

Einfluss der regionalen Solarstrahlung auf den Pkw

Dipl.-Ing. **Malte Westerloh**, Volkswagen AG, Wolfsburg; Prof. Dr.-Ing. **Jürgen Köhler**, Institut für Thermodynamik, TU Braunschweig

Kurzfassung

Der zur Auslegung von Pkw-Klimaanlagen relevante VDA Pull down [1] ist ein Testszenario in dem die Solarstrahlung senkrecht von oben auf den Pkw gerichtet ist. In der Realität tritt diese Einstrahlung kaum auf und ist u. a. abhängig von der geographischen Breite.

Für ausgewählte Breitengrade und Jahreszeiten wurden die Ausrichtungen des Pkw, bei der die maximale mittlere Fahrgastraumtemperatur aufgrund des entsprechenden Sonnenlaufs erreicht wird, simulativ bestimmt. Abgeschlossen wurde die Untersuchung durch eine gekoppelte thermische Gesamtfahrzeugsimulation auf Basis eines Elektrofahrzeugs der Kompaktklasse. Hier wurde der Einfluss der regionalisierten Ausrichtung auf die Pkw-Klimatisierung für unterschiedliche Breitengrade exemplarisch bestimmt. Die Fahrgastraummodelle wurden mit der Software THESEUS-FE der Firma P&Z GmbH erstellt und abgebildet.

Alle Pkw-Segmente wurden mit einer regionalisierten Ausrichtung je Breitengrad und Jahreszeit abgebildet werden. Im Vergleich zum Testszenario verursacht der Einfluss der regionalisierten Ausrichtung bis zu 25 % mehr Energieverbrauch bei den jeweiligen Breitengraden aufgrund der Klimatisierung.

Abstract

To design the mobile air conditioning system the ideal test scenario VDA pull down must be considered. In this test scenario, the solar radiation is directed vertically from above on the car. This idealized condition occurs in reality hardly during a year.

The orientations of the cars are determined for each latitude and season, in which the maximum average passenger compartment temperature is achieved by simulation. The investigation will be concluded by coupling with an electric vehicle in the thermal vehicle simulation. The impact of the regional orientation should be investigated on the vehicle air-conditioning for different latitudes. The passenger compartment models were mapped using 3D models.

All car segments can be mapped with one regional orientation for each latitude and season. Compared to the test scenario causes the influence of regional orientation is up to 25 % more energy consumption at the respective latitudes due to the air conditioning system

1. Einleitung

Die Klimatisierung spielt bei der Elektromobilität einen reichweitenlimitierenden Faktor. Zur Auslegung von Pkw-Klimaanlagen wird der VDA Pull down mit fest definierten

Randbedingungen in Klimakammern als Testszenario verwendet. Die Solarstrahlung wird dabei mit einer gleichmäßigen und senkrecht von oben gerichteten Strahlung auf den Pkw abgebildet. Damit bildet das Testszenario nur einen kleinen Ausschnitt aus der Realität ab. Die überwiegende Zeit im Jahr ist die Strahlung schräg auf den Pkw gerichtet, wodurch sich der Fahrgastraum deutlich stärker aufheizt, als im Testszenario [2]. In dieser Arbeit wird der jahreszeitliche Einfluss der Solarstrahlung an unterschiedlichen geographischen Standorten für verschiedene Pkw-Segmente auf die Fahrgastraumtemperatur untersucht und auf wenige, charakteristische Parametersätze reduziert.

2. Randbedingungen

Die Untersuchungen zum Einfluss des regionalen Sonnenstandes [3] werden mit der Software THESEUS-FE der Firma P+Z GmbH [4] durchgeführt. Die Untersuchung beschränkt sich auf die Breitengrade zwischen 0° N und 60° N. Die Ergebnisse lassen sich analog auf die Südhalbkugel übertragen. Eine grobe Zuordnung der Breitengrade zu einem Ort kann der Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Breitengrade und Referenzorte

| Breitengrad | Referenzort |
|-------------|-----------------------------------|
| 0° | Bogota, Singapur |
| 10° | Bangkok, Caracas |
| 20° | Hong Kong, Mexico City, Mumbai |
| 30° | Houston, Kairo, Shanghai |
| 40° | Beijing, New York City, Rom |
| 50° | Frankfurt, Paris, Vancouver |
| 60° | Oslo, Sankt Petersburg, Stockholm |

