

# Thermische Modellierung eines doppelstöckigen Wagenkastens für Next Generation Train.

Ivan Windemut, Mathias Böhm  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
Institut für Fahrzeugkonzepte  
*ivan.windemut@dlr.de*

Die wachsenden Komfortansprüche der Reisenden, die aufgrund des Klimawandels immer extremer werdenden Witterungsbedingungen sowie der grenzüberschreitende Schienenverkehr über verschiedene Klimazonen erfordern einen erhöhten Energieaufwand für die Klimatisierung der Fahrgasträume und der Führerstände. Dem gegenüber steht die Forderung der Betreiber und der Politik nach energieeffizienteren Schienenfahrzeugen. Darüber hinaus müssen thermische Eigenschaften von neuartigen Materialien, die durch den angestrebten Leichtbau vermehrt in Schienenfahrzeugen Anwendung finden, untersucht werden.

Zur Ermittlung äußerer und innerer Einflussfaktoren, wie Wärme- und Feuchtigkeitslasten, wurde mittels der Human Comfort Bibliothek der XRG Simulation GmbH ein thermisches Wagenkastenmodell entwickelt, welches neben der Geometrie, den verwendeten Materialien und den bahnspezifischen Normen und Vorschriften das Wohlbefinden der Fahrgäste berücksichtigt. Das thermische Wagenkastenmodell wurde in einen virtuellen Prüfstand, der mit Hilfe der auf der DLR-Bibliothek AlternativeVehicles [1] basierenden RailwayVehicles Bibliothek aufgebaut ist, integriert. Durch die Kopplung der thermischen Modelle mit den Schienenfahrzeugmodellen werden strecken-, geschwindigkeits- und wetterabhängige Simulationen ermöglicht.

In Anbetracht der Herausforderungen, die heute an moderne Schienenfahrzeuge gestellt werden, wurden mehrere Situationen wie z.B. Fahrt an einem sonnigen Sommertag, Fahrt in einer eisigen Winternacht sowie Fahrten mit Voll-, Teil- und Nullbesetzung untersucht und Heiz- und Kühlleistungsbedarfe ermittelt. Aus den Simulationsergebnissen werden Anforderungen an die Auslegung der elektrischen Bordnetze abgeleitet um somit zu einer sicheren Versorgung der Komforteinrichtungen beizutragen.

## 1 Einleitung

Wachsendes Passagieraufkommen im Personennah- und Fernverkehr und steigende Energiepreise machen es notwendig, effizientere Antriebs- und Energiekonzepte auf die Schiene zu bringen. Daher wird am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), in Zusammenarbeit mit acht weiteren Instituten an einem neuartigen Zug für den Hochgeschwindigkeitsverkehr, dem Next Generation Train (NGT), geforscht.

Ziele dieser Forschung sind unter anderem:

- Niedrigerer spezifischer Energieverbrauch (50 %) gegenüber dem ICE3
- Verringerung des Verschleißes und der Lebenszykluskosten
- Höhere betriebliche Fahrgeschwindigkeit von 400 km/h
- Intelligentes Energiemanagement
- Konsequenter Leichtbau unter Einsatz modernster Materialien

Der Ultrahochgeschwindigkeitszug wird für transeuropäische (oder vergleichbar lange) Strecken konzipiert und muss in Sachen Fahrgastkomfort den höchsten Ansprüchen genügen. Da der Energieverbrauch der Klimatisierungsanlagen in diesem Zusammenhang einen nicht unerheblichen Teil des Gesamtenergieverbrauches darstellt (beim ICE3 5-10% [2]), müssen die thermischen Vorgänge im Wagenkasten des Next Generation Trains quantifiziert werden. Dafür werden äußere und innere Einflussfaktoren identifiziert und bei der Modellierung berücksichtigt. Zu solchen Faktoren zählt vor allem die Geometrie des Wagenkastens, die Materialzusammensetzung und Schichtdicke der Wände, klimatische Einsatzbedingungen, Fahrgeschwindigkeit, aber auch die Wärme- und Feuchtigkeitsabgabe der Fahrgäste und der Einrichtungsgegenstände.

