

Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung (HLK) im öffentlichen Verkehr

Franz Sidler¹, Urs-Peter Menti¹, Eveline Thaler¹,

¹ Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Technikumstrasse 21, CH-6048 Horw,
franz.sidler@hslu.ch, +41 41 349 33 77, www.hslu.ch/zig
urs-peter.menti@hslu.ch, +41 41 349 33 17, www.hslu.ch/zig
eveline.thaler@hslu.ch, +41 41 349 34 38, www.hslu.ch/zig

Kurzfassung: In Schienenfahrzeugen und Trolleybussen werden zwischen 20% und 40% der Energie für Heizen, Lüften und Kühlen (HLK) verbraucht. Während bei der Traktion trotz grosser Bestrebungen nur noch vergleichsweise geringe Effizienzfortschritte möglich sind, wurden im Bereich der HLK grosse und gleichzeitig einfach realisierbare Potenziale vermutet. Im Forschungsprojekt wurden Massnahmen ausgearbeitet, um diesen Energieverbrauch bei mindestens gleich bleibendem Komfort zu reduzieren.

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

Mit den kalibrierten Simulationsmodellen konnten Optimierungsmassnahmen für die HLK-Technik und der Fahrzeughülle definiert und Einsparpotenziale berechnet werden. Die Simulationen zeigten, dass das Energiesparpotential im Regionalverkehr bis zu ca. 40% des Energieverbrauchs betragen kann. Im Fernverkehr ist das Einsparpotenzial unter anderem aufgrund der längeren Einsatzzeiten geringer.

Keywords: Schienenfahrzeuge, Energieeffizienz, Heizen, Lüften, Kühlen

1 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. Für den Energieverbrauch 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 vier 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.

Insgesamt wurden folgende Fahrzeuge analysiert: NINA (BLS), EW II (RhB), EW IV (RhB, ohne Simulation), Pano GEX (RhB, ohne Simulation), Flirt (SOB), ICN (SBB) und Swisstrolley 4 (tl, ohne Simulation).

2 Methodik

In einer ersten Phase wurde von der Universität Basel ein Messsystem zur Erfassung der Raumlufttemperaturen, der Heiz- und Kühlenergie, der Klimadaten (z.B. solare Einstrahlung) und der GPS-Daten entwickelt und in verschiedenen Zügen eingebaut. Damit standen für einzelne Wagen detaillierte Daten zum Energieverbrauch zur Verfügung, z.T. über mehrere Jahre. Zusätzlich zu diesen Messungen wurden durch die Hochschule Luzern weitere Messungen z.B. Aufheiz- und Auskühlverhalten sowie Tracergasmessungen und Thermographieaufnahmen durchgeführt.

Simulationsmodelle für einen kompletten Wagen bzw. für eine ganze Zugseinheit der verschiedenen untersuchten Züge wurden in der zweiten Phase erstellt. Mit den kalibrierten und validierten Simulationsmodellen konnten einerseits die Einsparpotenziale einzelner Optimierungsmassnahmen oder verschiedener Kombinationen von Massnahmen für die HLK-Technik, insbesondere bei der Lüftung, und bei der Fahrzeughülle definiert und berechnet werden. Andererseits konnten dank den Simulationen schnell und einfach Variantenstudien durchgeführt werden. Simulationen lassen detaillierte Prognosen zu, mit welchen Massnahmen der Energieverbrauch und der Komfort für die Fahrgäste wie verändert werden kann.

2.1 Aufheizversuch

Ziel des Aufheizversuchs war die Berechnung des mittleren U-Wertes, die 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 Raumlufttemperatur im Fahrgastraum aufgezeichnet, um daraus die entsprechenden fahrzeugspezifischen Informationen zu ermitteln.

2.2 Tracergasmessung

Vorgängige Untersuchungen zeigten, dass die Variable "Aussenluftanteil" der Lüftungsanlage einen sehr hohen Einfluss auf die Genauigkeit des thermischen Simulationsmodells von Fahrzeugen hat. Zur Ermittlung dieser fahrzeugspezifischen Variablen wurden Tracergasmessungen durchgeführt. Dazu wurde das Zugabteil mit einem Gas (hier: SF₆) solange befüllt, bis eine Sättigung der Konzentration erreicht wurde. Anschliessend wurde die Zuführung des Gases gestoppt und das Abklingen der Konzentration konnte aufgezeichnet werden. Das Abklingen kann durch Infiltration oder durch die Zufuhr von Aussenluft durch die Lüftungsanlage verursacht werden. Mit dem bekannten Wagenvolumen und dem Verlauf der Gaskonzentration bei ausgeschalteter Lüftung konnte der Aussenluftvolumenstrom berechnet werden.

