



Lucerne University of
Applied Sciences and Arts

**HOCHSCHULE
LUZERN**

Technik & Architektur



Bundesamt für Verkehr BAV

swisselectric
research

Forschungsbericht 2015

Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im Öffentlichen Verkehr Teil 2: Modul 2 und 3

Urs-Peter Menti, Franz Sidler, Johannes Maderspacher, Dominic Jurt, Nadège Vetterli, Eveline Thaler, Gerhard Zweifel, René Stockhaus

Hochschule Luzern – Technik & Architektur

Zentrum für Integrale Gebäudetechnik

Technikumstrasse 21, 6048 Horw

+41 41 349 33 17

urs-peter.menti@hslu.ch

Dauer des Projekts: 01.04.2012 – 31.12.2016

Datum: 07.12.2015

Dank

Ohne Forschungsidee kann kein Forschungsprojekt realisiert werden. Die Idee dieses Projekts und die Initiative dieses umzusetzen verdanken wir Professor Dr. Peter Oelhafen des Departements Physik der Universität Basel. Dafür und für die Leitung des Projekts sowie die gute Zusammenarbeit möchten wir uns herzlich bedanken.

Wir bedanken uns bei swisselectric research (Dr. Martin Kauert), beim Bundesamt für Verkehr (Dr. Tristan Chevroulet und Dr. Stefan Schnell) und beim Bundesamt für Energie (Herr Martin Pulver) für die finanzielle Unterstützung. Ohne diese Finanzpartner wäre es nicht möglich gewesen, dieses Projekt in dieser Form umzusetzen.

Des Weiteren möchten wir uns bei allen am Projekt beteiligten Forschungspartnern für die gute Zusammenarbeit und den spannenden Austausch bedanken. Einen besonderen Dank gilt Herrn Andreas Tonin vom Departement Physik der Universität Basel. Ein Grossteil der im Modul 2 und Modul 3 verwendeten Messdaten basiert auf seinen Messungen. Wir bedanken uns auch bei Dr. Andreas Schüler (Laboratoire d'Energie Solaire LESO der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL), Dr. Samuel Brunner (EMPA), Herrn Stefan Menth (emkamatik GmbH), Herrn Hans Burkard (OPIT Solutions AG), Herrn Lutz Boeck (FAIVELEY Transport Leipzig) und Herrn Peter Wüst (Ecotrans GmbH).

Während des Projektes waren wir oft auf die Unterstützung der verschiedenen Bahnbetreiber angewiesen. Darum gilt auch diesen unser Dank, insbesondere Herrn Christof Isenschmid (BLS), Herrn Matthias Müri (RhB), Herrn Martin Burkhard, Herrn Andreas Gerber, Herrn Daniel Toggweiler (alle drei SOB) und den Herren Ralf Hofer sowie Matthias Tuchs Schmid (beide SBB).

1. Management Summary

Ein hoher Anteil an elektrischer Energie wird in Zügen neben dem Antrieb (Traktion) für die Komforteinrichtungen wie Heizung, Lüftung und Kühlung (HLK) der Fahrgasträume und technischer Komponenten benötigt. Relevante Faktoren für diesen Energieverbrauch sind die thermischen Eigenschaften des Fahrzeuges, die implementierte Steuerungstechnik und betriebliche Parameter wie die täglichen Fahrdistanzen, die Standzeiten und der Energieverbrauch für die Traktion.

Für das Forschungsprojekt zur Reduzierung des Energieverbrauchs von Heizung, Lüftung und Kühlung im öffentlichen Verkehr bearbeitet das Zentrum für Integrale Gebäudetechnik (ZIG) der Hochschule Luzern – Technik & Architektur folgende Module:

- Modul 2 “Modellierung von HLK-Energieverbrauch und Komfortparameter der Fahrzeuge“
- Modul 3 “Identifikation der Massnahmen mit dem grössten Einsparpotential und kleinstem Umsetzungsaufwand“

Dabei werden Massnahmen unterschiedlichster Art ausgearbeitet um den Energieverbrauch bei mindestens gleich bleibendem Komfort zu reduzieren. Zudem werden die Potenziale mittels Simulationsrechnungen quantifiziert.

Im Projekt werden insgesamt sechs verschiedene Fahrzeuge von verschiedenen Schweizer Bahngesellschaften analysiert:

- NINA (BLS)
- EW II (RhB)
- EW IV (RhB)
- Pano GEX (RhB)
- Flirt (SOB)
- ICN (SBB)

Für die Erstellung der thermischen Simulationsmodelle der verschiedenen Fahrzeuge werden die Fahrzeughülle und die Fahrzeugstruktur berücksichtigt. Weiter fließen die HLK-Technik inklusive der Regelung, die Nutzung, wie die Betriebsweise der Systeme und Anwesenheit der Fahrgäste, die Klimadaten und Fahrdaten wie Standort, Ausrichtung und Fahrgeschwindigkeit in die Simulationsmodelle ein. Die benötigten Daten aus der Zugsautomation werden aus dem Anlagenbeschrieb für die Regelung in der Simulation übersetzt.

Die Validierung erfolgt aufgrund der Messergebnisse aus Modul 1 und aufgrund von Resultaten aus zusätzlich durchgeführten Messungen wie Aufheizversuchen zur Ermittlung des Auskühlverhaltens des Fahrzeuges, Luftdichtigkeitsmessungen mittels Tracergas und Thermographieaufnahmen.

Bei zwei Fahrzeugen der RhB (EW II und Pano GEX) wurden zur Ermittlung der effektiven Passagierzahlen (dynamisch pro Teilstrecke) Personenzählungen durchgeführt. Mit Hilfe dieser Daten konnte ein Modell entwickelt werden, welches die jeweilige Anzahl der anwesenden Fahrgäste aufgrund der CO₂-Konzentration und der Frischluftmenge ermittelt. Die Durchführung von Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen ermöglicht die Ermittlung der Gesamtunsicherheit des Simulationsmodelles

sowie die Identifikation der einflussreichsten Modellparameter zur Prioritätensetzung bei den einzelnen Massnahmen. Zur Darstellung der verschiedenen Energieflüsse (Gewinne / Lasten auf der einen Seite, Verluste auf der anderen Seite) wurde für den EW II ein Sankey-Diagramm (Energiebilanzierung) erstellt.

Es werden Optimierungsmassnahmen für die HLK-Technik (insbesondere bei der Lüftung) und bei der Fahrzeughülle definiert und grob ausgearbeitet. Für einzelne Massnahmen und für verschiedene Kombinationen von Massnahmen wird mittels Simulationen das Energie-Einsparpotenzial ermittelt. Folgende Simulationen von Massnahmen werden für die Ermittlung der möglichen Einsparungen durchgeführt:

- Reduktion des Aussenluftanteils der Lüftung mittels bedarfsgesteuerter Regelung der Aussenluftmenge über die CO₂-Konzentration
- Implementierung der Raumsollwertabsenkung bei abgestelltem Fahrzeug
- Reduktion des Sollwertes der Raumlufttemperatur
- Verbesserungen bei der Fahrzeughülle
- Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung

Die Kenntnis über den Betriebszustand wurde in der Periode von April 2014 bis November 2015 bearbeitet und in diesem Bericht dokumentiert.

Mit den Aufheiz- und Tracergasmessungen konnte eine erfolgreiche Validierung des Simulationsmodells in den Punkten "thermische Masse", "Wärmedurchgang der Hülle" sowie "HLK-Technik" am stehenden Zug erzielt werden.

Die Simulationen ermöglichen Massnahmen am Fahrzeug sowohl energetisch als auch betreffend der Auswirkungen auf die Behaglichkeit im Fahrgastraum quantitativ zu beurteilen. Weiterführend kann so auch eine wirtschaftliche Beurteilung (Energie-Minder- oder Mehrverbrauch) abgeschätzt werden.

Die Massnahmenliste, welche in Zusammenarbeit mit den Bahngesellschaften hinsichtlich Potential, Einschränkungen und Risiken erstellt und beurteilt wurde, zeigt, dass folgende Massnahmen ein grosses Potential aufweisen und mit vertretbarem Aufwand umsetzbar sind:

- Optimierung der Fenstergrösse (nur bei Neubeschaffung sinnvoll möglich)
- Nachtabsenkung der Innenraumtemperatur
- Bedarfsgerechte Regelung der Aussenluftmenge in Abhängigkeit der CO₂-Konzentration im Fahrgastraum
- Temperaturregelung und somit Absenkung des Raumtemperatur-Sollwerts

2. Forschungsbericht

1. Einleitung (Auszug aus der Vereinbarung vom 18.06.2012)

Das Forschungsprojekt befasst sich mit der Verbesserung der Energieeffizienz der Heizung, Lüftung und Kühlung (HLK) im öffentlichen Verkehr. Das Hauptziel ist die Ausarbeitung von Massnahmen unterschiedlichster Art, welche den Energieverbrauch der Heizung, Lüftung und Kühlung bei mindestens gleich bleibendem Komfort reduzieren.

Das Zentrum für Integrale Gebäudetechnik (ZIG) der Hochschule Luzern – Technik & Architektur bearbeitet das Modul 2 “Modellierung von HLK-Energieverbrauch und Komfortparameter der Fahrzeuge” und das Modul 3 “Identifikation der Massnahmen mit grösstem Einsparpotentialen und kleinstem Umsetzungsaufwand”.

2. Modul 2 – Modellierung von HLK-Energieverbrauch und Komfortparameter der Fahrzeuge

2.1. Ziele

Im Modul 2 werden verschiedene Fahrzeuge als Simulationsmodell im Computer mathematisch modelliert, damit der heutige Energiebedarf abgebildet (Validierung) und damit der Einfluss auf den Energiebedarf von betrieblichen oder technischen Änderungen gegenüber dem heutigen Betrieb / Zustand abgeschätzt werden kann.

2.2. Arbeitsfortschritt

In der Tabelle 1 ist der Arbeitsfortschritt der einzelnen Arbeiten pro Fahrzeug aufgelistet.

100%	Arbeit ist abgeschlossen
x%	In Bearbeitung
0%	Arbeit noch offen

Fahrzeug	NINA (BLS)	EW II (RhB)	EW IV (RhB)	Pano GEX (RhB)	Flirt (SOB)	ICN (SBB)
Aufheizversuch	100%	100%	100%	100%	100%	-
Tracergas-messung	100%	100%	100%	100%	100%	-
Thermographie-aufnahmen	-	-	100%	100%	100%	-
Aufbereitung Messdaten	100%	2011: 100% 2012: 100% 2013: 100%	-	100%	100%	0%
Simulationsmodell	100%	100%	-	-	100%	0%
Simulation	100%	2011: 100%	-	-	80%	0%
Validierung Simulation	100%	100%	-	-	60%	-
Sensitivitätsanalyse	100%	100%	-	-	-	-
Personenzählung	-	100%	-	100%	-	-
Energieflussdiagramm	-	100%	-	-	0%	0%

Tabelle 1: Arbeitsfortschritt der einzelnen Arbeiten des Moduls 2 pro Fahrzeug

2.3. Aufheizversuch

2.3.1. Vorgehen Aufheizversuch

Ziel des Aufheizversuchs war die Berechnung des mittleren U-Wertes, Messung der Zeitkonstante des Fahrzeuges und die Kalibrierung des Simulationsmodells. Dazu wurde das Fahrzeug im Depot bei möglichst konstanten Umgebungsbedingungen auf rund 40°C aufgeheizt. Anschliessend wurde das Auskühlverhalten des Fahrzeuges anhand der Raumlufthtemperatur aufgezeichnet, um daraus die entsprechenden fahrzeugspezifischen Informationen zu ermitteln.

Für die Zugskomposition NINA (BLS) wurde ein dreistufiges Vorgehen für den Aufheizversuch gewählt:

Als erstes wurde in der Nacht vom 16.11.2012 auf den 17.11.2012 von 21:30 bis 05:30 eine Aufheizmessung bei einer NINA 06 durchgeführt. Abbildung 1 zeigt die Resultate sowie das Fitting der Messdaten. Da die Möglichkeit der Aufheizmessung auf 7 Stunden (420min, siehe x-Achse der Abbildung 1) begrenzt war, wurden die Messdaten mit Hilfe einer Sättigungsfunktion gefittet (siehe grüne Kurve der Abbildung 1 und Gleichung 1) um so den "Steady-state" des Fahrzeuges zu ermitteln. Im thermisch eingeschwungenen Zustand lässt sich nun der "mittlere" Wärmetransport über die Fahrzeughülle ermitteln (ca. 1.9 W/m²K bei 510 m² Hüllfläche des Modells).

Sättigungsfunktion mit den ermittelten Parametern:

$$y = 10.16 * \left(1 - e^{\frac{-x}{159.46}} \right) + 20.33$$

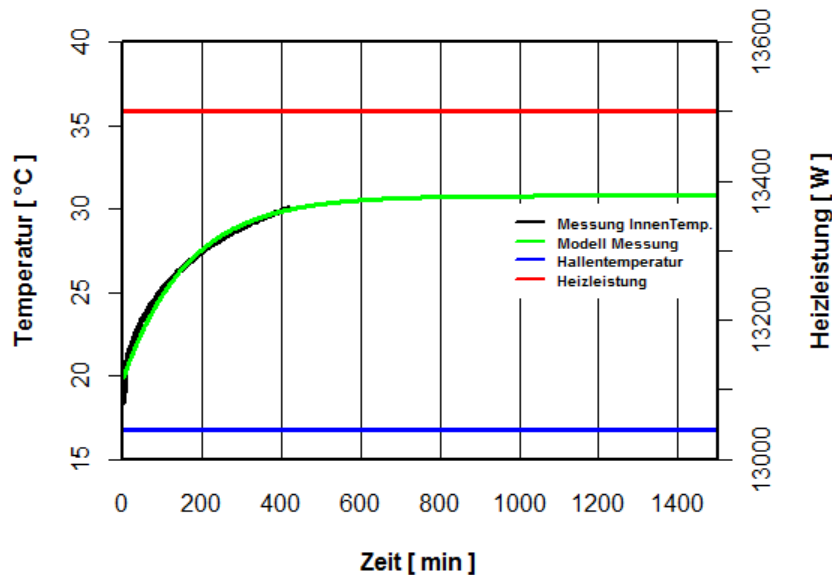


Abbildung 1: Fitting der Messdaten aus dem Aufheizversuch vom 16 – 17.11.2012

Um die gewonnen Erkenntnisse aus der Aufheizmessung zu verifizieren, wurde versucht, das Simulationsmodell mit einem Hallenaufenthalt der NINA zu vergleichen. Abbildung 2 zeigt einen Vergleich von gemessenen und simulierten Innentemperaturen der NINA. Dabei wurde die Messung als Mittelwert für das gesamte Fahrzeug und die Simulationsergebnisse pro Wagon dargestellt. Die Ergebnisse des Vergleichs sind sehr zufriedenstellend. Die Abweichungen zu Beginn (ca. 16:00 am 24.02) sind durch eine Standortänderung des Zuges, welches im Modell nicht nachgebildet worden ist, zu erklären. Die Ursachen der Abweichungen zwischen dem 25.2 und dem 26.2 sind nur schwer zu erklären. Hier könnten Türöffnungen oder zusätzliche interne Lasten, welche durch die Arbeiten am Zug in der Halle verursacht wurden, die Ursache sein. Generell kann der Temperaturverlauf der Messungen mit ausreichendem Genauigkeitsgrad durch das Modell abgebildet werden.

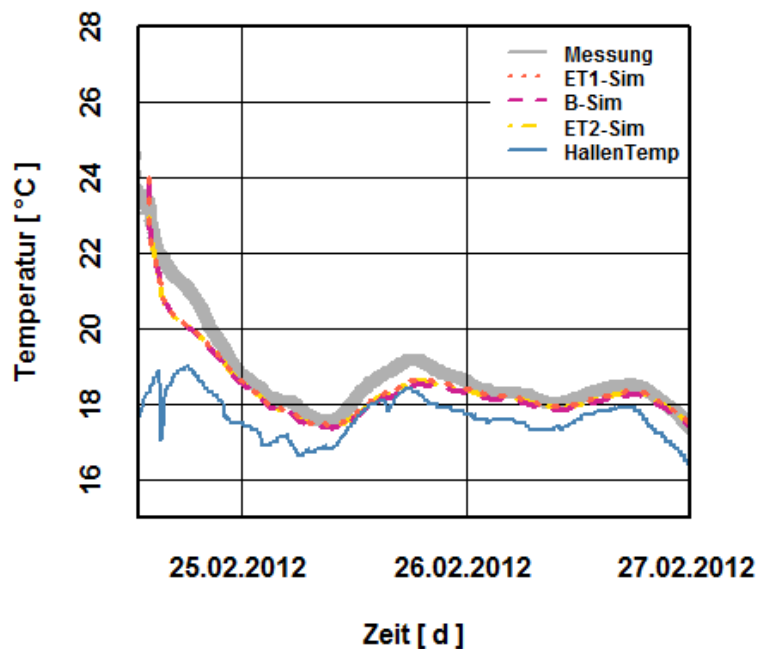


Abbildung 2: Vergleich von Mess- und Simulationsresultaten während eines Hallenaufenthaltes

Als letzter Schritt wurde versucht, die Solarstrahlung miteinzubeziehen. Dazu wurde eine Messperiode ausgewählt, in welcher die NINA unter freiem Himmel stand und kein Betrieb der aktiven Komforteinrichtungen (HLK) vorhanden war. Da der Standort des Zuges (Abbildung 4 und Abbildung 5) in Realität am Standort Spiez zum Teil unter einer Unterführung sowie nahe an einer Böschung war, wurde ein Teil des Zuges während der Messung teilweise verschattet.

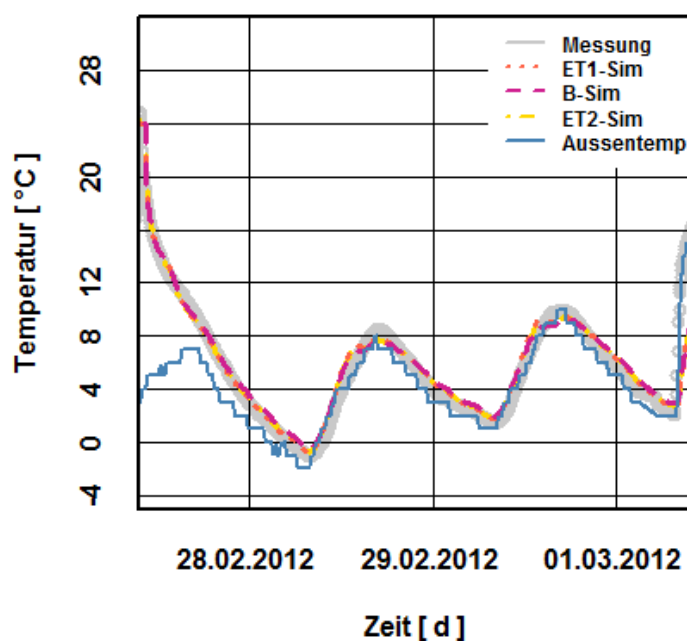


Abbildung 3: Vergleich Mess- und Simulationsresultate während einer Periode auf dem Abstellgleis mit Verschattung

Die Abbildung 3 zeigt einen Vergleich der gemessenen und simulierten Innentemperaturen des Zuges. Auch hier kann das Modell den Verlauf der Innentemperatur in einem ausreichenden Genauigkeitsgrad wiedergeben. Die leichten Überhöhungen der Simulationsergebnisse am Mittag des 28.02.2012 und des 29.02.2012 sind mit grosser Wahrscheinlichkeit durch eine zu hohe solare Belastung im Modell zu erklären.



Abbildung 4: Standort des Zuges auf dem Abstellgleis, teilweise Verschattung durch Umgebung / Strassenüberführung

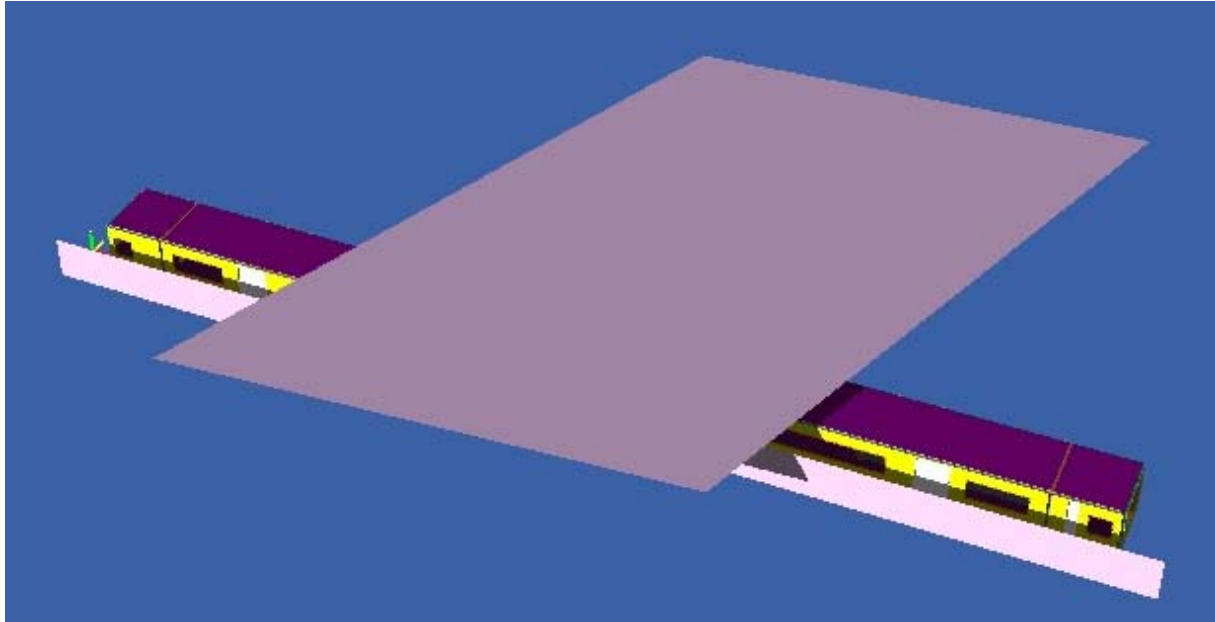


Abbildung 5: Modellierung der Verschattung am Standort der NINA (BLS) vom 27.2 - 01.03.2012

Anhand des Aufheizversuchs des EW IV der RhB wird das Vorgehen stellvertretend für alle anderen Zugkompositionen beschrieben:

Der Versuch fand in einer Halle statt, damit bei möglichst gleich bleibenden Umgebungsbedingungen gemessen werden kann. Für die Messung wurden im Wagen alle Verbraucher ausgeschaltet und der Wagen wurde vom Bahnnetz getrennt. Während

der gesamten Messdauer bleiben die Türen und Fenster geschlossen. Mit je einem Heizlüfter in den Vorräumen und vier Heizlüftern im Fahrgast-Abteil – gemäss Anordnung in der Abbildung 6 – wurde der Wagen mit konstanter Leistung von 11.3 kW solange aufgeheizt, bis die Innenraumtemperatur nicht mehr weiter ansteigt. Der Temperaturanstieg betrug ca. 20 K, so dass eine maximale Innenraumtemperatur von ca. 40°C erreicht wurde. Im Wagen wurden die Innenraumtemperaturen an 5 verschiedenen Messorten auf einer Höhe ab Boden (OK) von 0.5 m, 1.1 m und 1.6 m gemessen. Der gesamte Aufheizversuch dauerte inklusive Vorbereitungsarbeiten und Abbau ca. 3 Tage.

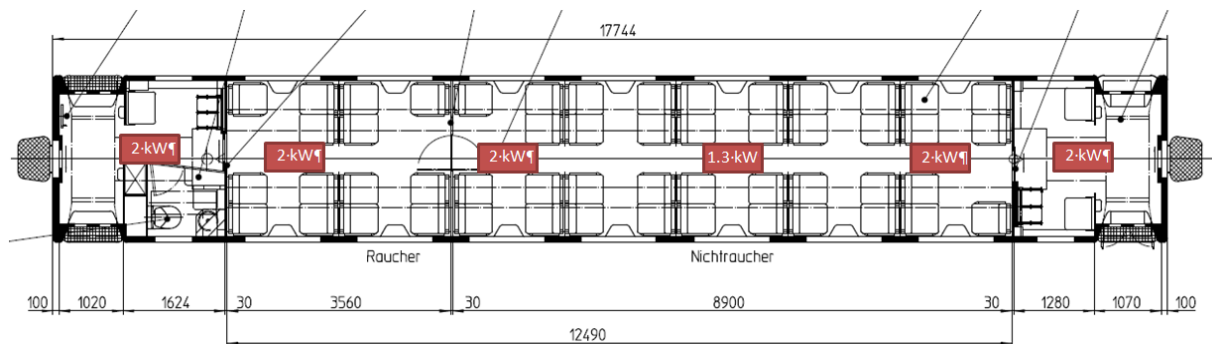


Abbildung 6: Anordnung der Heizlüfter für den Aufheizversuch im EW IV der RhB



Abbildung 7: Aufheizversuch mit Heizlüftern und Temperaturmessstelle im Fahrgastraum

Analog diesem Vorgehen wurde auch bei folgenden Fahrzeugen ein Aufheizversuch durchgeführt:

- EW II (RhB)
- EW IV (RhB)
- Pano GEX (RhB)
- Flirt (SOB)

Für den ICN der SBB ist kein Aufheizversuch vorgesehen.

2.3.2. Ergebnisse und Erkenntnisse Aufheizversuch

Anhand der Messdaten des Aufheizversuchs wurden im Simulationsmodell die Wärmebrücken und die thermische Masse des Wagens verfeinert, bis sich die Simulationsergebnisse mit den Daten des Aufheizversuchs deckten.

Wie der Vergleich der gemessenen und der simulierten Temperatur im Wagen des EW II der RhB (Abbildung 8) deutlich zeigt, ist nach den Anpassungen am Simulationsmodell (Simulation 2, gelbe Linie) der Temperaturverlauf sowohl beim Aufheizen wie auch beim Auskühlen praktisch deckungsgleich mit der gemessenen Temperatur des Aufheizversuchs (Messung Hochschule Luzern, grüne Linie). Deutliche Abweichungen zeigte die Simulation 1 bevor das Modell mit dem Aufheizversuch abgeglichen wurde. Am Modell 2 wurde hauptsächlich die Hülle mit zusätzlicher Masselage in der Aussenwand angepasst. Die Abweichung von ca. fünf Grad zur Messung der fest installierten Temperaturfühler der Universität Basel im gleichen Fahrzeug dürfte vermutlich an der unterschiedlichen Platzierung der Fühler liegen. Im Abteil sind die Raumfühler unter dem Deckenkanal montiert. Wie stark an dieser Stelle infolge Luftzirkulation oder Wärmebrücken die Temperatur beeinträchtigt wird, ist schwer abzuschätzen. Beim EW II stimmen die Messwerte und die Simulation genügend genau überein.

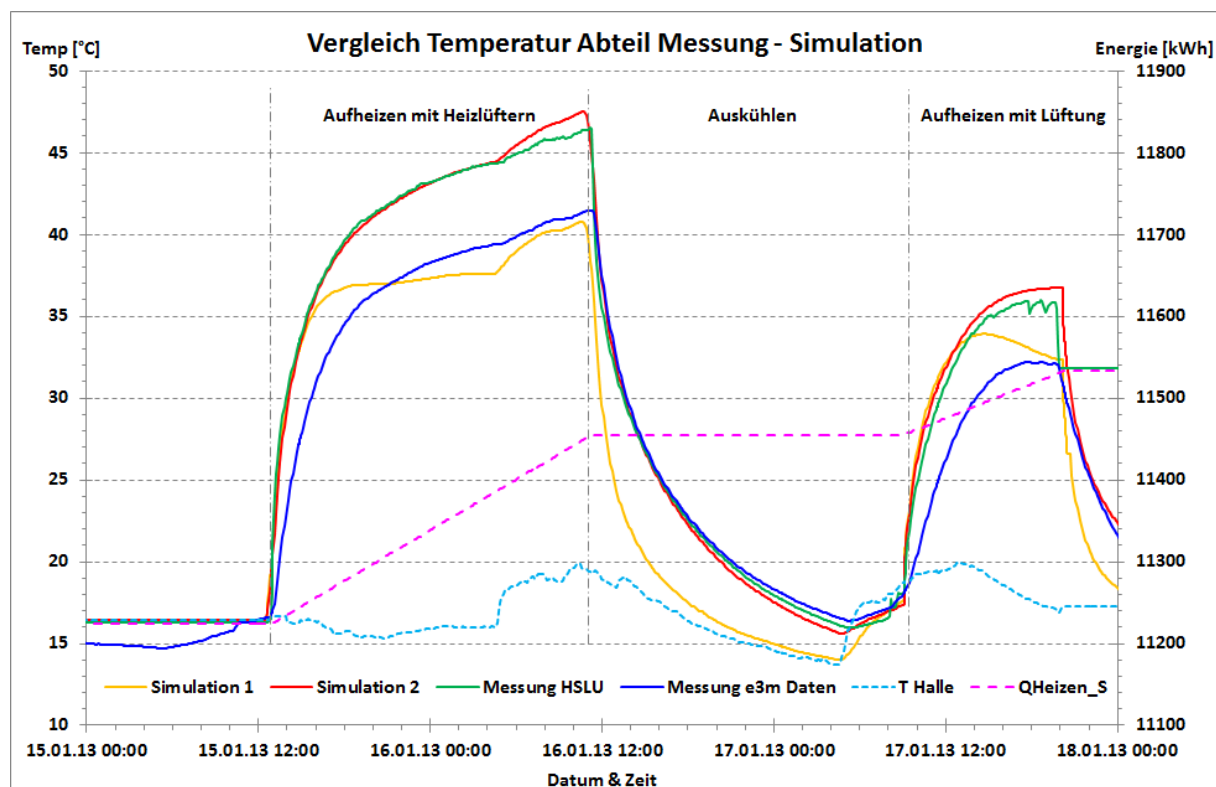


Abbildung 8 Vergleich Messung vs. Simulation der Lufttemperaturen im Abteil des EW II (RhB)

2.4. Tracergasmessung

2.4.1. Vorgehen Tracergasmessung

Vorgängige Untersuchungen zeigten, dass die Variable "Aussenluftanteil" der Lüftungsanlage einen sehr hohen Einfluss auf die Genauigkeit des thermischen Simulationsmodells von Fahrzeugen hat. Zur präzisen Ermittlung dieser fahrzeugspezifischen Variablen wurden Tracergasmessungen durchgeführt. Bei der NINA (BLS) war das Ziel, die Anteile von Aussenluft und Umluft am Gesamtvolumenstrom der Lüftungsanlage zu bestimmen. Bei allen anderen Messungen wurde die Infiltrationsrate ohne eingeschaltete Lüftung bestimmt, d.h. die Undichtheit der Hülle gemessen.



Abbildung 9: Aufbau Tracergasmessung NINA (BLS)

Das Prinzip der Tracergasmessung besteht darin, einen Raum (oder ein Zugabteil) mit einem Gas (hier: SF₆) solange zu befüllen, bis eine Sättigung der Konzentration erreicht ist. Dann wird die Zuführung des Gases gestoppt und das Abklingen der Konzentration kann beobachtet werden. Das Abklingen kann durch Infiltration oder wie in diesem Fall durch die Zuführung von Aussenluft durch die Lüftungsanlage verursacht werden. Mit dem bekannten Waggenvolumen und dem Verlauf der Gaskon-

zentration bei ausgeschalteter Lüftung kann der Volumenstrom der Aussenluft berechnet werden.



Abbildung 10: Messstelle Gaskonzentration EW II (RhB)



Abbildung 11: Messgeräte für den Aufheizversuch und Tracergasmessung EW II (RhB)

Die Messungen (EW II, EW IV, Pano GEX (alle RhB) und Flirt (SOB)) wurden während des Aufheizversuchs durchgeführt. Dazu wurde im aufgeheizten Wagen bei ausgeschalteter Lüftung das Tracergas SF₆ eingeblasen. Sobald das Gas sich im Wagen gut verteilt hatte, wurden die Heizlüfter abgeschaltet und der Verlauf der Gaskonzentration an den sechs Messstellen im Wagen in der Auskühlphase gemessen.

Die Tracergasmessungen bei der NINA (BLS) wurden pro Lüftungseinheit zur Bestimmung der Aussenluftmenge durchgeführt. Die Messungen wurden im stehenden sowie im fahrenden Zug durchgeführt.

2.4.2. Ergebnisse und Erkenntnisse Tracergasmessung

Es ist zu beachten, dass die so ermittelte Luftwechselrate nur bei Stillstand des Fahrzeuges und bei ausgeschalteter Lüftung gültig ist. Beim Fahren oder bei Wind ändern sich die Druckdifferenzen und somit auch die Infiltrationsrate.

2.5. Thermographieaufnahmen

2.5.1. Vorgehen Thermographieaufnahmen

Fahrzeughüllen sind aus thermischer Sicht sehr komplex und der Wärmedurchgang ist über die Hülle sehr un stetig verteilt (Wärmebrücken). Neben der quantitativen Ermittlung der Wärmeverluste (siehe "Aufheizversuch") ist auch eine qualitative Aussage zur Verteilung der Wärmeverluste über die ganze Oberfläche sehr wichtig. Eine geeignete Methode für diese Analyse sind Thermographieaufnahmen mittels einer Thermographiekamera.

Direkt im Anschluss an die Aufheizversuche werden Thermographieaufnahmen erstellt. So war gewährleistet, dass die ganze Zugskomposition gleichmässig aufgeheizt war und externe Einflüsse möglichst ausgeschlossen werden konnten. Die Aufnahmen beschränken sich primär auf die Seitenwände und die Front, Aussagen zum Dach und zum Unterboden sind aufgrund der beschränkten Zugänglichkeit nur beschränkt möglich.

Bei diesen Aufnahmen haben die Aussenbedingungen (Bedeckungsgrad Himmel, Aussenlufttemperatur, Wind, etc.) einen grossen Einfluss auf die Qualität der Aufnahmen. Diese Anforderungen wurden möglichst berücksichtigt.

2.5.2. Ergebnisse und Erkenntnisse Thermographieaufnahmen

Anhand der Thermographieaufnahmen konnte festgestellt werden, dass unabhängig vom Fahrzeugtyp die grössten Schwachstellen der Fahrzeughülle bei den Fenstern und Türen liegen. Sonstige Wärmebrücken, z.B. durch Rippen, fallen weniger ins Gewicht.

In Abbildung 12 ist der Wagenübergang hinten bei einem EW IV abgebildet. Die Temperaturschichtung im Wagen ist gut ersichtlich. Die Temperaturen des Türfensters sind aufgrund der Reflexion und den damit verbundenen Verfälschungen der Infrarotaufnahme mit Vorsicht zu betrachten.