Um konkrete Aussagen über den streckenabhängigen Energieverbrauch der Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)-Anlagen eines Zuges machen zu können, wurde mit Hilfe von Modelica/Dymola

ein thermisches Wagenkastenmodell aufgebaut, welches die zuvor genannten Einflussfaktoren berücksichtigt. Dieses Modell wurde nachfolgend in ein energetisches Gesamtzugmodell aus der auf der DLR-Bibliothek Alternative Vehicles (AV) basierenden Railway Vehicles Bibliothek (RV) integriert.

Mit Hilfe des energetischen Gesamtzugmodells lassen sich Maßnahmen zur Verbesserung der Energiebedarfswerte und ggf. zur Minderung einiger gravierender Einflussfaktoren identifizieren. Dieses gilt sowohl für Neuentwicklungen wie NGT, als auch für bestehende Schienenfahrzeuge.

## 2 Thermisches Wagenkastenmodell

Das thermische Wagenkastenmodell (TWKM) wurde in der Simulationsumgebung Dymola erstellt. Dieser Simulationssoftware von Dassault Systemes liegt die objektorientierte und gleichungsbasierte Programmiersprache Modelica zugrunde. Für die Simulation werden in einem Modelica-Modell Komponenten basierend auf Differential-, algebraischen und diskreten Gleichungen aufgebaut. Danach werden die Gleichungen aller Komponenten und aller Verbindungen zu einem Gesamtgleichungssystem zusammengefasst. Da die direkte numerische Lösung bezüglich der Rechenzeit in der Regel ineffizient ist, werden Transformationsalgorithmen angewendet, um das Ausgangsgleichungssystem in eine durch ein Standard-Integrationsverfahren lösbare Form zu transformieren [3].

Grundelemente aus verschiedenen Fachdisziplinen wie Thermodynamik, Elektrotechnik oder Mechanik stehen dem Anwender durch eine kostenfreie Bibliothek, die Modelica Standard Library, zur Verfügung. Darüber hinaus existieren kommerzielle Modelica-Bibliotheken, wie z. B. die HumanComfort Library von XRG Simulation GmbH zur Simulation der thermischen Behaglichkeit, die Alternative Vehicles Library vom DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte zur Simulation von neuartigen Straßenfahrzeugen oder auf der letzteren basierende Railway Vehicles Library zur Simulation von Schienenfahrzeugen.

### 2.1 Ziele der Modellierung

Zur Abschätzung des Energiebedarfs zur Klimatisierung von unterschiedlichen Mittelwagenkonzepten aber auch zur Identifikation und Quantifizierung von äußeren und inneren Einflussfaktoren wurde das thermische Wagenkastenmodell als Umgebung für die simulationstechnische Untersuchung unterschiedli-

cher Klimaanlageentypen entwickelt. Dieses Modell kann mit wenig Aufwand an unterschiedliche doppelstöckige Züge angepasst werden. Das liegt zum einen an der guten Ausnutzung des bahnspezifischen Lichtraumprofils durch den NGT und den darauf basierenden geometrischen Vereinfachungen im Rahmen der Modellbildung, zum anderen aber an der Integration der Materialdaten als Parametersätze (Records).

Durch die Verwendung der HumanComfort Library (HCL), war eine genaue Nachbildung des mehrschichtigen Wand- und Fensteraufbaus möglich [4]. Die Modelle der HCL sind bereits verifiziert und wurden daher als Referenz herangezogen.

Die große Anzahl der Einflussfaktoren erfordert komplexe Modelle mit mehrstufiger Parametervererbung, was die Simulationszeit verlängert und Maßnahmen zur Minimierung der Rechenzeit notwendig macht. Eine solche Maßnahme stellt die vereinfachte Betrachtung thermodynamischer Vorgänge dar. Als Beispiel kann das Außerachtlassen von Wärmebrücken oder die eindimensionale Betrachtung der Wärmeleitung im Festkörper genannt werden. Solche Vereinfachungen sind im Fall NGT durchaus zulässig, da die aus CFK aufgebaute Wagenhülle schlechter Wärmeleiter ist. Für jedes weitere Wagenkastenkonzept müssen diese aber einzeln geprüft werden.

### 2.2 Modellaufbau

#### 2.2.1 Einflussfaktoren

Die inneren Einflüsse auf einen Fahrgastraum sind die Wärme- und Feuchtigkeitsabgabe der Fahrgäste und der inneren Einrichtung. Diese sind in der HCL implementiert und wurden im Wagenkastenmodell als fertiger Baustein verwendet [4]. Da für die Inneneinrichtung des NGT kein Wärmemanagement notwendig ist, wird das Untermodell auch entsprechend parametrisiert.