2.3 Thermographieaufnahmen

Fahrzeughüllen sind aus thermischer Sicht sehr komplex und der Wärmedurchgang ist über die Hülle sehr un stetig verteilt (inhomogene Bauteile, 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 wurden die Aufnahmen erstellt. So war gewährleistet, dass die ganze Zugskomposition gleichmässig aufgeheizt war und externe Einflüsse bestmöglich ausgeschlossen werden konnten.

2.4 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. Die ausgelesenen Daten wurden für die Verwendung im Simulationsprogramm zeitlich synchronisiert. Für die Simulation wurden die Strahlungswerte getrennt in Direkt- und Diffusstrahlung benötigt. Da am Wagen nur die Globalstrahlung gemessen wurde, musste ein Rechenmodell zur Strahlungsumrechnung erstellt werden.

2.5 Simulation

Die Fahrzeuge wurden als Computermodell mit der Software IDA ICE (Indoor Climate and Energy) der Firma EQUA erstellt und simuliert. Die Software stammt aus dem Gebäudebereich und findet heute in Forschung und Engineering breite Anwendung. Zu den Eingabedaten für das Computermodell gehörten 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 in Kombination mit den durchgeführten stationären Messungen (Aufheizen und Tracergasmessung) und Personenzählungen kalibriert.

2.5.1 Modellbildung

Als erster Schritt wurde der Aufbau und die Konstruktion der Fahrzeughülle in IDA ICE implementiert. Im Simulationsmodell wurde die Konstruktion der Hülle vereinfacht mittels eines Verlustkoeffizienten (ermittelt aus der Messung des Aufheiz- und Auskühlverhaltens) angenommen. Die HLK-Technik der simulierten Züge besteht grundsätzlich aus maximal drei Komponenten: einer Luftbehandlungseinheit in der Zwischendecke, einer Kälteerzeugung auf dem Dach und einem Abluftventilator. Sämtliche relevanten Komponenten werden im Simulationsmodell berücksichtigt.

2.5.2 Grundlagen für die Modellbildung des EW II

Die für die Simulation des EW II (RhB) verwendeten Grundlagen sind in der Tabelle 1 aufgelistet. Die Luftmengen sind im HLK-System in Abbildung 1 aufgeführt. Der EW II verfügt über eine Luftheizung ohne Kühlung.

Baujahr	1977, Refit 2005
Abmessungen	Länge 17.7 m, Breite 2.6 m
Flächen	Boden 46 m ² , Hülle 182 m ² , Fenster 18 m ²
Volumen	88 m ³ (netto)
Personen	54 Sitzplätze
Luftmengen	max. Luftwechsel 13 (1/h), Volumen pro Person 11 m ³ /h
HLK-System	Luftheizung im Abteil, Radiatoren im WC & Vorraum

