



## Reduzierung des Heizenergiebedarfs von Bahnfahrzeugen durch eine verbesserte Wärmedämmung der Fahrzeughülle

BAV-Auftrag P-070

Zusammenfassung der Zwischenergebnisse  
Biel, 29.05.2019



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Bundesamt für Verkehr BAV**

## Impressum

### **Auftraggeber:**

Bundesamt für Verkehr BAV  
Mühlestrasse 6  
CH-3063 Ittigen

### **Auftragnehmer:**

Berner Fachhochschule  
Architektur, Holz und Bau (BFH-AHB)  
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur  
Solithurnstrasse 102, CH-2504 Biel  
Tel / Fax +41 (0)32 344 03 41/91

### **Projektbeteiligte Wirtschafts- und Forschungspartner:**

Rhätische Bahn, 7302 Landquart, [www.rhb.ch](http://www.rhb.ch)  
Stadler Altenrhein AG, 9423 Altenrhein, [www.stadlerrail.com](http://www.stadlerrail.com)  
BFH-AHB, 2504 Biel, [www.ahb.bfh.ch](http://www.ahb.bfh.ch)  
Empa, 8600 Dübendorf, [www.Empa.ch/abt312](http://www.Empa.ch/abt312)  
EPFL, 1015 Lausanne, <http://leso.epfl.ch>  
HSLU, 6048 Horw, [www.hslu.ch/zip](http://www.hslu.ch/zip)

### **Autoren:**

BFH-AHB: Hausammann Roman  
Rädle Wolfgang  
Geyer Christoph

Empa: Wernery Jannis  
Brunner Samuel

EPFL: Schüler Andreas  
Fleury Jérémy

HSLU: Sidler Franz  
Zweifel Gerhard

### **BFH Bericht Nr.**

R.008163-10-73FE-01-FB-00

### **BFH Auftrag Nr.**

R.008163-10-73FE-01

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
1 Projektbeschrieb [1].....	4
1.1 Problemstellung.....	4
1.2 Zieldefinition.....	4
1.3 Projektablauf.....	4
1.4 Projektorganisation.....	5
1.5 Projektbeteiligte Partner.....	6
2 Ist-Zustand Referenzfahrzeug (RFZ).....	7
2.1 Leistungseigenschaften Fahrzeughülle.....	7
2.2 Messeinrichtung BFH im Referenzfahrzeug [3].....	7
2.2.1 Planung der Messeinrichtung für das RFZ.....	7
2.2.2 Einbau der Messeinrichtung BFH.....	8
2.2.3 Auswertung der Messungen (10/2017 – 05/2018).....	9
2.3 Stationäre Messungen am Referenzfahrzeug [4].....	12
2.3.1 Aufheizversuch.....	12
2.3.2 Aussenluftvolumenstrom Lüftungsanlage.....	12
2.3.3 Luftdichtheit.....	13
2.3.4 Infrarotaufnahmen.....	14
2.4 Auswertung Messdaten Uni Basel [2].....	15
2.5 Thermische Simulation [4].....	15
2.6 Konstruktionsanalyse Steuerwagen [5].....	16
3 Prototypkonzepte.....	18
3.1 Recherche nach innovativen Wärmedämmstoffen [6].....	18
3.2 Wissenschaftliche Untersuchung Dämmstoffe und Zugverglasung.....	19
3.2.1 Aerogel- und Vakuumdämmung [8].....	19
3.2.2 Offen- und geschlossenporige Dämmstoffe mit und ohne Drainageschicht [2].....	20
3.2.3 Zugverglasung mit tiefem U-Wert und hoher Mikrowellentransmission.....	20
3.3 Entwicklung Prototypkonzept Steuerwagen BDT1 751 ff [5].....	20
3.4 3D-Wärmebrückenanalyse [9].....	22
3.5 Messeinrichtung BFH im Prototypfahrzeug [3].....	22
4 Analyse Energiebedarf.....	23
4.1 Energieeinsparung bei konservativen Annahmen.....	23
4.2 Energieeinsparung bei optimistischen Annahmen.....	24
4.3 Energieverluste über die Fenster, Zusatzanalyse EPFL.....	24
5 Zielerreichung.....	25
6 Verzeichnisse.....	26
6.1 Abbildungsverzeichnis.....	26
6.2 Tabellenverzeichnis.....	26
6.3 Quellenverzeichnis.....	27

# 1 Projektbeschreibung [1]

## 1.1 Problemstellung

Ein Ergebnis des von Swiss Electric Research, BFE und BAV finanzierten Projekts „Energieeffizienz von HLK im öffentlichen Verkehr“ besagt, dass der Energiebedarf für Heizung, Lüftung und Kühlung (HLK) im Schienenverkehr bis zu einem Drittel des Gesamtenergieverbrauchs ausmachen kann. Der Energiebedarf für Heizung und Kühlung ergibt sich aus den Wärmeverlusten (Winter) bzw. Wärmegewinnen (Sommer) über die Fahrzeughülle. Eine verbesserte Wärmedämmung der Fahrzeughülle führt zu einer Reduzierung des Heizenergiebedarfs im Winter und zu einer Reduzierung des Wärmeeintrags im Sommer. Infiltration infolge von Leckagen in der Fahrzeughülle führt zu Wärmeverlusten, die durch eine Erhöhung der Heizenergie ausgeglichen werden müssen. Ein weiterer relevanter Einflussfaktor auf den Heizenergiebedarf sind durch die Fortluft der Lüftungsanlage verursachte Wärmeverluste.

