



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

Simulation Energiebilanz Heizung Lüftung Klima: ICN (SBB)

Schlussbericht



Franz Sidler, Hochschule Luzern

Technikumstrasse 21 6048 Horw, franz.sidler@hslu.ch, www.hslu.ch

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

CH-3003 Bern

Programmleiter

Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: 056 (des ESöV 2050-Programms)

Bezugsquelle

Kostenlos zu beziehen über das Internet

www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autoren –innen dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 6.12.2018

Inhalt

Danksagung	4
Zusammenfassung	5
Résumé sommaire	6
Executive summary	6
1. Ausgangslage und Zielsetzung	7
1.1 Ausgangslage	7
1.2 Ziel der Arbeit	7
2. Methodik	7
2.1 Grundlagen der 7-Wagen-Zug Formation	7
2.2 Systembeschrieb HLK	10
2.3 Kalibrierung	11
3. Ergebnisse	14
3.1 Energiebedarf des ICN	14
3.2 Energetische Verbesserungen	14
4. Diskussion	18
5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	18
6. Anhang Simulationsgrundlagen	19
6.1 Wagenhülle	19
6.2 Systeme	22
6.3 Ergebnisse der Varianten	23

Danksagung

Wir bedanken uns bei der Firma SBB AG (Tuchschmid Matthias und Dréwniok Johannes) für die gute Zusammenarbeit, und die zur Verfügung gestellten Dokumente.

Wir bedanken uns beim Bundesamt für Verkehr Dr. Tristan Chevroulet für die finanzielle Unterstützung. Ohne diese Finanzpartner wäre es nicht möglich gewesen, dieses Projekt in dieser Form umzusetzen.

Ein weiterer Dank geht an Gerhard Zweifel der Hochschule Luzern für die Durchsicht des Berichts.

Zusammenfassung

Der Energiebedarf für Heizung, Lüftung und Klima (HLK) bei Schienenfahrzeugen macht ca. 20-40 % des Gesamtenergieverbrauchs aus. Im vorangegangenen Projekt wurden sechs verschiedene Fahrzeuge detailliert ausgemessen und deren Optimierungspotenzial der Komforteinrichtungen ausgewiesen. Analog wird in diesem Bericht das Sparpotenzial am Fernverkehrszug Intercity Neigezuge (ICN) der SBB untersucht.

Für den ICN wurde ein detailliertes Simulationsmodell erstellt und mit Messdaten validiert. Das Ziel ist, die Energie für Heizung, Lüftung und Klimatisierung für den Istzustand ICN zu bilanzieren.

Optimierungsmassnahmen betreffend Fahrzeughülle, HLK-Systeme, Steuerung und Regelung zur Effizienzsteigerung wurden simuliert und das Einsparpotenzial ausgewiesen.

Einige wichtige Ergebnisse werden in Abbildung 1 miteinander verglichen. Es wird empfohlen, die Massnahme «bedarfsabhängige Aussenluftsteuerung», welche Energieeinsparungen von 14.9 MWh/a (41.5 %) ermöglichen, umzusetzen. Diese Massnahme befindet sich bereits in der Umsetzung.

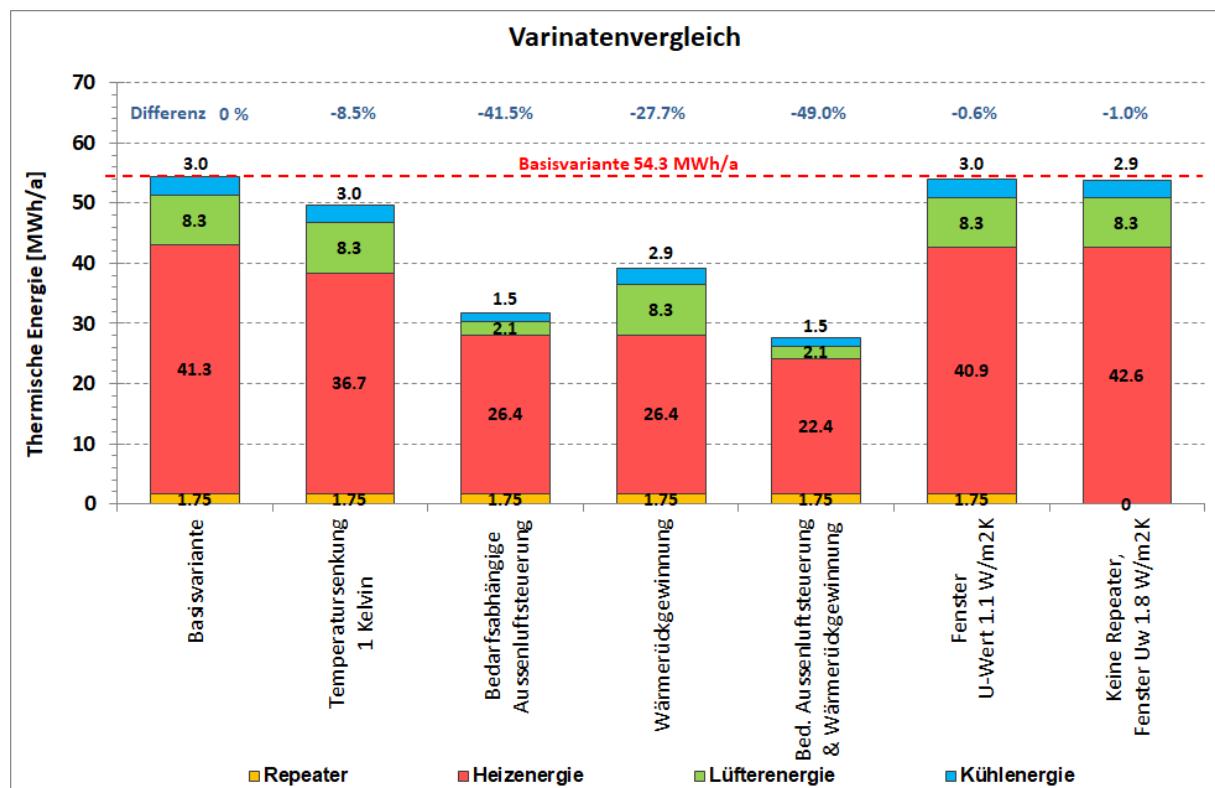


Abbildung 1 Vergleich der wichtigsten Varianten

Résumé sommaire

Les besoins d'énergie pour le chauffage, la ventilation et la climatisation (HVAC) des véhicules ferroviaires représentent environ 20 à 40 % de leur consommation totale en énergie. Dans les projets précédents, six véhicules différents avaient été mesurés en détail et le potentiel d'optimisation des équipements de confort avait pu être démontré. De la même manière, ce rapport examine le potentiel d'économie du train « Intercity Neigezug » (ICN) des CFF sur les longues distances.

Un modèle de simulation détaillé de l'ICN a été recréé et validé avec les données de mesure. L'objectif est de calculer le bilan d'énergie pour le chauffage, la ventilation et la climatisation dans l'état actuel des ICN. Les mesures d'optimisation concernant la coque des véhicules, les systèmes de CVC et les régulations pour l'augmentation de l'efficacité ont été simulées et les potentiels d'économie identifiés.

Quelques résultats importants sont comparés dans le graphique 1. Il est recommandé de mettre en œuvre des mesures de « régulation de l'air extérieur en fonction de la demande », qui permettent une économie d'énergie de 14,9 MWh/a (41,5 %). L'implantation de tels mesures est déjà cour.

Executive summary

The energy requirement for heating, ventilation and air conditioning (HVAC) in rail vehicles accounts for approx. 20-40 % of the total energy consumption. In previous projects, six different vehicles were measured in detail and their optimisation potential of the comfort equipment was shown. Similarly, this report examines the savings potential of SBB's Intercity Tilting Train (ICN).

A detailed simulation model has been created for the ICN and validated with measurement data. The aim is to calculate the energy balance for heating, ventilation and air conditioning for the ICN in the current state. Optimisation measures regarding the vehicle shell, HVAC systems, control and regulation to increase efficiency were simulated and the savings potential identified.

Some important results are compared in Figure 1. It is recommended to implement the measure of demand-dependent outdoor air control, which enables energy savings of 14.9 MWh/a (41.5 %). This measure is already being implemented.

1. Ausgangslage und Zielsetzung

1.1 Ausgangslage

Der Energiebedarf für Heizung, Lüftung und Klima (HLK) bei Schienenfahrzeugen macht ca. 20-40 % des Gesamtenergieverbrauchs aus, wie im Projekt „Energieeffizienz von HLK im öffentlichen Verkehr“ aufgezeigt wurde. In diesem Projekt wurden sechs verschiedene Fahrzeuge detailliert ausgemessen (Energieverbrauch HLK und Komfort Fahrgastraum). Für drei Fahrzeuge aus dem Nahverkehr (NINA, EW II und FLIRT) wurden parallel dazu detaillierte Simulationsmodelle erstellt und validiert. Mit den Simulationen wurden betriebliche und technische Optimierungen berechnet und Einsparpotenziale ermittelt. Bei diesen Betrachtungen wurde kein Fahrzeug aus dem Fernverkehr untersucht. Mit dem Intercity Neigezug (ICN), welcher erst in einer zweiten Phase ins Messprogramm aufgenommen wurde, konnte diese Lücke geschlossen werden. Analog zu den Nahverkehrsfahrzeugen wurde der Energiebedarf der HLK beim ICN untersucht.

1.2 Ziel der Arbeit

Für den Fernverkehrszug ICN soll ein detailliertes Simulationsmodell erstellt und mit Messdaten validiert werden. Das Ziel ist, die Energie für Heizung, Lüftung und Klimatisierung zu bilanzieren. Zusätzlich werden Optimierungsmassnahmen betreffend Fahrzeughülle, HLK-Systeme, Steuerung und Regelung zur Effizienzsteigerung simuliert, um deren Einsparpotenzial abzuschätzen. Somit lassen sich neben NINA, EW II und FLIRT die bekannten Massnahmen auch an einem modernen Fernverkehrszug simulieren und das Einsparpotenzial quantifizieren. Zudem soll die Massnahme „Wärmepumpe“ modelliert werden, da der ICN mit den Kompaktklimaanlagen eine relativ günstige Ausgangslage besitzt. Die Ergebnisse der Simulationen werden der SBB zur Verfügung gestellt und mit Berechnungen des SBB-internen Tools „HLK-Modellierung SBB-Fahrzeuge“ verglichen und plausibilisiert.