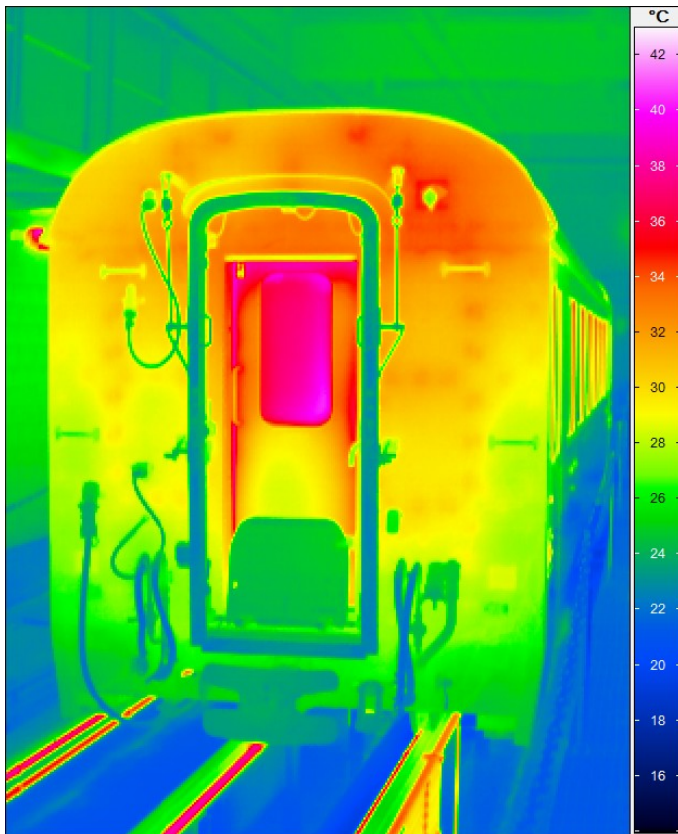


Abbildung 12: Wagenübergang hinten beim EW IV (RhB)

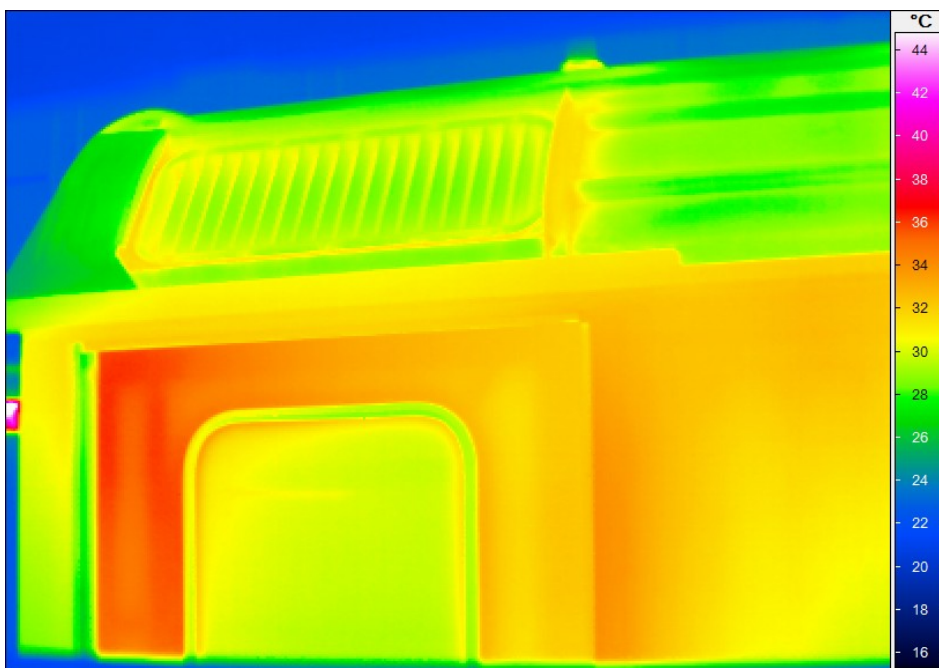


Abbildung 13: Aussenluftfassung oberhalb Türe beim EW IV (RhB)

Im Gegensatz zum Wagen EW IV sind die Wärmebrücken bei der Türe beim neueren Pano GEX bereits wesentlich geringer (Abbildung 14). Allgemein verfügt dieser Wagentyp gegenüber den anderen gemessenen Wagen der RhB über eine bessere Hülle.

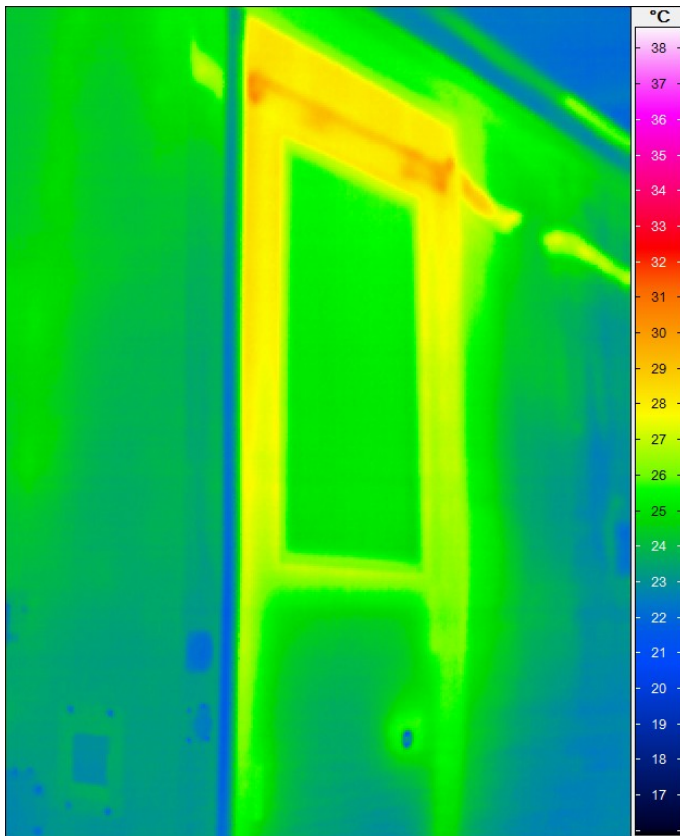


Abbildung 14: Türe des Pano GEX (RhB)

Eine der grossen Schwachstellen beim Flirt (SOB) stellen die Klappfenster dar. Die Faltbälge beim Wagenübergang haben einen geringeren Wärmeverlust, wie in der Abbildung 15 ersichtlich ist. Bei den neueren Generationen des Flirts werden keine Klappfenster mehr eingebaut.

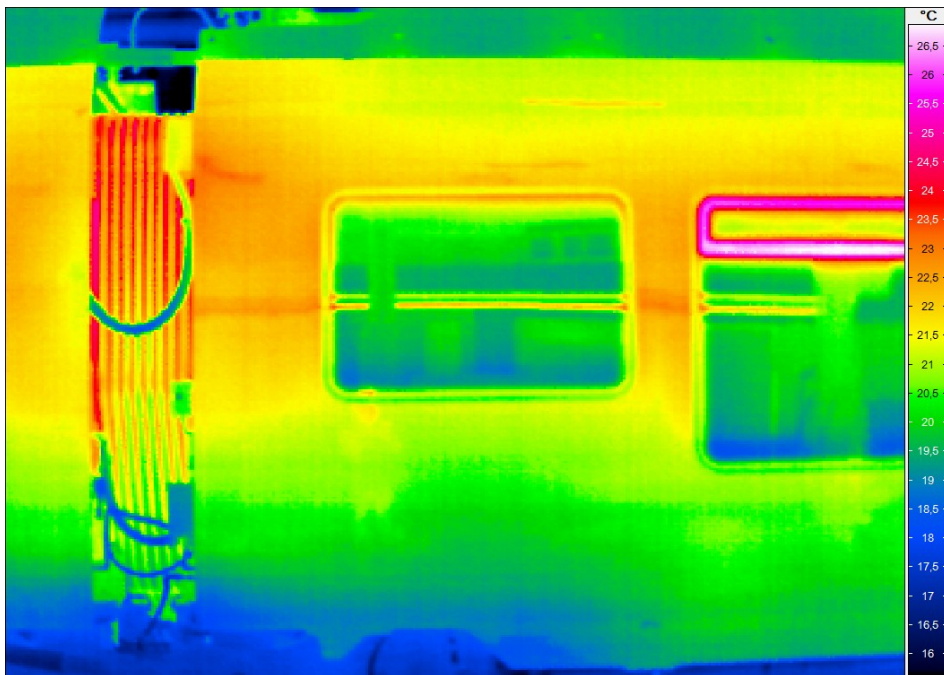


Abbildung 15: Wagenübergang, Fenster und Fenster mit Klappe beim Flirt (SOB)

Gut ersichtlich ist auch der Wärmeverlust des Fortluftauslasses auf dem Dach (Abbildung 16).

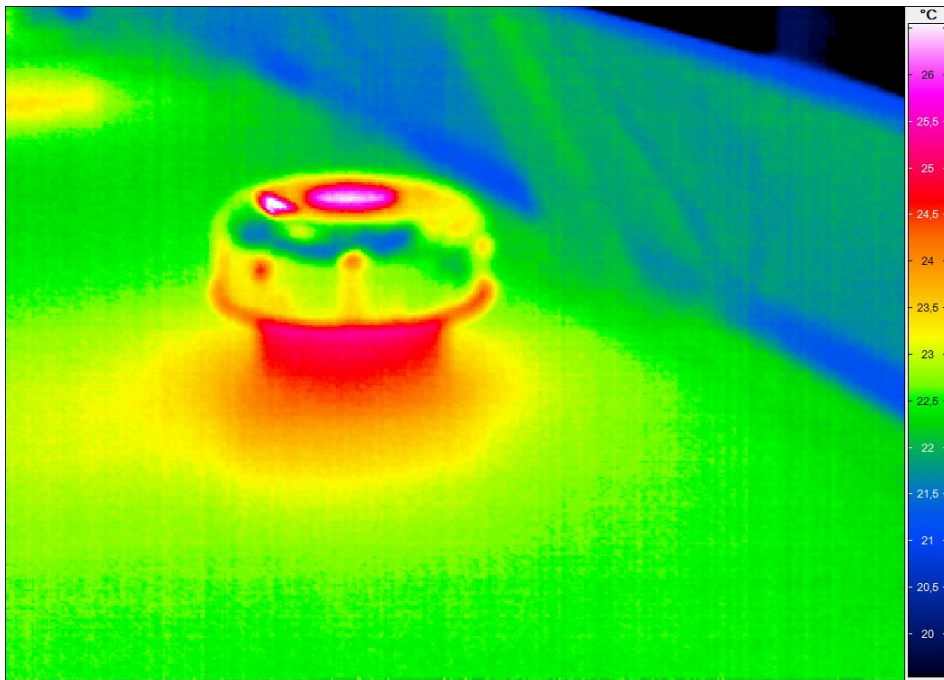


Abbildung 16: Fortluftauslass beim Flirt (SOB)

Auch beim Flirt sind die Türen grosse thermische Schwachstellen in der Hülle (Abbildung 17).

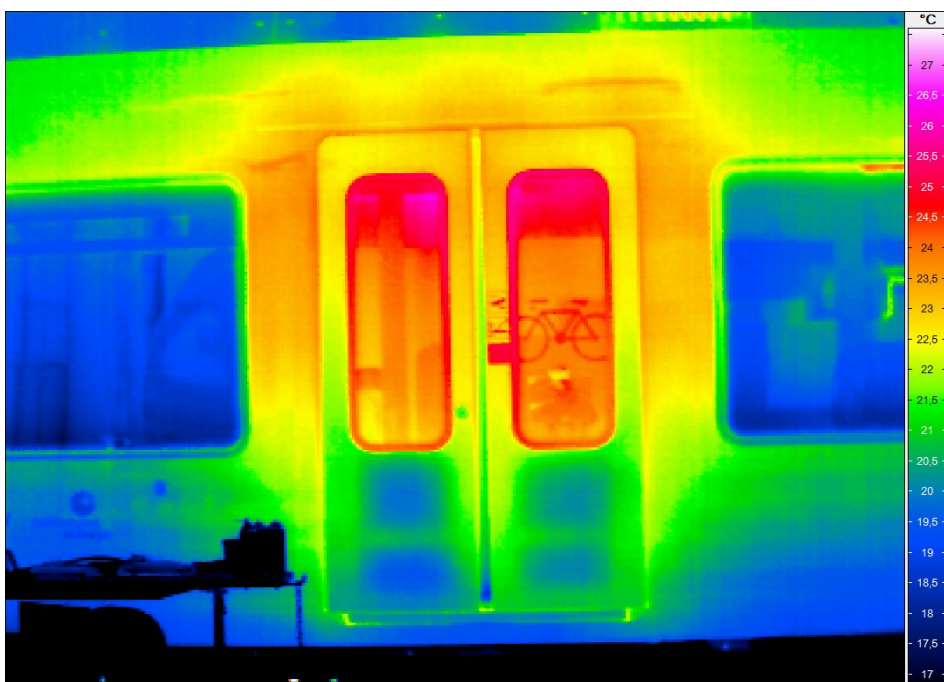


Abbildung 17: Türen beim Flirt (SOB)

2.6. Kenntnis des Betriebszustandes der einzelnen Anlagekomponenten

Um bei der Simulation den Energieverbrauch der HLK-Anlagen abzuschätzen, ist es notwendig, die Betriebszustände der HLK-Anlagen in den Simulationsmodellen möglichst gemäss der realen Situation abbilden zu können. Dazu müssen die Betriebszustände der einzelnen Komponenten des HLK-Systems – wie Aussentemperatur, Temperatursollwert, Heiz- und Kühlleistung, Umluftbetrieb, Aussenluftvolumenstrom, Frischluftanteil und Umluftanteil – detailliert und in hoher zeitlicher Auflösung bekannt sein.

2.6.1. Vorgehen Betriebszustand der Anlagekomponenten

Für die beiden untersuchten Fahrzeuge – Pano GEX der RhB und Flirt der SOB – wurde in Zusammenarbeit mit den beiden Bahngesellschaften abgeklärt, welche Daten ab Leitsystem oder Buskommunikation bereits verfügbar sind (Betriebsartenschalter HLK, Luftvolumenströme, Ventilator Drehzahlen, Klappenstellungen, etc.). Es wurde überprüft, wie die Daten ausgelesen, ausgewertet und für die Simulationen weiterverwendet werden können. Insbesondere wurden dazu die Softwarespezifikationen der Lüftung, das Elektroschema, die Pläne, etc. analysiert und dokumentiert.

2.6.2. Ergebnisse und Erkenntnisse Betriebszustand der Anlagekomponenten

Für den Pano GEX der RhB wurden die Daten in Tabellen mit Zusammenstellungen der installierten Heizleistungen, Kühlleistungen und Beleuchtung erfasst. Zusätzlich wurde die Zuordnung der Parameter: Heiz- und Kühlleistung, Luftmenge und Temperatursollwerte gemäss der Betriebsarten in Abhängigkeit der Betriebszustände und Aussenlufttemperatur in einer Tabelle zusammengestellt.

Auch für den Flirt der SOB wurde die Zuordnung der Parameter Heiz- und Kühlleistung, Luftmenge und Temperatursollwerte gemäss den Betriebsarten in Abhängigkeit der Betriebszustände und Aussenlufttemperatur in einer Tabelle zusammengestellt. Zusätzlich wurde eine Tabelle mit den Sollwertkurven der Regelung erstellt. Um diese Daten ins Simulationsmodell von IDA ICE zu implementieren, mussten diese Tabellen entsprechend vereinfacht werden (siehe Tabelle 2).

Betrieb	Bedingungen	Zuluft	Umluft	Zulufttemperatur
Aus	Zug steht mehr als 2 min	0%	100%	Alles aus
Parken	$T_{AUL} < 20^{\circ}\text{C}$		100%	Frostschutzbetrieb auf $+5^{\circ}\text{C}$ mit Konvektionsheizung
Parken	$T_{AUL} > 24^{\circ}\text{C}$		0%	Überhitzungsschutz mit Zuluftventilatoren auf kleinster Drehzahlstufe, Aussenluftklappe voll geöffnet
Vorheizen			100%	
Vorkühlen			15 min 0% anschl. 100%	
Automatik (Zuluft- und Aussenluftmenge in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur)	$-20^{\circ}\text{C} < T_{AUL} < -5^{\circ}\text{C}$ $-5^{\circ}\text{C} < T_{AUL} < 5^{\circ}\text{C}$ $5^{\circ}\text{C} < T_{AUL} < 26^{\circ}\text{C}$ $26^{\circ}\text{C} < T_{AUL} < 35^{\circ}\text{C}$	2'000 m ³ /h 2'000 m ³ /h 2'800 m ³ /h 2'800 m ³ /h	57% 35.5% 54% 69.3%	Siehe Temperaturkurve Abbildung 18

Tabelle 2: Betriebsbedingungen für die Heizung, Kühlung und Lüftung für den Flirt (SOB)

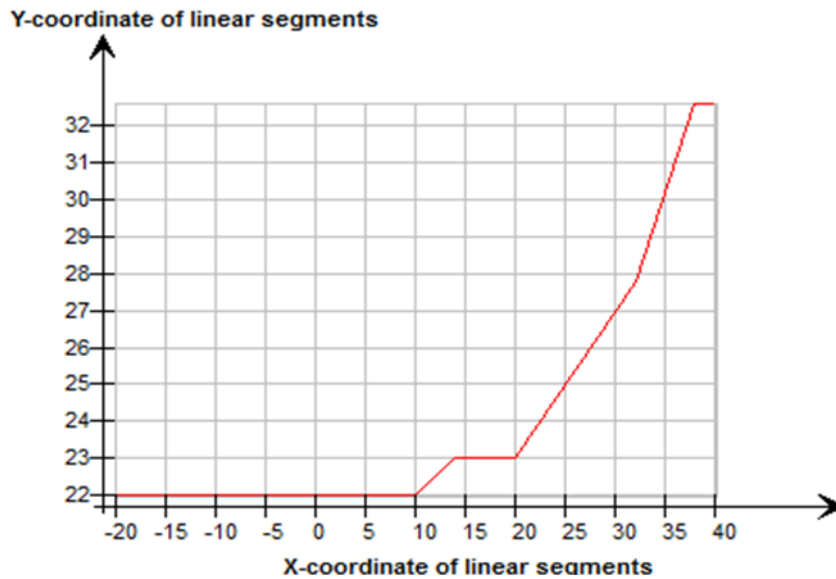


Abbildung 18: Temperaturkurve der Zulufttemperatur [°C] (y-Achse) in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur [°C] (x-Achse) für den Flirt (SOB)

Die Daten aus dem Anlagenbeschrieb wurden für die Regelung in IDA ICE übersetzt.

2.7. Aufbereitung Messdaten

2.7.1. Vorgehen Aufbereitung Messdaten

Die Messdaten der einzelnen Fahrzeuge aus der Datenbank der Messungen der Universität Basel wurden gesichtet, um geeignete Zeiträume für eine Kalibrierung des Simulationsmodelles zu definieren. Ziel war es eine Periode mit folgenden Merkmalen aufzufinden:

- Der Wagon ist nicht in Betrieb.
- Eine deutliche Differenz zwischen Innen- und Aussentemperatur ist vorhanden.
- Ein "Schwingen" der Innentemperatur des Wagons verursacht durch klimatische Randbedingungen oder aufgrund der HLK-Technik.

Die ausgelesenen Daten wurden für die Verwendung im Simulationsprogramm zeitlich synchronisiert.

Die Abbildung 19 zeigt die gewählte Messperiode des EW II (RhB), bei der der Wagon vom 10.01.2011 bis 13.01.2011 in Landquart auf einem Abstellgleis stand.

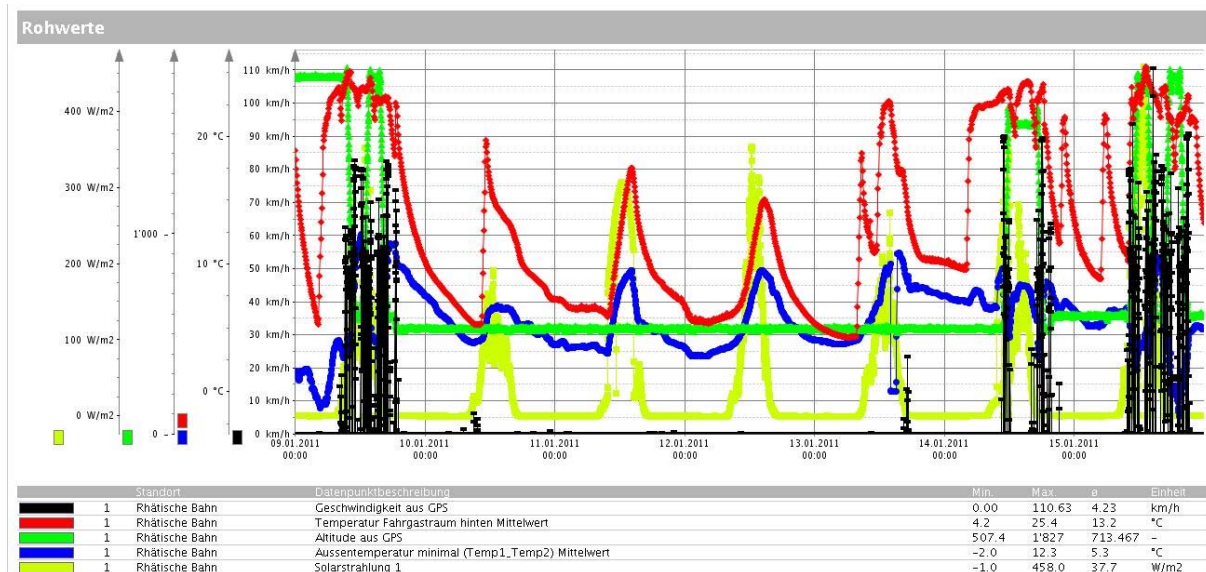


Abbildung 19: Messperiode vom 10.01.2011 bis 13.01.2011 für den EW II in Landquart

Für die Simulation wurden die Strahlungswerte getrennt in Direkt- und Diffusstrahlung benötigt. Da am Wagen die Globalstrahlung gemessen wurde, musste ein Rechenmodell zur Strahlungsumrechnung erstellt werden.

2.8. Simulationsmodell / Simulation

2.8.1. Vorgehen Simulationsmodell / Simulation

Allgemeines Vorgehen Simulationsmodell / Simulation

Für die Fahrzeuge wurde mit der Software IDA ICE¹ ein Simulationsmodell erstellt und entsprechende Simulationen wurden durchgeführt. Die verwendete Software stammt aus dem Gebäudebereich und findet heute in Forschung und Engineering breite Anwendung. Zu den Eingabedaten für das Computermodell gehören die Fahrzeugkonstruktion (insbesondere die energetischen Eigenschaften der Fahrzeughülle), die HLK-Ausrüstung, die jeweilige Art des Einsatzes (inkl. Fahrgastzahlen), die Art der Regelung sowie das Aussenklima (Temperaturen, solare Einstrahlung).

I) Modellbildung der Konstruktion

Als erster Schritt wurde der Aufbau und die Konstruktion der Fahrzeughülle in die Softwareumgebung IDA ICE implementiert. Die Hülle des Fahrzeuges besteht aus Stahlblech, welches mit Rippen nach Innen verstärkt ist. Die Zwischenräume sind teilweise mit einer Dämmung ausgefüllt. Die Innenverkleidung besteht zum größten Teil aus einer glasfaserverstärkten Kunststoffplatte. Abbildung 20 zeigt den schematischen Aufbau einer Wand. Die Wandstärken variieren. Im Simulationsmodell wurden die Aufbauten der Hülle jedoch vereinfacht angenommen. Es gibt daher nur eine Stärke der Aussenwand. Die Kunststoffübergänge der Wagons wurden in der Konstruktion nicht dargestellt. Die Vereinfachungen der Hülle wurden im Simulationsmo-

¹ Die Software IDA ICE (Indoor Climate and Energy) der Firma EQUA ist ein Programm zur detaillierten dynamischen Simulation von einzelnen Räumen bis zu komplexen Gebäuden. Es berechnet den zeitlichen Verlauf von Energieflüssen (dem Raum zu- und abgeführte Wärmeleistung) und von Komfortvariablen (Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Luftfeuchte, CO₂-Konzentration) in den vom Anwender definierten Räumen bzw. Zonen. Die Randbedingungen wie Aussenklima, Konstruktion der Gebäude- bzw. Fahrzeughülle, Betriebsweise der HLK-Komponenten, Anwesenheit von Bewohnern bzw. Fahrgästen etc. sind vorzugeben. IDA ICE berechnet das Verhalten und die dynamische Wechselwirkung zwischen Klima, Gebäude/Fahrzeug, HLK-Technik und Personen. In einem den Simulationen nachfolgenden Postprocessing werden die verschiedenen Grössen zu Energieverbrauchs- bzw. Komfortbewertungsgrössen aufintegriert.

dell mit Hilfe eines Verlustkoeffizienten berücksichtigt. Dieser Verlustkoeffizient wurde durch eine Aufheizmessung kalibriert.

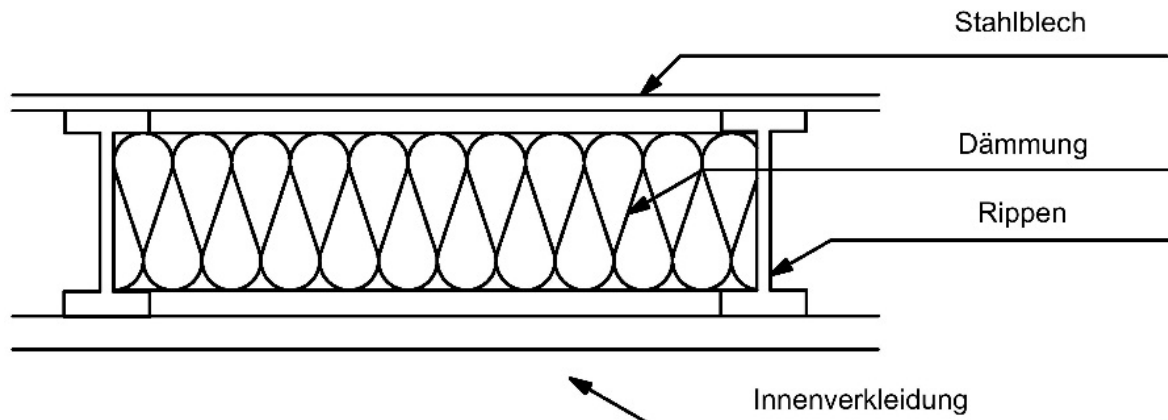


Abbildung 20: Aufbau der Hülle (vereinfacht dargestellt)

Eine Besonderheit im Aufbau der Fahrzeughülle aus Sicht der Modellbildung sind die auftretenden Hohlräume zwischen Dämmung und Innenverkleidung bzw. dem Stahlblech. Besonders gross ist der Abstand im Deckenzwischenraum. Dieser Zwischenraum wird für die Unterbringung diverser Technikkomponenten verwendet. In der Simulation wurde der Zwischenraum aus Gründen der Vereinfachung nicht dargestellt. Die thermische Masse der Technik im Deckenzwischenraum wurde mit der pauschalen internen Speichermasse der Zone repräsentiert.

In Abbildung 21 ist die Zonierung der NINA und in Abbildung 22 das Model eines EW II in IDA ICE abgebildet.

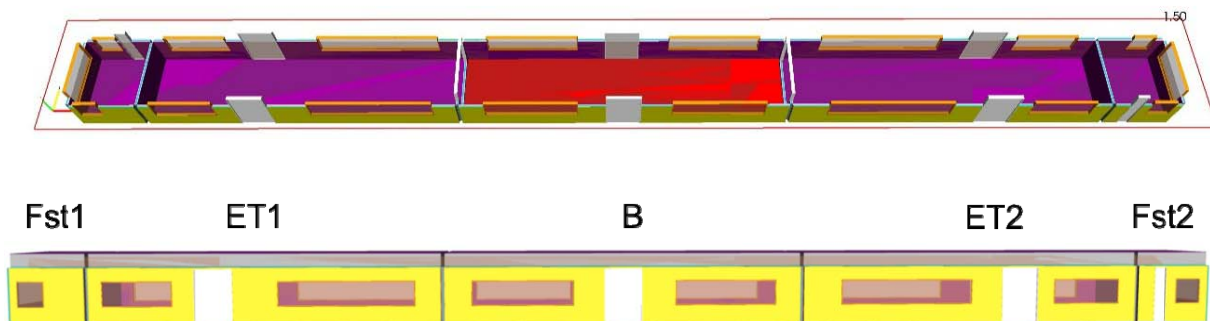


Abbildung 21: Zonierung des Zuges NINA (BLS)

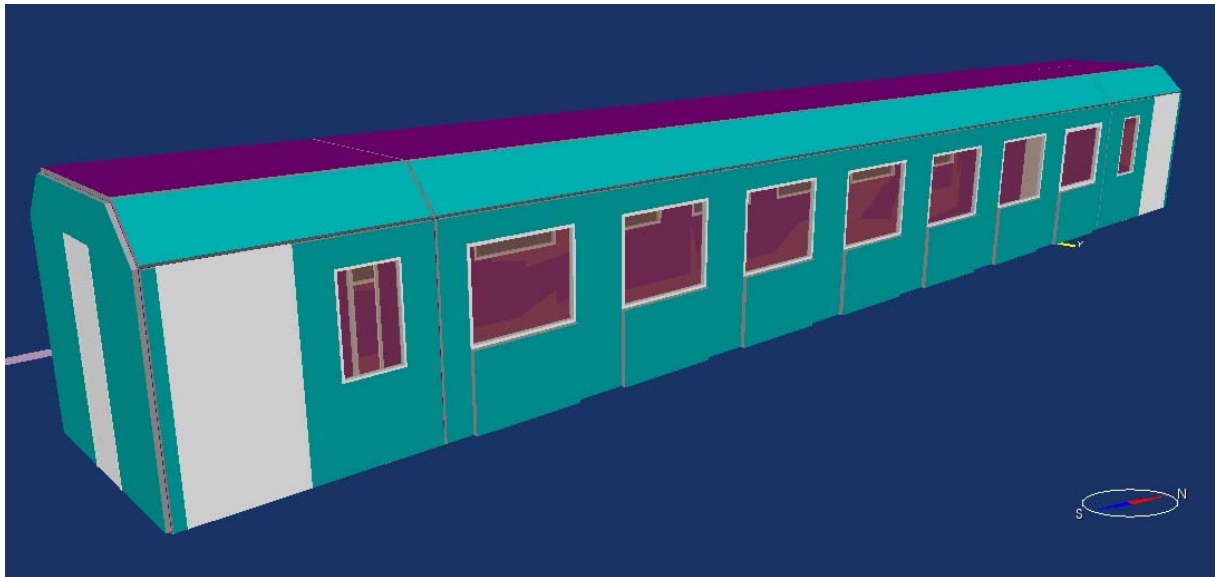


Abbildung 22: Modell des EW II (RhB) in IDA ICE

II) Modellbildung der Anlagentechnik

Die HLK-Technik der simulierten Züge besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten: einer Luftbehandlungseinheit in der Zwischendecke, einer Kälteerzeugung auf dem Dach und einem Abluftventilator. Jeder der drei Wagen ist mit diesen Komponenten ausgestattet.

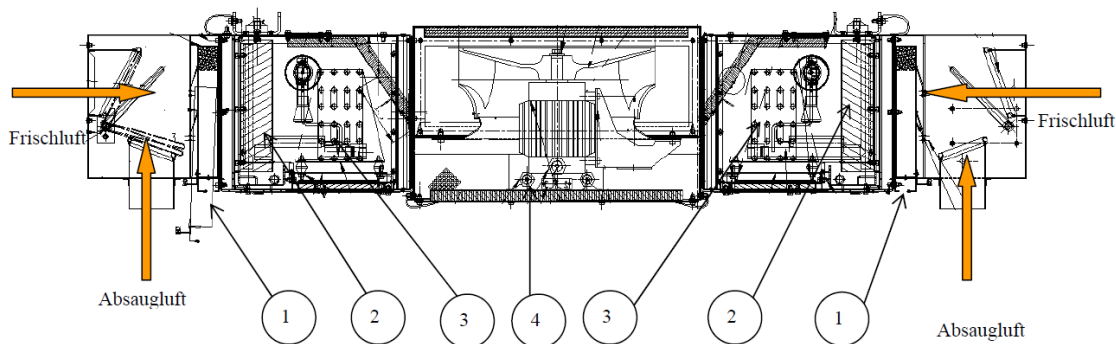


Abbildung 23: Schnitt durch die Luftbehandlungseinheit

- 1) Filter
- 2) Vorwärmung Heizregister
- 3) Heizregister
- 4) Motorventilator

In Abbildung 23 ist ein Schnitt durch die Luftbehandlungseinheit dargestellt. Links und rechts in der Grafik sind Klappen zu erkennen. Diese regeln die Zusammensetzung der Zuluft über die Anteile von Aussenluft und Umluft. Es gibt drei mögliche Stellungen:

- a) Nur Umluft
- b) Maximaler Aussenluftanteil
- c) Minimaler Aussenluftanteil

Im Folgenden wird das Funktionsprinzip der Lüftungsanlage schrittweise beschrieben. Abbildung 24 zeigt den schematischen Betrieb der HLK-Technik.

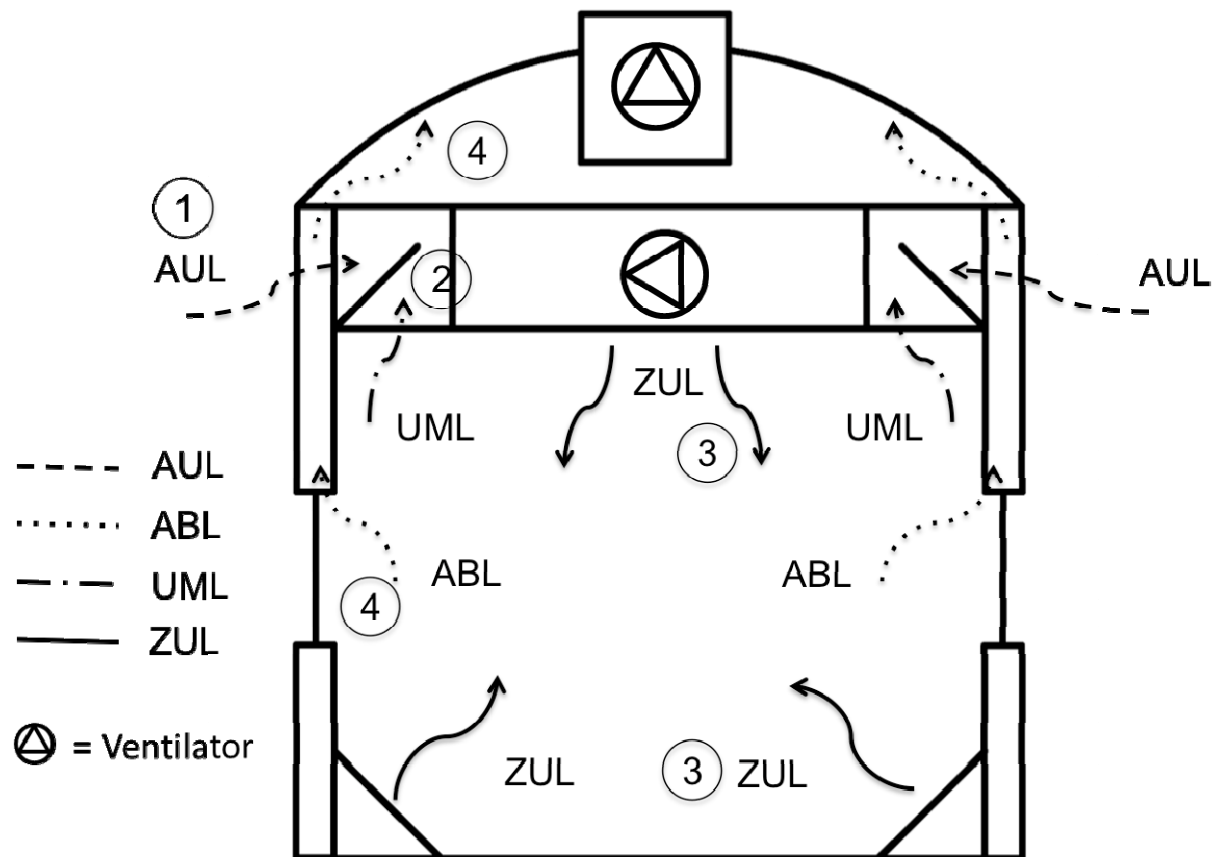


Abbildung 24: Funktionsprinzip Lüftungsanlage

- 1) Ansaugen der Aussenluft über den Eingangsbereichen des Wagens
- 2) Regelung der Zuluftzusammensetzung (AUL vs. UML)
- 3) Behandelte Zuluft wird im Regelfall "Sommer" über die Lochdecke und im Regelfall "Winter" über die Auslässe unter den Sitzen in den Wagon geleitet. Es gibt auch noch einen Regelfall "Mischung". Dann werden 50% der Zuluft über die Decke und 50% über die Auslässe am Boden dem Wagon zugeführt.
- 4) Abluft wird oberhalb der Fenster in die Zwischendecke abgesaugt und über den Abluftventilator an die Umgebung abgegeben.

Bei den Zugskompositionen mit Kühlung wurde diese im Modell berücksichtigt und mit entsprechender Kühlleistung simuliert.

2.8.2. Ergebnisse und Erkenntnisse Simulationsmodell / Simulation

Als Ergebnis der Simulation resultierten detaillierte Aussagen in Stundenschritten (bei Bedarf auch kürzere Zeitschritte möglich) zu den Komfortparametern im Innenraum und zu den Zustandsgrösse sowie zum Energieverbrauch der HLK-Technik. Die Simulationen ermöglichten Massnahmen am Fahrzeug (Fahrzeughülle, HLK-Regelung und/oder Verbesserung der HLK-Konzepte und -Komponenten) sowohl energetisch als auch betreffend der Auswirkungen auf die Behaglichkeit im Fahrgastraum quantitativ zu beurteilen. Weiterführend konnte so auch eine wirtschaftliche Beurteilung (Energie-Minder- oder Mehrverbrauch) vorgenommen werden.