Die Wärmedämmung der Fahrzeughülle ist kein fester Wert, sondern wird durch die Umgebungsbedingungen beeinflusst, z.B. durch Luftströmungen im Querschnitt der Fahrzeughülle, oder den Eintrag von Feuchte in den Wandquerschnitt. Eine ruhende Luftschicht im Querschnitt der Fahrzeugwand trägt zur Wärmedämmung bei, eine bewegte Luftschicht fördert konvektiven Wärmetransport, wodurch sich die Wärmedämmung der kompletten Fahrzeughülle verschlechtert. Darüber hinaus können sich Luftströmungen durch das Eindringen der strömenden Luft in den Querschnitt des Wärmedämmmaterials negativ auf die Wärmedämmung von stark luftdurchlässigen Dämmmaterialien auswirken. Zusätzlich fördern ungeordnete Luftströmungen den konvektiven Feuchteeintrag in den Querschnitt der Fahrzeugwand. Dies kann, speziell in der Heizperiode, zu Kondenswasser und Eisbildung in der Fahrzeugwand führen. Die Wärmeleitfähigkeit von Dämmmaterialien wird durch eine zunehmende Materialfeuchte erhöht. Die Aufweitung von Dämmmaterialien ist je nach Materialeigenschaft unterschiedlich. In Abhängigkeit der tatsächlichen Verhältnisse im Querschnitt der Fahrzeughülle ergeben sich spezifische Anforderungen an die Wärmedämmmaterialien und den konstruktiven Aufbau.

## 1.2 Zieldefinition

Im Rahmen des Forschungsprojekts werden folgende Ziele definiert:

- Reduzierung der Wärmeverluste über die Fahrzeughülle des Steuerwagens BDt1751ff der RhB. Durch eine gezielte Verbesserung der Wärmedämmung und eine Verringerung der Luftdurchlässigkeit der Fahrzeughülle (Fenster, Dach, Wand, Boden, Wärmebrücken und Infiltration) wird im Bereich der Heizenergie eine Einsparung von 20% bis 25% erwartet.
- Die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse dienen als Basis für zukünftige Verbesserungsprogramme, mit denen der Heizenergieverbrauch von Fahrzeugen im ÖV, durch eine verbesserte Wärmedämmung der Fahrzeughülle, reduziert werden soll.

## 1.3 Projektablauf

Das Projekt gliedert sich in sechs Arbeitspakete (AP) und implementiert ein externes Arbeitspaket AP0. Beim **AP0** handelt es sich um Leistungen durch das BAV-Projekt „Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im Öffentlichen Verkehr“ (Leitung: Uni Basel). Dieses Projekt liefert Messwerte, die für den Vergleich des Heizenergieverbrauchs eines Referenzfahrzeugs (RFZ) und eines Prototypenfahrzeugs (PFZ) notwendig sind. Die zur Aufzeichnung des Energieverbrauchs erforderliche Messeinrichtung „Uni BS“ wird im Rahmen von AP0 in ein RFZ der Rhätischen Bahn (RhB) eingebaut. Damit ist es möglich, den Heizenergieverbrauch eines nicht modifizierten Bestandsfahrzeugs zu bestimmen. In **AP1** werden die klimatischen Verhältnisse im Querschnitt der Fahrzeughülle des fahrenden Referenzfahrzeugs über eine Winterperiode messtechnisch ermittelt. Dabei werden Temperatur, Luftfeuchte, Luft- und Wärmeströmung an verschiedenen Stellen der Fahrzeughülle untersucht. Als Basis für die Schwachstellenanalyse, die Konstruktionsoptimierung und das Simulationsmodell werden stationäre Messungen am Referenzfahrzeug durchgeführt (Aufheizversuch, Tracergasmessung, Blower Door Test, Thermografieaufnahmen). In **AP2** werden die Anforderungen an das Fahrzeug und dessen Hüllenbauteile definiert. In einem iterativen Entwicklungsprozess werden innovative Prototypkonzepte zur Verbesserung der Wärmedämmung erarbeitet. Diese Konzepte werden dann unter Einbezug von Laboruntersuchungen auf Eignung und Machbarkeit geprüft. In **AP3** wird das beste Prototypkonzept inkl. Messeinrichtung an einem Bestandsfahrzeug der RhB implementiert. In **AP4** werden die Energieverbrauchsdaten und die klimatischen Verhältnisse im Querschnitt der Fahrzeughülle des PFZ messtechnisch ermittelt. Die gewonnenen Daten werden in **AP5** ausgewertet und die Energieeinsparung quantifiziert. Begleitet wird das Projekt durch das **AP6**, welches die laufende Kommunikation der Projektergebnisse sowie die Berichterstattung an das BAV beinhaltet.

