils [J/K]
$\dot{Q}_{\text{Konvektion,außen}}$	Wärmestrom durch Konvektion an der äußeren Oberfläche des jeweiligen Bauteils [W]

$\dot{Q}_{Konvektion,innen}$	Wärmestrom durch Konvektion an der inneren Oberfläche des jeweiligen Bauteils [W]
$\dot{Q}_{Absorption}$	Wärmestrom durch Absorption der solaren Bestrahlungsstärke [W]
$\dot{Q}_{Strahlung,Himmel}$	Wärmestrom infolge des langwelligen Strahlungsaustauschs mit dem Himmel [W]

Die Bestimmung der einzelnen Wärmeströme ist den Kapiteln 4.3.1 bis 4.3.3 zu entnehmen. Für die Bauteile Boden und Spritzwand bleiben die Wärmeströme durch Absorption und langwelligen Strahlungsaustausch unberücksichtigt.

Luftvolumen

Für das Luftvolumen in der Fahrzeugkabine kann unter Vernachlässigung der potentiellen und der kinetischen Energie sowie der thermischen Ausdehnung des Luftvolumens die nachfolgende Energiebilanz aufgestellt werden:

$$\frac{dU}{dt} = -\sum_i \dot{Q}_{Konv.,Bauteil,i} - \dot{Q}_{Konv.,Einbauten} + \dot{H}_{Zu} - \dot{H}_{Ab} \quad (4.18)$$

Darin bedeuten:

U	absolute innere Energie des Luftvolumens [J]
$\dot{Q}_{Konv.,Bauteil,i}$	Wärmestrom durch Konvektion an der Oberfläche des jeweiligen Bauteils i der Umschließungsfläche [W]
$\dot{Q}_{Konv.,Einbauten}$	Wärmestrom durch Konvektion an den Einbauten [W]
\dot{H}_{Zu}	zugeführter Enthalpiestrom [W]
\dot{H}_{Ab}	abgeführter Enthalpiestrom [W]

Die Berechnung der konvektiven Wärmeströme ist in den vorausgehenden Kapiteln beschrieben worden. Der zugeführte Enthalpiestrom berücksichtigt nur den Enthalpiestrom der über das Gebläse in den Fahrgastraum eingebrachten Zuluft, der Enthalpiestrom durch den Wasserdampfeintrag des Insassen wird vernachlässigt. Für den zu- und abgeführten Enthalpiestrom gilt somit:

$$\dot{H}_{Zu} = \dot{m}_{Zuluft} \cdot h_{Zuluft} \quad (4.19)$$

$$\dot{H}_{Ab} = \dot{m}_{Abluft} \cdot h_{Kabine} \quad (4.20)$$

mit:

\dot{m}_{Zuluft}	zugeführter Luftmassenstrom [kg/s]
h_{Zuluft}	spezifische Enthalpie der feuchten Außenluft [J/kg]
\dot{m}_{Abluft}	abgeführter Luftmassenstrom [kg/s]
h_{Kabine}	spezifische Enthalpie der feuchten Luft im Fahrgastraum [J/kg]

Die zeitliche Änderung der Wasserdampfmasse im Fahrgastraum ergibt sich unter der Annahme, dass der ein- und der ausströmende trockene Luftmassenstrom in den Fahrgastraum gleich groß sind, zu:

$$\frac{dm_{WD}}{dt} = \dot{m}_{tr,Luft} \cdot (x_{Zuluft} - x_{Kabine}) + \dot{m}_{WD,Insassen} \quad (4.21)$$

Darin bedeuten:

m_{WD}	Wasserdampfmasse [kg]
$\dot{m}_{tr,Luft}$	Massenstrom der trockenen Luft [kg/s]
x_{Zuluft}	Wassergehalt des zugeführten Luftmassenstroms [kg/kg]
x_{Kabine}	Wassergehalt des aus dem Fahrgastraum abgeführten Luftmassenstroms [kg/kg]
$\dot{m}_{WD,Insassen}$	Wasserdampfeintrag durch den Insassen in den Fahrgastraum [kg/s]

Für die Berechnung der Stoffdaten von feuchter Luft wird eine kommerziell erhältliche Stoffdatenbibliothek [40] eingesetzt.

4.4 Klimatisierungssystem

Das Klimatisierungssystem wird mit Hilfe von idealisierten Beziehungen beschrieben, die eine realistische Abschätzung der benötigten elektrischen Energieaufwände ohne Kenntnis der real ausgeführten Systeme ermöglichen.

Im Kühlfall wird der Aufwand mit Hilfe des Kennwertes Coefficient Of Performance (COP) bestimmt, der für den hier betrachteten Fall einer Kompressionskälteanlage als Quotient von Kälteleistung des Verdampfers zu Antriebsleistung des Verdichters definiert ist:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{Verdampfer}}{P_{Verdichter}} \quad (4.22)$$

Weiterhin lässt sich der COP für einen realen Kälteprozess in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur sowie der Verdampfungstemperatur unter Berücksichtigung eines Gütegrades über folgende Beziehung in guter Näherung beschreiben:

$$COP = \varepsilon \cdot \frac{T_{Umgebung}}{T_{Umgebung} - T_{Verdampfung}} \quad (4.23)$$

ε	Gütegrad der Kälteerzeugung [-]
$T_{Umgebung}$	Umgebungstemperatur [K]
$T_{Verdampfung}$	Verdampfungstemperatur [K]

Vereinfachend wird für die relevanten Umgebungstemperaturen ein konstanter Gütegrad angenommen, der aus Messdaten abgeleitet wurde. Abbildung 4 zeigt den resultierenden Verlauf des COP aufgetragen über die Umgebungstemperatur bei einer angenommenen Verdampfungstemperatur von 1 °C. Mit Kenntnis der erforderlichen Kälteleistung lässt sich somit die Antriebsleistung des Verdichters ermitteln, die ohne Berücksichtigung weiterer Verluste

der Batterie entnommen wird. Anzumerken bleibt, dass keine Begrenzung der Kälteleistung im Rahmen der Simulationsrechnungen vorgesehen wurde.

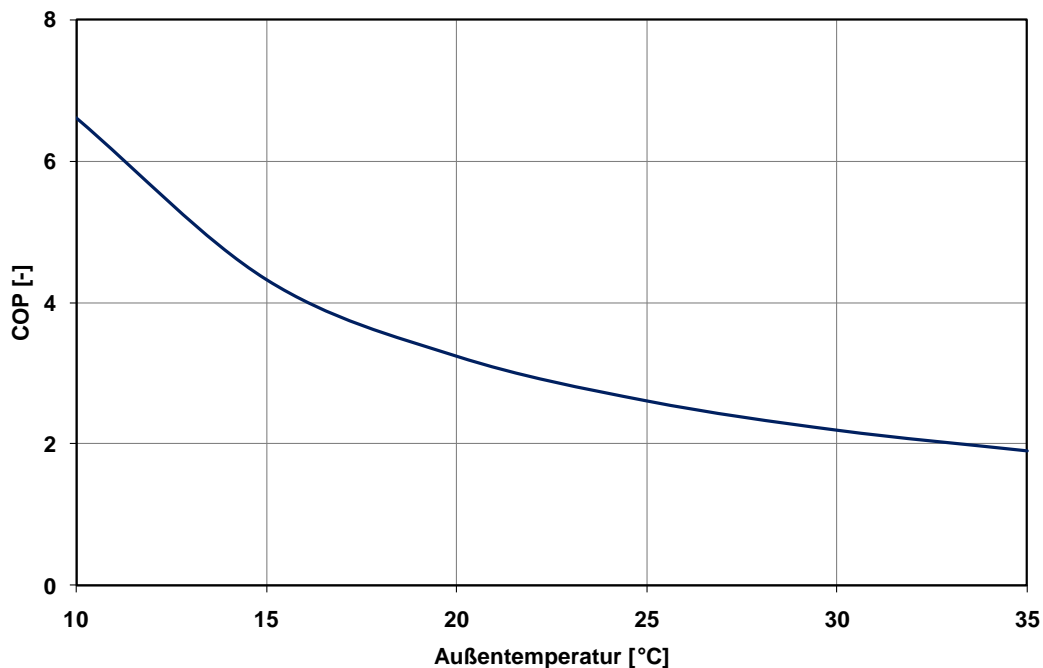


Abbildung 4: COP der zugrunde gelegten Kälteanlage in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur

Im Heizfall werden die beiden Varianten elektrischer PTC-Zuheizer und Wärmepumpe betrachtet. Für den PTC-Zuheizer wird ein Wirkungsgrad von 100% angenommen, die Leistungsaufnahme der Wärmepumpe wird mit einem zum Kältekreislauf analogen Ansatz abgeschätzt. Die Heizleistung, welche dem Fahrgastraum maximal zugeführt wird, beträgt 4 kW.

Regelung

In den nachfolgenden Untersuchungen wird die Lufttemperatur im Fahrgastraum abweichend von der beschriebenen Empfehlung für die anzustrebende mittlere Lufttemperatur nach DIN 1946, Teil 3 (siehe Kapitel 3.2) auf einen konstanten Wert von 20 °C geregelt. Eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei den betrachteten Umgebungstemperaturen soll hiermit sichergestellt werden. Die Solllufttemperatur von 20 °C wird nachfolgend als Komforttemperatur bezeichnet.

Regelgröße ist die Temperatur des in den Fahrgastraum einströmenden Zuluftmassenstroms. Der Zuluftmassenstrom selber wird der besseren Vergleichbarkeit wegen nicht variiert. Dieser wurde in Absprache mit dem Arbeitskreis 5 der FAT auf 3 kg/min in den betrachteten Heizfällen und auf 8 kg/min bei den betrachteten Kühlfällen festgelegt. Ferner wird eine maximale Zulufttemperatur von 70 °C für die Beheizung angenommen, als minimale Zulufttemperatur im Kühlfall werden 4 °C zugelassen.

4.5 Referenzszenarien für die Konditionierung

Alle Untersuchungen werden jeweils für ein konditioniertes Fahrzeug durchgeführt, um einen mit der Realität vergleichbaren Ausgangszustand zu Beginn der Zyklusfahrt einzustellen. Be-

trachtet wird während der Konditionierungsphase ausschließlich der Fahrgastraum bestehend aus Karosserie, Verschiebungen, Einbauten sowie Innenraumluft. Für die Beheizung und die Kühlung wurden Referenzszenarien definiert, die im Folgenden vorgestellt werden. Alternative Konditionierungsvarianten werden im Kapitel 8.1 betrachtet.

4.5.1 Beheizung

Für den Beheizungsfall wird als Referenzszenario ein für längere Zeitdauer unter freiem Himmel geparktes Fahrzeug betrachtet. Eine solare Bestrahlung erfolgt nicht. Bei Fahrtbeginn wird der Fahrgastraum somit als vollständig auf Umgebungstemperatur durchtemperiert angenommen. Dieses Szenario erfordert die Bereitstellung der höchsten Heizleistung.

4.5.2 Kühlung

Das Referenzszenario für den Kühlfall sieht vor, dass das im Freien parkende Fahrzeug über eine Zeitdauer von sechs Stunden einer konstanten solaren Bestrahlung ausgesetzt wird, wobei das Fahrzeug zu Beginn der Bestrahlung bzw. Aufheizung vereinfachend als komplett auf Komforttemperatur durchtemperiert angenommen wird. Die Temperaturen des Fahrgastraums, die sich am Ende der sechsstündigen Aufheizung einstellen, dienen als Startwerte für die eigentliche Fahrzyklusbetrachtung.

Während unter realen Bedingungen ein variierender Sonnenstand und eine veränderliche solare Strahlung auf die jeweiligen Karosserie- und Verschiebungsflächen zu verzeichnen sind, werden die Untersuchungen der Einfachheit halber mit einer senkrecht über dem Fahrzeug stehenden Strahlungsquelle und einer konstanten Strahlungsstärke durchgeführt.

Abbildung 5 zeigt exemplarisch für ein Fahrzeug der Golf-Klasse (siehe Kapitel 5.1) den Verlauf ausgewählter Bauteiltemperaturen während einer sechsstündigen Aufheizung bei einer Außentemperatur von 20 °C und bei einer solaren Strahlungsstärke von 700 W/m². Zu Konditionierungsbeginn steigen die Temperaturen von Frontscheibe und Dach zunächst sehr schnell an und ändern sich anschließend nur noch geringfügig, während die Einbauten einen merklich geringeren, dafür aber gleichmäßigeren Temperaturanstieg während der sechsstündigen Aufheizung aufweisen. Der geringere Temperaturanstieg der Einbauten ist auf deren vergleichsweise sehr hohe Wärmekapazität zurückzuführen. Die erreichte Temperatur des Daches ist Folge des hohen Anteils an absorbierte Solarstrahlung.

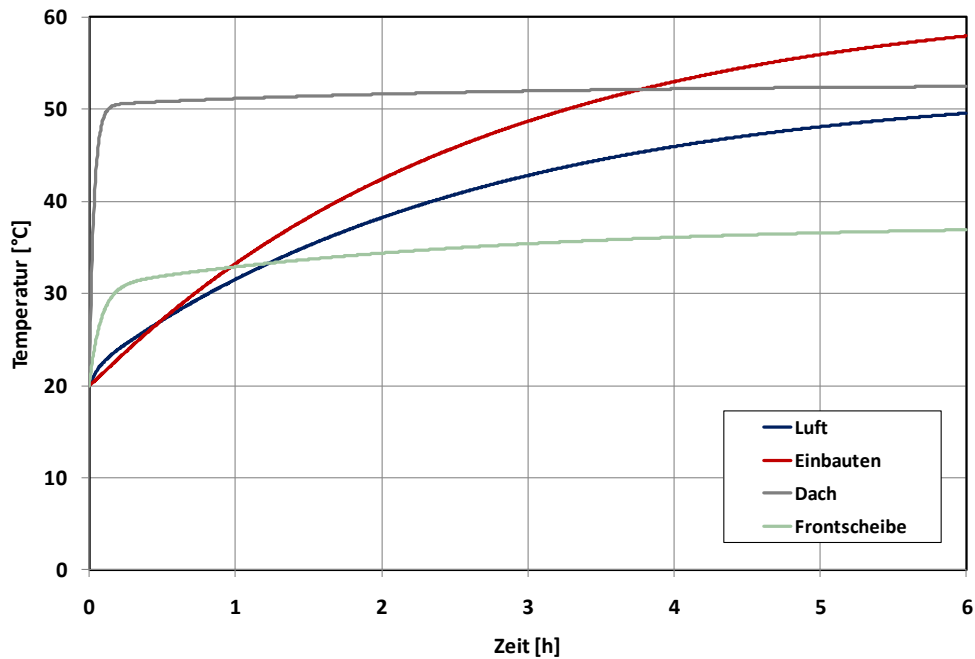


Abbildung 5: Bauteiltemperaturverläufe für eine sechsstündige Vorkonditionierung bei einer Außentemperatur von 20 °C und einer Bestrahlungsstärke von 700 W/m², Golf-Klasse

4.6 Umgebungsrandbedingungen

Die Berechnungen werden für das Umgebungstemperaturspektrum von -20 °C bis 35 °C jeweils für diskrete Stützstellen im 5 K Raster durchgeführt. Bezüglich der solaren Strahlungsstärke werden die diskreten Werte 100 W/m², 700 W/m² und 1.000 W/m² betrachtet.

Die relative Luftfeuchtigkeit der Umgebung wird hinsichtlich der besseren Vergleichbarkeit und Interpretierbarkeit der Ergebnisse für alle durchgeführten Berechnungen konstant mit 50% berücksichtigt. Anzumerken bleibt, dass diese Annahme bei hohen Außenlufttemperaturen zu einer im Vergleich mit den realen Verhältnissen erhöhten Verdampferleistung führt. So treten nach [20] z.B. für den geographischen Bezugsraum Gesamteuropa bei Umgebungstemperaturen größer 30 °C am häufigsten relative Luftfeuchten in Intervall von 20-40% auf.

Kapitel 5

Fahrzeugklassen

Alle in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Untersuchungen wurden exemplarisch für zwei gemeinsam mit dem Arbeitskreis 5 der Forschungsvereinigung Automobiltechnik definierte Fahrzeugklassen durchgeführt. Diese repräsentieren keine realen PKW, sondern sind explizit als vorwettbewerbliche Plattformen für Mobilitätskonzepte zu verstehen.

5.1 Definition der Fahrzeugklassen

Definiert wurde zum einen eine Fahrzeugklasse mit zwei Sitzen, niedrigem Gesamtgewicht und geringer Reichweite als typisches Fahrzeug für urbane Gebiete, im Folgenden der leichteren Verständlichkeit wegen mit Smart-Klasse bezeichnet. Darüber hinaus wurde eine Klasse mit vier bis fünf Sitzplätzen und höherer Reichweite für erweiterte Individual-Mobilitätsradien definiert, die im Weiteren mit Golf-Klasse bezeichnet wird.

Tabelle 5.1 fasst wesentliche, die beiden Fahrzeugklassen charakterisierende Kenndaten zusammen. Die angegebene Batteriekapazität wurde so bemessen, dass unter Berücksichtigung der Rekuperation die gewünschte Reichweite für das nicht klimatisierte Fahrzeug erzielt wird.

	Smart-Klasse	Golf-Klasse
Elektrische Antriebsleistung [kW]	40	80
Fahrzeuggesamtgewicht [kg]	1000	1600
Reichweite [km]	150	190
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	120	160
Batteriekapazität [kWh]	15	30

Tabelle 5.1: Charakterisierende Kenndaten der definierten Fahrzeugklassen

5.2 Fahrzeugparameter

Für die Berechnung der Fahrwiderstände werden neben der Fahrzeugmasse die in Tabelle 5.2 aufgeführten Parameter benötigt. Ferner ist die Getriebereduktionsstufe angegeben, die in die Lastpunktuntersuchung einfließt. Diese lässt sich mit Hilfe der Maximaldrehzahl des E-Motors, die mit 11.000 Umdrehungen pro Minute festgelegt wurde, der Fahrzeughöchstgeschwindigkeit sowie dem Radradius bestimmen.

	Smart-Klasse	Golf-Klasse
Rollwiderstandsbeiwert [-]	0,011	0,011
c_w -Wert [-]	0,37	0,32
Stirnfläche [m ²]	1,95	2,22
Radradius [m]	0,285	0,308
Getriebereduktionsstufe [-]	9,8	8,0

Tabelle 5.2: Parameter für die Längsdynamik- sowie Lastpunktberechnung

Die Wirkungsgrade für die einzelnen Komponenten des Antriebsstrangs wurden für beide Fahrzeugklassen einheitlich festgelegt. Der Einfachheit halber wurden konstante Werte gewählt, eine Abhängigkeit vom Betriebspunkt wurde nicht berücksichtigt. Die Teilwirkungsgrade sowie der sich aus der Multiplikation ergebende Gesamtwirkungsgrad können Tabelle 5.3 entnommen werden.

	Wirkungsgrad
Übersetzungsstufe	98 %
Differential	98 %
Batterie + Leistungselektronik + Elektrische Maschine	94 %
Gesamtwirkungsgrad Antriebsstrang	90,3 %

Tabelle 5.3: Wirkungsgrade des Antriebsstrangs

Die für die Nutzung des Innenraummodells notwendigen Parameter wie Innenraumvolumina, Bauteilmassen und -flächen, sowie spezifischen Wärmekapazitäten sind dem Anhang zu entnehmen.

5.3 Rekuperationspotenzial

In der Fahrzeugtechnik wird unter Rekuperation die Energierückwandlung der kinetischen Energie beim Bremsen verstanden. Der Elektromotor fungiert als Generator und verzögert das Fahrzeug, die zurückgewonnene kinetische Energie wird in die Batterie eingespeichert. Bei hohen Verzögerungswerten setzt dies eine elektrische Maschine mit hoher Nennleistung voraus. Der für die Untersuchungen betrachtete NEFZ weist hingegen nur moderate Verzögerungswerte auf, so dass bei beiden definierten Fahrzeugklassen ausschließlich von einem elektromotorischen Bremsen ausgegangen wird. Weiterhin wird angenommen, dass vom theoretischen Rekuperationspotential pauschal 85 % genutzt werden können.

Abbildung 6 zeigt für ein Fahrzeug der Golf-Klasse die zeitliche Auftragung der erforderlichen Antriebsenergiemenge im NEFZ. Die Wirkungsgradkette im Antriebsstrang wurde berücksichtigt, der Fahrgastraum wurde jedoch als nicht klimatisiert betrachtet. Gleichfalls aufgetragen ist die kumulierte Energiemenge, die gewöhnlich beim Bremsen dissipiert und somit das maximal rekuperierbare Potential darstellt. Gemäß Auftragung werden für einen NEFZ insgesamt 1,74 kWh für den Fahrzeugantrieb benötigt, von denen theoretisch 0,52 kWh rekuperiert werden können. Unter Berücksichtigung des Rekuperationsgrades von 85 % lassen sich 0,44 kWh und damit ca. 25 % der Antriebsenergie zurückgewinnen. Die Reichweite steigt für die betrachtete unklimateisierte Fahrzeugklasse um 64 km von 190 km auf 254 km an.

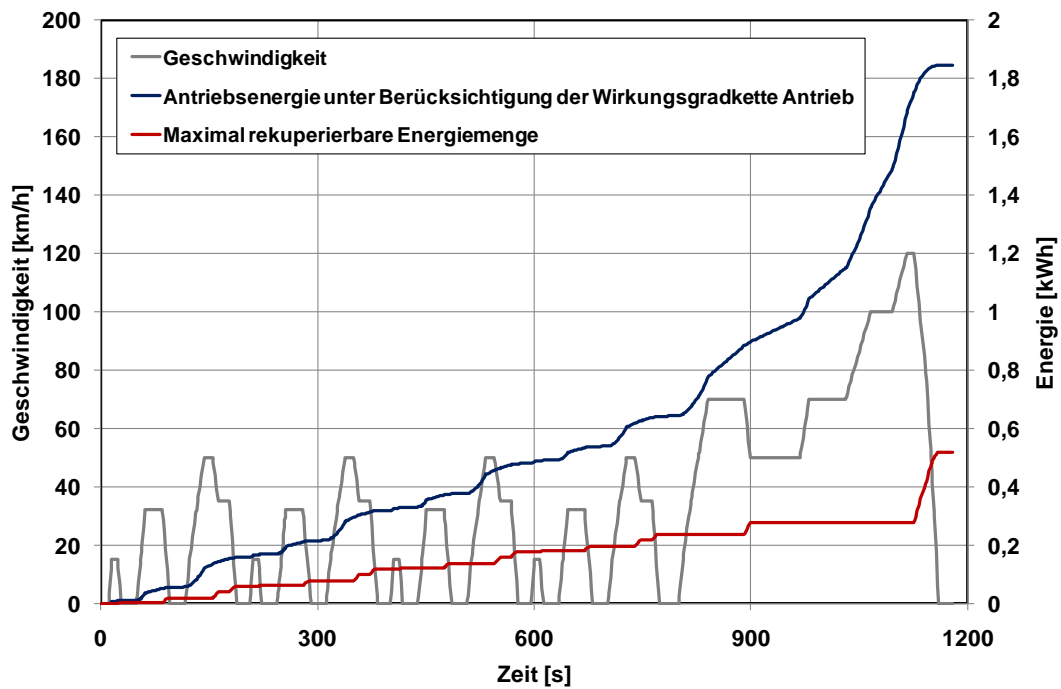


Abbildung 6: Energiemenge zum Fahrzeugantrieb sowie maximal recuperierbare Energiemenge für ein nicht klimatisiertes Fahrzeug der Golf-Klasse

Ausdrücklich sei darauf hingewiesen, dass bei den durchgeführten Untersuchungen der Einfluss der Rekuperation auf die Reichweite keine Berücksichtigung findet, sondern ausschließlich der Reichweiteneinfluss der Klimatisierungsmaßnahmen betrachtet wird.

Kapitel 6

Simulation des Kundenbetriebs

Beim Thermomanagement in PKW-Antriebssträngen stehen die Komponenten des Antriebsstrangs bezüglich ihrer Wirkungsgrade einschließlich der thermischen Abhängigkeiten im Vordergrund. Die genannten Aspekte hängen wesentlich von den Einsatzbedingungen des Fahrzeugs ab. Mit Hilfe der so genannten 3F-Methodik (siehe Kapitel 6.1) werden alle im realen bzw. repräsentativen Kundeneinsatz relevanten Fahrzustände (Fahrgeschwindigkeit, Last- und Bremszustände, etc.) und die Fahrumgebungsparameter systematisch betrachtet. Mit der Kenntnis dieser repräsentativen Einsatzbedingungen können auch die Anforderungen an die Klimatisierung objektiviert werden. Ferner sind umfangreiche Statistiken über Verzögerungs- und Beschleunigungsmanöver (Kapitel 6.2) für alle oben genannten Fahrsituationen verfügbar, so dass in Zusammenhang mit Hybrid- und Elektroantrieben eine zuverlässige Basis zur Ermittlung des Bremsenergiepotenzials (Rekuperation, Nutzung der Wärmeenergie bei Verzögerung, etc. – siehe Kapitel 6.3) vorhanden ist, welche ebenfalls Rückschlüsse in Bezug auf die Dimensionierung des Energiespeichers zulässt.

6.1 3F-Methodik: Anforderungsermittlung im Kundenbetrieb

Die systematische Identifikation des Kundenverhaltens mit Hilfe der auf [29] zurückgehenden 3F-Methodik wurde zur Ermittlung repräsentativer Lastkollektive im Rahmen zahlreicher Industrieprojekte und Forschungsvorhaben entwickelt.

Zentrales Element der Methodik ist der so genannte 3F-Parameterraum, der bereits in umfangreichen Messungen erfasst wurde und darüber hinaus in der Simulation abgebildet wird. Die Achsen des 3F-Parameterraums werden durch die Eigenschaften von Fahrer, Fahrzeug und Fahrumgebung definiert. Für den Fahrer ist dies der Fahrstil, der in die drei Gruppen schonend, durchschnittlich und sportlich unterteilt wird. Die Achse Fahrzeug wird durch die vier Beladungszustände leicht, mittel, voll sowie voll beladen mit Anhänger beschrieben. Die Fahrumgebung wird durch einen Kunden über die Wahl der Fahrstrecke beeinflusst. Der Kundenbetrieb ist vollständig abgedeckt, wenn die Fahrstreckenarten Stadt, Landstraße, Bundesautobahn und Berg erfasst werden. Ein typischer Kunde kann nun durch eine Kombination der Eigenschaften der drei Achsen beschrieben werden, zum Beispiel als schonender Fahrer, der sein Fahrzeug hauptsächlich leicht beladen auf Bergstraßen bewegt. Insgesamt ergeben sich damit 48 Kundentypkombinationen, vgl. Abbildung 7.

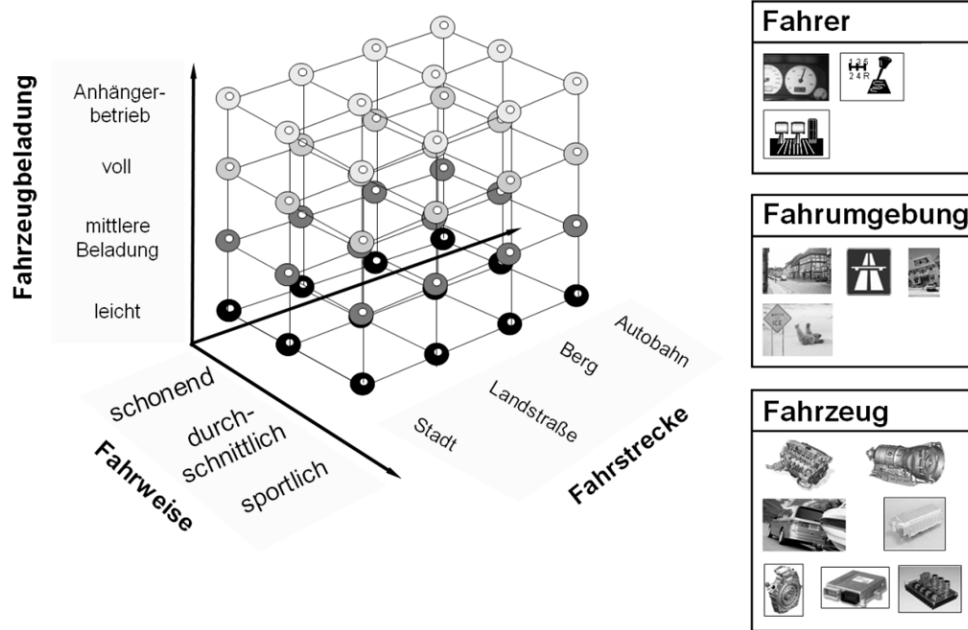


Abbildung 7: Der 3F-Parameterraum für den Antriebsstrang

Eng mit der Methode verknüpft ist ein Fahrer- und Fahrumgebungsmodell zur virtuellen Abbildung des Kundenverhaltens auf Grundlage der statistischen Auswertung umfangreicher Fahrzeugmessungen in der Simulationsumgebung MOVE3F (Modulare Variantenbasierte Entwicklungsplattform für 3F-Simulationen). Bei der Simulation mit MOVE3F wird nicht wie bei anderen Ansätzen auf die Wiederholung einzelner Messschriebe zurückgegriffen. Als Datenquelle dienen stattdessen Statistiken, die den Fahrer und die Fahrumgebung beschreiben. Diese wurden aus einer Vielzahl von Messungen mit Fahrzeugen unterschiedlicher Motorisierung, Fahrzeugklasse, Antriebsstrangkonfiguration und Antriebskonzept über bis zu 60.000 km je Fahrzeug gewonnen, welche nach dem Prinzip der Kundentyp-Identifikation in West- und Mitteleuropa, aber auch in den USA, Osteuropa sowie China eingefahren wurden. In diesen Messkampagnen werden Probanden auf Basis objektiver Kriterien in die drei Fahrstilgruppen schonend, durchschnittlich und sportlich eingeteilt und ihr Fahrverhalten unter Variation der Fahrzeugbeladung auf definierten, repräsentativen Fahrstrecken erfasst. Die Zeitdaten einer Vielzahl von Messsignalen werden aufgezeichnet, welche Fahrer, Fahrzeug und Fahrumgebung betreffen, und alle auftretenden Betriebszustände des Antriebs beinhalten.

6.2 Fahrzeugmodell und Fahrer- /Fahrumgebungsstatistiken

Die Simulation der beiden Fahrzeugklassen erfolgte auf Basis der in Kapitel 5.1 und 5.2 vorgestellten Fahrzeug-Parametrierungen. Die Wahl der Fahrer- und Fahrumgebungsstatistiken im Simulationsmodell greift auf die Erkenntnisse in [13] zurück, welche keinen Einfluss der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf das Fahrerverhalten hinsichtlich des 3F-Fingerprints (siehe unten) beweisen. Dies gilt für alle Fahrzeuge mit einem vergleichbaren Leistungsgewicht und ermöglicht in der Simulation hybrider oder rein elektrisch angetriebener Fahrzeuge die Nutzung vorhandener Statistiken konventionell angetriebener Fahrzeuge.

Die 3F-Statistiken zur Simulation der Smart- und der Golf-Klasse im Kundenbetrieb basieren auf dem identischen Fahrzeug. Für dieses vermessene Fahrzeug wurden Beladungsvariationen vorgenommen, welche das Fahrzeuggewicht beeinflussen und somit der oben genannten Forderung nach vergleichbaren Leistungsgewichten Rechnung tragen. Die volle Be-

ladung des vermessenen Fahrzeugs bildet somit die statistische Grundlage für die Simulation der Smart-Klasse (25 kg/kW), während die mittlere Beladung für die Statistiken zur Simulation der Golf-Klasse (20 kg/kW) genutzt werden.

Im Folgenden werden die Verläufe des Geschwindigkeits-, Beschleunigungs- und Verzögerungsverhaltens für beide Fahrzeuge (Smart- und Golf-Klasse) dargestellt. Diese die Fahrzeuglängsdynamik betreffenden Größen sind Teil des sogenannten 3F-Fingerprints und spiegeln das fahrertypabhängige Verhalten bei verschiedenen Fahrzeug- und Fahrumgebungsparametern wider.

Der 3F-Fingerprint bezüglich der Häufigkeitsverteilung für definierte Geschwindigkeitsklassen aus der statistischen Datenbasis der Golf- und der Smart-Klasse ist in Abbildung 8 dargestellt. Der Einfluss des Fahrstils und der Fahrumgebung in dieser Klassierung der Verweildauer ist vom schonenden zum sportlichen Fahrer und vom Stadt- zum Autobahnfahrer durch eine Verschiebung hin zu höheren Fahrgeschwindigkeiten gekennzeichnet, welche für beide Fahrzeuge in identischer Form zu verzeichnen ist.

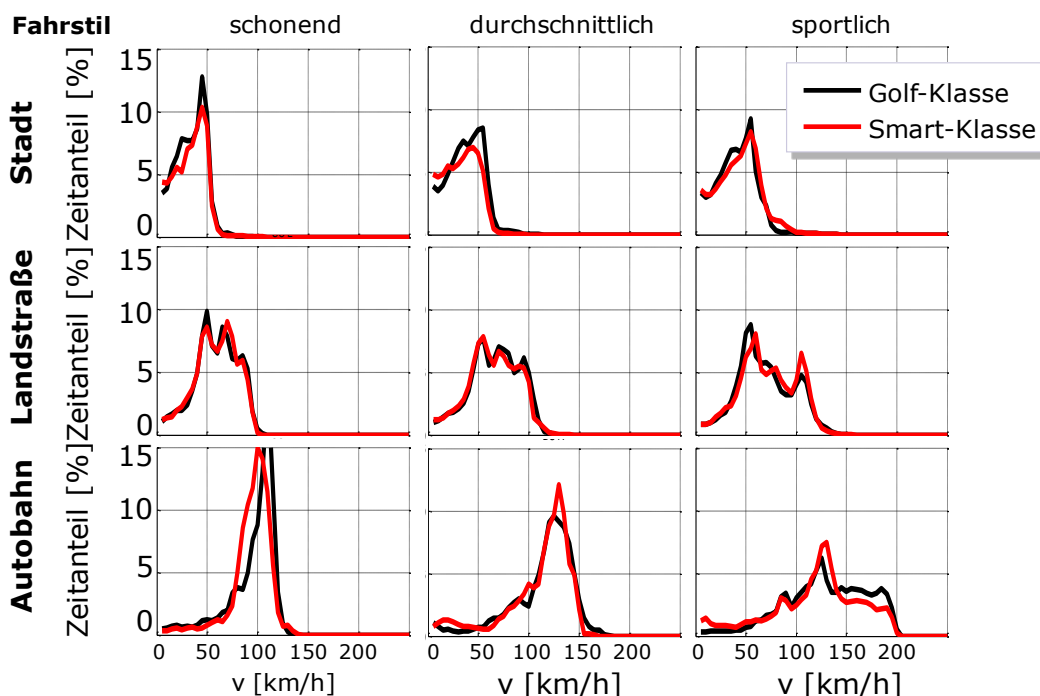


Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung der Fahrzeuggeschwindigkeiten für die betrachteten Fahrzeugklassen

Im Geschwindigkeitsverhalten des Fahrers der Golf-Klasse ist im Vergleich zu der Smart-Klasse eine leichte Verschiebung der Häufigkeiten hin zu höheren Geschwindigkeiten aufgrund des geringeren Leistungsgewichts zu erkennen.