Beim EW II wurde die Jahressimulation für das Jahr 2011 durchgeführt. Das Energieflussdiagramm wird im Kapitel 2.12.2 erläutert.

2.9. Validierung Simulation

2.9.1. Vorgehen Validierung Simulation

Die Langzeitmessungen der Universität Basel in Kombination mit den durchgeführten temporären Messungen (Aufheizen und Tracergasmessung) und Personenzählungen waren Basis für die Kalibrierung des Simulationsmodelles.

2.9.2. Ergebnisse und Erkenntnisse Validierung Simulation

Mit den oben genannten Messungen konnte eine erfolgreiche Validierung des Modells in den Punkten thermische Masse, Wärmedurchgang der Hülle sowie HLK-Technik am stehenden Zug erzielt werden.

2.10. Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse

Vorgehen Sensitivitätsanalyse

(Auszug aus Masterarbeit von J. Maderspacher, Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse, 2012)

Die Sensitivitätsanalyse (Sensitivity Analysis = SA) ist das Studium eines Modells. Es wird untersucht in wie weit die Änderung des Outputs (Uncertainty) den Änderungen eines Inputparameters zugerechnet werden kann. Sie ist eine Technik, welche systematisch die Variablen eines Modells ändert, um deren Einfluss zu bestimmen. Anders formuliert wird in der Sensitivitätsanalyse der Einfluss von Inputfaktoren (einzeln oder gemeinsam) auf bestimmte Ergebnisgrößen untersucht. Die Analyse kann mathematisch durch das Analysieren von Modellgleichungen erfolgen oder durch Variation einzelner Inputfaktoren (Iterationsverfahren) und einem damit verbundenen Vergleich der Ergebnisse mit dem Ergebnis des Standardinputs.

Allgemeiner ausgedrückt untersuchen Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse die Robustheit eines Systems, sofern das System der Form eines statistischen Modells unterliegt.

Eine Monte-Carlo-Simulation oder Monte-Carlo-Studie, auch MC-Analyse, ist ein Verfahren aus der Stochastik, bei dem sehr häufig durchgeführte Zufallsexperimente die Basis darstellen. Es wird dabei versucht, mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie analytisch nicht oder nur aufwendig lösbare Probleme numerisch zu lösen. Nach einer MCA hat z.B. der Output Heizenergie nicht mehr nur einen Wert, sondern auch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung bei der im Falle einer Normalverteilung ein Erwartungswert $\bar{Y}$ und eine Standardabweichung σ ermittelt werden kann.

Bei einer Monte Carlo Studie wird allen ungewissen Inputs eine spezifische Wahrscheinlichkeitsverteilung zugeordnet. Alle Input Parameter werden dann gleichzeitig variiert.

Unsicherheitsanalyse der Modellkalibrierung für den NINA (BLS)

(Auszug aus Masterarbeit von J. Maderspacher, Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse, 2012)

Am Beispiel des NINA wurde die Monte Carlo Analyse mit Hilfe der Statistiksoftware R (R Core Team, 2013) und mit IDA-ICE (EQUA, 2013) umgesetzt. Der Ablauf kann wie folgt gegliedert werden:

1. Definition der Parameter wie z.B. g-Wert der Verglasung oder Aussenluftanteil der Lüftungsanlage
2. Zuweisung der Wahrscheinlichkeitsverteilung an die Parameter (am Beispiel Normalverteilung)

3. Mit einer Samplingmethode werden 120 Stichproben aus den Verteilungen genommen und eine Matrix erstellt
4. Importieren der Samplingmatrix in das Simulationsmodell
5. Durchführung von 120 Simulation mit IDA-ICE
6. Aufbereitung des Outputs mit der Software R
7. Durchführung einer Unsicherheitsanalyse mit dem Output (z.B. der Verteilung der Heizenergie)

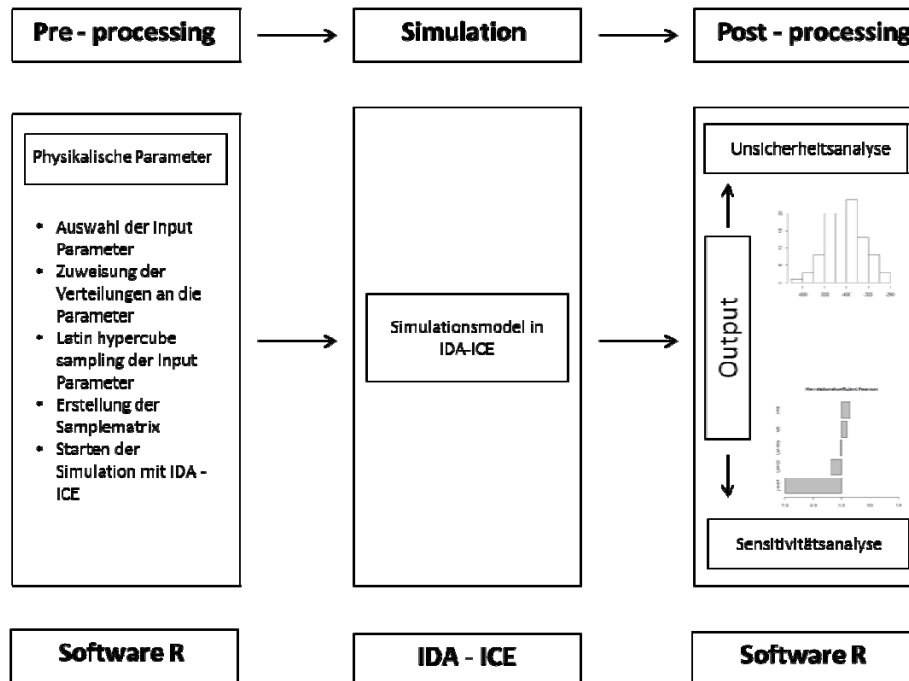


Abbildung 25: Schematischer Ablauf einer Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse in drei Schritte

Es wurden folgende Parameter für die Untersuchung herangezogen:

- Aussentemperatur: Aufgrund der Beeinflussung des Temperaturfühlers an der Aussenwand des Zuges wurde den Messungen eine Unsicherheit hinzugefügt.
- Aussenluftanteil Fahrgastraum: Hier wurden die Unsicherheiten der Tracergasmessung berücksichtigt.
- Aussenluftanteil Führerstände: Aufgrund der Erfahrung aus der Tracergasmessung in den Fahrgasträumen wurde für den Aussenluftanteil der Führerstände ebenfalls eine Unsicherheit definiert.
- Interne Lasten: Die internen Lasten setzen sich im Modell aus Abwärme von Geräten und der Personenbelegung zusammen. Beide Grössen wurden in den bisherigen Messungen nur sehr ungenau ermittelt. Deshalb wurden sie im Modell als konstante Last definiert. Dies entspricht nicht der Realität und wurde deshalb mit einer Unsicherheit beaufschlagt.
- Wärmeübergangskoeffizient: Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient der Aussenhülle wurde nur mit einem vereinfachten Ansatz berechnet.
- Wärmebrücken: Die Aufheizmessung wurde mit Hilfe eines Sättigungsmodelles ergänzt. Hier können Unsicherheiten durch die Messung und das Modell entstehen und dadurch die Kalibrierung des Verlustkoeffizienten (Wärmebrücken) beeinflussen.

- Fläche interne Masse: Auch die thermische Speichermasse wurde mit Hilfe des Sättigungsmodelles kalibriert.
- Solarstrahlung: Die Umrechnung der gemessenen horizontalen Globalstrahlung in horizontale Diffusstrahlung und Direktstrahlung wurde mit Hilfe von Himmelsmodellen (Perez et al., 1992) realisiert. Diese Modelle können generell nur als Näherungen betrachtet werden. Dies trifft besonders am Beispiel des NINA zu, da sich die Position und somit auch die Umgebung des Zuges ständig verändern.
- Kennwerte Verglasung: Der g-Wert sowie der U-Wert der Verglasung wurden gemäss den Messungen der EPFL (Schüler, 2013) mit einer Unsicherheit versehen.

EW II (RhB)

Der Ablauf der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse des EW II (RhB) war identisch zur NINA (BLS). Der einzige Unterschied lag darin, dass als Software nicht mehr R sondern MATLAB eingesetzt worden ist.

Wie bei der NINA (BLS) wurden auch bei diesem Simulationsobjekt die Parameter des Modells ausgewählt, bei welchen im Kalibrierungsprozess die Annahmen mit den grössten Unsicherheiten getroffen wurden.

Die ausgewählten Parameter wurden mit einer Unsicherheit in Normalverteilung versehen. Diese wird durch die Standardabweichung in Prozent vom Mittelwert angegeben (Tabelle 3).

Bezeichnung	Standardabweichung [%]	Einheit
Azimut Winkel Wagen	37.8	°
Personenbelegung	9.7	---
Leistung Radiatoren	19.5	W
Umluftanteil Lüftung	9.7	L/s
Volumenstrom Lüftung	9.7	L/s
Türöffnungszeit	39	s
Infiltration durch Wände	15.5	kg/s
Spezifische Wärmeleitfähigkeit Wände	38	W/(m*K)
Wärmedurchgangskoeffizient Fenster	6.1	W/(m ² *K)
Energiedurchlassgrad Fenster	7.5	---
Delta Aussentemperatur	0.75	°C

Tabelle 3: Parameterunsicherheit beim EW II (RhB)

2.10.1. Spezifische Ergebnisse und Erkenntnisse Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse für einzelne Fahrzeuge

NINA (BLS)

(Auszug aus Masterarbeit von J. Maderspacher, Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse, 2012)

Im Rahmen der Monte Carlo Analyse wurden 120 Simulationen mit dem Modell der NINA durchgeführt. Abbildung 26 zeigt die Auswertung der Zielgrösse Heizenergie. Die beiden Kontrollgrafiken Boxplot und Q-Q Plot lassen eine Normalverteilung der Daten erkennen. So konnten ein Erwartungswert von ca. 130'000 kWh und eine

Standardabweichung von ca. 17'500 kWh ermittelt werden. Daraus resultierte eine Gesamtunsicherheit des Modelles, bezogen auf die kalkulierte Heizenergie, von ca. $\pm 15\%$.

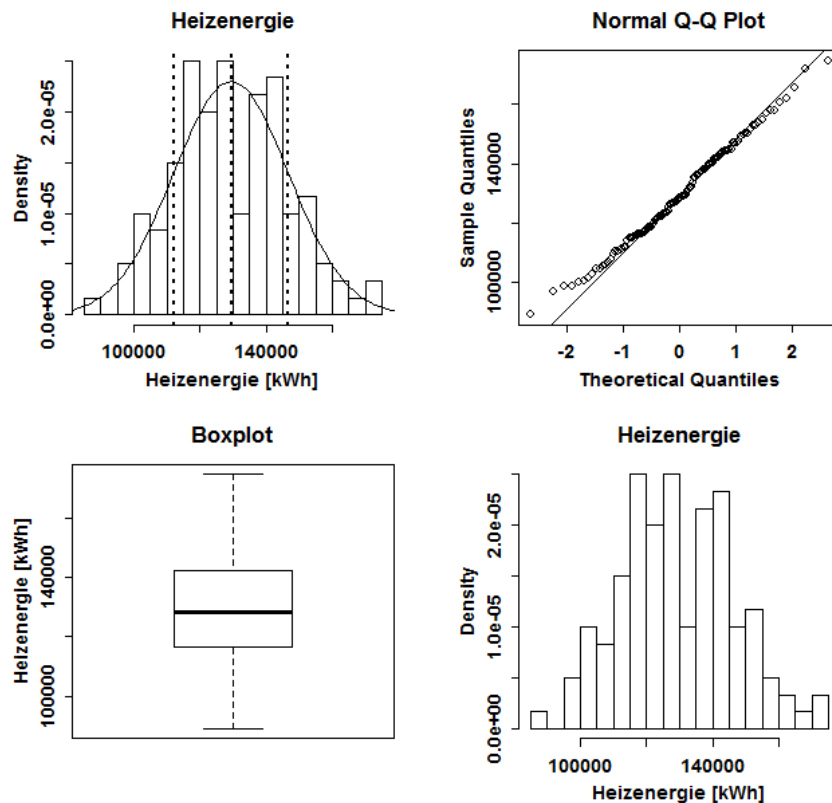


Abbildung 26: Unsicherheitsanalyse der Zielgrösse Heizenergie

In Abbildung 27 ist die Unsicherheitsanalyse der Zielgrösse Kühlenergie dargestellt. Im Boxplot sind im oberen Bereich Ausreisser zu erkennen, welche auch im Histogramm sichtbar sind. Auch die Werte am unteren und oberen Ende des Q-Q Plots zeigen Unregelmässigkeiten. Deshalb ist eine Untersuchung auf Basis einer Normalverteilung nur bedingt anwendbar. Da hier aber nur eine qualitative Vorstellung der Methode erfolgen sollte, wurde sie dennoch durchgeführt. Der errechnete Erwartungswert liegt bei ca. 9'500 kWh und die Standardabweichung bei 3'350 kWh. Dies ergibt eine Gesamtunsicherheit der Zielgrösse Kühlenergie von ca. $\pm 35\%$.

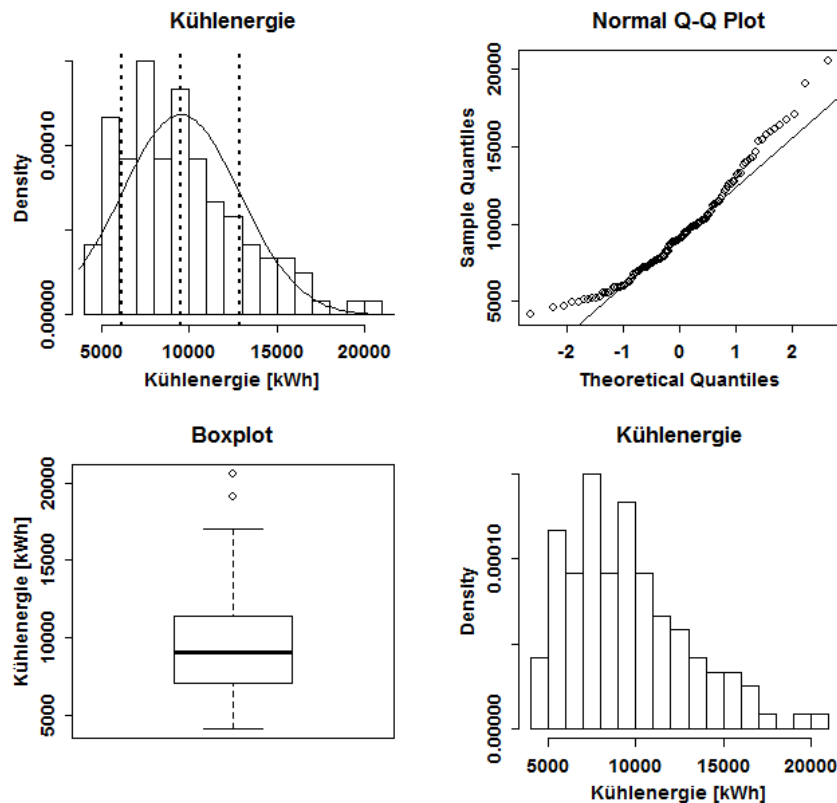


Abbildung 27: Unsicherheitsanalyse der Zielgrösse Kühlenergie

Die Differenz in den Unsicherheiten vom Heiz- und Kühlenergieverbrauch liegt am unterschiedlichen Einfluss der definierten Parameter, sowie am Verhältnis der beiden Energieverbräuche zueinander. Der Verbrauch für Heizen ist mehr als 10-mal so hoch wie der Verbrauch für das Kühlen. Deshalb hat z.B. die Unsicherheit der "Internen Last", welche einen Erwartungswert von 3.75 kW mit einer Standardabweichung von $\pm 50\%$ besitzt, auf die Kühlenergie einen deutlich höheren Einfluss.

Die Resultate in Abbildung 28 beschreiben die Unsicherheit des Gesamtenergieverbrauches. Die beiden Kontrollgrafiken Boxplot und Q-Q Plot lassen eine Normalverteilung der Daten erkennen. Der Erwartungswert liegt bei ca. 140'000 kWh die Standardabweichung beträgt 14'350 kWh. Daraus ergibt sich eine Unsicherheit von $\pm 11\%$. Die Unsicherheit des Gesamtverbrauches weist somit den kleinsten Wert auf. Dies kann vermutlich auf die Überlagerung von Effekten des Heiz- und Kühlenergieverbrauches zurückgeführt werden. Generell wird die Unsicherheit im Gesamtverbrauch durch die Dominanz der Heizenergie verursacht.

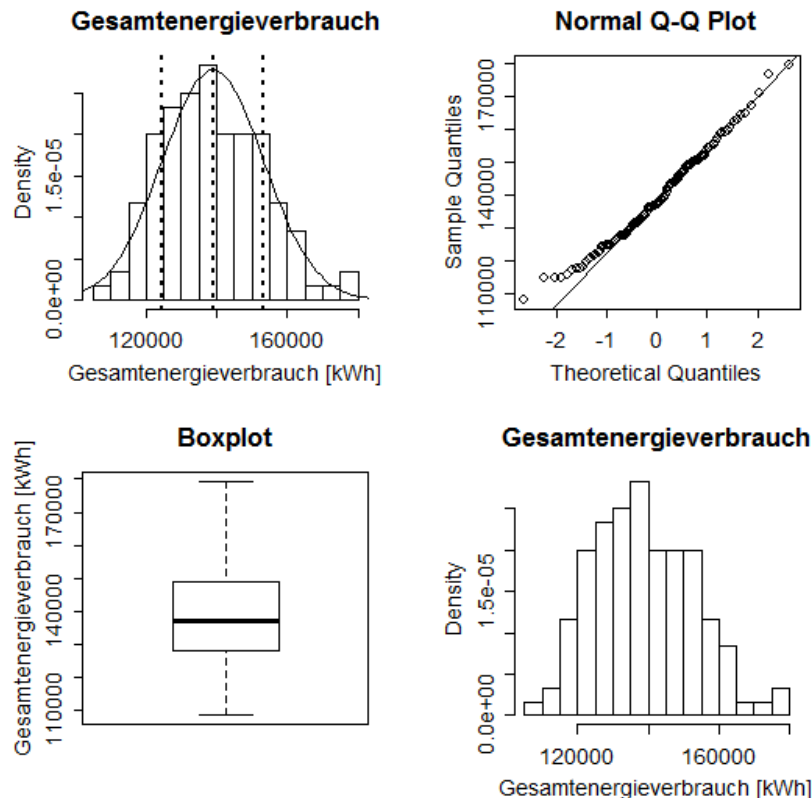


Abbildung 28: Unsicherheitsanalyse der Zielgrösse Gesamtenergieverbrauch

Sensitivität

Tabelle 4 beinhaltet die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse durch die Streudiagramme. Die beiden Parameter "Interne Last" und "Aussentemperatur" dominieren bei beiden Zielgrössen. Der hohe Einfluss der "Internen Last" kann durch die definierte Unsicherheit des Parameters von 50 % erklärt werden. Diese grosse Unsicherheit ist auf die fehlenden Informationen bezüglich Personenbelegung und Abwärme von Geräten zurückzuführen.

Die starke Sensitivität des Modelles in Bezug auf die Aussentemperatur ist dagegen sehr interessant, da die Standardabweichung der Temperatur nur 1°C beträgt. Die Unterschiede des Temperaturfühlers am Zug gegenüber stationären Messungen können aber bis zu 5 °C betragen. Die hohen Werte bei den Varianzen zeigen, dass die Unsicherheit des Heiz- und Kühlenergieverbrauches im Modell hauptsächlich durch diese beiden Parameter verursacht wird.

Für eine erste Reduktion der Gesamtunsicherheiten müssten also die Unsicherheiten dieser beiden Eingangsgrössen reduziert werden. Dies könnte z.B. durch ein auf die CO₂-Messungen basiertes Personenbelegungsmodell oder durch detailliertere Messungen der internen Wärmelasten erfolgen. Das Problem der Aussentemperaturmessung könnte durch eine, mit dem Aufheizversuch kalibrierte, Korrekturfunktion der gemessenen Temperatur gelöst werden.

Heizen			Kühlen		
Rang	Parameter	Varianz	Rang	Parameter	Varianz
1	Aussentemperatur	151.8x10 ⁶	1	Interne Last	6.66x10 ⁶
2	Interne Last	146.2x10 ⁶	2	Aussentemperatur	4.62x10 ⁶
3	Wärmeübergangskoe.	74.4x10 ⁶	3	Wärmeübergangskoe.	2.14x10 ⁶
4	Aussenluftanteil Fgr.	37.8x10 ⁶	4	Aussenluftanteil Fgr.	1.18x10 ⁶
5	U-Wert Verglasung	29.3x10 ⁶	5	U-Wert Verglasung	0.58x10 ⁶
6	g-Wert Verglasung	12.6x10 ⁶	6	g-Wert Verglasung	0.54x10 ⁶
7	Diffusstrahlung	11.2x10 ⁶	7	Diffusstrahlung	0.47x10 ⁶
8	Fläche interne Masse	9.67x10 ⁶	8	Fläche interne Masse	0.45x10 ⁶
9	Wärmebrücken	9.12x10 ⁶	9	Direktnormalstrahlung	0.44x10 ⁶
10	Aussenluftanteil Fst.	7.67x10 ⁶	10	Aussenluftanteil Fst.	0.28x10 ⁶
11	Direktnormalstrahlung	6.89x10 ⁶	11	Wärmebrücken	0.17x10 ⁶

Tabelle 4: Rangliste der sensitivsten Parameter aus der Analyse der Streudiagramme

EW II (RhB)

Für den Einheitswagen II der RhB wurden mit den Parameterunsicherheiten aus Abschnitt 0 eine Monte Carlo Studie mit 104 Iterationen durchgeführt. Die nachfolgenden Resultate sind die Ergebnisse dieser Studie.

Heizenergie total

Die totale Heizenergie setzt sich aus der Heizenergie für die Heizregister in den beiden Lüftungsgeräten sowie der Energie für die elektrischen Radiatoren in den Vorräumen und dem WC zusammen. Anhand des Q-Q Plots in Abbildung 29 kann man die Verteilung der Werte grob als Normalverteilung annehmen, wobei allerdings eine sogenannte Kurzschwänzigkeit vorliegt. Das heisst, dass im Gegensatz zur perfekten Normalverteilung die Werte am Rand der Verteilung näher am Mittelwert liegen. Der Mittelwert dieser Verteilung liegt bei 45'114 kWh und die Standardabweichung bei 4'188 kWh. Daraus ergibt sich eine Gesamtunsicherheit bezüglich der gesamten Heizenergie von $\pm 9.3\%$. Verwendet man anstelle der doppelten Standardabweichung den Quantilsabstand QA16, welcher 68% aller Werte enthält, erhält man eine Unsicherheit von $\pm 8.6\%$.

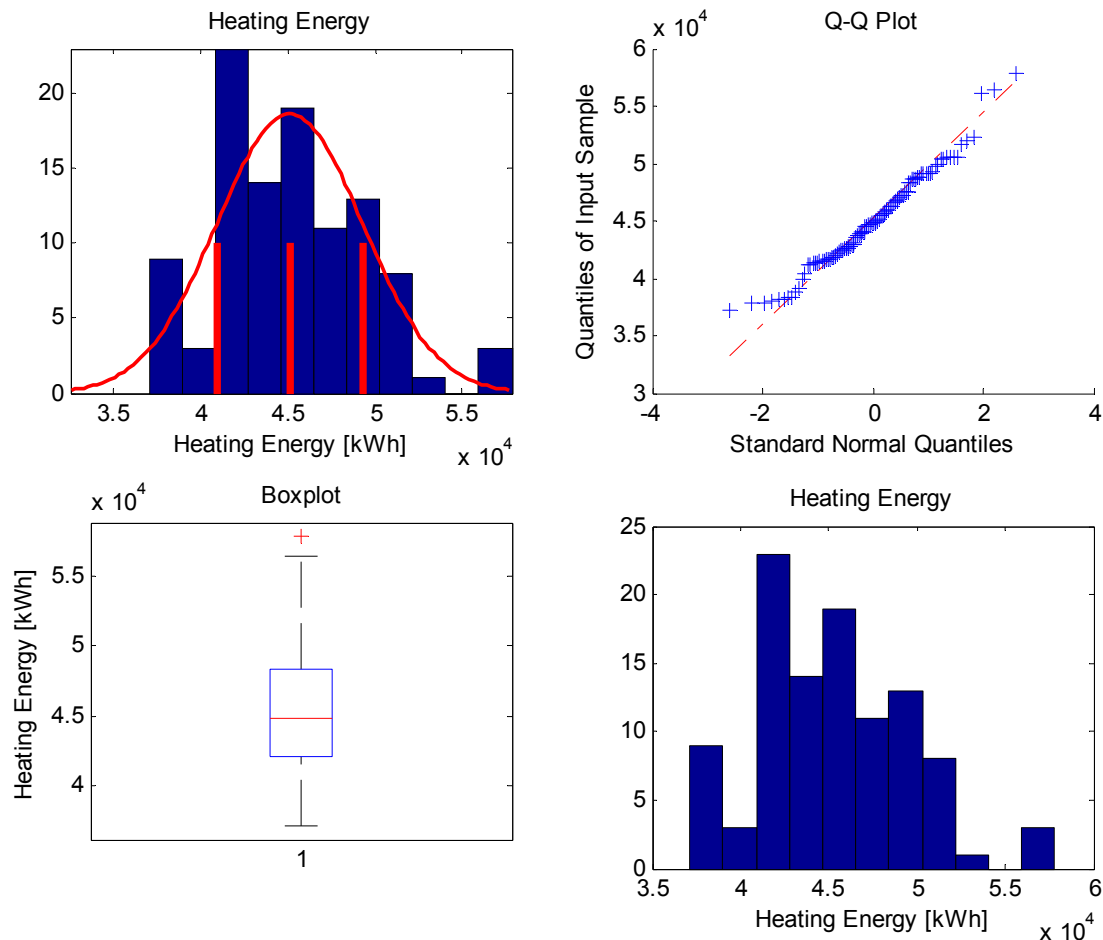


Abbildung 29: Unsicherheit der Heizenergie des EW II

Sensitivität

Die Sensitivität beschreibt den Einfluss der variierten Modellparameter auf die gewählte Zielgrösse. Dazu wird mit der Methode "Conditional Variances - Second Path" (Saltelli & et al., 2008, S. 21-23) die Abhängigkeit zwischen den Modellparametern und der Zielgrösse betrachtet. Die Abbildung 30, die daraus entsteht, ist dabei als Rangliste der Parameter gemäss ihres Einflusses auf die Zielgrösse zu verstehen.

Betrachtet man die gesamte Heizenergie als Zielgrösse, ergibt sich eine sehr grosse Abhängigkeit von der Aussentemperatur. Die Ursache dafür ist, dass durch den verhältnismässig grossen Aussenluftanteil der Lüftung viel Energie aufgebracht werden muss, um die Aussenluft zu konditionieren. Den zweitgrössten Einfluss auf die Heizenergie hat die Leistung der Elektroradiatoren. Der Grund ist, dass die gewählte maximale Heizleistung in grossem Masse mit der Zielgrösse "Heizenergie für die Radiatoren" zusammenhängt. Da diese etwa ein Drittel der gesamten Heizenergie ausmacht, wirkt sich das auch stark auf die Abhängigkeit zur gesamten Heizenergie aus.

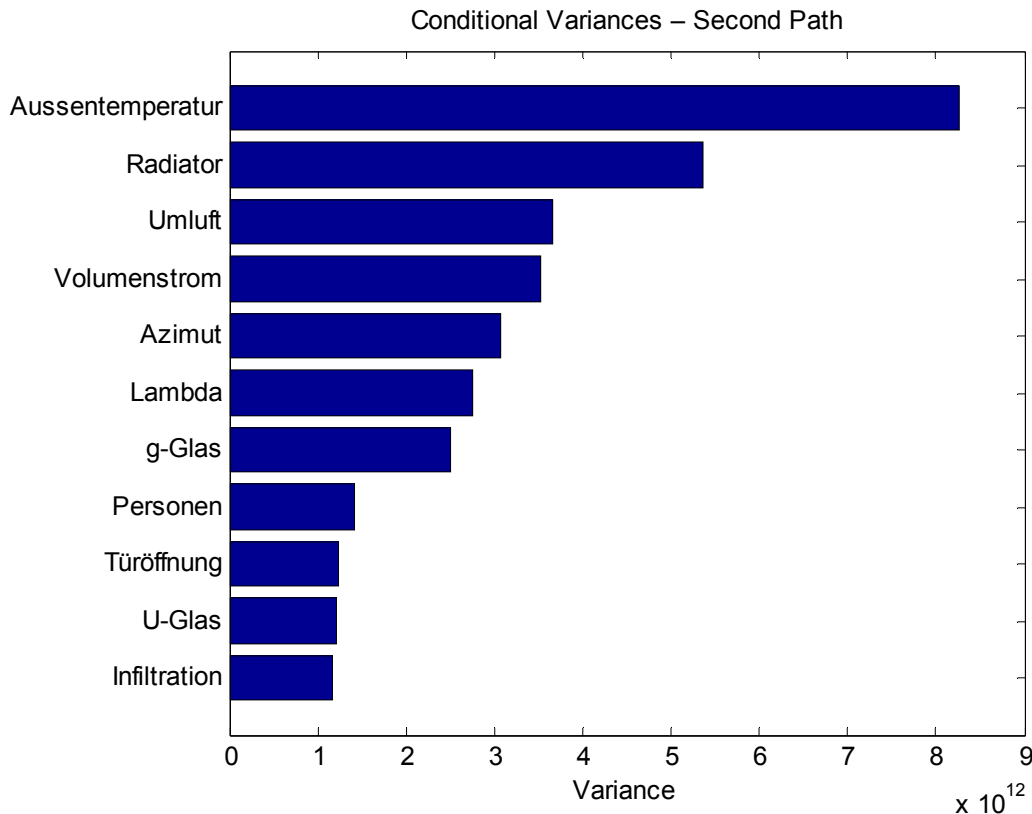


Abbildung 30: Rangliste der Sensitivität beim EW II

Will man also die Gesamtunsicherheit des Modells verkleinern, müsste man in einem ersten Schritt die gewählte Parameterunsicherheit der Aussentemperatur von $\pm 0.75^\circ\text{C}$ verkleinern. Dies ist praktisch fast nicht möglich, da die Grundlage die gemessene Aussentemperatur darstellt. Allein schon die Sensoren weisen bei einer Jahresmitteltemperatur von 9.6°C eine Unsicherheit von $\pm 0.4^\circ\text{C}$ auf. Dazu muss noch eine weitere Unsicherheit addiert werden, da die Temperatur nur an zwei Positionen gemessen und als räumlicher Mittelwert angenommen wird.

Die zweitgrösste Stellschraube, um die Gesamtunsicherheit einzugrenzen ist, die Unsicherheit der Radiatorleistung zu reduzieren. Für diese Studie wurde ein Wert von 20% angenommen, da in der Realität der Zugbegleiter die Heizstufe der Radiatoren manuell nach eigenem Gutdünken einstellen kann. Dadurch, dass diese über keinen Schlummerbetrieb, also zum Beispiel eine Absenkung in der Nacht, verfügen, summiert sich deren Energiebedarf übers Jahr überdurchschnittlich auf. Die Unsicherheit liesse sich eingrenzen, wenn entweder das Schaltverhalten des Zugbegleiters deterministisch wäre oder aber die momentane Heizstufe als zeitkontinuierlicher Messwert vorliegen würde. Beide Varianten liessen sich entsprechend in das Modell einbinden und damit lässt sich eine Reduktion der Parameterunsicherheit rechtfertigen.

2.11. Personenzählung

2.11.1. Vorgehen Personenzählung

Um das Simulationsmodell weiter zu verfeinern, ist es notwendig die internen Wärmequellen detailliert im Verlauf über die Zeit zu kennen. Im Fall der Schienenfahrzeuge kann man bei den internen Lasten ausschliesslich von Personen ausgehen, da die von den Personen verwendeten elektronischen Geräte vernachlässigt werden

können. Die Beleuchtung, welche ebenfalls Wärme in die Zugkomposition abgibt, ist bekannt und wird im Simulationsprogramm IDA separat berücksichtigt.

Die Personenbelegung ist kein konstanter Wert und liegt auch nicht als Messwert vor. Der Grund liegt darin, dass je nach Fahrzeug gar keine Messinstrumente vorhanden sind oder es für die Betreiber sehr aufwendig ist, die Datensätze aus dem ERP-System (Enterprise-Resource-Planning-System) herauszuziehen.

Als Alternative bietet sich die Abschätzung der jeweils mitfahrenden Personenzahl anhand des gemessenen CO₂-Wertes an. Es war zum Vorneherein klar, dass man damit keine exakten Zahlen erhalten kann. Es ist jedoch sicher eine Verbesserung gegenüber der Annahme einer konstanten Personenanzahl über die gesamte Betriebszeit.

Allgemeines Vorgehen Personenzählung

Die Personenanzahl lässt sich theoretisch über das folgende Formel herleiten:

$$N_{\text{pers}} = \frac{(p_i - p_a) * L * V * \rho_{\text{CO}_2}}{m}$$

N _{pers}	Anzahl Personen im Raum
p _i :	CO ₂ Konzentration innen (gemessen)[ppm]
p _a :	CO ₂ Konzentration Umgebung [ppm]
L:	Luftwechselrate [1/h]
V:	Raumvolumen [m ³]
ρ _{CO₂} :	Dichte CO ₂ [kg/m ³]
m:	CO ₂ -Emission pro Person [mg/h]

Quelle: (Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz - BGIA, 2005)

Die Parameter V und ρ_{CO₂} sind für jede Zugkomposition exakt bestimmbar. p_i ist ebenfalls aus der Messung bekannt. Die restlichen Werte sind Modellparameter, welche für jede Zugkomposition kalibriert werden müssen. Eine Kalibration bedeutet, dass man über einen gewissen Zeitraum die Personenanzahl exakt bestimmt und diese Zahl mittels des Modells in Relation zur gemessenen CO₂-Konzentration bringt. Die Bestimmung der Personen erfolgte je nach Zug entweder mit einer manuellen Zählung direkt im Fahrgastraum oder aber aus dem ERP-System.

Vorgehen bei der NINA (BLS)

Die tatsächlichen Fahrgastzahlen für die beiden betrachteten Tage wurden von der BLS zur Verfügung gestellt. Da die Zugkomposition mit zwei CO₂-Sensoren ausgestattet ist, wurde der Mittelwert der beiden verwendet. Die Grafik Abbildung 31 zeigt den Vergleich des kalibrierten Modells mit den realen Werten.

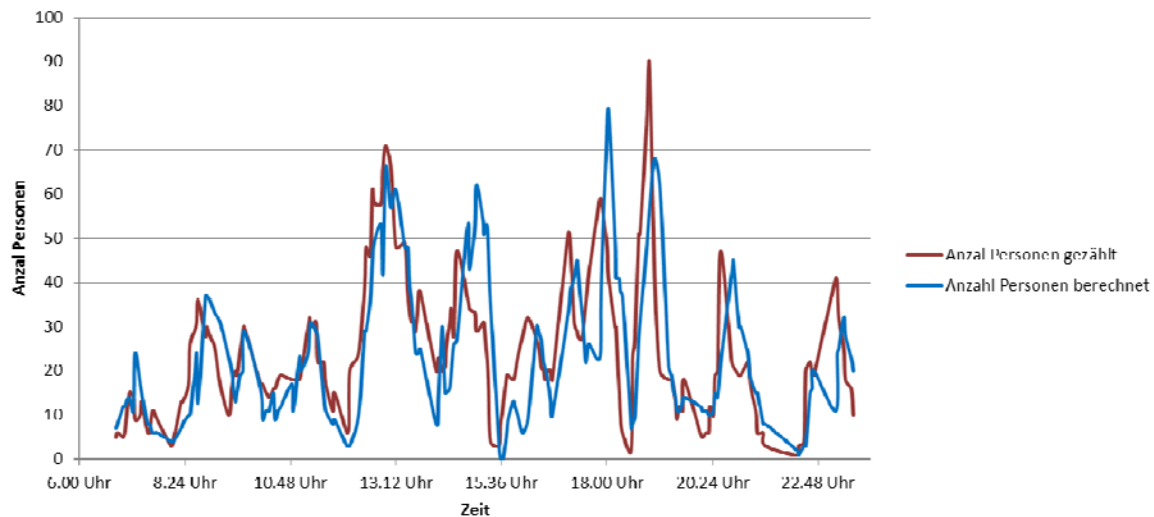


Abbildung 31: Kalibrierung Personenmodell NINA (BLS) mit Daten vom 16.02.2013

Pano GEX (RhB)

Da der Wagen auf einer gebirgigen Strecke eingesetzt wird, ändert sich dessen Höhe über Meer im Verlaufe der Fahrt zum Teil stark. Da die Konzentration des CO₂ in der Aussenluft von der Höhe abhängt, muss dieser Faktor mitberücksichtigt werden. Der Rest des mathematischen Modells bleibt gleich.