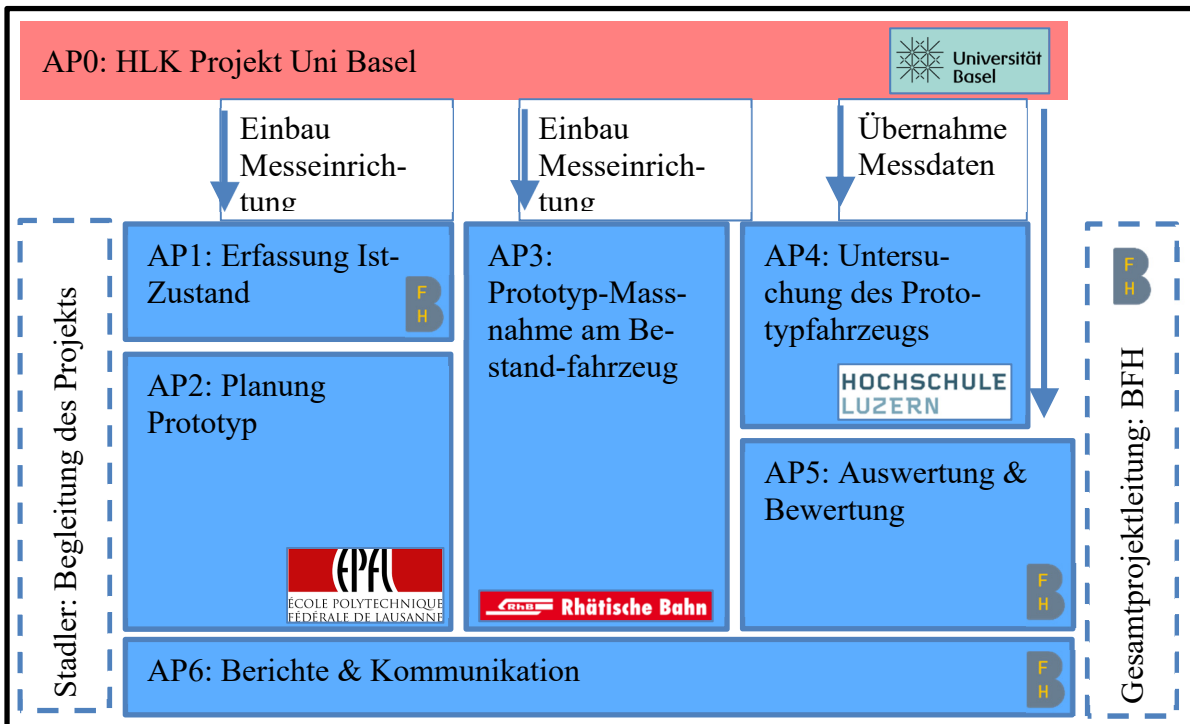


Abbildung 1: Übersicht Gesamtprojekt

## 1.4 Projektorganisation

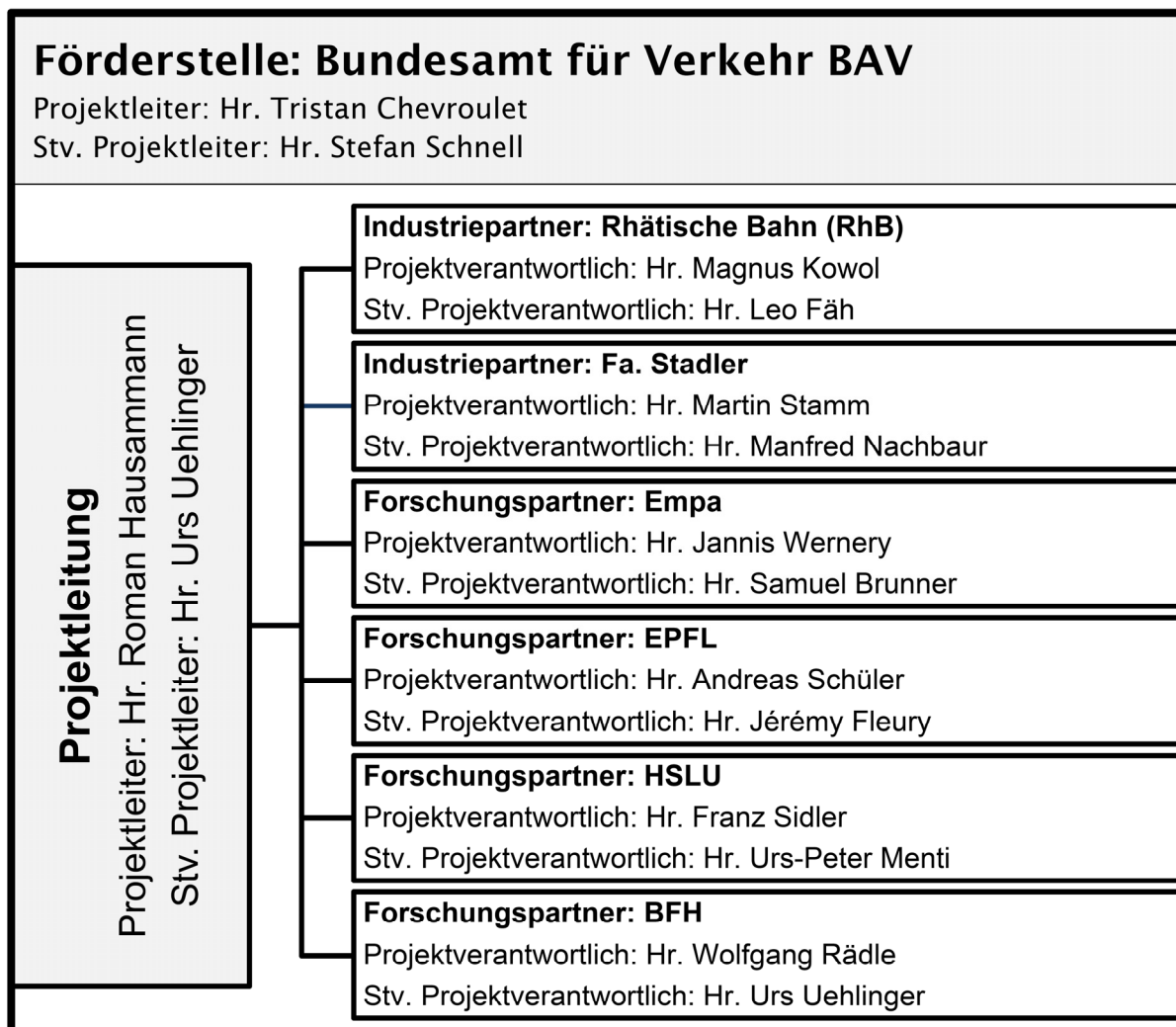


Abbildung 2: Projektorganigramm

## 1.5 Projektbeteiligte Partner

BFH-AHB	Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur Solithurnstr. 102, CH-2504 Biel, <a href="http://www.bfh.ch">www.bfh.ch</a>
RhB	Rhätische Bahn, RhB-Strasse 1, 7302 Landquart, <a href="http://www.rhb.ch">www.rhb.ch</a>
Stadler	Stadler Altenrhein AG, Industrie- und Gewerbepark, CH-9423 Altenrhein, <a href="http://www.stadlerrail.com">www.stadlerrail.com</a>
Empa	Abteilung Materialien und Komponenten für energieeffiziente Gebäude, Empa, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf, <a href="http://www.empa.ch/abt312">www.empa.ch/abt312</a>
EPFL	Laboratoire d'Énergie Solaire et de Physique du Bâtiment LESO-PB, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL, Station 18, 1015 Lausanne ; <a href="http://leso.epfl.ch">http://leso.epfl.ch</a>
HSLU	Hochschule Luzern - Technik & Architektur, Zentrum für Integrale Gebäudetechnik, ZIG, Technikumstr. 21, 6048 Horw: <a href="http://www.hslu.ch/zig">www.hslu.ch/zig</a>
Uni Basel	<i>Universität Basel, Departement Physik, Klingelbergstrasse 82, 4056 Basel; <a href="http://www.unibas.ch">www.unibas.ch</a></i>

Tabelle 1: Projektbeteiligte Wirtschafts- und Forschungspartner

## 2 Ist-Zustand Referenzfahrzeug (RFZ)

### 2.1 Leistungseigenschaften Fahrzeughülle

Die Anforderungen an die klimatischen Bedingungen im Innenraum wurden auf der Basis der bestehenden Fernverkehr Normen EN13129 diskutiert und festgelegt. Davon ausgehend wurde diskutiert, welche Leistungseigenschaften der Fahrzeughülle (U-Wert, Luftdurchlässigkeit) nötig sind, um den Anforderungen an die klimatischen Bedingungen im Innenraum zu entsprechen. Im Forschungsbericht der EPFL [2] sind die Klimaparameter quantifiziert, die dem Retrofit Projekt zugrunde gelegt werden. Diese Parameter wurden zusammen mit der RhB festgelegt.