Die in Abbildung 9 dargestellten Verläufe stellen die Durchschnittswerte bei Beschleunigungen und Verzögerungen in Abhängigkeit von einer definierten Fahrzeug-Startgeschwindigkeit v_{Start} dar. Während die mittleren Beschleunigungen in allen Diagrammen aufgrund der Abnahme des Zugkraftüberschusses bei höheren Startgeschwindigkeiten geringer werden, nehmen die Mittelwerte der Verzögerungen nahezu im gleichen Umfang zu, was anhand der annähernd parallelen Beschleunigungs- und Verzögerungsverläufe zu erkennen ist. Ebenso ist der Fahrstileinfluss auf allen Fahrstrecken vom schonenden über den durchschnittlichen zum sportlichen Fahrstil anhand der Zunahme der Mittelwerte zu erkennen. Die Golf-Klasse weist im Vergleich zur Smart-Klasse geringfügig höhere Werte der Beschleunigung und der Verzö-

gerung auf, was sich insbesondere bei dem sportlichen Fahrstil gut erkennen lässt. Aufgrund des differierenden Fahrzeuggewichts von Smart- und Golf-Klasse sind jedoch bedeutende Unterschiede in den aus den Beschleunigungen und Verzögerungen resultierenden Radleistungen respektive den Energiebilanzen zu erwarten.

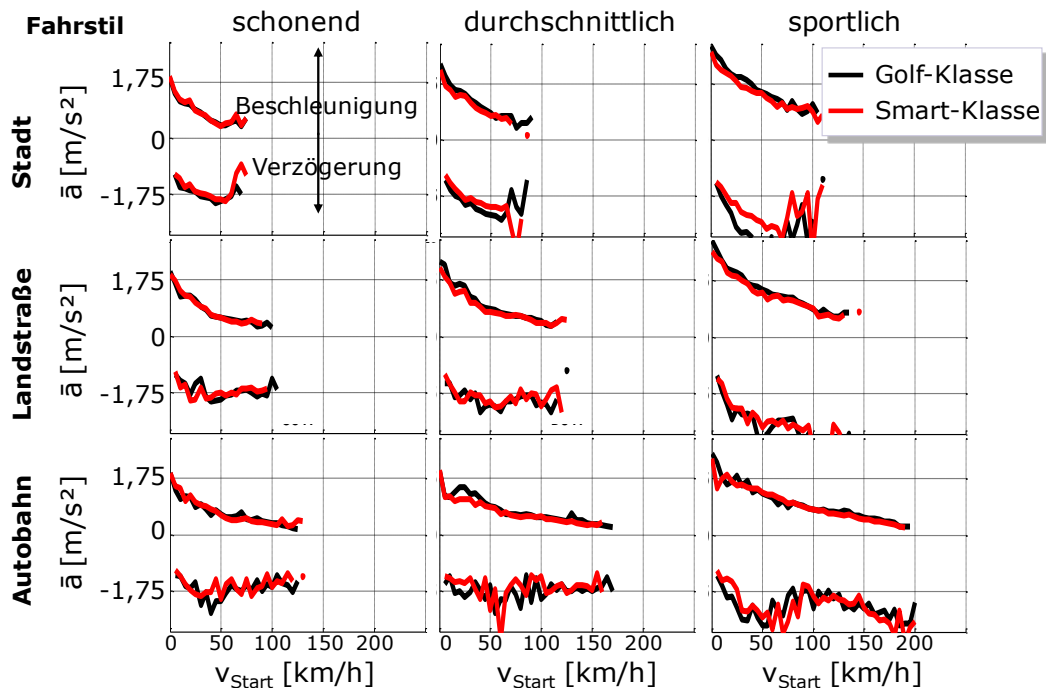


Abbildung 9: Durchschnittliche Beschleunigung und Verzögerung für die betrachteten Fahrzeugklassen

6.3 Ergebnisse der Kundensimulation

Die bei einer begrenzten Batteriekapazität (siehe Abbildung 10) zur Überwindung der Fahrwiderstände benötigte Antriebsenergie bestimmt die verbleibende Energie für Nebenverbraucher wie z.B. für das Heiz- und Klimasystem. Unabhängig vom Einsatzgebiet und vom Fahrstil ist diese Energie für jeden Kundentypen identisch. Dies gilt nicht für die potentiell rekuperierbare Energie, welche die erforderliche Batteriekapazität reduziert, bzw. Energie für die Nebenverbraucher zur Verfügung stellt.

Dieser Zusammenhang führt zu der Frage, welcher Kundentyp für einen Fahrer eines Elektrofahrzeugs repräsentativ ist, und welche Anforderungen sich in Bezug auf eine bereitzustellende Batteriekapazität ergeben. Die folgende Analyse der Simulationsergebnisse der Smart- und der Golf-Klasse vermag diese Frage nicht zu beantworten. Dennoch zielt der Vergleich des Kundenbetriebs mit dem NEFZ darauf ab, die in diesem Vergleichszyklus resultierende Energiebilanz mit der des Kundenfahrers zu vergleichen bzw. eine Einordnung des NEFZ-Energiebedarfs für die ausgewählten Kundentypen des durchschnittlichen Stadt- und des durchschnittlichen Autobahnfahrers (BAB) zu treffen.

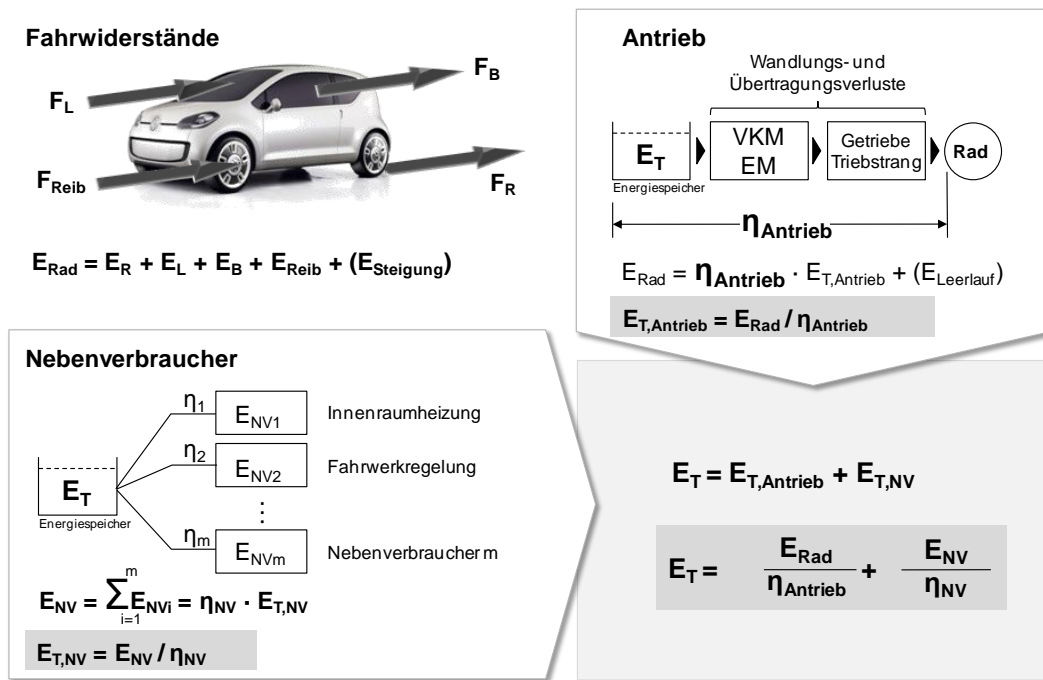


Abbildung 10: Energiebedarf des Fahrzeugs

Die in der Tabelle 4 aufgeführten Werte der erforderlichen Antriebsenergie zeigen für den NEFZ und den Stadtfahrer vergleichbare Werte auf, während der Autobahnfahrer aufgrund eines höheren Geschwindigkeitsniveaus eine höhere Antriebsenergie benötigt. Das Rekuperationspotential ist für den NEFZ jedoch nur halb so groß wie für den Stadtfahrer. Der Autobahnfahrer weist hingegen nur einen Bruchteil des Rekuperationspotentials eines Stadtfahrers auf. Dies resultiert bei voller Ausnutzung der Bremsenergieerückgewinnung in einer streckenbezogenen Gesamtenergie, welche für den NEFZ zwischen den Kundentypen des Stadt- und des Autobahnfahrers zu verzeichnen ist.

Angaben jeweils in kWh/100km	Golf-Klasse			Smart-Klasse		
	NEFZ	Kunde: Fahrstil durchschnittlich		NEFZ	Kunde: Fahrstil durchschnittlich	
		Stadt	BAB		Stadt	BAB
Antriebsenergie $E_{\text{T,Antrieb}}$	15.29	15.9	18.09	11.86	11.09	13.60
Rekuperationsenergie $E_{\text{Rekuperation}}$	-3.55	-6.65	-0.78	-2.33	-4.41	-0.33
Gesamtenergie $E_{\text{Ges}} = E_{\text{Rekuperation}} + E_{\text{T,Antrieb}}$	11.74	9.25	17.31	9.53	6.68	13.27

Tabelle 4: Antriebsenergiebedarf und Rekuperationspotential für den NEFZ und die Kundentypen des durchschnittlichen Stadt- und Autobahnfahrers, jeweils spezifiziert für die beiden betrachteten Fahrzeugklassen

Die stark differierenden Werte des Rekuperationspotentials sind auf die Betriebspunkte zurückzuführen, welche in der Abbildung 11 (Golf-Klasse) und der Abbildung 12 (Smart-Klasse) dargestellt sind.

Die Weganteile bei generatorischem Betrieb der E-Maschine im NEFZ sind relativ gering, was auf einen hohen Weganteil bei Konstantfahrt zurückzuführen ist. Diese Stationäranteile sind in dem Kennfeld bei motorischem Betrieb der E-Maschine in den Bereichen niedrigen Drehmoments und im Fall des NEFZ bei hohen Weganteilen wiederzufinden. Für den NEFZ ist das Rekuperationspotential somit vergleichsweise gering.

Sehr viel deutlicher wird die Tendenz eines geringen Rekuperationspotentials im Falle des Autobahnfahrers, welcher sehr hohe Weganteile bei hohen Geschwindigkeiten (respektive hohen Drehzahlen aufgrund eines Eingang-Reduktionsgetriebes) und niedrigen Drehmomenten aufzeigt. Dies gilt insbesondere für den Smart-Fahrer, welcher mit einem hohen Weganteil im Bereich des Leistungsmaximums die Konstantfahrt bei hohen Geschwindigkeiten bestreitet und dahingegen nur sehr geringe Weganteile und Drehmomente im generatorischen Betrieb der E-Maschine aufweist. Die Kombination eines leichten Fahrzeugs – welches ein entsprechend geringeres Rekuperationsmoment aufweist als die schwerere Golf-Klasse – mit niedriger Antriebsleistung und nur einem Reduktionsgang zeigt die Grenzen eines sinnvollen Einsatzes dieses Fahrzeugs insbesondere unter Berücksichtigung der erforderlichen Energiebereitstellung für die Nebenverbraucher auf.

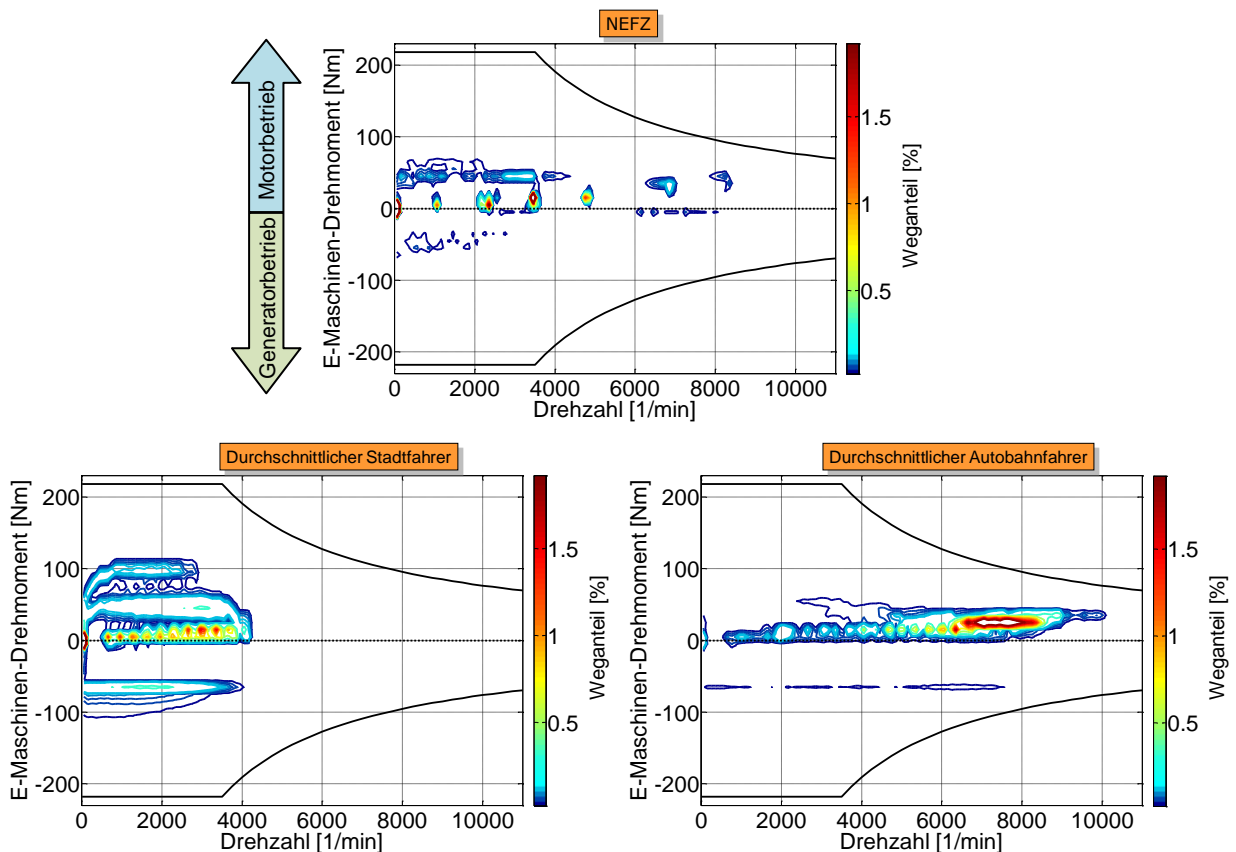


Abbildung 11: Weganteile der Golf-Klasse im Momenten-Drehzahl-Kennfeld der E-Maschine für den NEFZ (oben), den durchschnittlichen Stadtfahrer (links) und den durchschnittlichen Autobahnfahrer (rechts)

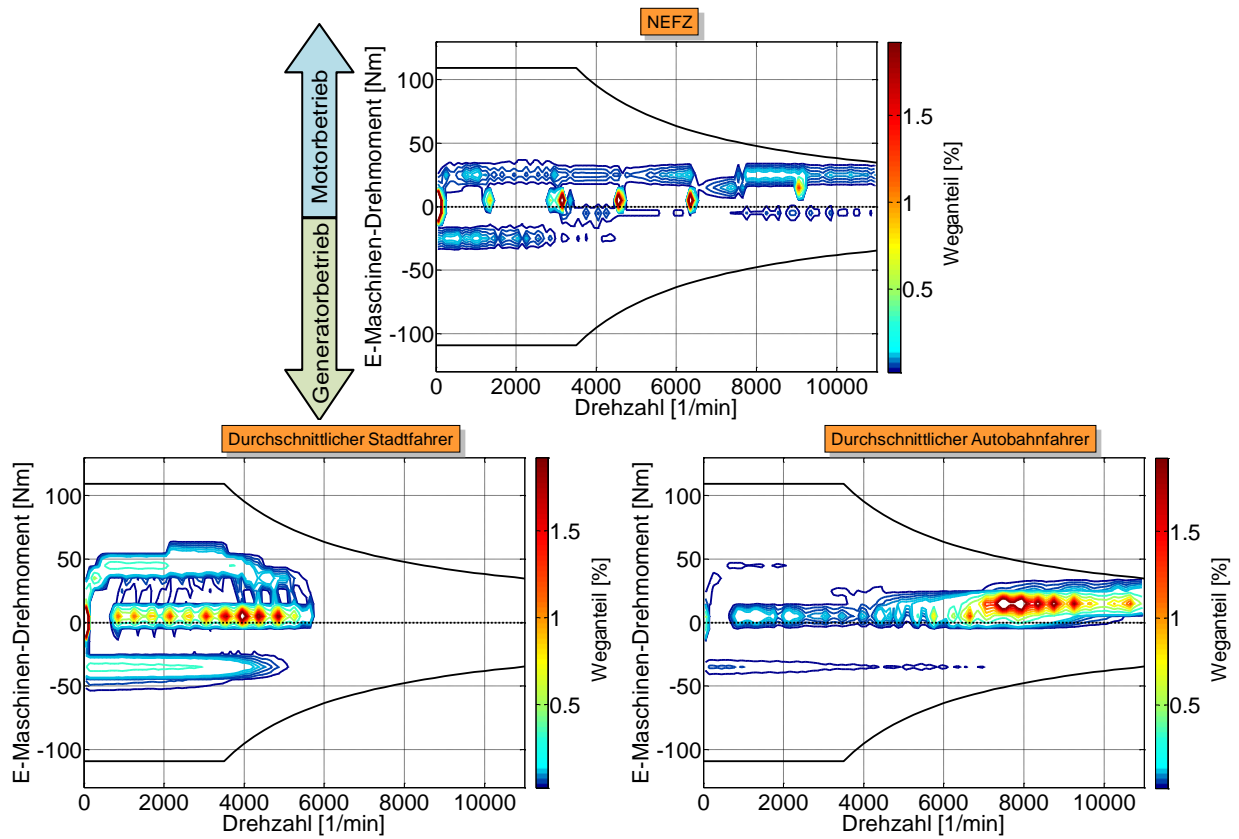


Abbildung 12: Weganteile der Smart-Klasse im Momenten-Drehzahl-Kennfeld der E-Maschine für den NEFZ (oben), den durchschnittlichen Stadtfahrer (links) und den durchschnittlichen Autobahnfahrer (rechts)

Kapitel 7

Referenz für die Maßnahmenbewertung

Als Referenz für die weiteren Untersuchungen werden zunächst Reichweiten und Energieverbräuche sowie die erreichten Innenraumtemperaturen für ein Fahrzeug ohne Modifikationen beschrieben. Eine ausführliche Darstellung erfolgt ausschließlich für die Golf-Klasse, jeweils getrennt für den Kühl- und den Heizfall. Die Ergebnisse der Smart-Klasse sind dem Anhang zu entnehmen, eine vergleichende Betrachtung von Golf- und Smart-Klasse liefert Kapitel 9.

7.1 Kühlfall

Das Fahrzeug wird wie in Kapitel 4.5.2 beschrieben vor dem Durchfahren eines NEFZ für 6 Stunden konditioniert. Abbildung 13 zeigt die Lufttemperaturen im Fahrgastraum am Ende der Konditionierungsphase bzw. zu Beginn der Zyklusfahrt für unterschiedliche solare Strahlungsstärken und Außentemperaturen. Bei 1.000 W/m^2 Strahlungsintensität werden die höchsten Lufttemperaturen im Fahrgastraum erzielt, während bei 100 W/m^2 Strahlungsintensität die Lufttemperatur die jeweilige Außentemperatur nur geringfügig überschreitet. Die Lufttemperatur und damit die Komfortbedingungen verschlechtern sich mit ansteigender Außentemperatur und/oder steigender Strahlungsintensität. Neben der Lufttemperatur werden die Temperaturen für alle weiteren Bauteile und Einbauten berechnet. Diese werden als Initialwerte für die Reichweitenermittlung herangezogen.

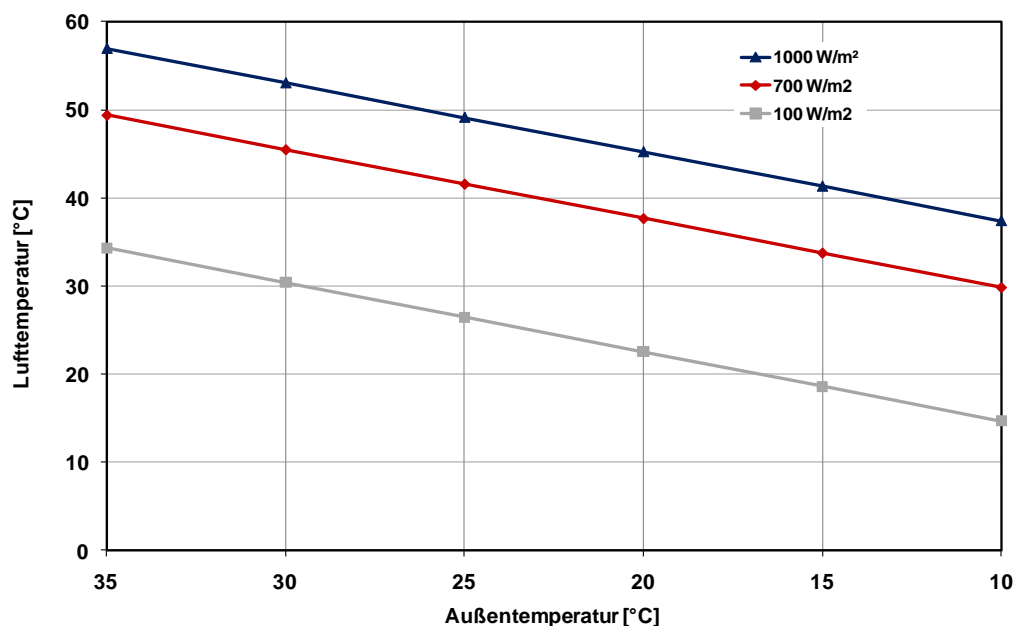


Abbildung 13: Lufttemperaturen im Fahrgastraum in Abhängigkeit von Außentemperatur und Strahlungsintensität zu Beginn der Zyklusfahrt, Golf-Klasse

In Abbildung 14 sind Ergebnisse für den Kühlbetrieb bei diskreten Außentemperaturen und einer konstanten Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 dargestellt. Es wurde jeweils ein reiner Frischluftbetrieb betrachtet. Die blaue Kurve zeigt den Energieverbrauch für das Durchfahren eines NEFZ, die rote Kurve die insgesamt erzielbare Reichweite gemäß Definition nach Kapitel 4.2. Der Energieverbrauch zum Durchfahren eines NEFZ beträgt unabhängig von den Umgebungsrandbedingungen immer $1,74 \text{ kWh}$ unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.2 getroffenen Vereinfachungen. Zwecks besserer Unterscheidung zwischen Energieverbräuchen für das Fahren und für das Klimatisieren ist eine graue Fläche in das Diagramm eingezeichnet. Sie markiert den Energieverbrauch für das Fahren, der Verbrauchsanteil oberhalb dieser Fläche entspricht dem Mehraufwand für die Klimatisierung. Bei Außentemperaturen oberhalb von 15°C wird unter den genannten Umgebungsrandbedingungen aktiv gekühlt, wobei der Energieverbrauch für die Kühlung mit zunehmender Außentemperatur ansteigt. Die erzielbare Reichweite bleibt dementsprechend weiter hinter der maximalen Reichweite von 190 km zurück. Bei einer Außentemperatur von 35°C bleibt eine Reichweite von 103 km zu verzeichnen, 46% der eingesetzten Energie werden somit zur Klimatisierung verwendet.

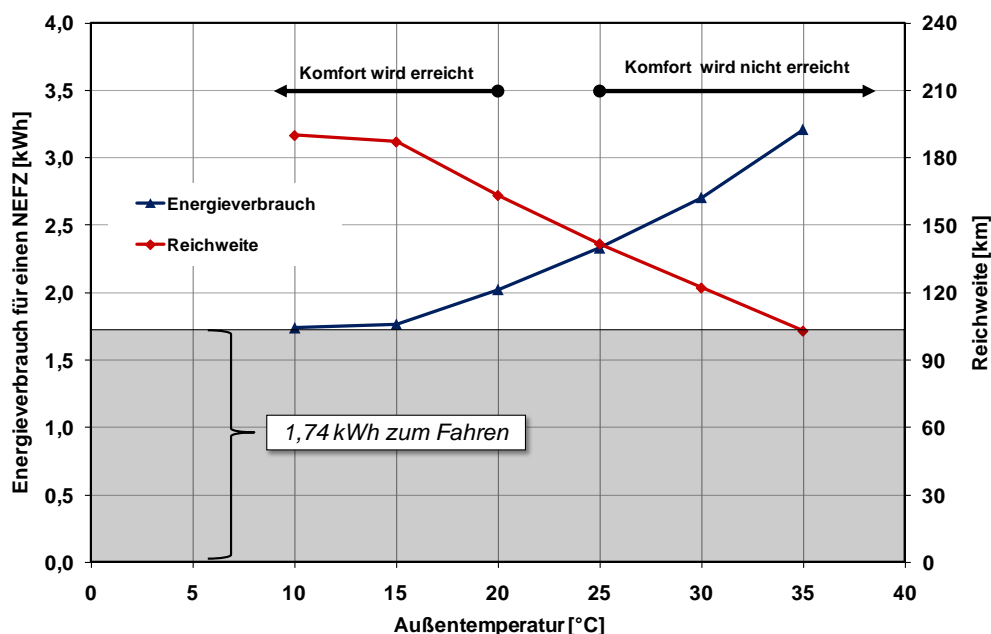


Abbildung 14: Einfluss der Außentemperatur auf Energieverbrauch und Reichweite im Kühlbetrieb bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 , Golf-Klasse

Abbildung 15 zeigt neben dem Energieverbrauch die resultierende Lufttemperatur im Fahrgastraum nach dem Durchfahren eines NEFZ. Die rote Kurve zeigt, dass bei Außentemperaturen von mehr als 25°C die Komforttemperatur nicht mehr während der gesamten Fahrtdauer des NEFZ erreicht wird. Der Kältekreis kann die geforderte Kälteleistung infolge der Begrenzung der Luftaustrittstemperatur nach Verdampfer sowie des Luftmassenstroms unter den betrachteten Umgebungsrandbedingungen, insbesondere der jeweils mit 50% angenommenen relativen Außenluftfeuchte (vgl. Kapitel 4.6), nicht zur Verfügung stellen.

Der bei zunehmender Außentemperatur ansteigende Energieverbrauch ist zum Einen dem Absinken des COP geschuldet, zum Anderen der ansteigenden latenten Verdampferleistung infolge der als konstant angenommenen relativen Außenluftfeuchte.

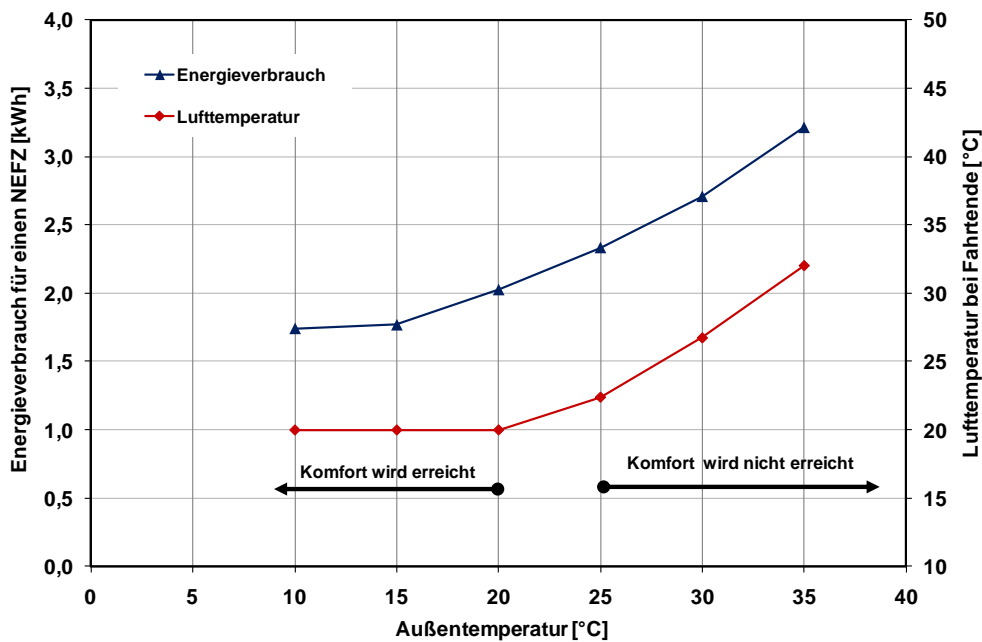


Abbildung 15: Einfluss der Außentemperatur auf Energieverbrauch und Lufttemperatur im Kühlbetrieb bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m², Golf-Klasse

7.2 Heizfall

Als Ausgangsbasis für den Heizfall wird das auf Außentemperatur durchtemperierte Fahrzeug herangezogen, vgl. Kapitel 4.5.1. Die sich nach Durchfahren eines NEFZ einstellenden Energieverbräuche und erzielten Reichweiten werden in Abbildung 16 in Abhängigkeit von diskreten Außentemperaturen für eine konstante Strahlungsintensität von 100 W/m² dargestellt. Bereits bei Außentemperaturen unterhalb der Komforttemperatur von 20 °C muss der Fahr- gastraum beheizt werden, wie der geringfügige Energiemehrverbrauch gegenüber dem reinen Fahrbetrieb zeigt.

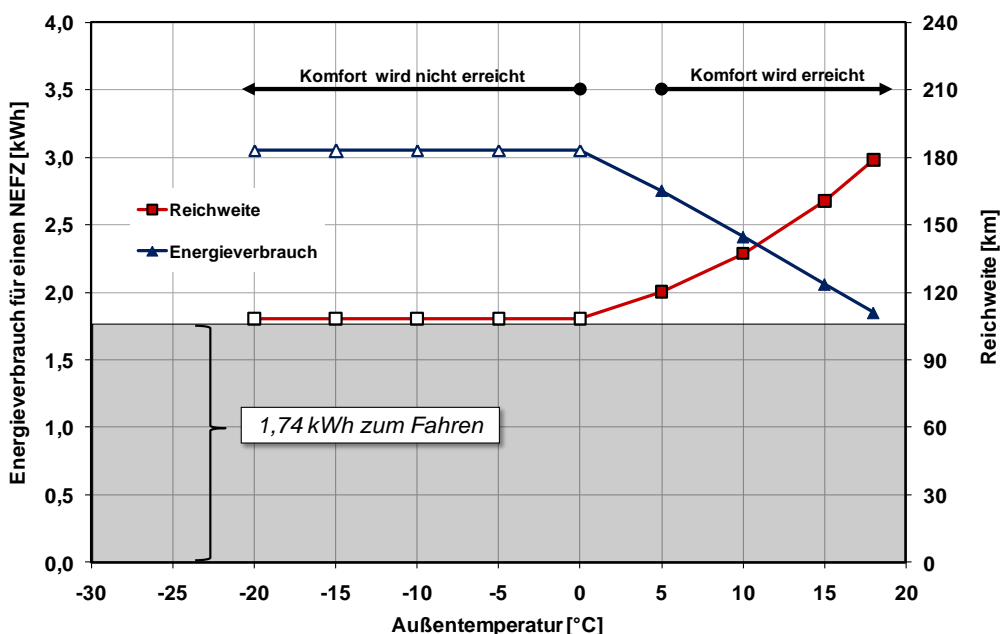


Abbildung 16: Einfluss der Außentemperatur auf Energieverbrauch und Reichweite im Heizbetrieb bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m², Golf-Klasse

Der Energieverbrauch steigt mit sinkenden Außentemperaturen stetig an, bis er bei einer Außentemperatur von ungefähr 0 °C einen Maximalwert erreicht, der sich bei weiterer Reduktion der Außentemperatur nicht mehr ändert. Dieser Maximalwert liegt in der Begrenzung der Heizleistung auf 4 kW begründet. Die Reichweite verhält sich umgekehrt. Mit sinkender Außentemperatur reduziert sich diese von 190 km bei einer Außentemperatur von 20 °C auf 108 km für Außentemperaturen unterhalb von 0 °C. Bis zu 43% der eingesetzten Energie werden somit für das Heizen verwendet.

Neben Reichweite und Energieverbrauch stellt die Innenraumtemperatur ein weiteres wichtiges Bewertungskriterium dar. Wie oben dargestellt, verringert sich unterhalb einer Außentemperatur von 0 °C die Reichweite nicht mehr. Die erreichten Lufttemperaturen im Fahrgastraum bei Fahrtende jedoch korrelieren mit der Außentemperatur und sinken weiter ab, wie Abbildung 17 zu entnehmen ist. Bei einer Außentemperatur von -20 °C wird bei Fahrtende eine Lufttemperatur von etwa 0 °C erreicht. Die Komforttemperatur wird bei Außentemperaturen größer 5 °C erreicht.