Für die verschiedenen Pkw-Segmente (Kompaktwagen (C), Oberklasse (F), Sports Utility Vehicle (SUV) und Großraum-Van (M) [5]) werden die Fahrgasträume (FGR) betrachtet (Tabelle 2). Die Fahrgastraumgeometrie wird mit der Software THESEUS-FE als sogenannte 1D-Generatormodelle [6] abgebildet. Die FGR unterscheiden sich in ihrer Scheibenfläche, Neigungswinkel der Scheiben sowie dem Fahrgastraumvolumen. Der Wärmedurchgangswert der Karosserie sowie das verwendete Scheibenmaterial bleiben bei allen Pkw identisch. Alle Segmente werden in der Simulation mit gleichen spektralen Eigenschaften der Scheiben versehen.

Tabelle 2: Größenverhältnisse der FGR-Modelle

| | FGR-volumen | Fläche Windschutzscheibe | Fläche Seitenscheibe vorne | Fläche Seitenscheibe hinten | Fläche Heckscheibe |
|----------|-------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| C-Klasse | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| F-Klasse | 1,4 | 1,4 | 1,2 | 1,5 | 2,5 |
| SUV | 1,6 | 1,3 | 1,3 | 1,8 | 2,0 |
| M-Klasse | 3,1 | 1,6 | 1,6 | 3,2 | 2,4 |

Zusätzlich zu einer geographischen und jahreszeitlichen Variation wird das Fahrzeug um die eigene Achse in 30°-Schritten gedreht. Damit soll eine regionalisierte Ausrichtung des Pkw zur Sonne, bei dem sich die maximale mittlere FGR-Temperatur aufgrund der Orientierung einstellt, bestimmt werden. Um den Einfluss der Umgebungstemperatur zu eliminieren, werden alle Simulationen mit einer Umgebungstemperatur von 20 °C simuliert.

3. Jahreszeitlicher und geographischer Einfluss auf den Pkw

Bei der Untersuchung des jahreszeitlichen und geographischen Einflusses der Sonne wird der Pkw mit der Windschutzscheibe nach Süden ausgerichtet. In allen Fällen wird ein Tageslauf der Sonne von morgens 4 Uhr bis abends 22 Uhr simuliert. Die Temperaturverläufe sind, durch den gleichen physikalischen Aufbau der unterschiedlichen FGR-Modelle, sehr ähnlich ausgeprägt. Sie unterscheiden sich lediglich in ihrem Temperaturmaximum (Abbildung 1).

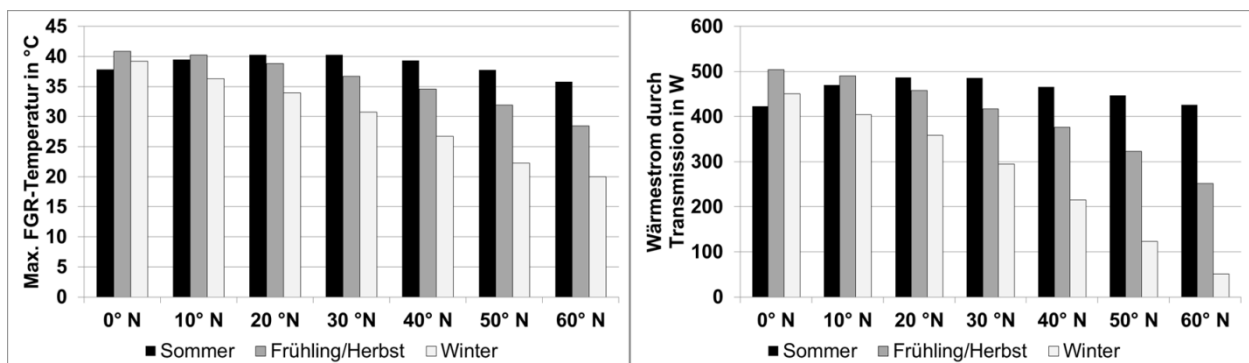


Abbildung 1: Links: Maximale mittleren FGR-Temperatur, rechts: Wärmestrom durch Transmission in den FGR für unterschiedliche geographische Breiten und Jahreszeiten eines C-Klasse Modells mit einer Fahrzeugausrichtung nach Süden. Rechts: Wärmestrom durch Transmission in den FGR