### 2.2 Messeinrichtung BFH im Referenzfahrzeug [3]

Hinsichtlich der klimatischen Verhältnisse in der Fahrzeughülle gab es viele Vermutungen und wenig belastbare Aussagen. Mit der «Messeinrichtung BFH im RFZ» wurden die tatsächlichen Verhältnisse in der Fahrzeughülle messtechnisch ermittelt. Die gewonnenen Erkenntnisse beeinflussten die durchzuführenden Laborprüfungen sowie die Konstruktion und die Materialauswahl für die Prototyp-Konzepte.

Die Messeinrichtung zeichnete Daten des RFZ während der kompletten Laufzeit des Projekts auf und übertrug diese täglich an einen Datenserver. Durchgeführt wurden die Messungen in einem Steuerwagen aus der Serie «BDt 1751ff» der Rhätischen Bahn

#### 2.2.1 Planung der Messeinrichtung für das RFZ

Im Projekt „Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im öffentlichen Verkehr“ wurde der Energiebedarf für HLK im Schienenverkehr ermittelt und das Einsparpotential verschiedener Massnahmen ausgewiesen. Im Bereich der Heizenergie von Fahrzeugen des ÖV liegt nachweislich ein hohes Einsparpotential. Klimatischen Vorgänge im Querschnitt der Fahrzeugwand wurden diskutiert, ohne diese zu untersuchen. Die Vermutung war, dass folgende relevante Faktoren im Querschnitt der Fahrzeugwand auftreten:

- Kondensatbildung zwischen Aussenhülle und Wärmedämmung bei Bahnfahrzeugen
- Eisbildung zwischen der Aussenhülle und der Wärmedämmung von Bahnfahrzeugen
- Luftströmungen zwischen der Innenbekleidung und der Wärmedämmung aufgrund von Druckdifferenzen, welche die Lüftungsanlage des Bahnfahrzeugs hervorruft

Diese Parameter können einen merklichen Einfluss auf den Wärmeverlust über die Fahrzeughülle haben. Im Rahmen des oben genannten Projekts wurde durch die BFH der Einfluss von Luftströmungen und Kondensatbildung auf den U-Wert einer Fahrzeugwand mit einer Wärmedämmung aus Melaminharzschaum untersucht. Das Ergebnis in Abbildung 3 zeigt, dass beide Einflussfaktoren den Wärmeverlust durch eine Fahrzeugwand mit Wärmedämmung aus Melaminharzschaum deutlich beeinflussen.