Die äußeren Einflüsse sind hauptsächlich durch die DIN EN 13129 - „Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs“ festgelegt [5]. In der Norm sind für Europa drei klimatische Zonen definiert, wobei für jede Zone die niedrigste und die höchste Außentemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und die Strahlungsleistung der Sonne vorgegeben sind (vgl. Tabelle 1). Diese Faktoren werden durch das Untermodell „Weather“ aus HCL miteinbezogen. Weitere Außenbedingungen werden dem TWKM von dem virtuellen Prüfstand zur Verfügung gestellt.

Klima- zone	Niedrigste Außen- tempera- tur	Höchste Außen- tempe- ratur	Relative Luft- feuch- tigkeit	Strah- lungslei- stung Son- ne
Zone I	-10 °C	+40 °C	40%	800 W/m <sup>2</sup>
Zone II	-20 °C	+35 °C	50%	700 W/m <sup>2</sup>
Zone III	-40 °C	+28 °C	45%	600 W/m <sup>2</sup>

Tabelle 1. Klimazonen in Europa [5]

Zusammenfassend wird die Wärmebilanz (1) des Fahrgastraums in Abbildung 1 dargestellt.

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{Q}_{Tr} + \dot{Q}_L + \dot{Q}_P + \dot{Q}_{St} + \dot{Q}_M \quad (1)$$

Dabei bedeuten:

- $\dot{Q}_{Tr}$  - Transmissionswärmestrom;
- $\dot{Q}_L$  - Verlustwärmestrom durch Abluft;
- $\dot{Q}_P$  - Wärmestrom einer Person;
- $\dot{Q}_{St}$  - Strahlungswärmestrom.

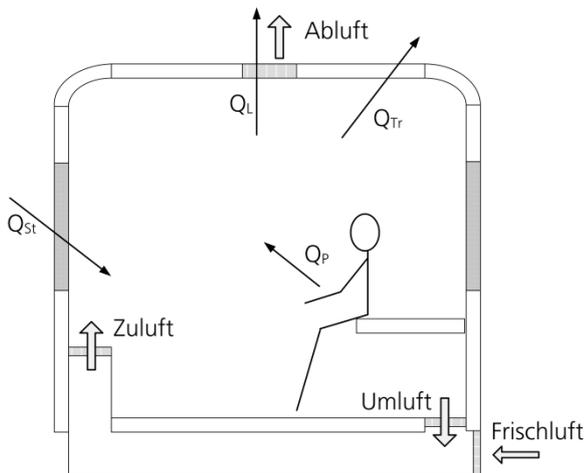


Abbildung 1. Wärmebilanz des Fahrgastraums [6]

### 2.2.2 Geometrische Vereinfachung für NGT

Für die thermische Modellierung des NGT ist es ausreichend einen Doppelstockwagenkasten, nicht aber den Gesamtzug zu betrachten. Der Energieverbrauch des Gesamtzuges kann anschließend durch lineare Interpolation bestimmt werden. Durch diese Vereinfachung wird der Rechenaufwand minimiert und der Modellierungsaufwand verringert. In diesem Zusammenhang werden die beiden Stirnseiten des Wagens als adiabate Grenzen angesehen. Es findet also kein Wärmeaustausch zwischen diesen Flächen und der Umgebung statt.

Der Wagenkasten wurde in einen Fahrgastraum und zwei Fahrwerkssegmente aufgeteilt (Abbildung 2).



Abbildung 2. Aufteilung des NGT-Wagenkastens

Die Gründe für die Aufteilung sind der unterschiedliche geometrische Aufbau der Teilbereiche, die Position der Türen, die Aussparungen für die Fahrwerke sowie die Verwendung unterschiedlicher Materialien der Fahrzeughülle. Außerdem wurde der Einfluss der Fahrgäste ausschließlich im Fahrgastraum betrachtet.

Der verwendete Querschnitt des Wagenkastens ist in der Abbildung 3 dargestellt.