In Abbildung 1 ist erkennbar, dass bei 0° nördlicher Breite die maximale mittlere FGR-Temperatur im Frühling/Herbst erreicht wird. Dort befindet sich die Sonne senkrecht über dem Pkw und die atmosphärische Schwächung der Sonnenstrahlung durch die Luftmasse ist am geringsten. Die Elevation beschreibt den Sonnenhöhenwinkel und gibt damit die Höhe der Sonne über dem Horizont an. Im Sommer ist die maximale FGR-Temperatur ca. 1,5 K geringer als im Winter, trotz gleicher Elevation und gleicher Umgebungstemperatur von

20 °C. Der Grund dafür ist, dass im Sommer die Sonne von Norden auf die Heckscheibe des Pkw trifft und im Winter von Süden auf die Windschutzscheibe. Die Fläche der Windschutzscheibe ist bei allen FGR-Modellen im Schnitt anderthalb mal so groß wie die Heckscheibe. Daher fällt der maximale Wärmestrom durch Transmission im um ca. 30 W größer aus.

Bei 10° nördlicher Breite sind die die maximale mittlere FGR-Temperatur im Sommer und Frühling/Herbst nahezu identisch ($\Delta T < 1 \text{ K}$). Im Frühling/Herbst ist die maximale mittlere FGR-Temperatur minimal größer, da dort die Elevation 3° größer ist ($\Delta \dot{Q}_{\text{trans}} \approx 20 \text{ W}$). Im Winter ist die Elevation um 20° - 23° kleiner, wodurch die atmosphärische Schwächung durch die Luftmasse größer ausfällt. Zudem ist die Tageslänge kürzer als an den anderen beiden betrachteten Tagen. Dadurch ist der Temperaturverlauf um 3 bis 4 K geringer.

Ab 20° nördlicher Breite nimmt die maximale Elevation im Frühling/Herbst im Vergleich zum Sommer deutlich ab (Tabelle 3). Dadurch werden die Tageslängen sowohl im Frühling/Herbst als auch im Winter mit steigenden Breitengraden deutlich kürzer. Im 20. Breitengrad beträgt die Differenz der maximalen mittleren FGR-Temperatur zwischen Sommer und Frühling/Herbst ca. 2 K, diese Differenz vergrößert sich bis zum 60. Breitengrad auf > 10 K.

Im Sommer scheint die Sonne in den Breitengraden 0° N bis 20° N von Norden auf den Pkw, bei 30° N bis 60° N scheint sie von Süden. Im Frühling/Herbst und Winter scheint die Sonne von Süden auf den Pkw. Die maximale Elevation tritt am Äquator im Frühling/Herbst mit 90° auf und am 20. Breitengrad mit 87° im Sommer. Damit bilden diese beiden Punkte das Testszenario mit einem Sonnenstand senkrecht über dem Pkw ab. Bei allen weiteren Punkten ist die Sonne schräg auf den Pkw gerichtet (Tabelle 3).

Tabelle 3: Maximale Elevation für die unterschiedlichen Breitengrade und Jahreszeiten

| Breitengrad | Sommer | Frühling/Herbst | Winter |
|-------------|--------|-----------------|--------|
| 0°N | 67° | 90° | 67° |
| 10°N | 77° | 80° | 57° |
| 20°N | 87° | 70° | 47° |
| 30°N | 84° | 60° | 37° |
| 40°N | 74° | 50° | 27° |
| 50°N | 64° | 40° | 17° |
| 60°N | 54° | 30° | 7° |

Die Simulation mit unterschiedlichen Jahreszeiten und Breitengraden zeigt deutlich unterschiedliche FGR-Temperaturen im Tagesverlauf. Im Folgenden wird aufbauend auf diesen Ergebnissen der Einfluss der Orientierung des Pkw zur Sonne untersucht.