Tabelle 1 Grundlagen EW II

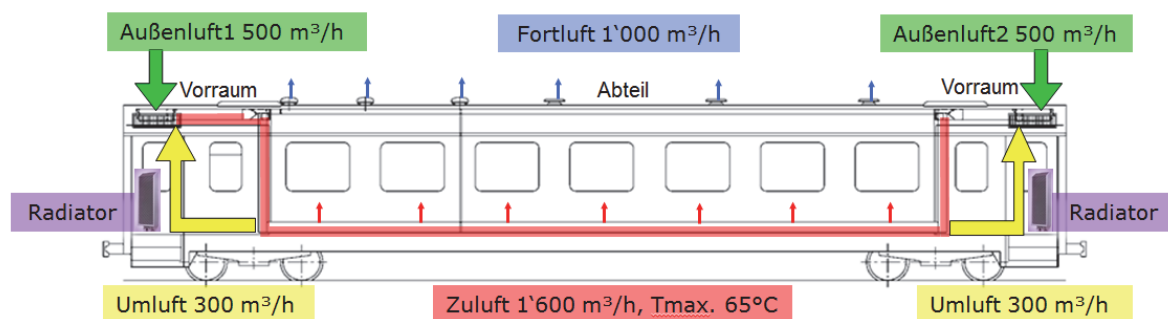


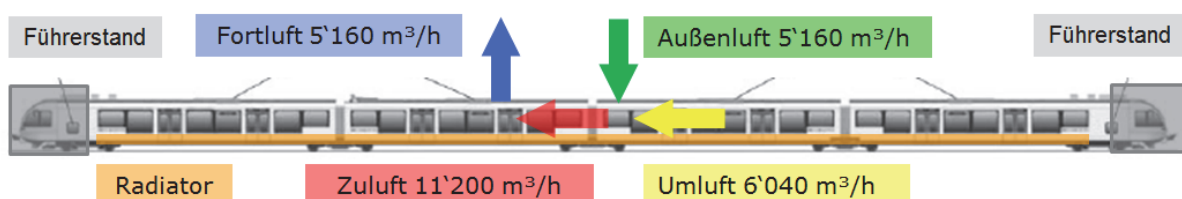
Abbildung 1 HLK-System mit Luftmengen, EW II

2.5.3 Grundlagen für die Modellbildung des Flirt

Die für die Simulation des Flirt (SOB) verwendeten Grundlagen sind in der Tabelle 2 aufgelistet. Die Luftmengen des HLK-Systems sind in Abbildung 2 aufgeführt. Der Flirt verfügt im Gegensatz zum älteren EW II über eine Kühlung.

Baujahr	2007
Abmessungen	Länge 63.1 m, Breite 2.6 m
Flächen	Boden 164 m ² , Hülle 670 m ² , Fenster 134 m ²
Volumen	410 m ³ (netto)
Personen	455 (212 Sitzplätze, 243 Stehplätze)
Luftmengen	max. Luftwechsel 13 (1/h), Volumen pro Person 11 m ³ /h
HLK-System	Radiatoren; Luftheizung & Kühlung kombiniert

Tabelle 2 Grundlagen Flirt



Luftmengen bei TA = 20 °C mit voller Belegung

Abbildung 2 HLK-System mit Luftmengen, Flirt

2.6 Personenzählung und interne Wärmequellen

Um das Simulationsmodell weiter zu verfeinern, war es notwendig, alle internen Wärmequellen detailliert als Verlauf über die Zeit zu kennen. Im Fall der Schienenfahrzeuge sind primär die internen Lasten der Beleuchtung und der Personen massgebend und wurden im Simulationsmodell integriert. Die von den Personen verwendeten elektronischen Geräte wurden vernachlässigt.

Die Personenbelegung ist kein konstanter Wert und lag auch nicht als Messwert vor. Der Grund dafür war, dass je nach Fahrzeug gar keine Messinstrumente vorhanden waren oder es für die Betreiber sehr aufwendig war, die Datensätze aus dem System auszulesen.

Als Alternative bot sich die Abschätzung der jeweils mitfahrenden Personenzahl anhand des gemessenen CO₂-Wertes an. Das ist eine Verbesserung gegenüber der Annahme eines typischen Profils der Personenbelegung über den Tag.

Die Personenanzahl liess sich theoretisch über das folgende mathematisches Modell [BGIA, 2005] herleiten:

$$N_{pers} = \frac{(p_i - p_a) * L * V * \rho_{CO_2}}{\dot{m}}$$

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]

Die Parameter V und ρ_{CO_2} waren für jede Zugkomposition bestimmbar und p_i war aus der Messung bekannt. Die restlichen Werte sind Modellparameter, welche für jede Zugkomposition kalibriert werden mussten. Die Kalibrierung der Personenbelegung erfolgte je nach Fahrzeug entweder mit einer manuellen Zählung direkt im Fahrgastraum oder sofern verfügbar mit den Daten aus dem System der Betreiber.

2.7 Definition der Massnahmen

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

Eine dieser Massnahmen ist die Nachtab senkung. Dabei wird bei der Zugkomposition am Abend wenn sie abgestellt wird, die Raumsolltemperatur auf ein Frostschutzniveau von 6 – 8°C abgesenkt.

3 Resultate

Anhand der Messdaten des Aufheizversuchs und der Tracergasmessung wurden im Simulationsmodell die Wärmebrücken, die Masse der Tragkonstruktion sowie des Innenausbaus

und die Infiltration so verfeinert, bis sich die Simulationsergebnisse mit den Daten des Aufheizversuchs in Abbildung 3 deckten.