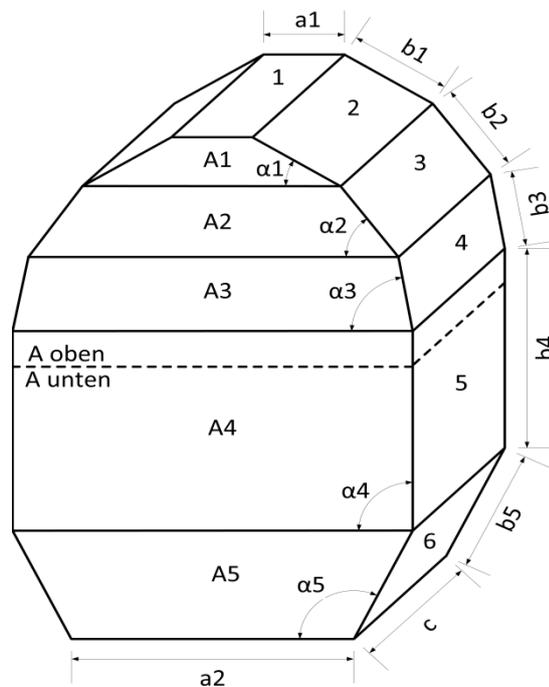


Abbildung 3. Querschnitt des NGT-Wagenkastens

Da mit den Wand- und Fenstermodellen aus HCL nur ebene Flächen dargestellt werden können, die des NGT jedoch gewölbt sind, war es notwendig, Korrekturfaktoren für Flächen und Volumina einzuführen. Die realen Flächeninhalte wurden dazu aus dem CAD-Modell bestimmt.

Mit den Winkeln  $\alpha_1$  bis  $\alpha_5$  wurde die Flächenausrichtung gegenüber dem Horizont dargestellt, welche für die Berechnung der Sonneneinstrahlung maßgeblich ist.

In der Abbildung 4 ist das Modell des Fahrgastraums dargestellt. Das Fahrwerksegment unterscheidet sich von diesem durch fehlende Fahrgäste und vorhandene Türen. Die Abbildung 5 zeigt abschließend das Gesamtmodell.

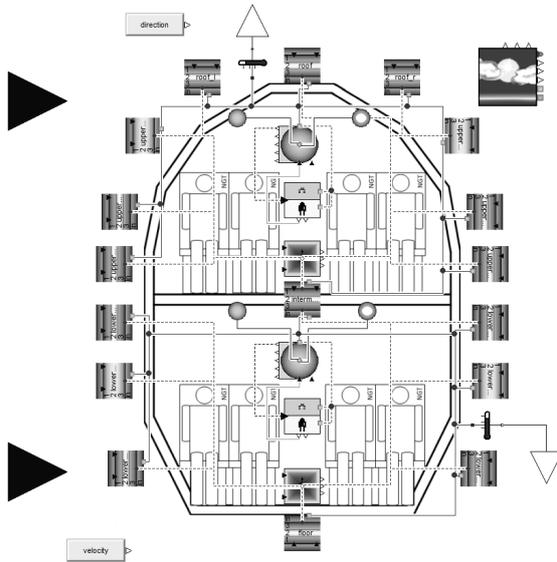


Abbildung 4. Fahrgastraummodell

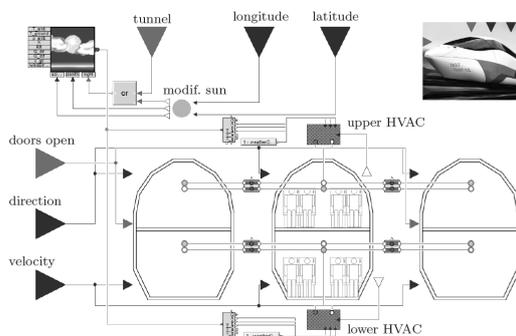


Abbildung 5. Thermisches Wagenkastenmodell NGT

### 2.3 Virtueller Prüfstand

Dem in der Abbildung 6 dargestellten virtuellen Prüfstand für das thermische Wagenkastenmodell liegt das nach NGT-Spezifikationen aus [7] und [8] parametrisierte SimpleTrain2-Modell aus der RV-Bibliothek zugrunde. Das SimpleTrain2-Modell ist ein Zugmodell für die Simulation und Bewertung von Triebzügen mit elektrischen, diesel-elektrischen sowie diesel-hydraulischen Antrieben. Mit Hilfe der SimpleTrain2-Architektur werden am DLR unter anderem energetische Untersuchungen zur Antriebsleistung in Abhängigkeit von fahrzeugcharakteristischen Eigenschaften wie z.B. Fahrzeuggewicht, Roll- und Luftwiderstand durchgeführt.