Der Korrekturfaktor in Abhängigkeit der aktuellen Höhe kann über das Verhältnis der aktuellen Luftdichte zum Basiswert der Luftdichte berechnet werden. Die Formel für die Luftdichte der trockenen Luft ist dabei eine Näherung, welche für die Schweiz gilt. Das Verhältnis, das den Korrekturfaktor ergibt, beschreibt sich folgendermassen:

$$k = \frac{c_1 * e^{-c_2 * h(h)}}{c_1 * e^{-c_2 * h_{basis}}}$$

$$c_1 = 1.247015$$

$$c_2 = 0.000104$$

Quelle: (Bundesamt für Energie, 1999)

Daraus folgt für die CO₂-Konzentration der Aussenluft in Abhängigkeit der Höhe:

$$p(h) = k * p_{basis}$$

Da die RhB in diesem Wagen nicht über ein System zur Fahrgastzählung verfügt, wurden an einem Tag die Personen manuell gezählt. Mit Hilfe dieser Zählung wurde das mathematische Modell kalibriert. Der Vergleich mit den realen Daten ist in Abbildung 32 zu sehen.

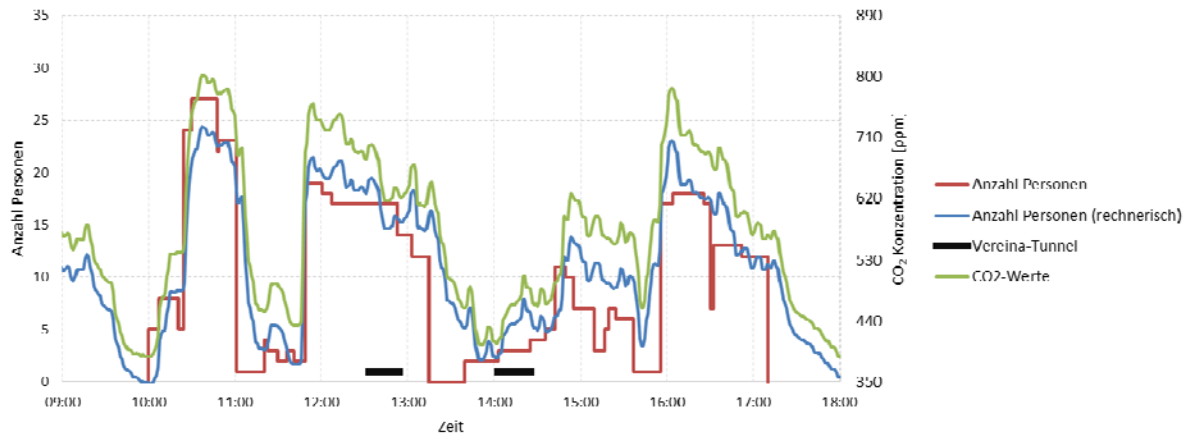


Abbildung 32: Kalibrierung Personenmodell Pano GEX (RhB) mit Daten vom 10.06.2013

2.12. Energieflussdiagramm

2.12.1. Vorgehen Energieflussdiagramm

Das Energieflussdiagramm wird auf Basis der Daten der Jahressimulationen erstellt.

2.12.2. Ergebnisse und Erkenntnisse Energieflussdiagramm

In Abbildung 33 ist der Energiefluss auf Basis der Simulationsdaten des Jahres 2011 für einen EW II dargestellt. Alle Prozentangaben beziehen sich auf die Gesamtenergie ohne Traktion und sind gerundet.

Auf der linken Seite ist der Energieeintrag und auf der rechten Seite der Energieverlust dargestellt. "Solar" steht für den solaren Wärmeeintrag durch die Fenster, "Licht" für den Wärmeeintrag durch die Beleuchtung, "Personen" für den Wärmeeintrag durch die Personen. Der Passagierraum mit den Sitzplätzen verfügt über eine Luftheizung. Die beiden Vorräume werden nur mit Radiatoren beheizt. Diese werden nach Aussentemperatur 3-stufig geregelt, was in der Simulation eine grosse Unsicherheit mit sich bringt. Von der erhitzten Luft wird nur ein kleiner Anteil verwendet um den Heizbedarf zu decken. Der grössere Anteil der erhitzten Luft wird ungenutzt als Fortluft abgeführt.

Die Verluste über die Infiltration beinhalten auch die Verluste der Türöffnungen.

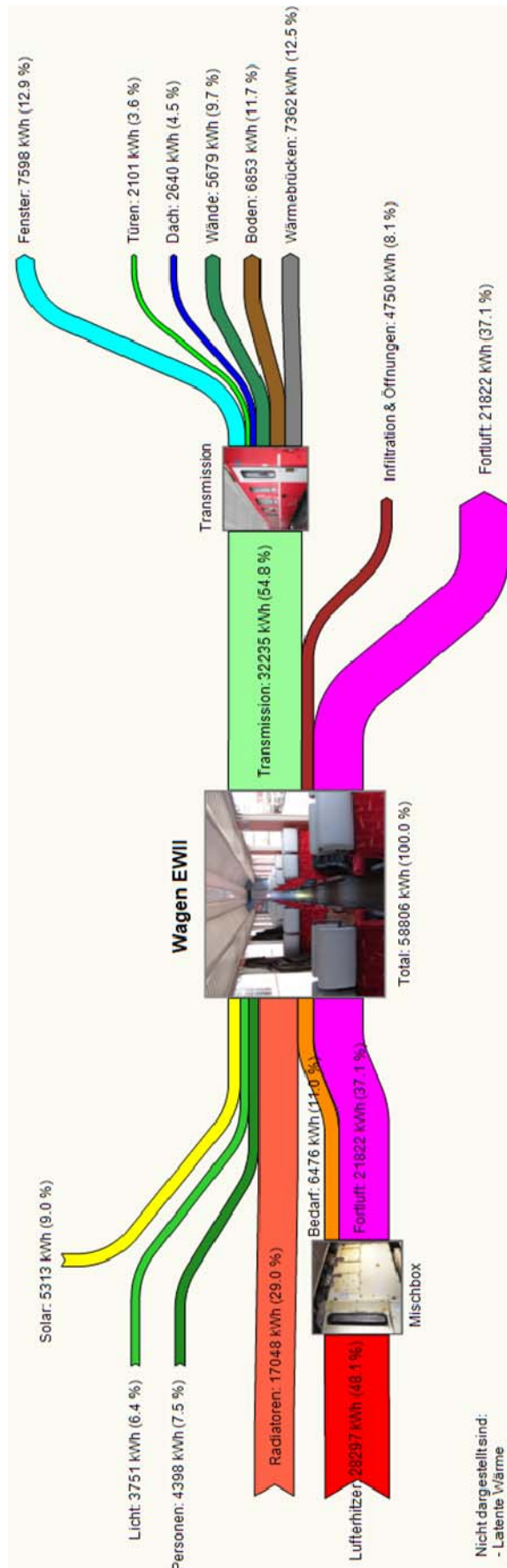


Abbildung 33: Energieflussdiagramm Jahressimulation 2011 des EW II (RhB)

3. Modul 3 – Identifikation der Massnahmen mit hohem Einsparpotential und geringem Umsetzungsaufwand

3.1. Ziele

Aufgrund der Erkenntnisse aus Modul 1 und Modul 2 lässt sich der Energieverbrauch der HLK-Technik in den analysierten Schienenfahrzeugen transparent darstellen und teilweise auch aufschlüsseln. Daraus können Bereiche mit grossem Optimierungspotenzial identifiziert werden. Im Modul 3 sollen betriebliche und technische Massnahmen erarbeitet werden und mit Hilfe der Simulationsmodelle aus Modul 2 deren Einsparpotenzial quantifiziert werden. Verbunden mit dem Aufwand für die Umsetzung der Massnahmen lässt sich eine Liste von möglichen Massnahmen nach Prioritäten ordnen. Wichtige Randbedingung dabei ist immer, dass der Komfort für die Fahrgäste nicht verschlechtert werden darf.

3.2. Arbeitsfortschritt

In der Tabelle 5: Arbeitsfortschritt der einzelnen Arbeiten des Moduls 3 pro Fahrzeug ist der Arbeitsfortschritt der einzelnen Arbeiten pro Fahrzeug aufgelistet.

100%	Arbeit ist abgeschlossen
x%	In Bearbeitung
0%	Arbeit noch offen

Fahrzeug	NINA (BLS)	EW II (RhB)	EW IV (RhB)	Pano GEX (RhB)	Flirt (SOB)	ICN (SBB)
Massnahmen definieren	100%	100%	-	-	50%	0%
Variantenanalyse (Simulation)	100%	100%	-	-	0%	0%

Tabelle 5: Arbeitsfortschritt der einzelnen Arbeiten des Moduls 3 pro Fahrzeug

3.3. Massnahmen definieren

3.3.1. Vorgehen Massnahmen definieren

In einer ersten Phase wurden Ideen für betriebliche und technische Massnahmen gesammelt und bewertet. Zusammen mit den Bahngesellschaften wurden diese priorisiert. Die einzelnen Massnahmen konnten in einer zweiten Phase für die einzelnen Wagen auf Basis der in Kapitel 2 beschriebenen Jahressimulationen modelliert und somit deren Potenzial bewertet werden.

Die analysierten Massnahmen lassen sich in drei verschiedene Bereiche gliedern:

- Massnahmen im Bereich der "Fahrzeughülle"
- Massnahmen im Bereich des "Fahrzeugbetriebs", welche Änderungen an der Regelung und Steuerung der HLK-Systeme betreffen
- Massnahmen im Bereich der Fahrzeug-HLK, welche zusätzliche oder andere HLK-Komponenten betreffen

Zur Definition der Massnahmen wurden zwei Workshops durchgeführt. Der erste Workshop war ein interner Workshop am 17. April 2013 mit allen am Projekt beteiligten Mitarbeitern des Zentrums für Integrale Gebäudetechnik (ZIG) der Hochschule Luzern – Technik & Architektur mit dem Ziel erste Massnahmen zu sammeln und zu beurteilen.

Der Output dieses ersten Workshops ist in den folgenden Tabellen (Tabelle 6 bis Tabelle 18) zusammengefasst.

“Software“-Massnahmen

Reduzierte HLK Betriebszeiten / Schlummerbetrieb	
Beschreibung	Bei Nichtbetrieb der Fahrzeuge wird die Heizung ausgeschaltet bzw. reduziert, da die Innentemperatur auf ca. 10-12°C absinken darf. Im Hochsommer wird die Klimaanlage ausgeschaltet, zusätzlich auch der Luftkompressor (Lärmschutz). Kriterien für die Einschaltung des Schlummerbetriebes sind Geschwindigkeiten < 5 km/h resp. Parkstellung und Licht aus. Realisierung durch Aktualisierung der Software, bei modernen Fahrzeugen bereits ab Werk.
Mögliche Umsetzungsschwierigkeiten	Je nach Lösung unterschiedlich schwierig, in der einfachsten Variante sehr einfach. BLS versucht es seit geraumer Zeit umzusetzen aber ohne Erfolg. RhB hat den Schlummerbetrieb bereits umgesetzt. Zum Teil dürfen Softwareanpassungen nur durch die Herstellerfirma durchgeführt werden, was den Vorgang relativ komplex macht.
Verbundene Risiken	Bei der einfachsten Variante Risiko von zu tiefen Starttemperaturen nach der Schlummerphase.

Tabelle 6: Reduzierte HLK Betriebszeiten / Schlummerbetrieb

Bedarfsgesteuerter Aussenluftvolumenstrom	
Beschreibung	Aussenluftvolumenstrom gesteuert nach CO ₂ -Konzentration oder Auslastung gemäss Fahrplan Nachrüstung der Steuerung bei älterem Rollmaterial bedingt Einbau eines CO ₂ -Sensors und Aussenluftklappe mit Stellmotor, Verdrahtung zum Wagenleitnehmer und aktualisierte Software. Dies ist nur bei Revisionen machbar.
Mögliche Umsetzungsschwierigkeiten	Kosten. Normen müssen ev. auf diese Situation angepasst werden. Keine Vorgabe der Luftmenge pro Sitzplatz.
Verbundene Risiken	Ausfälle in der Übergangszeit von alter auf neuer Regelung bei Erneuerung.

Tabelle 7: Bedarfsgesteuerter Aussenluftvolumenstrom

Reduzierter Sollwert bei der Raumlufthtemperatur	
Beschreibung	Saisonabhängige Anpassung der Sollwerte für die Innenraumtemperaturen Im S-Bahn-Betrieb Anpassung der Solltemperatur an CLO-Wert mit Aus-senbekleidung (Annahme: Fahrgäste behalten Jacken, Mäntel etc. an --> entsprechend tiefere Raumtemperaturen bei Aussentemperatur erwünscht)
Mögliche Umsetzungs-schwierigkeiten	Normen müssten angepasst werden. Eigentlich nicht realisierbar ohne Nut-zerstudie.
Verbundene Risiken	Nicht kompatibel mit geltenden Normen. Beschwerden der Nutzer.

Tabelle 8: Reduzierter Sollwert bei der Raumlufthtemperatur

Tageslichtgeregelter Beleuchtung	
Beschreibung	Einbau einer tageslichtabhängigen Beleuchtung Aktuell sind hohe Anschlussleistungen installiert, teilweise bis zum doppel-ten Wert für Büronutzung nach SIA 2024. Das System muss sehr schnell reagieren, so dass bei Tunneleinfahrten die Passagiere nicht im Dunkeln sitzen.
Mögliche Umsetzungs-schwierigkeiten	ohne Ersatz der Leuchtmittel evt. schwierig
Verbundene Risiken	Unzufriedene Kunden, wenn es bei Tunneleinfahrten kurzzeitig zu dunkel zum Lesen ist.

Tabelle 9: Tageslichtgeregelter Beleuchtung

Koordination der Systeme	
Beschreibung	Vermeiden von gleichzeitigem Heizen und Kühlen
Mögliche Umsetzungs-schwierigkeiten	Eventuell muss Regelung komplett ersetzt werden, was mit einem hohen Aufwand verbunden wäre. Kostenintensive Massnahme, da Regler kommunikationsfähig sein müssen und vermutlich sogar ersetzt werden müssen. Zusätzlicher Verdrahtungs-aufwand zwischen den HLK-Komponenten.
Verbundene Risiken	Anlagensteuerung wird komplexer und somit auch anfälliger auf Störungen und Ausfälle einzelner Teilkomponenten.

Tabelle 10: Koordination der Systeme

Individuelle Regelung der Führerstände	
Beschreibung	Individuelle Regelung unterbinden, Rücksetzung auf "Normalwert" nach Zeit x analog WC-Lüftungen etc. Abklären, was tatsächlich mitgeheizt und mitgekühlt wird.
Mögliche Umsetzungsschwierigkeiten	Akzeptanz seitens Fahrpersonal
Verbundene Risiken	Unzufriedenes Personals

Tabelle 11: Individuelle Regelung der Führerstände

“Hardware“-Massnahmen

Wärmerückgewinnung	
Beschreibung	Wärmerückgewinnung mittels Wärmetauscher
Mögliche Umsetzungsschwierigkeiten	Bei bestehenden Zügen auch bei einem Retrofit vermutlich schwierig umzusetzen, bei neuen Zügen möglich. Im Fall der NINA komplett neues HLK Konzept.
Verbundene Risiken	keine

Tabelle 12: Wärmerückgewinnung

Fortluftwärmepumpe	
Beschreibung	Wärmerückgewinnung mittels Abluftwärmepumpe
Mögliche Umsetzungsschwierigkeiten	Bei bestehenden Zügen auch bei einem Retrofit vermutlich schwierig umzusetzen, bei neuen Zügen möglich. Im Fall der NINA komplett neues HLK Konzept.
Verbundene Risiken	Bei Abluftwärmepumpe: Ausfallrisiko

Tabelle 13: Fortluftwärmepumpe

Luftvorhang Türen	
Beschreibung	Luftvorhang bei Türe zur Verringerung des Wärmeverlusts nach aussen an Haltestellen
Mögliche Umsetzungsschwierigkeiten	Platzbedarf
Verbundene Risiken	Möglicher Ausfall

Tabelle 14: Luftvorhang Türen

Beleuchtung	
Beschreibung	Ersatz der heutigen Leuchtmittel durch LED-Leuchtmittel
Mögliche Umsetzungsschwierigkeiten	Zum Teil andere Spannungen erforderlich
Verbundene Risiken	keine

Tabelle 15: Beleuchtung

“Hülle“-Massnahmen

Lückenlose Dämmung	
Beschreibung	Aerogel, Vakuum, konventionelle Materialien Interesse an neuen Erkenntnissen im Bereich «Dämmung» von Seiten der Bahngesellschaften ist vorhanden, insbesondere betreffend verbesserter Wärmedurchgangswerten (Fenster, Dämmmaterialien, Wärmebrücken) Bestehende Dämmung durch offenporiges, wasserabstossendes Material ersetzen.
Mögliche Umsetzungsschwierigkeiten	Eine durchgängige Dämmebene ist aus Konstruktionsgründen nicht möglich. Da sonst der Wandaufbau stark zunimmt, d.h. Wärmebrücken bleiben vorhanden.
Verbundene Risiken	Feuchtehaushalt

Tabelle 16: Lückenlose Dämmung

Verglasung	
Beschreibung	U-Wert tief, g-Wert optimieren low-e-Fenster zur Reduktion des Heizbedarfs, Polymerfolien zur Verbesserung des U-Werts
Mögliche Umsetzungsschwierigkeiten	keine
Verbundene Risiken	Folien: Beständigkeit (ausser Witterungseinflüsse, innen Beschädigung durch Vandalismus)

Tabelle 17: Verglasung

Wärmebrücken reduzieren	
Beschreibung	Innenverkleidung dämmen
Mögliche Umsetzungsschwierigkeiten	Platzbedarf der Isolation
Verbundene Risiken	keine

Tabelle 18: Wärmebrücken reduzieren

Am 14. Mai 2014 wurde an der Hochschule Luzern ein zweiter Workshop zum Thema Optimierungsmassnahmen zusammen mit den am Projekt beteiligten Bahngesellschaften und Projektpartnern durchgeführt. Ziel des zweiten Workshops war es, weitere Massnahmen zu sammeln und zu diskutieren und daraus einen Massnahmenkatalog inklusive Bewertung zu erstellen. Somit stand das Finden, Beurteilen und Bewerten von Massnahmen im Bereich HLK und Hülle bei Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs (Schwerpunkt Eisenbahn) zur Steigerung der Energieeffizienz im Mittelpunkt. Alle Teilnehmer sollten hinsichtlich Potenzial & Möglichkeiten, Anforderungen & Randbedingungen sowie Sensitivität von Energieeffizienz-Simulationen sensibilisiert werden.

I) Massnahmen Katalogisierung und Beurteilung

In einem ersten Schritt wurden realisierte, in Umsetzung befindliche und zukünftig mögliche Massnahmen in den Bereichen Fahrzeughülle, Fahrzeugbetrieb und Fahrzeug-HLK-Systeme aufgelistet. Anschliessend wurden die Massnahmen hinsichtlich ihres Potentials, Einschränkungen und Risiken beurteilt und mit Erfahrungen, Hemmnissen und möglichen Gegenargumenten ergänzt.

Massnahmen im Bereich Fahrzeughülle

Anforderungen an die Fahrzeughülle/Wärme-Dämmmaterial:

- λ (in trockenen und feuchten Bedingungen)
- Wärmeleitfähigkeit (bei trockener und feuchter Luft)
- Feuchtigkeitsresistenz/Haltbarkeit
- Gewicht
- Brandschutzanforderungen
- Verarbeitbarkeit
- Kosten
- Akustische Dämmung
- Hygiene/Unterhalt (Reinigung)

	Massnahme	Beschreibung/Kommentar	Risiken
1	Neue Materialien/Innovationen im Bereich Türen und Einstiege	Gewichts- und sicherheitsrelevante Innovationen erforderlich	
2	Mehrlagige Dämmung inkl. Drainage		- Platzbedarf - Vereisung - Langfristigkeit der Schwankungen
3	Drainagezonen im Dämmbereich	Evtl. mehrlagiger Aufbau, Analogie zu Flugzeugbau	
4	Optimierung zwischen Fenster & Dämmung	- Füllmaterial: Glas - Forderung: U-Wert = 1.2 – 1.5 W/m ² K - Keine passive Sonnennutzung → Sonnenschutzfenster - Adaptiver Energieeintrag durch Sonnenstrahlung (Lebensdauer ca. 15J., Durchlässigkeit elektromagnetische Strahlung)	
5	Intelligente Lüftung	Trocknen der Dämmmaterialien	
6	Dämmmaterialien optimieren	- Aerogel (Platten oder Granulat) - offene Poren (hydrophob) - geschlossene Poren - Verbund - Schaum - Vakuumisolation - Infrarotreflektierende Isolation	- Masse - Feuchtigkeit - Brandschutz
7	Katalogisieren von Dämmmaterialien/Aufbauten	Simulationen & Versuche/Tests (Parameterstudie): Matrix pro Fahrzeug und Einsatzort (Klima) mit optimaler Hülle (Fenster und Hülle: λ , U-Wert)	
8	Gesamtkonzept Hülle: Anzustrebender U-Wert für Hülle festlegen	In abhängig von der Fahrzeuggeneration und Fahrzeugtyp. → Variabler U-Wert? Anpassen an Lastbedingungen?	Einschränkung: Platz
9	Farbe Aussenhülle	Absorptionsgrad	Verschmutzung während des Betriebes
10	Fenstergrösse optimieren	Welches sind die Optimierungskriterien (Kosten, Energie, Transparenz, ...?)	
11	Thermische Trennung zwischen Dämmung ↔ Wärmebrücken ↔ Fenster optimieren		
12	Luftdichtigkeit Hülle	Statische und dynamische Messung	
13	Konstruktionsmaterial Wagenhülle optimieren	Stahl, Aluminium, Composite?	

Tabelle 19: Massnahmen im Bereich Fahrzeughülle

 Bewertete Massnahmen

Massnahmen im Bereich Fahrzeugbetrieb

	Massnahme	Beschreibung/Kommentar	Risiken
1	Standbetrieb: a. Schlummerbetrieb b. Energieoptimiertes Abschalten c. komplettes Ausschalten	- Welche Innentemperaturen sind akzeptabel? - Während welchen Zeiten ist welcher Standbetrieb möglich? - betriebliche/logistische Fragen - technische Aspekte - ökonom. Aspekte - praktische Umsetzung? - Zusammenspiel Subsysteme? - Spezifisch für Fahrzeugtyp/Einsatz/für einzelne Komponenten	Achtung: Betriebliche Praxis genau beachten
2	CO ₂ -Steuerung/Lüftung VOC-Steuerung/Lüftung	- Kombination Heizen & Lüften - Normvorgabe 10m ³ /Sitzplatz wird obsolet	
3	Temperatur Steuerung/Regelung	Heizen/Kühlen	
4	Betriebsoptimierung	Monitoring, Analyse, Massnahmen („Heizen/Kühlen gleichzeitig“) - Datenerfassung durch Hersteller (Analyse mit intelligenten Algorithmen) - Fahrzeug-/Betreiberspezifisch	
5	Untersuchen/Anpassen von Behaglichkeitsanforderungen	- Flexible Komfortzonen/-anforderungen - Definition von Komfortklassen - Mögliche Synergien Flugzeugindustrie ↔ Bahn - Komfortbedarf generell schwierig abzuschätzen → Wissensbedarf, Forschungsarbeit	
6	Unterscheidung Nah-/Fernverkehr	Einfluss auf Behaglichkeitsanforderungen	
7	Energieetikette für Schienenfahrzeuge	- Eigenmotivation vs. gesetzliche Vorgaben (heute keine Energievorgaben vorhanden) - Idee einer ISO-Norm wird gegenwärtig in einer Arbeitsgruppe diskutiert: 1. Definition des Komforts (Komfortklassen: A,B,C), 2. Energieetikette - politische Unterstützung für öffentlichen Verkehr - soll von Betreiber & Industrie getragen werden	
8	Akzeptanz von/für betriebliche Massnahmen und deren Auswirkungen	Untersuchen, fördern, informieren, aufklären	
9	„Konkurrenz“ Strassenverkehr	→ Behaglichkeitsanforderungen	
10	Optimaler Fahrzeugeinsatz	Verwendung des „richtigen“ Fahrzeuges für den jeweiligen Verwendungszweck (heutiges Hemmnis: lieber ein „schlechtes“ eigenes, als ein „gutes“ fremdes)	
11	Lastmanagement Flotte/Fahrzeug	energierrelevant & kostenrelevant Zeitdauer der Abschätzung?	
12	Beleuchtung steuern/regeln		

Tabelle 20: Massnahmen im Bereich Stand-/Fahrbetrieb

☐ Bewertete Massnahmen

Massnahmen im Bereich Fahrzeug-HLK

	Massnahme	Beschreibung/Kommentar	Risiken
1	Reduktion Aussenluftvolumenstrom (CO ₂ -Regelung)	- Mittels CO₂-/Gewichtssensor - 2 Jahre Amortisationszeit - SBB: Positive Erfahrungen - Erfordert Aussenluftklappen	
2	WP zum Heizen	- Nur bei Warmluft sinnvoll - (fast) gewichtsneutral: Nutzung des Klimaaggregatkompressors	- Vereisung unter 5°C - Temperaturbereich - Lebensdauer Verdichter/ Verschleiss Kompressor - Regelung kritisch - Schlechte Erfahrungen in Norwegen - SBB: COP =1.3 bis 1.4
3	WRG-Lüftung	Realisiert in Skandinavien	- Gewicht/Platz - Vereisung/Frost - Wirtschaftlichkeit - Wartung - CO₂-Regelung reduziert den Nutzen
4	Sollwertanpassung	Heizen: 22°C → 20°C Kühlen: +1K	
5	Freecooling	- bedingt erhöhte Luftvolumenströme - Erfahrungen der RhB zeigen, dass auch mit bestehenden Systemen Freecooling möglich ist, allerdings mit erhöhten Lärmemissionen → Balance zwischen Lärm & Nutzen → ΔT = mind. 7-10K (bestehende Anlagen)	- Erhöhte Lärmemissionen - Zugluft - Feuchte zu hoch im Raum
6	Einsatz von PCM-Materialien für Wärmeübertrager	≈ energieneutral	
7	Abwärme von anderen Systemen nutzen	- Mögliche Systeme: Stromrichter, Traktion, Luftkompressor - Transportmedium: Luft/Wasser? - Potential bei Dieselantrieb vorhanden - Zwischenspeichern der Wärme möglich?	- neue Komponenten haben weniger Abwärme - Temperaturniveau zu tief - Kupplungen - Wärmeversorgung nicht kontinuierlich vorhanden - Gewichtseinbussen
8	Stufenlose Regulierung der Verdichter	Verdichter mit Frequenzumrichter steuern	Verfügbarkeit der Geräte eingeschränkt: Müssen bahntauglich sein (erhöhte Anforderungen an Schmierung, robust gegenüber Erschütterungen)
9	Nur Frostbetrieb bei Dienstfahrten	Licht entkoppeln	

	Massnahme	Beschreibung/Kommentar	Risiken
10	Türschliessautomatik bei allen Fahrzeugen		
11	Beleuchtungssteuerung	- LED, Tageslicht - Lichtfarben (Winter: rot, Sommer: blau)	
12	Luftgeschwindigkeit beim Kühlen erhöhen		
13	Gewicht reduzieren	Einsatz von anderen Akkutypen	
14	Direkt geregelte Lüfter		
15	Duftstoffe einblasen		

Tabelle 21: Massnahmen im Bereich HLK



Bewertete Massnahmen

Generelle Bedenken:

- Höchste Priorität für den Betreiber hat die Verfügbarkeit des Rollmaterials. Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz müssen während einer geplanten Revision implementiert werden → Zeitraum stark beschränkt.
- Massnahmen sollen/können nicht pauschal beurteilt werden. Das Betriebsspektrum und die Randbedingungen eines jeden Zuges variiert je nach Einsatz.

II) Bewertung der Massnahmen

Die wesentlichen in den Tabelle 19 bis Tabelle 21 aufgelisteten Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz werden im Folgenden hinsichtlich ihres Energieeinsparungspotentials und Realisierungsaufwandes bewertet.

Aufwand/Potential-Abschätzung Fahrzeughülle

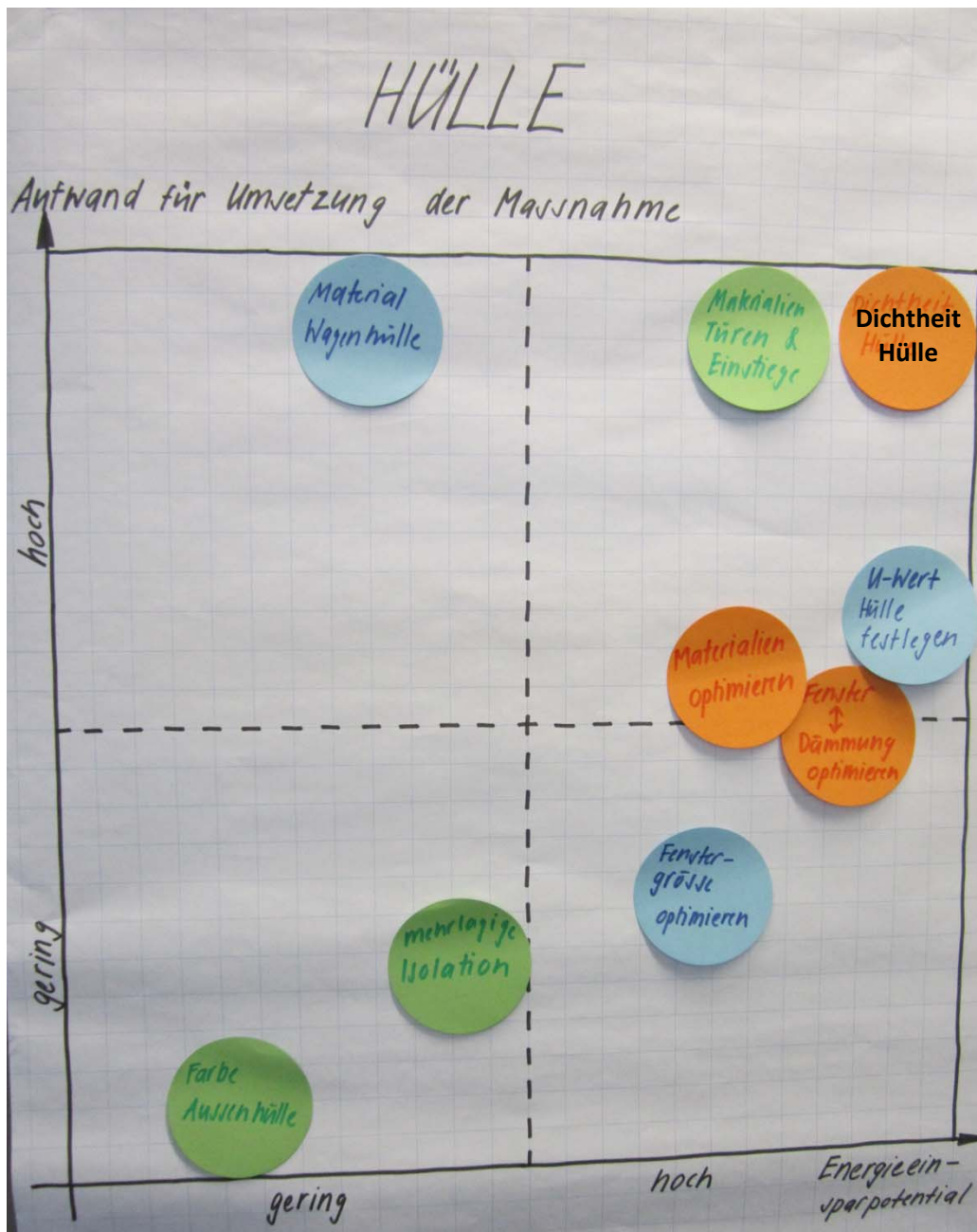


Abbildung 34: Aufwand/Potential-Abschätzung der gefundenen Massnahmen im Bereich Fahrzeughülle

Aufwand/Potential-Abschätzung Fahrzeugbetrieb

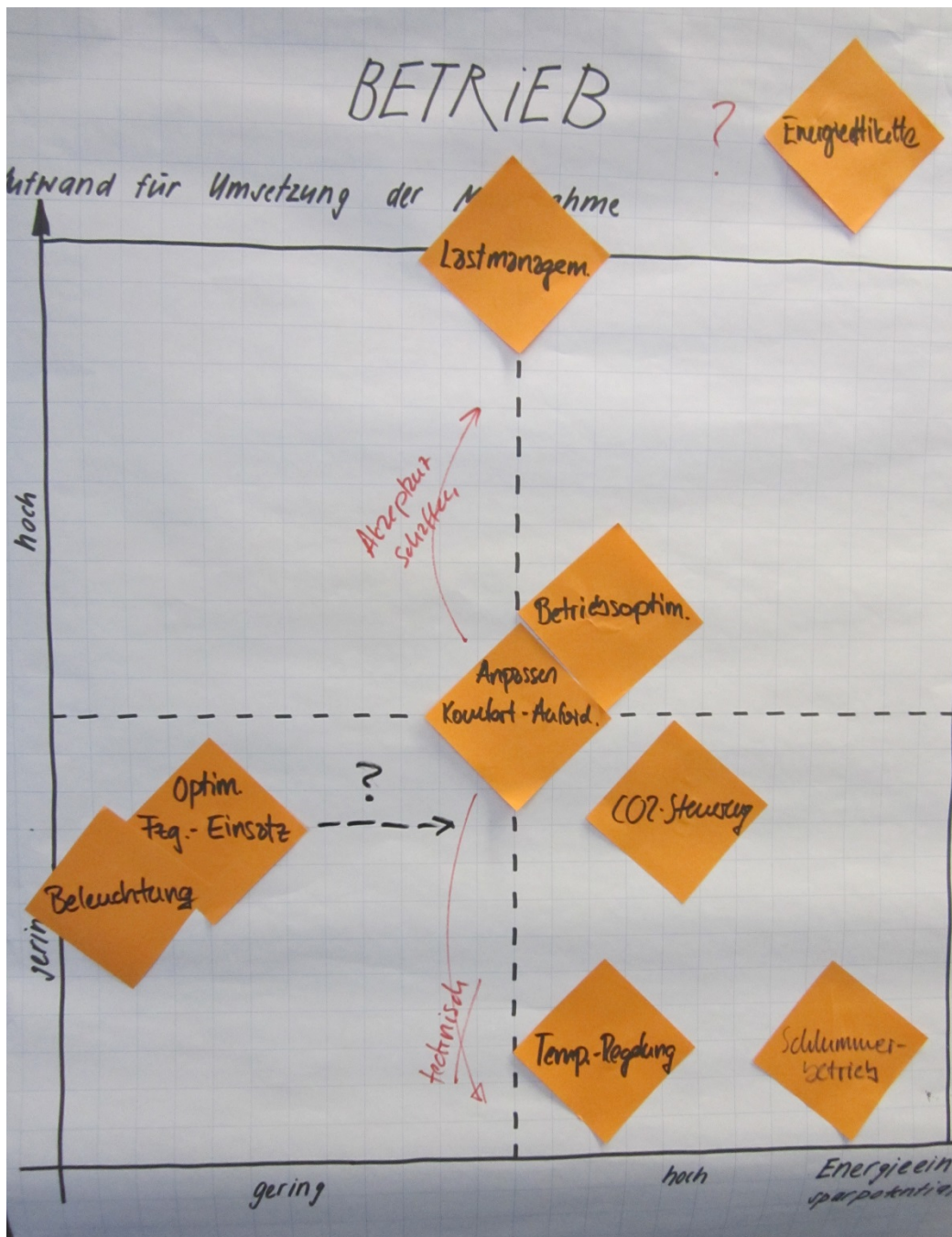


Abbildung 35: Aufwand/Potential-Abschätzung der gefundenen Massnahmen im Bereich Fahrzeug-HLK

