

## **ENERGIEEFFIZIENZ VON HEIZUNG, LÜFTUNG UND KÜHLUNG IM ÖFFENTLICHEN VERKEHR**

Franz Sidler<sup>1</sup>, Dominic Jurt<sup>1</sup>, Urs-Peter Menti<sup>1</sup>, Eveline Thaler<sup>1</sup> und Peter Oelhafen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Horw, Schweiz

<sup>2</sup>Universität 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 CO<sub>2</sub>-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)

## 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. SF<sub>6</sub> 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 Simulationsmodelles 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.

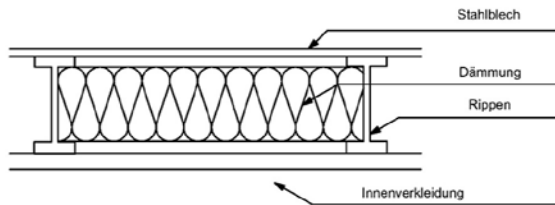


Abbildung 1: Aufbau der Hülle (vereinfacht dargestellt)

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 Kühlleistung 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 Personenzahl anhand des gemessenen  $\text{CO}_2$ -Wertes an. Das ist sicher eine Verbesserung gegenüber der Annahme einer konstanten Personenzahl über die gesamte Betriebszeit.

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

$$N_{\text{pers}} = \frac{(p_i - p_a) \cdot L \cdot V \cdot p_{\text{CO}_2}}{\dot{m}} \quad (1)$$

$N_{\text{pers}}$  Anzahl Personen im Raum

$p_i$   $\text{CO}_2$ -Konzentration innen (gemessen) [ppm]

$p_a$   $\text{CO}_2$ -Konzentration Umgebung [ppm]

$L$  Luftwechselrate [1/h]

$V$  Raumvolumen [ $\text{m}^3$ ]

$p_{\text{CO}_2}$  Dichte  $\text{CO}_2$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\dot{m}$   $\text{CO}_2$ -Emission pro Person [mg/h]

Die Parameter  $V$  und  $\rho_{\text{CO}_2}$  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  $\sigma$  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. $\sigma$ [%]	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 <sup>2</sup> K)
Energiedurchlassgrad Fenster	7.5	---
Delta Aussentemperatur	0.75	°C
Legende: ang. $\sigma$ – 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  $\pm 8.6\%$ .

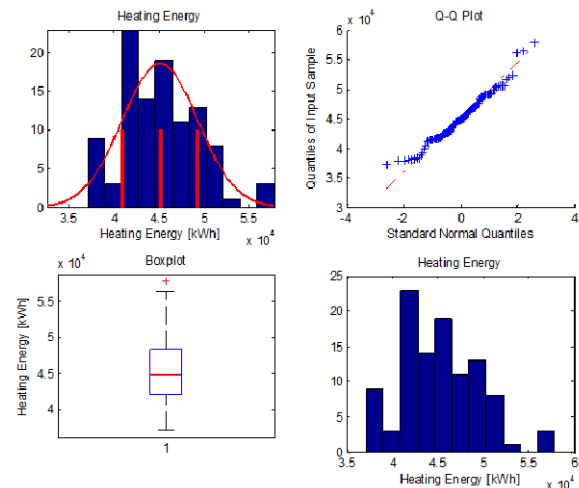


Abbildung 2: Unsicherheit der Heizenergie des EW II

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.

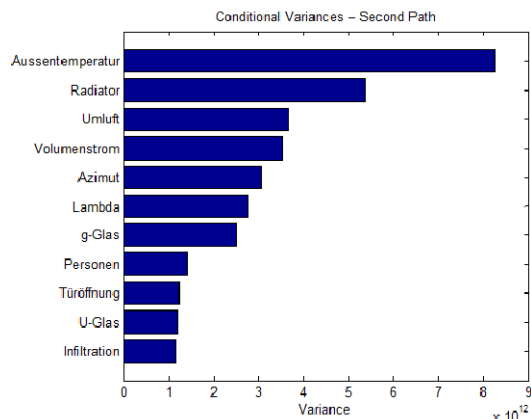


Abbildung 3: Rangliste der Sensitivität beim EW II

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  $9.6^\circ\text{C}$  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.