4. Orientierung des Pkw

Zusätzlich zum jahreszeitlichen und geographischen Einfluss der Sonne wird die Orientierung des Pkw zur Sonne in 30°-Schritten um die eigene Achse gedreht. Durch den Einfluss der Orientierung des Pkw zur Sonne ist die maximale mittlere FGR-Temperatur je nach Pkw-Segment, Breitengrad und Jahreszeit zwischen < 1 K bis knapp über 6 K ausgeprägt (Abbildung 2).

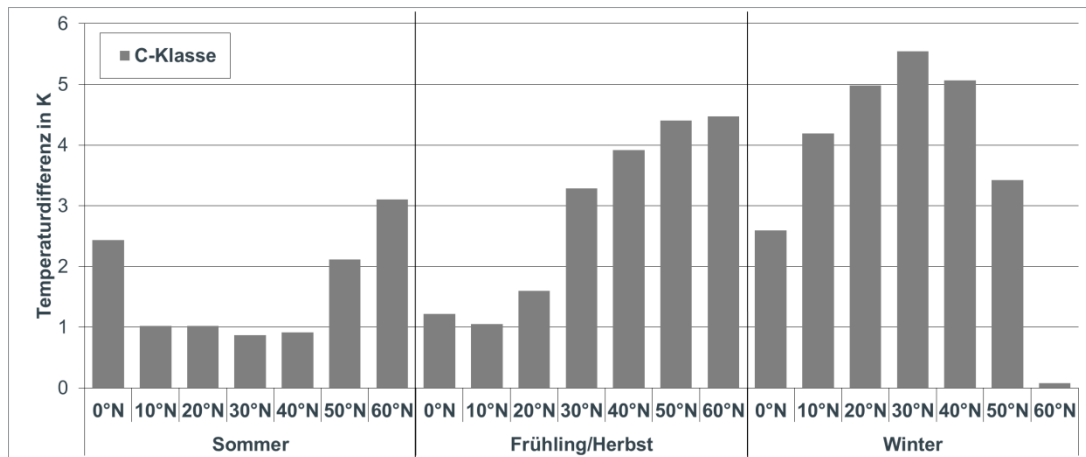


Abbildung 2: Abweichung der mittleren FGR-Temperatur aufgrund unterschiedlicher Orientierung des Pkw zur Sonne am Beispiel des C-Klassemodells

Im Sommer und Frühling/Herbst ist der Einfluss der Drehung ca. 1 K auf die maximale mittlere FGR-Temperatur und im Winter ca. 4 K (Abbildung 3).

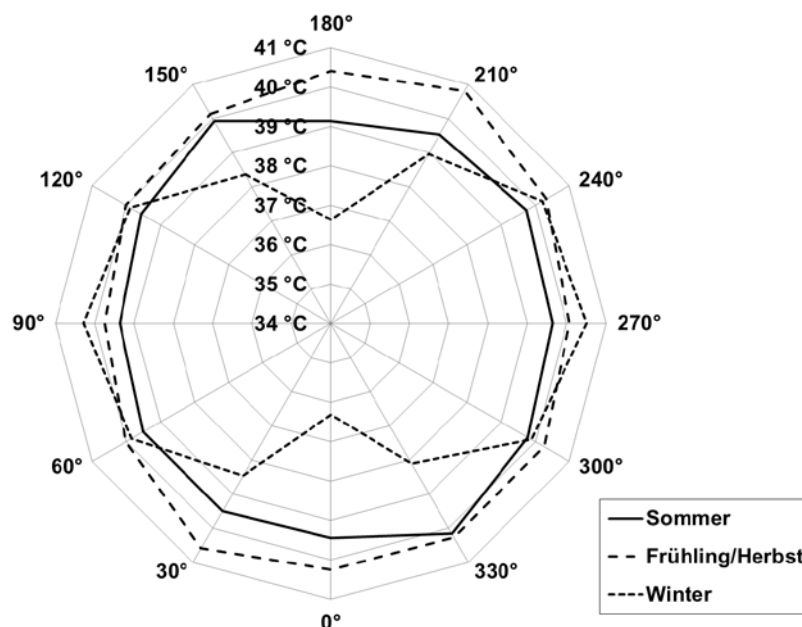


Abbildung 3: Einfluss der Drehung auf die maximale mittlere FGR-Temperatur am Beispiel 10° nördlicher Breite

Tabelle 4: Regionalisierte Ausrichtung für die maximale mittlere FGR-Temperatur je Jahreszeit und Breitengrad einstellt.