2. Methodik

2.1 Grundlagen der 7-Wagen-Zug Formation

Ein ICN ist ein moderner Fernverkehrszug der SBB. Er besteht aus sieben Wagen, die folgendermassen zu einem Pendelzug angeordnet sind:

- Bt-Wagen ausgestattet mit 2. Klasse Abteilen (Steuerwagen)
- B-Wagen ausgestattet mit 2. Klasse Abteilen
- WRA-Wagen ausgestattet mit 1. Klasse Abteilen und Restaurantabteil
- A-Wagen ausgestattet mit 1. Klasse Abteilen
- AD-Wagen ausgestattet mit 1. Klasse Abteilen und Gepäckabteil
- B-Wagen ausgestattet mit 2. Klasse Abteilen
- Bt-Wagen ausgestattet mit 2. Klasse Abteilen (Steuerwagen)

Der Zug kann zwischen dem A- und AD-Wagen in zwei eigenständige Halbzüge getrennt werden.

Die Untersuchung wurde nur am B-Wagen gemäss Abbildung 2 durchgeführt.

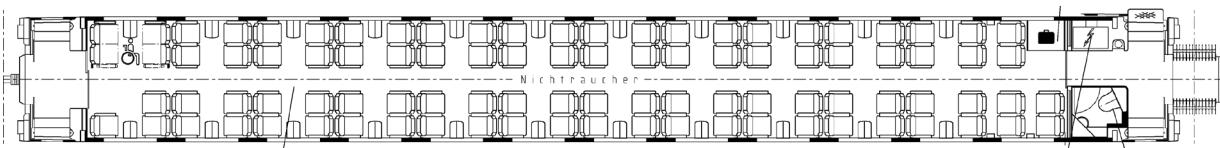


Abbildung 2 B-Wagen des ICN

In der Tabelle 1 sind einige technischen Angaben des untersuchten B-Wagens aus der 7-teiligen Formation aufgeführt.

Was	Wert	Bemerkung
Zugtyp	Intercity Neigezuge (ICN)	Einsatz Fernverkehr
Anzahl Fahrzeuge	44	In Betrieb bei der SBB
Höchstgeschwindigkeit	200 km/h	
Zuglänge	188.8 m	
Wagenlänge	27 m	
Aussenmasse B-Wagen	Länge 27 m Breite 2.83 m Höhe 3.95m	
Gewicht B-Wagen	Tara (Leergewicht) 52.0 t Brutto 399 t	
Platzangebot	Sitzplätze 93 Stehplätze ?	
Heizung	el. Radiatoren 24 kW Luftheritzer 30.8 kW	Beidseitig im Fussbereich In Lüftungsanlage
Kühlung	thermische Leistung 44 kW	2 Klimaboxen auf dem Dach
Lüftung	Volumenstrom max. 1'600 m ³ /h	Annahme basierend auf Messberichten und Kalibration des Models

Tabelle 1 Kennzahlen ICN

Zusammen mit der SBB wurden die Grundlagen für den ICN im Grundlagendokument definiert. Im Anhang sind die wichtigsten Grundlagen zusammengefasst.

Mit diesen Angaben wurde das Simulationsmodell als 3 D-Modell gemäss Abbildung 3 für den B-Wagen erstellt. Das Modell wurde konstant nach Südwest ausgerichtet.

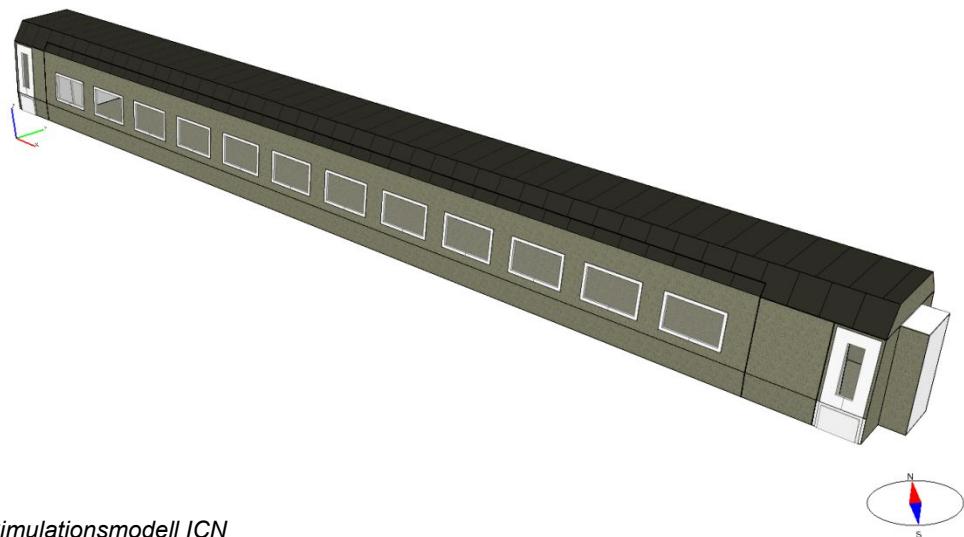


Abbildung 3 3-D Simulationsmodell ICN

In der Simulation wurden die gemessenen Klimadaten der Universität Basel vom Jahr 2016 verwendet welche in Abbildung 4 als Verlauf und in Abbildung 5 als Häufigkeit dargestellt ist.

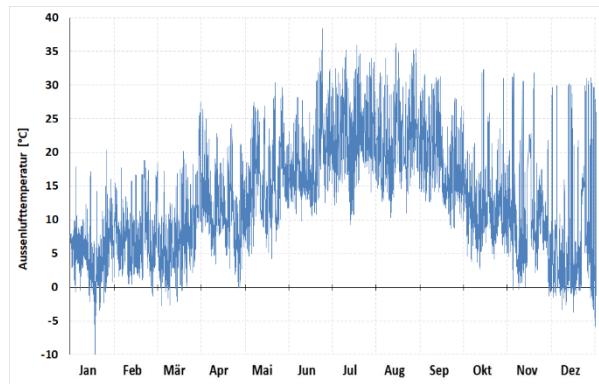


Abbildung 4 Aussenlufttemperaturverlauf

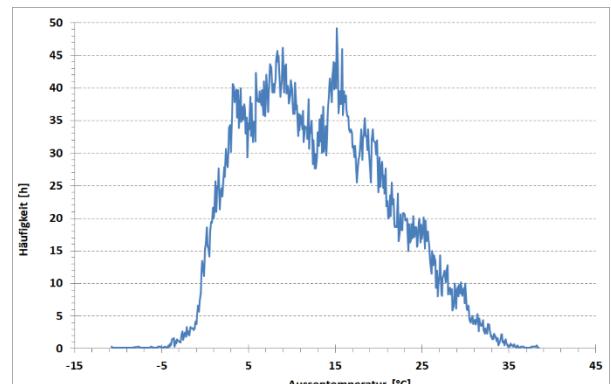


Abbildung 5 Häufigkeit der Aussenlufttemperatur

Das Modell wurde in vier Zonen gemäss Abbildung 6 aufgeteilt.