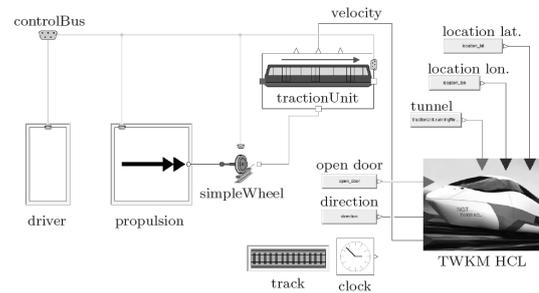


Abbildung 6. TWKM im virtuellen Prüfstand

Durch das Zusammenfügen beider Modelle war es möglich, die wetterabhängige Simulationen streckenbezogen zu gestalten. Dem Wagenkastenmodell werden die Informationen über aktuelle Fahrgeschwindigkeit, Zugausrichtung, Tunnel und Stationen bezogen auf die Zugposition zur Verfügung gestellt. Aus diesen berechnet das Wagenkastenmodell die Konvektionsverluste, die Sonneneinstrahlung sowie die Wärmeverluste durch offene Türen und zieht die Bilanz unter Berücksichtigung der Fahrgastraumerwärmung durch Fahrgäste. Die Ermittlung der Sonneneinstrahlungsleistung erfolgt aus den geografischen Zugkoordinaten und der Tageszeit mit Hilfe eines modifizierten SUN-Modells aus der HCL. Daher ist die Angabe der Startzeit notwendig.

### 2.4 Ergebnisse der Simulationen

Den hier vorgestellten Simulationen liegen folgende Parameter zugrunde: NGT-HGV-Geometrie, Materialien und Abmessungen; jede der zwei Ebenen ist mit einer auf die Innenraumtemperatur von 22°C ideal geregelten Klimaanlage im Außenluftbetrieb ausgestattet; Sitzplatzkapazitäten sind 64 auf der oberen Ebene und 48 auf der unteren; der Zug ist zu Anfang weder vorgeheizt noch vorgekühlt. Als Referenzstrecke dient eine hypothetische Strecke von Paris nach Wien. Sie ist ca. 1230 km lang und die Fahrzeit beträgt mit dem gewählten Geschwindigkeitsprofil ca. 5 Stunden. Der Streckenverlauf und das Geschwindigkeitsprofil sind in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt.



Abbildung 7. Referenzstrecke NGT

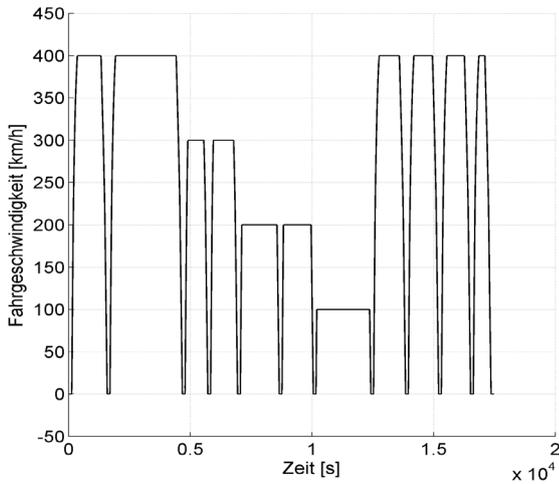


Abbildung 8. Fahrprofil NGT

Die Abbildung 9 zeigt den Energiebedarf der Klimaanlage im Heizbetrieb. Dabei handelt es sich um thermische Leistung. Die Außenlufttemperatur von  $-10^{\circ}\text{C}$ , relative Luftfeuchtigkeit von 50% und die Sonneneinstrahlung von 0 Watt werden zusammenfassend als Fall „Winter Nacht“ bezeichnet. Dabei ist der Zug auf beiden Ebenen vollbesetzt.