| Breitengrad | Jahreszeit | C-Klasse | F-Klasse | SUV | M-Klasse |
|-------------|-----------------|----------|----------|------|----------|
| 0° N | Sommer | 240° | 270° | 270° | 210° |
| | Frühling/Herbst | 0° | 0° | 0° | 180° |
| | Winter | 240° | 270° | 270° | 210° |
| 10° N | Sommer | 330° | 330° | 240° | 150° |
| | Frühling/Herbst | 210° | 210° | 210° | 180° |
| | Winter | 270° | 270° | 270° | 270° |
| 20° N | Sommer | 0° | 180° | 0° | 150° |
| | Frühling/Herbst | 240° | 240° | 270° | 210° |
| | Winter | 270° | 270° | 270° | 270° |
| 30° N | Sommer | 0° | 0° | 210° | 180° |
| | Frühling/Herbst | 270° | 270° | 270° | 270° |
| | Winter | 270° | 270° | 270° | 270° |
| 40° N | Sommer | 210° | 210° | 240° | 180° |
| | Frühling/Herbst | 270° | 270° | 270° | 270° |
| | Winter | 270° | 270° | 270° | 270° |
| 50° N | Sommer | 240° | 270° | 270° | 210° |
| | Frühling/Herbst | 270° | 270° | 270° | 300° |
| | Winter | 90° | 90° | 90° | 270° |
| 60° N | Sommer | 270° | 270° | 270° | 270° |
| | Frühling/Herbst | 270° | 270° | 270° | 270° |
| | Winter | 120° | 120° | 120° | 120° |

Anhand dieser Ergebnisse ist deutlich zu erkennen, dass neben der Jahreszeit und dem Breitengrad auch die Orientierung des Pkw zur Sonne einen signifikanten Einfluss auf die maximale mittlere FGR-Temperatur hat. Aus diesen Ergebnissen lassen sich Ausrichtungen des Pkw, anhand der Jahreszeit und geographischen Breite, für die Simulation ableiten, bei der sich die maximale mittlere FGR-Temperatur einstellt (Tabelle 4).

Die sieben betrachteten Breitengrade mit jeweils drei Jahreszeiten ergeben pro Pkw-Segment 21 verschiedene Parametersätze. Bei vier verschiedenen Pkw-Segmenten kann aufgrund der großen Übereinstimmung der Ergebnisse eine Parameterreduzierung durchgeführt werden. Als Referenz wird das F-Klasse Modell aufgrund der häufigsten Übereinstimmungen mit den anderen FGR-Modellen definiert. Bei den Abweichungen der anderen Modelle handelt es sich entweder um eine Spiegelung der Ausrichtung oder die Abweichung der FGR-Temperatur ist hinreichend klein ($< 0,5$ K), so dass mit ausreichender Näherung eine Segmentbereinigung durchgeführt und die regionalisierte Ausrichtung des Referenzfalls (F-Klasse) übernommen werden kann.

5. Ableitung charakteristischer Randbedingungen

Aufbauend auf den obigen Ergebnissen werden charakteristische Parametersätze als Abbildung des regionalen Sonnenstandes abgeleitet. Dafür muss in der Simulation, zusätzlich

zu den regionalisierten Ausrichtungen, der jeweilig Elevations- und Azimutwinkel bestimmt werden (Tabelle 5). Mit diesen drei Parametern ist es möglich den charakteristischen Einfluss der Sonne am jeweiligen Ort zur jeweiligen Jahreszeit darzustellen. und den Wort Case Fall abzubilden.