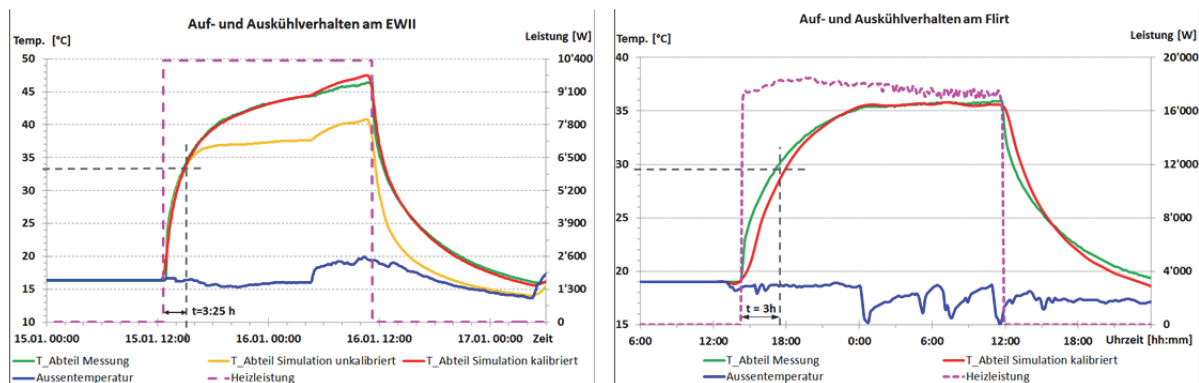


Abbildung 3 Vergleich Raumtemperatur Messung Aufheizen / Auskühlen und Simulation am EWII und Flirt

3.1 Ergebnisse EW II

3.1.1 Energieflussdiagramm EW II

In Abbildung 4 sind die thermischen 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 passiv solaren Wärmeeintrag durch die Verglasung, "Licht" für den Wärmeeintrag durch die Beleuchtung, "Personen" für den Wärmeeintrag durch die Personen. Von der zugeführten Wärme werden 55% für die Beheizung des Fahrgastraumes benötigt, 37% werden mit der Fortluft wieder nach aussen abgegeben.

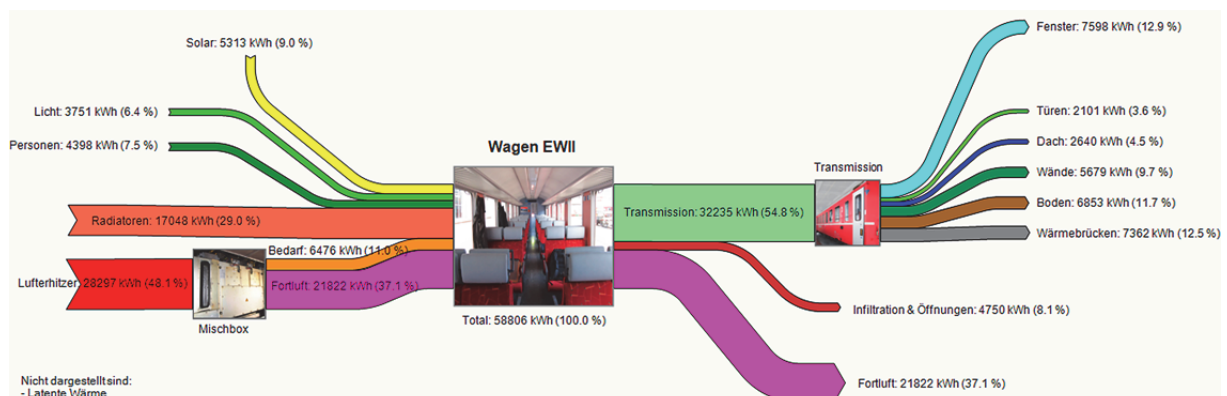


Abbildung 4 Energieflussdiagramm Jahressimulation 2011 des EW II

3.1.2 Mögliche Massnahmen und deren Einsparpotential am EW II

Die Simulationen zeigen, dass das Energiesparpotential je nach Massnahmen mehr als 40% des Energieverbrauchs betragen kann.

Für den EW II wurden insgesamt sieben verschiedene Massnahmen simuliert. Die in Abbildung 5 dargestellte Basissimulation ist eine Jahressimulation für das Jahr 2011, welche auch Basis für das Energieflussdiagramm in Abbildung 4 ist.