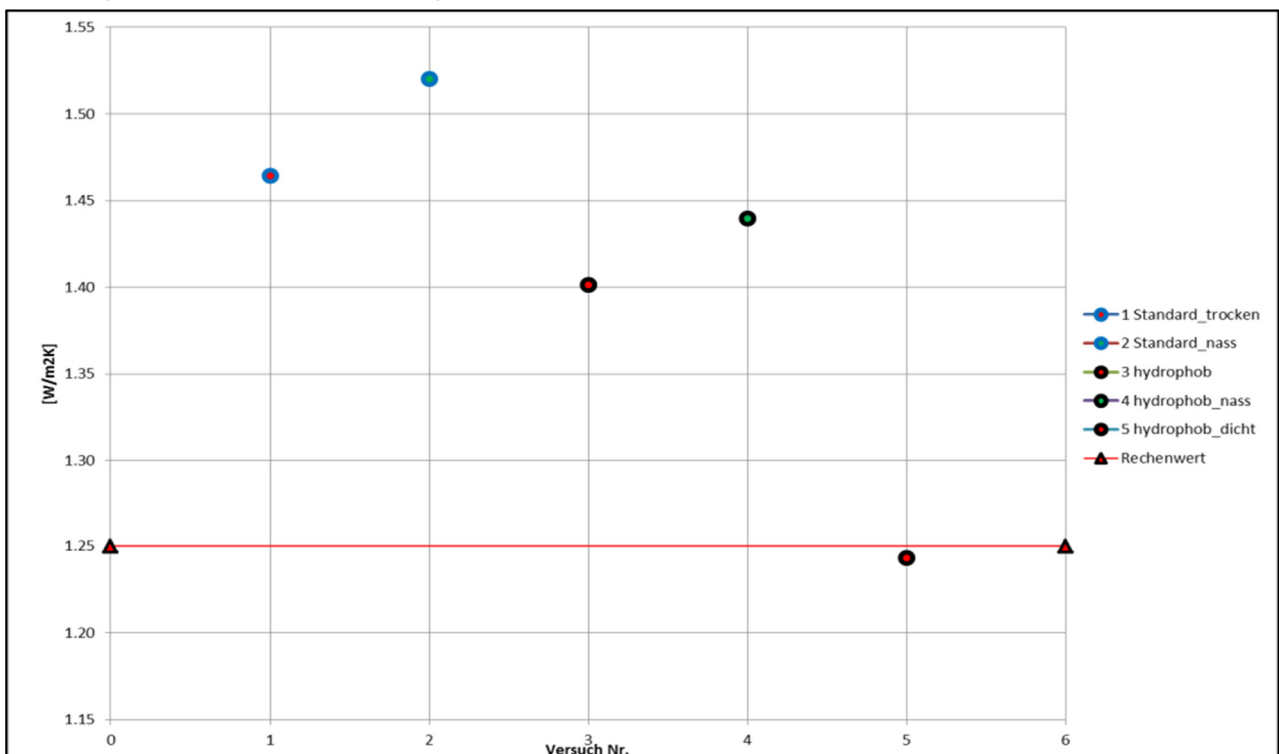


Abbildung 3: U-Wertmessdaten an einer Fahrzeugwand mit verschiedenen Melaminharzdämmstoffen und div. Feuchtegehalt

Legende zu Abbildung 3:

- Versuch 1 und 2: Melaminharzschaum nicht hydrophobiert (trocken und nass)
- Versuch 3 und 4: Melaminharzschaum hydrophobiert (trocken und nass)
- Versuch 5: Messung mit einer Konvektionsbarriere aus Polyethylen auf dem hydrophobierten Melaminharzschaum

Die rote Linie zeigt den rechnerischen U-Wert der geprüften Wandkonstruktion, welcher sich aus den Rechenwerten der wärmeschutztechnischen Kennwerte ergibt.

Aufgrund der oben beschriebenen Überlegungen und der durchgeführten Untersuchungen, wurde beschlossen, folgende Messgrößen im RFZ zu messen.

- Die Temperatur und die relative Feuchte der Aussenluft (durch «Messeinrichtung UNI Basel»)
- Die Temperatur und die relative Feuchte der Luft im Personenabteil («Messeinrichtung UNI Basel»)
- Die Oberflächentemperatur der Aussenhülle und der Innenbekleidung («Messeinrichtung BFH»)
- Die Temperatur und die relative Feuchte der Luft zwischen Aussenhülle und Wärmedämmung und zwischen Wärmedämmung und Innenbekleidung («Messeinrichtung BFH»)
- Die Luftgeschwindigkeit im Lufthohlraum zwischen Innenbekleidung und Wärmedämmung («Messeinrichtung BFH»)
- Die Wärmestromdichte über die Fahrzeugwand («Messeinrichtung BFH»)
- Die Druckdifferenz zwischen Personenabteil und Aussenklima («Messeinrichtung UNI Basel»)
- Die Globalstrahlung («Messeinrichtung UNI Basel»)
- Die Heizleistung der Konvektionsheizung im Personenabteil («Messeinrichtung UNI Basel»)

### 2.2.2 Einbau der Messeinrichtung BFH

Die Messeinrichtung BFH wurde an verschiedenen Stellen in der Wagenhülle angebracht:

- Im Niederflurbereich (vgl. Abbildung 4): Fensterbrüstung, Wandpfosten zwischen den Fenstern, Wand über dem Fenster
- Im Hochflurbereich: Fensterbrüstung, Wandpfosten zwischen den Fenstern, Wand über dem Fenster
- Im Gepäckraum: Wand neben dem Fenster, Wand über dem Fenster

Die Sensoren wurden auf der gleichen Wagenseite wie die Messstellen im Projekt «UNI Basel» eingebaut. Im Hochflurbereich ist dies rechts in Fahrtrichtung und im Niederflurbereich links in Fahrtrichtung.