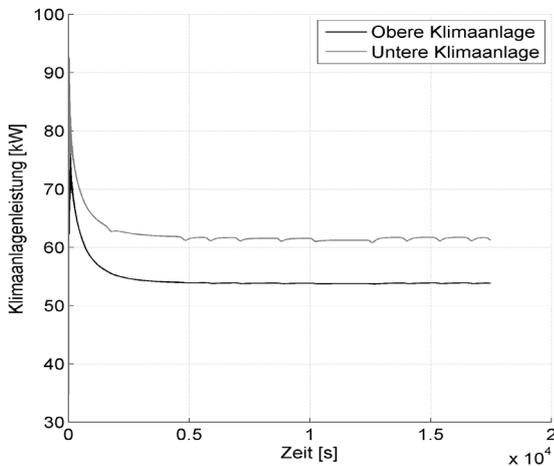


Abbildung 9. Heizbetrieb; Winter Nacht, vollbesetzt

Die obere Klimaanlage benötigt weniger Heizleistung als die untere. Das ist zum einen durch das kleinere Volumen zum anderen durch die größere Anzahl der Fahrgäste im oberen Bereich zu erklären. Aus dem gleichen Grund sind die geschwindigkeitsabhängigen Konvektionsverluste im unteren Bereich stärker ausgeprägt.

In der Abbildung 10 ist der Energiebedarf der Klimaanlage im Kühlbetrieb dargestellt. Unter der Be-

zeichnung „Sommer Tag“ sind die Außentemperatur von  $28^{\circ}\text{C}$ , relative Luftfeuchtigkeit von 70% und die Sonneneinstrahlung von max. 700 Watt zusammengefasst.

Der Sonnengang wird ausgehend von der Startzeit am 21. Juni um 12:00 Uhr und der aktuellen geografischen Zugposition berechnet. Der Besetzungsgrad beträgt auf beiden Ebenen 100%.

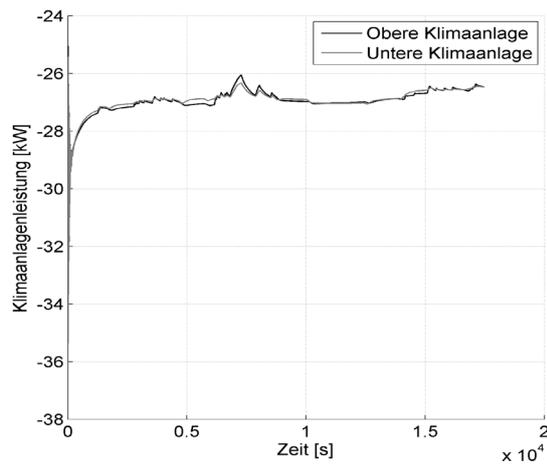


Abbildung 10. Kühlbetrieb; Sommer Tag, vollbesetzt

Die Energiebedarfe der Klimaanlage sind in diesem Fall nahezu identisch. Die Spitzen kommen durch die fehlende Sonneneinstrahlung in den auf der Strecke vorhandenen Tunnel zustande. Die große Spitze im mittleren Bereich kennzeichnet den neuen Stuttgarter Hauptbahnhof, einen Durchgangsbahnhof in Tieflage mit unterirdischen Zulaufstrecken [9], in dem der NGT einen planmäßigen Halt hat.

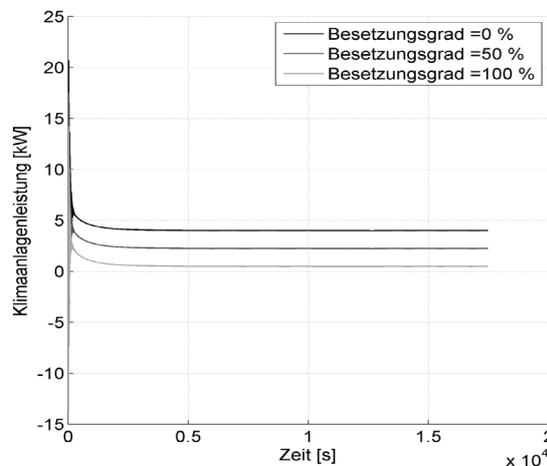


Abbildung 11. Obere Klimaanlage bei variablem Besetzungsgrad (Sommer Nacht)

Die Abbildung 11 und die Abbildung 12 zeigen exemplarisch die Abhängigkeit der Klimaanlageleistungen vom Besetzungsgrad. Als Außenbedingung wurde der Fall „Sommer Nacht“ (Außenlufttemperatur von 18°C, relative Luftfeuchtigkeit von 80%, keine Sonneneinstrahlung) gewählt.