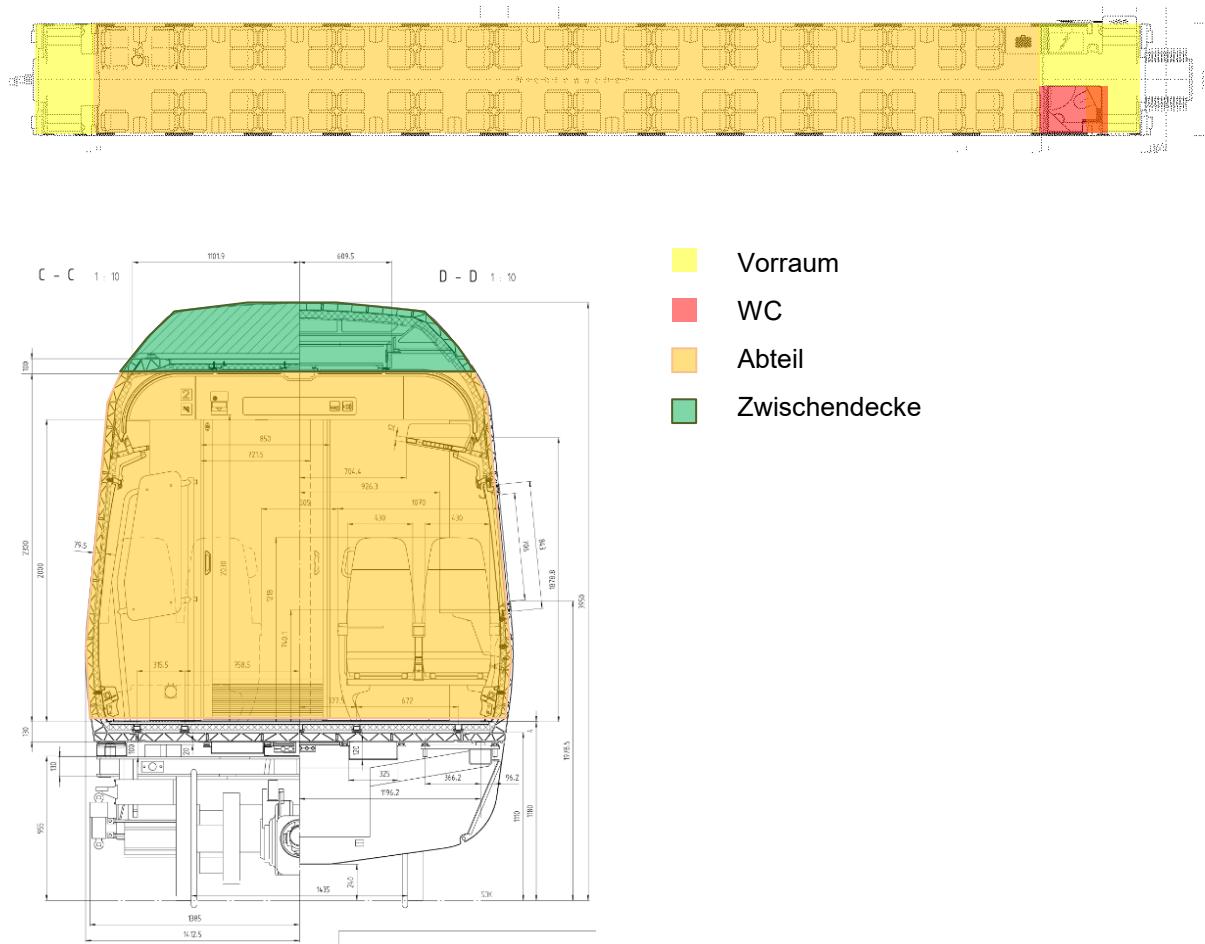


Abbildung 6 Zoneneinteilung im Grundriss und im Schnitt

2.2 Systembeschrieb HLK

Der Fahrgastraum wird mit elektrischen Heizkörpern (Radiatoren) mit einer maximalen Leistung von 24 KW geheizt. Die Radiatoren sind auf beiden Längsseiten im Fahrgastraum jeweils in Bodennähe unterhalb der Fenster eingebaut. Zusätzlich kann über die Lüftung eine Schnellaufheizung mit einer Zulufttemperatur von bis zu 50 °C erfolgen. In den Vorräumen befindet sich jeweils 1 Heizkörper. Eine Einkanalklimaanlage wird durch zwei Kompaktklimageräte bedient, welche an den beiden Wagenenden angeordnet sind. Darin sind alle Einrichtungen zum Heizen, Lüften und Kühlen zusammengefasst. Je nach Betriebsart und Außentemperatur wird das Mischungsverhältnis von Außenluft und Umluft automatisch verändert. Die Luft wird unter der Decke eingeblasen. Die Abluft aus dem Abteil überströmt in die beiden angrenzenden Vorräume, bevor sie ohne Wärmerückgewinnung nach außen abgeführt wird. (Der Außenluftvolumenstrom wurde auf maximal 1600 m³/h festgelegt.)

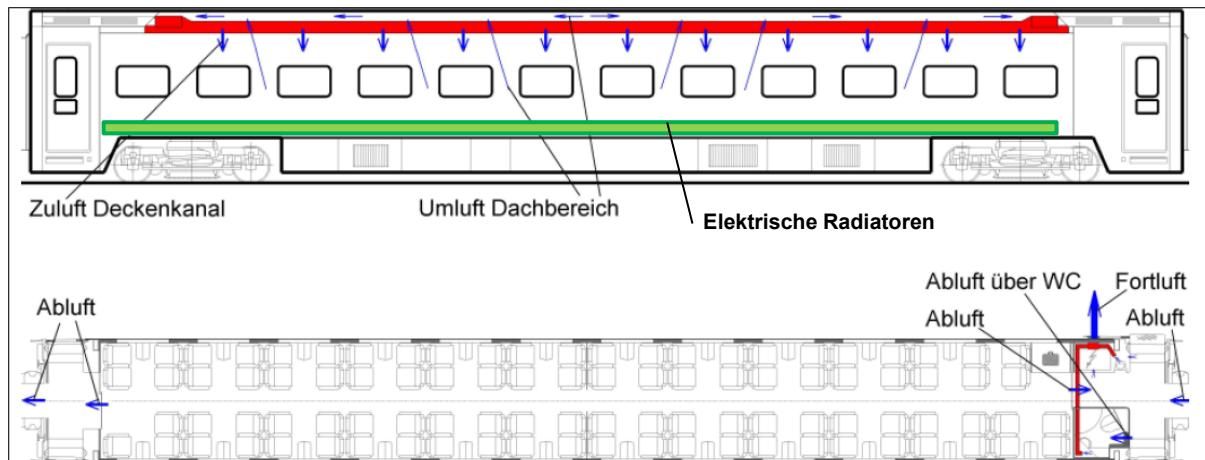


Abbildung 7 Systembild der Lüftungsanlage im ICN

Steuerung HLK

Der Raumsollwert wird während der Nutzung in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur gemäss Abbildung 8 geregelt. Ausserhalb der Nutzung wird der Raumsollwert im "Schlummerbetrieb" auf 10 °C gesenkt, zum einen um Frostschäden zu verhindern und zum anderen um in kurzer Zeit wieder auf Betriebstemperatur aufheizen zu können. In der Simulation wurde angenommen, dass der Schlummerbetrieb aktiviert wird, wenn die Geschwindigkeit während mehr als 45 Minuten weniger als 10 km/h beträgt. Das Vorheizen im Umluftbetrieb wird 30 Minuten vor Fahrtbeginn gestartet und anschliessend gemäss Raumsollwert weiter genutzt.

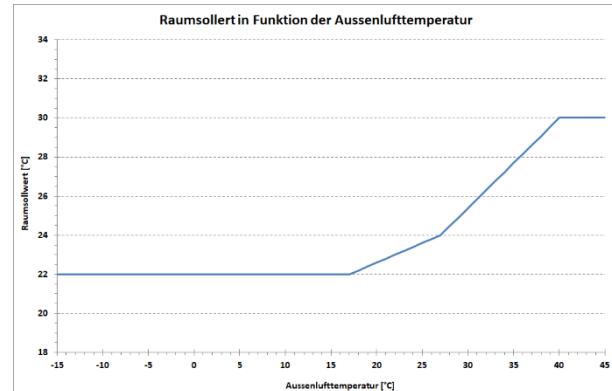


Abbildung 8 Raumsollwertkurve

Die Luftmenge der Lüftungsanlage war während der Nutzung konstant und nicht bedarfsgeregelt. Die Zulufttemperatur wurde um 0.7 °C höher als der Raumsollwert definiert. Die Abluft wurde ohne Wärmerückgewinnung nach außen geführt. Nur im Aufheizbetrieb und während dem Schlummerbetrieb wurde auf Umluftbetrieb umgeschaltet.

Öffnung der Aussentüren

Bei jedem Stillstand, wenn die Geschwindigkeit unter 40 km/h sank, wurden die beiden Türen im Abteil und die Aussentüren auf der Südwestseite in der Simulation für 45 s geöffnet.

2.3 Kalibrierung

Da keine Möglichkeit bestand, am ICN einen Aufheizversuch durchzuführen, wurde das Modell mit den zur Verfügung stehenden Messdaten kalibriert. Dazu wurde eine geeignete Periode mit möglichst konstanten Bedingungen gesucht. Ausgewählt wurde die Periode vom 24.12.2015 bis 31.12.2015. Während dieser Zeit stand der Wagen auf dem Abstellgleis in Zürich Altstetten und wurde normal beheizt und belüftet. Die Messeinrichtung der Universität Basel war in Betrieb, sodass das Modell in dieser Periode kalibriert werden konnte. Die Kalibrierung erfolgte durch Anpassung der Wärmebrücken und den internen Massen. In Abbildung 9 wird die Leistung der Radiatoren und der Luftheritzer sowie die Raumlufttemperatur der Simulation mit der Messung verglichen. Die Leistung des Luftheritzers ist um ca. 15 % tiefer als die Messungen. Mögliche Ursachen sind eine zu geringe Luftmenge oder eine zu tiefe Zulufttemperatur.

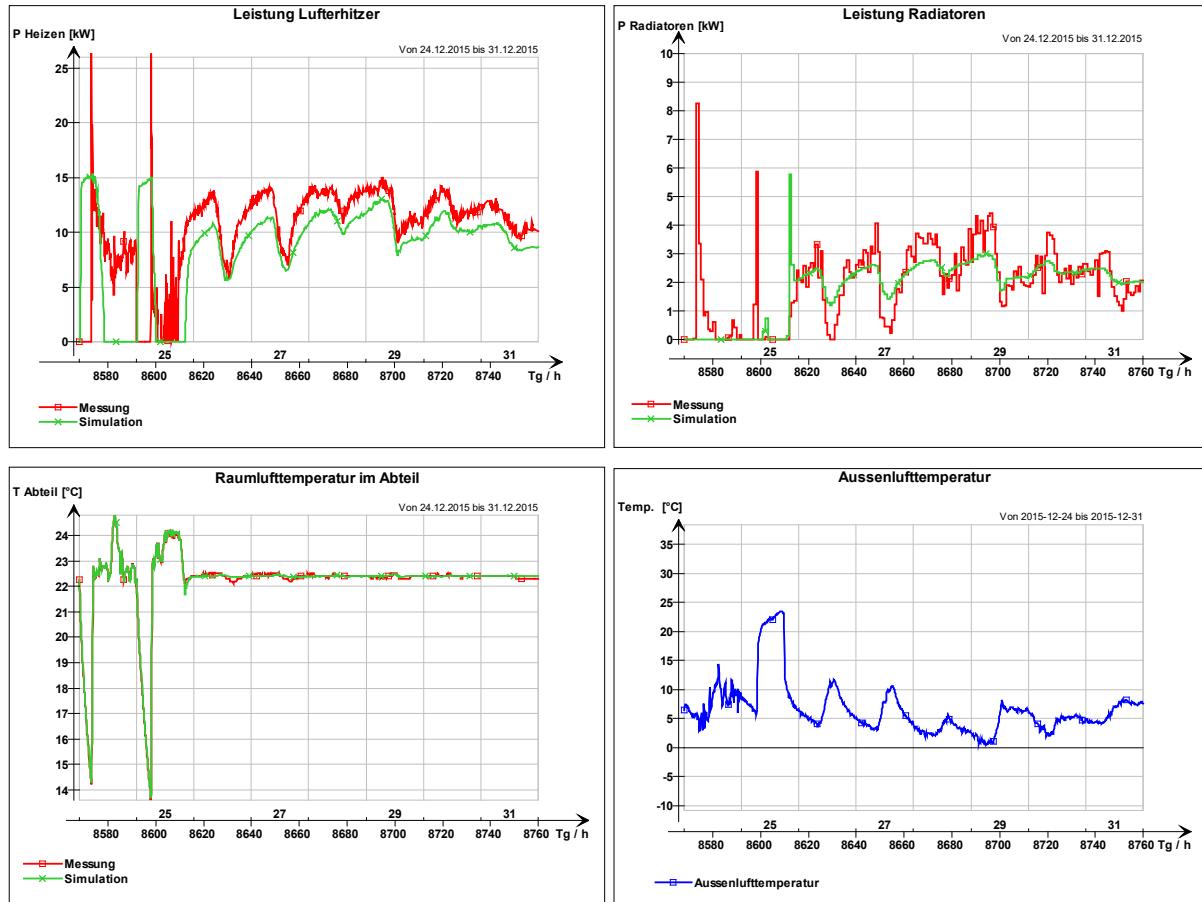


Abbildung 9 Vergleich der Messung mit der Simulation im Zeitraum vom 24.12. bis 31.12.2015

Das Modell wurde mit der Regulierung der HLK und den internen Wärmegewinnen wie Licht und Personen ergänzt. Die Passagierzahlen im Abteil wurden nicht erfasst. Deshalb wurden die Passagierzahlen aus der CO₂-Konzentration und der Aussenluftmenge der Lüftung nach dem mathematischen Modell BGIA, 2005 wie folgt berechnet:

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

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 Luftwechselrate wurde aus der Luftmenge der Lüftung abgeleitet. Für den 4.1.2016 ist der berechnete Tagesverlauf der Belegung in Abbildung 10 dargestellt.