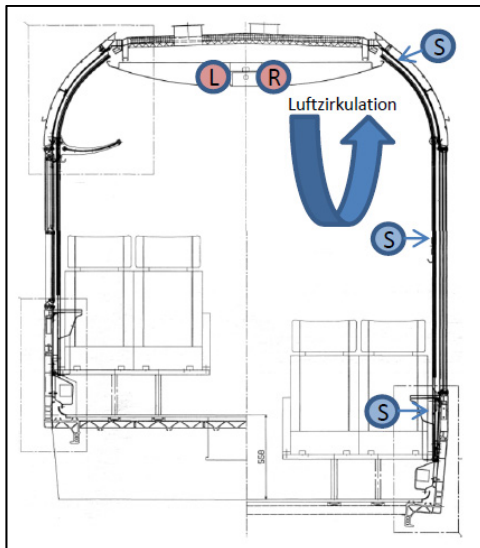


Abbildung 4: Vertikalschnitt Steuerwagen, Positionierung der Sensoren (S) im Niederflurbereich

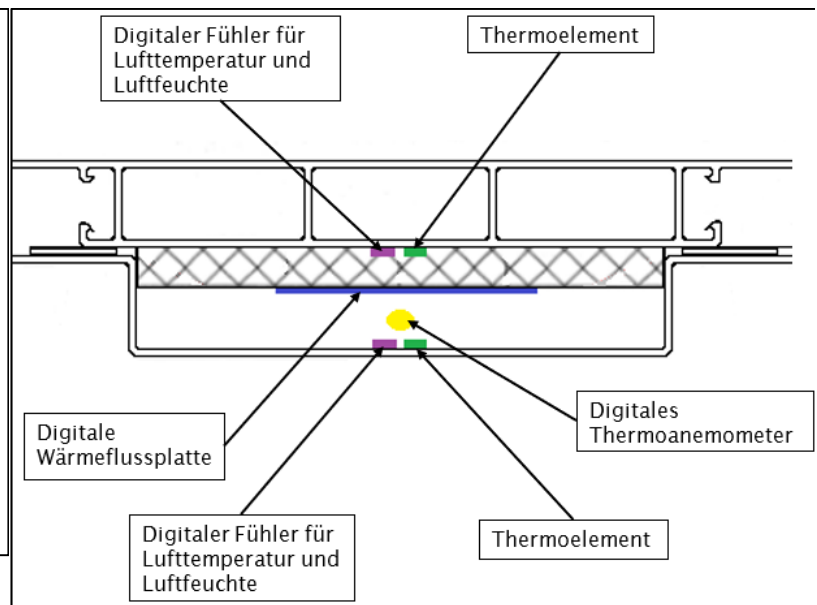


Abbildung 5: Anordnung der Sensoren im Pfosten zwischen den Fenstern

## 2.2.3 Auswertung der Messungen (10/2017 – 05/2018)

Die Messungen wurden im Zeitraum zwischen Oktober 2017 und Mai 2018 durchgeführt. Aus den Messungen können folgende erste Schlussfolgerungen gezogen werden.

### Temperaturmessung

- Extrem auffällig sind die Oberflächentemperaturen der Innenbekleidung der Wand unter dem Fenster, sowohl im Hochflurbereich als auch im Niederflurbereich. Bei Raumlufttemperaturen im Bereich von 18°C bis 25°C wurden an diesen Messstellen im Beobachtungszeitraum von September 2017 bis April 2018 Temperaturen bis 64°C gemessen. Diese hohen Oberflächentemperaturen hängen eindeutig mit der Heizleistung der Konvektionsheizung im Personenabteil zusammen. Abbildung 6: .
- Thermografieaufnahmen zeigen, dass die Temperatur der Heizung während der Aufheizphase auf über 90°C ansteigt. Diese Bilder von Samuel Brunner (Empa) wurden während der Aufheizphase des Fahrzeugs nach der Nachtabenkung aufgenommen.