Aufwand/Potential-Abschätzung Fahrzeug-HLK

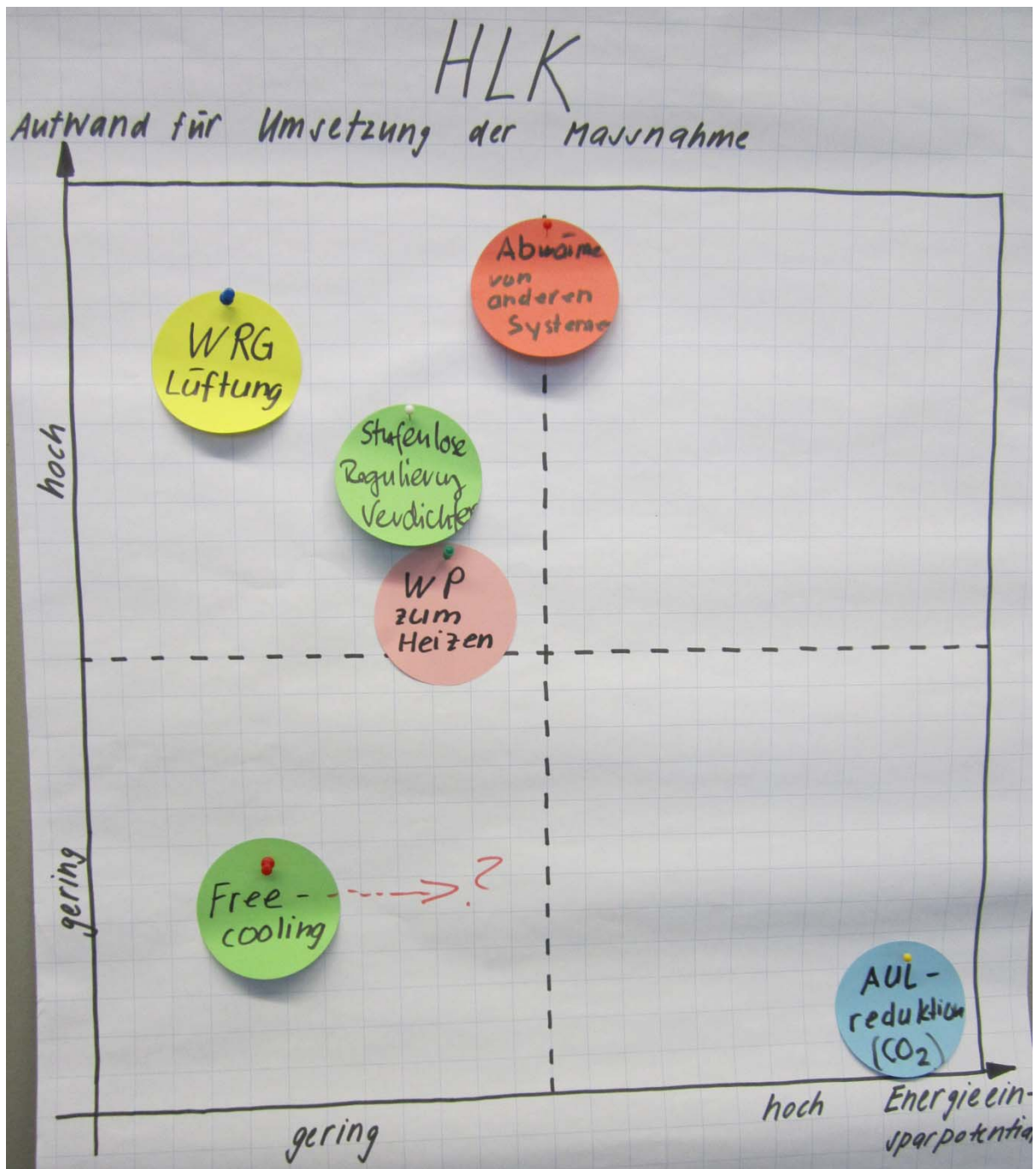


Abbildung 36: Aufwand/Potential-Abschätzung der gefundenen Massnahmen im Bereich Fahrzeug-HLK

III) Prioritätenliste der Massnahmen

Themengruppe	Massnahme	Potential mit Simulation überprüfbar
Hülle		
grosses Potential / einfache Umsetzung	Fenstergrösse optimieren	Ja, einfach
grosses Potential / aufwändige Umsetzung	Fenster ↔ Dämmung optimieren	Ja
	U-Wert Hülle festlegen	Ja, schwierig sind die vielen unbekannten Wärmebrücken
	Materialien optimieren	Ja
	Dichtheit Hülle	Ja, einfach solange Dichtheit als konstante Infiltration angenommen. Dyn. Werte im Fahrbetrieb sind komplex.
	Materialien Türen und Einstiege U-Wert Hülle festlegen	Ja
kleines Potential / einfache Umsetzung	mehrlagige Isolation	Ja
kleines Potential / aufwändige Umsetzung	Material Wagenhülle	Ja
Betrieb		
grosses Potential / einfache Umsetzung	Schlumberbetrieb	Ja
	CO ₂ -Steuerung	Ja
	Temperaturregelung	Ja
	Anpassen Komfortanforderungen	Ja
grosses Potential / aufwändige Umsetzung	Betriebsoptimierung	Nur wenn Fahrpläne der Optimierung für Simulationsdauer bekannt
kleines Potential / einfache Umsetzung	Optimierung Fahrzeugeinsatz	Nein
	Beleuchtung	Ja, einfach
kleines Potential / aufwändige Umsetzung	Lastmanagement	Nur wenn die Lastprofile für die Simulationsperiode bekannt sind
HLK		
grosses Potential / einfache Umsetzung	AUL-Reduktion (CO ₂)	Ja
grosses Potential / aufwändige Umsetzung	Abwärme von anderen Systemen	Nein
kleines Potential / einfache Umsetzung	Freecooling	Ja
kleines Potential / aufwändige Umsetzung	WP zum Heizen	Ja, nur mit einfachem WP-Modell
	stufenlose Regulierung Verdichter	Nein
	WRG Lüftung	Ja

Tabelle 22: Prioritätenliste der Massnahmen mit Potentialabschätzung durch Simulation

3.3.2. Ergebnisse und Erkenntnisse zu möglichen Massnahmen

Die Simulationen zeigten, dass das Energiesparpotential je nach Massnahme und Situation bis zu ca. 40% des Energieverbrauchs betragen kann.

Simulierte Massnahmen NINA (BLS)

Aus den im Kapitel 3.3.1 definierten Massnahmen lassen sich für die NINA der BLS aus Sicht des Simulationsmodelles folgende Optimierungsparameter ableiten:

- Aussenluftanteil: Der Aussenluftanteil der Lüftungsanlage hat einen dominanten Einfluss auf die Energiebilanz des NINA. Es gibt mehrere Ansätze diese Problematik zu behandeln. Eine Möglichkeit wäre eine CO₂-abhängige Regelung des Aussenluftanteils. Eine andere ist die Installation einer Wärmerückgewinnung in der Lüftungsanlage. Um sich für eine Methode zu entscheiden, ist es sinnvoll das Einsparpotential in Bezug auf den Aussenluftanteils zu wissen. Deshalb wurde im Modell eine Wärmerückgewinnung installiert. Als Optimierungsparameter wurde ihr Wirkungsgrad angesetzt. Die Bandbreite des Wirkungsgrades wurde für die erste qualitative Untersuchung idealisiert von 0 - 100% definiert.
- U-Wert Aussenwand: Für eine Reduktion des Energieverbrauchs der HLK im NINA ist die Minimierung der Transmissionswärmeverluste entscheidend. Dafür wurde als Optimierungsparameter die Wärmeleitfähigkeit λ der Dämmung in der Aussenhülle verwendet.
- U-Wert Verglasung: Ein weiterer Optimierungsparameter in Bezug auf den Transmissionswärmeverlust ist der U-Wert der Verglasung.
- g-Wert Verglasung: Für den Kühlenergieverbrauch ist der g-Wert die entscheidende Grösse und wurde deshalb als Optimierungsparameter ausgewählt.

Als Zielfunktion wurde der Gesamtenergieverbrauch aus Heizen und Kühlen definiert. Es wurden alle vier Parameter gleichzeitig optimiert, um deren Interaktion untereinander zu berücksichtigen. Die Bandbreiten der Optimierungsparameter sind wie folgt festgelegt:

Parameter	Min	Max	Einheit
Wärmerückgewinnung	0	100	[%]
Lambda Dämmung	0.03	0.06	[W/mK]
U-Wert Verglasung	1.0	2.9	[W/m ² K]
g-Wert Verglasung	0.3	0.7	[-]

Tabelle 23: Definition des Lösungsraumes über die Bandbreite der Optimierungsparameter

Die ersten Resultate der Optimierungsanalyse sind in Tabelle 24 dargestellt. Die meisten Parameter haben sich im Rahmen der Optimierung in diesem einfachen Beispiel in die erwartete Richtung verändert. So wird der Aussenluftanteil der Lüftungsanlage durch einen idealisierten Wärmerückgewinnungsgrad von 99% maximal reduziert. Der U-Wert der Verglasung sowie die Wärmeleitfähigkeit der Aussenwanddämmung gehen auch auf ihre definierte Untergrenze.

Auffallend ist, dass auch der g-Wert reduziert wird. Bei einem Heizenergieverbrauch, der 10 Mal höher ist als der Kühlenergieverbrauch, wäre eine Erhöhung des g-Wertes zu erwarten. Da aber nach Optimierung der anderen drei Parameter die Hei-

zenergie auf ca. 50'000 kWh reduziert wird, spielt die Kühlenergie eine grössere Rolle. Deshalb wurde auch der g-Wert auf seine definierte Untergrenze optimiert.

Parameter	Optimum	Einheit
Wärmerückgewinnung	99	[%]
Lambda Dämmung	0.03	[W/mK]
U-Wert Verglasung	1.0	[W/m ² K]
g-Wert Verglasung	0.3	[-]

Tabelle 24: Optimale Werte der einzelnen Parameter

Der Gesamtverbrauch kann im Simulationsmodell durch die Optimierung von ca. 140'000 kWh (100%) auf ca. 60'000 kWh (42%) gesenkt werden. Das wäre bei einer Umsetzung aller Massnahmen eine Reduktion des Gesamtenergieverbrauches von 58% und entspricht einer Einsparung von 80 MWh/a. Die BLS-AG besitzt 60 baugleiche Niederflur-Nahverkehrszüge (NINA), wodurch eine Einsparung von 4.8 GWh/a erfolgen könnte. Diese Zahlen sind jedoch in diesem Umfang nicht realisierbar, da zum Beispiel eine Reduktion des Aussenluftanteils auf null nicht zulässig ist.

Diese Aufstellung der Energieeinsparungen soll lediglich eine mögliche Schlussfolgerung aus dem ganzheitlichen Ansatz einer simulationsgestützten Optimierung des NINA aufzeigen.

Simulierte Massnahmen EW II (RhB)

Für den EW II der RhB wurden insgesamt sieben verschiedene Massnahmen simuliert. Die in Abbildung 37 dargestellten Ergebnisse basieren auf einer Jahressimulation für das Jahr 2011.

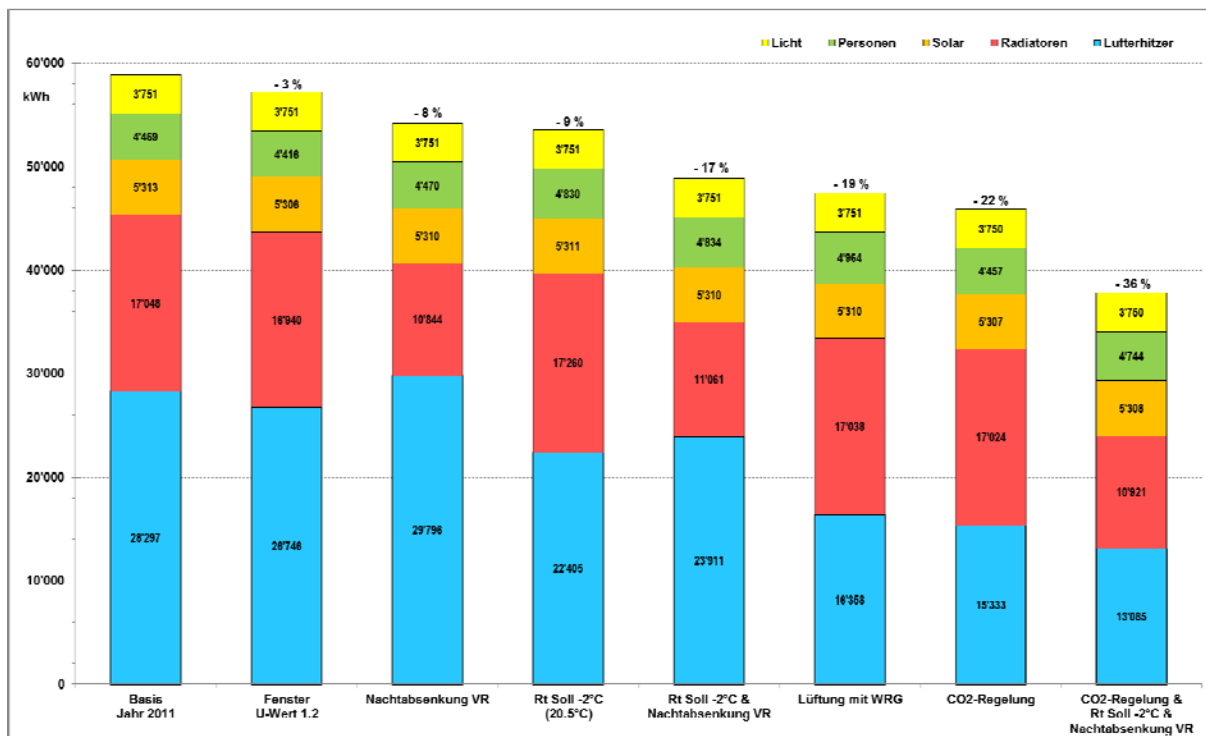


Abbildung 37: Energiebedarf jeweils nach Realisierung verschiedener Massnahmen für den EW II (RhB)

In der Basisvariante beträgt der U-Wert der Fenster $3.1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Bei der ersten simulierten Massnahme wurde er auf $1.2 \text{ W/m}^2\text{K}$ reduziert. Diese Massnahme hat eine Reduktion der Energie um 3% zur Folge. Da bei allen Massnahmen die Simulation mit der gleichen Anzahl Personen durchgeführt wurde, müsste eigentlich die durch die Personen abgegebene Wärmeenergie auch für alle Massnahmen gleich sein. Das Simulationsmodell erhöht die Wärmeabgabe pro Person jedoch, je tiefer die Raumlufttemperaturen sinken. Dies führt zu diesen Differenzen in der Wärmeabgabe durch die Personen.

Das Modell für die zusätzliche Nachtabenkung der Radiatoren im Vorraum basiert auf der Nachtabenkung im Fahrgastraum. Es wird ein Frostschutz berücksichtigt. Bei dieser Variante beträgt die Einsparung der Energie gegenüber der Basisvariante 8%.

Mit der einfach umzusetzenden Absenkung der Raumlufttemperatur um 2 K von 22.5°C auf 20.5°C können 9% Heizenergie eingespart werden.

Eine Kombination der Massnahmen mit der Raumtemperatur-Sollwertabsenkung um 2 K und einer zusätzlichen Nachtabenkung im Vorraum reduziert den Energiebedarf um 17% gegenüber der Basisvariante. Dies ist beinahe so viel, wie mit einer Wärmerückgewinnung bei der Lüftungsanlage (19% Energieeinsparung) erreicht werden kann. Bei der Wärmerückgewinnung wird der Frostschutz berücksichtigt, d.h. die minimale Fortlufttemperatur beträgt 1°C .

Noch mehr Potential als die Wärmerückgewinnung hat die bedarfsgerechte Regelung der Luftmenge in Abhängigkeit der CO_2 -Konzentration im Raum. Es wird auf eine maximale CO_2 -Konzentration von 1'000 ppm geregelt. Der Energiebedarf lässt sich so um 22% reduzieren. Dies ist die attraktivste Massnahme, da sie einfach umzusetzen ist bei gleichzeitig grosser Energieeinsparung. Es werden nur zusätzliche CO_2 -Fühler inkl. Regler benötigt.

Kombiniert man nun verschiedene Massnahmen (Reduktion der Luftmenge, bedarfsgerechte CO_2 -Regelung, Raumtemperatur-Sollwertabsenkung um 2 K, zusätzliche Nachtabenkung im Vorraum) verringert sich der Energiebedarf um 36%, was mehr als 21'000 kWh pro Jahr und Wagen entspricht. Alle diese Massnahmen sind ohne grosse Investition umsetzbar.

4. Fazit und Ausblick

Mit den Aufheiz- und Tracergasmessungen konnte eine erfolgreiche Validierung des Modelles in den Punkten "thermische Masse", "Wärmedurchgang der Hülle" sowie "HLK-Technik" am stehenden Zug erzielt werden.

Die Simulationen ermöglichen Massnahmen am Fahrzeug sowohl energetisch als auch betreffend der Auswirkungen auf die Behaglichkeit im Fahrgastraum quantitativ zu beurteilen. Weiterführend kann so auch eine wirtschaftliche Beurteilung (Energie-Minder- oder Mehrverbrauch) abgeschätzt werden.

Die Massnahmenliste, welche in Zusammenarbeit mit den Bahngesellschaften hinsichtlich Potential, Einschränkungen und Risiken erstellt und beurteilt wird, zeigt, dass folgende Massnahmen ein grosses Potential aufweisen und mit vertretbarem Aufwand umsetzbar sind:

- Optimierung der Fenstergrösse (nur bei Neubeschaffung)
- Nachtabenkung der Innenraumtemperatur

- Bedarfsgerechte Regelung der Luftmenge in Abhängigkeit der CO₂-Konzentration im Fahrgastraum
- Temperaturregelung und somit Absenkung des Raumtemperatur-Sollwerts

Für den Flirt der SOB wurde das Simulationsmodell bereits erstellt. Als nächsten Schritt erfolgt die Validierung der Simulation, bevor die einzelnen Massnahmen simuliert werden können.

Für das nächste Jahr ist auch die Simulation, d.h. die Erstellung des Simulationsmodells inklusive Validierung und die Simulation einzelner Massnahmen, für den ICN der SBB geplant. Da bei dieser Zugskomposition keine zusätzlichen Messungen wie Aufheizversuch und Tracergasmessungen vorgesehen sind, wird die Validierung der Simulation auf den Erfahrungen der bereits simulierten Modelle basieren.

Nicht nur Schienenfahrzeuge verbrauchen viel Energie für Heizen, Lüften und Kühlen. Darum soll abgeklärt werden, ob dieses Projekt auch auf andere Verkehrsmittel wie Tram, Stadtbusse und Fahrgastschiffe ausgeweitet werden kann. Um das Potential abzuschätzen ist zusätzlich zu ersten Kontaktaufnahmen mit betroffenen Betreibern eine Recherche geplant. Dies bildet die Basis für eine Analyse der Unterschiede bei den Randbedingungen und Voraussetzungen zwischen dem laufenden Projekt und einem möglichen Projekt für andere Verkehrsmittel.

5. Publikationen

In der Ausgabe Nr. 11 vom Oktober 2012 von "Hochschule Luzern Das Magazin" wurde ein Artikel zu diesem Forschungsprojekt mit dem Titel "Höchste Eisenbahn: mehr Energieeffizienz im Zug" veröffentlicht (Hochschule Luzern, Sigrid Cariola, 2012).

Im ZIG Newsletter 2/13 ist der Beitrag "Numerische Optimierung des Energieverbrauchs eines Nahverkehrszuges" (Hochschule Luzern, Dr. Christian Struck, 2013) publiziert worden.

Der Artikel "Energieeffiziente Eisenbahn" (Autoren: Eveline Thaler, Franz Sidler, Prof. Urs-Peter Menti) ist im Mai 2014 in der Ausgabe Nr. 5 der Fachzeitschrift Haustech (Axel Springer Schweiz, Zürich, S. 54 -57) erschienen.

Am 18. Status-Seminar 2014 an der ETH Zürich (04.-05.09.2014) wurde das reviewed Paper "Energieeffiziente HLK-Technik bei Schienenfahrzeugen" (Autoren: Franz Sidler, Eveline Thaler, Prof. Urs-Peter Menti, Prof. Gerhard Zweifel, Prof. Dr. Peter Oelhafen) präsentiert.

Das reviewed Paper "Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im öffentlichen Verkehr" (Autoren: Franz Sidler, Dominic Jurt, Prof. Urs-Peter Menti, Eveline Thaler, Prof. Dr. Peter Oelhafen) wurde an der BauSIM 2014 an der RWTH Aachen University (22.-24.09.2014) präsentiert.

An der CISBAT 2015 an der EPF Lausanne (09.-11.09.2015) wurde das reviewed Paper "Energy Efficiency of Railway Vehicles" (Autoren: Nadège Vetterli, Prof. Urs-Peter Menti, Franz Sidler, Eveline Thaler, Prof. Gerhard Zweifel) präsentiert.

6. Literaturverzeichnis

- Burhenne, S., & et al. (November 2011). Sampling based on sobol' sequences for monte carlo techniques applied to building simulations. Building Simulation, S. 1816 - 1823.
- Lomas, K. J., & Eppel, H. (1992). Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs. Energy and Buildings(19), S. 21–44.
- Macdonald, I. A. (27-30. July 2009). Comparison of sampling techniques on the performance of montecarlo based sensitivity analysis. Building Simulation, S. 992-999.
- Maderspacher, J. (2012). Sensitivitäts und Unsicherheitsanalyse. Luzern: HSLU.
- Maderspacher, J. (2013). Simulationsgestützte Optimierung mit populationsbasierten Metaheuristiken. Luzern: HSLU.
- Saltelli, A., & et al. (2000). Sensitivity Analysis. Wiley.
- Saltelli, A., & et al. (2008). Global Sensitivity Analysis. The Primer. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd..

7. Anhang

7.1. Höchste Eisenbahn: mehr Energieeffizienz im Zug

Sigrid Cariola

Hochschule Luzern Das Magazin, Ausgabe Nr. 11

Oktober 2012



Der Bahnwagen als Komfortzone: Heizung, Lüftung und Kühlung verbrauchen sehr viel Strom.

Höchste Eisenbahn: mehr Energieeffizienz im Zug

Die Bahn verbraucht für das Heizen, Lüften und Kühlen der Wagen viel Strom. Im Extremfall sogar fast so viel wie für ihren eigentlichen Zweck: die Fortbewegung. Ein Forschungsprojekt unter Beteiligung der Hochschule Luzern lotet jetzt aus, wie die Bahnen Strom sparen können.

— Wer mit der Bahn fährt, reist sicher und vor allem ökologisch – so die gängige Meinung. Tatsächlich ist die Transporteffizienz des Schienenverkehrs hoch. Autofahrer legen jährlich zwar mit 90,7 Milliarden deutlich mehr Kilometer zurück als Bahnfahrer (19,2 Milliar-

den), wenn man aber die Ausdehnung des Schienen- und des Strassennetzes miteinander vergleicht, ist die Bahn deutlich effizienter. Im Mittel sind pro Kilometer Strasse täglich (nur) 3'500 Personen unterwegs, pro Kilometer Schiene hingegen sind es 10'300 Personen.

Doch es gibt einen Bereich, in dem die Bahnen grosses Potenzial haben, ihren «Ökobonus» auf den Individualverkehr weiter auszubauen: beim Umgang mit Energie. Ein beträchtlicher Anteil an elektrischer Energie wird nämlich nicht für den Antrieb verbraucht, sondern für die Heizung, Lüftung und Kühlung von Wagen und technischen Komponenten.

Züge sind schlecht isoliert

Dass in diesem Bereich nun etwas ins Rollen kommt, ist Prof. Dr. Peter Oelhafen zu verdanken. Der Physiker der Universität Basel konnte vor drei Jahren die Rhätische Bahn (RhB) für einen Pilotversuch gewinnen und in einem zwischen Chur und St. Moritz pendelnden Wagen verschiedene Sensoren installieren. Diese massen u.a. die Temperatur und die Feuchtigkeit. Nach zwei Wintern kam der inzwischen emeritierte Professor zu folgendem Ergebnis: Zwischen Oktober und März wird allein für die Beheizung der Wagen gleich viel Energie aufgewendet wie für die Traktionsenergie, die das Fahrzeug bewegt. «Der Hauptgrund für den hohen Verbrauch ist die schlechte Dämmung der Wagenhülle», erklärt Oelhafen. Diese zu verbessern, ist jedoch kostenintensiv und lohnt sich nur im Zuge einer Totalrevision. Doch es gibt weitere Faktoren, die den Energieverbrauch beeinflussen: zum einen die Zahl der Passagiere, zum anderen der Zustand der parkierten Fahrzeuge während der nächtlichen Betriebspause. Oelhafen stellte fest, dass sich bereits durch die Optimierung der Einsatzpläne und eine Art «Nachtabenkung» der Temperaturen im Wageninnern während der Standzeiten erheblich Strom sparen lässt. «Eine Reduktion der Nachttemperatur auf 5 Grad gewährleistet ausreichenden Frostschutz der Elektrik und der Wassertanks und ermöglicht zudem für die erste Fahrt mit Passagieren ein rasches Aufheizen des Wageninnern auf mindestens 18 Grad.»

Die RhB, gewahr geworden, welches Einsparpotenzial sich hier auftut, hat sich entschieden, die Verbrauchswerte ihrer

gesamten Flotte zu erheben. Und zwar nicht nur für die Heizung, sondern auch für die Lüftung und die Kühlung. Seit diesem Herbst werden die Panoramawagen mit Messinstrumenten ausgerüstet. Mit von der Partie sind inzwischen auch die Bern-Lötschberg-Simplon- und die Südostbahn. Oelhafen freuts: «Der Stromverbrauch eines Zuges wird von vielen Komponenten beeinflusst: von der Bauart des Zuges, aber auch von der Strecke, der Geschwindigkeit, mit der der Zug unterwegs ist, und den Halte-Intervallen. Je mehr Daten wir haben, desto differenzierter fällt die Analyse aus.»

Was als Einzelinitiative begann, hat sich zu einem Forschungsprojekt mit einem Volumen von weit über einer Million Franken ausgewachsen, das auf drei Jahre angelegt ist. Es wird von swisselectric research und vom Bundesamt für Energie unterstützt. Von Seiten der Forschung sind neben der Universität Basel die Hochschule Luzern, die ETH Lausanne (EPFL) und die Eidgenössische Materialforschungs- und Prüfungsanstalt (Empa) beteiligt.

Mit wenig Aufwand viel erreichen

Während die Physiker und Elektrotechnikingenieure der Universität Basel die Messdaten erheben, kommen die Experten des Zentrums für Integrale Gebäudetechnik (ZIG) der Hochschule Luzern ins Spiel, wenn es um die digitale Nachbildung der Schienenfahrzeuge geht. «Auf der Grundlage der technischen Daten entwickeln wir Computermodelle und simulieren verschiedene Betriebszustände – hohe und niedrige Temperaturen, volle und leere Wagen und so weiter», erklärt Urs Peter Menti, Leiter des ZIG. In einer ersten Phase geht es darum, die echten Daten, die in den Zügen erhoben wurden, mit den Ergebnissen der Simulationen zu vergleichen. Die Simulationsmodelle werden quasi geeicht.

Sie bilden die Grundlage für das folgende, aufwändige «Setzkastenspiel»: Die Ingenieure variieren die verschiedenen Komponenten immer wieder neu: Effi-

Im Durchschnitt sind pro Kilometer Schiene täglich 10'300 Personen unterwegs, pro Kilometer Strasse sind es nur 3'500.

Messungen in einem Bahnwagen während 12 Monaten zeigten: Die Heizung machte über 40% des gesamten Energieverbrauchs aus, im Winterhalbjahr sogar 50%. Das ist gleich viel, wie zur Fortbewegung des Zuges nötig ist.

In einer S-Bahn liegt der Anteil von Heizung, Lüftung und Kühlung am Gesamtenergieverbrauch bei 33%, im Winterhalbjahr steigt dieser Anteil auf 42%.

Eine Nachttemperatur von 5 °C reicht aus, um Elektrik und Wassertanks vor Frost zu schützen.

Projektziel ist eine Einsparung beim Heizen, Lüften und Kühlen von 40% – dies entspricht dem privaten Stromverbrauch in den Kantonen Uri und Zug.

zientere Lüftungs- und Heizungsgeräte werden «eingebaut», die Wagenhülle wird besser gedämmt, der Sonnenschutz modifiziert. Ziel ist es, bei mindestens gleich bleibendem Komfort für die Fahrgäste den Energieverbrauch zu reduzieren. «Dank der Simulationen können wir abschätzen, welche Änderung wie viel bringt», sagt Urs Peter Menti. «Für Verbesserungen muss man dort ansetzen, wo sich mit möglichst geringem Aufwand ein Maximum an Einsparung herausholen lässt. Meistens sind das relativ einfache betriebliche Anpassungen, z.B. an der Regelung oder der Steuerung.»

Ambitionierte Sparziele gesetzt

Bei der Optimierung der Fahrzeughülle sind die Empa und die EPFL gefordert. Die Metallstruktur eines Schienenfahrzeugs verhält sich völlig anders als eine Gebäudehülle. Aufgrund der Leichtbau-technik fehlt es an Speichermasse, so dass im Winter wie im Sommer ein rascher Ausgleich mit der Umgebungstemperatur stattfindet. Menti: «Die Randbedingungen im Schienenfahrzeugbau sind extrem: Jedes Kilo an Zusatzgewicht ist ein Kilo zu viel, und auch die Platzverhältnisse sind sehr knapp. Das ist die grosse Herausforderung.»

Das Ziel des Projekts ist ehrgeizig: Angestrebt wird eine Energieeinsparung beim Energieverbrauch für die Heizung, Lüftung und Kühlung von mindestens 40 Prozent. Wenn man berücksichtigt, dass die SBB und die 13 Privatbahnen jährlich mit 2'430 Gigawattstunden an Bahnstrom etwa so viel verbrauchen wie 630'000 Privathaushalte, ist das eine Menge: nämlich rund zehn Prozent. Das entspricht dem Stromverbrauch aller Privathaushalte in den Kantonen Zug und Uri zusammen.

Für Spardruck sorgen neben der vom Bundesrat proklamierten Energiewende vor allem auch die Ausbaupläne der SBB. Sie prognostizieren durch Netz- und Kapazitätserweiterungen bis in das Jahr 2030 einen Anstieg ihres Stromverbrauchs von 25 Prozent. **Sigrid Cariola**

7.2. Numerische Optimierung des Energieverbrauchs eines Nahverkehrszuges

Dr. Christian Struck

ZIG Newsletter 2/13

Oktober 2013

Numerische Optimierung des Energieverbrauches eines Nahverkehrszuges

Im Rahmen des von Swisselectric Research und dem BFE finanzierten und zusammen mit der Universität Basel und der ETH Lausanne bearbeiteten Forschungsprojektes «Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im Öffentlichen Verkehr» wurde am ZIG eine Masterarbeit durchgeführt (Autor: Johannes Maderspacher, Betreuung: Gerhard Zweifel). Ein wichtiger Bestandteil der Arbeit war die Wahl und Bewertung von geeigneten Methoden zur Durchführung von Sensitivitätsanalysen und der numerischen Optimierung des Energiebedarfs. Diese Untersuchungen wurden komplementär zu Messungen an einem Niederflur-Nahverkehrszug (NINA) der BLS eingesetzt.

Die dem Projekt zugrunde liegende Erkenntnis ist, dass der Energieverbrauch für Heizung, Lüftung und Kühlung (HLK) im öffentlichen Verkehr im Vergleich zum Energieaufwand für die Traktion mit einem Anteil von bis zu 40 % unerwartet hoch ist, siehe Bild 1. Die Erfahrung bei der Realisierung von Energieeinsparmassnahmen in den letzten

25 Jahren im Gebäudesektor lassen erwarten, dass auch bei Schienenfahrzeugen der Energieverbrauch für die HLK in einem ähnlichen Ausmass reduziert werden kann.

Um das Einsparpotential der NINA mittels Simulation zu quantifizieren, wurde das Simulationstool IDA-ICE mit R, einer Programmierungsumgebung für statistische Analysen, gekoppelt. Nach der Kalibrierung des Simulationsmodelles wurden verschiedene Sensitivitätsanalysetechniken evaluiert. Das Ziel war, die für den Energieverbrauch relevantesten Parameter zu ermitteln und entsprechende Massnahmen nach deren Potenzial zu priorisieren.

Anschliessend wurden Optimierungsalgorithmen getestet. Die Ergebnisse der Bewertung von Genauigkeit und Effizienz verschiedener Algorithmen ergeben, dass sich der Einsatz des Particle-Swarm Algorithmus besonders gut eignet, da hiermit das absolute, erzielbare Minimum im Energiebe-

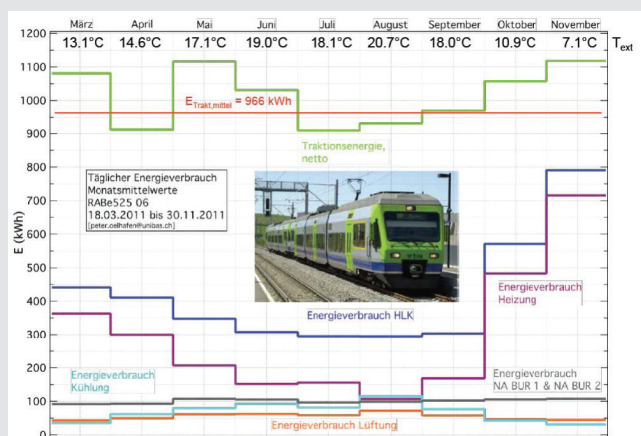


Bild 1, Messung des Energieverbrauches eines Niederflur Nahverkehrszuges RABe 525 (NINA) der BLS AG (Oelhafen, 2013)

darf mit hoher Wahrscheinlichkeit und kurzer Rechenzeit gefunden wird, siehe Bild 2. Dies im Vergleich zu einem anderen Algorithmus, siehe Bild 3.

Die Masterarbeit zeigt, dass das Energiesparpotential in der Tat hoch ist. Für das betrachtete Modell der NINA konnte der Gesamtenergieverbrauch für die HLK in der Simulation auf 42 % des Ursprungswertes gesenkt werden. Die Arbeit macht deutlich, dass sich die Energieeffizienz durch eine integrale Betrachtung, auch im Schienenverkehr, erheblich anheben lässt und Simulationen auch in diesem Anwendungsfall ein potentes Werkzeug sind, um Massnahmen zu identifizieren, zu analysieren und zu priorisieren.

Kontakt: christian.struck@hslu.ch

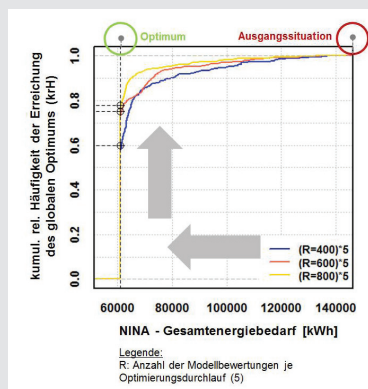


Bild 2, Particle-Swarm Algorithmus – Das globale Energiebedarfs optimum wird mit kurzen Rechenzeiten zuverlässig erreicht.

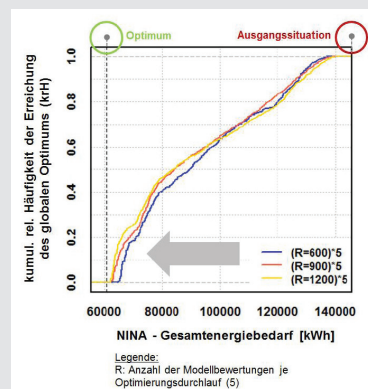


Bild 3, Genetischer Algorithmus – Das globale Energiebedarfs optimum wird auch mit grossem Rechenaufwand nicht erreicht.

(Je höher krH, desto effizienter der Algorithmus)

Zertifizierungsmessungen für AHRI

Das Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute AHRI (www.ahrinet.org) vergibt in den USA unter anderem das Qualitätssiegel für Luft-/Luft-Wärmerückgewinnungssysteme. Das ZIG wurde angefragt, Zertifizierungsmessungen für dieses Programm durchzuführen.