Tabelle 5: Regionale Randbedingungen für die thermische Gesamtfahrzeugsimulation

| Breitengrad | Jahreszeit | Ausrichtung | Elevation | Azimut |
|-------------|-----------------|-------------|-----------|--------|
| 0° N | Sommer | 270° | 66° | 191° |
| | Frühling/Herbst | 0° | 72° | 268° |
| | Winter | 270° | 54° | 227° |
| 10° N | Sommer | 330° | 66° | 317° |
| | Frühling/Herbst | 210° | 59° | 251° |
| | Winter | 270° | 56° | 189° |
| 20° N | Sommer | 0° | 65° | 284° |
| | Frühling/Herbst | 240° | 58° | 232° |
| | Winter | 270° | 45° | 194° |
| 30° N | Sommer | 0° | 61° | 264° |
| | Frühling/Herbst | 270° | 58° | 200° |
| | Winter | 270° | 36° | 192° |
| 40° N | Sommer | 210° | 58° | 249° |
| | Frühling/Herbst | 270° | 48° | 198° |
| | Winter | 270° | 26° | 189° |
| 50° N | Sommer | 270° | 66° | 190° |
| | Frühling/Herbst | 270° | 39° | 194° |
| | Winter | 90° | 16° | 190° |
| 60° N | Sommer | 270° | 48° | 219° |
| | Frühling/Herbst | 270° | 29° | 194° |
| | Winter | 120° | 6° | 187° |

Da für die Auslegung der Pkw-Klimatisierung die höchste FGR-Temperatur des jeweiligen Breitengrades von Interesse ist, kann die Tabelle 5 auf insgesamt sieben Parametersätze reduziert werden, einen je Breitengrad (Tabelle 6).

Tabelle 6: Ausrichtung zur Ermittlung der höchsten mittleren FGR-Temperatur

| Breitengrad | Jahreszeit | Ausrichtung | Elevation | Azimut |
|-------------|-----------------|-------------|-----------|--------|
| 0° N | Winter | 270° | 54° | 227° |
| 10° N | Frühling/Herbst | 210° | 59° | 251° |
| 20° N | Frühling/Herbst | 240° | 58° | 232° |
| 30° N | Sommer | 0° | 61° | 264° |
| 40° N | Sommer | 210° | 58° | 249° |
| 50° N | Sommer | 270° | 66° | 190° |
| 60° N | Sommer | 270° | 48° | 219° |

6. Einfluss der regionalisierten Ausrichtung auf den Energieverbrauch

Mit den Parametersätzen aus Tabelle 6 ist es möglich, die maximal auf den Fahrgastraum auftretende Last durch die Sonne mit der thermischen Gesamtfahrzeugsimulation abzubilden. Durch eine virtuelle Vergleichsfahrt bei gleichen Umgebungs- und Fahrbedingungen kann eine Bewertung des Klimatisierungsmehrverbrauchs aufgrund der regionalen Sonnenstände im Verhältnis zu dem Testszenario (VDA Pull down; Sonne senkrecht von oben, $\dot{Q}_{\text{Solar}}=850 \text{ Wm}^{-2}$) ausgewiesen werden (Abbildung 4).

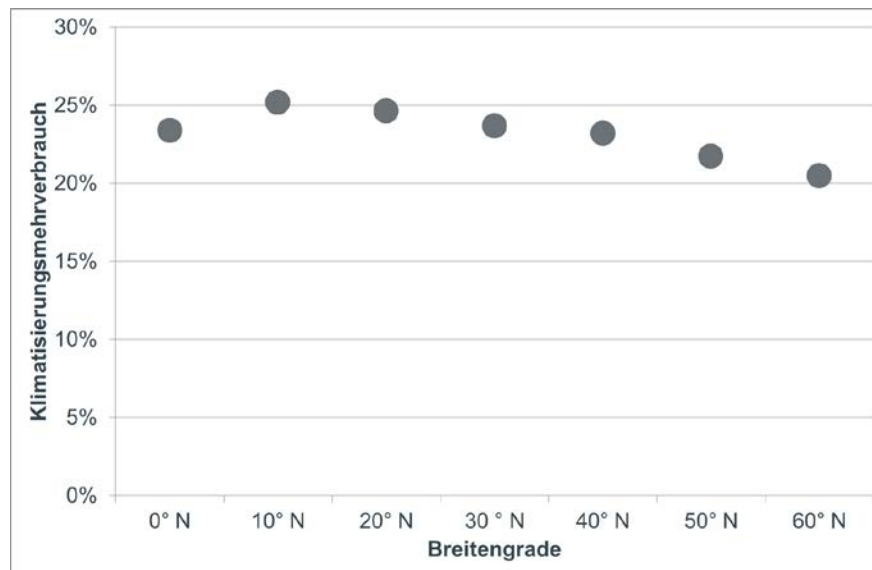


Abbildung 4: Klimatisierungsmehrverbrauch durch regionale Sonnenstände im Vergleich zum Testszenario mit der Sonne senkrecht von oben

Zu sehen ist, dass die Szenarien mit der regionalisierten Ausrichtung zu einer deutlichen Erhöhung der benötigten Klimatisierungsleistung von 20 bis 25 % in einem NEFZ führen.