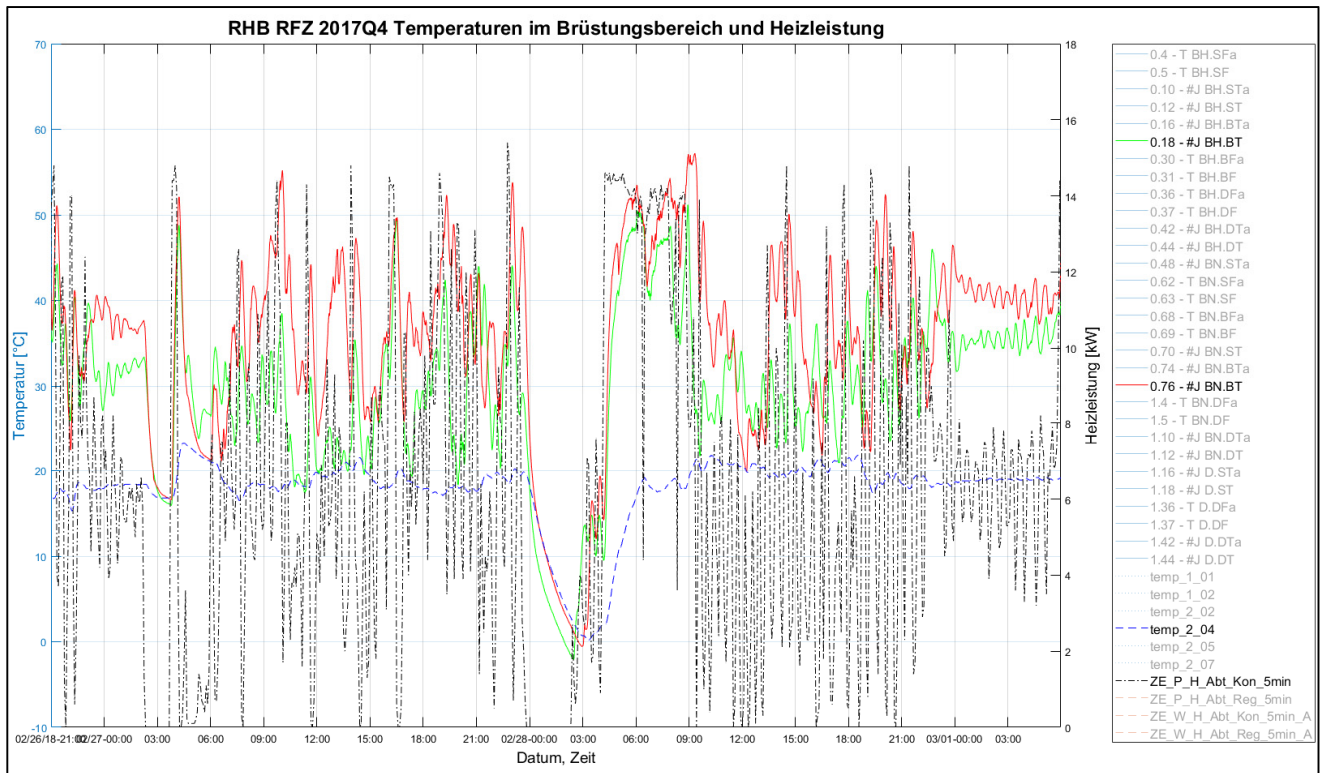
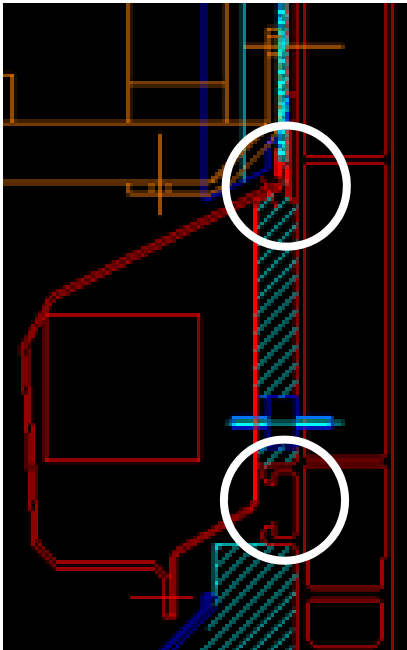


Abbildung 6: Lufttemperatur im Personenabteil (blau gestrichelt), Oberflächentemperatur an der Innenbekleidung im Brüstungsbereich hinter der Heizung (Niederflurbereich: rot und Hochflurbereich: grün) und Heizleistung der Konvektionsheizung im Personenabteil (schwarz gestrichelt)

- Bei Tunneldurchfahrten steigen die Aussentemperaturen markant an, um anschliessend ebenso markant wieder abzusinken. Die beobachtete kurzfristige Schwankung der Aussentemperatur bei den Tunneldurchfahrten führt hinsichtlich des Klimas in der Fahrzeugwand zu keinen erkennbaren Problemen. Es ist nicht geklärt, welche Auswirkungen die Tunneldurchfahrten in Bezug auf die Feuchte im Fahrzeug und auf eine eventuelle Tauwasserbildung im Querschnitt der Fahrzeugwand haben.
- Die Messung der Lufttemperaturen im Fahrgastraum und im Gepäckraum zeigt, dass die Nachtabenkung nicht jede Nacht und auch nicht immer in beiden Räumen einsetzt. Durch eine noch konsequenteren Nutzung der Nachtabenkung könnte zusätzlich Heizenergie eingespart werden.



- Die hohen Temperaturen an der innenliegenden Brüstungsbekleidung und der ungenügend gedämmte Wandaufbau (vgl. Abbildung 7) verursachen hohe Wärmeverluste. Hier besteht grosses Potential zur Heizenergieeinsparung.
- Eine Verbesserung der Wärmedämmung im Brüstungsbereich sollte mit folgenden Massnahmen kombiniert werden:
  - Absenkung der Maximaltemperatur der Heizung
  - Thermische Trennung der Befestigung der Heizung an der Aussenhülle des Fahrzeugs
  - Anbringen einer reflektierenden Schicht zwischen Heizung und Aussenhülle

Abbildung 7: Vertikalschnitt Fahrzeughülle, Heizung inkl. Befestigung an der Fahrzeugwand

### Wärmeströme im Querschnitt der Fahrzeugwand

- Die Wärmestromdichten liegen bei fünf der acht Wärmeflussplatten nahe beieinander. Deutlich erhöhte Wärmestromdichten messen wir bei 3 Wärmeflussplatten.
- Zwei Wärmeflussplatten mit erhöhten Wärmestromdichten liegen im Brüstungsbereich des Niederflur- und des Hochflurbereichs. Dies deckt sich mit den gemessenen Temperaturen im Brüstungsbereich und unserer Aussage bzgl. erhöhter Wärmeverluste an diesen Stellen.
- Eine Wärmeflussplatte mit stark erhöhter Wärmestromdichte befindet sich im Bereich neben dem Fenster des Gepäckabteils. Aus den gemessenen Temperaturen ergibt sich keine Erklärung für diese hohe Wärmestromdichte. Bei der Montage der «Messeinrichtung BFH» haben wir festgestellt, dass die Wärmedämmung in diesem Bereich eine geringere Dicke aufweist als im Personenabteil. Hieraus erklärt sich das abweichende Verhalten hinsichtlich der Wärmestromdichte an dieser Messstelle.