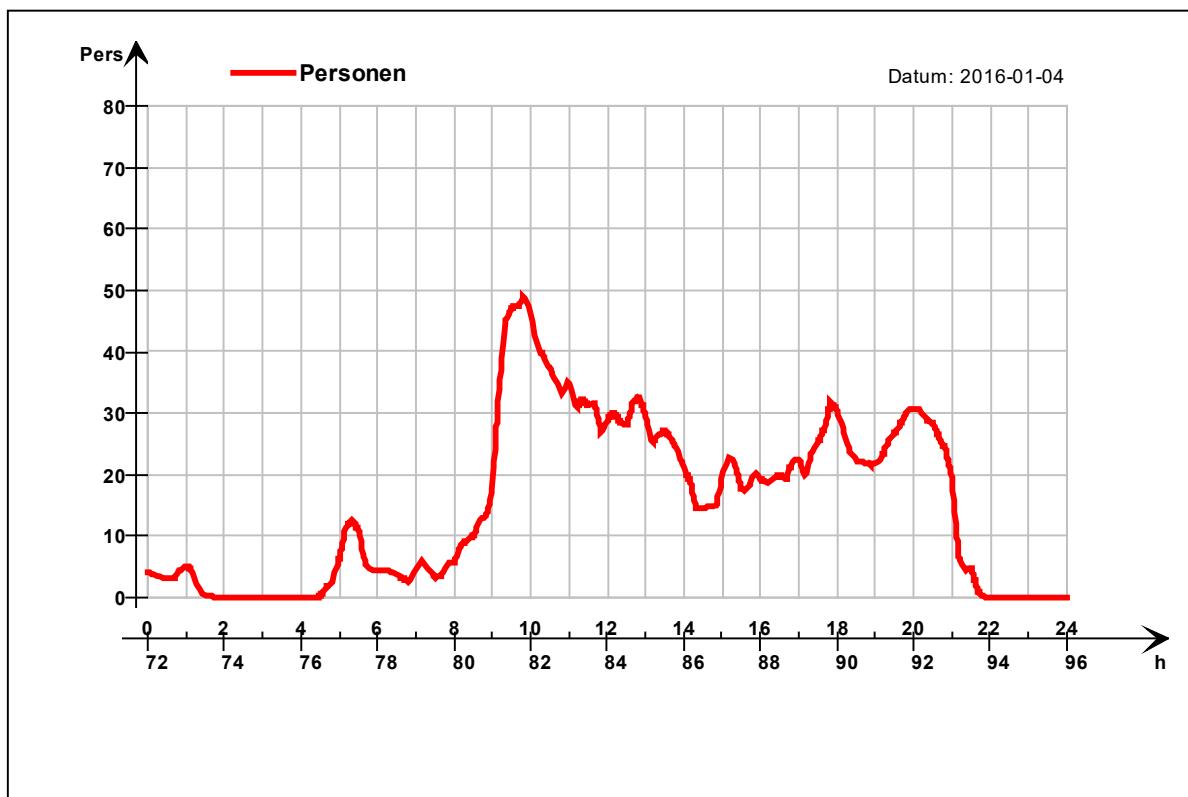


Abbildung 11 Tagesverlauf der Passagiere am 4.1.16

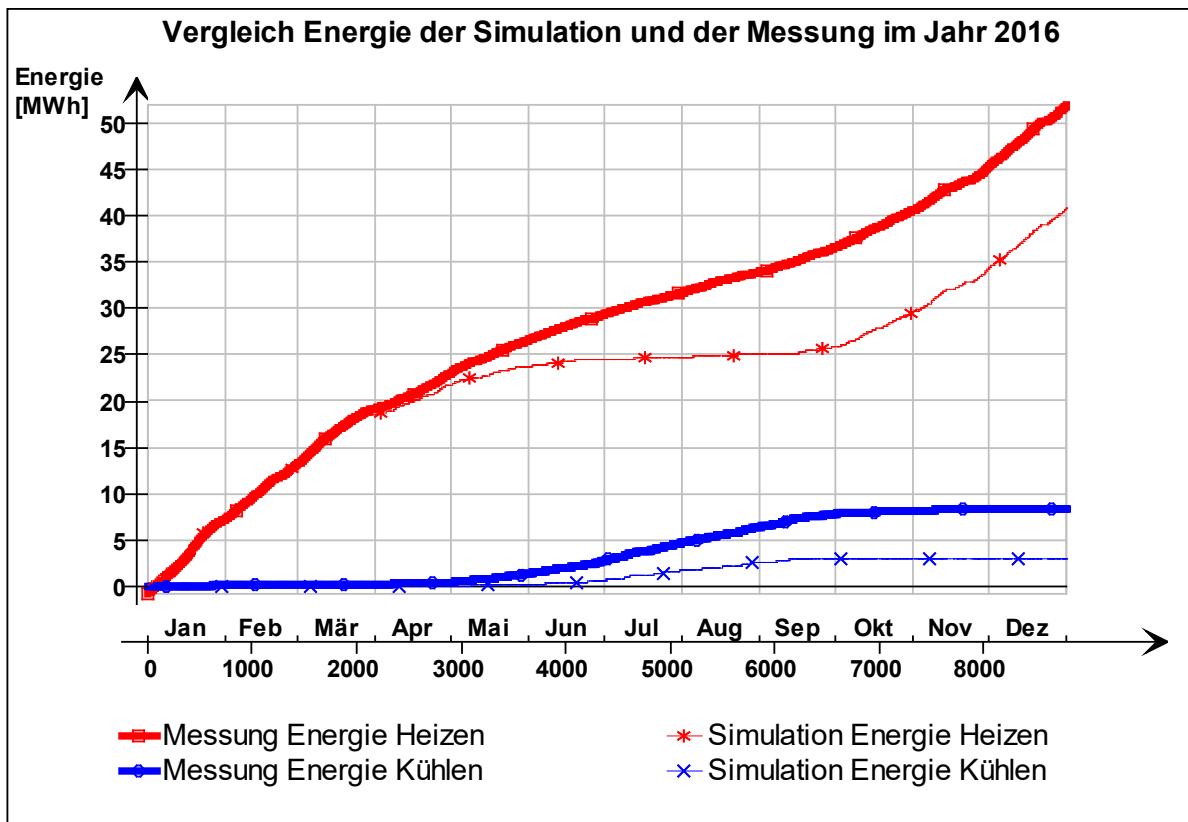


Abbildung 10 Vergleich Messung der gesamten Energie Heizen (inkl. Lüfterwärmer) mit der Simulation

In Abbildung 11 wird die Jahresenergie der Messung mit der Simulation verglichen. Dabei fällt auf, dass die Messung mit der Simulation vom 1. Januar bis ca. Ende März sowie ab Oktober nur geringe

Abweichungen haben. Die Abweichung besteht in den wärmeren Monaten von April bis September. Während dieser Zeit wird der ICN gekühlt. Die Auslegung der Kühleistung wurde mit grossen Reserven in der Kühleistung durchgeführt. Da der Verdichter zur Bereitstellung der Kälte nur ein- und ausgeschaltet werden kann, wird durch zusätzliches Nachheizen mit dem Luftheritzer die Zuluft wieder auf die erforderliche Temperatur geheizt (Gegenheizen). Bei einer überdimensionierten Anlage mit vielen Stunden im Teillastbereich ist mit diesem System kein effizienter Betrieb möglich. Diese ineffiziente Variante der Kälteerzeugung mit Gegenheizen wurde in der Simulation nicht nachgebildet. Abbildung 12 zeigt, dass in der Simulation während der Sommermonate gegenüber der Messung der Luftheritzer keine Energie benötigt.

In der Simulation wurde die thermische Energie für Heizung und Kühlung berechnet. Bei den elektrischen Radiatoren und dem elektrisch betriebenen Luftheritzer beträgt der Systemwirkungsgrad ca. 1. Deshalb kann die gemessene elektrische Energie mit der thermischen Energie aus der Simulation verglichen werden. Bei der Kühlung wurde durch die Universität Basel nur die elektrische Systemleistung gemessen. Die thermische Kälteleistung ist abhängig vom System der Kälteerzeugung und wurden nicht gemessen. In der Simulation wurde nur die erforderliche thermische Energie berechnet, ohne den Systemwirkungsgrad der Kälteerzeugung zu kennen. Deshalb ist der direkte Vergleich dieser beiden Energien schwierig und erklärt die Abweichung in Abbildung 11.