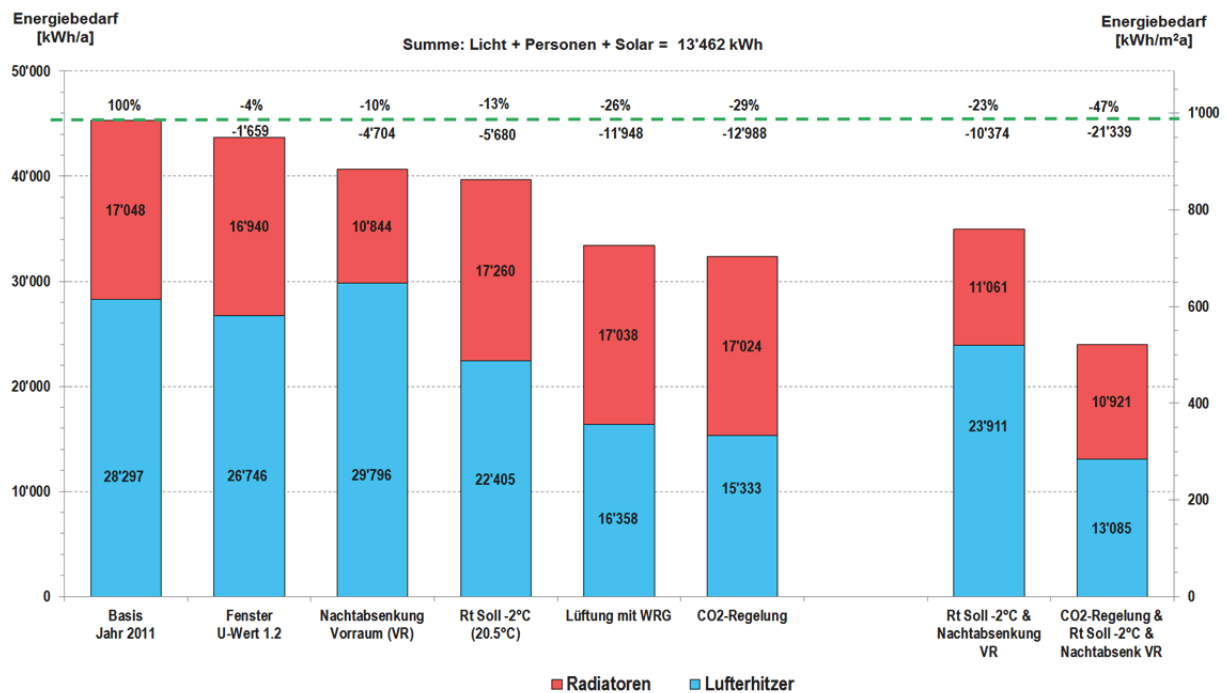


Abbildung 5 Energiebedarf Basisvariante und nach Realisierung verschiedener Massnahmen für den EW II

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 4% zur Folge.

Eine Nachtabsenkung der Radiatoren im Vorraum wurde analog zur Nachtabsenkung im Fahrgastraum definiert. Dabei wird der Frostschutz wie im Fahrgastraum berücksichtigt. Bei dieser Variante beträgt die Energieeinsparung gegenüber der Basisvariante 10%.

Mit der Absenkung der Soll-Raumlufttemperatur um 2 K von 22.5°C auf 20.5°C können 13% 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 zusätzlichen Nachtabsenkung im Vorraum reduziert den Energiebedarf um 23% gegenüber der Basisvariante. Dies entspricht beinahe der mit einer Wärmerückgewinnung bei der Lüftungsanlage erzielbaren Einsparung von 26%. 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 Aussenluftmenge in Abhängigkeit der CO₂-Konzentration im Fahrgastraum. Die Regelung wird auf eine maximale CO₂-Konzentration von 1'000 ppm eingestellt. Der Energiebedarf lässt sich so um 29% reduzieren. Dies ist die attraktivste Einzelmassnahme, 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 47%, was mehr als 21'000 kWh pro Jahr und Wagen entspricht.

3.2 Ergebnisse Flirt

3.2.1 Energieflussdiagramm Flirt

In Abbildung 6 sind die Energieflüsse für ein Jahr für den Flirt dargestellt. Auch dieses Simulationsmodell wurde mit dem Aufheizversuch kalibriert.