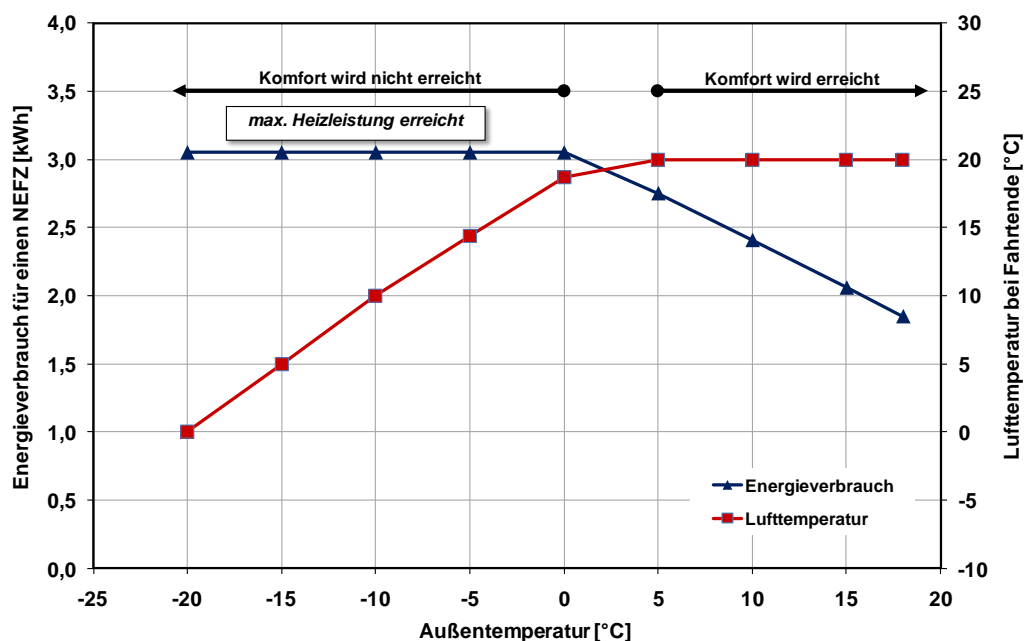


Abbildung 17: Einfluss der Außentemperatur auf Energieverbrauch und Lufttemperatur bei Fahrtende im Heizbetrieb bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m², Golf-Klasse

Kapitel 8

Maßnahmen zur Reichweitenerhöhung

Im Folgenden werden Maßnahmen analysiert, die den zuvor dargestellten großen Einfluss der Klimatisierung auf den Energieverbrauch verringern sollen und demnach zu einer Reichweitenerhöhung führen. Es werden im Einzelnen folgende Maßnahmen untersucht:

- Standmaßnahmen
- Einfluss der thermisch relevanten Fahrgastraummasse
- Umluftbetrieb einschließlich der Betrachtung von Scheibenenteisung und Beschlagsfreiheit
- Wärmepumpenbetrieb
- Einfluss der Karosserie-Isolierung
- Einfluss der Verschiebung

8.1 Standmaßnahmen

Unter Standmaßnahmen werden im Folgenden Maßnahmen verstanden, die die thermischen Bedingungen im Fahrgastraum bereits vor Fahrtbeginn positiv beeinflussen. Betrachtet werden sowohl passive Standmaßnahmen, die keinen zusätzlichen energetischen Aufwand erfordern, als auch aktive Standmaßnahmen. In letztgenanntem Fall muss der Nutzen, der durch einen geringeren Energiebedarf für die Klimatisierung entsteht, dem energetischen Aufwand der Standmaßnahme gegenübergestellt werden. Weiterhin ist der Komfortgewinn, der möglicherweise infolge der Standmaßnahme erzielt wird, bei der abschließenden Bewertung der Maßnahme zu berücksichtigen.

8.1.1 Heizfall

Die in Kapitel 7.2 vorgestellte Referenzvariante für die Beheizung mit einem auf Außentemperatur durchtemperierten Fahrzeug stellt den ungünstigsten Fall mit der höchsten erforderlichen Heizleistung dar. Als gegensätzliches Szenario wird daher das bereits vor Fahrtantritt z.B. in einer beheizten Garage vollständig auf Komforttemperatur vorgewärmte Fahrzeug betrachtet.

In Abbildung 18 ist für die beiden genannten Varianten der Energieverbrauch für das Durchfahren eines NEFZ bei diskreten Außentemperaturen im Bereich von -20°C bis 20°C dargestellt. Die rote Kurve kennzeichnet den Energieverbrauch für das Referenzfahrzeug, die blaue Kurve den Energieverbrauch für das vorgewärmte Fahrzeug. Ein Verbrauchsvorteil ergibt sich für das vorgewärmte Fahrzeug im betrachteten Außentemperaturbereich, sofern die Außentemperatur -20°C übersteigt. Der identische Energieverbrauch bei einer Außentemperatur von -20°C liegt darin begründet, dass auch für das vorgewärmte Fahrzeug die maximale Heizleistung nicht ausreichend ist, um die Komforttemperatur im Fahrgastraum im reinen Frischluftbetrieb zu halten. Die maximale Verbrauchseinsparung durch die Vorwärmung ist

bei ca. 0 °C zu verzeichnen. Der Energieverbrauchsanteil für das Heizen am Gesamtenergieverbrauch sinkt in diesem Fall von 43 % auf 31 %.

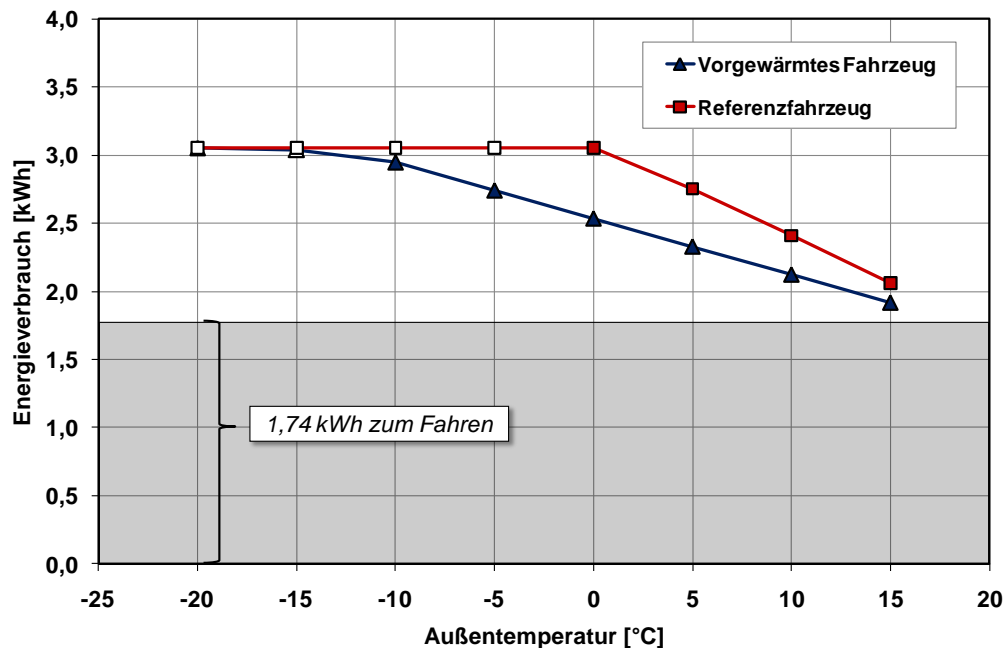


Abbildung 18: Einfluss der Außentemperatur auf den Energieverbrauch im Heizbetrieb für das vorgewärmte Fahrzeug und das Referenzfahrzeug bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m², Golf-Klasse

Die resultierenden Reichweiten für die beiden beschriebenen Varianten stellt Abbildung 19 dar. Die blaue Kurve zeigt den Verlauf der Reichweite des vorgewärmten Fahrzeugs, die rote Kurve den entsprechenden Verlauf des Referenzfahrzeugs. Der größte Reichweitenvorteil des vorgewärmten Fahrzeugs ist bei einer Außentemperatur von ca. 0 °C mit rund 22 km zu verzeichnen. Bei niedrigeren Außentemperaturen wird auch beim vorgewärmten Fahrzeug eine hohe Heizleistung zur Aufrechterhaltung der Komforttemperatur benötigt, ein geringerer bzw. kein Reichweitenvorteil bleibt festzustellen. Bei höheren Außentemperaturen hingegen sinkt der Anteil für die Beheizung am Gesamtenergieverbrauch, demnach reduziert sich gleichfalls der Reichweitenvorteil.

Abbildung 20 zeigt die Verläufe der jeweiligen Lufttemperaturen im Fahrgastraum bei Fahrtende in Abhängigkeit von der Außentemperatur. Die Komforttemperatur für das vorgewärmte Fahrzeug kann bereits ab einer Außentemperatur von -10 °C sichergestellt werden, im Referenzfall hingegen erst ab einer Außentemperatur von 5 °C. Ferner wird im vorgewärmten Fahrzeug bei Fahrtende im betrachteten Außentemperaturspektrum immer eine Lufttemperatur von größer 14 °C erzielt. Der Komfort ist im Vergleich zum Referenzfahrzeug als deutlich erhöht einzuschätzen.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Lufttemperatur bei Fahrtende im vorgewärmten Fahrzeug deutlich komfortabler ist und dass die Reichweite in einem weiten Außentemperaturbereich nennenswert ansteigt.

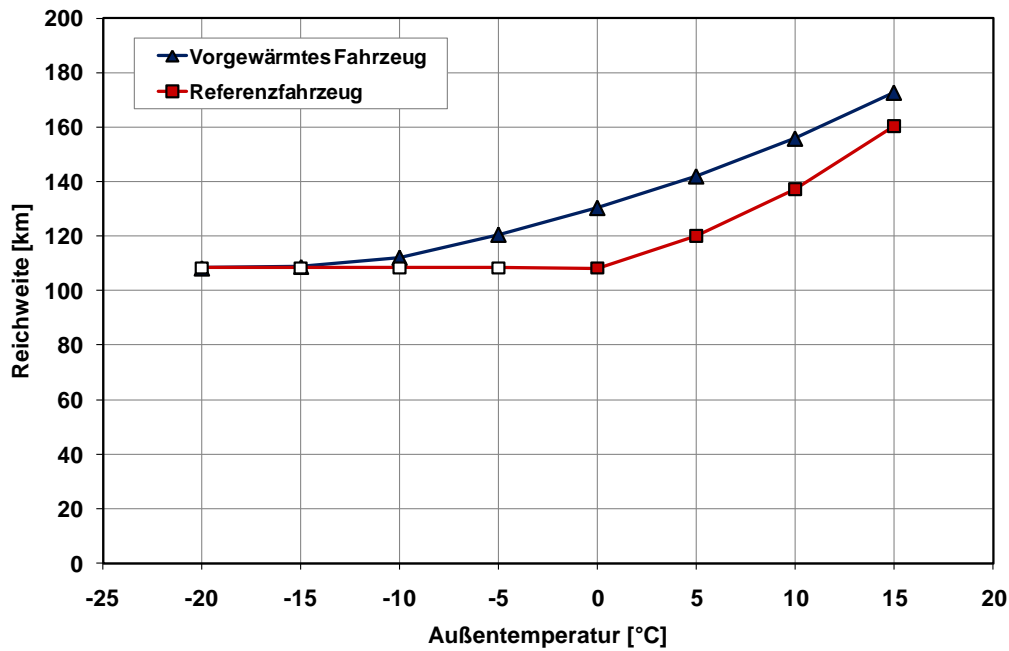


Abbildung 19: Einfluss der Außentemperatur auf die Reichweite im Heizbetrieb für das vorgewärmte Fahrzeug und das Referenzfahrzeug bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m², Golf-Klasse

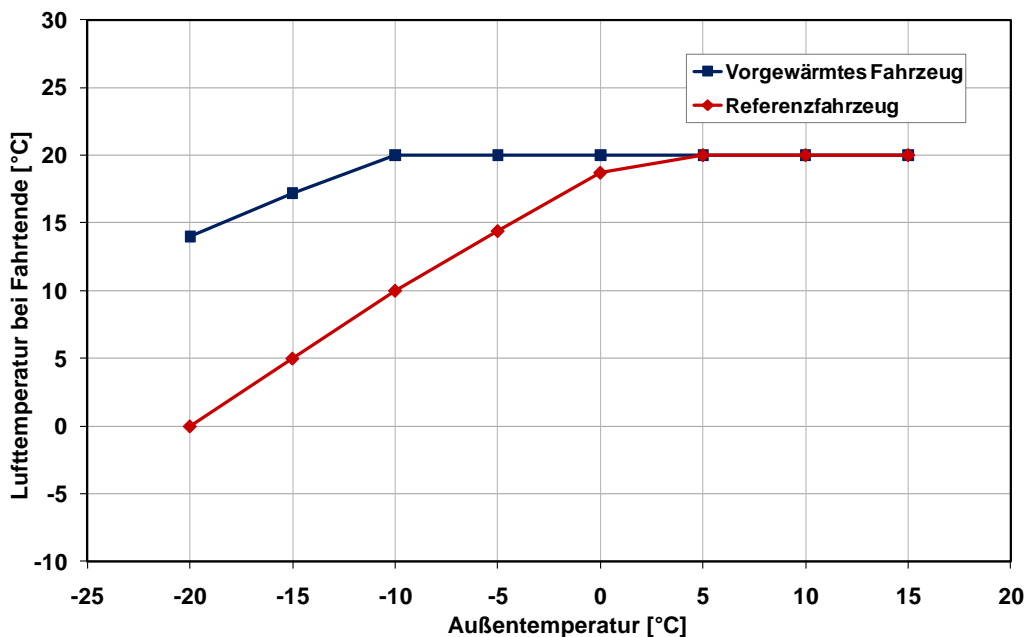


Abbildung 20: Einfluss der Außentemperatur auf die Lufttemperatur im Fahrgastraum bei Fahrtende im Heizbetrieb für das vorgewärmte Fahrzeug und das Referenzfahrzeug bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m², Golf-Klasse

8.1.2 Kühlfall

Zielsetzung der Standmaßnahmen im Kühlfall ist es im Wesentlichen, die Lufttemperaturen im Fahrgastraum bereits vor Fahrtantritt abzusenken. Neben der in Kapitel 4.5.2 beschriebenen Referenzvariante werden drei verschiedene Standmaßnahmen betrachtet:

- I. **Referenzfall:** Das Fahrzeug ist ungeschützt der Solarstrahlung ausgesetzt. Der Fahrgastraum wird nicht durchlüftet.
- II. **Beschattete Frontscheibe:** Das Fahrzeug ist der Solarstrahlung ausgesetzt, jedoch wird die Frontscheibe als von außen beschattet betrachtet. Eine Durchlüftung des Fahrgastraums findet nicht statt.
- III. **Beschattung + Durchlüftung:** Alle Fahrzeugaußenflächen sind beschattet, der Innenraum wird durchlüftet. Das gesamte Fahrzeug wird bei Fahrtantritt vereinfachend als vollständig auf Außentemperaturniveau durchtemperiert betrachtet. Diese Variante entspricht den thermischen Bedingungen eines unter einem Carport abgestellten Fahrzeugs mit abgesenkten Seitenscheiben.
- IV. **Vorklimatisierung:** Das Fahrzeug wird hier bereits vor Fahrtantritt vollständig auf das Niveau der Komforttemperatur durchtemperiert. Diese Variante entspricht damit einem vorklimatisierten Fahrzeug in Analogie zum vorgewärmten Fahrzeug im Heizfall.

Für die Variante mit beschatteter Frontscheibe wird das Fahrzeug analog zum Referenzfall zunächst für eine Zeitdauer von sechs Stunden der Solarstrahlung ausgesetzt. Hingewiesen sei darauf, dass die in diesem Unterkapitel beschriebenen Ergebnisse jeweils für eine Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 erzeugt wurden.

In Abbildung 21 sind die Temperaturen von Innenraumluft, Einbauten und Dach dargestellt, die bei einer Außentemperatur von 35°C bei Fahrtantritt zu verzeichnen sind. Im Vergleich zum Referenzfall wird die Lufttemperatur im Fahrgastraum bereits durch eine Beschattung der Frontscheibe um ca. 15 K reduziert. Diese sehr groß erscheinende Absenkung ist auf die Annahme einer senkrecht über dem Fahrzeug stehenden Sonne und einem damit nur geringen solaren Wärmeeintrag durch die übrigen, nicht beschatteten Verscheibungen zurückzuführen.

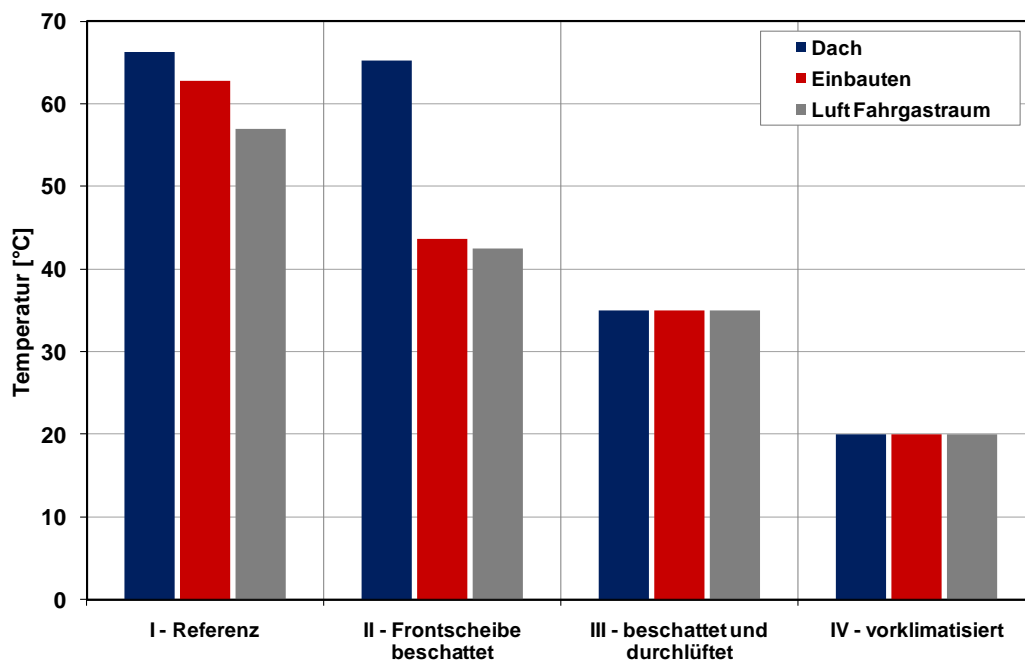


Abbildung 21: Lufttemperatur sowie Temperaturen für Dach und Einbauten bei Fahrtantritt für die untersuchten Standmaßnahmen bei einer Außentemperatur von 35°C und einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 , Golf-Klasse

Abbildung 22 zeigt die Auswirkungen der untersuchten Standmaßnahmen auf den Energieverbrauch für das Durchfahren des NEFZ im betrachteten Außentemperaturbereich. Die gepunktete Linie kennzeichnet den Referenzfall. Durch Einsatz einer beschatteten Frontscheibe (blaue Kurve) kann der größte Verbrauchsvorteil bei Außentemperaturen um 20 °C erzielt werden. Bei höheren Außentemperaturen sind nur geringe bzw. keine Unterschiede bei der erforderlichen Kälteleistung und damit beim Energieverbrauch feststellbar. Der Kältekreis kann die benötigte Kälteleistung infolge des hohen Anteils für die latente Verdampfung bei der betrachteten relativen Außenluftfeuchte von 50 % nicht mehr zur Verfügung stellen.

Bei den Varianten beschattetes plus durchlüftetes Fahrzeug (rote Kurve) sowie vorklimatisiertes Fahrzeug (graue Kurve) ist ein ähnlicher Kurvenverlauf zu verzeichnen, wobei die letztgenannte Variante einen geringeren Energieverbrauch aufweist. Der größte Verbrauchsvorteil wird für diese Varianten bei Außentemperaturen um 25 °C erzielt. Bei höheren Außentemperaturen lässt sich gleichfalls die im Vorabschnitt genannte Begründung anführen. Der augenscheinliche Knick im Kurvenverlauf des vorklimatisierten Fahrzeugs bei 30 °C ist der geringen Zahl der Außentemperatur-Stützpunkte geschuldet - bei rund 32 °C dürfte die Kälteleistung nicht mehr ausreichen, um die Komforttemperatur im Fahrgastraum sicherzustellen und somit würde der Energieverbrauch mit dem des Referenzfalls identisch sein.

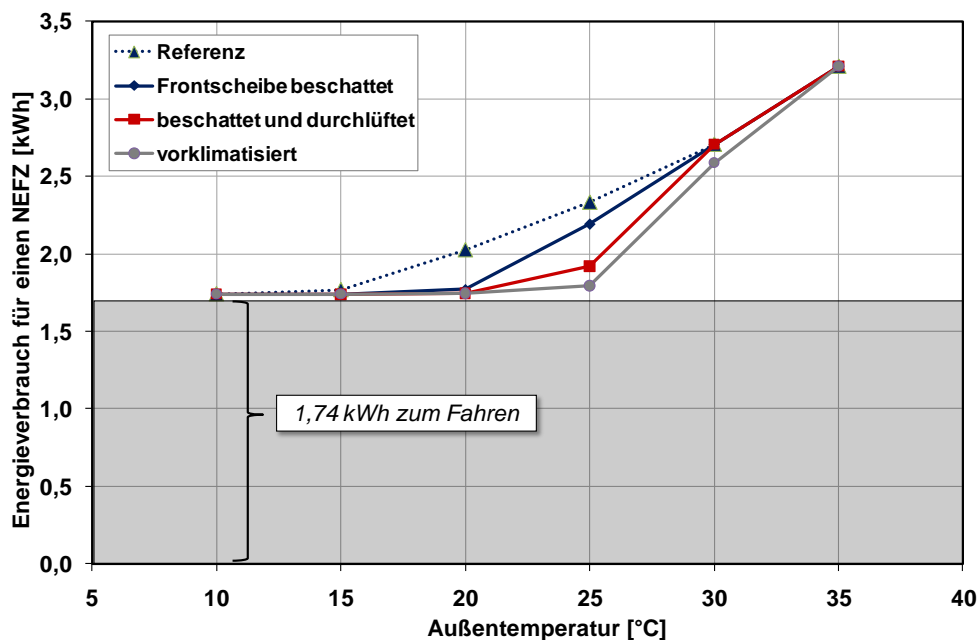


Abbildung 22: Einfluss der Außentemperatur auf den Energieverbrauch während des Kühlbetriebs bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m² für die untersuchten Standmaßnahmen, Golf-Klasse

Die erzielten Reichweiten für die betrachteten Standmaßnahmen sind in Abbildung 23 dargestellt. Die für den Energieverbrauch dargelegten Ausführungen gelten analog. Der maximale Reichweitenvorteil ist bei einer Außentemperatur von ca. 25 °C für das vorklimatisierte Fahrzeug mit etwa 42 km zu verzeichnen. Bei der Variante mit beschatteter Frontscheibe kann die Reichweite maximal um ca. 23 km bei einer Außentemperatur von 20 °C gesteigert werden, bei dem beschatteten und durchlüfteten Fahrzeug um maximal ca. 30 km bei einer Außentemperaturen von 25 °C.

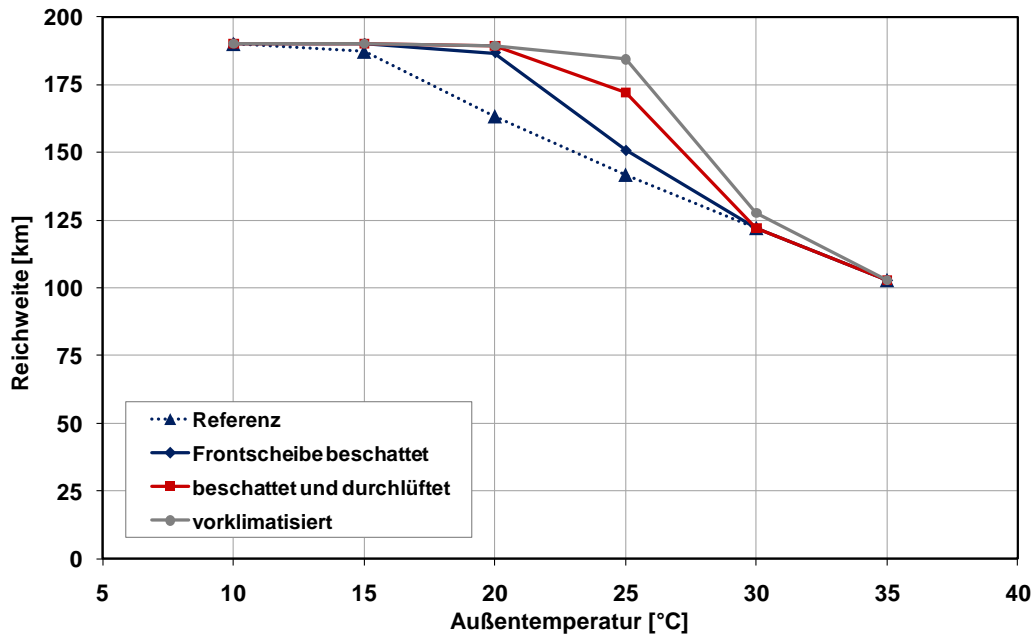


Abbildung 23: Einfluss der Außentemperatur auf die Reichweite während des Kühlbetriebs bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 für die untersuchten Standmaßnahmen, Golf-Klasse

Die Temperaturen der Luft im Fahrgastraum bei Fahrtende sind für die untersuchten Standmaßnahmen in Abbildung 24 in Abhängigkeit von der Außentemperatur aufgetragen und zeigen deutlich den positiven Effekt der Standmaßnahmen auf den Komfort. Auch wenn bei Temperaturen ab 30°C und größer kein signifikanter Reichweitenvorteil zu verzeichnen ist, so ist der Komfort gegenüber dem Referenzfall merklich höher.

Alle Varianten weisen bei Außentemperaturen oberhalb von 20°C eine gegenüber dem Referenzfall reduzierte Lufttemperatur auf. Bereits über eine beschattete Frontscheibe ist eine um ca. 3 K geringere Lufttemperatur erzielbar, allerdings kann allein durch diese Maßnahme die Komforttemperatur bei Außentemperaturen über 25°C nicht mehr sichergestellt werden. Bei der Vorklimatisierung des Fahrzeugs wird die Komforttemperatur, wie bereits oben diskutiert, bei einer Außentemperatur oberhalb von ca. 32°C nicht mehr erreicht, jedoch bleibt auch bei einer Außentemperatur von 35°C eine im Vergleich zum Referenzfall um ca. 15 K geringere Lufttemperatur festzuhalten.

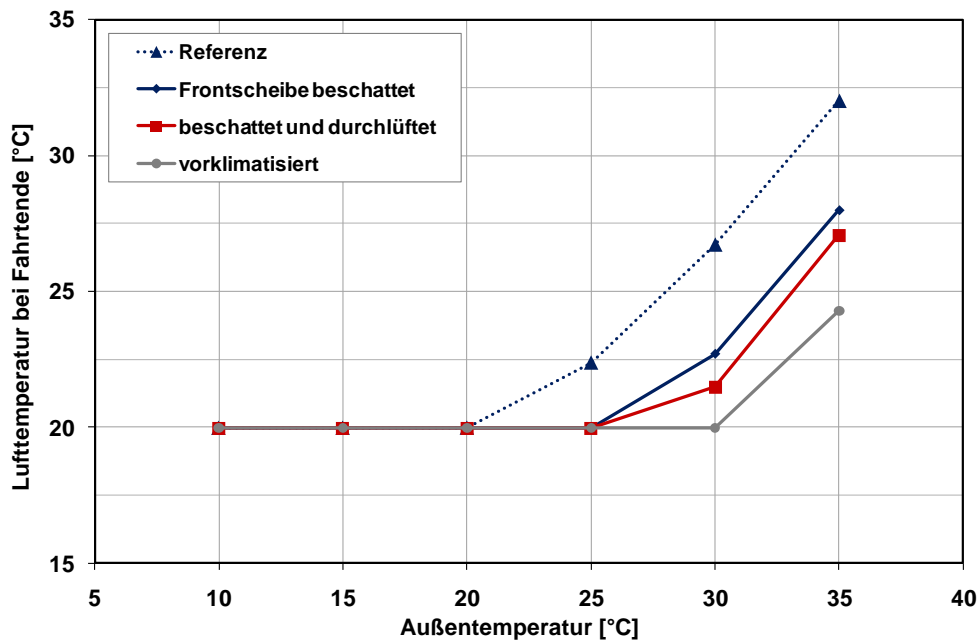


Abbildung 24: Einfluss der Außentemperatur auf die Lufttemperatur im Fahrgastraum bei Fahrtende während des Kühlbetriebs bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 für die untersuchten Standmaßnahmen, Golf-Klasse

Zusammenfassend lässt sich durch die untersuchten Standmaßnahmen eine maximale Steigerung der Reichweite um 42 km von 142 km auf 184 km erzielen. Eine deutliche Komfortverbesserung bleibt für alle Standmaßnahmen im betrachteten Außentemperaturbereich festzustellen, insbesondere bei einer Vorklimatisierung des Fahrzeugs vor Fahrtantritt.

8.2 Reduzierung der thermisch relevanten Masse im Fahrgastraum

In diesem Unterkapitel wird der Einfluss einer reduzierten thermisch relevanten Masse des Fahrgastraumes auf den Energieverbrauch für die Klimatisierung und damit auf die erzielbare Reichweite untersucht. Als thermisch relevante Masse soll hier die Masse aller Einbauten des Fahrgastraums verstanden werden, d.h. Sitze, Dachhimmel, Armaturentafel, Tür- und Seitenverkleidungen sowie Bodenauslegware. Definiert werden drei Varianten mit unterschiedlicher Masse:

- Variante I: 300 kg
- Variante II: 185 kg
- Variante III: 100 kg

In Variante I entspricht die aufgeführte Masse der Gesamtmasse der Einbauten für die betrachtete Golf-Klasse, in Variante II der Gesamtmasse der Einbauten für die Smart-Klasse. Die Massenangabe der Variante III ist in Abstimmung mit dem Arbeitskreis 5 der Forschungsvereinigung Automobiltechnik als untere Grenze für den Leichtbau anzusehen, da eine weitere Reduzierung aus sicherheitstechnischen Aspekten als kritisch einzuschätzen ist.

Abbildung 25 zeigt für die spezifizierten drei Varianten die erreichten Temperaturen von Dach, Einbauten und Luft im Fahrgastraum bei Fahrtantritt nach vorausgegangener sechsstündiger solarer Bestrahlung mit einer Bestrahlungsstärke von 1.000 W/m^2 bei einer Außentemperatur von 25 °C . Mit ansteigender Masse der Einbauten ist ein Absinken der mittleren Einbautentemperatur aufgrund der zunehmenden Kapazität zu verzeichnen, während die Temperatur des Dachs bedingt durch die solare Bestrahlung nahezu unverändert bleibt. Die

Lufttemperatur korreliert mit der Einbautemperatur und sinkt mit zunehmender Masse gleichfalls ab.

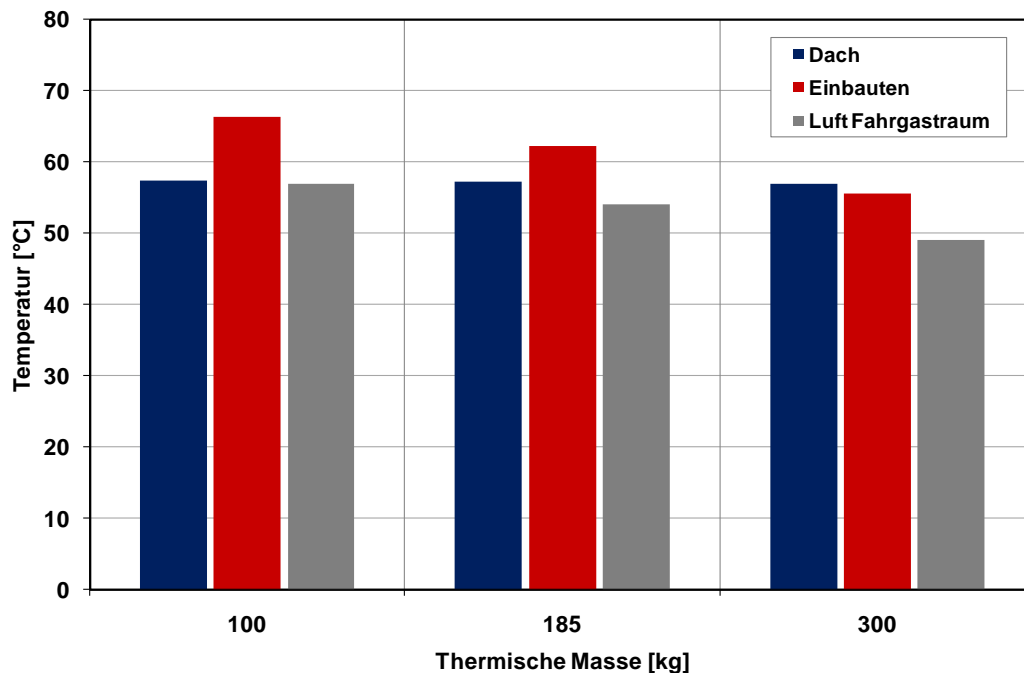


Abbildung 25: Abhängigkeit der Temperaturen von Dach, Einbauten und Luft im Fahrgastraum bei Fahrtantritt nach vorausgegangener sechsständiger solarer Bestrahlung mit einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 für unterschiedliche thermischen Massen bei einer Außentemperatur von 25°C , Golf-Klasse

In Abbildung 26 ist abweichend von den bisher gezeigten Abbildungen allein der Energieverbrauch für die Klimatisierung für ausgewählte Szenarien dargestellt. Um die Vergleichbarkeit der Energieverbräuche zu gewährleisten, beginnt die y-Achse bei $1,74 \text{ kWh}$, dem Energieverbrauch für den reinen Fahrbetrieb. Anzumerken bleibt, dass die Gesamtfahrzeugmasse zunächst als konstant betrachtet wird. Die Energieverbräuche der einzelnen Szenarien aus Abbildung 26 werden nachfolgend von links nach rechts vorgestellt und diskutiert:

- A. Das Fahrzeug wurde bei einer Außentemperatur von 25°C und einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 gemäß der Referenzvariante konditioniert, anschließend wurde ein NEFZ durchfahren. Weil die gewünschte Komforttemperatur für alle drei Varianten nicht erreicht wird, ist die gleiche Kälteleistung und demzufolge ein identischer Energieverbrauch zu verzeichnen.
- B. Abweichend vom vorstehenden Szenario wurde eine Außentemperatur von 20°C gewählt. In allen Varianten kann die benötigte Kälteleistung zur Verfügung gestellt werden. Mit zunehmender thermischer Masse steigen der Kühlbedarf und damit der Energieverbrauch bedingt durch die größere eingespeicherte Wärmemenge in den Einbauten zunächst geringfügig an. Mit weiterer Zunahme der Masse überwiegt die reduzierte Wärmeabgabe der Einbauten in den Innenraum, so dass die notwendige Kälteleistung wieder geringfügig absinkt.
- C. In diesem Szenario wird ein auf 20°C vorklimatisiertes Fahrzeug (siehe Kapitel 8.1.2) betrachtet. Die Durchfahrt des NEFZ erfolgt bei einer Außentemperatur von 20°C und einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 . Bei der kleinsten thermischen Masse bleibt ein geringfügig höherer Energieverbrauch für die Klimatisierung festzustellen, da die absorbierte langwellige Wärmestrahlung zu einer höheren Einbautemperatur führt,

die einen höheren konvektiven Wärmestrom in den Fahrgastraum und damit einen höheren Klimatisierungsaufwand zur Folge hat.