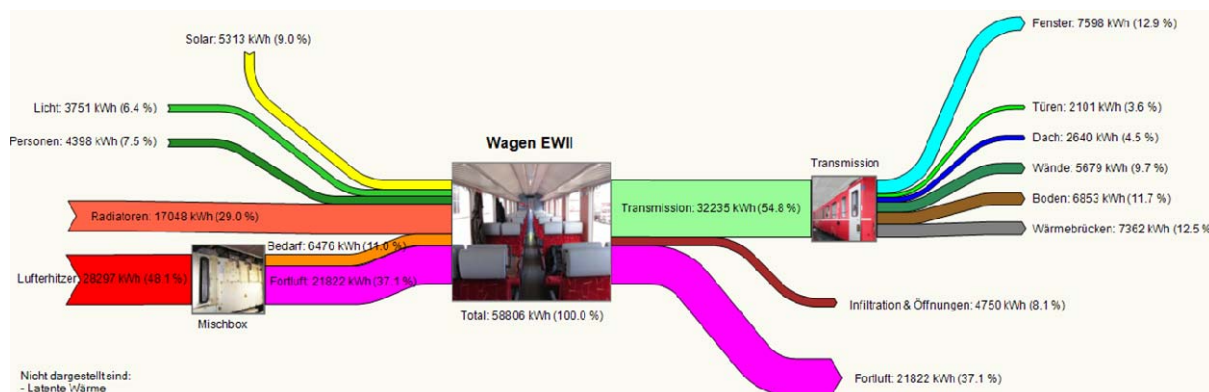


Abbildung 4: Energieflussdiagramm Jahressimulation 2011 des EW II (RhB)

### 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 Basissimulation bildet die Jahressimulation für das Jahr 2011 ab, welche dem Energieflussdiagramm entspricht.

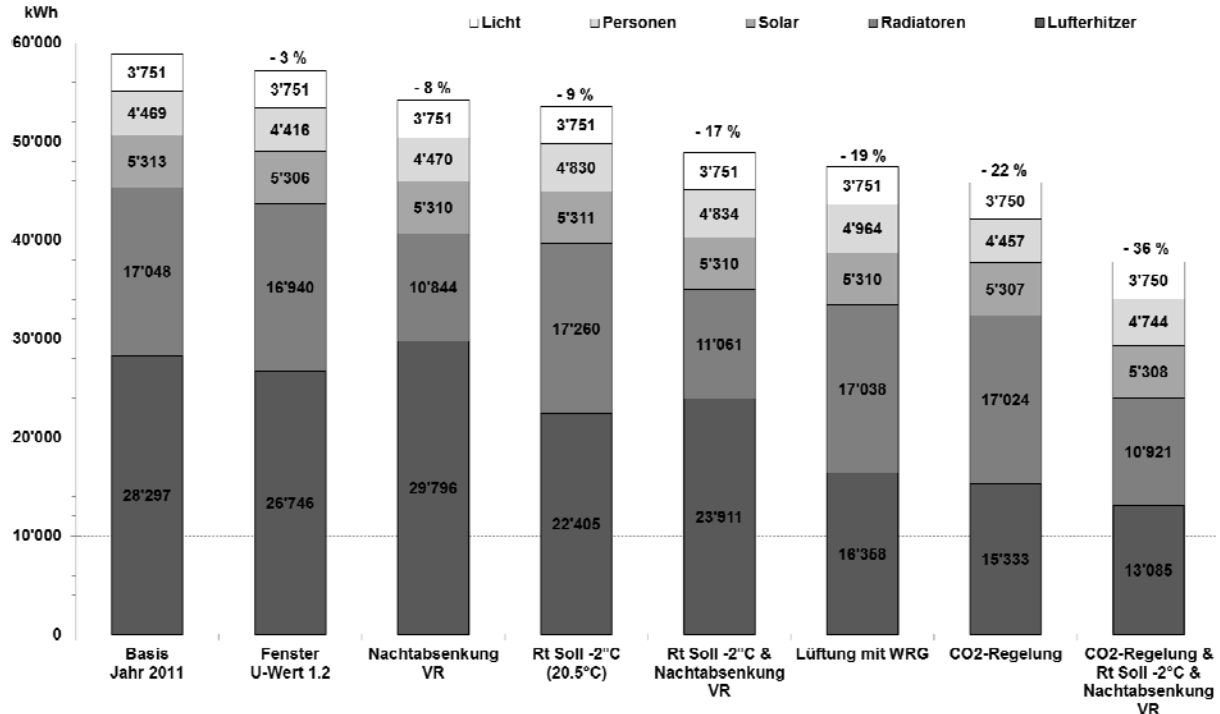


Abbildung 5: Energiebedarf jeweils nach Realisierung verschiedener Massnahmen für den EW II (RhB)

In der Basisvariante beträgt der U-Wert der Fenster 3.1 W/m<sup>2</sup>K. Bei der ersten simulierten Massnahme wird er auf 1.2 W/m<sup>2</sup>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 Nachtabsenkung der Radiatoren im Vorraum sind analog zur Nachtabsenkung 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 Nachtabsenkung 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 CO<sub>2</sub>-Konzentration. Die Regelung wird auf eine maximale CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Fühler inkl. Regler benötigt.

Kombiniert man nun die einzelnen Massnahmen wie die Reduktion der Luftmenge mittels bedarfsgerechter CO<sub>2</sub>-Regelung mit der Raumtemperatur-Sollwertabsenkung um 2 K und mit einer zusätzliche Nachtabsenkung 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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.