Die Transmissionsverluste über die Hülle betragen 68 MWh (50%) von der zugeführten Wärme 136 MWh. Da der Zug keine WRG hat, werden 38% der Energie über das Dach mit der Fortluft wieder nach aussen abgeführt. Der Verlust der Infiltration beträgt 8% und beinhaltet auch die Verluste der Türöffnungen.

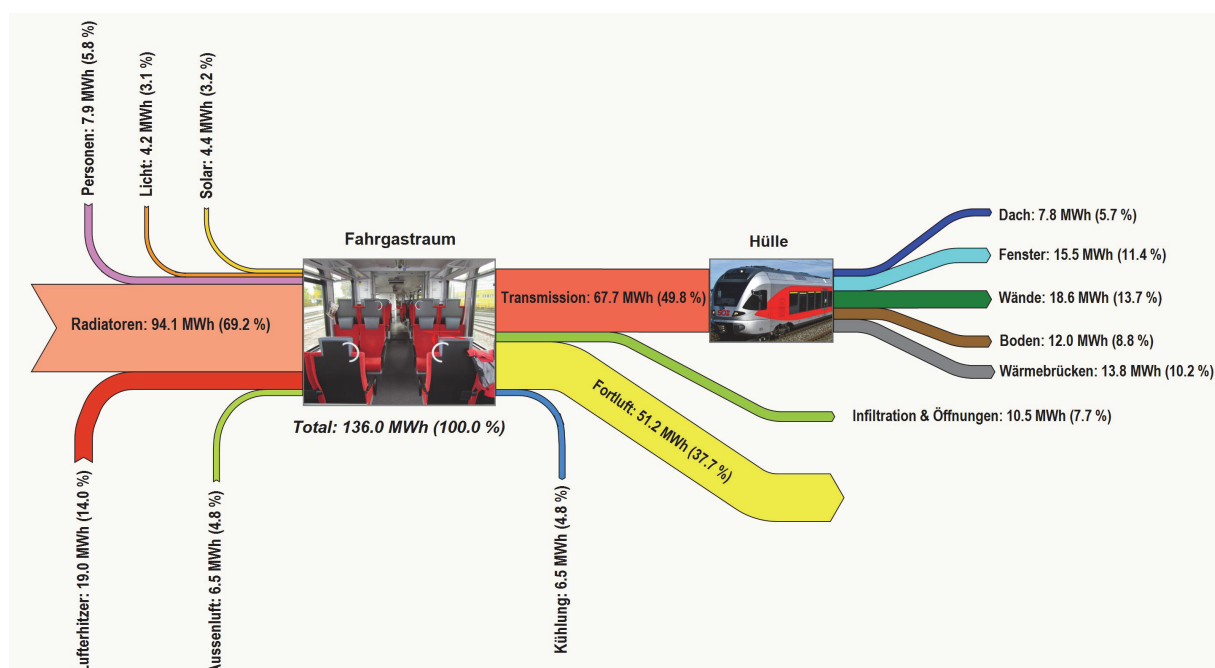


Abbildung 6 Energieflussdiagramm Jahressimulation 2014/2015 des Flirt

3.2.2 Mögliche Massnahmen und deren Einsparpotential am Flirt

Die Simulationen zeigten, dass das Energiesparpotential in Abbildung 7 auch beim neueren Triebzug Flirt je nach Massnahme bis zu ca. 36% des Energieverbrauchs betragen kann.

Die Erhöhung des g-Wertes der Verglasung von 0.25 auf 0.6 wirkt sich nicht signifikant auf den Energieverbrauch aus. 5.8% der Energie können eingespart werden, wenn ein gleichzeitiges Kühlen und Heizen im Zug verhindert wird, indem die Heiz- und Kühlkurven im Übergangsbereich einen grösseren Abstand erhalten. Mit einer Verbesserung der Wärmedämmung der opaken Hülle durch eine Halbierung der U-Werte können 15% Energie eingespart werden. Mit dem Einsatz einer Wärmerückgewinnung (WRG) oder einer bedarfsgerechten CO₂-Regelung der Aussenluftmenge können rund 28% eingespart werden.

Durch die Kombination der beiden Massnahmen WRG und CO₂-Regelung der Aussenluft können 36% oder 43 MWh pro Jahr und Fahrzeug eingespart werden.