- D. Das Fahrzeug wird gemäß Referenz für den Heizfall bei einer Außentemperatur von 5 °C betrachtet. Der Energieverbrauch steigt mit zunehmender Masse der Einbauten geringfügig an, da für deren Aufheizung infolge der größeren Wärmekapazität eine höhere Heizleistung erforderlich ist.
- E. In diesem Szenario wird ein auf 20 °C vorgewärmtes Fahrzeug (siehe Kapitel 8.1.1) betrachtet, das anschließend bei einer Außentemperatur von 5 °C einen NEFZ durchfährt. Die Auswirkungen der thermischen Massen auf den Energieverbrauch sind vernachlässigbar.

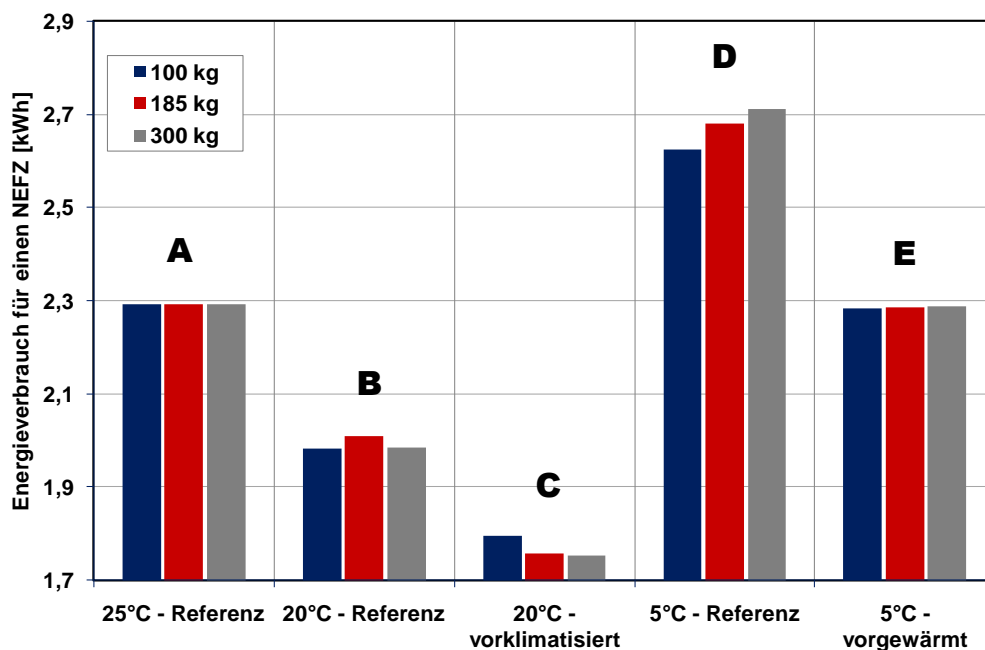


Abbildung 26: Energieverbrauch für die Durchfahrt eines NEFZ bei ausgewählten Szenarien in Abhängigkeit von der thermischen Masse, Golf-Klasse

Die dargestellten Untersuchungen zeigen ein geringes Einsparpotenzial am Energieverbrauch durch eine geänderte thermische Masse und damit nur einen geringen Einfluss auf die erzielbare Reichweite. Bei dem betrachteten Szenario D (5 °C - Referenz) wird so bei einer thermischen Masse von 300 kg eine Reichweite von 120 km erzielt, bei 100 kg erhöht sich die Reichweite auf 124 km. Wird dasselbe Fahrzeug jedoch für den Kühlfall gemäß Szenario C (20 °C - vorklimatisiert) betrachtet, ist eine Reichweiteneinbuße von 3 km bei Vergleich der Varianten mit einer Masse von 300 kg und 100 kg zu verzeichnen. Demnach führen die unterschiedlichen Ausgangsbedingungen bei den betrachteten drei untersuchten Massevarianten zu gegensätzlichen Auswirkungen auf die Reichweite.

Bisher wurde bei den beschriebenen Szenarien aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit ausschließlich der energetische Mehraufwand für die Klimatisierung betrachtet. Nachfolgend soll daher der Einfluss der Masse auf die Fahrwiderstände und damit den Energieverbrauch für den reinen Fahrbetrieb untersucht werden. Vereinfachend wird angenommen, dass eine reduzierte Masse der Einbauten auch zu einer Reduktion des Fahrzeuggesamtgewichts in gleicher Höhe führt.

- Das oben definierte Fahrzeug der Golf-Klasse mit einer thermisch relevanten Masse von 300 kg im Fahrgastraum besitzt ein Gesamtgewicht von 1600 kg. Damit ergeben

sich ein Energieverbrauch beim Durchfahren des NEFZ von 1,74 kWh und eine erzielbare Reichweite von 190 km.

- Das Fahrzeug mit einer thermisch relevanten Masse von 185 kg besitzt demnach ein reduziertes Gesamtgewicht von 1485 kg. Der Energiebedarf zum Durchfahren des NEFZ sinkt auf 1,65 kWh, die Reichweite erhöht sich auf 200 km.
- Bei einer thermisch relevanten Masse von 100 kg reduziert sich das Gesamtgewicht des Fahrzeugs auf 1400 kg. Damit ergeben sich ein Energieverbrauch beim Durchfahren des NEFZ von 1,59 kWh und eine Reichweite von 208 km.

Die durchgeführten Abschätzungen legen nahe, die Einbautenmasse und damit die Fahrzeugmasse zu reduzieren, um Energieeinsparungen infolge geringerer Fahrwiderstände beim reinen Fahrbetrieb zu realisieren. Jedoch ist hierbei zu berücksichtigen, dass gemäß Abbildung 25 eine geringere Einbautenmasse bei hoher solarer Einstrahlung zu höheren Lufttemperaturen im Fahrgastraum und damit zu einer Komfortreduktion führen kann.

8.3 Umluftbetrieb

In den bisherigen Betrachtungen wurde für die Klimatisierung des Fahrgastraums ein reiner Frischluftbetrieb berücksichtigt, bei dem ausschließlich Außenluft in den Fahrgastraum eingeblasen wird. Nachfolgend soll daher ein Teilumluftbetrieb untersucht werden, bei dem der Frischluftmassenstrom anteilig durch einen dem Fahrgastraum entnommenen Luftmassenstrom ersetzt wird. Der dem Fahrgastraum entnommene Anteil des Luftmassenstroms muss demnach nur ausgehend von der Lufttemperatur bei Entnahme auf die benötigte Zulufttemperatur geheizt oder gekühlt werden. Der erforderliche Klimatisierungsaufwand kann so je nach Umluftanteil deutlich reduziert werden. Anzumerken bleibt jedoch, dass der Umluftanteil nicht beliebig gesteigert werden kann, um eine übermäßige Einschränkung der Luftqualität zu vermeiden.

In Abbildung 27 sind die Energieverbräuche verschiedener Heiz- und Kühlszenarien bei reinem Frischluftbetrieb sowie Teilumluftbetrieb mit einem Umluftanteil von 50 % und von 80 % gegenübergestellt. In allen betrachteten Szenarien wird mit steigendem Umluftanteil eine entgegengesetzt proportionale Reduktion des Energieverbrauchs erzielt. Im Heizfall ist das höchste Einsparpotenzial bei einer Außentemperatur von -20°C für das vorgewärmte Fahrzeug zu verzeichnen. Der Gesamtenergieverbrauch sinkt in diesem Szenario um 24 %, der anteilige Energieverbrauch für die Beheizung reduziert sich von 43 % auf 25 %. Im Kühlfall verringert sich der Gesamtenergieverbrauch für das Referenzfahrzeug bei einer Außentemperatur von 35°C und einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 um 17 %, der anteilige Energieverbrauch für die Kühlung sinkt von 46 % auf 35 %.

Die Einflüsse von Frisch- und Umluftbetrieb auf die Reichweite sind in Abbildung 28 für die gleichen Szenarien dargestellt. Die maximale Steigerung der Reichweite wird für das vorgewärmte Fahrzeug bei einer Außentemperatur von -20°C erzielt. Gegenüber 108 km im Frischluftbetrieb kann die Reichweite auf 143 km im Umluftbetrieb mit 80 %-igen Umluftanteil gesteigert werden.

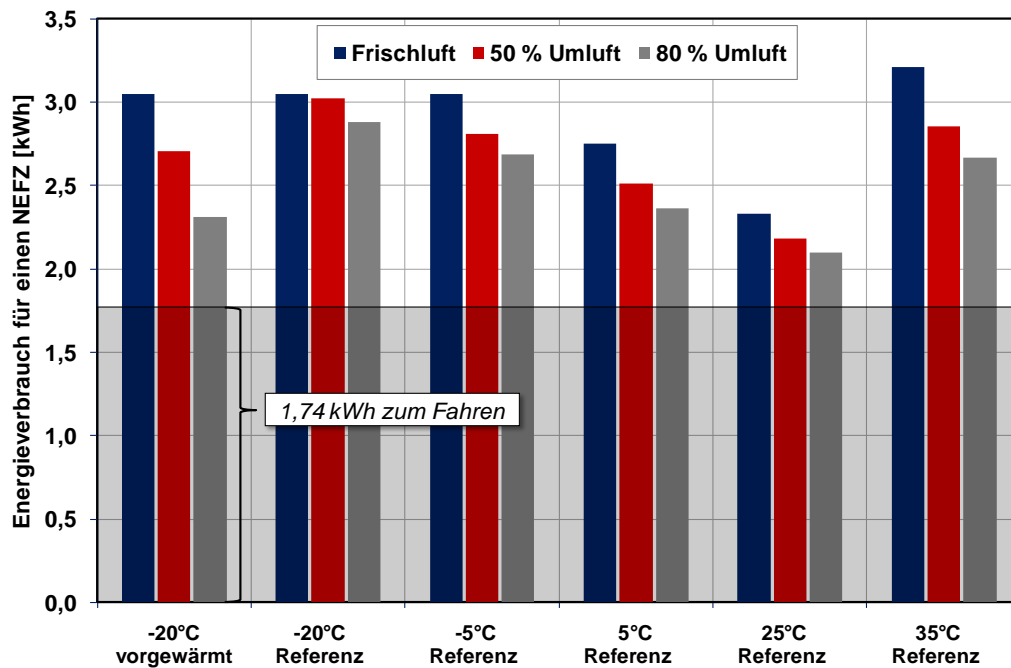


Abbildung 27: Energieverbrauch für verschiedene Heizfälle (Strahlungsintensität 100 W/m²) und Kühlfälle (Strahlungsintensität 1.000 W/m²) im Frischluftbetrieb sowie bei Teilumlufbetrieb mit 50 % bzw. 80 % Umluftanteil, Golf-Klasse

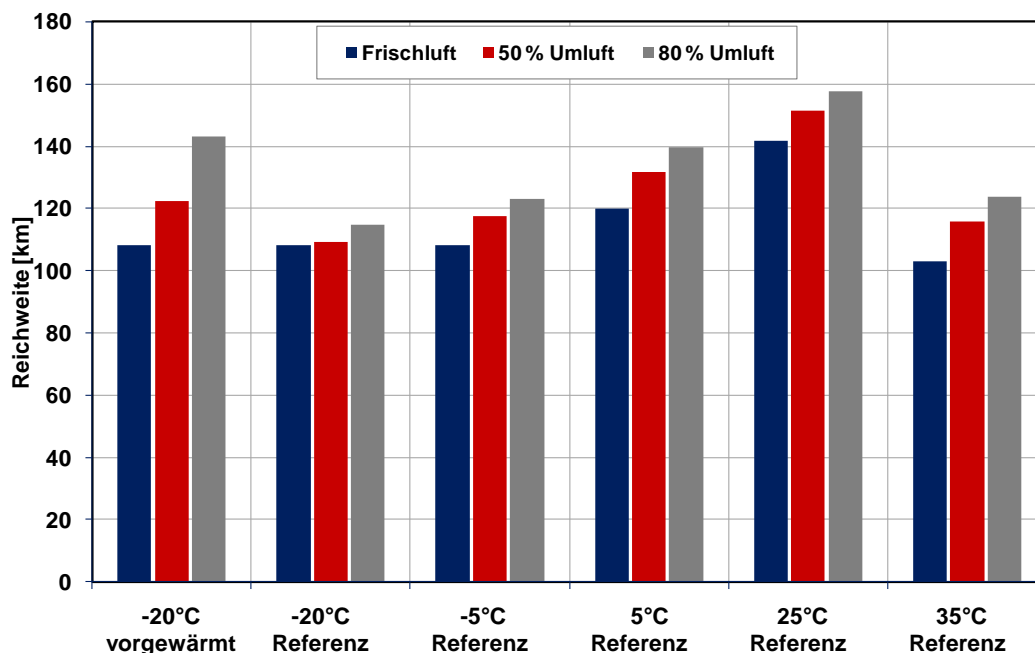


Abbildung 28: Reichweite für verschiedene Heizfälle (Strahlungsintensität 100 W/m²) und Kühlfälle (Strahlungsintensität 1.000 W/m²) im Frischluftbetrieb sowie bei Teilumlufbetrieb mit 50 % bzw. 80 % Umluftanteil, Golf-Klasse

Neben dem energetischen Effekt, der die Reichweite beeinflusst, ist ein Einfluss auf den Komfort zu verzeichnen. In Abbildung 29 sind die erreichten Lufttemperaturen im Fahrgastraum bei Fahrtende gleichfalls für die in Abbildung 27 bzw. Abbildung 28 bereits betrachteten Szenarien dargestellt. In allen betrachteten Szenarien ist bei Teilumlufbetrieb eine gerin-

gere Abweichung zwischen Lufttemperatur und der gewünschten Komforttemperatur als bei Frischluftbetrieb zu verzeichnen, abgesehen von dem Szenario (5 °C – Referenz), bei dem für alle Lüftungsbetriebsarten die Komforttemperatur erreicht wird.

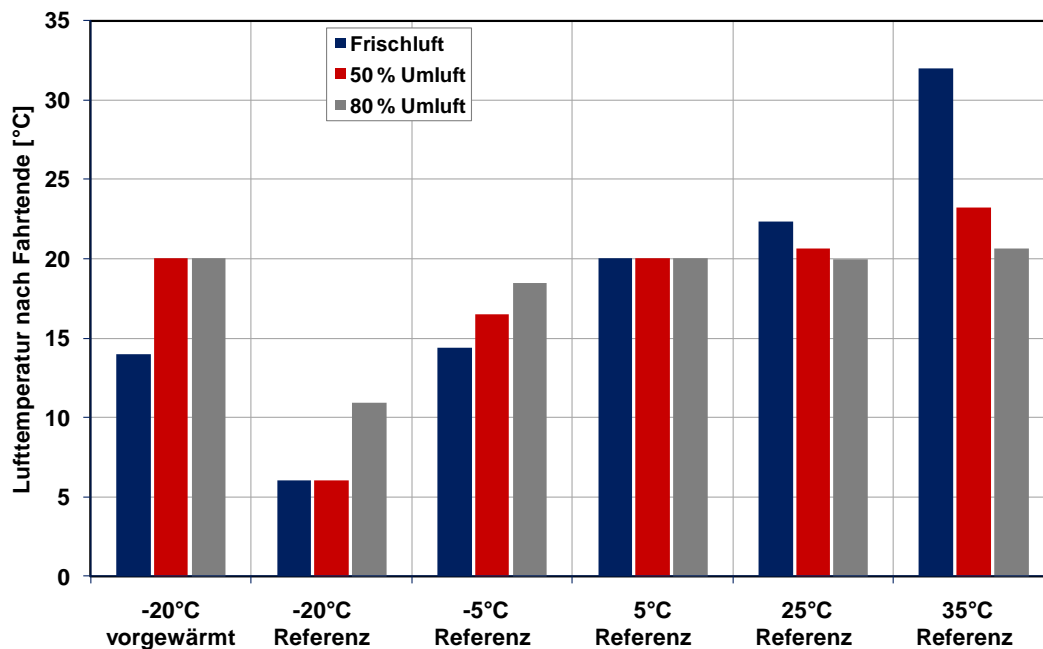


Abbildung 29: Lufttemperaturen im Fahrgastraum nach Fahrtende für verschiedene Heizfälle (Strahlungsintensität 100 W/m²) und Kühlfälle (Strahlungsintensität 1.000 W/m²) im Frischluftbetrieb sowie bei Teilumlufbetrieb mit 50 % bzw. 80 % Umluftanteil, Golf-Klasse

Beschlagfreiheit und Scheibenenteisung

Neben dem Aufrechterhalten der Komfortbedingungen im Fahrgastraum kann der Fahrzeugklimaanlage als Aufgabe auch die Freihaltung der Frontscheibe von Eis und Feuchtigkeit zugeordnet werden.

Insbesondere im Umluftbetrieb und bei kleinen Zuluftmassenströmen kann die Luftfeuchtigkeit so weit ansteigen, dass Feuchtigkeit an den Scheiben auskondensiert. Von sicherheitsrelevantem Interesse ist in diesem Fall die Frontscheibe. Die Temperatur der Frontscheibe wird daher nachfolgend als Größe herangezogen, um die Gefahr von Scheibenbeschlag zu detektieren. Unterschreitet die Scheibentemperatur die Taupunkttemperatur der Luft im Fahrgastraum, besteht Beschlaggefahr. Hingewiesen sei darauf, dass im Berechnungsmodell der Frontscheibe eine einzige homogene Scheibentemperatur zugeordnet wird und somit keine Aussage zu lokalen Temperaturen getroffen werden kann. Weiterhin steht die Frontscheibe im Berechnungsmodell ausschließlich in konvektivem Wärmeaustausch mit der Kabinenluft während in Realität die Frontscheibe im Defrost-Betrieb mit warmer Zuluft angeströmt wird. Dies führt zu einer stärkeren Erwärmung der Frontscheibe und bedingt ferner, dass die Taupunkttemperatur der Zuluft für die Beschlagneigung entscheidender ist. Die hier vorgestellten Ergebnisse zur Beschlagneigung an der Frontscheibe geben also lediglich grobe Hinweise, wann mit dem Beschlagen der Frontscheibe zu rechnen ist. Für fundiertere Aussagen ist ein wesentlich detaillierteres Berechnungsmodell erforderlich.

In Abbildung 30 sind die Frontscheiben- und Taupunkttemperaturen bei einer Außenlufttemperatur von -20 °C im Frischluftbetrieb sowie im Teilumlufbetrieb mit 50 % und 80 % Umluftanteil dargestellt. Im Frischluftbetrieb unterschreitet die Temperatur der Frontscheibe die Taupunkttemperatur nicht, so dass ohne weiteren Feuchtigkeitseintrag z.B. durch feuchte

Kleidung oder Transpiration nicht mit Scheibenbeschlag zu rechnen ist. In den beiden gewählten Umluftbetriebsfällen hingegen erfolgt rein rechnerisch eine Taupunktunterschreitung, mit Scheibenbeschlag ist zu einem früheren Zeitpunkt während der Zyklusfahrt für den Umluftbetriebsfall mit 80 % Umluftanteil zu rechnen.

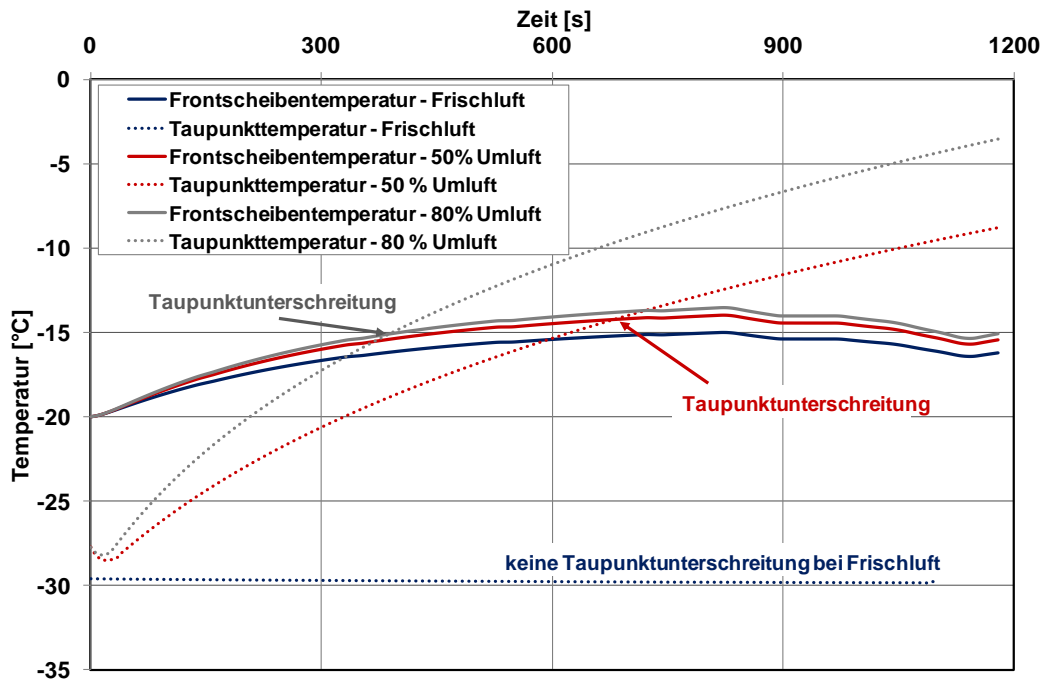


Abbildung 30: Frontscheiben- und Taupunkttemperaturen bei Frischluftbetrieb sowie bei Teilumluftbetrieb mit 50 % und mit 80 % Umluftanteil bei einer Außentemperatur von -20°C , Golf-Klasse

Zur Scheibenenteisung und zur Sicherstellung der Beschlagfreiheit kommt die in Kapitel 3.2 vorgestellte EU-Verordnung 672/2010/EG zur Anwendung. Die folgenden beiden Möglichkeiten bieten sich für das Enteisen und Trocknen an:

1. **Trocknung und Enteisung mittels Klimaanlage:** Diese Variante stellt die klassische Methode dar, bei der durch Luftausströmer, die unterhalb der Scheibe in die Armaturentafel integriert sind, konditionierte Luft ausgeblasen wird. Die eingebrachte Energie kann damit nur anteilig für das Enteisen und Trocknen der Scheibe aufgewendet werden. Der andere Teil wird an den Fahrgastraum abgegeben. Dies ist dem Fahrgastraumkomfort zuträglich, mindert jedoch die Effektivität der Enteisung und Trocknung.
2. **Elektrische Trocknung und Enteisung:** Durch beheizte feine, in die Scheibe integrierte Drähte oder auch beheizbare Folien oder metallische Beschichtungen wird die Scheibe trocken und eisfrei gehalten. Die Effektivität dieser Varianten ist hoch, da nahezu die gesamte Energie zur Aufheizung der Scheibe verwendet wird.

Wenn die Enteisung und Trocknung der Frontscheibe separat betrachtet wird, ist die elektrische Heizung sehr effektiv. Wird jedoch zusätzlich die Beheizung des Fahrgastraums in die Betrachtung eingeschlossen, ist auch ein Wärmepumpenprozess in eine genauere Untersuchung mit einzubeziehen.

Eine neu entwickelte transparente Beschichtung aus Indiumzinnoxid mit geringer Emissivität soll nach [22] ein Kondensieren von Feuchtigkeit auf der Scheibe verhindern und somit eine Beschlag- und Eisfreiheit gewährleisten. Damit ließe sich gemäß 672/2010/EG jedoch nicht auf eine Anlage zur Trocknung und Enteisung verzichten. Im realen Fahrzeugbetrieb könnte diese Neuentwicklung zu Energieeinsparungen führen.

8.4 Wärmepumpe

Eine Energieeinsparung bei der Beheizung des Fahrgastraums würde sich bei den in Deutschland vorliegenden Umgebungsrandbedingungen deutlich auf den Jahresenergieverbrauch auswirken. Als Alternative zum PTC-Zuheizer wird die Wärmepumpe betrachtet.

Eine für den Kühlfall verbaute Kompressionskälteanlage lässt sich z.B. durch entsprechende Umschaltung von Ventilen auch im Wärmepumpenbetrieb zum Heizen verwenden. Dabei werden, abhängig u.a. von der Außentemperatur, systemisch bedingt deutlich höhere Leistungszahlen erreicht als bei einem PTC-Zuheizer. Die realisierbare Leistungszahl, dem Verhältnis von abgegebener Wärmeleistung zu eingesetzter Antriebsenergie, hängt von einer Vielzahl von Parametern ab, die in einfachen Berechnungsmodellen nicht hinreichend genau bestimmt werden können. Für genaue thermische Analysen ist daher eine detaillierte Modellierung notwendig. Analog zu der Kälteanlage wurde eine idealisierte Berechnung vorgenommen mit einer von der Außentemperatur abhängigen Leistungszahl. Es wird außerdem davon ausgegangen, dass die benötigte Verdampfungswärme auch tatsächlich zur Verfügung steht.

Wie in Abbildung 31 dargestellt, ist mit diesen vereinfachten Annahmen eine Reichweitenberechnung bei einer Außentemperatur von -10°C für das Referenz- und das vorgewärmte Fahrzeug durchgeführt worden. Für den Referenzfall ergibt sich ein Reichweitenvorteil von 38 km bei Einsatz einer Wärmepumpe, bei einem bei Fahrtbeginn bereits vorgewärmten Fahrzeug von 37 km. Der Anteil der Heizenergie am Gesamt-Energieverbrauch sinkt dadurch in beiden Szenarien um 20 Prozentpunkte von rund 40 % auf rund 20 %.

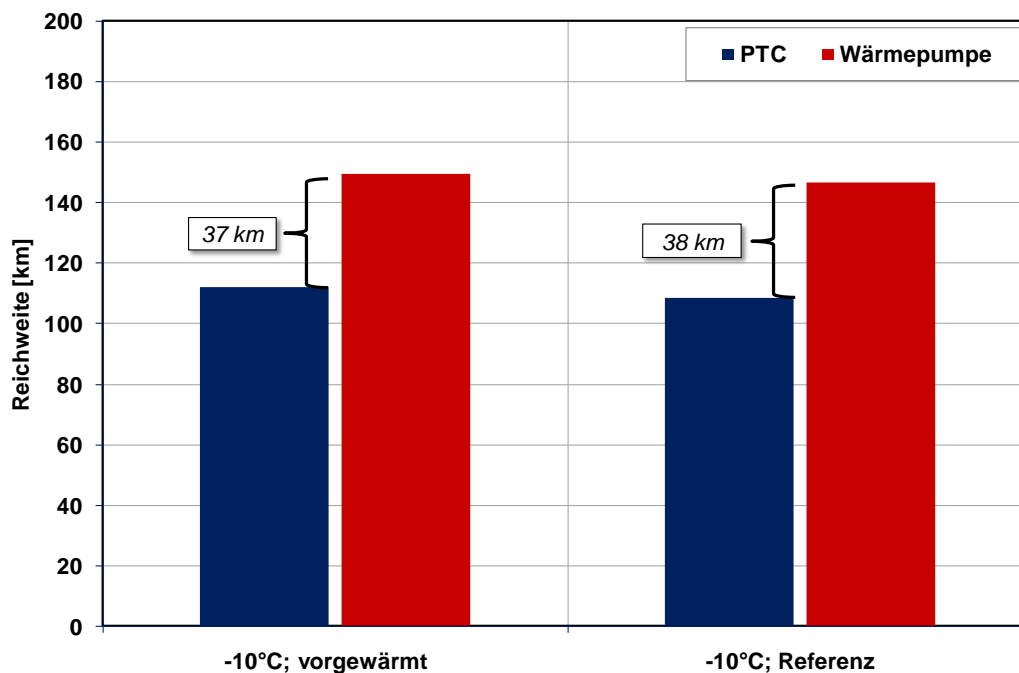


Abbildung 31: Reichweitenvorteil der Wärmepumpe gegenüber einem PTC-Zuheizer im Heizbetrieb für das vorgewärmte Fahrzeug sowie das Referenzfahrzeug bei einer Außentemperatur von -10°C und einer Strahlungsintensität von 100 W/m^2 , Golf-Klasse

Bei den diversen Herstellern und Zulieferern werden die verschiedensten Wärmepumpen-Verschaltungen diskutiert. Dabei wird das Hauptaugenmerk neben Leistungsfähigkeit und Wirkungsgrad auch auf den Funktionsumfang gelegt. Neben den reinen Heiz- oder Kühlfällen werden Misch-Szenarien betrachtet, die z.B. einen Heizbetrieb in Kombination mit der Entfeuchtung ermöglichen.

8.5 Karosserie-Isolierung

In diesem Unterkapitel wird der Reichweiteneinfluss einer verbesserten Karosserie-Isolierung und damit eines reduzierten Wärmestroms zwischen Karosserie und Umgebung untersucht. Es soll unterstellt werden, dass durch die Wahl geeigneter Materialien bzw. Materialstärken in Analogie zum Kühltransporter ein Wärmedurchgangskoeffizient von $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ für die Karosserie darstellbar ist, während das Fahrzeug mit Standard-Karosserie einem Wert von ca. $2,3 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ aufweist. Der genannte Zielwert könnte z.B. durch Einsatz von Vakuum-Isolationsmaterialien erreicht werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass dieses Isolationsmaterial nur eine geringe mechanische Belastbarkeit aufweist.

Tabelle 8.1 gibt einen Überblick über wichtige Kenngrößen gebräuchlicher Isolationswerkstoffe sowie Vergleichswerte für Standardwerkstoffe des Automobilbaus. Die Dichte gibt Auskunft über die etwaige Masse und lässt somit Rückschlüsse auf den daraus resultierenden Einfluss auf die Fahrwiderstände zu.

	Dichte [kg/m^3]	Wärmeleitfähigkeit [$\text{W}/(\text{K}\cdot\text{m})$]
Luft	1,18	0,026
Stahl	7850	55
Aluminium	2700	229
Glaswolle	120	0,66
Fensterglas	2480	0,8
Polyurethanplatte	30	0,025
Vakuumdämmplatte	150 ... 190	0,005
GFK	2000	0,2 ... 0,8
CFK	1550 ... 1800	17

Tabelle 8.1: Materialkenndaten gebräuchlicher Isolationswerkstoffe sowie von Standardwerkstoffen für den Automobilbau

Abbildung 32 zeigt die Temperatur der Luft im Fahrgastraum bei Fahrtantritt nach vorausgegangener sechsstündiger solarer Bestrahlung für beide betrachteten Varianten der Karosserieausführung. Zu erkennen ist, dass bei einem Fahrzeug mit verbesserter Isolierung die Lufttemperaturen merklich höher sind. Ursächlich hierfür ist der reduzierte Wärmestrom durch die Karosserie, der infolge der solar eingetragenen Wärme zu einer erhöhten Lufttemperatur führt.

In Abbildung 33 sind die erzielbaren Reichweiten unterschiedlicher Szenarien für die beiden Karosserieausführungen aufgetragen. Die verbesserte Karosserie-Isolierung bewirkt im Heizfall bei -10°C und einem bereits vorgewärmten Fahrzeug einen Reichweitengewinn von ca. 4 km. Mit steigenden Außentemperaturen sinkt der Reichweitenvorteil im Heizfall. Für den Kühlfall ergibt sich ein Reichweitenverlust von ca. 3 km bei einer Außentemperatur von 20°C für den Referenzfall. Dieser Reichweitenverlust ist zum einen der höheren Lufttemperatur im Fahrgastraum bei Fahrtantritt geschuldet, zum anderen dem verminderten Wärmestrom über die Karosserie an die Umgebung.

Angemerkt sei, dass in Heizfällen, bei denen die Komforttemperatur nicht erreicht wird, durch die verbesserte Karosserie-Isolierung eine geringfügige Anhebung der Lufttemperatur

im Fahrgastraum zu verzeichnen ist, während bei Kühlfällen mit nicht erreichter Komforttemperatur eine leicht erhöhte Lufttemperatur feststellbar ist.