Im August fanden im Labor der Prüfstelle Gebäudetechnik unter Begleitung eines Ingenieurs von AHRI erste Zertifizierungsmessungen sowie eine Ringmessung (Vergleichsmessung am gleichen Prüfling in verschiedenen Instituten) statt. Eine Schwierigkeit bildeten die unterschiedlichen Masssysteme, da Druckdifferenzen in den USA in Zoll Wassersäule angegeben werden. Für die Umrechnung in Pa musste zunächst geklärt werden, welche Wassertemperatur eingesetzt werden soll.

Für AHRI werden aktuell neun Prüflinge getestet. Nebst Eurovent Certita Certification ist AHRI das zweite grosse Institut, für welches das ZIG Wärmerückgewinnungssysteme prüft.

Kontakt: martin.imholz@hslu.ch



7.3. Energieeffiziente Eisenbahn

Eveline Thaler, Franz Sidler, Prof. Urs-Peter Menti

Haustech, Ausgabe Nr. 5

Mai 2014

Bei Zügen werden bis zu 40 Prozent des Energieverbrauchs für die Heizung, Lüftung und Kühlung (HLK) der Fahrgasträume und der technischen Komponenten benötigt (60 Prozent für die Traktion). Unter der Leitung des Departments Physik der Universität Basel (Professor Peter Oelhafen) wurde vor zwei Jahren ein Forschungsprojekt lanciert, welches sich mit der Verbesserung der Energieeffizienz der HLK im öffentlichen Verkehr befasst. Das Hauptziel ist die Ausarbeitung von Massnahmen unterschiedlichster Art, welche den Energieverbrauch der Heizung, Lüftung und Kühlung bei mindestens gleich bleibendem Komfort reduzieren.

Zwei wesentliche Gründe für den hohen Energieverbrauch sind die schlechte Dämmung der Wagenhüllen und die fehlende Wärmerückgewinnung bei der Lüftung. Beides kann jedoch nur im Rahmen einer Totalrevision optimiert werden, ist kostenintensiv und beansprucht zudem viel (kaum vorhandenen) Platz. Einfacher umsetzbare Massnahmen sind aber z.B. die Reduktion des Aussenluftanteils der Lüftung durch eine über die CO₂-Konzentration bedarfsgesteuerte Regelung der Zuluftmenge, die Implementierung einer «Nachtabenkung» der Temperaturen im Wageninnern während den Standzeiten und die Sollwertreduktion der Innenraumlufttemperatur um einige wenige Grad.

Messdatenerhebung

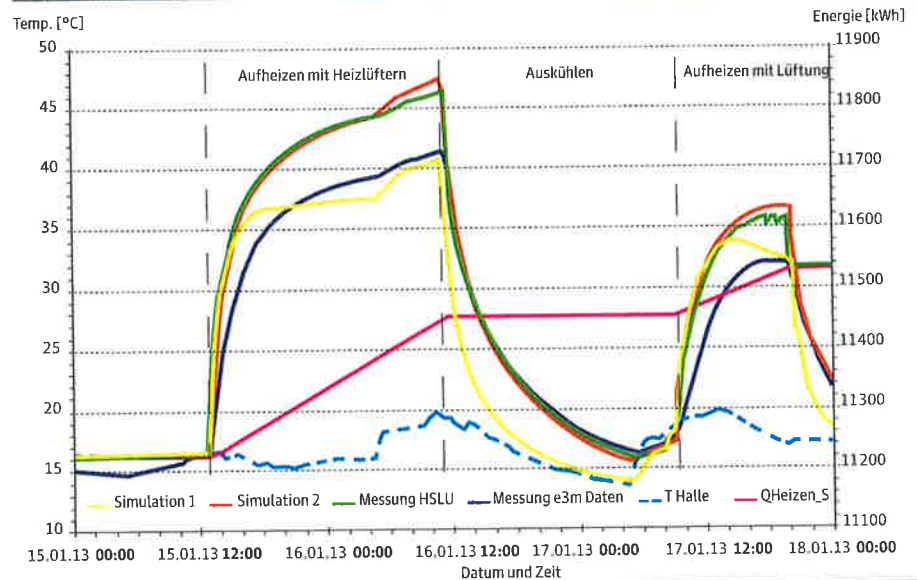
Bevor einzelne Massnahmen definiert, berechnet und bewertet werden konnten, wurden in den einzelnen Eisenbahnwagen und Fahrzeugen Komfort- und Energieverbrauchsdaten erhoben. Als Erstes konnte die Rhätische Bahn (RhB) für einen Pilotversuch gewonnen werden. Ein Wagen des Models EW II wurde mit einem eigens für das Projekt entwickelten Messsystem der Universität Basel bestückt. Das System beinhaltet die Erfassung von Temperaturen, Feuchtigkeit, Betriebsdaten zur Heizung und Lüftung (Energien, Leistungen), von Fahrdaten (GPS-Positionen) und von Solarstrahlung. Für dieses Fahrzeug konnten bereits über mehrere Jahre wertvolle Informationen gesammelt werden. In der Zwischenzeit sind nun zusätzlich ein Wagen des Models EW IV und ein Panoramawagen des Glacier Expresses (Pano GEX) der RhB mit dem analogen Messsystem ausgestattet. Neben der RhB beteiligen sich mittlerweile auch die BLS, die SOB und die SBB an diesem Forschungsprojekt. Der



Energieeffiziente Eisenbahn

Bis zu 40 Prozent des Stromverbrauchs von Schienenfahrzeugen wird für Heizen, Lüften und Kühlen verbraucht. In einem Forschungsprojekt der Universität Basel mit Beteiligung des Zentrums für integrale Gebäudetechnik werden Massnahmen ausgearbeitet, um diesen Energieverbrauch zu reduzieren. Einsparungen von bis zu 40 Prozent sind mit relativ geringem Aufwand realisierbar.

Text **Eveline Thaler, Franz Sidler, Urs-Peter Menti**



Vergleich Temperaturverlauf für erste Simulation, Aufheizversuch und zweite Simulation mit angepasstem Simulationsmodell (EW II der RhB).

Universität Basel weitere Kurzzeitmessungen durchgeführt. So wurde z.B. für den Abgleich des Temperaturverhaltens des Simulationsmodells mit demjenigen des realen Eisenbahnwagens ein Aufheizversuch mit anschliessendem Abkühlen durchgeführt. Dazu wurde der Wagen mit Heizlüftern bei geschlossenen Fenstern und Türen aufgeheizt, bis die Wageninnentemperatur auf ca. 40 Grad angestiegen war. Während des Aufheizvorgangs wurden die Temperaturverläufe zum Abgleich der Simulationsmodelle aufgezeichnet. Diese Messungen geben Aufschluss über die thermische Masse des Fahrzeuges sowie über die Energieverluste durch Transmission und Infiltration.

Die Resultate der Simulation 1, noch ohne Kalibrierung des Modells (gelb), weichen noch deutlich von den Messresultaten (grün) ab. Die Resultate der Simulation 2 mit dem angepassten Modell (rot) zeigen nur noch geringe Abweichungen zu den Messungen aus dem Aufheizversuch mit anschliessendem Auskühlen.

Eine weitere grosse Unbekannte bei Eisenbahnwagen ist die Luftundichtheit der Hülle. Um diese möglichst real abbilden zu können, wurden Tracergasmessungen durchgeführt. Das Prinzip dieser Messungen besteht darin, einen Raum – in diesem Fall einen ganzen Wagen – mit einem Gas (z.B. SF₆) so lange zu befüllen, bis eine Sättigung der Konzentration erreicht ist. Anschliessend stoppt man die Zuführung des Gases und beobachtet das Abklingen der

Konzentration. Mit dem bekannten Wagentenvolumen und dem Verlauf der Gaskonzentration bei ausgeschalteter Lüftung kann die Undichtheit der Hülle bestimmt werden.

Fahrzeughüllen sind aus thermischer Sicht sehr komplex, und der Wärmedurchgang ist über die Hülle sehr un stetig (Wärmebrücken) verteilt. Neben der quantitativen Ermittlung der Wärmeverluste ist auch eine qualitative Aussage zur Verteilung der Wärmeverluste über die ganze Oberfläche sehr wichtig. Zur Ermittlung und Analyse dieser Wärmebrücken wurden mittels einer Thermografiekamera Wärmebildaufnahmen gemacht.

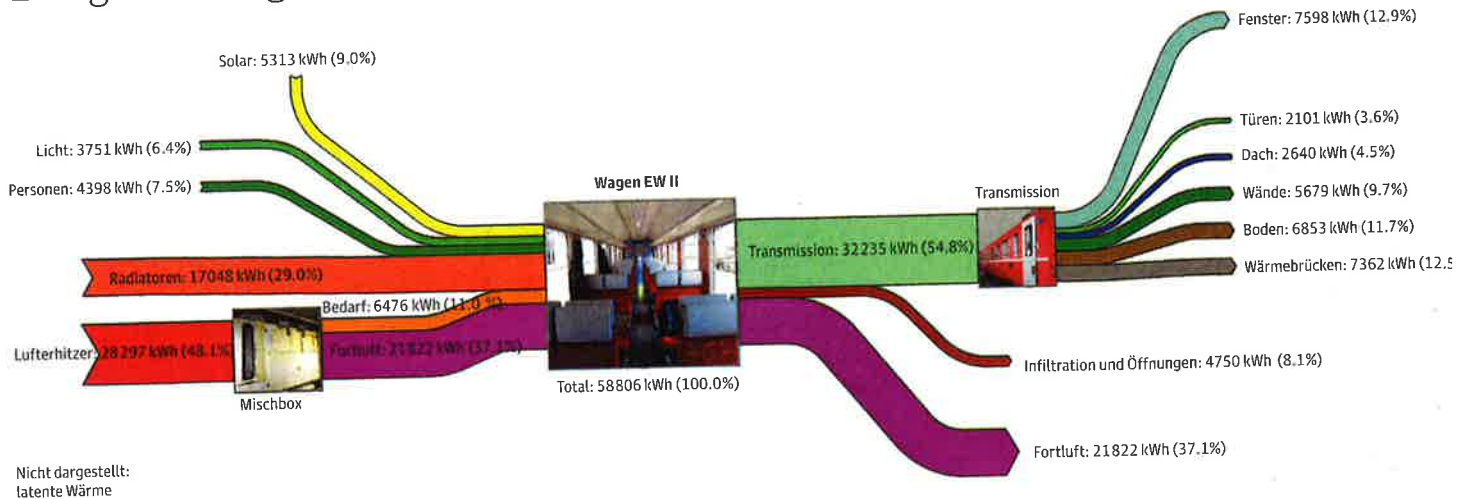
Bei zwei Fahrzeugen der RhB (EW II und Pano GEX) wurden zur Ermittlung der effektiven Passagierzahlen (pro Teilstrecke) Personenzählungen durchgeführt. Mit Hilfe dieser Daten konnte ein Modell entwickelt werden, welches die jeweilige Anzahl der anwesenden Fahrgäste aufgrund der gemessenen CO₂-Konzentration und der bekannten Frischluftmenge ermittelt. Diese Personenzahlen können so relativ genau im Modell berücksichtigt werden. Auch Varianten der bedarfsgerechten Lüftungssteuerung auf der Basis der CO₂-Konzentration können damit berechnet werden. Die im Rahmen einer Masterarbeit durchgeführten Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen ermöglichten die Ermittlung der Gesamtunsicherheit des Simulationsmodells sowie die Identifikation der

Hochschule Luzern stehen dadurch auch Messdaten einer Zugskomposition des Modells NINA der BLS und des Modells FLIRT der schweizerischen Südostbahn (SOB) zur Verfügung. Messungen an einem ICN-Neigezug der SBB sind in Vorbereitung.

Simulationsmodell

Diese Messdaten dienen dem Zentrum für integrale Gebäudetechnik (ZIG) als Basis für die weiteren Arbeiten. Aufgrund der technischen Daten, wie Fahrzeughülle und -struktur, der HLK-Technik inklusive Regelung, der Nutzung (Betriebsweise der Systeme und Anzahl Fahrgäste), der Klimadaten und der Fahrdaten (Standort, Ausrichtung und Fahrgeschwindigkeit) werden für die einzelnen Fahrzeuge Computermodelle entwickelt und verschiedene Betriebszustände simuliert. Für die Optimierung und Validierung dieser Simulationsmodelle – also für den Abgleich der Simulation mit den Messungen – wurden ergänzend zu den Langzeitmessungen der

Energieflussdiagramm für einen Eisenbahnwagen



Energieflussdiagramm EW II (RhB) für das Jahr 2011.

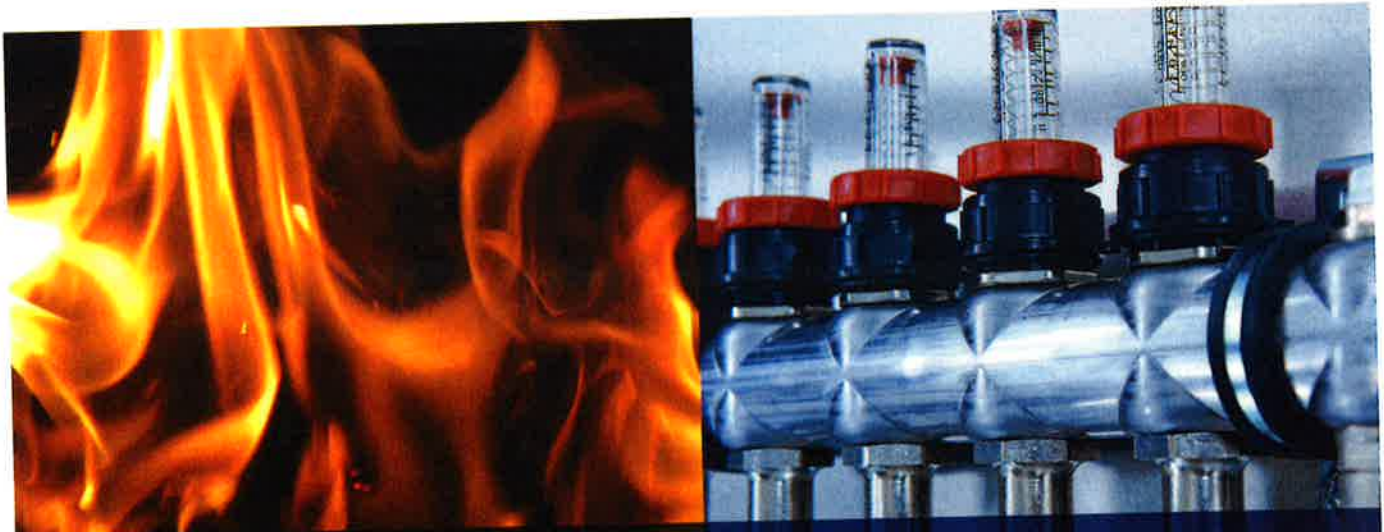
► einflussreichsten Parameter zur Prioritätensetzung bei den einzelnen Massnahmen. Zur Darstellung der verschiedenen Energieflüsse (Gewinne/Lasten auf der einen Seite, Verluste auf der anderen Seite) wurde für den EW II ein Sankey-Diagramm erstellt.

Im Bild oben ist der gesamte simulierte Energiefluss für den EW II dargestellt. Der Energieeintrag durch die Fenster, das Licht und die Personen ist im Vergleich zur Heizung klein. Bemerkenswert ist dabei, dass 37 Prozent der Energie mit der Fortluft über das Dach abfliesst.

Massnahmen

Erst mit den kalibrierten Simulationsmodellen können nun einzelne Optimierungsmassnahmen für die HLK-Technik (insbesondere bei der Lüftung) und bei der Fahrzeughülle definiert und berechnet werden. Damit kann das Einsparpotenzial

grafiken.rvg



Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung und Wärmeabgabe

In den Bereichen Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung und Wärmeabgabe garantieren wir mit Markenprodukten optimale Lösungen und Dienstleistungen. Ein umfassendes und professionelles Sortiment deckt den Anwendungsbereich unserer Kunden vollkommen ab. Wir erfüllen Ihre Anforderungen und

Wünsche im Heizungsbereich, sowohl in konventionellen als auch in alternativen Energien. Zuverlässige Heizungslösungen – wirtschaftlich und ökologisch – alles aus einer Hand, mit einer Marktpräsenz an 18 Heizungsstandorten geografisch verteilt in der ganzen Schweiz.

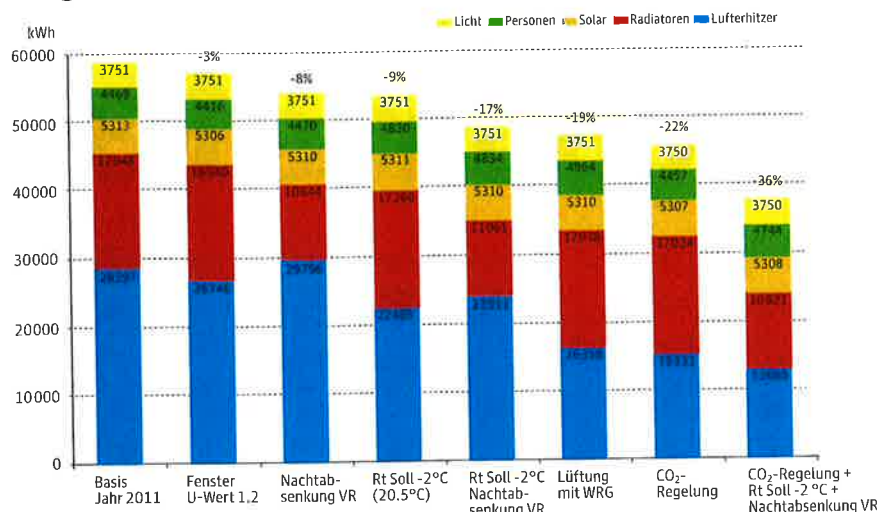
Debrunner Acifer

klöckner & co multi metal distribution

www.d-a.ch



Mögliche Massnahmen und entsprechendes Potenzial



Energiebedarf des EW II im Ist-Zustand und nach Realisierung verschiedener Massnahmen.

der eingangs beschriebenen Massnahmen oder Kombinationen abgeschätzt werden.

Mit einfach umsetzbaren Massnahmen wie Absenkung der Raumlufttemperatur um 2 K von 22.5 Grad auf 20.5 Grad können 9 Prozent Heizenergie eingespart werden. Eine Reduktion der

Luftmenge mit einer bedarfsgerechten CO₂-Regelung, in Kombination mit der Reduktion der Raumlufttemperatur, verringert den Energiebedarf für HLK um insgesamt 36 Prozent, was nur schon für einen einzelnen Wagen mehr als 21 000 kWh pro Jahr entspricht. Diese

Massnahme ist ohne grosse Investition und ohne grössere Eingriffe am Fahrzeug umsetzbar.

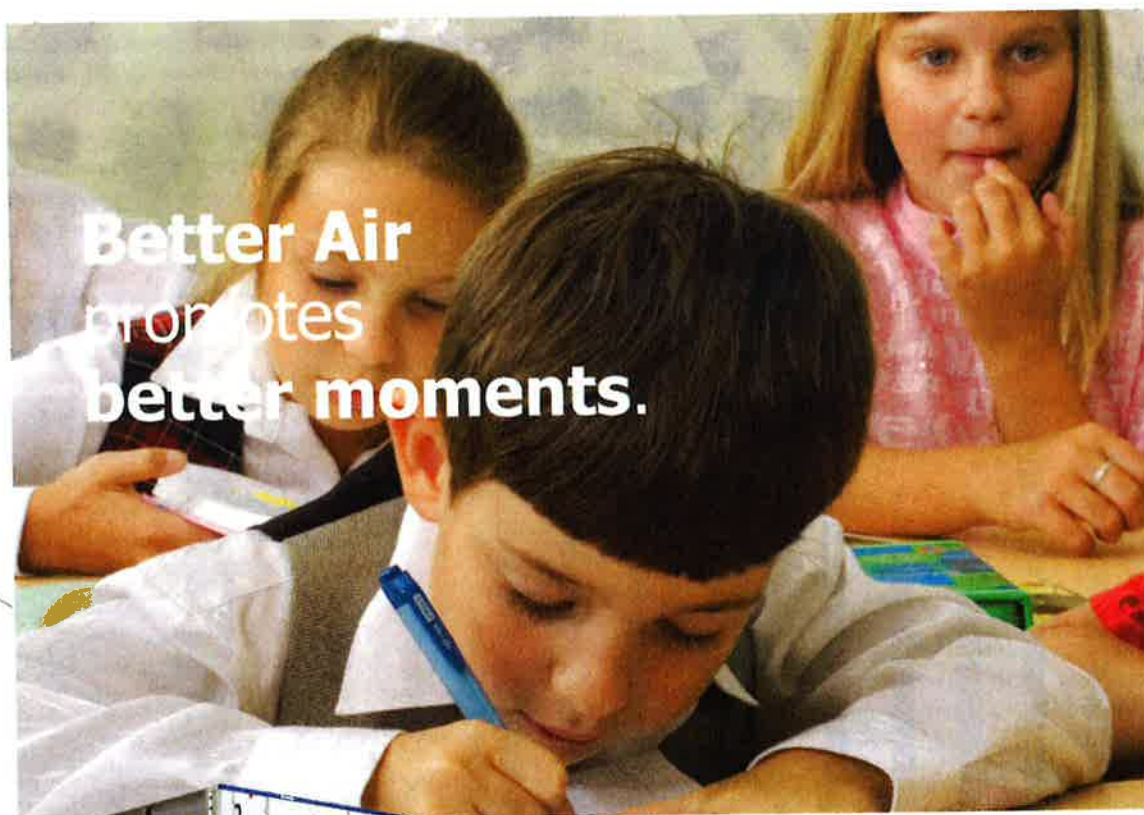
Die Simulationen bestätigen die ersten Vermutungen, dass das Energiesparpotenzial je nach der Massnahme bis zu ca. 40 Prozent des Energieverbrauchs für HLK betragen kann.

Weitgehend abgeschlossen sind zum jetzigen Zeitpunkt die Arbeiten für die beiden Fahrzeuge NINA der BLS und EW II der RhB. Bei den anderen Fahrzeugen erfolgt die Modellierung, Validierung und Simulation einzelner Massnahmen im nächsten Projektjahr. Zudem sind vergleichbare Analysen in Stadtbussen vorgesehen, da dort ein ähnlich grosses Optimierungspotenzial vermutet wird. ■

Weitere Informationen

Eveline Thaler (eveline.thaler@hslu.ch),
Franz Sidler (franz.sidler@hslu.ch)
Urs-Peter Menti (urs-peter.menti@hslu.ch)

Hochschule Luzern –
Technik & Architektur
Zentrum für integrale Gebäudetechnik
Technikumstrasse 21, 6048 Horw
Das Projekt wird unterstützt von swisselectric
research, dem Bundesamt für Energie BFE
und dem Bundesamt für Verkehr BAV.



GTR Luft GmbH

Luft, Wärme & Entrauchungstechnik

Mühlegasse 18 | 6340 Baar

Tel. + 41 (0) 41 763 20 72

info@gtr-luft.ch | www.gtr-luft.ch

7.4. Energieeffiziente HLK-Technik bei Schienenfahrzeugen

Franz Sidler, Eveline Thaler, Prof. Urs-Peter Menti, Prof. Gerhard Zweifel, Prof. Dr. Peter Oelhafen

Status-Seminar 2014

September 2014

Energieeffiziente HLK-Technik bei Schienenfahrzeugen

Franz Sidler, Eveline Thaler, Prof. Urs-Peter Menti, Prof. Gerhard Zweifel
Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Zentrum für Integrale Gebäudetechnik,
Technikumstrasse 21, CH-6048 Horw
franz.sidler@hslu.ch / www.hslu.ch/zig

Prof. Dr. Peter Oelhafen
Universität Basel, Departement Physik, Klingelbergstrasse 82, CH-4056 Basel
peter.oelhafen@unibas.ch / www.physik.unibas.ch

Zusammenfassung

Abstract

In Schienenfahrzeugen werden zwischen 20% und 40% der Energie für Heizen, Lüften und Kühlen verbraucht. In einem Forschungsprojekt werden Massnahmen ausgearbeitet, um diesen Energieverbrauch bei mindestens gleich bleibendem Komfort zu reduzieren.

Hierzu werden Schienenfahrzeuge unterschiedlicher Betreiber in der Schweiz (SOB, RhB, BLS und SBB) im Detail ausgemessen. Zusätzlich zu den Energiemessungen wurden Aufheizversuche, Luftdichtigkeitsmessungen und Thermographieaufnahmen durchgeführt. Es wurden Simulationsmodelle der verschiedenen untersuchten Züge erstellt. Mit den kalibrierten Simulationsmodellen können dann Optimierungsmassnahmen für die HLK-Technik und bei der Fahrzeughülle definiert und berechnet werden. Die Simulationen zeigen, dass das mit einer Summe von Massnahmen realisierbare Energiesparpotential im Regionalverkehr von allen Massnahmen zusammen bis zu ca. 40% des Energieverbrauchs betragen kann. Im Fernverkehr ist das Einsparpotenzial geringer.

In rail vehicles between 20% and 40% of the energy are used for heating, ventilation and cooling. In a research project, measures are elaborated to reduce this energy consumption while keeping the indoor comfort at least at the same level.

For this purpose, rail vehicles of different Swiss railway companies (SOB, RhB, BLS and SBB) are monitored in detail. In addition to these measurements, heating-up experiments, air tightness measurements and thermographic pictures are made. Simulation models for the different trains are compiled. With the calibrated simulation models, the optimization measures for the HVAC system and the vehicle envelope could be defined and calculated. The result of the simulations is that the potential of energy savings in a regional traffic service of all measure together can be up to 40% of the electric energy consumption depending on the measure. In the long-distance traffic the possible savings are less.

1. Ausgangslage

Ein hoher Anteil an elektrischer Energie wird in Zügen nicht für den Antrieb (Traktion), sondern für die Komforteinrichtungen wie Heizung, Lüftung und Kühlung (HLK) der Fahrgasträume und technischer Komponenten benötigt. Relevante Faktoren sind die thermischen Eigenschaften des Fahrzeuges, die implementierte Steuerungslogik und betriebliche Parameter wie die täglichen Fahrdistanzen, die Standzeiten und der Energieverbrauch für die Traktion. Unter der Leitung des Departements Physik der Universität Basel wurde vor zwei Jahren ein Forschungsprojekt lanciert, welches sich mit der Verbesserung der Energieeffizienz der HLK im öffentlichen Verkehr befasst. Das Hauptziel ist die Ausarbeitung von Massnahmen unterschiedlichster Art, welche den Energieverbrauch der Heizung, Lüftung und Kühlung bei mindestens gleich bleibendem Komfort reduzieren.

Zwei wesentliche Gründe für den hohen Energieverbrauch sind die schlechte Dämmung der Fahrzeughülle und die fehlende Wärmerückgewinnung bei der Lüftung. Beides kann jedoch nur im Rahmen einer Totalrevision optimiert werden, ist kostenintensiv und beansprucht viel (kaum vorhandenen) Platz. Einfacher umsetzbare Massnahmen – mit etwas geringerem Einsparpotenzial – sind z.B. die Reduktion des Aussenluftanteils der Lüftung durch eine über die CO₂-Konzentration gesteuerte Regelung der Zuluftmenge, die Implementierung einer "Nachtabsenkung" der Temperaturen im Wageninnern während den Standzeiten und die Sollwertreduktion der Innenraumlufttemperatur um einige wenige Grad.

Insgesamt werden voraussichtlich sechs verschiedene Fahrzeuge analysiert:

- NINA (BLS)
- EW II (RhB)
- EW IV (RhB)
- Pano GEX (RhB)
- Flirt (SOB)
- ICN (SBB)

Das Projekt wird unterstützt von swisselectric research, dem Bundesamt für Energie BFE und dem Bundesamt für Verkehr BAV sowie durch Eigenleistungen der Projektpartner.

2. Vorgehen

Von der Universität Basel wurde ein Messsystem zur Messung der Temperaturen, Heizenergie, Kühlenergie, Klimadaten wie solarer Einstrahlung und GPS-Daten entwickelt und in verschiedene Züge eingebaut. Damit stehen für einige Wagen detaillierte Daten zum Energieverbrauch zur Verfügung, z.T. bereits über mehrere Jahre. Zusätzlich zu diesen Messungen wurden durch die Hochschule Luzern weitere Messungen wie Aufheizversuche, Tracergasmessungen und Thermographieaufnahmen durchgeführt.

Simulationsmodelle für einen kompletten Wagen bzw. für eine ganze Zugseinheit der verschiedenen untersuchten Züge wurden erstellt. Mit den kalibrierten Simulationsmodellen können nun einzelne Optimierungsmassnahmen oder verschiedene Kombinationen von Massnahmen für die HLK-Technik, insbesondere bei der Lüftung und bei der Fahrzeughülle definiert und berechnet werden.

Die Vorgehensweise ist für die verschiedenen Fahrzeuge weitestgehend identisch.

2.1 Vorgehen Aufheizversuch

Ziel des Aufheizversuchs ist die Bestimmung der thermisch aktiven Speichermassen und der thermischen Verluste (Verlustkoeffizienten) über die Fahrzeughülle. Dazu wird das Fahrzeug im Depot bei möglichst konstanten Umgebungsbedingungen auf rund 40°C aufgeheizt. Anschliessend wird das Auskühlverhalten des Fahrzeuges anhand der Raumlufthtemperatur aufgezeichnet, um daraus die entsprechenden fahrzeugspezifischen Informationen zu erhalten.

2.2 Vorgehen Tracergasmessung

Vorgängige Untersuchungen zeigten, dass die Variable "Aussenluftanteil" der Lüftungsanlage einen sehr hohen Einfluss auf die Genauigkeit des thermischen Simulationsmodells von Fahrzeugen hat. Zur präzisen Ermittlung dieser fahrzeugspezifischen Variablen werden Tracergasmessungen durchgeführt.

Das Prinzip der Tracergasmessung besteht darin, einen Raum (oder ein Zugabteil) mit einem Gas z.B. SF₆ solange zu befüllen, bis eine Sättigung der Konzentration erreicht ist. Dann wird die Zuführung des Gases gestoppt und das Abklingen der Konzentration kann beobachtet werden. Das Abklingen kann durch Infiltration oder wie in diesem Fall durch die Zuführung von Aussenluft durch die Lüftungsanlage verursacht werden. Mit dem bekannten Wagnvolumen und dem Verlauf der Gaskonzentration bei ausgeschalteter Lüftung kann der Volumenstrom der Aussenluft berechnet werden.

2.3 Vorgehen Thermographieaufnahmen

Fahrzeughüllen sind aus thermischer Sicht sehr komplex und der Wärmedurchgang ist über die Hülle sehr un stetig verteilt (Wärmebrücken). Neben der quantitativen Ermittlung der Wärmeverluste (siehe "Aufheizversuch") ist auch eine qualitative Aussage zur Verteilung der Wärmeverluste über die ganze Oberfläche sehr wichtig. Eine geeignete Methode für diese Analyse sind Thermographieaufnahmen mittels einer Thermographiekamera.

2.4 Vorgehen Aufbereitung Messdaten

Die Messdaten der einzelnen Fahrzeuge aus der Datenbank der Universität Basel wurden gesichtet um geeignete Zeiträume für eine Kalibrierung des Simulationsmodelles zu definieren. Ziel ist es eine Periode mit folgenden Merkmalen aufzufinden:

- Der Wagon ist nicht in Betrieb.
- Eine deutliche Differenz zwischen Innen- und Aussentemperatur ist vorhanden.
- Ein "Schwngen" der Innentemperatur des Wagons verursacht durch klimatische Randbedingungen oder aufgrund der HLK-Technik.

Die ausgelesenen Daten wurden für die Verwendung im Simulationsprogramm zeitlich synchronisiert.

Für die Simulation werden die Strahlungswerte getrennt in Direkt- und Diffusstrahlung benötigt. Da am Wagen die Globalstrahlung gemessen wird, wurde ein Rechenmodell zur Strahlungsumrechnung erstellt.

2.5 Vorgehen Simulationsmodell / Simulation

Allgemeines Vorgehen Simulationsmodell / Simulation

Die Fahrzeuge werden als Computermmodell mit der Software IDA ICE erstellt und simuliert. Die Software stammt aus dem Gebäudebereich und findet heute in Forschung und Engineering breite Anwendung. Zu den Eingabedaten für das Computermmodell gehören die Fahrzeugkonstruktion (insbesondere die energetischen Eigenschaften der Fahrzeughülle), die HLK-Ausrüstung, die jeweilige Art des Einsatzes (inkl. Fahrgastzahlen), die Art der Regelung sowie das Aussenklima (Temperaturen, solare Einstrahlung). Das Modell wurde mittels der Langzeitmessungen der Universität Basel in Kombination mit den durchgeführten stationären Messungen (Aufheizen und Tracergasmessung) und Personenzählungen kalibriert.

Modellbildung der Konstruktion

Als erster Schritt wurde der Aufbau und die Konstruktion der Fahrzeughülle in die Softwareumgebung IDA ICE implementiert. Die Hülle des Fahrzeuges besteht aus Stahlblech, welches mit Rippen nach Innen verstärkt ist. Die Zwischenräume sind teilweise mit einer Dämmung ausgefüllt. Die Innenverkleidung besteht zum größten Teil aus einer glasfaserverstärkten Kunststoffplatte. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau einer Wand. Die Wandstärken variieren. Im Simulationsmodell werden die Aufbauten der Hülle jedoch

vereinfacht angenommen. Diese Vereinfachungen der Hülle wurden im Simulationsmodell mit Hilfe eines Verlustkoeffizienten berücksichtigt. Dieser Verlustkoeffizient wurde durch eine Aufheizmessung kalibriert.

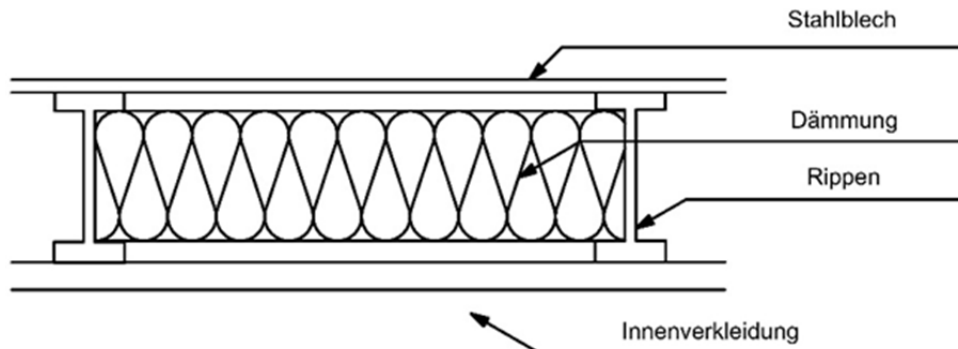


Abbildung 1 Aufbau der Hülle (vereinfacht dargestellt)

Modellbildung der Anlagentechnik

Die HLK-Technik der simulierten Züge besteht je nachdem ob eine Kühlung vorhanden ist, aus zwei bis drei Komponenten: einer Luftbehandlungseinheit in der Zwischendecke, einer Kälteerzeugung auf dem Dach und einem Abluftventilator. Bei den Zugkompositionen mit Kühlung wird diese im Modell berücksichtigt und mit entsprechender Kühlleistung simuliert.

2.6 Vorgehen Personenzählung, interne Wärmequellen

Um das Simulationsmodell weiter zu verfeinern, ist es notwendig, alle internen Wärmequellen detailliert als Verlauf über die Zeit zu kennen. Im Fall der Schienenfahrzeuge kann man bei den internen Lasten von der Beleuchtung und von Personen ausgehen. Die von den Personen verwendeten elektronischen Geräte können im Normalfall vernachlässigt werden. Die Beleuchtung, welche ebenfalls Wärme in die Zugkomposition abgibt, ist bekannt und wird im Simulationsprogramm separat eingegeben.

Die Personenbelegung ist kein konstanter Wert und liegt auch nicht als Messwert vor. Der Grund liegt darin, dass je nach Fahrzeug gar keine Messinstrumente vorhanden sind oder es für die Betreiber sehr aufwendig ist, die Datensätze aus dem System herauszuziehen.

Als Alternative bietet sich die Abschätzung der jeweils mitfahrenden Personenzahl anhand des gemessenen CO_2 -Wertes an. Das ist sicher eine Verbesserung gegenüber der Annahme einer konstanten Personenanzahl über die gesamte Betriebszeit.