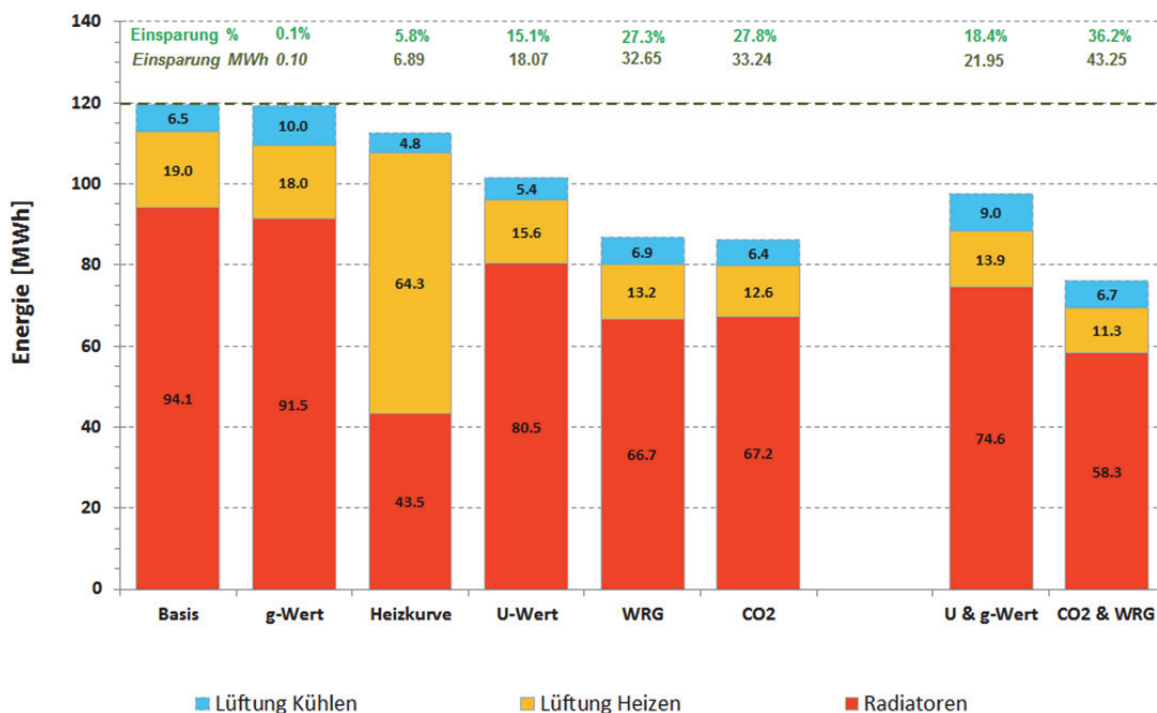


Abbildung 7 Energiebedarf jeweils nach Realisierung verschiedener Massnahmen für den Flirt

3.3 Vergleich der beiden Fahrzeuge EW II und Flirt

Im Abbildung 8 wird der Heizenergiebedarf spezifisch in kWh/m²a dargestellt (wobei die m² die Bodenfläche des Fahrzeuges darstellen). Der Wagen EW II mit Baujahr 1977 benötigt 26-mal mehr Energie als ein Wohnhaus welches nach der aktuellen Energieverordnung in der Schweiz gebaut wird. Beim neueren Flirt beträgt der Unterschied noch Faktor 17. Durch ein Refit mit einer CO₂-Regelung und einer Wärmerückgewinnung wird der spezifische Energiebedarf deutlich gesenkt.