7. Diskussion der Ergebnisse

Die hier vorgestellten Ergebnisse basieren auf einem 1D-Generatormodell des Fahrgastraums. In diesem Generatormodell wird beispielsweise nur eine gemittelte Temperatur dargestellt und keine Temperaturverteilung an Bauteilen. Dafür erhöht sich auch die Rechengeschwindigkeit des Modells. Der Innenraum besteht nur aus einer Luftzone, in der nur eine mittlere Lufttemperatur berechnet wird. Fein aufgelöste Luftschichtungen und somit Unterschiede zwischen Fuß- und Kopfbereich können mit diesem Modell nicht dargestellt werden. Anwendungen aus der Praxis haben jedoch gezeigt, dass dieses 1D-Generatormodell den tatsächlichen FGR mit hinreichender Genauigkeit abbildet.

Die regionale Parametersätze können bei virtuellen Testfahrten zur Abbildung des regionalen Sonnenstandes eingesetzt werden. Wie in den Ergebnissen zu sehen ist, steigt der Klimatisierungsverbrauch aufgrund extremer Solarexposition deutlich an. Die Klimatisierung ist der größte Nebenverbraucher im Elektrofahrzeug ist und somit einen entscheidenden Einfluss

auf die Reichweite. Die hier ermittelten Ergebnisse können in die Auslegung von Pkw-Klimaanlagen mit einfließen.

8. Fazit

Die Untersuchungen zum regionalen Sonnenstand haben gezeigt, dass sich modellunabhängige und segmentbereinigte regionale Parametersätze für alle geographischen Breiten und Jahreszeiten ableiten lassen (Tabelle 5). Die Parametersätze werden durch die Orientierung des Pkw sowie Elevationswinkel und Azimutwinkel dargestellt. Wenn ausschließlich die maximal zu erreichenden mittleren Lufttemperaturen bestimmt werden sollen, ist der Fall einer Solarstrahlung senkrecht von oben nicht das Worst Case Szenario. Dies wird meistens durch eine Ausrichtung des Pkw mit der Windschutzscheibe nach Osten und einem Sonnenstand in südwestlicher Richtung (nachmittags) erreicht. Die Ergebnisse für alle untersuchten Breitengrade und Jahreszeiten sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Weiterhin wurde für jede geographische Breite eine Jahreszeit bestimmt, bei der die maximalen mittleren Lufttemperaturen erreicht werden (Tabelle 6). Die Verwendung der regionalisierten Ausrichtungen anstelle einer Solarstrahlung senkrecht von oben führt zu einem Klimatisierungsmehrverbrauch im NEFZ von bis zu 25 %. Aus diesem Grund sollten für regionale Extrembedingungen die entsprechenden Ausrichtungen nach Tabelle 6 verwendet werden.

Literatur

- [1] DIN 1946-3,: Raumluftechnik - Teil 3: Klimatisierung von Personenkraftwagen und Lastkraftwagen. Berlin, 2006
- [2] Köhler, J.; Kuhn B.; Sonnekalb M. J.; Behr, H.: Numerical calculation of the distribution of temperature and heat flux in buses under the influence of the vehicle air-conditioning system. In: ASHRAE Trans 96.1n 96 (1990), Nr. 1, S. 432–446
- [3] Duffie, J. A.; Beckmann, W. A.: Solar engineering of thermal processes. 4th Edition. John Wiley and Sons Ltd, 2012. – ISBN
- [4] Paulke, S.; Köster, D.; Hass, R.; Bader, V.; Menzel, S.; Gubalke, A.: Thermische Simulationen einer Volkswagen e-Golf-Fahrzeugkabine unter Einbezug von thermischen Menschmodellen, 2014
- [5] Fahrzeugsegmente (Europäische Kommission); Case No COMP/M.5518; Brüssel; 23.6.2009
- [6] P+Z Engineering GmbH: THESEUS-FE Theory manual; Version 5.1.03.; 2015