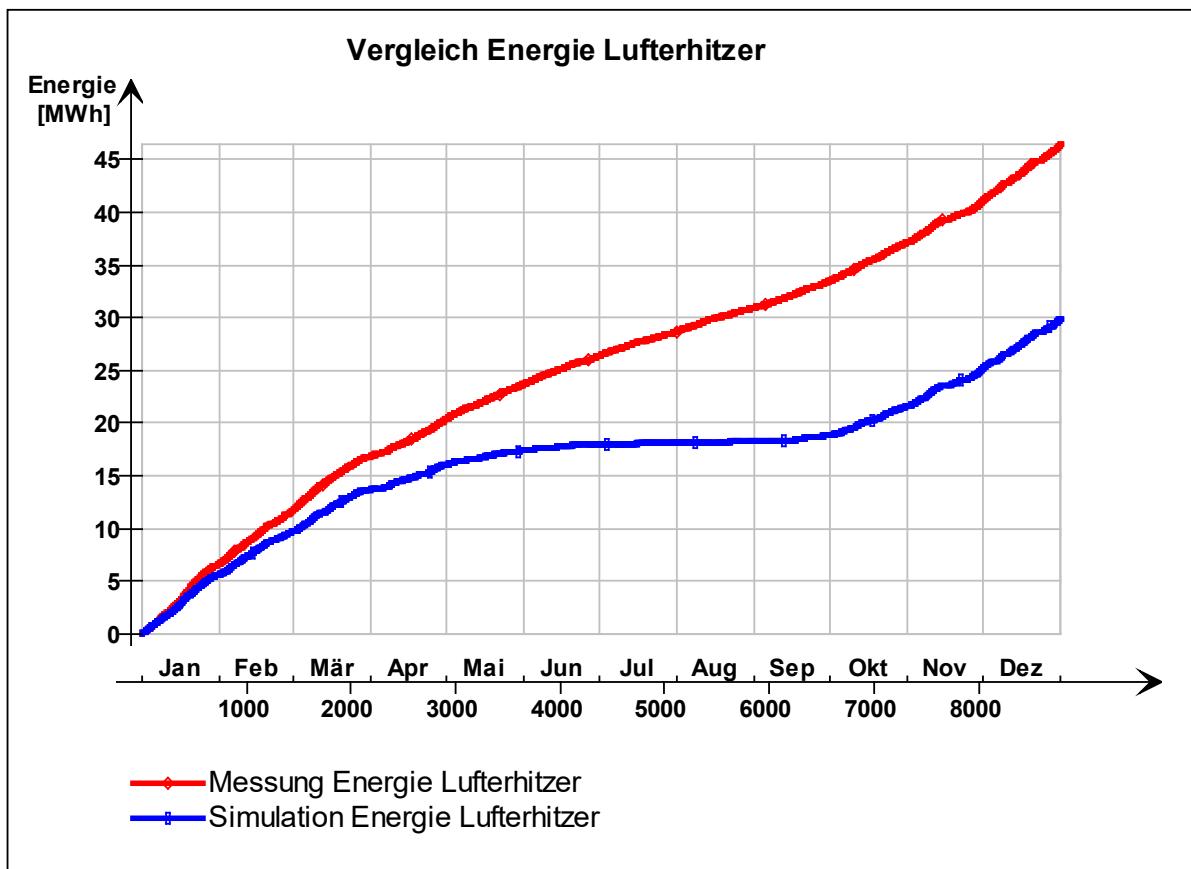


Abbildung 12 Vergleich Simulation Energie Luftheritzer ohne Gegenheizen mit Messung

Ebenfalls wurde der mittlere U-Wert der Simulation mit den Messungen des ICN verglichen. Der berechnete mittlere U-Wert aus der Simulation basiert auf den Standardwärmeübergängen innen von $1/8 \text{ K}^* \text{m}^2/\text{W}$ und aussen von $1/25 \text{ K}^* \text{m}^2/\text{W}$. Der ICN B-Wagen im Modell hat einen mittleren U-Wert von $1.57 \text{ W/m}^2/\text{K}$. Am leicht unterschiedlichen Wagentyp Bt des ICN wurde am 7.12.1998 im Windkanal Wien die beiden mittleren U-Werte von $1.3 \text{ W/m}^2/\text{K}$ bei 12 km/h Wind und $1.53 \text{ W/m}^2/\text{K}$ bei 60 km/h Wind gemessen.

Basierend auf diesem kalibrierten Modell wurden die verschiedenen Varianten zur Ermittlung des Einsparpotenzials durchgeführt.

3. Ergebnisse

3.1 Energiebedarf des ICN

Mit dem oben beschriebenen Modell wurde das Energieflussdiagramm in Abbildung 13 berechnet. Der ICN B-Wagen benötigt im Jahr 68.4 MWh Energie für die Komforteinrichtungen. Davon gehen 32.7 MWh, annähernd die Hälfte, über die Wagenhülle verloren. 44.6 % wird über die Abluft ohne Wärmerückgewinnung nach aussen abgeführt. Die Verluste durch Türöffnungen und Infiltration haben einen Anteil von 3.1 % der gesamten Energie.

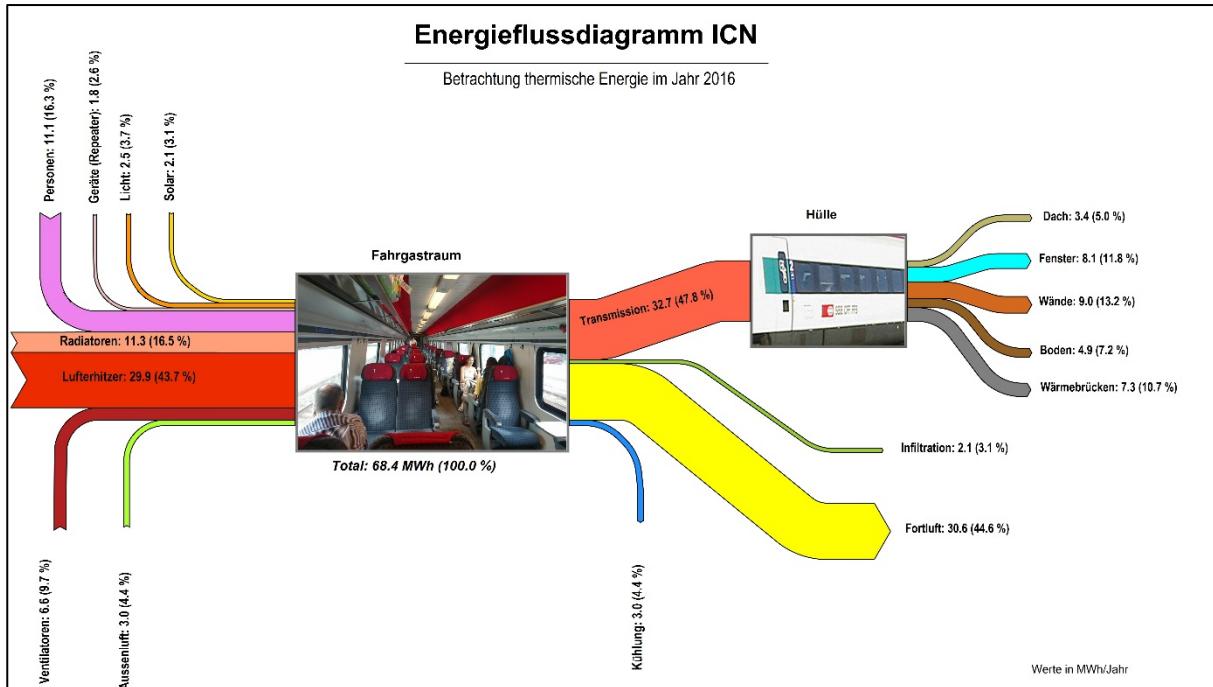


Abbildung 13 Energieflussdiagramm ICN

3.2 Energetische Verbesserungen

Als Grundlage der folgenden Verbesserungsmassnahmen wurde das oben beschriebene Basismodell verwendet, bei welchem der Schlummerbetrieb (Nachtabsenkung) bereits umgesetzt wurde. Bei der Definition der Massnahmen wurde die Verbesserung der opaken Wagenhülle nicht berücksichtigt, da eine Verbesserung der Dämmung sehr kostenintensiv ist und aktuell keine Priorität bei der SBB hat.

Am ICN wurden bezüglich des Energiebedarfs folgende Massnahmen untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 14 grafisch und die Einzelwerte in Tabelle 2 im Anhang zusammengefasst.

- **Schlummerbetrieb**

Wenn das Fahrzeug abgestellt wird und sich keine Fahrgäste im Innern des Zuges befinden, wird die Innentemperatur auf 10 °C abgesenkt. Beim Einschalten des Lichtes (z. B. durch die Reinigung) wird das Fahrzeug aus dem Schlummerbetrieb geweckt. In der Simulation wurde der Schlummerbetrieb aktiviert, wenn die Geschwindigkeit des Wagens mehr als 45 Minuten kleiner als 10 km/h war. Beendet wurde der Schlummerbetrieb mit dem Vorheizen 30 Minuten bevor die Geschwindigkeit des ICN auf mehr als 10 km/h anstieg.

Der Schlummerbetrieb wurde im ICN bereits umgesetzt und wird deshalb nicht als Reduktion, sondern als Mehrverbrauch zum Basismodell dargestellt. Ohne Schlummerbetrieb benötigt der ICN 80 MWh/a Energie im Jahr. Der ICN war im Jahr 2016 angeblich während 3455 Stunden im Schlummerbetrieb. Die Auswertung der Messdaten ergab, dass der Wagen nur an 2'275 Stunden im Schlummerbetrieb war. Dies weil aktuell beim Einschalten des Lichts durch z.B. Reinigungspersonal der Schlummerbetrieb beendet wird. Mit einem optimierten Schlummerbetrieb sind weitere 1'180 Stunden im reduzierten Heizbetrieb und damit Einsparungen von 12.1 MWh (22 %) möglich.

Die Simulation zeigte, dass durch eine weitere Senkung der Raumlufttemperatur von 10 °C auf 5 °C während des Schlummerbetriebs die Einsparungen 0.4 MWh/a (0.5 %) betragen. Die Einsparungen im Vergleich zum Schlummerbetrieb mit 10 °C Raumlufttemperatur sind gering, weil die Raumlufttemperatur im Schlummerbetrieb an weniger als 10 h unter 10 °C absinkt.

- **Temperatursenkung im Fahrgastraum**

Gemäss den Messdaten der Universität Basel war die Raumlufttemperatur im Fahrgastraum während des Heizbetriebs ca. 22.5 bis 23 °C. In der Simulation wurde das Energiesparpotenzial einer Raumsollwertreduktion während der Nutzungszeit von 1 K und von 2 K überprüft. Um ein schnelles Aufheizen am Morgen zu gewährleisten wurde ausserhalb der Nutzungszeit der Sollwert von 10 °C nicht abgesenkt. Mit der Temperaturabsenkung von 1K wird der Energiebedarf um 4.6 MWh/a (-8.5 %) und bei einer Temperaturabsenkung von 2K um 9.0 MWh/a (-16.5 %) reduziert.