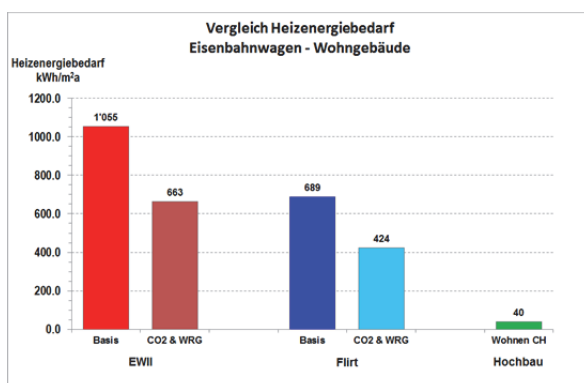


Abbildung 8 Vergleich Energiebedarf Heizen

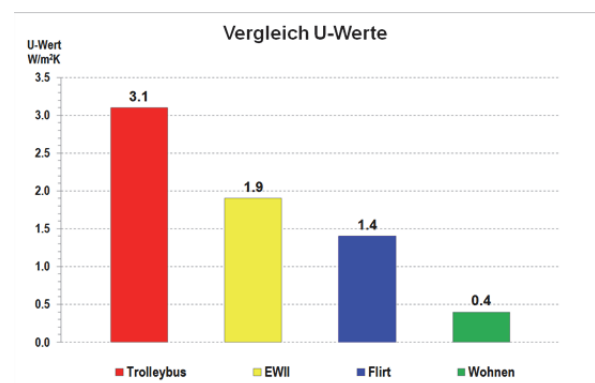


Abbildung 9 Vergleich U-Werte

Der Vergleich der mittleren U-Werte zeigt in Abbildung 9, dass ein Swisstrolleybus 4 der neusten Generation mit einem U-Wert von 3.1 W/m²K die schlechteste Wärmedämmung hat, gefolgt vom EW II aus dem Jahr 1977 und dem Flirt von 2003. Der Flirt hat gegenüber dem Wohnbau eine um Faktor 3.5 schlechtere Dämmung.

4 Diskussion und Ausblick

Die Simulationen mit kalibrierten und validierten Modellen ermöglichen Massnahmen am Fahrzeug sowohl energetisch als auch betreffend der Auswirkungen auf die Behaglichkeit im Fahrgastraum quantitativ zu beurteilen.

Zwei wesentliche Gründe für den hohen Energieverbrauch sind die schlechte Dämmung der Fahrzeughülle und die grosse Aussenluftmenge bei geringer Personenbelegung. Eine Verbesserung der Isolation der Zugshülle kann nur in Zusammenhang mit einem kompletten Retrofit umgesetzt werden. Hinzu kommt, dass diese Massnahme teuer ist und viel Platz im Innern des Wagens beansprucht, welcher nicht vorhanden ist.

Massnahmen mit grossem Potential und umsetzbar mit vertretbarem Aufwand sind die komplette Nachtabenkung der Innenraumtemperatur im ganzen Wagen, die bedarfsgerechte Regelung der Luftmenge in Abhängigkeit der CO₂-Konzentration im Fahrgastraum. Insbesondere die CO₂-Regelung der Aussenluftmenge kann kostengünstig umgesetzt werden, da dazu nur die Software vom Klimaregler angepasst werden muss, ein CO₂-Sensor und eine Drehzahlregelung des Ventilators installiert werden müssen. Bei der älteren Zugskomposition EW II ergab die Simulation der Kombination aus allen drei oben erwähnten Massnahmen die grösste Einsparung im Energieverbrauch. Da beim Flirt die Nachtabenkung bereits umgesetzt und auch die Innenraumtemperatur gut eingestellt wurde, ist hier die Massnahme mit der bedarfsgerechten Lüftung diejenige mit der grössten Energieeinsparung.

Im öffentlichen Verkehr stehen neben Eisenbahnen auch andere Fahrzeugtypen wie Busse, Strassenbahnen, Flugzeuge oder Schiffe im Einsatz. Es ist bekannt, dass auch in diesen Fahrzeugen ein grosses Potential zur Reduktion des Energieverbrauches der Komforteinrichtungen steckt. Entsprechende Untersuchungen sind im Gang oder in Vorbereitung. Dabei zeigt sich, dass der Energiebedarf für die Komforteinrichtungen vor allem bei strombetriebenen Fahrzeugen mit Akku eine sehr grosse Bedeutung erhält, da der Energiebedarf einen wesentlichen Einfluss auf die Reichweite bzw. das Gewicht der Fahrzeuge hat.

5 Dank

Die Idee dieses Projekts und die Initiative, dieses umzusetzen verdanken wir dem "spiritus rector" Professor Dr. Peter Oelhafen des Departements Physik der Universität Basel. Für die Leitung des Projekts sowie die gute Zusammenarbeit bedanken wir uns herzlich. Der Dank geht auch an Andreas Tonin der Universität Basel für die Entwicklung des Messsystems.

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.

Während des Projektes waren wir oft auf die Unterstützung der verschiedenen Bahnbetreiber angewiesen (SBB, SOB, RhB, BLS, TI). Darum gilt auch diesen unser Dank.

6 Literaturverzeichnis

Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz (BGIA). 2005