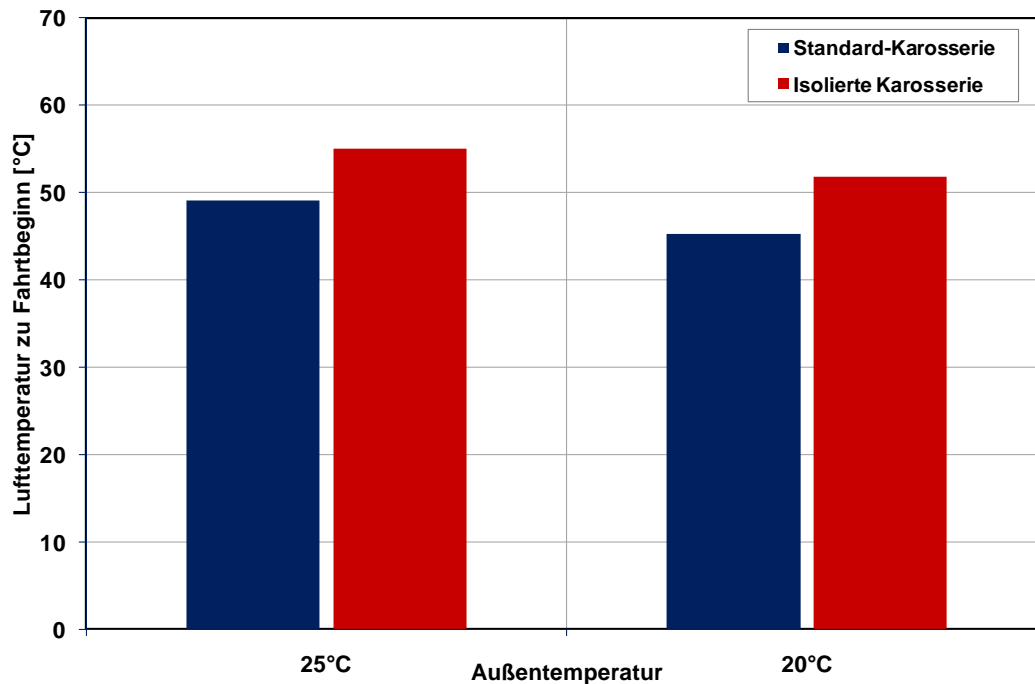


Abbildung 32: Lufttemperaturen im Fahrgastraum bei Fahrtantritt nach vorausgegangener sechsständiger solarer Bestrahlung mit einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m² für die Varianten Standard-Karosserie und isolierte Karosserie bei verschiedenen Außentemperaturen, Golf-Klasse

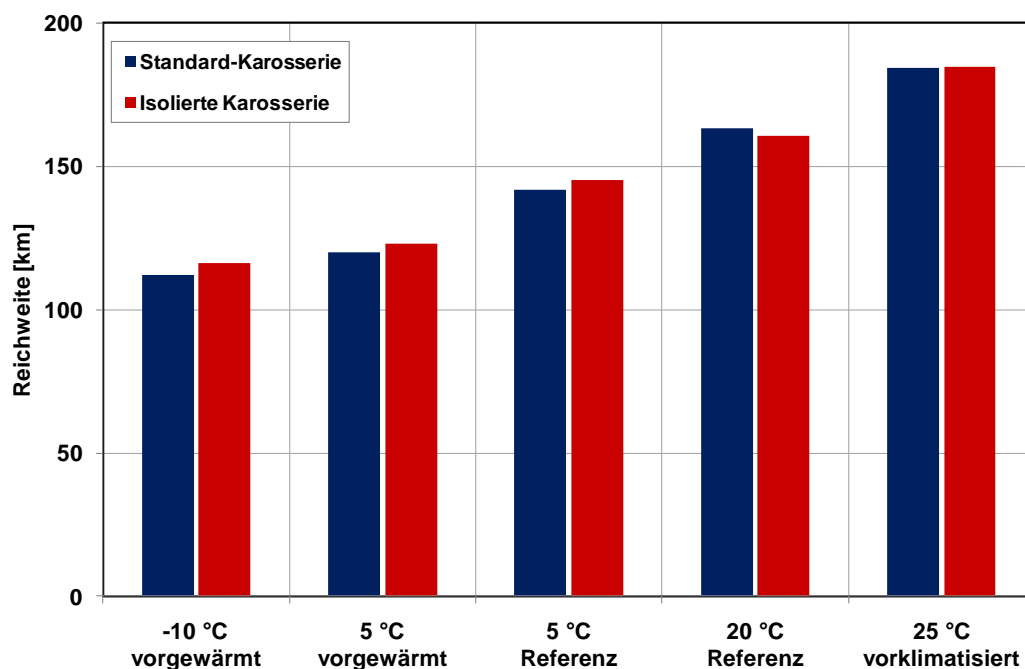


Abbildung 33: Reichweite für die Varianten Standard-Karosserie und isolierte Karosserie bei ausgewählten Heizfällen (Strahlungsintensität 100 W/m²) und Kühlfällen (Strahlungsintensität 1.000 W/m²), Golf-Klasse

8.6 Verschiebung

Durch die Wahl der Verschiebung kann die in den Fahrgastraum eingestrahlte Energiemenge und somit der Kühlbedarf beeinflusst werden. Exemplarisch wird an dieser Stelle untersucht, ob ein mit einer optimierten Verschiebung ausgestattetes Fahrzeug eine größere Reichweite als ein vergleichbares Fahrzeug mit Standardverschiebung erzielt. Die verwendeten Verschiebungsparameter wurden vom Arbeitskreis 5 der Forschungsvereinigung Automobiltechnik zur Verfügung gestellt.

Abbildung 34 zeigt die bei Fahrtantritt nach vorausgegangener sechsstündiger solarer Bestrahlung mit einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 erreichten Temperaturen der Luft sowie der Einbauten im Fahrgastraum für ein mit den beschriebenen Verschiebungsvarianten ausgestattetes Fahrzeug bei unterschiedlichen Außentemperaturen. In allen betrachteten Fällen lässt sich bei der optimierten Verschiebungsvariante eine merklich geringere Temperatur der Luft sowie der Einbauten feststellen. Die Temperaturen fallen um bis zu 5 K ab.

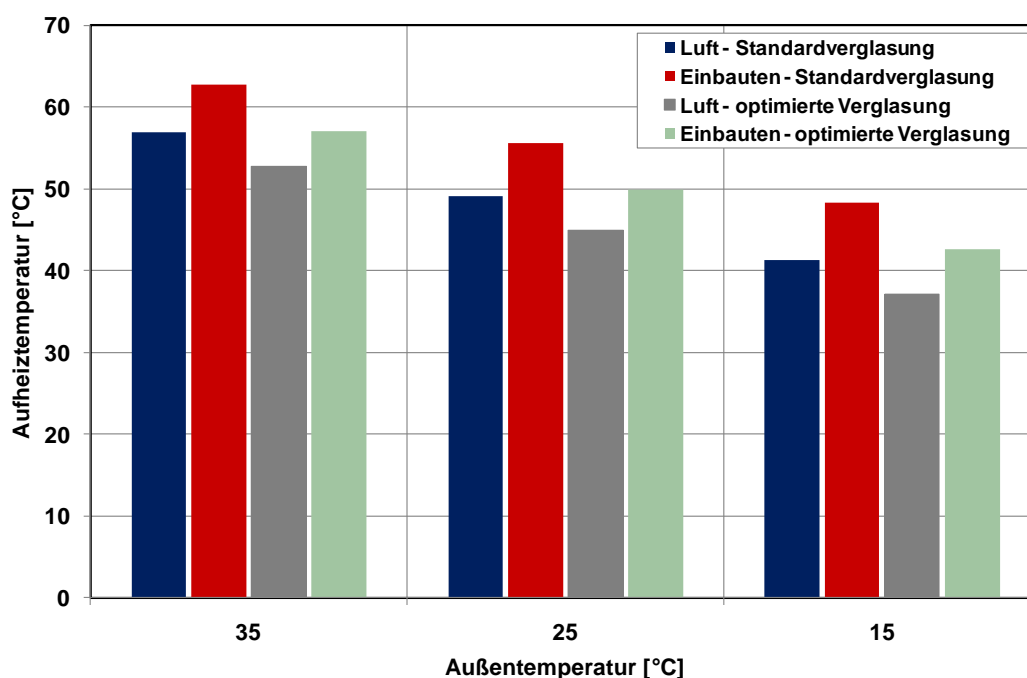


Abbildung 34: Abhängigkeit der Temperaturen von Luft und Einbauten im Fahrgastraum von der Außentemperatur, Temperaturwerte jeweils bei Fahrtantritt nach sechsstündiger solarer Bestrahlung mit einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 für ein Fahrzeug mit Standard- bzw. optimierter Verschiebung, Golf-Klasse

Wie Abbildung 35 zu entnehmen ist, stellt sich jedoch für die betrachteten Szenarien kein signifikanter Reichweitenvorteil ein. Für die Szenarien mit einer Außentemperatur größer 15°C wird beim Durchfahren des NEFZ die Komforttemperatur nicht erreicht, somit ist bei beiden Verschiebungsvarianten immer die maximale Kälteleistung bereitzustellen. Für das Szenario mit einer Außentemperatur von 15°C ergibt sich im Vergleich der beiden Verschiebungsvarianten ein Reichweitenvorteil von rund 1 km.

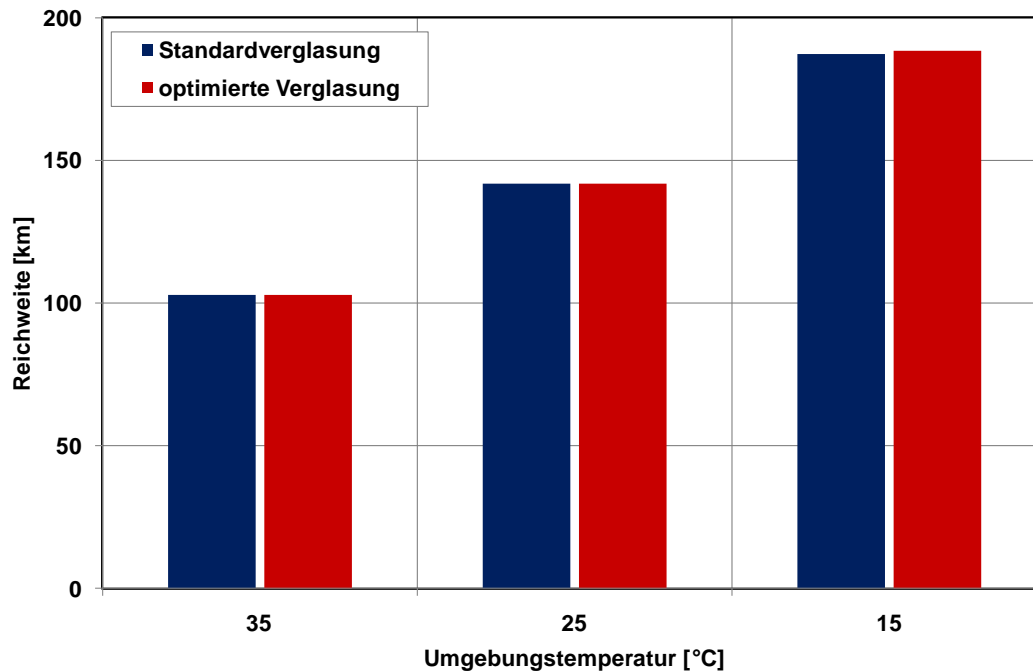


Abbildung 35: Abhängigkeit der Reichweite von der Außentemperatur im Kühlfall für Fahrzeuge mit Standard- und optimierter Verschiebung bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 , Golf-Klasse

8.7 Maßnahmenkombinationen

Nachdem in den Vorkapiteln die Einzelmaßnahmen getrennt für sich untersucht wurden, sollen an dieser Stelle abschließend exemplarische Kombinationen dieser Einzelmaßnahmen hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Reichweite vorgestellt werden.

Für den Heizfall wurde ein Maßnahmenpaket bestehend aus den Einzelmaßnahmen Vorwärmung des Fahrzeugs vor Fahrtantritt, Beheizung über eine Wärmepumpe, Teilumlufbetrieb mit 80% Umluftanteil und die Karosserie-Isolierung betrachtet. Dabei wurde für die durchgeführte Untersuchung das Gesamtmaßnahmenpaket schrittweise aus den Einzelmaßnahmen aufgebaut. Ausgehend vom Referenzfall wurde jeweils nach Hinzufügen einer weiteren Einzelmaßnahme die erzielbare Reichweite über das betrachtete Temperaturintervall ermittelt, um eine Aussage über den zusätzlichen Reichweitengewinn durch das Hinzufügen genau dieser Einzelmaßnahme zu generieren.

Abbildung 36 zeigt die Auswirkungen auf die Reichweite für die betrachtete Kombination von Einzelmaßnahmen im Heizfall. Durch das gewählte Maßnahmenpaket kann die Reichweite bei einer Außentemperatur von -20 °C von etwa 108 km im Referenzfall auf etwa 171 km erhöht werden. Im Vergleich zur Reichweite von 190 km bei reinem Fahrbetrieb ist somit eine beträchtliche Steigerung erreicht worden.

Wie bei der Betrachtung der Einzelmaßnahme bereits dargestellt, ist der positive Einfluss der Wärmepumpe auf die Reichweite über den gesamten Temperaturbereich zu erkennen. Hingewiesen sei an dieser Stelle nochmals darauf, dass nur ein sehr einfaches Modell zur Abbildung des Wärmepumpenbetriebs herangezogen wurde. Der Teilumlufbetrieb hat ebenfalls über den gesamten Temperaturbereich einen großen Einfluss auf die Reichweite. Allerdings ist hier einschränkend anzumerken, dass infolge des möglichen Scheibenbeschlags der Umluftanteil ggf. reduziert werden muss. Die Karosserie-Isolierung hat wie zu erwarten nur einen geringfügigen Einfluss auf die Reichweite.

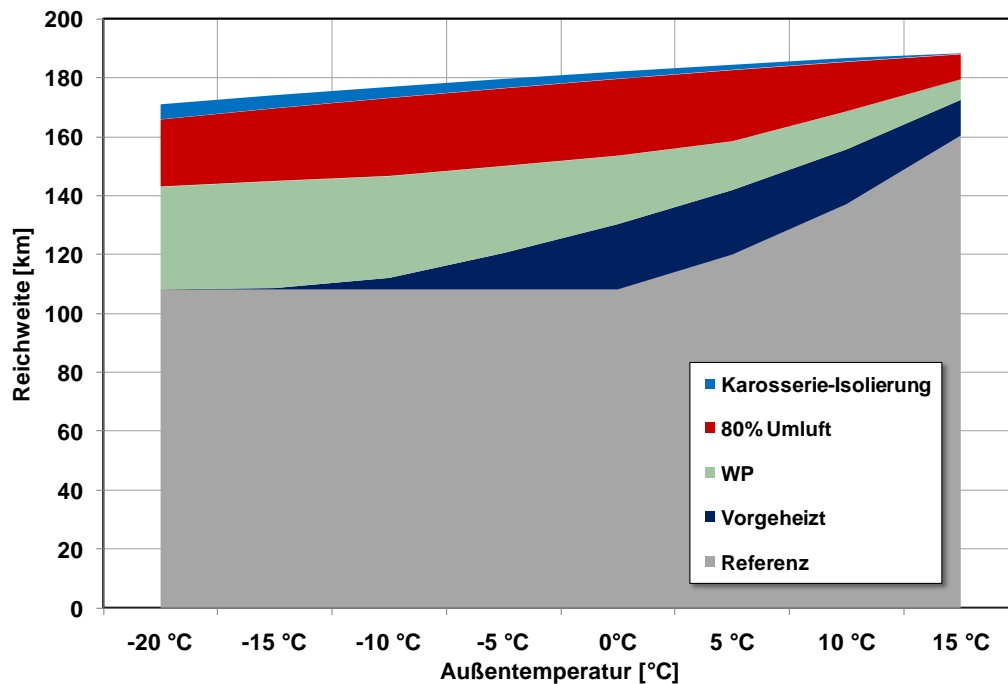


Abbildung 36: Einfluss von kombinierten und aufeinander aufbauenden Einzelmaßnahmen auf die Reichweite bei unterschiedlichen Außentemperaturen im Heizfall, Golf-Klasse. Bei der Interpretation ist die gegenseitige Beeinflussung der Maßnahmen zu berücksichtigen.

In Abbildung 37 sind in Analogie für den Kühlfall Auswirkungen auf die Reichweite für ein ähnliches Maßnahmenpaket dargestellt. Das betrachtete Maßnahmenpaket berücksichtigt die Vorklimatisierung des Fahrzeugs vor Fahrtantritt, einen Teilumlufbetrieb mit 80 % Umluftanteil sowie die Karosserie-Isolierung. Die Reichweite von 190 km bei reinem Fahrbetrieb ließe sich bis zu einer Außentemperatur von 25 °C erreichen. Auch bei einer Außentemperatur von 35 °C verringert sich die Reichweite nur auf 164 km, während im Referenzfall lediglich 103 km erzielt werden.

Durch die Kombination von einem hohen Umluftanteil und einer Vorklimatisierung wird somit eine signifikante Reichweitensteigerung erzielt. Der positive Effekt der Karosserie-Isolierung sowohl im Heiz- wie auch im Kühlfall tritt nur in Kombination mit der Vorwärmung bzw. Vorklimatisierung auf. Erfolgt diese Standmaßnahme nicht, wirkt die Karosserie-Isolierung unter Umständen reichweitenmindernd (vgl. Kapitel 8.5).

Hinsichtlich der Interpretation der dargestellten Diagramme für die Maßnahmenkombination soll exemplarisch die Reichweitensteigerung bei einer Außentemperatur von 35 °C in Abbildung 37 diskutiert werden. Gemäß Abbildung 37 scheint die Reichweitensteigerung nahezu ausschließlich durch den Teilumlufbetrieb bedingt zu sein. Wie jedoch den in Abbildung 28 dargestellten Reichweiten zu entnehmen ist, führt die Einzelmaßnahme Teilumlufbetrieb mit 80 % Umluftanteil lediglich zu einer Reichweitensteigerung auf rund 125 km. Die in Abbildung 37 dargestellte Reichweite von etwa 160 km (ohne Berücksichtigung der Karosserie-Isolierung) ist somit erst durch die Kombination mit der Vorklimatisierung erzielbar.

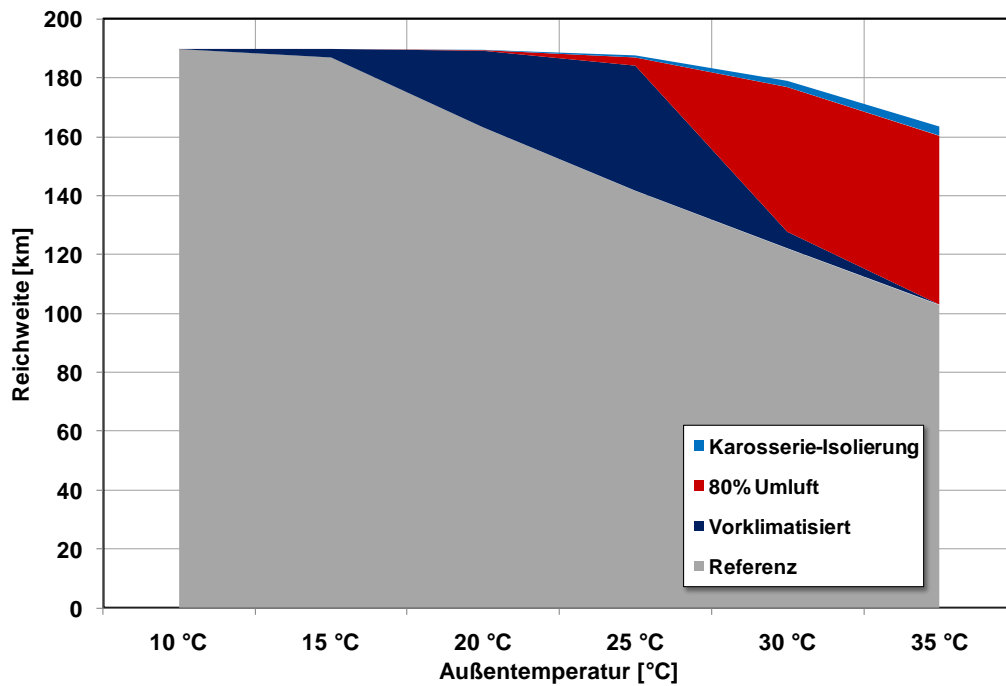


Abbildung 37: Einfluss von kombinierten und aufeinander aufbauenden Einzelmaßnahmen auf die Reichweite bei unterschiedlichen Außentemperaturen im Kühlfall, bei einer Strahlungsin- tensität von 1000 W/m^2 , Golf-Klasse. Bei der Interpretation ist die gegenseitige Beeinflussung der Maßnahmen zu berücksichtigen.

Kapitel 9

Vergleich der Ergebnisse von Golf- und Smart-Klasse

In den vorausgehenden Kapiteln wird ausschließlich die Golf-Klasse betrachtet, da die Untersuchungsergebnisse von Golf- und Smart-Klasse sehr große Ähnlichkeiten aufweisen. Die generierten grafischen Ergebnisdarstellungen für die Smart-Klasse sind dem Anhang zu entnehmen. An dieser Stelle werden etwaige Unterschiede zwischen den beiden Fahrzeugklassen erläutert.

In Abbildung 38 ist für beide Fahrzeugklassen der Energiebedarf für das Durchfahren eines NEFZ aufgetragen. Die Golf-Klasse weist demnach einen um ca. 35 % höheren Energiebedarf auf, der auf die deutlich höhere Gesamtfahrzeugmasse der Golf-Klasse gegenüber der Smart-Klasse zurückzuführen ist (siehe Tabelle 5.1).

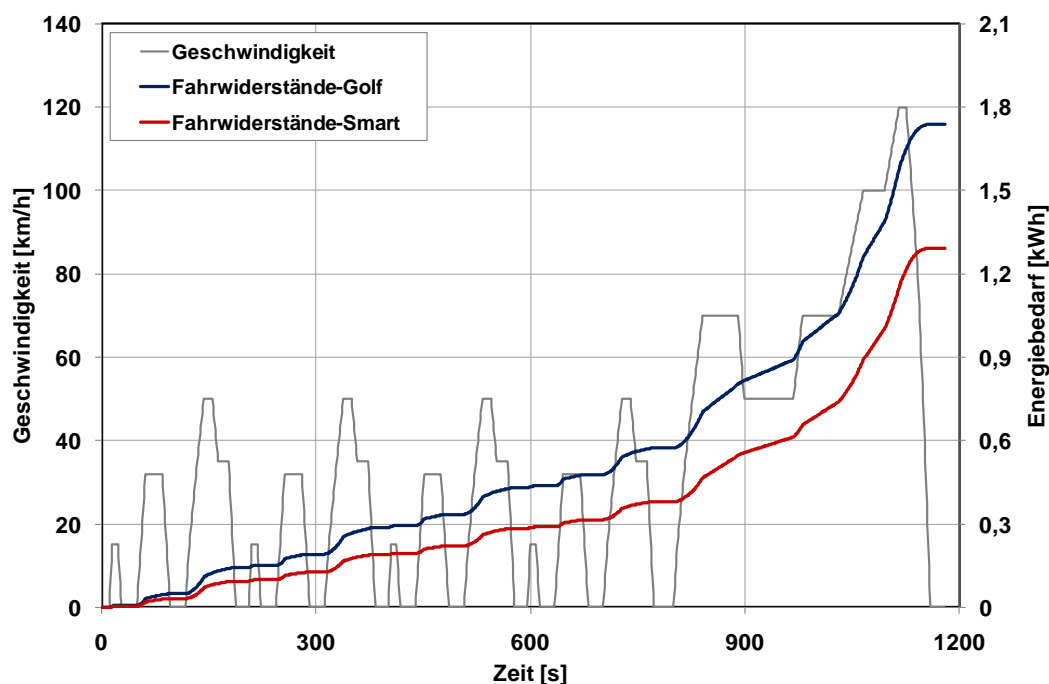


Abbildung 38: Energiebedarf zur Überwindung der Fahrwiderstände im NEFZ für die Golf- und Smart-Klasse

Die erhöhte Gesamtfahrzeugmasse der Golf-Klasse führt in Bezug auf die Rekuperation jedoch zu einem um etwa 60 % höheren Potenzial gegenüber der Smart-Klasse, siehe Abbildung 39. Bei Annahme eines gleichen Rekuperationsgrades für beide Fahrzeugklassen ließe

sich durch das Rekuperieren der energetische Mehrbedarf für die Golf-Klasse im Vergleich zur Smart-Klasse senken.

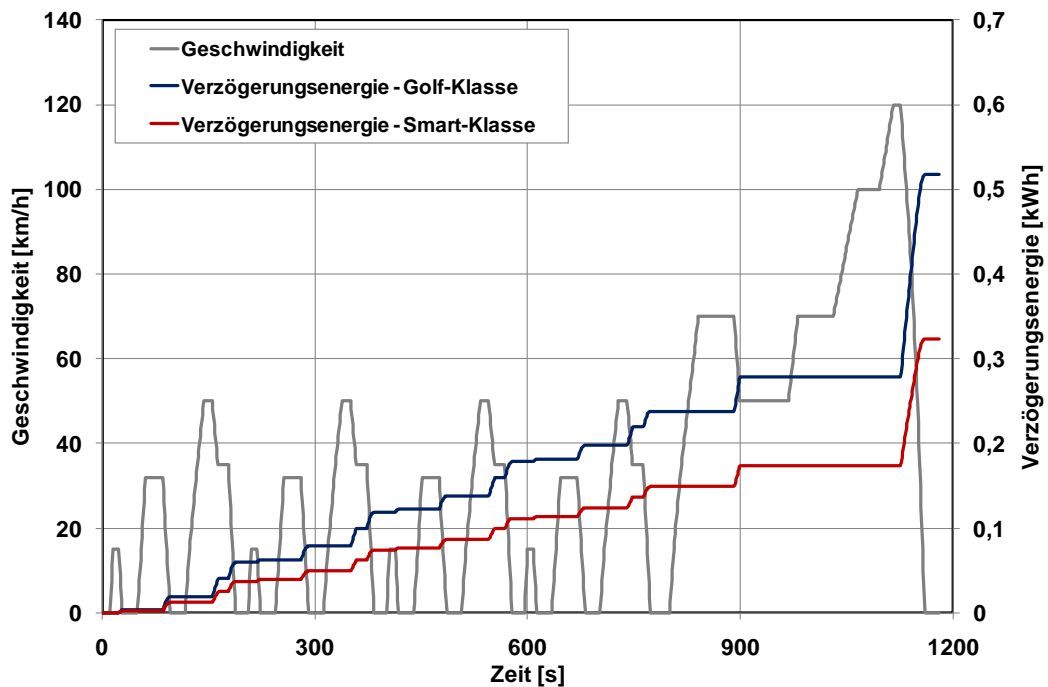


Abbildung 39: Rekuperationspotenzial im NEFZ für die Golf-Klasse und die Smart-Klasse

Einen Komfortvergleich zwischen Golf- und Smart-Klasse für den Kühlfall bei einer solaren Bestrahlungsintensität von 1.000 W/m^2 zeigt Abbildung 40. Dort sind die Aufheiztemperaturen für beide Fahrzeuge dargestellt. Die Aufheiztemperaturen sind für die Smart-Klasse etwas geringer, was zum größten Teil auf die kleineren und steiler angestellten Scheibenflächen zurückzuführen ist. Dadurch werden die Einbauten weniger stark erwärmt und geben entsprechend weniger Energie an die Kabinenluft ab.

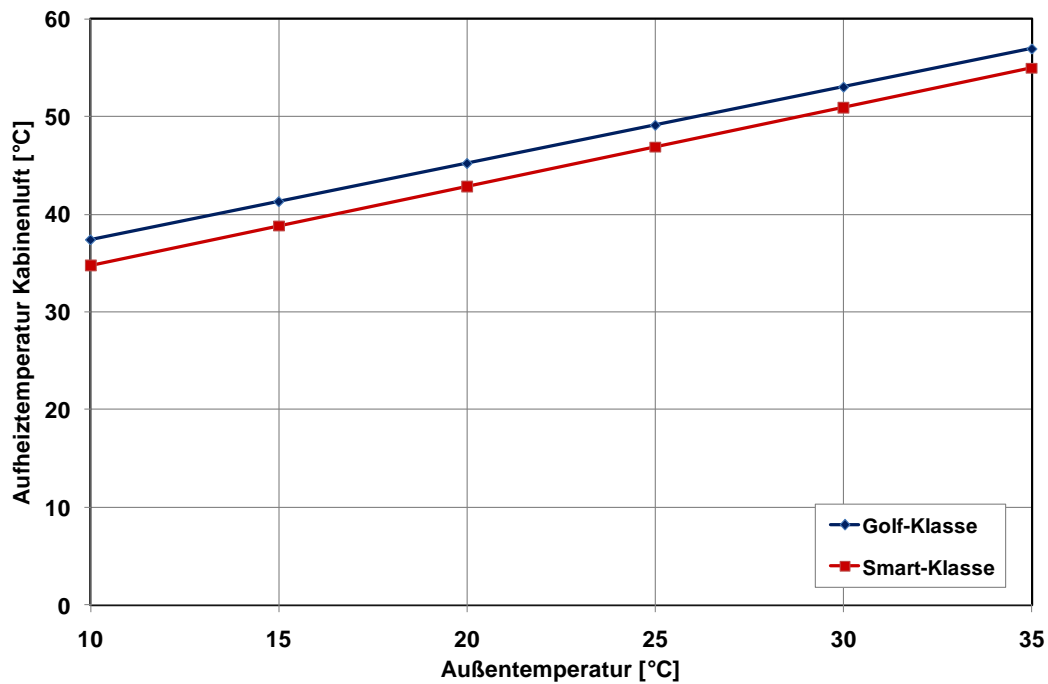


Abbildung 40: Lufttemperaturen im Fahrgastraum bei Fahrtantritt nach vorausgegangener sechsständiger solarer Bestrahlung mit einer Strahlungsintensität von 1.000W/m^2 für die Golf- und Smart-Klasse, Referenzfahrzeug

Abbildung 41 zeigt die Gesamtenergieverbräuche der Golf- und Smart-Klasse für das Referenzfahrzeug im Kühlfall. Das Plateau des Grundverbrauchs wird bei der Golf-Klasse bereits bei niedrigeren Außentemperaturen verlassen (bei Temperaturen größer $15\text{ }^\circ\text{C}$). Die größeren Scheibenflächen und deren flacherer Neigungswinkel sorgen bei der Golf-Klasse für eine höhere eingestrahelte Energie als bei der Smart-Klasse.

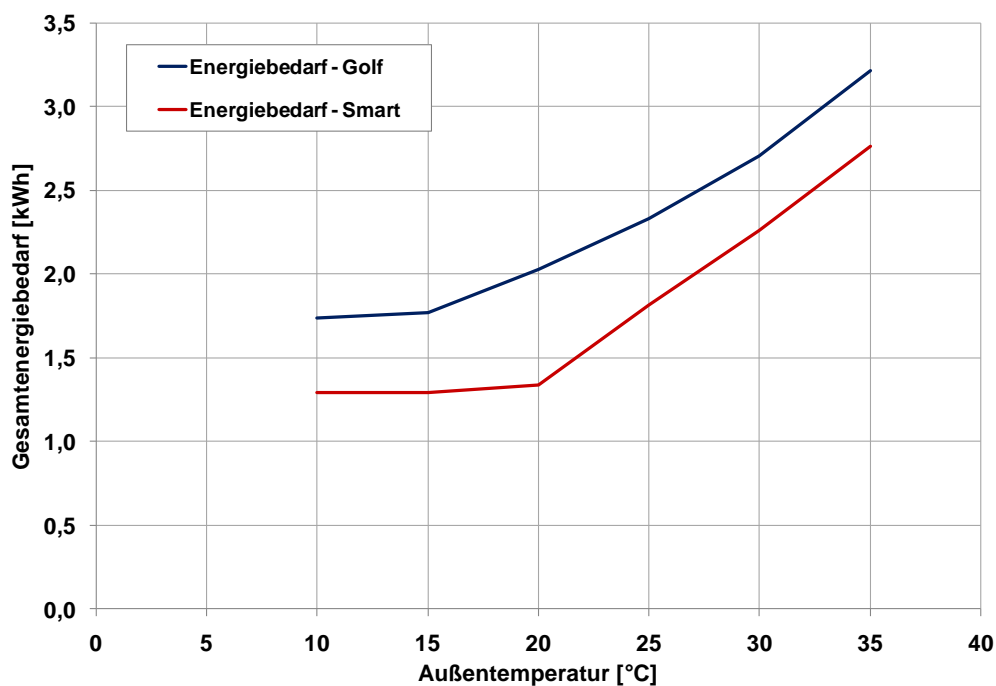


Abbildung 41: Energieverbrauch für die Golf- und Smart-Klasse im Kühlfall bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 , Referenzfahrzeug

In Abbildung 42 ist der Energiebedarf der Golf- und Smart-Klasse für das Referenzfahrzeug im Heizfall aufgetragen. Bei beiden Fahrzeugklassen ist ein Plateau zu erkennen, das durch die begrenzte maximale Heizleistung bei niedrigen Außentemperaturen zu begründen ist. Bei der Golf-Klasse wird dieses Plateau erst bei höheren Außentemperaturen verlassen als bei der Smart-Klasse. Ursächlich hierfür ist die größere thermische Masse der Einbauten.

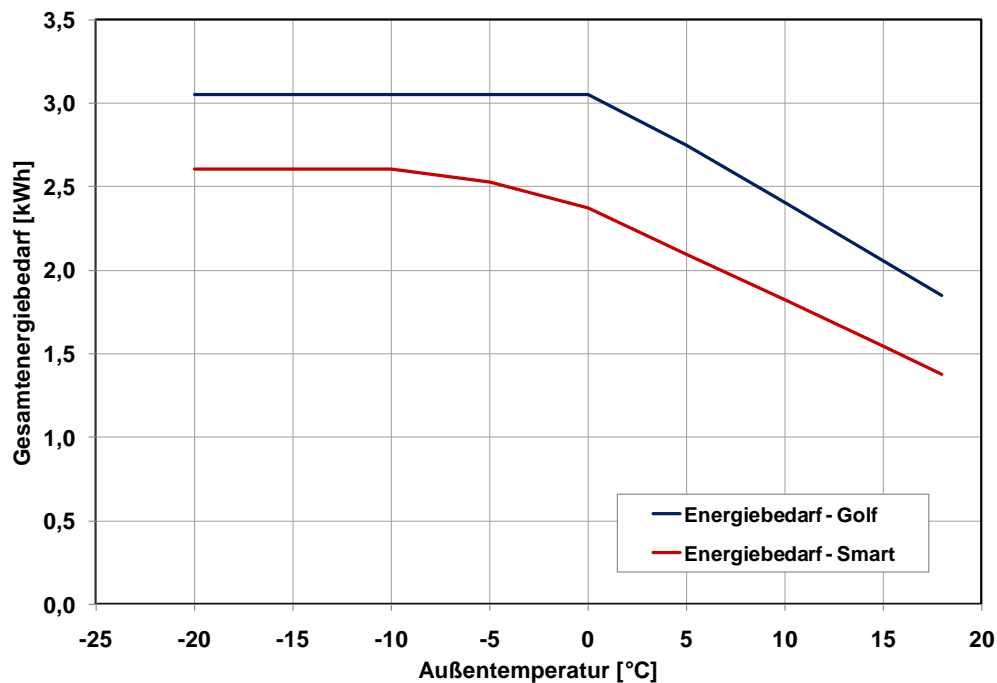


Abbildung 42: Energieverbrauch für die Golf- und Smart-Klasse im Heizfall, Referenzfahrzeug

Bei Betrachtung der Untersuchungsergebnisse für die Einzelmaßnahmen ist generell ein vergleichbares Verhalten bei beiden Fahrzeugklassen festzustellen.

Im Teil-Umluftbetrieb wird für gleiche Untersuchungsrandbedingungen bei der Smart-Klasse eine Lufttemperatur im Fahrgastraum erzielt, die näher an der Komforttemperatur heranreicht als bei der Golf-Klasse (vgl. Abbildung 43). Ursächlich hierfür ist der geringere Heiz- bzw. Klimatisierungsbedarf.