- **Bedarfsabhängige Aussenluftsteuerung**

Die Aussenluftmenge wird abhängig von der Luftqualität, basierend auf der CO₂-Konzentration im Fahrgastraum, geregelt. In der Simulation wurde die CO₂-Konzentration auf maximal 1400 ppm und ein minimaler Aussenluftvolumenstrom von 50 l/s eingestellt. Damit beträgt die minimale Luftwechselrate im Fahrgastraum ca. 1.4. Ausserhalb der Betriebszeit wird die Lüftung weiterhin ausgeschaltet. Als Einzelmaßnahme wird durch die bedarfsabhängige Aussenluftsteuerung mit 22.6 MWh/a (-41.5 %) am meisten Energie eingespart. Mit der bedarfsabhängigen Aussenluftsteuerung wird die Kühlenergie und durch den geringeren Volumenstrom auch der Energiebedarf der Ventilatoren der Lüftungsanlage reduziert. Diese Zahlen basieren auf der berechneten Personenbelegung. Steigt die Personenbelegung im Wagen im Extremfall auf 100 % an, kann bei korrekter Auslegung der Lüftung mit einer bedarfsabhängigen Lüftungssteuerung keine Energie eingespart werden, weil der Aussenluftvolumenstrom zur Einhaltung der CO₂ Konzentration nicht weiter gesenkt werden kann.

- **Wärmerückgewinnung in der Lüftung**

Die Lüftungsanlage wird mit einer Wärmerückgewinnung (WRG) aus der Abluft in die Zuluft simuliert. Der Wirkungsgrad der WRG wurde mit 70 % angenommen. Damit die Anlage nicht einfrieren kann, wurde die minimale Ablufttemperatur auf 1 °C eingestellt. Ohne diese Begrenzung würde im Winter mehr Energie zurückgewonnen, als in der Praxis möglich ist. Mit der WRG wird 15 MWh/a (-27 %) Energie eingespart.

- **Bedarfsabhängige Aussenluftsteuerung & Wärmerückgewinnung**

Damit werden die beiden oben beschriebenen Massnahmen der bedarfsabhängigen Aussenluftsteuerung mit einer Wärmerückgewinnung zusammen untersucht. Durch die Kombination der beiden Varianten sinkt der Energiebedarf auf den tiefsten Wert der untersuchten Massnahmen 27.7 MWh/a (-49 %). Die zusätzlichen Einsparungen mit der Kombination der bedarfsabhängigen Aussenluftsteuerung mit einer WRG betragen im Vergleich zur Einzelmaßnahme der bedarfsabhängigen Aussenluftsteuerung nur 4.1 MWh oder 12.7 %.

- **Fenster mit besserem U-Wert**

Die Fenster der Basisversion mit dem U-Wert von 1.6 W/m²K werden durch Fenster mit U-Werten von 1.1 W/m²K, 1.3 W/m²K und 1.8 W/m²K untersucht. Der g-Wert der Fenster bleibt unverändert bei 0.41. Beim Einsatz der Verglasung von 1.1 W/m²K sinkt der Jahresenergiebedarf um 0.3 MWh/a oder 0.6 % gegenüber der Basisversion.

- **Fenster mit grösserem Energiedurchlass**

Der Jahresenergiebedarf Heizen ist im Einsatzgebiet des ICN klimabedingt deutlich grösser als der Energiebedarf Kühlen. Durch eine Erhöhung des Energiedurchlasses der Fenster von 0.41 auf 0.65 wird eine Reduktion der Heizenergie und eine leichte Erhöhung der Kühlenergie erwartet. Die Auswertung ergab eine leichte Reduktion der Heizenergie von 1.1 % und ein Anstieg der thermischen Kühlenergie von 8 %. Der elektrische Energiebezug zum Kühlen wird abhängig vom Kühlsystem um den Faktor 2 bis 4 geringer ausfallen.

- **Keine Repeater**

Im ICN hat der Fahrgast durch die installierten Repeater einen sehr guten Funkempfang mit dem Handy. Die Repeater sind für einen guten Funkempfang mit den aktuellen Fenstern erforderlich. Durch den Einsatz von laserperforierten funk durchlässigen Gläsern sind Repeater, welche eine

Leistung von 345 W haben, nicht mehr erforderlich. Da der Fensterlieferant nur Fenster mit einem U-Wert von 1.8 W/m²K anbietet, wurde in dieser Variante der U-Wert der Fenster auf 1.8 W/m²K erhöht. Durch den Verzicht auf Repeater fällt dessen Energiebedarf von 1.75 MWh/a weg. Infolge des schlechteren U-Werts der Fenster steigt der Heizenergiebedarf um 1.4 MWh/a und der Kühlbedarf sinkt um 0.2 MWh/a. In der Summe sinkt der Energiebedarf um 0.55 MWh/a (1 %) beim Verzicht auf Repeater.

- **Effizienteres Lüftungssystem**

Der Energieaufwand der Ventilatoren im Lüftungsgerät ist im Vergleich zum Wohnungsbau grösser. Die spezifische Ventilatorleistung wird im heutigen Wagen bei einem angenommenen Druckverlust des Kanalnetzes von 1350 Pa auf 3.4 kW*s/m³ geschätzt. Diese Schätzung basiert auf der Leistungsmessung der Lüfter der Universität Basel und dem Luftvolumenstrom. Die Lüftungsanlage wird in der Simulation durch Senken der Druckverluste im Kanalnetz und besseren Nutzungsgrad der Ventilatoren wie folgt optimiert: Das Kanalnetz wird optimiert, so dass der Ventilatordruck von 1350 Pa auf 500 Pa gesenkt werden kann und der Nutzungsgrad des Ventilators wird von 0.4 auf 0.6 verbessert. Dadurch wird die spezifische Ventilatorleistung (SFP) von 3.4 kW*s/m³ auf 0.8 kW*s/m³ reduziert. Mit diesen Optimierungen kann der Energiebedarf der Ventilatoren um 3.7 MWh/a (5.7 %) reduziert werden

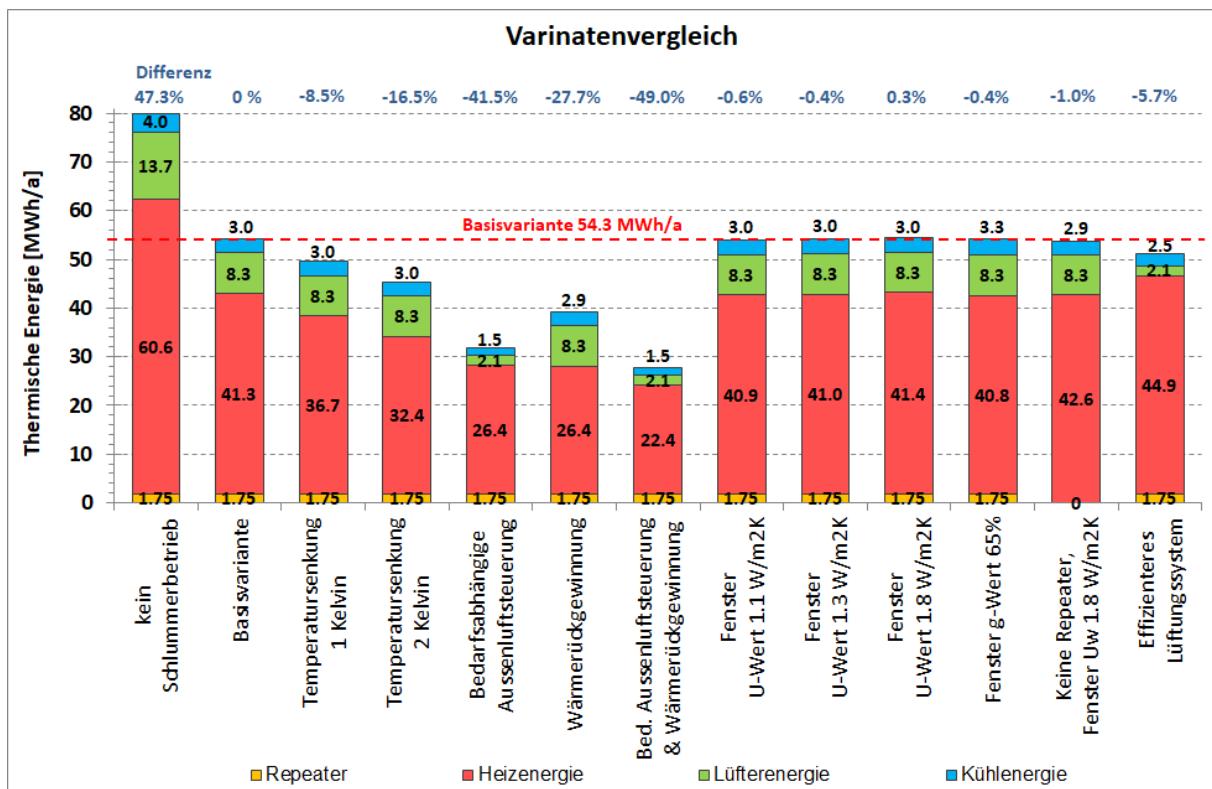


Abbildung 14 Vergleich der simulierten varianten

Gegenheizen

Die bisherigen 6 Zylinder-Klimakompressoren haben bei Schwachlast sehr viel Kälteleistung produziert. Um die Soll-Innentemperatur zu halten, wurde die Luft vor dem Einblasen in den Fahrgastraum mit dem Luftheritzer wieder aufgeheizt (Gegenheizen). In den Simulationen wurde das Gegenheizen nicht modelliert. Im Vergleich der Heizkennlinien-Funktion der Außenlufttemperatur aus den Messungen und der Simulation in Abbildung 15 fällt auf, dass im Betrieb (P-Messung) auch bei Außentemperaturen oberhalb 22 °C immer noch geheizt wird. Das Heizen oberhalb des Raumsollwerts von 22 °C zeigt die Wirkung des Gegenheizens. In der Simulation (P Simulation) ohne Gegenheizung sinkt die Heizleistung bei Außentemperaturen oberhalb 22 °C gegen 0. In der Annahme, dass das thermische Simulationsmodell dem ICN entspricht, kann vereinfacht die Differenz der Heizenergie aus Messung und Simulation (Abbildung 11) als Energieaufwand des Gegenheizen betrachtet werden. Mit dieser Betrachtung wird für das Gegenheizen 11.5 MWh/a verbraucht. Durch den Einsatz von regelbaren

Kompressoren oder kleinerer Kompressoren im Verbund, welche leistungsabhängig Einzel zugeschaltet werden, kann auf ineffizientes Gegenheizen ohne Komforteinbusse verzichtet werden.