Die Personenanzahl lässt sich theoretisch über das folgende mathematisches Modell herleiten:

$$N_{\text{pers}} = \frac{(p_i - p_a) * L * V * \rho_{\text{CO}_2}}{\dot{m}}$$

- N_{pers} : Anzahl Personen im Raum
- p_i : CO_2 -Konzentration innen (gemessen) [ppm]
- p_a : CO_2 -Konzentration Umgebung [ppm]
- L : Luftwechselrate [1/h]
- V : Raumvolumen [m^3]
- ρ_{CO_2} : Dichte CO_2 [kg/m^3]
- $\dot{m}$: CO_2 -Emission pro Person [mg/h]

Quelle: (Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz - BGIA, 2005)

Die Parameter V und ρ_{CO_2} sind für jede Zugkomposition bestimmbar und p_i ist aus der Messung bekannt. Die restlichen Werte sind Modellparameter, welche für jede Zugkomposition kalibriert werden müssen. Die Kalibrierung der Personen erfolgt je nach Zug entweder mit einer manuellen Zählung direkt im Fahrgastraum oder aber wenn vorhanden mit den Daten aus dem System der Betreiber.

2.7 Vorgehen Massnahmen definieren

In einer ersten Phase werden zusammen mit den Bahngesellschaften Ideen für betriebliche und technische Massnahmen gesammelt, bewertet priorisiert. Die einzelnen Massnahmen können in einer zweiten Phase für die einzelnen Wagen auf Basis der Jahressimulationen modelliert und somit deren Potenzial bewertet werden.

Die analysierten Massnahmen lassen sich in drei verschiedene Bereiche gliedern. Die "Software"-Massnahmen beschreiben Massnahmen, welche Änderungen an der Regelung und Steuerung der HLK-Systeme betreffen. Bei den "Hardware"-Massnahmen handelt es sich um solche, welche zusätzliche oder andere HLK-Komponenten betreffen. Die dritte Massnahmenkategorie betrifft die "Hülle".

3. Resultate

3.1 Ergebnisse Aufheizversuch

Anhand der Messdaten des Aufheizversuchs werden im Simulationsmodell die Wärmebrücken und zusätzliche Masse der Tragkonstruktion der Wände so verfeinert, bis sich die Simulationsergebnisse mit den Daten des Aufheizversuchs decken.

Wie der Vergleich der gemessenen und der simulierten Temperaturen im Wagen des EW II der RhB (Abbildung 2) deutlich zeigt, ist nach den Anpassungen am Simulationsmodell (Simulation 2, gelbe Linie) der Temperaturverlauf sowohl beim Aufheizen wie auch beim Auskühlen praktisch deckungsgleich mit der gemessenen Temperatur des Aufheizversuchs (Messung Hochschule Luzern, grüne Linie). Deutliche Abweichungen zeigt die Simulation 1 bevor das Modell mit dem Aufheizversuch abgeglichen wurde. Am Modell 2 wurde hauptsächlich die Hülle mit zusätzlicher Massenlage in der Aussenwand angepasst. Die Abweichung von ca. 5 K zur Messung der fest installierten Temperaturfühler der Universität Basel im gleichen Fahrzeug dürfte vermutlich an der unterschiedlichen Platzierung der Fühler liegen. Im Abteil sind die Raumfühler unter dem Deckenkanal in den Fortluftöffnungen montiert. Wie stark an dieser Stelle infolge Wärmebrücken die Temperatur beeinträchtigt wird, ist schwer abzuschätzen. Eine Verfälschung aufgrund der Luftzirkulation kann ausgeschlossen werden, da durch die Platzierung in den Fortluftöffnungen eine gute Umspülung mit entweichender Abteilluft gewährleistet ist, auch bei stillstehenden Fortluftventilatoren. Beim EW II stimmen die Messwerte und die Simulation nach den Modellanpassungen genügend genau überein.

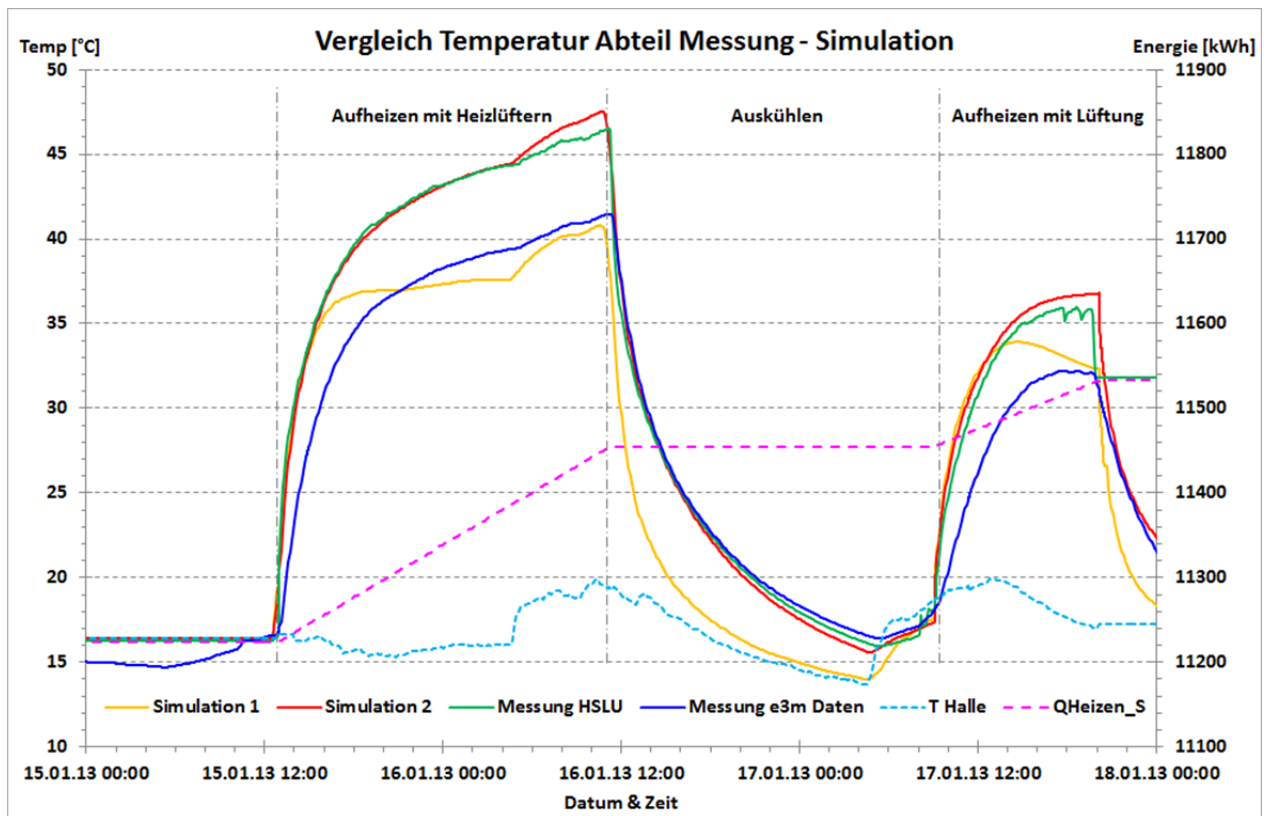


Abbildung 2 Vergleich Messung gegenüber Simulation der Lufttemperaturen im Abteil des EW II (RhB)

3.2 Ergebnisse Simulationsmodell / Simulation

Als Ergebnis der Simulation resultieren detaillierte Aussagen in Stundenschritten (bei Bedarf auch kürzere Zeitschritte möglich) zu den Komfortparametern im Innenraum und zu den Zustandsgrößen sowie Energieverbrauchsdaten der HLK-Technik.

3.3 Ergebnisse Energieflussdiagramm

In Abbildung 3 sind die Energieflüsse auf Basis der Simulationsdaten des Jahres 2011 für den EW II dargestellt. Alle Prozentangaben beziehen sich auf die Gesamtenergie ohne Traktion und sind gerundet.

Auf der linken Seite ist der Energieeintrag und auf der rechten Seite der Energieverlust dargestellt. "Solar" steht für den solaren Wärmeeintrag durch die Fenster, "Licht" für den Wärmeeintrag durch die künstliche Beleuchtung, "Personen" für den Wärmeeintrag durch die Personen. Der Passagierraum mit den Sitzplätzen verfügt über eine Luftheizung. Die beiden Vorräume werden nur mit Radiatoren beheizt. Diese werden nach Aussentemperatur 3-stufig geregelt und deren effektive Heizleistung stellt eine grosse Unsicherheit in der Simulation dar. Von der zugeführten Wärme werden 23% für die Beheizung des Fahrgastraumes benötigt, 77% werden mit der Fortluft wieder nach aussen abgegeben.

Die Verluste über die Hülle wurden bei der Simulation mit den Resultaten aus dem Aufheizversuch abgeglichen. Die Verluste über die Infiltration beinhalten auch die Verluste der Türöffnungen.

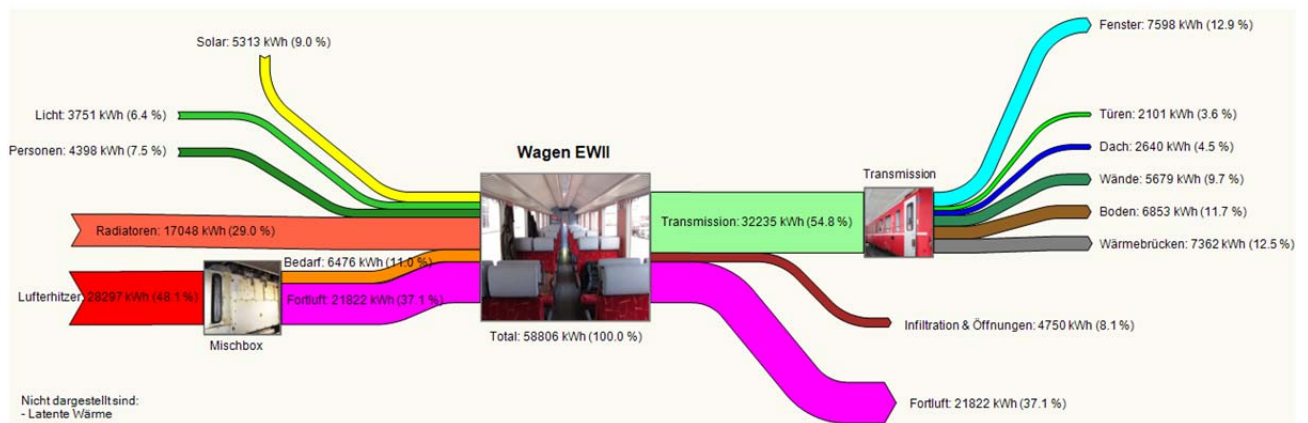


Abbildung 3 Energieflussdiagramm Jahressimulation 2011 des EW II (RhB)

3.4 Mögliche Massnahmen und deren Einsparpotential

Die Simulationen zeigen, dass das Energiesparpotential je nach Massnahme bis zu ca. 40% des Energieverbrauchs betragen kann. Für den EW II der RhB wurden insgesamt sieben verschiedene Massnahmen simuliert. Die in Abbildung 4 dargestellte Basissimulation bildet die Jahressimulation für das Jahr 2011 ab, welche dem Energieflussdiagramm entspricht.

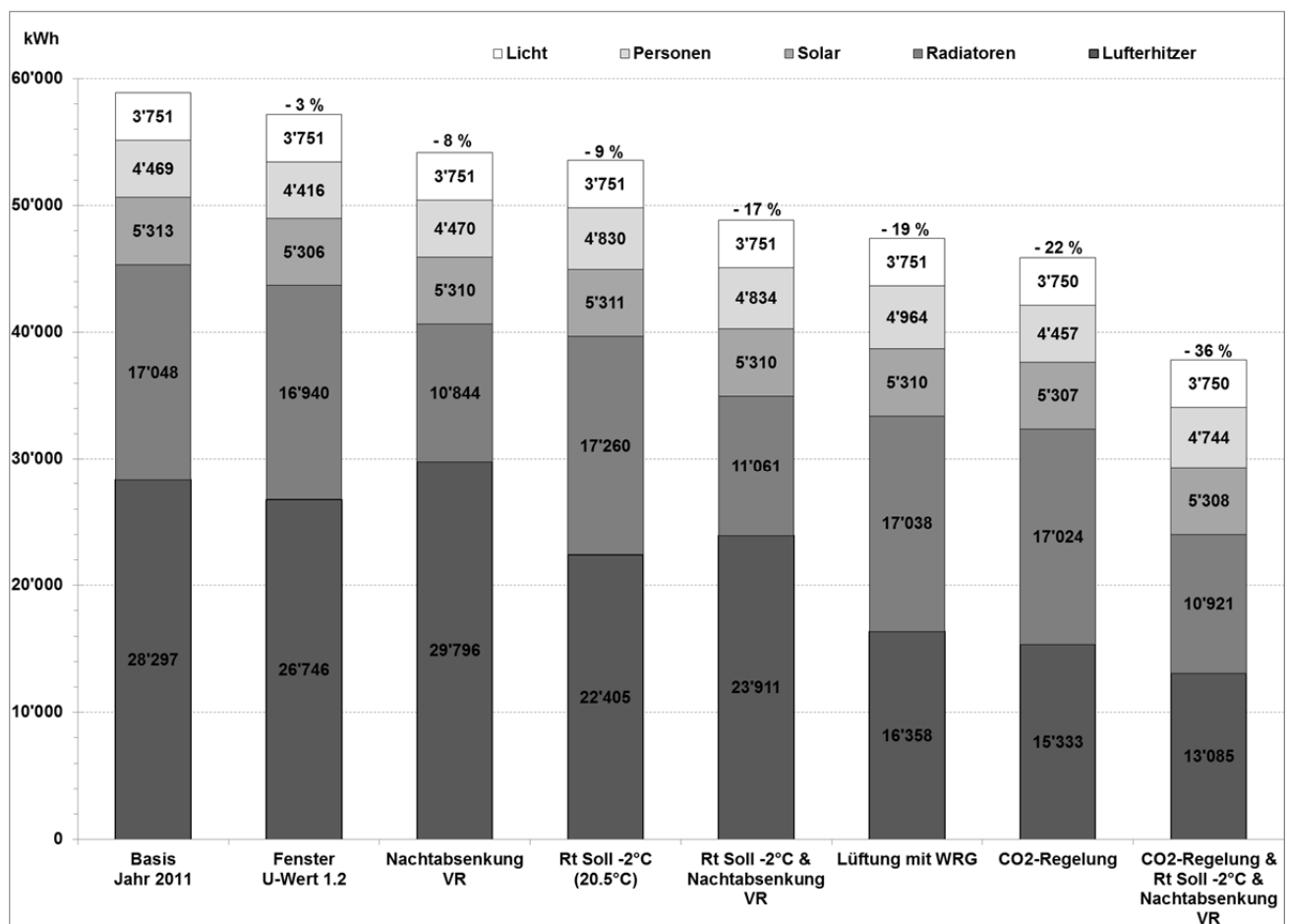


Abbildung 4 Energiebedarf jeweils nach Realisierung verschiedener Massnahmen für den EW II (RhB)

In der Basisvariante beträgt der U-Wert der Fenster $3.1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Bei der ersten simulierten Massnahme wurde er auf $1.2 \text{ W/m}^2\text{K}$ reduziert. Diese Massnahme hat eine Reduktion der Energie um 3% zur Folge. Die Änderung der Energie durch Personen gegenüber der Basisvariante ist eine Folge des Simulationsmodells. Dies ist darauf zurück zu führen, dass sich die sensible Wärmeabgabe durch die Personen mit tiefer werdender Raumtemperatur erhöht.

Die Modellannahmen für die zusätzliche Nachtabenkung der Radiatoren im Vorraum sind analog zur Nachtabenkung im Fahrgastraum definiert. Es wird ein Frostschutz berücksichtigt. Bei dieser Variante beträgt die Einsparung der Energie gegenüber der Basisvariante bereits 8%.

Mit einer weiteren Massnahme wie der Absenkung der Raumlufttemperatur um 2 K von 22.5°C auf 20.5°C können 9% an Heizenergie eingespart werden. Die Solltemperatur kann beim EW II jedoch in einem bestimmten Temperaturbereich durch die Passagiere selbst eingestellt werden, was auf Wunsch des Bahnbetreibers beibehalten werden soll. Dadurch ist hier eine Umsetzung der Massnahme unmöglich.

Eine Kombination der Massnahmen mit der Raumtemperatur-Sollwertabsenkung um 2 K und einer zusätzliche Nachtabenkung im Vorraum reduziert den Energiebedarf um 17% gegenüber der Basisvariante. Dies entspricht beinahe der mit einer Wärmerückgewinnung bei der Lüftungsanlage erzielbaren Einsparung (19%) erreicht werden kann. Bei der Wärmerückgewinnung wird der Frostschutz berücksichtigt, d.h. die minimale Fortlufttemperatur beträgt 1°C .

Noch mehr Potential als die Wärmerückgewinnung hat die bedarfsgerechte Regelung der Luftmenge in Abhängigkeit der CO_2 -Konzentration. Die Regelung wird auf eine maximale CO_2 -Konzentration von 1'000 ppm geregelt. Der Energiebedarf lässt sich so um 22% reduzieren. Dies ist die attraktivste Massnahme, da sie einfach umzusetzen ist bei gleichzeitig grosser Energieeinsparung. Es werden nur zusätzliche CO_2 -Fühler inkl. Regler benötigt.

Kombiniert man nun die einzelnen Massnahmen wie die Reduktion der Luftmenge mit einer bedarfsgerechten CO_2 -Regelung mit der Raumtemperatur-Sollwertabsenkung um 2 K und einer zusätzliche Nachtabenkung im Vorraum verringert sich der Energiebedarf um 36%, was mehr als 21'000 kWh pro Jahr und Wagen entspricht.

4. Diskussion

Mit den Aufheiz- und Tracergasmessungen konnte eine erfolgreiche Validierung des Modelles in den Punkten thermische Masse, Wärmedurchgang der Hülle sowie HLK-Technik am stehenden Zug erzielt werden. Anhand der Thermographieaufnahmen konnte allgemein festgestellt werden, dass unabhängig vom Fahrzeugtyp die grössten Schwachstellen der Fahrzeughülle bei den Fenstern und Türen liegen. Sonstige Wärmebrücken, z.B. durch Rippen, fallen nicht so stark ins Gewicht.

Die Simulationen ermöglichen Massnahmen am Fahrzeug sowohl energetisch als auch betreffend der Auswirkungen auf die Behaglichkeit im Fahrgastraum quantitativ zu beurteilen. Weiterführend kann so auch eine wirtschaftliche Beurteilung (Energie-Minder- oder Mehrverbrauch) abgeschätzt werden. Die Massnahmenliste, welche in Zusammenarbeit mit den Bahngesellschaften hinsichtlich Potential, Einschränkungen und Risiken erstellt und beurteilt wurde, hat ergeben, dass folgende Massnahmen ein grosses Potential aufweisen und mit vertretbarem Aufwand umsetzbar sind:

- Optimierung der Fenstergrösse (nur bei Neubeschaffung)
- Nachtabenkung der Innenraumtemperatur
- Bedarfsgerechte Regelung der Luftmenge in Abhängigkeit der CO_2 -Konzentration im Fahrgastraum
- Temperaturregelung und somit Absenkung des Raumtemperatur-Sollwerts

5. Ausblick

Die erforderlichen Messdaten sind für alle zu simulierenden Fahrzeugtypen vorhanden. Nun ist vorgesehen die noch ausstehenden Jahressimulationen und Simulationen der Massnahmen mit dem grössten Potential an den verschiedenen Fahrzeugen umzusetzen, insbesondere auch die Untersuchungen für Fahrzeuge aus dem Fernverkehr.

7.5. Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im öffentlichen Verkehr

Franz Sidler, Dominic Jurt, Prof. Urs-Peter Menti, Eveline Thaler, Prof. Dr. Peter Oelhafen

BauSIM 2014

September 2014

ENERGIEEFFIZIENZ VON HEIZUNG, LÜFTUNG UND KÜHLUNG IM ÖFFENTLICHEN VERKEHR

Franz Sidler¹, Dominic Jurt¹, Urs-Peter Menti¹, Eveline Thaler¹ und Peter Oelhafen²

¹Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw, Schweiz

²Universität Basel, Basel, Schweiz

KURZFASSUNG

In Schienenfahrzeugen werden zwischen 20% und 40% der Energie für Heizen, Lüften und Kühlen verbraucht. In einem Forschungsprojekt werden Massnahmen ausgearbeitet, um diesen Energieverbrauch bei mindestens gleich bleibendem Komfort zu reduzieren.

Hierzu wird der Energieverbrauch verschiedener Schienenfahrzeuge unterschiedlicher Betreiber in der Schweiz (SOB, RhB, BLS und SBB) im Detail ausgemessen. Zusätzlich zu den Messungen werden Aufheizversuche, Luftdichtigkeitsmessungen und Thermographieaufnahmen durchgeführt. Es werden Simulationsmodelle der verschiedenen Fahrzeuge erstellt. Die Durchführung von Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen ermöglicht die Ermittlung der Gesamtunsicherheit des Modelles sowie die Identifikation der einflussreichsten Modellparameter.

Mit den kalibrierten Simulationsmodellen können Optimierungsmassnahmen für die HLK-Technik und bei der Fahrzeughülle definiert und berechnet werden. Die Simulationen zeigen, dass das Energiesparpotential im Regionalverkehr bis zu ca. 40% des Energieverbrauchs betragen kann. Im Fernverkehr ist das Einsparpotenzial geringer.

In rail vehicles between 20% and 40% of the energy are used for heating, ventilation and cooling. In a research project, measures are elaborated to reduce this energy consumption while keeping the indoor comfort at least at the same level.

For this purpose, the energy consumption of rail vehicles of different Swiss railway companies (SOB, RhB, BLS and SBB) is monitored in detail. In addition to these measurements, heating-up experiments, air tightness measurements and thermographic pictures are made. Simulation models for the different trains are compiled. The realization of uncertainty and sensitivity analysis enables the investigation of the total uncertainty of the model and also the identification of the most influential model parameters.

With the calibrated simulation models, the optimization measures for the HVAC system and the vehicle envelope could be defined and calculated. The result of the simulations is that the potential of energy savings in a regional traffic service can be up to 40% of the electric energy consumption. In the long-distance traffic the possible savings are less.

EINLEITUNG

Ein hoher Anteil an elektrischer Energie wird in Zügen neben dem Antrieb (Traktion), für die Komforteinrichtungen wie Heizung, Lüftung und Kühlung (HLK) der Fahrgasträume und technischer Komponenten benötigt. Relevante Faktoren sind die thermischen Eigenschaften des Fahrzeuges, die implementierte Steuerungstechnik und betriebliche Parameter wie die täglichen Fahrdistanzen, die Standzeiten und der Energieverbrauch für die Traktion. Unter der Leitung des Departements Physik der Universität Basel wurde vor zwei Jahren ein Forschungsprojekt lanciert, welches sich mit der Verbesserung der Energieeffizienz der HLK im öffentlichen Verkehr befasst. Das Hauptziel ist die Ausarbeitung und Quantifizierung von Massnahmen unterschiedlichster Art, welche den Energieverbrauch der Heizung, Lüftung und Kühlung bei mindestens gleich bleibendem Komfort reduzieren.

Zwei wesentliche Gründe für den hohen Energieverbrauch sind die schlechte Dämmung der Fahrzeughülle und die fehlende Wärmerückgewinnung bei der Lüftung. Beides kann jedoch nur im Rahmen einer Totalrevision der Fahrzeuge optimiert werden, ist kostenintensiv und beansprucht viel (kaum vorhandenen) Platz. Einfacher umsetzbare Massnahmen – mit etwas geringerem Einsparpotenzial – sind z.B. die Reduktion des Aussenluftanteils der Lüftung durch eine über die CO₂-Konzentration gesteuerte Regelung der Zuluftmenge, die Implementierung einer “Nachtsabsenkung” der Temperaturen im Wageninnern während den Standzeiten und die Sollwertreduktion der Innenraumlufttemperatur um einige wenige Grad.

Insgesamt werden voraussichtlich sechs verschiedene Fahrzeuge analysiert:

- NINA (BLS)
- EW II (RhB)
- EW IV (RhB)
- Pano GEX (RhB)
- Flirt (SOB)
- ICN (SBB)

SIMULATION

Vorgehen

Von der Universität Basel wurde ein Messsystem zur Messung der Temperaturen, Heizenergie, Kühlenergie, Klimadaten wie solarer Einstrahlung und GPS-Daten entwickelt und in verschiedene Züge eingebaut. Damit stehen für einige Wagen detaillierte Daten zum Energieverbrauch zur Verfügung, z.T. bereits über mehrere Jahre. Zusätzlich zu diesen Messungen werden durch die Hochschule Luzern weitere Messungen wie Aufheizversuche, Tracergasmessungen und Thermographieaufnahmen durchgeführt. Die Vorgehensweise ist für die verschiedenen Fahrzeuge weitestgehend identisch.

Ziel des Aufheizversuchs ist die Bestimmung der thermisch aktiven Speichermassen und der thermischen Verluste (Verlustkoeffizienten) über die Fahrzeughülle. Dazu wird das Fahrzeug im Depot bei möglichst konstanten Umgebungsbedingungen auf rund 40°C aufgeheizt. Anschließend wird das Auskühlverhalten des Fahrzeuges anhand der Raumlufttemperatur aufgezeichnet, um daraus die entsprechenden fahrzeugspezifischen Informationen zu erhalten.

Anhand der Messdaten des Aufheizversuchs werden im Simulationsmodell die Wärmebrücken und zusätzliche Masse der Tragkonstruktion der Wände – in Absprache mit den Bahngesellschaften – so verfeinert, bis sich die Simulationsergebnisse mit den Daten des Aufheizversuchs decken.

Messungen und Simulationen zeigten, dass die Variable "Aussenluftanteil" der Lüftungsanlage einen sehr hohen Einfluss auf die Genauigkeit des thermischen Simulationsmodells von Fahrzeugen hat. Zur präzisen Ermittlung dieser fahrzeugspezifischen Variablen werden Tracergasmessungen durchgeführt. Das Prinzip der Tracergasmessung besteht darin, einen Raum (oder ein Zugabteil) mit einem Gas z.B. SF₆ solange zu befüllen, bis eine Sättigung der Konzentration erreicht ist. Dann wird die Zuführung des Gases gestoppt und das Abklingen der Konzentration kann beobachtet werden. Das Abklingen kann durch Infiltration oder wie in diesem Fall durch die Zuführung von Aussenluft durch die Lüftungsanlage verursacht werden. Mit dem bekannten Wagnvolumen und dem Verlauf der

Gaskonzentration bei ausgeschalteter Lüftung kann der Volumenstrom der Aussenluft berechnet werden.

Fahrzeughüllen sind aus thermischer Sicht und vom Aufbau her sehr komplex und der Wärmedurchgang ist über die Hülle sehr unständig verteilt (Wärmebrücken). Neben der quantitativen Ermittlung der Wärmeverluste (siehe "Aufheizversuch") ist auch eine qualitative Aussage zur Verteilung der Wärmeverluste über die ganze Oberfläche sehr wichtig. Eine geeignete Methode für diese Analyse sind Thermographieaufnahmen mittels einer Thermographiekamera.

Die Messdaten der einzelnen Fahrzeuge aus der Datenbank der Universität Basel werden gesichtet um geeignete Zeiträume für eine Kalibrierung des Simulationsmodells zu definieren. Die ausgelesenen Daten werden für die Verwendung im Simulationsprogramm zeitlich synchronisiert. Für die Simulation werden die Strahlungswerte getrennt in Direkt- und Diffusstrahlung benötigt. Da am Wagen die Globalstrahlung gemessen wird, wird ein Rechenmodell zur Strahlungsumrechnung erstellt.

Die Fahrzeuge werden als Computermodell mit der Software IDA ICE erstellt und simuliert. Die Software stammt aus dem Gebäudebereich und findet heute in Forschung und Engineering breite Anwendung. Zu den Eingabedaten für das Computermodell gehören die Fahrzeugkonstruktion (insbesondere die energetischen Eigenschaften der Fahrzeughülle), die HLK-Ausrüstung, die jeweilige Art des Einsatzes (inkl. Fahrgastzahlen), die Art der Regelung sowie das Aussenklima (Temperaturen, solare Einstrahlung). Das Modell wird mittels der Langzeitmessungen der Universität Basel in Kombination mit den durchgeführten stationären Messungen (Aufheizen und Tracergasmessung) und Personenzählungen kalibriert.

Als erster Schritt wird der Aufbau und die Konstruktion der Fahrzeughülle in die Softwareumgebung IDA ICE implementiert. Die Hülle des Fahrzeuges besteht aus Stahlblech, welches mit Rippen nach Innen verstärkt ist. Die Zwischenräume sind teilweise mit einer Dämmung ausgefüllt. Die Innenverkleidung besteht zum größten Teil aus einer glasfaserverstärkten Kunststoffplatte. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau einer Wand. Die Wandstärken variieren. Im Simulationsmodell werden die Aufbauten der Hülle jedoch vereinfacht angenommen. Diese Vereinfachungen der Hülle werden im Simulationsmodell mit Hilfe eines Verlustkoeffizienten berücksichtigt. Dieser Verlustkoeffizient wird durch eine Aufheizmessung kalibriert.

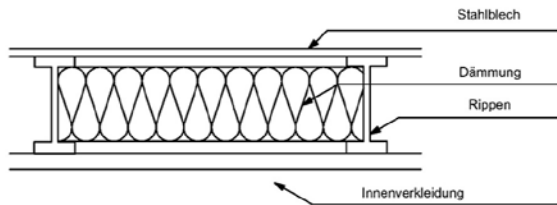


Abbildung 1: Aufbau der Hülle (vereinfacht dargestellt)

Die HLK-Technik der simulierten Züge besteht je nachdem ob eine Kühlung vorhanden ist aus zwei bis drei Komponenten: einer Luftbehandlungseinheit in der Zwischendecke, einer Kälteerzeugung auf dem Dach und einem Abluftventilator. Bei den Zugkompositionen mit Kühlung wird diese im Modell berücksichtigt und mit entsprechender Kühleistung simuliert.

Als Ergebnis der Simulation resultieren detaillierte Aussagen in Stundenschritten (bei Bedarf auch kürzere Zeitschritte möglich) zu den Komfortparametern im Innenraum und zu den Zustandsgrößen sowie Energieverbrauchsdaten der HLK-Technik.

Um das Simulationsmodell weiter zu verfeinern, ist es notwendig, alle internen Wärmequellen detailliert als Verlauf über die Zeit zu kennen. Im Fall der Schienenfahrzeuge kann man bei den internen Lasten von der Beleuchtung und von Personen ausgehen. Die von den Personen verwendeten elektronischen Geräte können im Normalfall vernachlässigt werden. Die Beleuchtung, welche ebenfalls Wärme in die Zugkomposition abgibt, ist bekannt und wird im Simulationsprogramm separat eingegeben.

Die Personenbelegung ist kein konstanter Wert und liegt auch nicht als Messwert vor. Der Grund liegt darin, dass je nach Fahrzeug gar keine Messinstrumente vorhanden sind oder es für die Betreiber sehr aufwändig ist, die Datensätze aus dem System auszulesen. Als Alternative bietet sich die Abschätzung der jeweiligen Personenanzahl anhand des gemessenen CO₂-Wertes an. Das ist sicher eine Verbesserung gegenüber der Annahme einer konstanten Personenanzahl über die gesamte Betriebszeit.

Die Personenanzahl lässt sich theoretisch über das folgende mathematische Modell (BGIA, 2005) herleiten:

$$N_{pers} = \frac{(p_i - p_a) \cdot L \cdot V \cdot p_{CO_2}}{\dot{m}} \quad (1)$$

N_{pers} Anzahl Personen im Raum

p_i CO₂-Konzentration innen (gemessen) [ppm]

p_a CO₂-Konzentration Umgebung [ppm]

L Luftwechselrate [1/h]

V Raumvolumen [m³]

p_{CO_2} Dichte CO₂ [kg/m³]

$\dot{m}$ CO₂-Emission pro Person [mg/h]

Die Parameter V und ρ_{CO_2} sind für jede Zugkomposition bestimmbar und p_i ist aus der Messung bekannt. Die restlichen Werte sind Modellparameter, welche für jede Zugkomposition kalibriert werden müssen. Die Kalibrierung der Personen erfolgt je nach Zug entweder mit einer manuellen Zählung direkt im Fahrgastraum oder aber mit den Daten aus dem System der Betreiber.

Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse (Sensitivity Analysis = SA) ist das Studium eines Modells. Es wird untersucht in wie weit die Änderung des Outputs (Uncertainty) den Änderungen eines Input Parameters zugerechnet werden kann. Sie ist eine Technik, welche systematisch die Variablen eines Modells ändert, um deren Einfluss zu bestimmen. Anders formuliert wird in der Sensitivitätsanalyse der Einfluss von Inputfaktoren (einzeln oder gemeinsam) auf bestimmte Ergebnisgrößen untersucht. Die Analyse kann mathematisch durch das Analysieren von Modellgleichungen erfolgen oder durch Variation einzelner Inputfaktoren (Iterationsverfahren) und einem damit verbundenen Vergleich der Ergebnisse mit dem Ergebnis des Standardinputs.

Allgemeiner ausgedrückt untersuchen Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen die Robustheit eines Systems, sofern das System der Form eines statistischen Modells unterliegt.

Eine Monte-Carlo-Simulation oder Monte-Carlo-Studie, auch MC-Analyse (MCA), ist ein Verfahren aus der Stochastik, bei dem sehr häufig durchgeführte Zufallsexperimente die Basis darstellen. Es wird dabei versucht, mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie analytisch nicht oder nur aufwändig lösbare Probleme numerisch zu lösen. Nach einer MCA hat z.B. der Output Heizenergie nicht nur einen Wert, sondern auch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung bei der im Falle einer Normalverteilung ein Erwartungswert Y und eine Standardabweichung σ ermittelt werden kann.

Bei einer Monte Carlo Studie wird allen ungewissen Inputs eine spezifische Wahrscheinlichkeitsverteilung zugeordnet. Alle Input-Parameter werden dann gleichzeitig variiert. (Maderspacher, 2012)

Für die Betrachtung des EWII der RhB wird die Monte Carlo Analyse mit Hilfe von Matlab und IDA-ICE umgesetzt. Der Ablauf kann wie folgt gegliedert werden:

1. Definition der Parameter wie z.B. g-Wert der Verglasung oder Aussenluftanteil der Lüftungsanlage.
2. Zuweisung der Wahrscheinlichkeitsverteilung an die Parameter (Tabelle 1).
3. Mit einer Samplemethode werden 104 Stichproben aus den Verteilungen genommen und eine Matrix erstellt.
4. Importieren der Samplematrix in das Simulationsmodell.
5. Durchführung von 104 Simulation mit IDA-ICE.
6. Aufbereitung des Outputs mit Matlab.
7. Durchführung einer Unsicherheitsanalyse mit dem Output (z.B. der Verteilung der Heizenergie)

Wie bei der BLS NINA werden auch bei diesem Fahrzeug die Parameter des Modells ausgewählt, bei welchen im Kalibrierungsprozess aufgrund der Erfahrungen die Annahmen mit den grössten Unsicherheiten getroffen werden.

Die ausgewählten Parameter werden dann mit einer normalverteilten Unsicherheit versehen. Diese wird durch die Standardabweichung in Prozent vom Mittelwert angegeben (Tabelle 1).

Tabelle 1: Parameterunsicherheit beim EW II (RhB)

Bezeichnung	ang. σ [%]	Einheit
Azimet Winkel Wagen	37.8	°
Personenbelegung	9.7	---
Leistung Radiatoren	19.5	W
Umluftanteil Lüftung	9.7	L/s
Volumenstrom Lüftung	9.7	L/s
Türöffnungszeit	39	s
Infiltration durch Wände	15.5	kg/s
Spezifische Wärmeleitfähigkeit Wände	38	W/(mK)
Wärmedurchgangskoeffizient Fenster	6.1	W/(m ² K)
Energiedurchlassgrad Fenster	7.5	---
Delta Aussentemperatur	0.75	°C
Legende: ang. σ – angenommene Standardabweichung		

Für den EWII der RhB wurden mit den Parameterunsicherheiten eine Monte Carlo Studie mit 104 Iterationen durchgeführt. Die nachfolgenden Resultate sind die Ergebnisse dieser Studie.