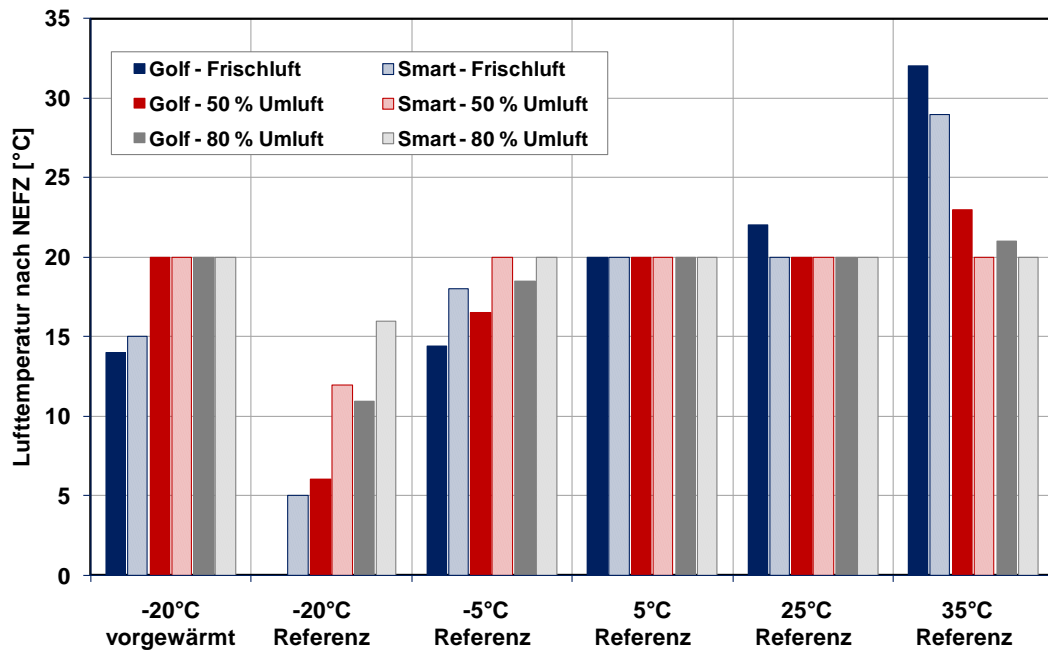


Abbildung 43: Lufttemperaturen im Fahrgastraum bei Fahrtende für ausgewählte Teil-Umluftszenerien für die Golf- und Smart-Klasse

Die Standmaßnahmen zeigen bei beiden Fahrzeugen ähnliche Einsparpotenziale. Das Einsparpotenzial im Kühlfall ist für die Golf-Klasse jedoch geringfügig höher, da der Klimatisierungsaufwand insgesamt etwas größer ist (vgl. Abbildung 44).

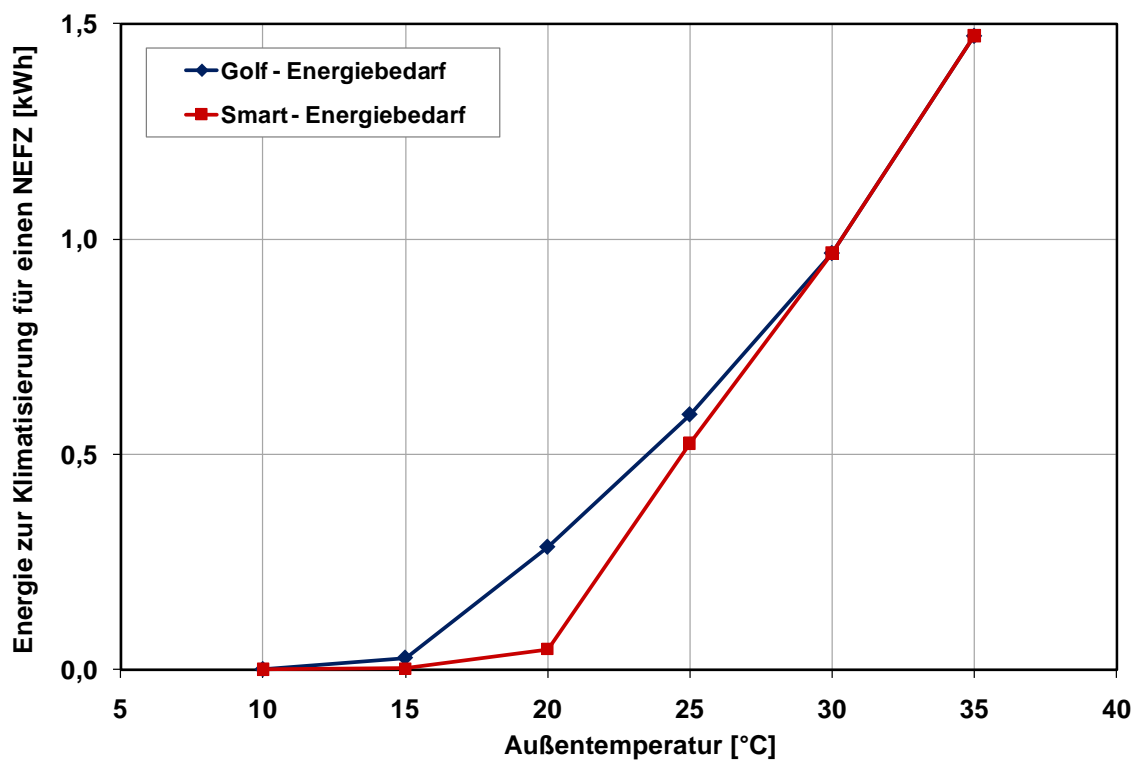


Abbildung 44: Gegenüberstellung der Klimatisierungsenergie für die Referenzkühlfälle der Golf- und Smart-Klasse bei unterschiedlichen Außentemperaturen und einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m²

Literaturverzeichnis

- [1] ABERSFELDER et al. inventors; MERCEDES-BENZ AG assignee. *Device for air-conditioning the passenger compartment and for cooling the drive system of electric vehicle*. US Patent 5,483,807. 1996 January 16.
- [2] AUSTRALIAN TRANSPORT ADVISORY COUNCIL: *ADR 15 - Australian Design Rule 15 for Demisting of Windscreens*. February 1984.
- [3] BAUMGART, R.: *Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs durch Optimierung von Pkw-Klimaanlagen*. Dissertation Technische Universität Chemnitz, Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2010
- [4] BETZ, K.; KOHLE, U.; EBERSPACH, G.: *Innenraumheizkonzepte für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben*. In: PKW-Klimatisierung VI, expertVerlag 2009.
- [5] BIENERT, R., JECKEL, A. Erfinder. DAIMLER AG Anmelder. *Verfahren und Vorrichtung zum Betrieb eines Fahrzeuges*. Offenlegungsschrift 10 2009 035 329.1. 2009 Februar 11.
- [6] BURKE, A. F.: *Dynamometer and Road Testing of Advanced Electric Vehicles and Projections of Future Range Capability*. In: Proceedings, The 12th International Electric Vehicle Symposium (EVS-12). Vol. 2, Sessions 3A-6D.
- [7] CERBE, G., WILHELMS, G.: *Technische Thermodynamik*. Hansa Verlag, München. 2008.
- [8] CHAN C.C.: *An Overview of Power Electronics in Electric Vehicles Capability*. In: Proceedings, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 44, NO. 1, Februar 1997.
- [9] DAVERGNE, J. inventor; VALEO THERMIQUE HABITACLE assignee. *Heating and cooling apparatus for an electric vehicle*. US Patent 5,280,852. 1994 Januar 25.
- [10] DIN 1946-3: *Raumlufttechnik – Teil 3: Klimatisierung von Personenkraftwagen und Lastkraftwagen*. 2006
- [11] DIN EN 1987: *Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Besondere Festlegungen für die Sicherheit*. März 1998.
- [12] ECHIGOYA, H., JINNAI, S. inventors; Honda Giken Kogyo Kabushiki Kaisha assignee. *Heat exchange system for electric vehicle*. US Patent 5,971,290. 1999 Oktober 26.
- [13] EGHTESSAD, M., KÜCÜKAY, F., KASSEL, T., DIETRICH, D.: *Customer-oriented Dimensioning of Electrified Drivetrains* VDI-Berichte 2081, VDI Verlag, Düsseldorf 2010
- [14] EN 13447: *Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Terminologie*. April 2001.
- [15] EN 1821-1: *Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Messverfahren für die Fahreigenschaften*. August 1998.

- [16] EN 1986-1: *Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Messverfahren für die Energieausnutzung*. Juli 1997.
- [17] 78/317/EWG: *Entfrostsungs- und Trocknungsanlagen für die verglasten Flächen von Kraftfahrzeugen*. 1977.
- [18] 672/2010/EG: *Verordnung der Kommission über die Typgenehmigung von Entfrostsungs- und Trocknungsanlagen bestimmter Kraftfahrzeuge*. 2010 Juli 27.
- [19] FARRINGTON, R.; RUGH, J.: *Impact of Vehicle Air-Conditioning on Fuel Economy, Tailpipe Emissions, and Electric Vehicle Range*. In: Earth Technologies Forum Washington (2000), NREL/CP-540-28960.
- [20] FAT SCHRIFTENREIHE 224: *Klimatische Daten und Pkw-Nutzung – Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte/Heizanlagen in Europa, USA, China und Indien*. Frankfurt am Main, 2009.
- [21] FMVSS 103: *Laboratory test procedures for windshield defrosting and defogging systems*. Safety Assurance Office of Vehicle Safety Compliance. 1996.
- [22] FRAUNHOFER GESELLSCHAFT: *Scheibe mit Alleskönner-Schicht*. Presseveröffentlichung 28. September 2010. www.fraunhofer.de.
- [23] FUKUMOTO, M., YOSHIDA, N. inventors; Matsushita Electric Industrial Co. assignee; *Heat pump cooling-heating-dehumidifying system for electric vehicle*. US Patent 5,709,102. 1998 January 20.
- [24] GROBMANN, H.: *Pkw-Klimatisierung – Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2010
- [25] HOTTA, Y., TAJIRI, A. inventors; HONDA GIKEN KOGYO KABUSHIKI KAISHA, assignee. *Air conditioning system with reduced energy consumption during defrosting for an electric vehicle*. US Patent 5,325,912. 1994 July 05.
- [26] HOTTA, Y., TAJIRI, A. inventors; HONDA GIKEN KOGYO KABUSHIKI KAISHA, assignee. *Air conditioning system suitable for an electric vehicle*. US Patent US 5,330,385. 1994 June 19.
- [27] HUCHO, W. H.: *Aerodynamik des Automobils*. Vieweg Verlag, Wiesbaden. 2005.
- [28] KELZ, M., ODEBRECHT, W., inventors; MERCEDES BENZ AG assignee; *Device for heating an interior of an electric vehicle*. US Patent 5,647,534. 1997 July 15.
- [29] KÜÇÜKAY, F.: *Rechnerunterstützte Getriebedimensionierung mit repräsentativen Lastkollektiven*, ATZ, 92. Jahrgang, Nr. 6, Vieweg Verlag, 1990
- [30] LAKE, B. J. et al. inventors; DAIMLERCHRYSLER CORPORATION assignee. *Reversible air conditioning and heat pump HVAC system for electric vehicles*. US Patent 6,082,128. 2000 July 04.
- [31] LARMINIE, J; LOWRY, J.: *ELECTRIC VEHICLE TECHNOLOGY EXPLAINED*, Springer Heidelberg, ISBN- 978-3-642-05494-5.
- [32] LIENKAMP, S., FONTAINE, R. inventors. FRASER CLEMENS MARTIN & MILLER LLC assignee. *Apparatus for optimized execution of heating tasks in fuel cell vehicles*. US patent Application US 2009/0236436 A1. 2009 September 24.
- [33] NEMESH, M. D. et al. inventors. GM GLOBAL TECHNOLOGY OPERATIONS, INC. assignee. *Vehicle HVAC and RESS thermal management*. US Patent Application US 2010/0012295 A1. 2010 January 21.

- [34] RECKNAGEL, H., HÖNMANN, W., SPRENGER, E: *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. Oldenbourg-Verlag, München. 1985.
- [35] SERKH, A. et al. inventors. THE GATES CORPORATION assignee. *Vehicle stop/start system with regenerative braking*. US Patent 7,552,705 B2. 2009 June 30.
- [36] SHIMIZU, S., HARA, H. ET AL: *Analyses on air-conditioning heat load of passenger vehicle*. In JSAE Review, Nov. 1982.
- [37] SONDERMANN, M. HAUSSMANN, R.; URBAN, R.: *Batterieklimatisierung: Anforderungsidentifikation, Systemdiskussion und Lösungsmöglichkeiten*. In: PKW-Klimatisierung VI, expert Verlag 2009.
- [38] TAGUCHI, T. inventor. Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha assignee. *Vehicle charging system, vehicle charging device and electric vehicle*. UA Patent Application US 2009/0256523 A1. 2009 October 15.
- [39] TANAKA, M., IRITANI, K. inventors. Denso Corporation assignee. *Electric vehicle air conditioner system and method for effecting defrosting operation before battery charging operation*. US Patent 6,178,760. 2001 January 30.
- [40] TILMEDIA: *Stoffdatenberechnung für feuchte Luft*. TLK-Thermo GmbH, Braunschweig.
- [41] VEMPATY MURTY, B. inventor; GENERAL MOTORS CORPORATION assignee. *High voltage bus and auxiliary heater control system for an electric or hybrid vehicle*. US Patent 6,040,561, 2000 March 21.
- [42] VIEGAS, H. H., MOHNS, W. F. Erfinder. THERMO KING CORP. Anmelder. *Kühlsystem mit einem Trockenmittel*. Offenlegungsschrift DE 10 2008 038 344.9. 2008 August 19.
- [43] ZHOU, P. inventor. TESLA MOTORS, INC. assignee. *Electric vehicle thermal management system*. WO 2008/127527 A1. 2008 October 23.
- [44] VDI 6032: *Hygiene-Anforderungen an die Lüftungstechnik in Fahrzeugen zur Personenbeförderung*. Februar 2004.
- [45] VDI 2078: *Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln)*. 1996.
- [46] Verein Deutscher Ingenieure; VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen: *VDI-Wärmeatlas*. 10. Auflage. Springer-Verlag, 2006.
- [47] 11. Karlsruher Kfz-Klima-Symposium: *Klimatisierung bei elektrischer Mobilität*. Tagungsband. Karlsruhe, 16. September 2010.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anzustrebende mittlere Lufttemperatur zur Aufrechterhaltung des Komforts im Fahrgastraum in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur	11
Abbildung 2:	Geschwindigkeitsprofil des NEFZ	15
Abbildung 3:	Berücksichtigte Wärmeströme sowie Bilanzräume des Fahrgastraummodells	18
Abbildung 4:	COP der zugrunde gelegten Kälteanlage in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur	24
Abbildung 5:	Bauteiltemperaturverläufe für eine sechsstündige Vorkonditionierung bei einer Außentemperatur von 20 °C und einer Bestrahlungsstärke von 700 W/m ² , Golf-Klasse	26
Abbildung 6:	Energiemenge zum Fahrzeugantrieb sowie maximal rekuperierbare Energiemenge für ein nicht klimatisiertes Fahrzeug der Golf-Klasse	29
Abbildung 7:	Der 3F-Parameterraum für den Antriebsstrang	31
Abbildung 8:	Häufigkeitsverteilung der Fahrzeuggeschwindigkeiten für die betrachteten Fahrzeugklassen	32
Abbildung 9:	Durchschnittliche Beschleunigung und Verzögerung für die betrachteten Fahrzeugklassen	33
Abbildung 10:	Energiebedarf des Fahrzeugs	34
Abbildung 11:	Weganteile der Golf-Klasse im Momenten-Drehzahl-Kennfeld der E-Maschine für den NEFZ (oben), den durchschnittlichen Stadtfahrer (links) und den durchschnittlichen Autobahnfahrer (rechts)	35
Abbildung 12:	Weganteile der Smart-Klasse im Momenten-Drehzahl-Kennfeld der E-Maschine für den NEFZ (oben), den durchschnittlichen Stadtfahrer (links) und den durchschnittlichen Autobahnfahrer (rechts)	36
Abbildung 13:	Lufttemperaturen im Fahrgastraum in Abhängigkeit von Außentemperatur und Strahlungsintensität zu Beginn der Zyklusfahrt, Golf-Klasse	37
Abbildung 14:	Einfluss der Außentemperatur auf Energieverbrauch und Reichweite im Kühlbetrieb bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m ² , Golf-Klasse	38
Abbildung 15:	Einfluss der Außentemperatur auf Energieverbrauch und Lufttemperatur im Kühlbetrieb bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m ² , Golf-Klasse	39
Abbildung 16:	Einfluss der Außentemperatur auf Energieverbrauch und Reichweite im Heizbetrieb bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m ² , Golf-Klasse	39

Abbildung 17: Einfluss der Außentemperatur auf Energieverbrauch und Lufttemperatur bei Fahrtende im Heizbetrieb bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m ² , Golf-Klasse.....	40
Abbildung 18: Einfluss der Außentemperatur auf den Energieverbrauch im Heizbetrieb für das vorgewärmte Fahrzeug und das Referenzfahrzeug bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m ² , Golf-Klasse	42
Abbildung 19: Einfluss der Außentemperatur auf die Reichweite im Heizbetrieb für das vorgewärmte Fahrzeug und das Referenzfahrzeug bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m ² , Golf-Klasse.....	43
Abbildung 20: Einfluss der Außentemperatur auf die Lufttemperatur im Fahrgastraum bei Fahrtende im Heizbetrieb für das vorgewärmte Fahrzeug und das Referenzfahrzeug bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m ² , Golf-Klasse	43
Abbildung 21: Lufttemperatur sowie Temperaturen für Dach und Einbauten bei Fahrtantritt für die untersuchten Standmaßnahmen bei einer Außentemperatur von 35 °C und einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m ² , Golf-Klasse	44
Abbildung 22: Einfluss der Außentemperatur auf den Energieverbrauch während des Kühlbetriebs bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m ² für die untersuchten Standmaßnahmen, Golf-Klasse.....	45
Abbildung 23: Einfluss der Außentemperatur auf die Reichweite während des Kühlbetriebs bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m ² für die untersuchten Standmaßnahmen, Golf-Klasse	46
Abbildung 24: Einfluss der Außentemperatur auf die Lufttemperatur im Fahrgastraum bei Fahrtende während des Kühlbetriebs bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m ² für die untersuchten Standmaßnahmen, Golf-Klasse.....	47
Abbildung 25: Abhängigkeit der Temperaturen von Dach, Einbauten und Luft im Fahrgastraum bei Fahrtantritt nach vorausgegangener sechsständiger solarer Bestrahlung mit einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m ² für unterschiedliche thermischen Massen bei einer Außentemperatur von 25 °C, Golf-Klasse.....	48
Abbildung 26: Energieverbrauch für die Durchfahrt eines NEFZ bei ausgewählten Szenarien in Abhängigkeit von der thermischen Masse, Golf-Klasse....	49
Abbildung 27: Energieverbrauch für verschiedene Heizfälle (Strahlungsintensität 100 W/m ²) und Kühlfälle (Strahlungsintensität 1.000 W/m ²) im Frischluftbetrieb sowie bei Teilumlufbetrieb mit 50 % bzw. 80 % Umluftanteil, Golf-Klasse	51
Abbildung 28: Reichweite für verschiedene Heizfälle (Strahlungsintensität 100 W/m ²) und Kühlfälle (Strahlungsintensität 1.000 W/m ²) im Frischluftbetrieb sowie bei Teilumlufbetrieb mit 50 % bzw. 80 % Umluftanteil, Golf-Klasse	51
Abbildung 29: Lufttemperaturen im Fahrgastraum nach Fahrtende für verschiedene Heizfälle (Strahlungsintensität 100 W/m ²) und Kühlfälle (Strahlungsintensität 1.000 W/m ²) im Frischluftbetrieb sowie bei Teilumlufbetrieb mit 50 % bzw. 80 % Umluftanteil, Golf-Klasse	52
Abbildung 30: Frontscheiben- und Taupunkttemperaturen bei Frischluftbetrieb sowie bei Teilumlufbetrieb mit 50 % und mit 80 % Umluftanteil bei einer Außentemperatur von -20 °C, Golf-Klasse	53

Abbildung 31: Reichweitenvorteil der Wärmepumpe gegenüber einem PTC-Zuheizer im Heizbetrieb für das vorgewärmte Fahrzeug sowie das Referenzfahrzeug bei einer Außentemperatur von -10°C und einer Strahlungsintensität von 100 W/m^2 , Golf-Klasse.....	54
Abbildung 32: Lufttemperaturen im Fahrgastraum bei Fahrtantritt nach vorausgegangener sechsständiger solarer Bestrahlung mit einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 für die Varianten Standard-Karosserie und isolierte Karosserie bei verschiedenen Außentemperaturen, Golf-Klasse.....	56
Abbildung 33: Reichweite für die Varianten Standard-Karosserie und isolierte Karosserie bei ausgewählten Heizfällen (Strahlungsintensität 100 W/m^2) und Kühlfällen (Strahlungsintensität 1.000 W/m^2), Golf-Klasse	56
Abbildung 34: Abhängigkeit der Temperaturen von Luft und Einbauten im Fahrgastraum von der Außentemperatur, Temperaturwerte jeweils bei Fahrtantritt nach sechsständiger solarer Bestrahlung mit einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 für ein Fahrzeug mit Standard- bzw. optimierter Verschleibung, Golf-Klasse.....	57
Abbildung 35: Abhängigkeit der Reichweite von der Außentemperatur im Kühlfall für Fahrzeuge mit Standard- und optimierter Verschleibung bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 , Golf-Klasse.....	58
Abbildung 36: Einfluss von kombinierten und aufeinander aufbauenden Einzelmaßnahmen auf die Reichweite bei unterschiedlichen Außentemperaturen im Heizfall, Golf-Klasse. Bei der Interpretation ist die gegenseitige Beeinflussung der Maßnahmen zu berücksichtigen.....	59
Abbildung 37: Einfluss von kombinierten und aufeinander aufbauenden Einzelmaßnahmen auf die Reichweite bei unterschiedlichen Außentemperaturen im Kühlfall, bei einer Strahlungsintensität von 1000 W/m^2 , Golf-Klasse. Bei der Interpretation ist die gegenseitige Beeinflussung der Maßnahmen zu berücksichtigen.....	60
Abbildung 38: Energiebedarf zur Überwindung der Fahrwiderstände im NEFZ für die Golf- und Smart-Klasse.....	61
Abbildung 39: Rekuperationspotenzial im NEFZ für die Golf-Klasse und die Smart-Klasse	62
Abbildung 40: Lufttemperaturen im Fahrgastraum bei Fahrtantritt nach vorausgegangener sechsständiger solarer Bestrahlung mit einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 für die Golf- und Smart-Klasse, Referenzfahrzeug	63
Abbildung 41: Energieverbrauch für die Golf- und Smart-Klasse im Kühlfall bei einer solaren Bestrahlungsstärke von 1.000 W/m^2 , Referenzfahrzeug ...	63
Abbildung 42: Energieverbrauch für die Golf- und Smart-Klasse im Heizfall, Referenzfahrzeug	64
Abbildung 43: Lufttemperaturen in der Fahrgastkabine nach Fahrtende für die Golf- und Smart-Klasse bei unterschiedlichen Umluftszszenarien. Komforttemperatur 20°C	65
Abbildung 44: Gegenüberstellung der Klimatisierungsenergie für Referenzkühlfälle Golf-/ Smart-Klasse.....	65
Abbildung 45: Äußerer Wärmeübergangskoeffizient für Front-, Heck- und Seitenscheibe in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit.....	75

Abbildung 46: Innerer Wärmeübergangskoeffizient der Front-, Heck- und Seitenscheibe in Abhängigkeit vom Belüftungsvolumenstrom des Fahrgastraums	75
Abbildung 47: Lufttemperaturen im Fahrgastraum in Abhängigkeit von Außentemperatur und Strahlungsintensität am Ende der Vorkonditionierungsphase, Smart-Klasse	77
Abbildung 48: Einfluss der Außentemperatur auf Energieverbrauch und Reichweite im Kühlbetrieb bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m ² , Smart-Klasse	78
Abbildung 49: Einfluss der Außentemperatur auf Energieverbrauch und Lufttemperatur im Kühlbetrieb bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m ² , Smart-Klasse	78
Abbildung 50: Einfluss der Außentemperatur auf Energieverbrauch und Reichweite im Heizbetrieb bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m ² , Smart-Klasse	79
Abbildung 51: Einfluss der Außentemperatur auf Energieverbrauch und Lufttemperatur im Heizbetrieb bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m ² , Smart-Klasse	79
Abbildung 52: Einfluss der Außentemperatur auf den Energieverbrauch im Heizbetrieb für das vorgewärmte Fahrzeug und das Referenzfahrzeug bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m ² , Smart-Klasse	80
Abbildung 53: Einfluss der Außentemperatur auf die Reichweite im Heizbetrieb für das vorgewärmte Fahrzeug und das Referenzfahrzeug bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m ² , Smart-Klasse	80
Abbildung 54: Einfluss der Außentemperatur auf die Lufttemperatur im Fahrgastraum bei Fahrtende im Heizbetrieb für das vorgewärmte Fahrzeug und das Referenzfahrzeug bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m ² , Smart-Klasse	81
Abbildung 55: Lufttemperatur sowie Temperaturen für Dach und Einbauten bei Fahrtantritt für die untersuchten Standmaßnahmen bei einer Außentemperatur von 35 °C und einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m ² , Smart-Klasse	82
Abbildung 56: Vergleich der Energieverbräuche und Lufttemperaturen nach einem NEFZ für das Fahrzeug mit beschatteter Frontscheibe im Vergleich zum Referenzfall, Smart-Klasse.....	82
Abbildung 57: Vergleich der Energieverbräuche und Lufttemperaturen nach einem NEFZ für das beschattete und durchlüftete Fahrzeug im Vergleich zum Referenzfall, Smart-Klasse.....	83
Abbildung 58: Vergleich der Energieverbräuche und Lufttemperaturen nach einem NEFZ für das vorklimatisierte Fahrzeug im Vergleich zum Referenzfahrzeug, Smart-Klasse.....	83
Abbildung 59: Einfluss der Außentemperatur auf die Reichweite während des Kühlbetriebs bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m ² für die untersuchten Standmaßnahmen, Smart-Klasse	84
Abbildung 60: Abhängigkeit der Temperaturen von Dach, Einbauten und Luft im Fahrgastraum bei Fahrtantritt nach vorausgegangener sechsstündiger solarer Bestrahlung mit einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m ² für unterschiedliche thermischen Massen bei einer Außentemperatur von 25 °C, Smart-Klasse.....	84

Abbildung 61: Energieverbrauch für die Durchfahrt eines NEFZ bei ausgewählten Szenarien in Abhängigkeit von der thermischen Masse, Smart-Klasse	85
Abbildung 62: Energieverbrauch für verschiedene Heizfälle (Strahlungsintensität 100 W/m ²) und Kühlfälle (Strahlungsintensität von 1.000 W/m ²) im Frischluftbetrieb sowie bei Teilumlufbetrieb mit 50 % bzw. 80 % Umluftanteil, Smart-Klasse	85
Abbildung 63: Reichweite für verschiedene Heizfälle (Strahlungsintensität 100 W/m ²) und Kühlfälle (Strahlungsintensität 1.000 W/m ²) im Frischluftbetrieb sowie bei Teilumlufbetrieb mit 50 % bzw. 80 % Umluftanteil, Smart Klasse	86
Abbildung 64: Lufttemperaturen im Fahrgastraum nach Fahrtende für verschiedene Heizfälle (Strahlungsintensität 100 W/m ²) und Kühlfälle (Strahlungsintensität von 1.000 W/m ²) im Frischluftbetrieb sowie bei Teilumlufbetrieb mit 50 % bzw. 80 % Umluftanteil, Smart-Klasse	86
Abbildung 65: Reichweitevorteil der Wärmepumpe gegenüber einem PTC-Zuheizer im Heizbetrieb für das vorgewärmte Fahrzeug sowie das Referenzfahrzeug bei einer Außentemperatur von -10 °C und einer Strahlungsintensität von 100 W/m ² , Smart-Klasse	87
Abbildung 66: Lufttemperaturen im Fahrgastraum bei Fahrtantritt nach vorausgegangener sechsständiger solarer Bestrahlung mit einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m ² für die Varianten Standard-Karosserie und isolierte Karosserie bei verschiedenen Außentemperaturen, Smart-Klasse	87
Abbildung 67: Reichweite für die Varianten Standard-Karosserie und isolierte Karosserie bei ausgewählten Heizfällen (Strahlungsintensität 100 W/m ²) und Kühlfällen (Strahlungsintensität 1.000 W/m ²), Smart-Klasse	88
Abbildung 68: Abhängigkeit der Temperaturen von Luft und Einbauten im Fahrgastraum von der Außentemperatur, Temperaturwerte jeweils bei Fahrtantritt nach sechsständiger solarer Bestrahlung mit einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m ² für ein Fahrzeug mit Standard- bzw. optimierter Verschreibung, Smart-Klasse	88
Abbildung 69: Abhängigkeit der Reichweite von der Außentemperatur im Kühlfall für Fahrzeuge mit Standard- und optimierter Verschreibung bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m ² , Smart-Klasse	89
Abbildung 70: Einfluss von kombinierten und aufeinander aufbauenden Einzelmaßnahmen auf die Reichweite bei unterschiedlichen Außentemperaturen im Heizfall, Smart-Klasse. Bei der Interpretation ist die gegenseitige Beeinflussung der Maßnahmen zu berücksichtigen	89
Abbildung 71: Einfluss von kombinierten und aufeinander aufbauenden Einzelmaßnahmen auf die Reichweite bei unterschiedlichen Außentemperaturen im Kühlfall, bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m ² , Smart-Klasse. Bei der Interpretation ist die gegenseitige Beeinflussung der Maßnahmen zu berücksichtigen	90

Anhang

A Modellierung des Fahrgastraums

A.1 Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten

Der Wärmeübergangskoeffizient von Dach und seitlicher Karosserie wird abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit angenommen und berechnet sich nach [36] mit einem Minimalwert von $25 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ (vgl. Seite 55 Kap. 8.5) zu

$$\alpha_{\text{Dach,au\ss en}} = \max \left\{ 25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}; 4,41 \cdot w^{0,8} \right\} \quad (0.1)$$

$$\alpha_{\text{Seiten,au\ss en}} = \max \left\{ 25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}; 7,21 \cdot w^{0,8} \right\} \quad (0.2)$$

mit der Fahrgeschwindigkeit w in der Einheit m/s .

Der \u00e4u\u00dferere W\u00e4rme\u00fcbergangskoeffizient f\u00fcr die Verscheibungen wird in Abh\u00e4ngigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit formuliert und auf einen Minimalwert von $25 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ begrenzt:

$$\alpha_{\text{FS,au\ss en}} = \max \left\{ 25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}; 3,79 \cdot w^{0,8} \right\} \quad (0.3)$$

$$\alpha_{\text{HS,au\ss en}} = \max \left\{ 25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}; 4,65 \cdot w^{0,8} \right\} \quad (0.4)$$

$$\alpha_{\text{SS,au\ss en}} = \max \left\{ 25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}; 7,21 \cdot w^{0,8} \right\} \quad (0.5)$$

In Abbildung 45 ist W\u00e4rme\u00fcbergangskoeffizient in Abh\u00e4ngigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit aufgetragen.

Der W\u00e4rme\u00fcbergangskoeffizient auf der Innenseite der Verscheibungen wird nach [36] in Abh\u00e4ngigkeit vom Bel\u00fcftungsvolumenstrom ermittelt, wobei dieser immer ein Mindestwert von $7 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ annimmt (vgl. Abbildung 46).

Für die einzelnen Scheibenflächen gilt mit dem Belüftungsvolumenstrom \dot{V}_L in der Einheit m^3/h :

$$\alpha_{\text{FS,innen}} = \max \left\{ 7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}; 0,584 \cdot \sqrt{\dot{V}_L} \right\} \quad (0.6)$$

$$\alpha_{\text{HS,innen}} = \max \left\{ 7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}; 0,700 \cdot \sqrt{\dot{V}_L} \right\} \quad (0.7)$$

$$\alpha_{\text{SS,innen}} = \max \left\{ 7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}; 0,495 \cdot \sqrt{\dot{V}_L} \right\} \quad (0.8)$$

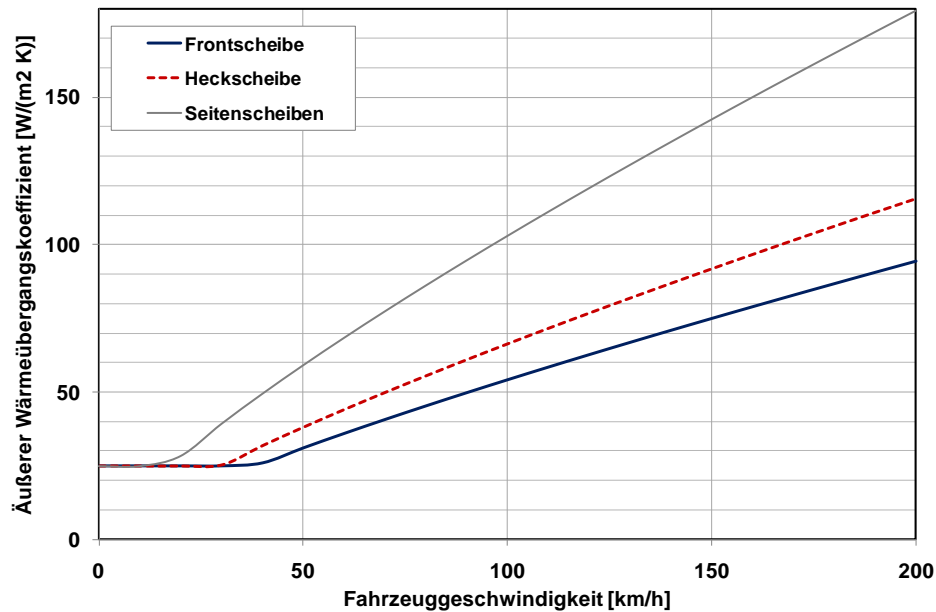


Abbildung 45: Äußerer Wärmeübergangskoeffizient für Front-, Heck- und Seitenscheibe in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit

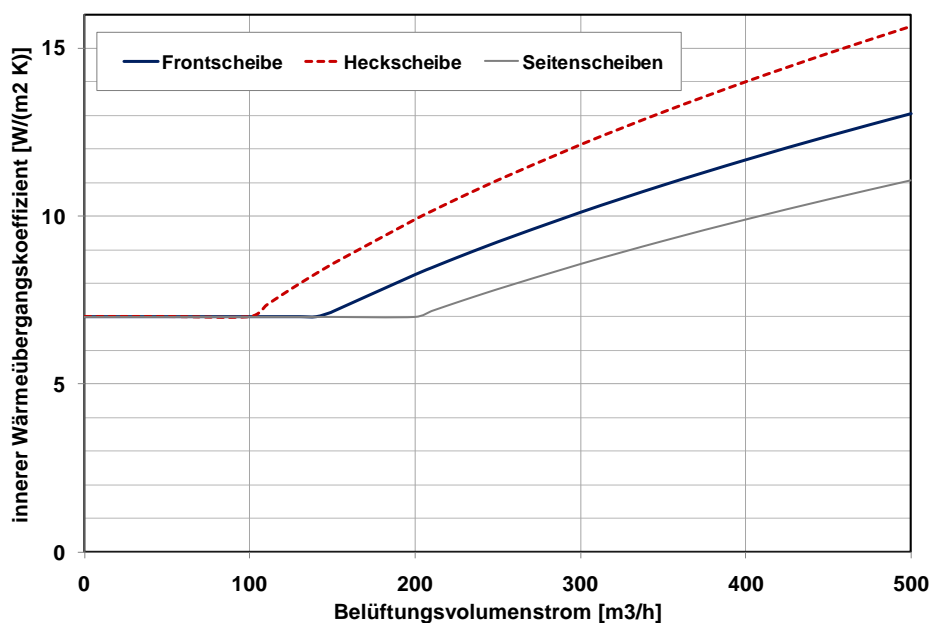


Abbildung 46: Innerer Wärmeübergangskoeffizient der Front-, Heck- und Seitenscheibe in Abhängigkeit vom Belüftungsvolumenstrom des Fahrgastraums

A.2 Parameter des Innenraummodells

Die folgende Tabelle fasst die für die Innenraummodellierung erforderlichen Parameter zusammen.