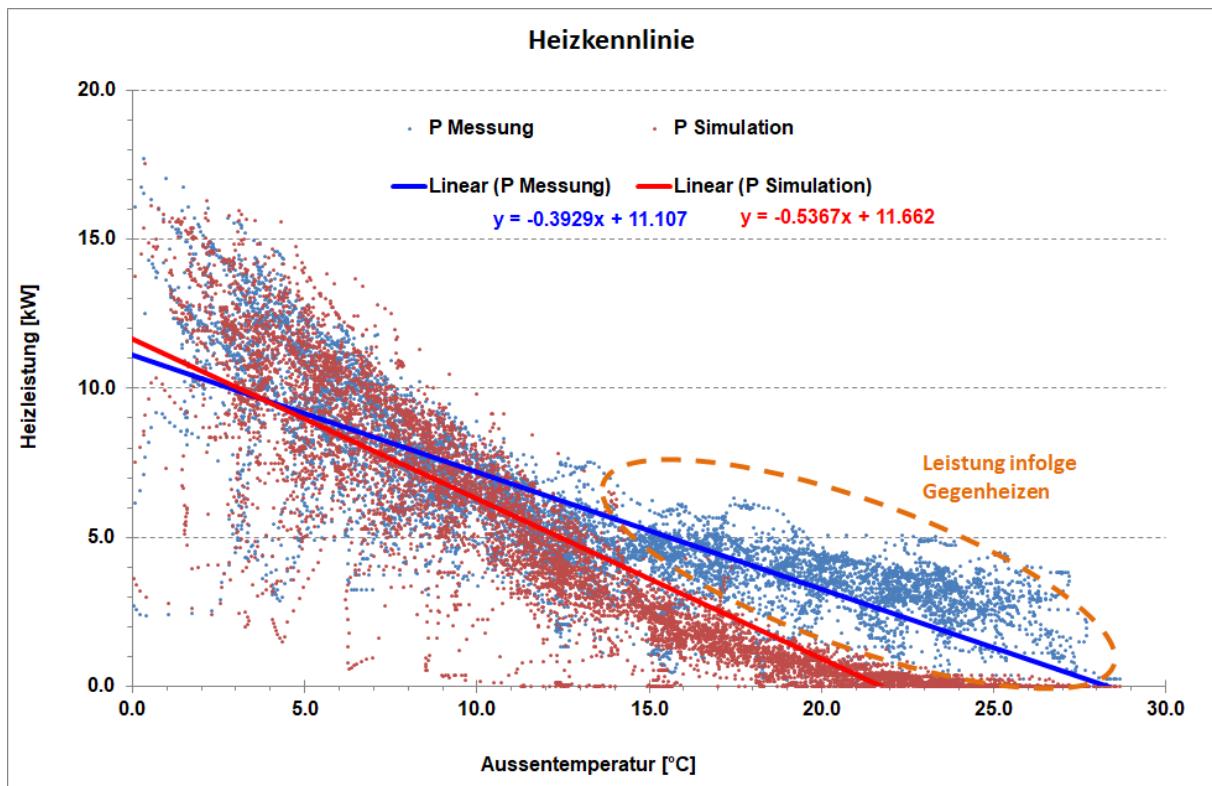


Abbildung 15 Darstellung Leistung im Gegenheizen

Wärmepumpe

Im heutigen ICN wird die Wärme mit elektrischen Radiatoren im Fußbereich und in der Lüftungsanlage mit einem elektrischen Luftheritzer bereitgestellt. Mit diesem System der Wärmeerzeugung wird eine Leistungszahl von ca. 1 erreicht. Durch den Einsatz einer Wärmepumpe kann abhängig vom System die Leistungszahl stark erhöht werden. Im Gebäude erreichen Luft-Wasser-Wärmepumpen im Heizbetrieb Jahresarbeitszahlen grösser 3.1 (Standardwert bei Minergiezertifizierung ohne zusätzlichen Nachweis einer besseren Anlage) bei maximalen Vorlauftemperaturen von ca. 30 °C.

Es wird angenommen, dass durch den Einsatz von Wärmepumpen zur Heizung des Fahrgastraumes im ICN der Heizenergiebedarf deutlich gesenkt werden kann. Die Effizienz einer Wärmepumpe ist von vielen Parametern des Systems abhängig wie den Vorlauftemperaturen, Regulierbarkeit der Leistung, mögliche Umschaltung zum Kühlen im Sommer, Dimensionierung der Wärmetauscher auf der Verdampfer- und der Kondensatorseite, dem Wärmeabgabesystem etc. Eine Simulation einer Wärmepumpenanlage im ICN wurde nicht durchgeführt, da diese auf zu vielen Annahmen basieren würde. Damit verlässliche Zahlen für Energieeinsparungen möglich sind, muss ein solches System wesentlich genauer beschrieben werden. Als grobe Schätzung kann bei einem gut abgestimmten System beim Einsatz einer Luft- Wasserwärmepumpe eine Jahresarbeitszahl etwas schlechter als im Wohnungsbau angenommen werden. Bei der Annahme einer Jahresarbeitszahl von 2.5 reduziert sich der Strombedarf Heizen von 41.3 MWh/a um 60 % auf 16.5 MWh/a. Der gesamte Energiebedarf wird mit diesen Annahmen um 45 % gesenkt.

4. Diskussion

Mit wenigen finanziellen Mitteln und grossen Energiesparpotenzialen von mehr als 41 % ist die Variante bedarfsgerechte Aussenluftsteuerung in der Umsetzung zu priorisieren.

Obwohl in dieser Studie eine bessere Dämmung der Wagenhülle nicht untersucht wurde, sollte bei einem Refit oder bei Neubestellung eine Verbesserung angestrebt werden. Denn annähernd die Hälfte der Energie geht über die Wagenhülle verloren. Insbesondere sollte der Dämmung in Kombination mit dem Einsatz von Wärmepumpen zum Heizen stärker priorisiert werden. Durch die Senkung des Wärmeverlusts kann die Heizleistung reduziert werden. Gemäss Abbildung 15 beträgt die Heizleistung bei 0 °C ca. 11 KW und bei -10 °C 65 KW. Würde die Leistung bei -10 °C Aussentemperatur nur mit der gegebenen Lüftungsanlage ohne Erhöhung des Volumenstroms von 1600 m3/h eingebracht müsste der Luftheritzer die Zuluft um unrealistische 121 °C anheben. Wird der Leistungsbedarf durch eine verbesserte Dämmung und weitere Massnahmen auf die Hälfte von 32 KW reduziert, können auch die Systemtemperaturen entsprechend auf 60 °C gesenkt werden. Eine Reduktion der Heizleistung bringt neben dem geringeren Energiebedarf vor allem auch Effizienzvorteile beim Einsatz einer Wärmepumpe und kann das Gewicht der Heiz- und Kühlaggregate senken.

Das Simulationsmodell wurde basierend auf den zur Verfügung gestellten Unterlagen der SBB erstellt. Die Kalibration der Hülle wurde mit den Messdaten der Universität Basel ohne einen genaueren Aufheizversuch durchzuführen vorgenommen.

Unsicherheiten bei den Eingabewerten in der Simulation gab es bei der Luftmenge der Lüftungsanlage. Weitere kleinere Unsicherheiten bestanden, da keine Informationen zum Verhalten bei hohen Fahrgeschwindigkeiten bezüglich der Luftdichtigkeit oder den Wärmeübergangskoeffizienten der Aussenwand am ICN vorhanden waren. Die Einsparungen basieren auf dem kalibrierten Basismodell. Dadurch wirkt sich ein leichter Offset der Energieberechnungen im Vergleich mit den anderen Massnahmen weniger aus.

5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Am bestehenden ICN wird die Umsetzung der bedarfsgerechten Aussenluftsteuerung als einfach umzusetzende Massnahme empfohlen.

Eine Reduktion des Raumsollwertes von 2 K ist aus Komfortgründen kritisch zu hinterfragen. Der um ein bis zwei Kelvin tiefere Sollwert könnte bei Neufahrzeugen mit besserer Dämmung und damit höheren Oberflächentemperaturen ohne grosse Komforteinbusse möglich sein.

Beim nächsten Refit sollten laserperforierte funk durchlässigen Fenster eingesetzt werden, um auf die Repeater zu verzichten. Dies spart zwar – falls entsprechenden Verglasungen mit tieferen U-Werten erhältlich sind – nur wenig Energie, reduziert aber den Instandhaltungsaufwand der Repeater.

Weitere Massnahmen wie der Einbau einer WRG oder eine effizientere Lüftungsanlage sind in den bestehenden Fahrzeugen weniger zu empfehlen, da die Anpassungen am Fahrzeug sowie der finanzielle Aufwand sehr gross sind.

6. Anhang Simulationsgrundlagen

6.1 Wagenhülle

Aussenwand und Stirnwand (Der Aufbau erfolgt von innen nach aussen)

Bezeichnung	λ	Dichte	c_p	Dicke
	W/(mK)	kg/m ³	J/(kgK)	m
Innenverkleidung (Melaminharzplatte)	0.3	1300	1700	0.003
Basotect mit ALU	0.035	9	1300	0.025
Aluminiumstrangprofil	218	2700	900	0.01
Zwischenschicht Luft	1	1.2	1006	0.01
Aluminiumstrangprofil	218	2700	900	0.01
Zwischenschicht Luft	1	1.2	1006	0.01
Aluminiumstrangprofil	218	2700	900	0.01
Summe				0.078
U-Wert	W/m²K			1.1

Dach (Der Aufbau erfolgt von innen nach aussen)

Bezeichnung	λ	Dichte	c_p	Dicke
	W/(mK)	kg/m ³	J/(kgK)	m
Basotect mit ALU	0.035	9	1300	0.05
Aluminiumstrangprofil	218	2700	900	0.01
Zwischenschicht Luft	1	1.2	1006	0.01
Aluminiumstrangprofil	218	2700	900	0.01
Zwischenschicht Luft	1	1.2	1006	0.01
Aluminiumstrangprofil	218	2700	900	0.01
Summe				0.1
U-Wert	W/m²K			0.62

Wagenübergang (Balg)

Bezeichnung	λ	Dichte	c_p	Dicke
	W/(mK)	kg/m ³	J/(kgK)	m
Kunststoff	0.3	1410	1400	0.002
Luftzwischenraum	1	1.2	1006	0.01
Kunststoff	0.3	1410	1400	0.002
Summe				0.014
U-Wert	W/m²K			5.2