Die totale Heizenergie setzt sich aus der Heizenergie für die Heizregister in den beiden Lüftungsgeräten sowie der Energie für die elektrischen Radiatoren in den Vorräumen und dem WC zusammen. Anhand des Q-Q Plots in Abbildung 2 kann man die Verteilung der Werte grob als Normalverteilung annehmen, wobei allerdings eine sogenannte Kurzschwänzigkeit vorliegt. Das heisst, dass im Gegensatz zur perfekten Normalverteilung die Werte am Rand der Verteilung näher am Mittelwert liegen. Der Mittelwert dieser Verteilung liegt bei 45'114 kWh und die Standardabweichung bei 4'188 kWh. Daraus ergibt sich eine Gesamtunsicherheit bezüglich der gesamten Heizenergie von $\pm 9.3\%$. Verwendet man anstelle der doppelten Standardabweichung den Quantilsabstand QA16, welcher 68% aller Werte enthält, erhält man eine Unsicherheit von $\pm 8.6\%$.

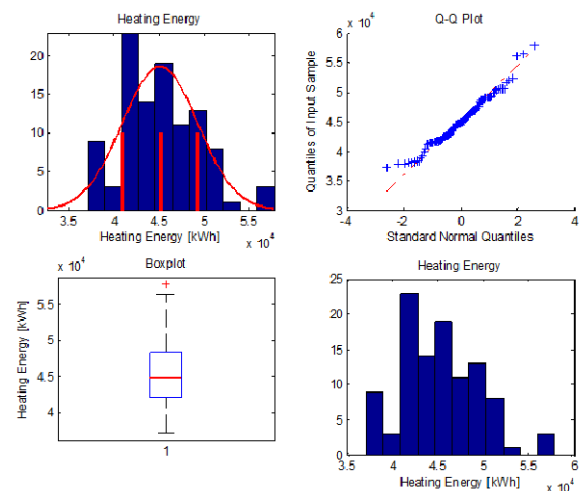


Abbildung 2: Unsicherheit der Heizenergie des EW II

Die Sensitivität beschreibt den Einfluss der variierten Modellparameter auf die gewählte Zielgrösse. Dazu wird mit der Methode "Conditional Variances – Second Path" (Saltelli et al., 2008) die Abhängigkeit zwischen den Modellparametern und der Zielgrösse betrachtet. Die Abbildung 3, die daraus entsteht, ist dabei als Rangliste der Parameter gemäss ihres Einflusses auf die Zielgrösse zu verstehen.

Betrachtet man die gesamte Heizenergie als Zielgrösse, ergibt sich eine sehr grosse Abhängigkeit von der Aussentemperatur. Die Ursache dafür ist, dass durch den verhältnismässig grossen Aussenluftanteil der Lüftung viel Energie aufgebracht werden muss, um die Aussenluft zu konditionieren. Den zweitgrössten Einfluss auf die Heizenergie hat die Leistung der Elektroradiatoren.

Der Grund ist, dass die gewählte maximale Heizleistung in grossem Masse mit der Zielgrösse "Heizenergie für die Radiatoren" zusammenhängt. Da diese etwa ein Drittel der gesamten Heizenergie ausmacht, wirkt sich das auch stark auf die Abhängigkeit zur gesamten Heizenergie aus.

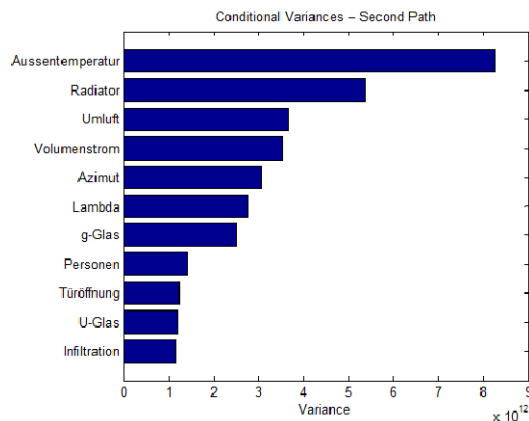


Abbildung 3: Rangliste der Sensitivität beim EW II

Will man also die Gesamtunsicherheit des Modells verkleinern, müsste man in einem ersten Schritt die gewählte Parameterunsicherheit der Aussentemperatur von $\pm 0.75^\circ\text{C}$ verkleinern. Dies ist praktisch fast nicht möglich, da die Grundlage die gemessene Aussentemperatur darstellt. Allein schon die Sensoren weisen bei einer Jahresmitteltemperatur von 9.6°C eine Unsicherheit von $\pm 0.4^\circ\text{C}$ auf. Dazu muss noch eine weitere Unsicherheit addiert werden, da die Temperatur nur an zwei Positionen gemessen und als räumlicher Mittelwert angenommen wird.

Die zweitgrösste Stellschraube um die Gesamtunsicherheit einzugrenzen ist, die Unsicherheit der Radiatorleistung zu reduzieren. Für diese Studie wurde ein Wert von 20% angenommen, da in der Realität der Zugbegleiter die Heizstufe der Radiatoren manuell nach eigenem Gutdünken einstellen kann. Dadurch, dass diese über keinen

Schlumberbetrieb, also zum Beispiel eine Absenkung in der Nacht, verfügen, summiert sich deren Jahresenergiebedarf überdurchschnittlich auf. Die Unsicherheit liesse sich eingrenzen, wenn entweder das Schaltverhalten des Zugbegleiters deterministisch wäre oder aber die momentane Heizstufe als zeitkontinuierlicher Messwert vorliegen würde. Beide Varianten liessen sich entsprechend in das Modell einbinden und damit eine Reduktion der Parameterunsicherheit rechtfertigen.

ERGEBNISANALYSE UND DISKUSSION

Ergebnisse Energieflussdiagramm

In Abbildung 4 sind die Energieflüsse auf Basis der Simulationsdaten des Jahres 2011 für den EW II dargestellt. Alle Prozentangaben beziehen sich auf die Gesamtenergie ohne Traktion und sind gerundet.

Auf der linken Seite ist der Energieeintrag und auf der rechten Seite der Energieverlust dargestellt. "Solar" steht für den solaren Wärmeeintrag durch die Fenster, "Licht" für den Wärmeeintrag durch die Beleuchtung, "Personen" für den Wärmeeintrag durch die Personen. Der Passagierraum mit den Sitzplätzen verfügt über eine Luftheizung. Die beiden Vorräume werden nur mit Radiatoren beheizt. Diese werden im Modell nach Aussentemperatur 3-stufig geregelt und stellen eine grosse Unsicherheit in der Simulation dar. Von der zugeführten Wärme werden 23% für die Beheizung des Fahrgastraumes benötigt, 77% werden mit der Fortluft wieder nach aussen abgegeben.

Die Verluste über die Hülle werden bei der Simulation mit den Resultaten aus dem Aufheizversuch abgeglichen. Die Verluste über die Infiltration beinhalten auch die Verluste der Türöffnungen.

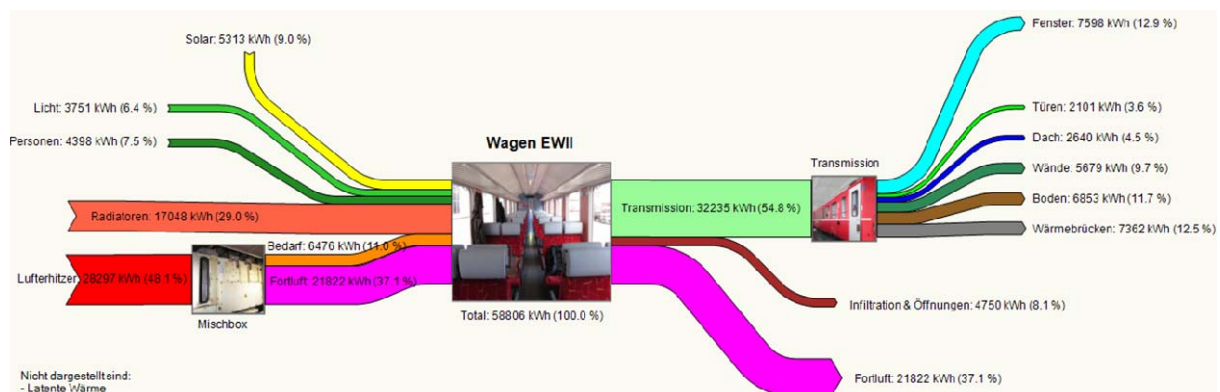


Abbildung 4: Energieflussdiagramm Jahressimulation 2011 des EW II (RhB)

Mögliche Massnahmen und Einsparpotential

Die Simulationen zeigen, dass das Energiesparpotential je nach Massnahme bis zu ca. 40% des Energieverbrauchs betragen kann.

Für den EW II der RhB werden insgesamt sieben verschiedene Massnahmen simuliert. Die in Abbildung 5 dargestellte Basisimulation bildet die Jahressimulation für das Jahr 2011 ab, welche dem Energieflussdiagramm entspricht.

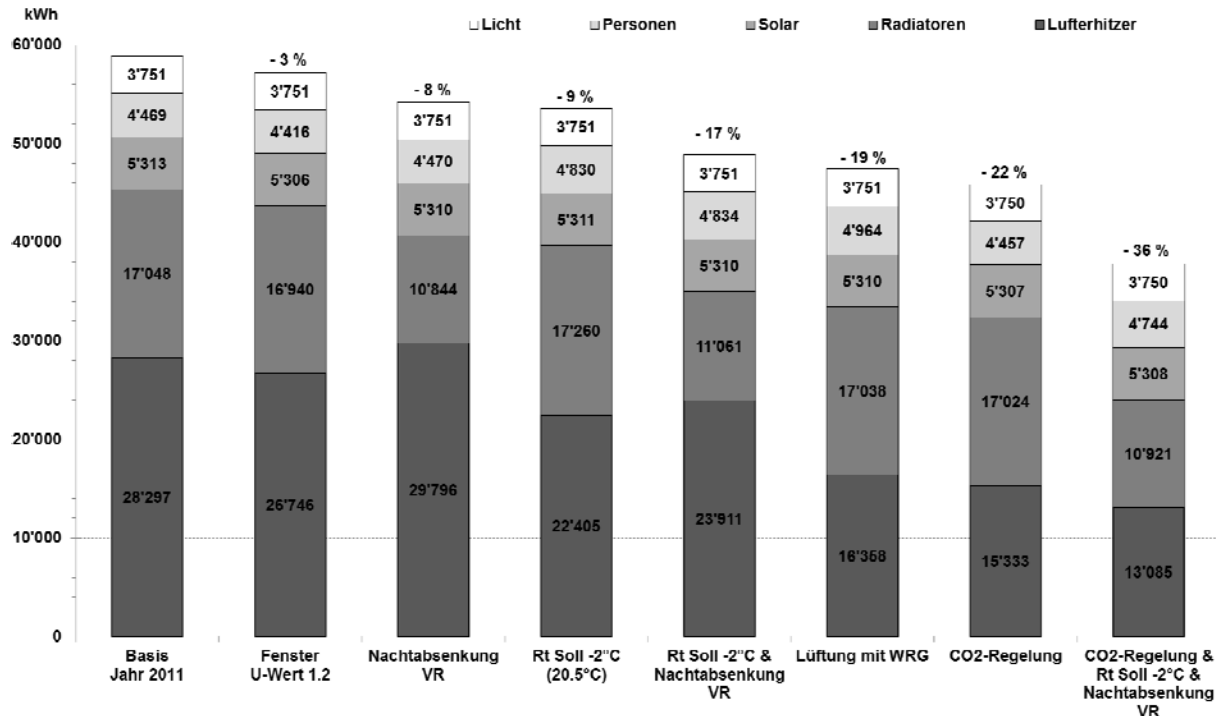


Abbildung 5: Energiebedarf jeweils nach Realisierung verschiedener Massnahmen für den EW II (RhB)

In der Basisvariante beträgt der U-Wert der Fenster 3.1 W/m²K. Bei der ersten simulierten Massnahme wird er auf 1.2 W/m²K reduziert. Diese Massnahme hat eine Reduktion der Energie um 3% zur Folge. Die Änderung der Energie durch Personen gegenüber der Basisvariante ist eine Folge des Simulationsmodells. Dies ist darauf zurück zu führen, dass sich die sensible Wärmeabgabe durch die Personen mit tiefer werdender Raumtemperatur erhöht.

Die Modellannahmen für die zusätzliche Nachtabenkung der Radiatoren im Vorraum sind analog zur Nachtabenkung im Fahrgastraum definiert. Es wird ein Frostschutz berücksichtigt. Bei dieser Variante beträgt die Einsparung der Energie gegenüber der Basisvariante bereits 8%.

Mit einer weiteren Massnahme wie der Absenkung der Raumlufttemperatur um 2 K von 22.5°C auf 20.5°C können 9% an Heizenergie eingespart werden. Die Solltemperatur kann beim EW II jedoch in einem bestimmten Temperaturbereich durch die Passagiere selbst eingestellt werden, was auf Wunsch des Bahnbetreibers beibehalten werden soll. Dadurch ist hier eine Umsetzung der Massnahme unmöglich.

Eine Kombination der Massnahmen mit der Raumtemperatur-Sollwertabsenkung um 2 K und einer zusätzliche Nachtabenkung im Vorraum reduziert den Energiebedarf um 17% gegenüber der Basisvariante. Dies entspricht beinahe der mit einer Wärmerückgewinnung bei der Lüftungsanlage erzielbaren Einsparung (19%). Bei der Wärmerückgewinnung wird der Frostschutz berücksichtigt, d.h. die minimale Fortlufttemperatur beträgt 1°C.

Noch mehr Potential als die Wärmerückgewinnung hat die bedarfsgerechte Regelung der Luftmenge in Abhängigkeit der CO₂-Konzentration. Die Regelung wird auf eine maximale CO₂-Konzentration von 1'000 ppm geregelt. Der Energiebedarf lässt sich so um 22% reduzieren. Dies ist die attraktivste Massnahme, da sie bei gleichzeitig grosser Energieeinsparung einfach umzusetzen ist. Es werden nur zusätzliche CO₂-Fühler inkl. Regler benötigt.

Kombiniert man nun die einzelnen Massnahmen wie die Reduktion der Luftmenge mittels bedarfsgerechter CO₂-Regelung mit der Raumtemperatur-Sollwertabsenkung um 2 K und mit einer zusätzliche Nachtabenkung im Vorraum, verringert sich der Energiebedarf rechnerisch um

36%, was mehr als 21'000 kWh pro Jahr und Wagen entspricht.

Diskussion

Mit den Aufheiz- und Tracergasmessungen konnte eine erfolgreiche Validierung des Modelles in den Punkten "thermische Masse", "Wärmedurchgang der Hülle" sowie "HLK-Technik" am stehenden Zug erzielt werden.

Die Simulationen ermöglichen Massnahmen am Fahrzeug sowohl energetisch als auch betreffend der Auswirkungen auf die Behaglichkeit im Fahrgastraum quantitativ zu beurteilen. Weiterführend kann so auch eine wirtschaftliche Beurteilung (Energie-Minder- oder Mehrverbrauch) abgeschätzt werden.

Die Massnahmenliste, welche in Zusammenarbeit mit den Bahngesellschaften hinsichtlich Potential, Einschränkungen und Risiken erstellt und beurteilt wird, zeigt, dass folgende Massnahmen ein grosses Potential aufweisen und mit vertretbarem Aufwand umsetzbar sind:

- Optimierung der Fenstergrösse (nur bei Neubeschaffung)
- Nachtabsenkung der Innenraumtemperatur
- Bedarfsgerechte Regelung der Luftmenge in Abhängigkeit der CO₂-Konzentration im Fahrgastraum
- Temperaturregelung und somit Absenkung des Raumtemperatur-Sollwerts

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Forschungsprojekt werden Massnahmen ausgearbeitet, um den Energieverbrauch der Heizung, Lüftung und Kühlung bei mindestens gleich bleibendem Komfort zu reduzieren. Hierzu werden Schienenfahrzeuge unterschiedlicher Betreiber in der Schweiz (SOB, RhB, BLS und SBB) im Detail ausgemessen und Simulationsmodelle erstellt.

Mit diesen Modellen können Optimierungsmassnahmen für die HLK-Technik und bei der Fahrzeughülle definiert und berechnet werden. Die Simulationen haben ergeben, dass vor allem die CO₂-Regelung kombiniert mit anderen Massnahmen eine beträchtliche Energieeinsparung zur Folge hat.

DANKSAGUNG

Das Projekt wird unterstützt von swisselectric research, dem Bundesamt für Energie BFE und dem Bundesamt für Verkehr BAV sowie durch Eigenleistungen der Projektpartner.

LITERATUR

Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz (BGIA). 2005

Maderspacher, J. 2012. Sensitivitäts und Unsicherheitsanalyse, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw CH.

Saltelli, A. et al. (2008). Global Sensitivity Analysis. The Primer, Chichester UK.

7.6. Energy Efficiency of Railway Vehicles

Nadège Vetterli, Prof. Urs-Peter Menti, Franz Sidler, Eveline Thaler, Prof. Gerhard Zweifel

CISBAT 2015

September 2015

ENERGY EFFICIENCY OF RAILWAY VEHICLES

Nadège Vetterli¹; Prof. U.P. Menti¹; F. Sidler¹; E. Thaler¹; Prof. G. Zweifel¹

1: Zentrum für Integrale Gebäudetechnik (ZIG), Technikumstrasse 21 CH-6048 Horw.

ABSTRACT

The railway vehicles in Switzerland consume, in addition to the traction energy, a high share of electricity for comfort purposes. About 20% to 40% of the electricity consumed by the vehicles is used for **h**eating, **v**entilation and **a**ir-conditioning (HVAC). The goal of this project was to optimise the HVAC system of the vehicle EWII of the Swiss Rhaetian Railway (RhB) to reduce overall energy consumption without any detrimental impact on passenger comfort.

The project was originally initiated by the Physics Department of the University of Basel with financial support from the Federal Office of Energy and the Federal Office of Transport. Over the last three years, six vehicles of four different railway companies were monitored by the University of Basel. The Center for Integral Building Technology of the Lucerne University of Applied Sciences and Arts (HSLU) has built up models of the rail vehicles in a simulation program and carried out additional measurements (heating-up experiments, air tightness measurements and thermographic imagery) in order to assess their energy demand and to calibrate the model. Once the models were calibrated, the optimisation measures for the HVAC system and the vehicle hardware of the EWII could be defined and calculated.

By means of simulations, the highest heat losses in the vehicles could be identified. Two substantial reasons for the high energy demand in rail vehicles turned out to be the poor insulation of the wagon envelope and the lack of heat recovery in the ventilation system. Both are challenging to improve due to on-board space requirements for additional systems as well as the high expenses. The most feasible measures identified to reduce the energy demand were the reduction of the outdoor air flow rate by means of CO₂ control or the temperature setback at night and during high occupation periods. Measures of this type are considerably easier to implement and, result in important energy savings, especially the CO₂ control when no heat recovery is installed in the ventilation unit.

Simulation results have shown a saving potential for heating demand as important as 40% for railway vehicles in case of the combined implementation of the measures, control of the air flow rate as a function of the CO₂ concentration, the reduction of the wagon temperature set point by 2K and the night setback of the vestibules. For the whole EWII fleet of the RhB this would represent a possible energy saving potential of about 840 MWh/a.

Keywords: railway vehicles, energy efficiency, heating demand of HVAC systems, CO₂-control, measurements, simulations.

INTRODUCTION

The passenger railway vehicles in Switzerland consume, in addition to the traction energy, a high share of electricity for comfort purposes. Relevant factors influencing this share are the thermal properties of the housing, the implemented controls and the operational parameters such as the distance of travel and the immobilisation time. Three years ago, a research project was initiated by the Physics Department of the University of Basel with the objective of improving the energy efficiency of HVAC systems in public transports. Several vehicles of

different railway companies were examined and a monitoring system was developed and placed in the train to measure temperature, heating and cooling energy, position (GPS) and meteorological data. The main objective was to define and quantify measures to reduce energy consumption of the HVAC without compromising the comfort quality for the passengers.

METHOD

The Center for Integral Building Technology of the Lucerne University of Applied Sciences and Arts (HSLU) has built up models of the rail vehicles in a simulation program. The following additional measurements were carried out in order to assess their energy demand and calibrate the models: heating-up experiments, air tightness measurements and thermographic imagery.

Heating-up experiment

The scope of the heating-up experiment was to define the active thermal mass and the heat coefficient of the vehicle housing. The vehicle was put in a railway depot with a constant ambient temperature and the inside heated up to about 40°C. The cool down behaviour of the vehicle was then analysed in order to extract the necessary information. Measurements of the heating-up experiment were used to correct the parameters such as thermal bridges or coefficients in the simulation model and calibrate the model up to the point of matching simulations results with data of the heating-up experiment.

Tracer gas measurements

Previous experiments had shown that the outdoor air flow rate of the ventilation system has a high impact on the accuracy of the simulation models of the vehicles. In order to assess precisely this variable, tracer gas measurements were performed. Basically, a room in the vehicle was filled up with a tracer gas, i.e. SF₆ until saturation was reached. The decay of concentration was then observed, when ventilation system was turned off. The decay is caused by either wall infiltration or by the supply of outside air through the ventilation system. Knowing the volume of the wagon and the gas concentration decay, the outdoor air flow rate can be calculated.

Internal heat gains

All internal heat sources need to be known as a function of time. In the case of railway vehicles, the gains from lighting and from people need to be considered. Heat flow of electronic devices used by the passengers can be neglected. Lighting in the wagons is always switched on during operation and was assumed to be constant. Passenger occupancy strongly varies during the day and was not available as measured values for the whole time. For this reason, the occupancy was calculated by means of the measured CO₂ concentration in the wagon and the outdoor supply flow rate of the ventilation. This consideration improved the accuracy of the simulation model a lot against the assumption of a constant number of people over the operation period.

Simulation models

The vehicles were modelled and simulated in the software program IDA ICE. This software originates from the building sector and is widely used in research and engineering applications. The input data to the model consist in the geometrical and physical properties of the wagon, (especially the housing), the HVAC equipment including its control, the internal heat gains and the outside climate (temperature, solar irradiation and wind). The final model

was calibrated with the help of the long term measurements by the University of Basel in combination with the stationary heating-up and tracer gas measurements and passenger countings. Once the models were calibrated, the optimisation measures for the HVAC units and the vehicle hardware could be defined and the highest energy saving potential in the vehicles could be identified.

Definition of Measures

In a first step, the energy flow diagram was generated. Ideas on how to optimise the wagon envelope and the operation of the HVAC system were gathered and evaluated in collaboration with the railway companies (Figure 1). The analysed measures were assigned to three categories: envelope, HVAC and operation. The measures were examined according to their energy saving potential and to the expenditure needed to implement the measures on an existing vehicle. The measures were classified into three levels, low, medium and high according to their expenditure. The lowest expenditure represents measures with small adjustments such as control and regulation of the HVAC systems. These measures can rapidly be implemented and are cost-efficient. Measures with medium expenditure affect additional or different HVAC components. The third category with the highest expenditure concerns the improvement of the opaque and transparent parts of the envelope.

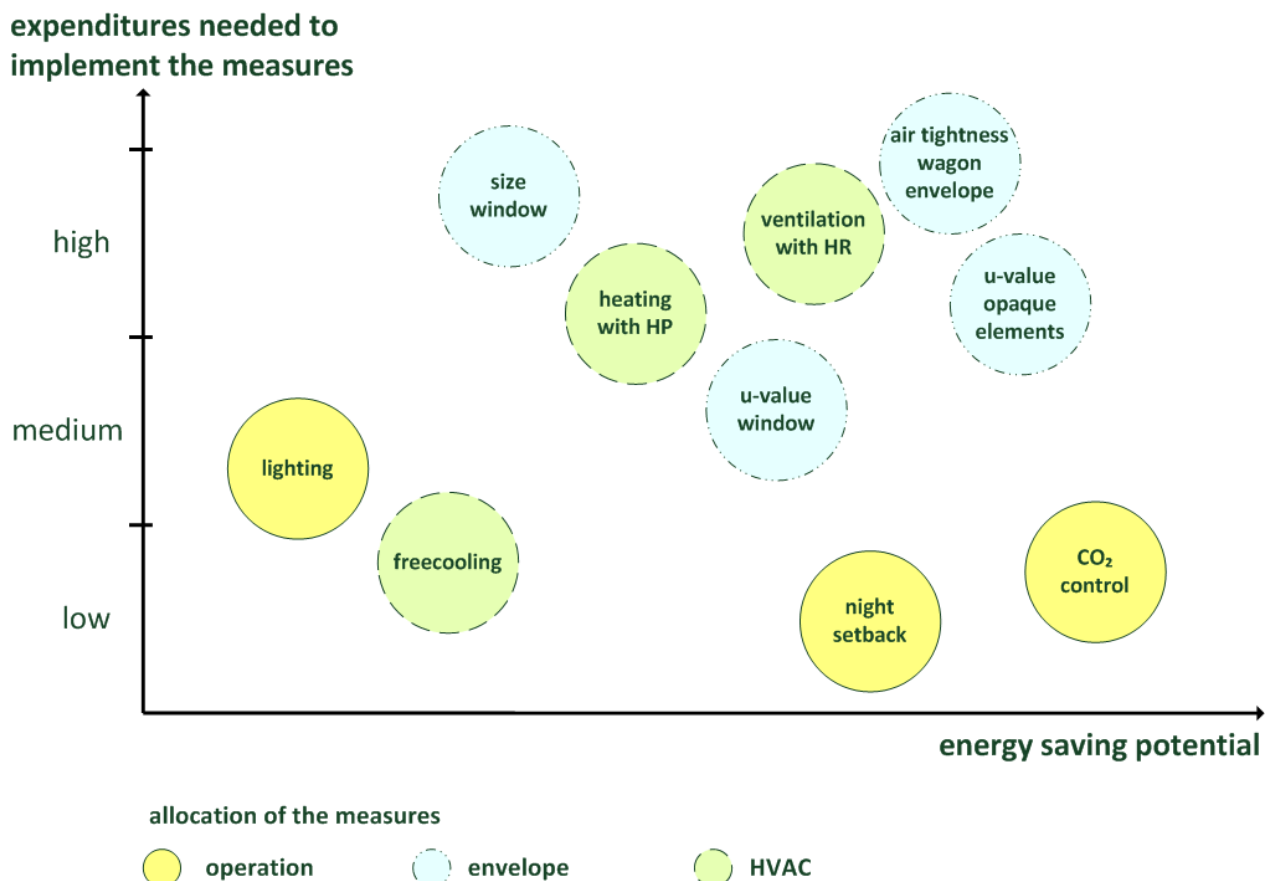


Figure 1: Qualitative cost-benefit assessment for the different measures (the assessment was performed by railway experts).

In a second step, defined measures were tested on the model of a specific wagon, the EWII of the Swiss Rhaetian Railway (RhB), and their energy saving potential was assessed.

RESULTS

Energy flow diagram

The energy flow diagram in Figure 2 shows the energy balance of the EWII of the Swiss Rhaetian Railway (RhB) on the base of the climatic data of the year 2011, i.e. the total heat gains (on the left) and heat losses (on the right) of the wagon for comfort purposes without considering the traction energy. “Solar” stands for solar heat gains through windows, “Light” the heat gains from lighting and “People” for heat gains from the passengers. The passenger room is conditioned by heating of the ventilation supply air, whereas the vestibules at the entrances are heated by radiators. The radiators have a three-stage manual control without temperature sensor. For this reason, the effective heat input of the radiators lead to a high uncertainty in the simulations.

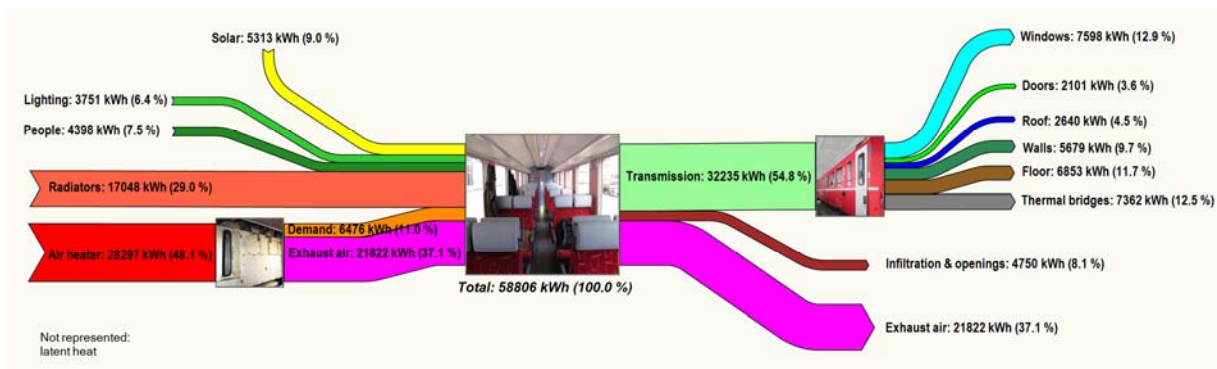


Figure 2: Energy flow diagram of the EW II (RhB) based on the simulations.

The results show that 55% of the heat losses are going through the envelope of the wagon (transmission losses) and 37% through the exhaust air of the ventilation system. Infiltration (incl. door openings) are responsible for 8% of the total heat losses. This shows that two substantial reasons for the high energy demand are the poor insulation of the wagon itself and the high outdoor air flow rate with a lacking heat recovery of the ventilation system. Not represented in figure 2 is the energy saving potential due to the reduction of the internal temperature set point and to the reduced operation times, inducing a proportional reduction of the energy flows.

Possible measures with their energy saving potential

A total of seven different measures were simulated for the EW II and the energy saving potential of each measure is shown in Figure 3. The five options represented on the left side are single measures (not cumulated), whereas the two options on the right side are a combination of left hand measures. Since the heat gains from lightning, people and solar irradiation are identical in all options, only the heat demand of the radiators and air heaters are represented.

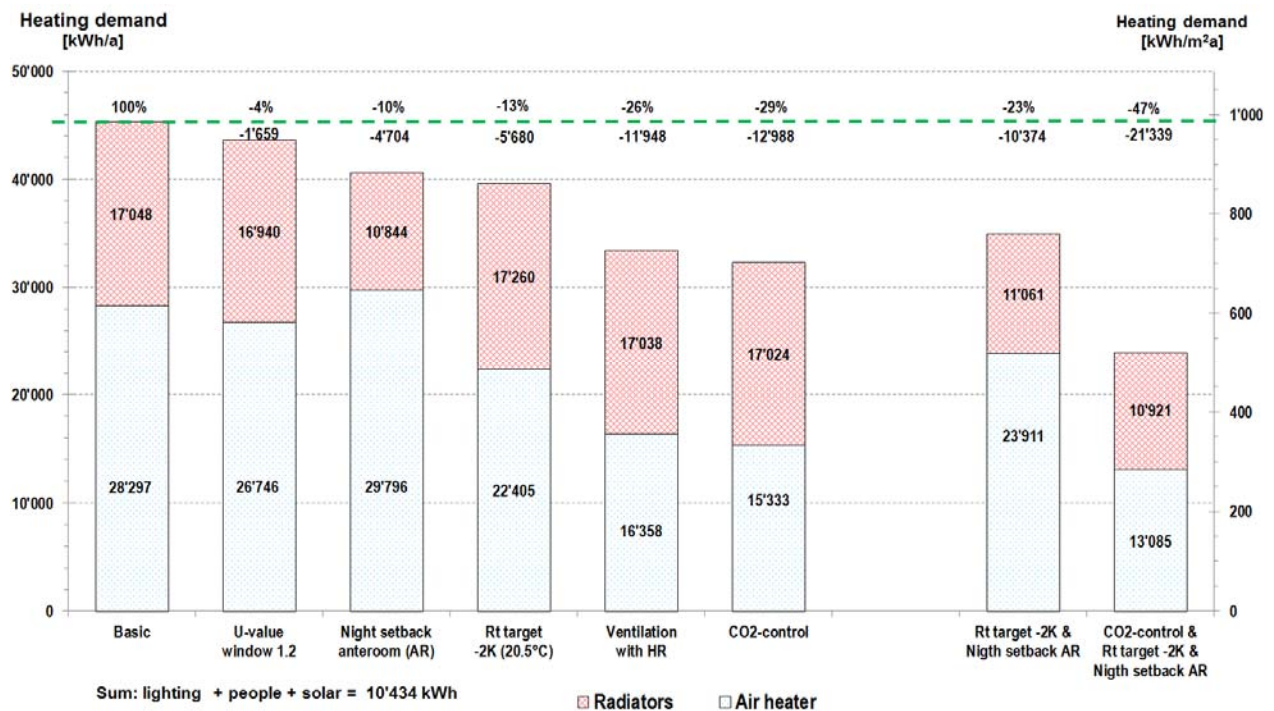


Figure 3: Heating demand of the EW II (RhB) after implementing different measures. The five options represented on the left side are single measures (not cumulated), whereas the two options on the right side are combined measures.

In the basic case, the U-value of the windows equals $3.1 \text{ W/m}^2\text{K}$. In the first option, this was reduced to $1.2 \text{ W/m}^2\text{K}$. This measure results in a 4% reduction of the heating demand.

In the second option, the air temperature of the two vestibules is reduced the same way (night set back) as in the passenger room. An anti-freeze protection to a set point of 6°C is assumed. This measure saves up to 10% of the heating demand.

The reduction of the indoor air temperature in the wagon from 22.5°C to 20.5°C (option 3) reduces the heating demand by 13%.

Another possibility to diminish heating demand is to implement a heat recovery (HR) in the ventilation system. The antifreeze protection for the HR was considered by limiting the exhaust air temperature to 1°C . The installation of a heat recovery system would allow 11'948 kWh or 26% of the heating demand to be saved.

The demand control of the outdoor air flow rate as a function of the CO_2 concentration (option 5) has shown even a slightly higher potential than the HR system. The set point has been set to a maximum of 1'000 ppm CO_2 concentration. This way, the heating demand can be reduced by around 29%.

The heating demand can be reduced further if more than one measure is implemented. The combination of the reduction of the wagon temperature by 2 K (option 2) and the night setback of the vestibules (option 3) can reduce heating demand by 23%.

If these two measures are combined with the CO_2 control of the air flow rate (option 5), the heating demand can be reduced by 47%, which corresponds to a saving potential of 21'000 kWh per year.

DISCUSSION

By means of a heating-up experiment and tracer gas measurements, a simulation model that reproduces the thermal mass, the heat losses through the envelope and the HVAC system of trains could be built up and validated. The heat demand of the specific railway vehicle (EWII of the RhB) could be represented and several improvement measures could be simulated.

The results have shown that the single measure which reduces the most the heating demand (-29%) is the demand control of the outdoor air flow rate as a function of the CO₂ concentration. This can be implemented at relative low expenses by integrating CO₂ sensors and a fan speed control in the ventilation system. The installation of a heat recovery in the ventilation system has fairly the same reduction potential as the CO₂ control, but leads to much higher expenses, since it requires the installation of additional components, which is difficult on existing wagons due to shortage of space. The improvement of the envelope insulation was not further analysed since this measure is only feasible in a total revision of the wagon. This measure is costly and requires space inside the wagon, which is hardly available.

By the simulations it could be shown that the simultaneous implementation of three relative easy and cost-effective measures in the wagon (the CO₂ control of the air flow rate, the reduction of the wagon temperature by 2K and the night setback in the vestibules), can reduce the heating energy demand by more than 40%. The implementation of these measures to all 40 EWII wagons of the RhB in operation would reduce their annual heating energy consumption by 840 MWh. The annual electricity consumption of the entire SBB passenger fleet is about 1'200 GWh [4]. Assuming that about 20% of this energy is used for the HVAC system, and 30% of it can be saved by the presented measures, about 70 GWh of electric energy could be saved annually for the SBB passenger fleet.

There are several other types of public transportation vehicles like buses, trams, air planes or ships, which presumably present a great energy saving potential for their comfort installations. These will also have great importance in future electric cars, since the heating and cooling demand highly affects the distance range of the vehicle. By means of thermal simulations, it is possible to calculate the energy demand of the comfort facilities of these transportation vehicles in detail and to assess different energy efficiency measures.

ACKNOWLEDGEMENT

This project is supported by swisselectric research, the Swiss Federal Office of Energy (SFOE), the Federal Office of Transport (FOT) as well as by personal contribution of the involved project partners.

REFERENCES

1. Sidler F. et al.: Energieeffiziente HLK-Technik bei Schienenfahrzeugen, brenet Status-Seminar Zürich, September 2014
2. Wellstein J.: Komfort in Zügen braucht Energie, energieRundschau, September 2012
3. Brunner U. C. et al.: Energiesparen bei Reisezugwagen, Messungen am erneuerten B 20-73 - Bericht 5, BFE, März 2000
4. Oral communication by Mr. Tuchschnied from SBB