		Smart-Klasse	Golf-Klasse
Fahrgast- raum	Innenraumvolumen [m ³]	1,5	2,5
Dach	Bauteilmasse [kg]	8	13
	Spez. Wärmekapazität [J/(kg K)]	480	480
	Bauteilfläche [m ²]	1,0	1,7
Seiten- wand	Bauteilmasse [kg]	29	41
	Spez. Wärmekapazität [J/(kg K)]	480	480
	Bauteilfläche [m ²]	2,5	3,4
Spritz- wand	Bauteilmasse [kg]	11	12
	Spez. Wärmekapazität [J/(kg K)]	480	480
	Bauteilfläche [m ²]	0,9	1,1
Unter- boden	Bauteilmasse [kg]	25	33
	Spez. Wärmekapazität [J/(kg K)]	480	480
	Bauteilfläche [m ²]	2,1	2,8
Front- scheibe	Bauteilmasse [kg]	8,8	12,1
	Spez. Wärmekapazität [J/(kg K)]	804	804
	Bauteilfläche [m ²]	0,8	1,1
Heck- scheibe	Bauteilmasse [kg]	3,8	4,8
	Spez. Wärmekapazität [J/(kg K)]	804	804
	Bauteilfläche [m ²]	0,4	0,5
Seiten- scheiben	Bauteilmasse [kg]	7,6	11,4
	Spez. Wärmekapazität [J/(kg K)]	804	804
	Bauteilfläche [m ²]	0,8	1,2
Einbauten	Bauteilmasse [kg]	185	300
	Spez. Wärmekapazität [J/(kg K)]	1250	1250
	Bauteilfläche [m ²]	5,0	9

Tabelle A.1: Parameter des Innenraummodells

B Untersuchungsergebnisse für die Smart-Klasse

Im Folgenden werden alle für die Golf-Klasse dargestellten Abbildungen analog für die Smart-Klasse präsentiert. Die Ergebnisse gleichen im Wesentlichen den oben bereits für die Golf-Klasse diskutierten Ergebnissen. Eine weitere Beschreibung der Abbildungen unterbleibt daher.

B.1 Referenz

B.1.1 Kühlfall

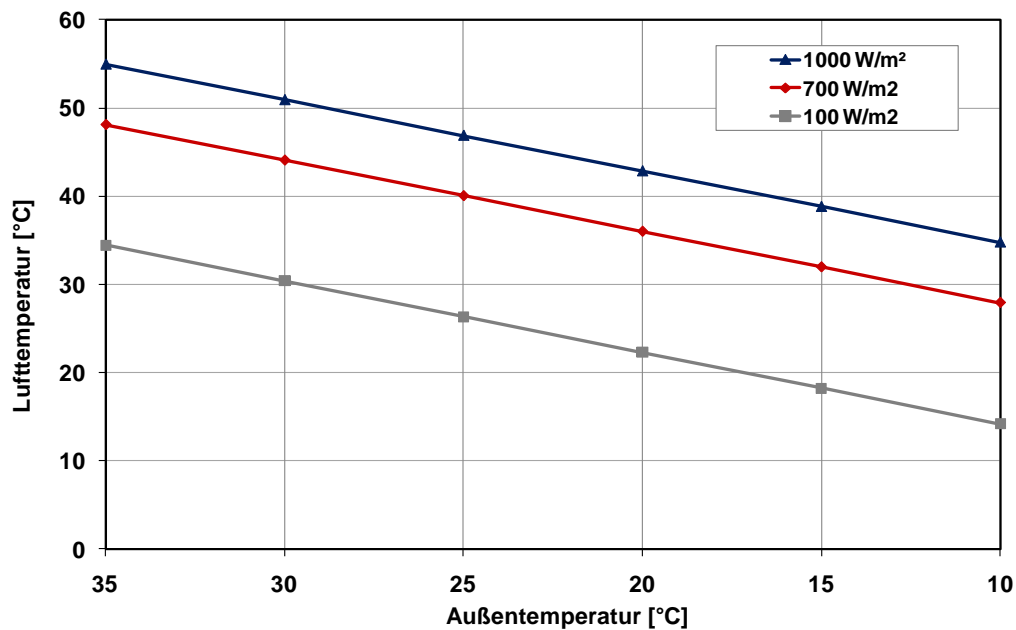


Abbildung 47: Lufttemperaturen im Fahrgastraum in Abhängigkeit von Außentemperatur und Strahlungsintensität am Ende der Vorkonditionierungsphase, Smart-Klasse

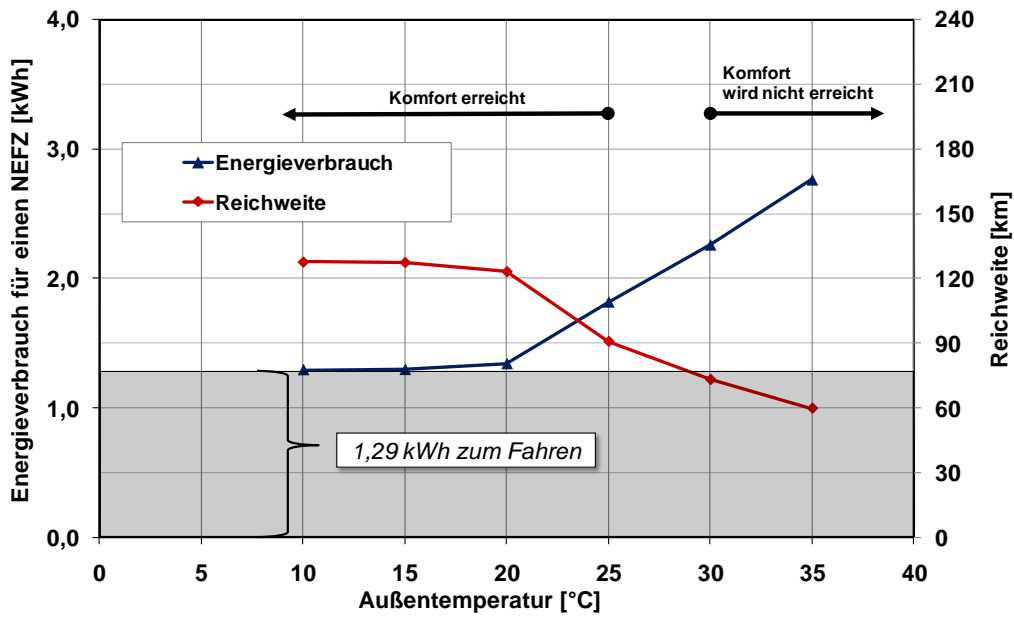


Abbildung 48: Einfluss der Außentemperatur auf Energieverbrauch und Reichweite im Kühlbetrieb bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m², Smart-Klasse

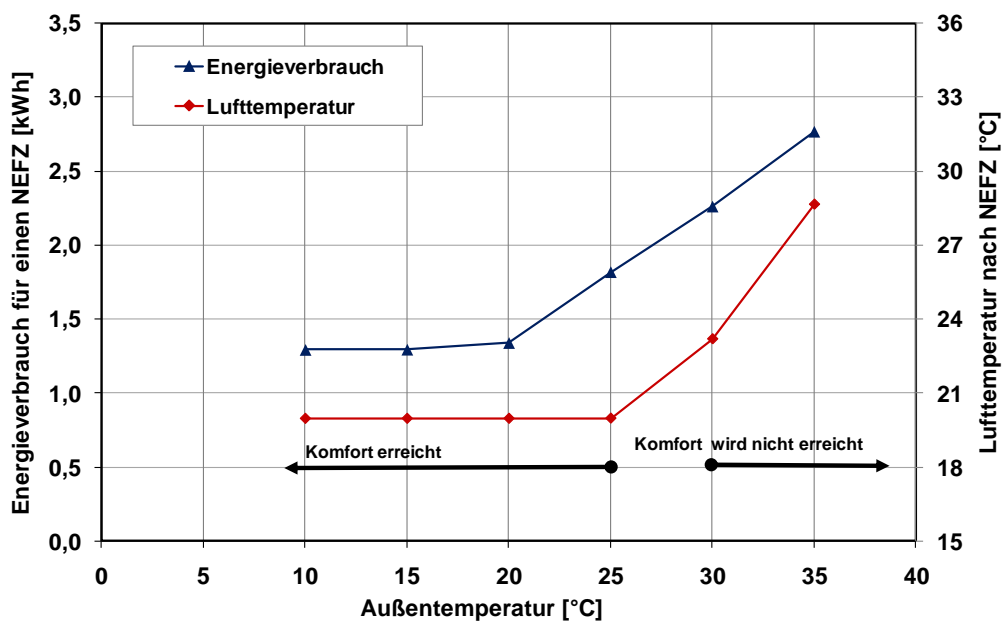


Abbildung 49: Einfluss der Außentemperatur auf Energieverbrauch und Lufttemperatur im Kühlbetrieb bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m², Smart-Klasse

B.1.2 Heizfall

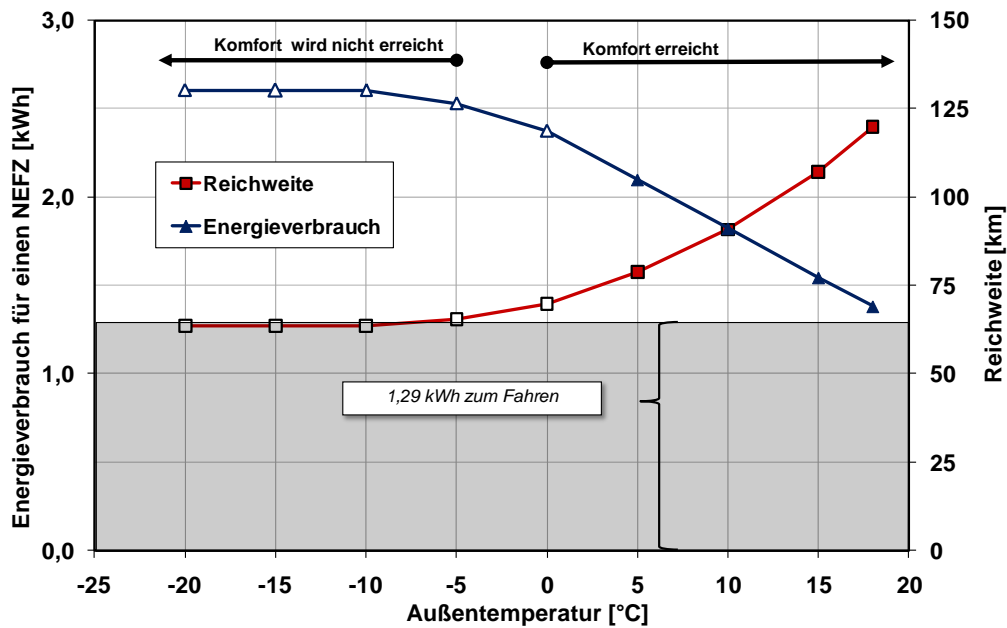


Abbildung 50: Einfluss der Außentemperatur auf Energieverbrauch und Reichweite im Heizbetrieb bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m², Smart-Klasse

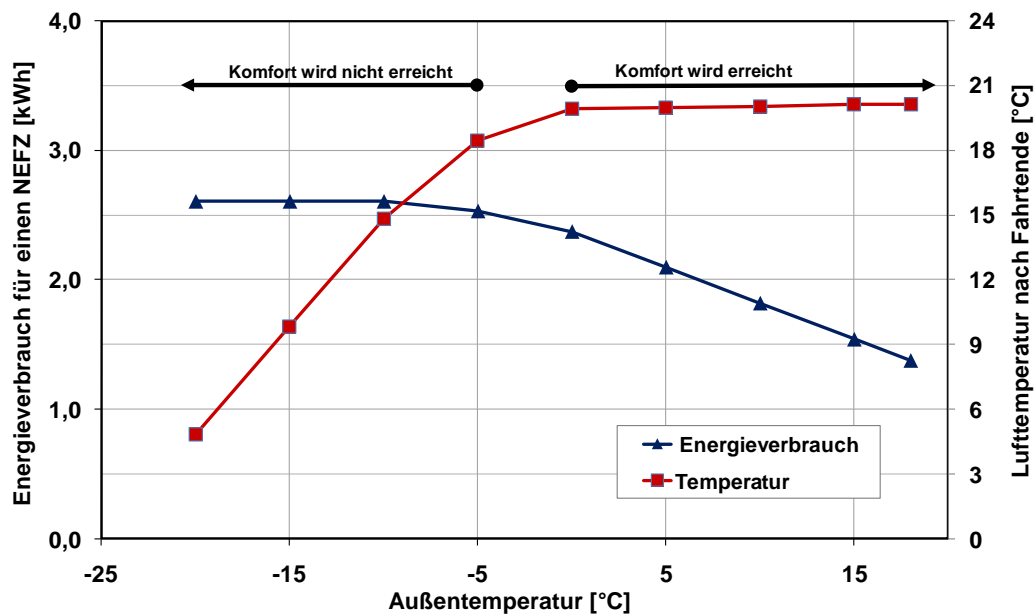


Abbildung 51: Einfluss der Außentemperatur auf Energieverbrauch und Lufttemperatur im Heizbetrieb bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m², Smart-Klasse

B.2 Maßnahmen zur Reichweitenoptimierung

B.2.1 Standmaßnahmen

B.2.1.1 Heizfall

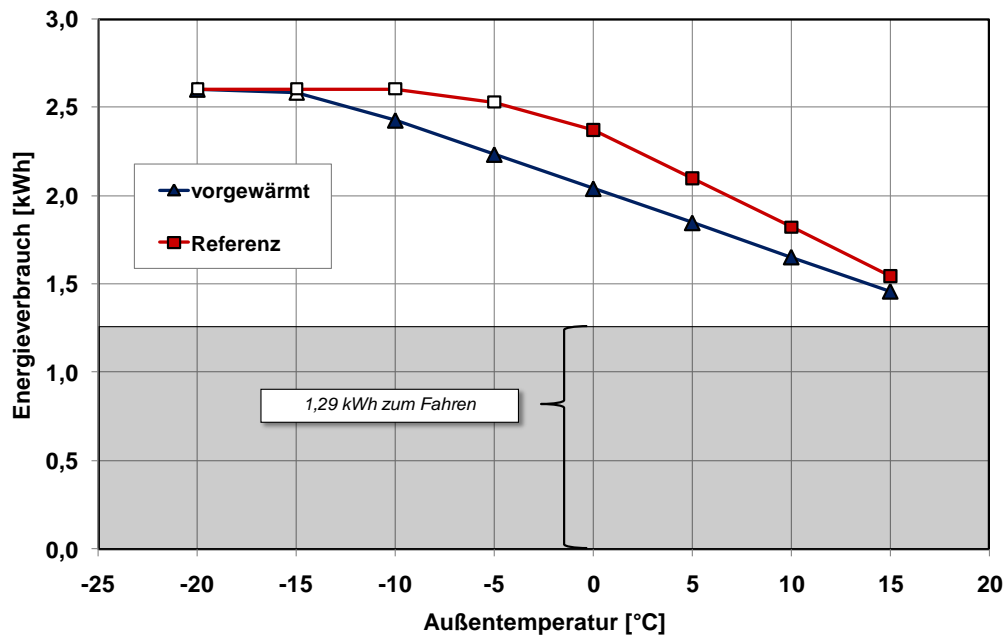


Abbildung 52: Einfluss der Außentemperatur auf den Energieverbrauch im Heizbetrieb für das vorgewärmte Fahrzeug und das Referenzfahrzeug bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m^2 , Smart-Klasse

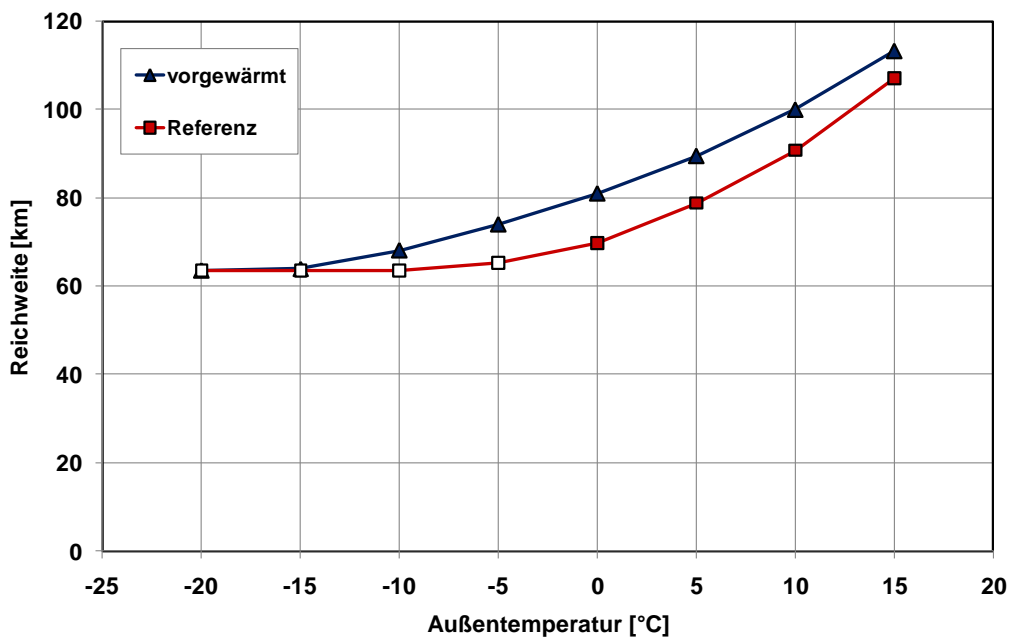


Abbildung 53: Einfluss der Außentemperatur auf die Reichweite im Heizbetrieb für das vorgewärmte Fahrzeug und das Referenzfahrzeug bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m^2 , Smart-Klasse

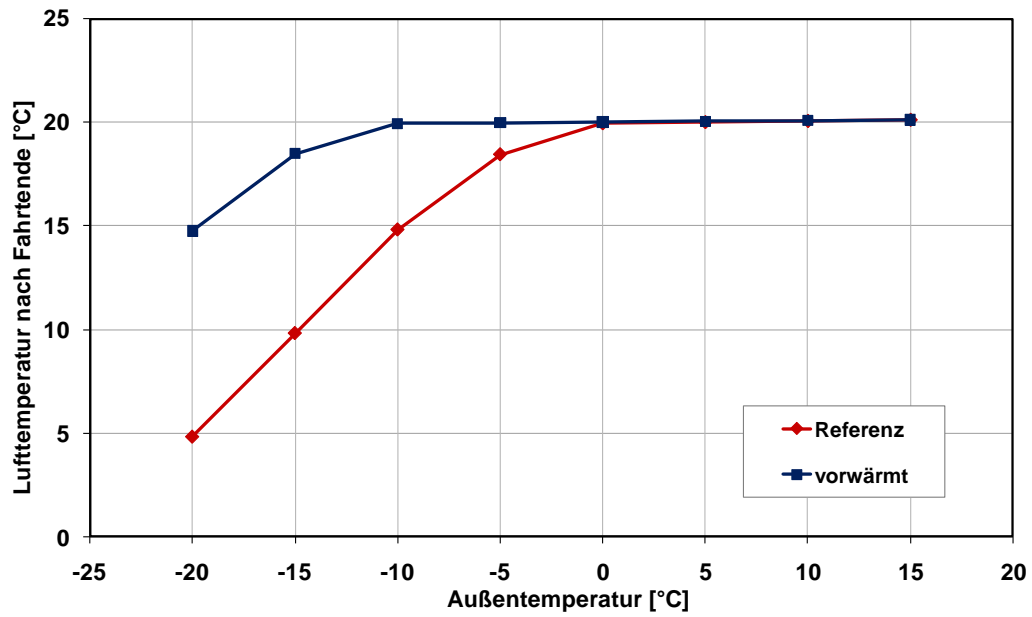


Abbildung 54: Einfluss der Außentemperatur auf die Lufttemperatur im Fahrgastraum bei Fahrtende im Heizbetrieb für das vorgewärmte Fahrzeug und das Referenzfahrzeug bei einer Strahlungsintensität von 100 W/m^2 , Smart-Klasse

B.2.1.2 Kühlfall

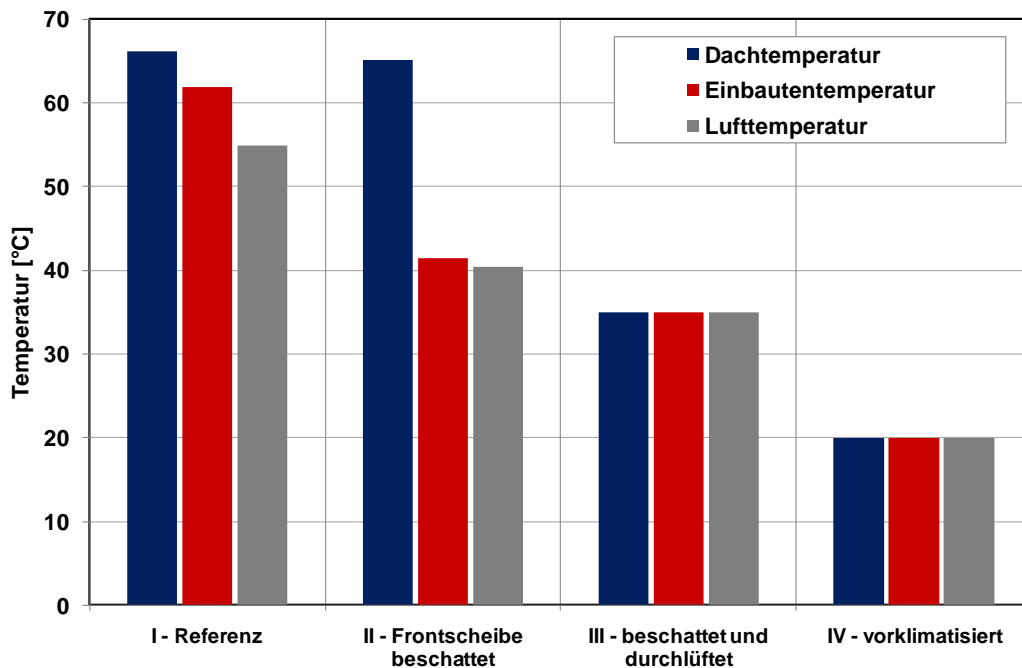


Abbildung 55: Lufttemperatur sowie Temperaturen für Dach und Einbauten bei Fahrtantritt für die untersuchten Standmaßnahmen bei einer Außentemperatur von 35 °C und einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m², Smart-Klasse

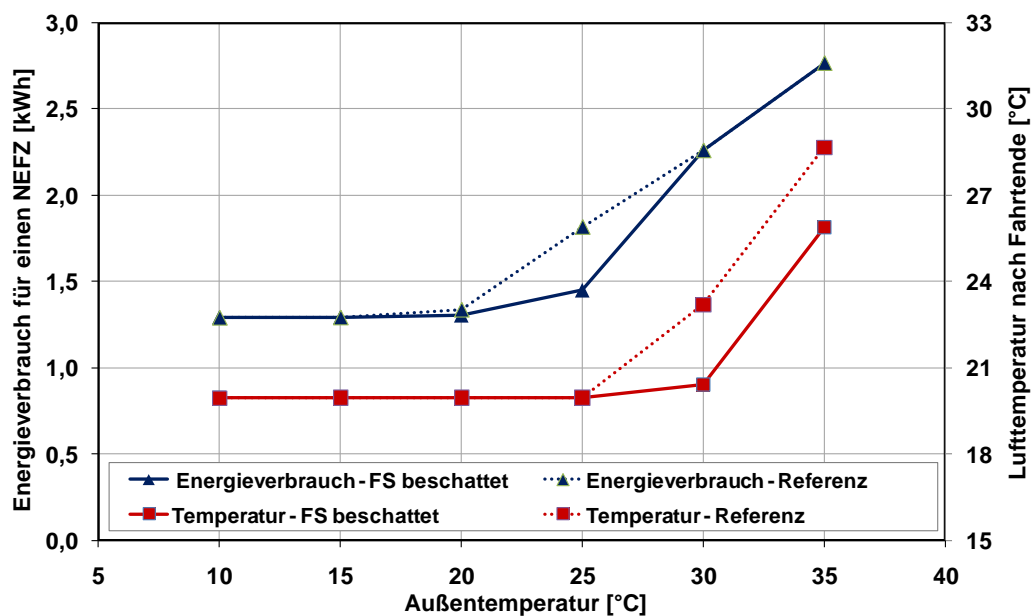


Abbildung 56: Vergleich der Energieverbräuche und Lufttemperaturen nach einem NEFZ für das Fahrzeug mit beschatteter Frontscheibe im Vergleich zum Referenzfall, Smart-Klasse

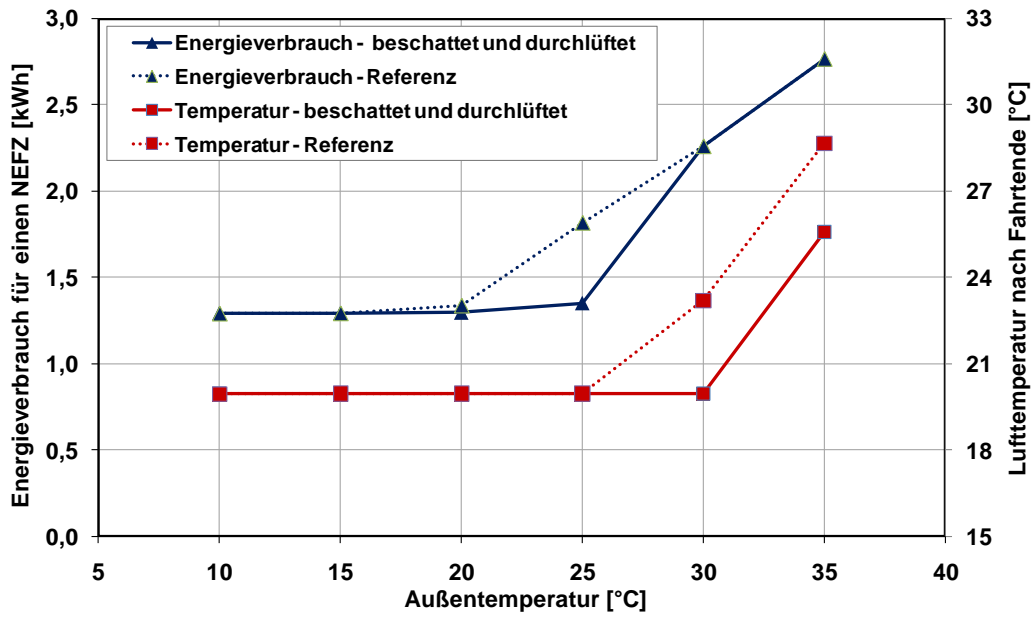


Abbildung 57: Vergleich der Energieverbräuche und Lufttemperaturen nach einem NEFZ für das beschattete und durchlüftete Fahrzeug im Vergleich zum Referenzfall, Smart-Klasse

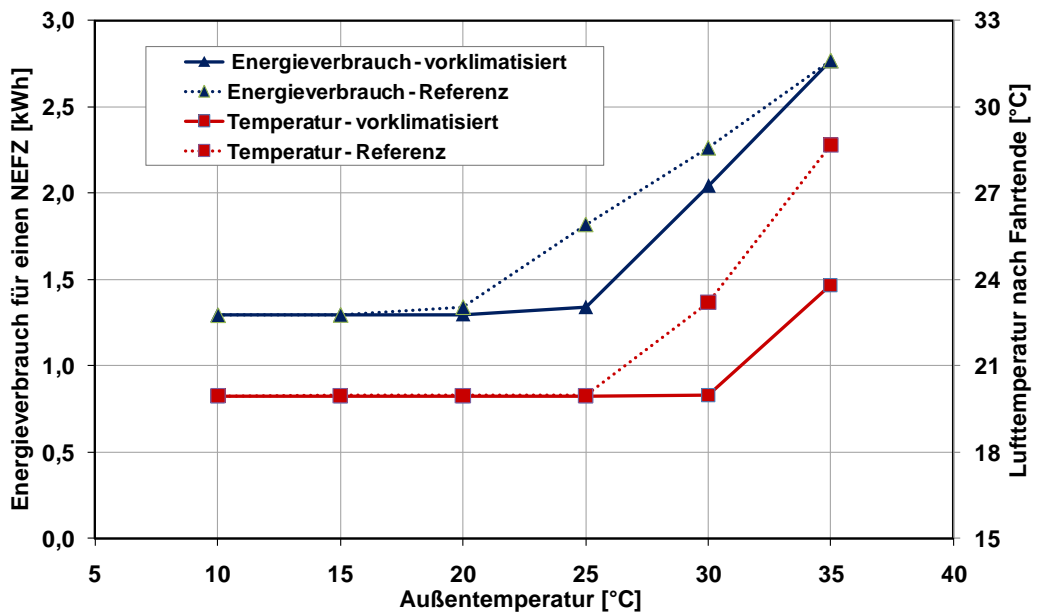


Abbildung 58: Vergleich der Energieverbräuche und Lufttemperaturen nach einem NEFZ für das vorklimatisierte Fahrzeug im Vergleich zum Referenzfahrzeug, Smart-Klasse

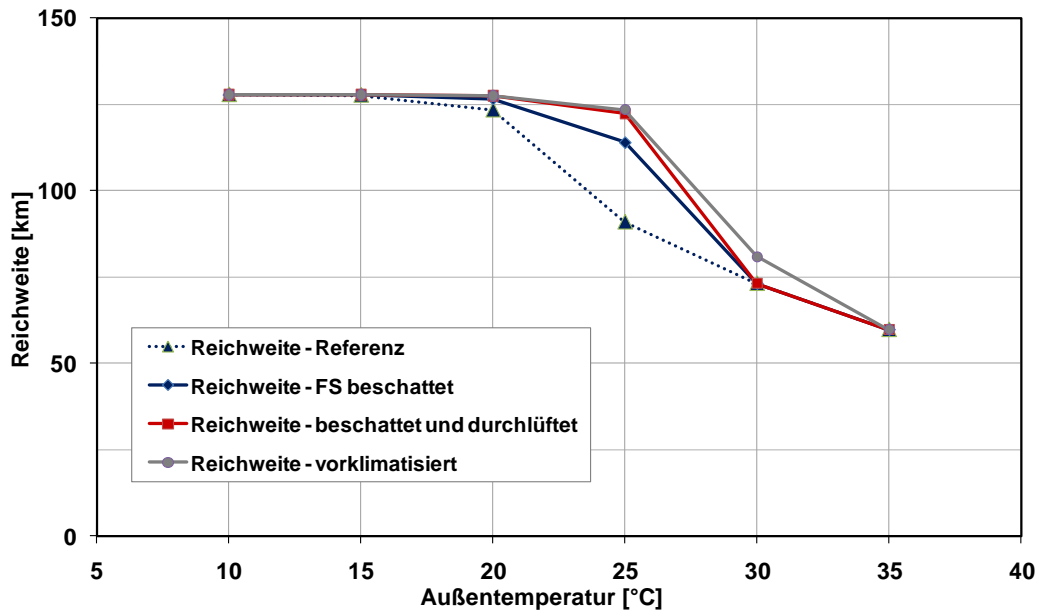


Abbildung 59: Einfluss der Außentemperatur auf die Reichweite während des Kühlbetriebs bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 für die untersuchten Standmaßnahmen, Smart-Klasse