Boden (Der Aufbau erfolgt von innen nach aussen)

Bezeichnung	λ	Dichte	c_p	Dicke
	W/(mK)	kg/m ³	J/(kgK)	m
Fussboden (Teppich)	0.06	200	1300	0.005
Abdeckung aus Kunststoff	0.3	1410	1400	0.005
Moniflex	0.06	13	1200	0.05
Aluminiumstrangprofil	218	2700	900	0.01
Zwischenschicht Luft	1	1.2	1006	0.01
Aluminiumstrangprofil	218	2700	900	0.01
Zwischenschicht Luft	1	1.2	1006	0.01
Aluminiumstrangprofil	218	2700	900	0.01
Summe				0.11
U-Wert	W/m²K			0.89

Innenwände, Zwischendecke

Bezeichnung	λ	Dichte	c_p	Dicke
	W/(mK)	kg/m ³	J/(kgK)	m
Innenverkleidung (Melaminharzplatte)	0.3	1300	1700	0.003
Holz (Spanplatte)	0.14	600	1700	0.01
Innenverkleidung (Melaminharzplatte)	0.3	1300	1700	0.003
Summe				0.016
U-Wert	W/m²K			3.8

Fenster

Bezeichnung	Wert	Einheit
U-Wert Glas (Doppelverglasung)	1.6	W/(m ² K)
U-Wert Rahmen (inkl. allen Wärmebrücken)	4	W/(m ² K)
U-Fenster	1.8	W/(m ² K)
Rahmenanteil	25	%
g-Wert	0.41	-
τ -solar	0.51	-

Glaseinsatz Aussentüren

Bezeichnung	Wert	Einheit
U-Wert Glas (Einfachverglasung)	5.8	W/(m ² K)
U-Wert Rahmen (entspricht U-Wert Türe)	4	W/(m ² K)
g-Wert	0.75	-
τ -solar	0.8	-

Wärmebrücken

Der Wagenaufbau ist nicht im Detail bekannt. Deshalb konnten die Wärmebrücken nicht genau erfasst werden. In der Simulation wurden angenommen, dass der Verlust über Wärmebrücken gross ist und somit folgende Annahmen für die Simulation gemacht:

Wärmebrücke	Wert	Einheit	Bild
Außenboden / Außenwand	0.4	W/(K·m)	
Außenwand / Innenwand	0.4	W/(K·m)	
Außenwand / Außenwand	0.8	W/(K·m)	
Einfassung Außenfenster	0.1	W/(K·m)	
Einfassung Außentür	0.1	W/(K·m)	
Dach / Außenwand	0.6	W/(K·m)	
Außenwand / Zwischendecke	0.6	W/(K·m)	
Balkonplatte / Außenwand	0	W/(K·m)	
Außenboden / Innenwand	0.4	W/(K·m)	
Dach / Innenwand	0.4	W/(K·m)	
Außenwand / Außenwand (einspringende Ecke)	0	W/(K·m)	
Gebäudehülle (Flächenuschlag zur Gebäudehülle)	0	W/(K·m ²)	

6.2 Systeme

Im ICN ist ein Kompaktklimagerät gemäss Abbildung 7

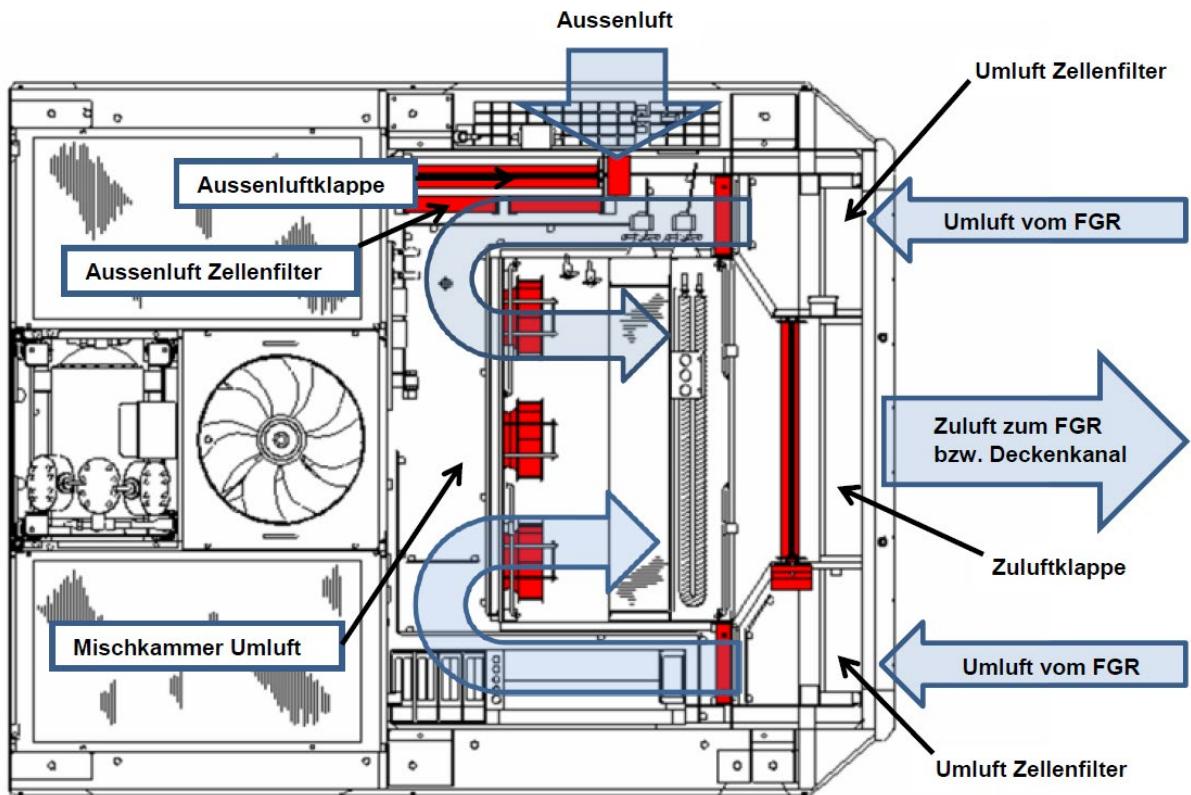


Abbildung 16 Schematischer Aufbau des Kompaktklimageräts

Klimagerät (2 Stück im B-Wagen)

Luftherhitzer thermisch	30.8 kW
Luftkühlung thermisch	44 kW
Max. Zulufttemperatur	50 °C
Min. Zulufttemperatur	15 °C
Max. Aussenluftvolumenstrom	1600 m³/h (gemäss Messungen SBB)
Wärmerückgewinnung	keine

Heizung

Elektrische Radiatoren	24 kW
------------------------	-------

Regelung der Raumlufttemperatur

Temperaturregelung in jeder Zone gemäss Raumsollwertkurve Abbildung 8 der SBB.

Türöffnung

Während einem Halt am Bahnhof werden die Aussentüren in der Simulation auf einer Seite und die beiden Innentüren für die Dauer von 45 Sekunden geöffnet.

Nutzungen

Die Daten zu den Nutzungen und der Betriebszeiten wurden aus den Messungen der Universität Basel generiert. Nach 45 Minuten Stillstand wird in den Schlummerbetrieb gewechselt.

Personen

Belegung Abteil:	Berechnung gemäss Messungen CO ₂
Belegung Vorräum, WC	keine Belegung berücksichtigt
Aktivität:	1.2 met
Bekleidung:	1.0 clo

Geräte

Repeater:	350 W (im Abteil)
Nutzung:	In Betrieb während der Nutzung, im Schlummerbetrieb aus

Beleuchtung

Leistung	408 W (Abteil), 68 W (Vorräume), 25 W (WC)
Konvektiver Anteil:	30 %
Nutzung:	Während der Betriebszeit immer ein

Natürliche Infiltration

Luftwechselrate konstant: 0.2 h⁻¹

6.3 Ergebnisse der Varianten

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der untersuchten Massnahmen als Zahlenwerte zusammengefasst.

Massnahme (Basiswert)	Heizenergie		Kühlenergie		Lüfternergie		Repeater	Summe ¹⁾	
	MWh/a	%	MWh/a	%	MWh/a	%		MWh/a	%
kein Schlummerbetrieb	60.6	46.9%	4.0	30.4%	13.7	65.6%	1.75	80.0	47.3%
Basisvariante	41.3		3.0		8.3		1.75	54.3	0.0%
Temperatursenkung 1 Kelvin	36.7	-11.1%	3.0	-1.4%	8.3	0.0%	1.75	49.7	-8.5%
Temperatursenkung 2 Kelvin	32.4	-21.6%	3.0	-1.9%	8.3	0.0%	1.75	45.4	-16.5%
Bedarfsabhängige Aussenluftsteuerung	26.4	-36.0%	1.5	-49.8%	2.1	-74.7%	1.75	31.8	-41.5%
Wärmerückgewinnung	26.4	-36.1%	2.9	-5.0%	8.3	0.0%	1.75	39.3	-27.7%
Bed. Aussenluftsteuerung & Wärmerückgewinnung	22.4	-45.7%	1.5	-52.1%	2.1	-74.7%	1.75	27.7	-49.0%
Fenster U-Wert 1.1 W/m ² K	40.9	-0.8%	3.0	0.2%	8.3	0.0%	1.75	54.0	-0.6%
Fenster U-Wert 1.3 W/m ² K	41.0	-0.5%	3.0	0.2%	8.3	0.0%	1.75	54.1	-0.4%
Fenster U-Wert 1.8 W/m ² K	41.4	0.4%	3.0	0.0%	8.3	0.0%	1.75	54.5	0.3%
Fenster g-Wert 65%	40.8	-1.1%	3.3	8.0%	8.3	0.2%	1.75	54.1	-0.4%
Keine Repeater, Fenster U _w 1.8 W/m ² K	42.6	3.4%	2.9	-5.8%	8.3	0.0%	0	53.8	-1.0%
Effizienteres Lüftungssystem	44.9	8.8%	2.5	-16.8%	2.1	-75.1%	1.75	51.2	-5.7%

¹⁾ inkl. Energie Repeater von 350W => 1.75 MWh/a

Tabelle 2 Zahlenwerte der untersuchten Massnahmen