Der Besetzungsgrad wurde in zwei Schritten von 0% auf 100% erhöht. Dabei fällt der Bedarf an Heizleistung bei der oberen Klimaanlage von 4 kW auf 0,5 kW und bei der unteren Klimaanlage von 5 kW auf 2 kW. Der Grund dafür ist die Wärmeabstrahlung der Fahrgäste. Die Leistungsdifferenz zwischen den Ebenen lässt sich durch die Geometrieunterschiede und ungleiche Sitzplatzkapazitäten erklären.

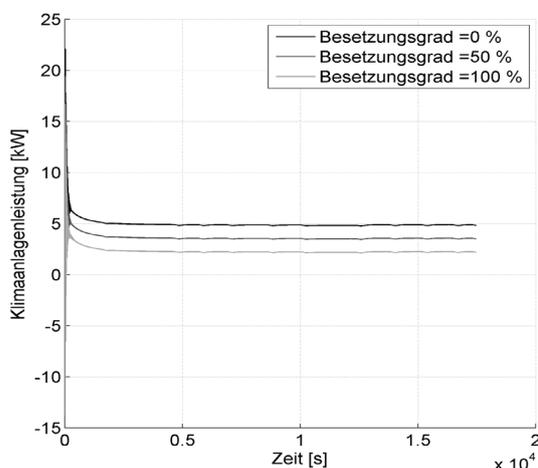


Abbildung 12. Untere Klimaanlage bei variablem Besetzungsgrad (Sommer Nacht)

### 3 Ausblick

Das vorgestellte thermische Wagenkastenmodell erlaubt es, thermodynamische Vorgänge in einem beliebigen doppelstöckigen Wagenkasten zu untersuchen. Die hierzu notwendigen Anpassungen und Umparametrisierungen sind mit geringem Aufwand durchführbar. Durch die erfolgreiche Kopplung der Bibliotheken RV und HCL wurde nicht nur die komplexe Geometrie des NGT-Wagenkastens abgebildet, sondern auch schienenfahrzeugspezifische äußere Einflüsse (Tunnelfahrt, schneller Wechsel der Witterungsbedingungen, Bahnhofshalt, etc.) wurden berücksichtigt.

Einer der weiteren Schritte ist der Ausbau des Fahrgastmodells, welcher die Ergebnisse der momentan im Rahmen des NGT-Projekts laufenden psychologischen Untersuchungen des Komfortempfindens mit-

einbezieht. Des Weiteren werden die Temperaturschichtung im Fahrgastraum und ein komplexeres Klimaanlage-Modell mit Möglichkeit des Umluftbetriebs implementiert. Darüber hinaus ist es angedacht, die Simulationsergebnisse mit einem realen physikalischen Versuchsaufbau zu überprüfen.

### 4 References

- [1] J. Ungethüm, D. Hülsebusch, H. Dittus und T. Braig. *Simulation von alternativen Fahrzeugantrieben in Modelica*. Workshop der ASIM/GI-Fachgruppe, 2010.
- [2] C. Klose. *Reduzierung des Energiebedarfs von Hochgeschwindigkeits-Triebzügen durch ein Verfahren zur Systemoptimierung der Steuerung von Triebfahrzeugen*. Dissertation, TU Dresden, Deutschland, 1999.
- [3] M. Otter und C. Schweiger. *Modellierung mechatronischer Systeme mit Modelica*. Mechatronischer Systementwurf, S. 39-50, 2004.
- [4] XRG Simulation GmbH. *Human Comfort Library 1.2, User's Guide*, 2012.
- [5] DIN EN 13129-1. *Bahn Anwendungen-Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs-Teil 1: Behaglichkeitsparameter*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2003.
- [6] K. Töpfer. *Grundausrüstungen*. VEB Verlag für Verkehrswesen Berlin, DDR, 1983.
- [7] T. Weiler. *Electric propulsion concept for an energy-efficient high speed train*. International Conference of Ecological Vehicles and Renewable Energies, 2011.
- [8] T. Braig. *Bremskonzept NGT HGV*. Next Generation Train - Bericht AP 1411. DLR intern. 2011.
- [9] DB AG und Projektpartner. *Finanzierungsvertrag Stuttgart 21, Anlage 3.2a*. [Online] [www.bahnprojekt-stuttgart-ulm.de/uploads/tx\\_smediamediathek/Finanzierungsvertrag\\_An\\_1\\_3\\_2a.pdf](http://www.bahnprojekt-stuttgart-ulm.de/uploads/tx_smediamediathek/Finanzierungsvertrag_An_1_3_2a.pdf), 2009.