B.2.2 Thermische Massen

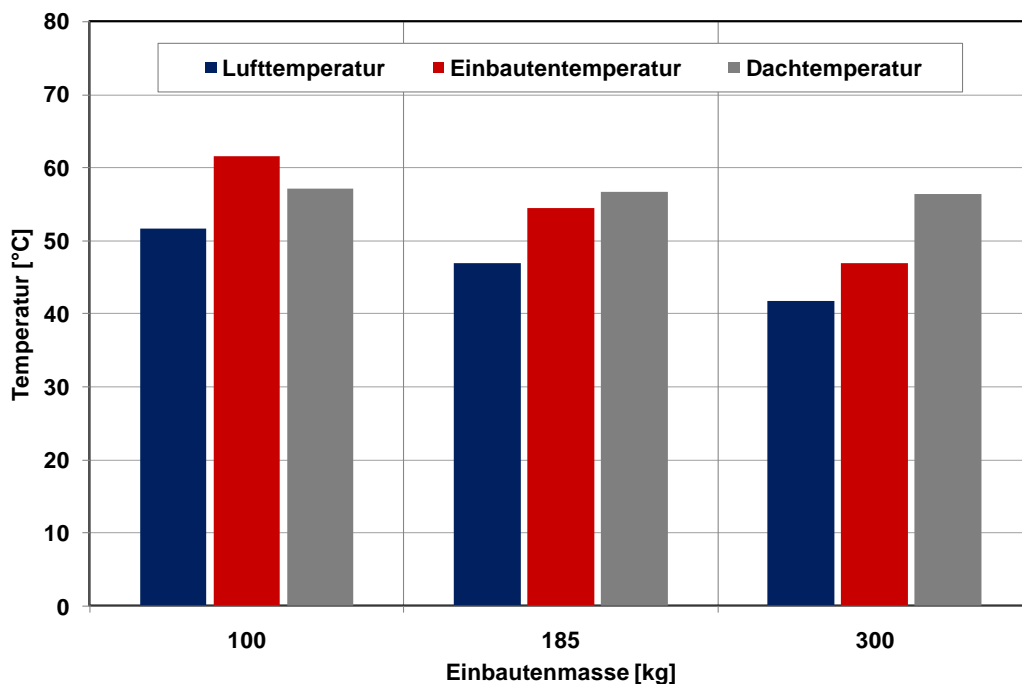


Abbildung 60: Abhängigkeit der Temperaturen von Dach, Einbauten und Luft im Fahrgastraum bei Fahrtantritt nach vorausgegangener sechsständiger solarer Bestrahlung mit einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 für unterschiedliche thermischen Massen bei einer Außentemperatur von 25 °C , Smart-Klasse

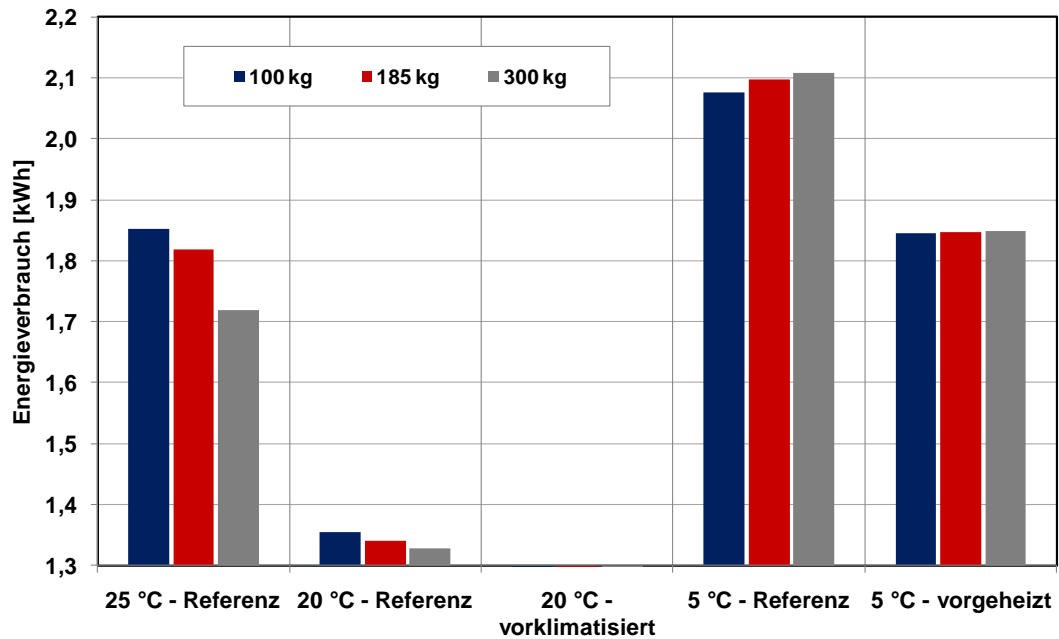


Abbildung 61: Energieverbrauch für die Durchfahrt eines NEFZ bei ausgewählten Szenarien in Abhängigkeit von der thermischen Masse, Smart-Klasse

B.2.3 Umluft

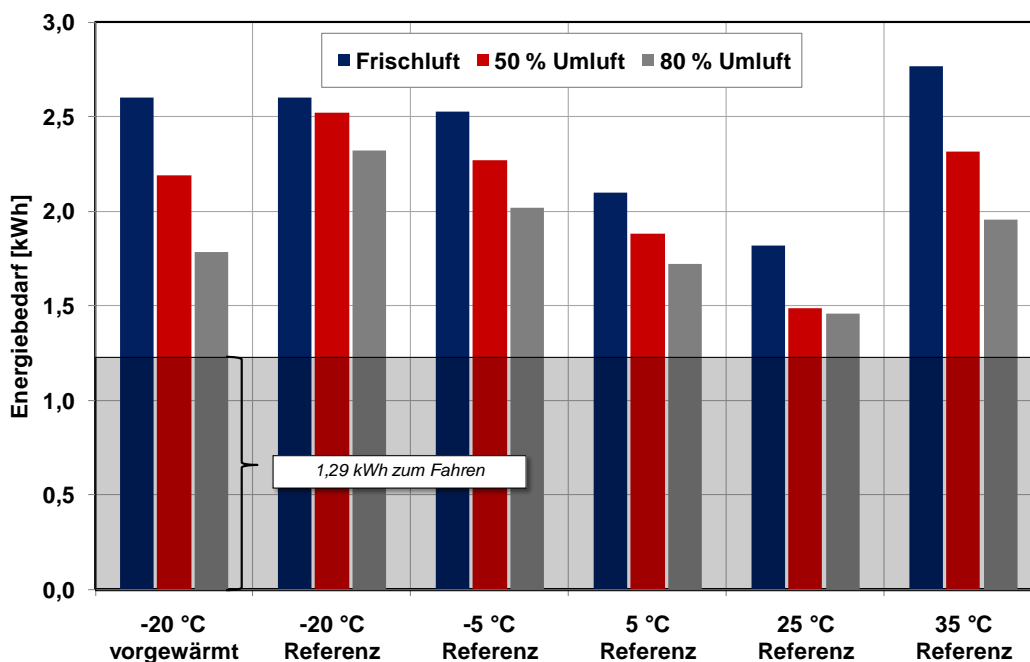


Abbildung 62: Energieverbrauch für verschiedene Heizfälle (Strahlungsintensität 100 W/m²) und Kühlfälle (Strahlungsintensität von 1.000 W/m²) im Frischluftbetrieb sowie bei Teilumlufbetrieb mit 50 % bzw. 80 % Umluftanteil, Smart-Klasse

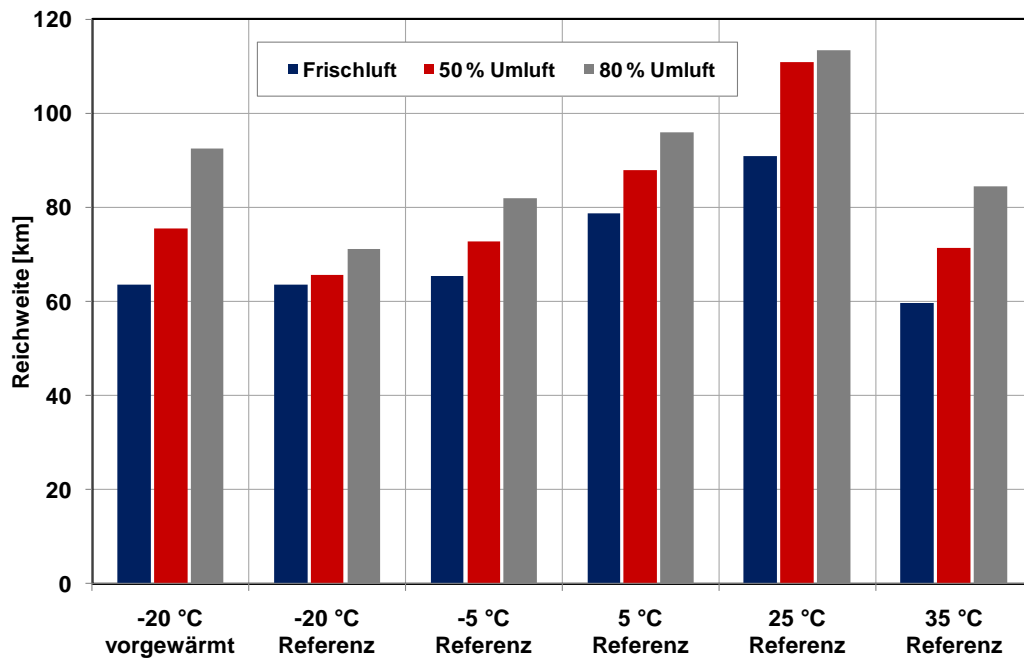


Abbildung 63: Reichweite für verschiedene Heizfälle (Strahlungsintensität 100 W/m²) und Kühlfälle (Strahlungsintensität 1.000 W/m²) im Frischluftbetrieb sowie bei Teilumluftebetrieb mit 50 % bzw. 80 % Umlufteanteil, Smart Klasse

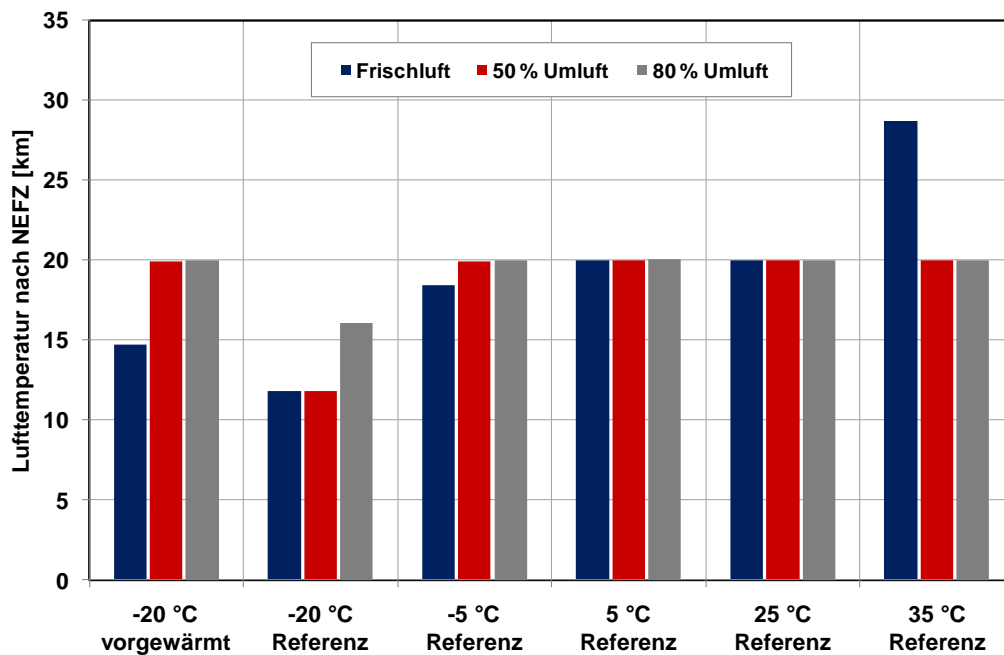


Abbildung 64: Lufttemperaturen im Fahrgastraum nach Fahrtende für verschiedene Heizfälle (Strahlungsintensität 100 W/m²) und Kühlfälle (Strahlungsintensität von 1.000 W/m²) im Frischluftbetrieb sowie bei Teilumluftebetrieb mit 50 % bzw. 80 % Umlufteanteil, Smart-Klasse

B.2.4 Wärmepumpe

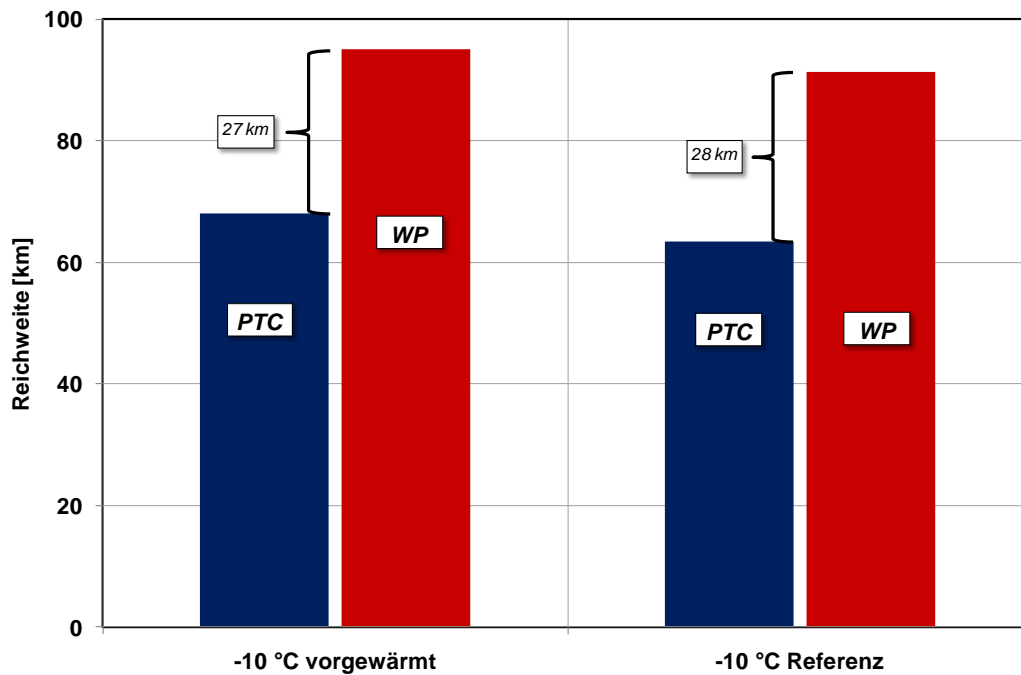


Abbildung 65: Reichweitenvorteil der Wärmepumpe gegenüber einem PTC-Zuheizer im Heizbetrieb für das vorgewärmte Fahrzeug sowie das Referenzfahrzeug bei einer Außentemperatur von -10 °C und einer Strahlungsintensität von 100 W/m^2 , Smart-Klasse

B.2.5 Karosserie-Isolierung

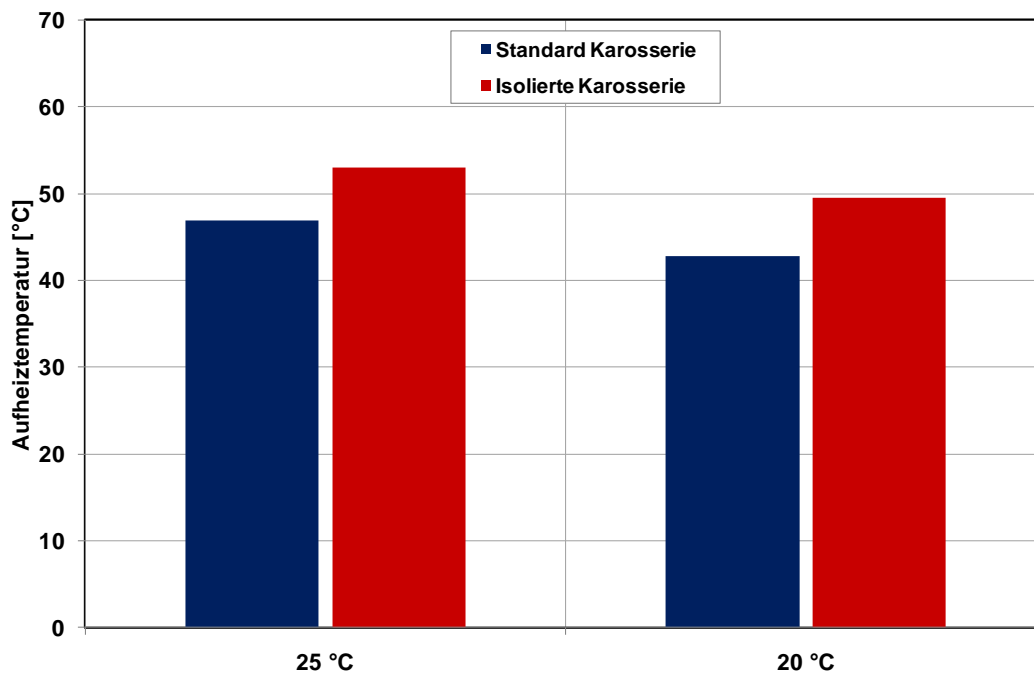


Abbildung 66: Lufttemperaturen im Fahrgastraum bei Fahrtantritt nach vorausgegangener sechsständiger solarer Bestrahlung mit einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 für die Varianten Standard-Karosserie und isolierte Karosserie bei verschiedenen Außentemperaturen, Smart-Klasse

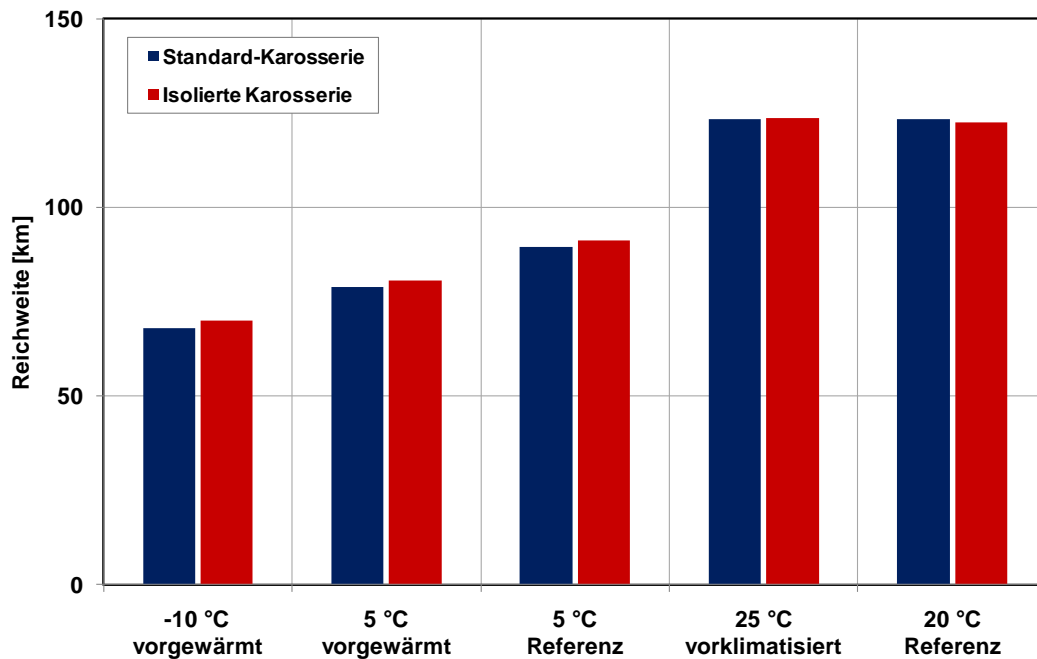


Abbildung 67: Reichweite für die Varianten Standard-Karosserie und isolierte Karosserie bei ausgewählten Heizfällen (Strahlungsintensität 100 W/m^2) und Kühlfällen (Strahlungsintensität 1.000 W/m^2), Smart-Klasse

B.2.6 Verschiebung

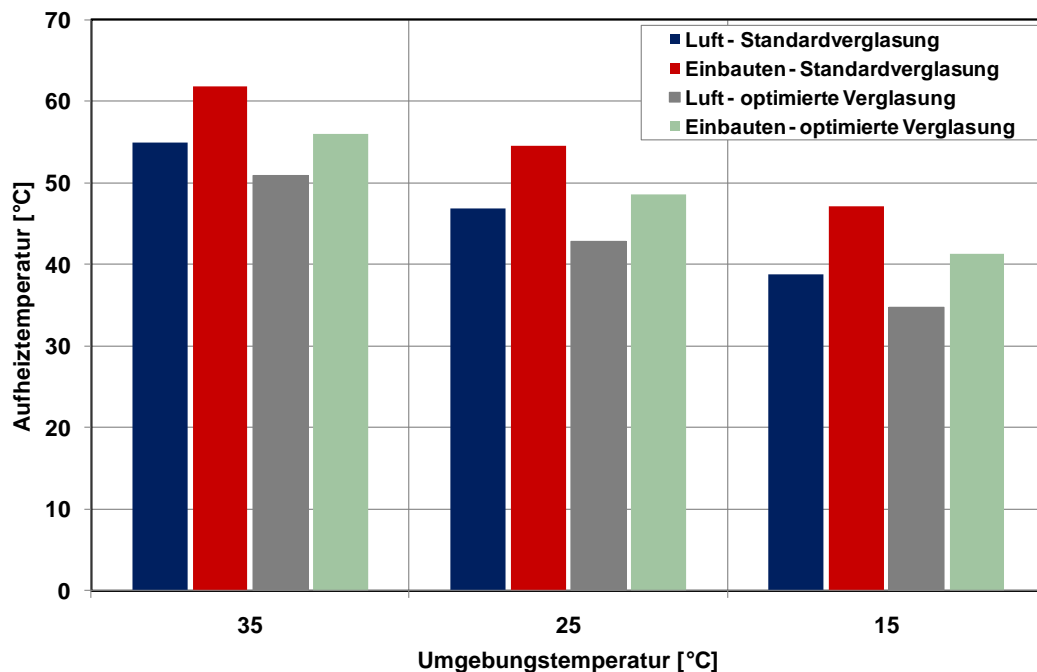


Abbildung 68: Abhängigkeit der Temperaturen von Luft und Einbauten im Fahrgastraum von der Außentemperatur, Temperaturwerte jeweils bei Fahrtantritt nach sechsständiger solarer Bestrahlung mit einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 für ein Fahrzeug mit Standard- bzw. optimierter Verschiebung, Smart-Klasse

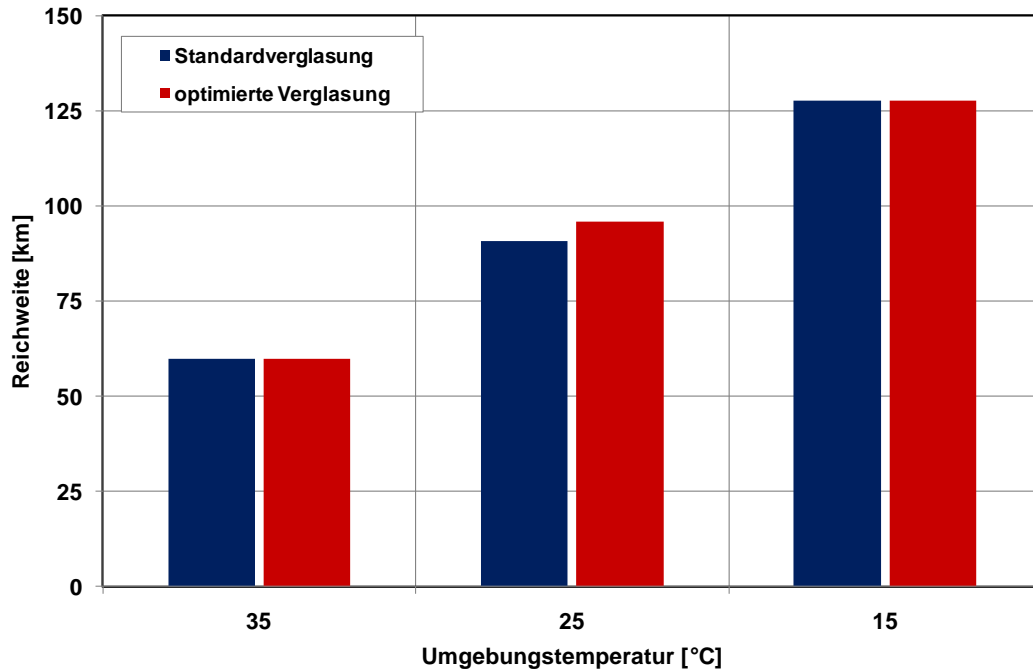


Abbildung 69: Abhängigkeit der Reichweite von der Außentemperatur im Kühlfall für Fahrzeuge mit Standard- und optimierter Verschiebung bei einer Strahlungsintensität von 1.000 W/m^2 , Smart-Klasse

B.2.7 Maßnahmenkombinationen

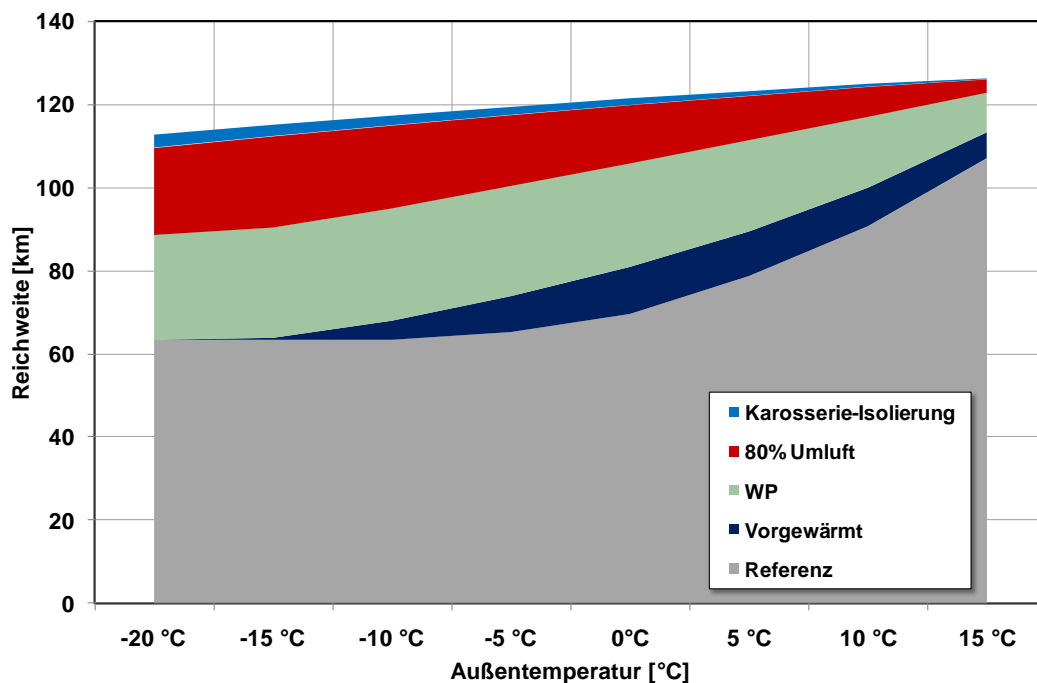


Abbildung 70: Einfluss von kombinierten und aufeinander aufbauenden Einzelmaßnahmen auf die Reichweite bei unterschiedlichen Außentemperaturen im Heizfall, Smart-Klasse. Bei der Interpretation ist die gegenseitige Beeinflussung der Maßnahmen zu berücksichtigen.

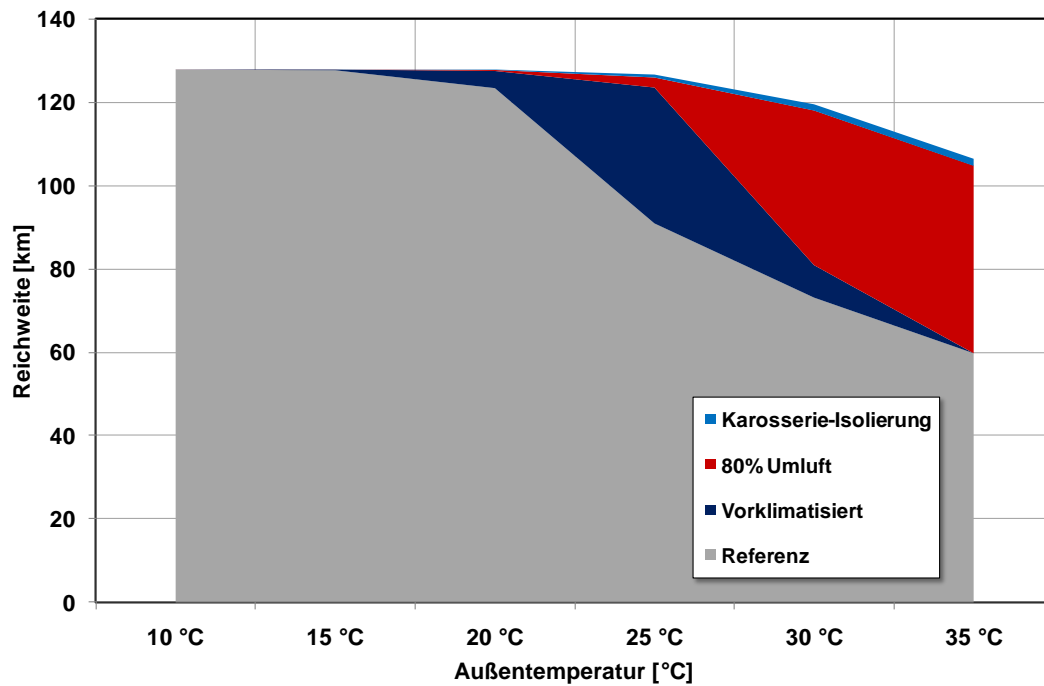


Abbildung 71: Einfluss von kombinierten und aufeinander aufbauenden Einzelmaßnahmen auf die Reichweite bei unterschiedlichen Außentemperaturen im Kühlfall, bei einer Strahlungsin- tensität von 1.000 W/m^2 , Smart-Klasse. Bei der Interpretation ist die gegenseitige Beeinflussung der Maßnahmen zu berücksichtigen.

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2006)

Nr.	Titel	Preis / €
199	Anwendungspotentiale und Prozeßgrenzen der Klebtechnik für die Umformung von Doppel-lagenblechen, 2006	76,-
200	Thermisches Fügen für die stahlintensive Hybridbauweise im Fahrzeugleichtbau, 2006	76,-
201	Lufthygienische Beurteilung von Pkw-Innenraumfiltern, 2006	96,-
202	Vergleich verschiedener Konzepte der Bodensimulation und von drehenden Rädern zur Nachbildung der Straßenfahrt im Windkanal und deren Auswirkung auf Fahrzeuge, 2006	40,-
203	Methodischer Ansatz im Stahlleichtbau am Beispiel Federbein/Dämpfer, 2006	50,-
204	Innovative Nfz-Konzepte - Gesamtwirtschaftliche Effekte durch Einführung schwerer und langer Lkw, 2006	45,-
205	Technische Kompatibilität von innovativen Nutzfahrzeugkonzepten auf den kombinierten Verkehr Straße/Schiene sowie den Containerverkehr, 2006	50,-
206	Größenaufgelöste physikalische und chemische Bestimmung von elementarem und Organischem Kohlenstoff in Nanopartikeln, 2006	55,-
207	Erstellung einer VHDL-AMS-Modellbibliothek für die Simulation von Kfz-Systemen, 2006	50,-
208	Fahrer-Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, 2006	50,-
209	Innovative Nfz-Konzepte - Akzeptanzuntersuchungen zur Einführung und zum Einsatz Innovativer Nutzfahrzeuge, 2007	40,-
210	Das Konzept des Situationsbewusstseins und seine Implikationen für die Fahrsicherheit, 2007	50,-
211	FAT-Richtlinie Dynamische Werkstoffkennwerte für die Crashesimulation, 2007	40,-
212	Innovative Nfz-Konzepte - Wirtschaftlichkeitsanalyse EuroCombi, 2007	35,-
213	Störfestigkeit von Fahrzeugelektronik bezüglich ESD und Impulseinkopplung, 2007	40,-
214	Betriebsfeste Bemessung von mehrachsig belasteten Laserstrahlschweißverbindungen aus Stahlfeinblechen des Karosseriebaus, 2007	40,-
215	Örtlich ertragbare Beanspruchungen bei Spannungskonzentrationen in Karosseriebauteilen aus hoch- und höherfesten Stählen, 2008	35,-
216	Auswirkung der Berücksichtigung lokaler Größen des E-Moduls im Hinblick auf die verbesserte Auslegung umgeformter Karosserieblechstrukturen aus Stahl, 2008	35,-
217	Aktueller Stand und Trends in der CFK-Berechnung im Fahrzeugbau, 2008	49,-
218	In-vitro-Untersuchungen zur Bioverfügbarkeit von an Dieselpartikel gebundenen polyaromatischen Kohlenwasserstoffen und Nitropyrenen, 2008	35,-
219	Bewertender Vergleich der aktuellen Empfehlungen zu den Luftqualitätsgrenzwerten NO ₂ + Evidenz-basierter Vergleich der epidemiologischen Studien 2002-2006 zu Gesundheitseffekten durch NO ₂ , 2008	40,-
220	Fahrdynamische Analyse innovativer Nfz-Konzepte (EuroCombi), 2008	49,-
221	Entwicklung einer Methode zur vergleichenden Bewertung von Schwingfestigkeitsversuchen mit gefügten Stahlblechen in Abhängigkeit des Versagensverhaltens, 2009	40,-

222	Untersuchung zur Wahrnehmung von Lenkmomenten bei Pkw, 2009	35,-
223	Entwicklung einer Prüfspezifikation zur Charakterisierung von Luftfedern, 2009	35,-
224	Klimatische Daten und Pkw-Nutzung - Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen in Europa, USA, China und Indien, 2009	35,-
225	CO ₂ -Einsparung durch Verflüssigung des Verkehrsablaufs - Abschätzung staubedingter CO ₂ -Emissionen und von Reduktionspotentialen durch Verbesserung des Verkehrsablaufs, 2009	35,-
226	Modellbasierte Systementwicklung, 2009	50,-
227	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Dünobleche aus Stahl, 2010	40,-
228	Systemmodellierung für Komponenten von Hybridfahrzeugen unter Berücksichtigung von Funktions- und EMV-Gesichtspunkten, 2010	35,-
229	Methodische und technische Aspekte einer Naturalistic Driving Study, 2010	40,-
230	Analyse der sekundären Gewichtseinsparung, 2010	40,-
231	Zuverlässigkeit von automotive embedded Systems, 2010	kostenloser Download
232	Erweiterung von Prozessgrenzen der Bonded Blank Technologie durch hydromechanische Umformung, 2011	kostenloser Download
233	Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge, 2011	kostenloser Download

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2011

VDA

Verband der
Automobilindustrie

FAT

Forschungsvereinigung
Automobiltechnik

Behrenstraße 35
10117 Berlin
www.vda.de
www.vda-fat.de