### Feuchtemessung

- Temperatur- und Feuchtebedingungen in der Fahrzeugwand, bei denen Kondensatbildung auftreten können, treten im Beobachtungszeitraum nur in wenigen kurzen Zeiträumen auf. Auf diese Zeiträume mit kritischen Feuchtebedingungen folgen immer Zeiträume mit einer deutlichen Abtrocknung. Sofern an der jeweiligen Messposition überhaupt Kondensatbildung auftritt, ist diese nur kurzfristig und führt nicht zu einer dauerhaften Auffeuchtung der Baustoffe.
- Die relative Feuchte der Aussenluft im Auswertzeitraum von September 2017 bis April 2018 deckt ein breites Spektrum ab (17% rH. bis 98% rH.) wobei langanhaltende Zeiträume mit relativen Luftfeuchten > 90% vorliegen.
- Im Auswertzeitraum ist die relative Luftfeuchte der Raumluft insgesamt niedrig. Relative Feuchten der Raumluft >50% treten nur sehr kurzfristig auf, eine Akkumulation der relativen Feuchte im Fahrzeug ist aus den vorliegenden Messwerten nicht ersichtlich, kritische relative Feuchten werden im Auswertzeitraum nicht erreicht. Tabelle 2 zeigt die Situation:

Monat	Messstelle 2-02			Messstelle 2-04			Messstelle 2-05			Messstelle 2-07		
	Min.	Max.	Ø	Min.	Max.	Ø	Min.	Max.	Ø	Min.	Max.	Ø
10/2017	8.9%	74.3%	31.5%	10%	62.6%	30.9%	8.5%	68.7%	30.3%	0.1%	77.2%	29.3%
11/2017	10.9%	56.7%	25.4%	9.0%	50.3%	24.7%	8.0%	55.9%	24.1%	6.1%	62.6%	22.4%
12/2017	8.1%	72.1%	25.3%	8.3%	66.1%	23.6%	7.3%	71.9%	23.3%	4.4%	84.9%	20.9%
01/2018	10.3%	76.3%	29.2%	8.7%	68.9%	26.3%	8.0%	82.0%	25.6%	0.4%	73.5%	23.3%
02/2018	7.4%	75.1%	23.3%	6.5%	60.0%	21.3%	5.2%	65.5%	20.2%	1.7%	68.3%	16.8%
03/2018	8.3%	67.8%	25.9%	8.1%	58.3%	23.9%	6.2%	68.8%	22.6%	1.1%	80.9%	20.4%
04/2018	9.5%	69.8%	30.0%	9.2%	61.7%	28.4%	8.1%	66.9%	27.6%	0.2%	74.6%	27.2%

Tabelle 2: Relative Feuchte der Raumluft im Beobachtungszeitraum

- Im Querschnitt der Fahrzeugwand werden relative Luftfeuchten  $> 90\%$  nur an den Messstellen in der «Wand über dem Fenster» zur Aussenhülle hin gemessen. Dass die Wand über dem Fenster an allen 3 Messpositionen besonders hohe Feuchtwerte aufweist, kann folgendermassen erklärt werden:

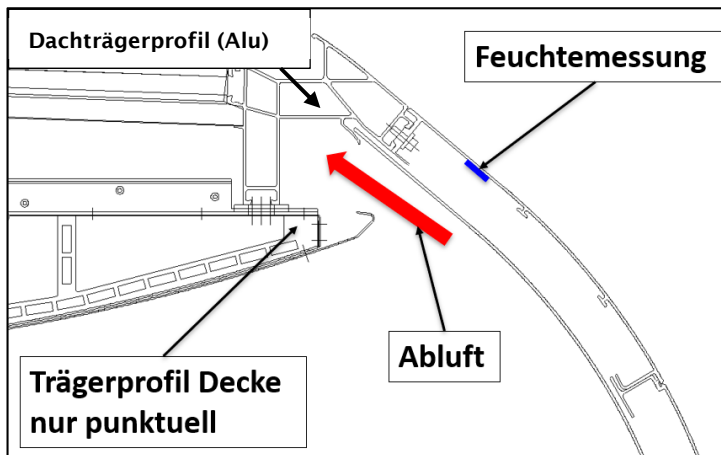


Abbildung 8: Vertikalschnitt Fahrzeughülle - Wand über dem Fenster

Die mit Feuchtigkeit angereicherte Abluft wird durch einen Spalt zwischen der Deckenbekleidung und der Innenbekleidung der Wand abgeführt, bevor sie das Fahrzeug durch einen Kamin im Dach verlässt. In diesem Bereich befindet sich eine Feuchtemessstelle. Der Anschluss der Innenbekleidung an das Dachträgerprofil ist nicht dampfdicht. Es ist ein Dampfdruckausgleich zwischen der Abluft und dem Querschnitt der Fahrzeugwand möglich (vgl. Abbildung 8).

- Die Tunneldurchfahrten (Vereinatunnel und Albulatunnel) führen zu einer Erhöhung der relativen Luftfeuchte in der Fahrzeugwand (vgl. Abbildung 9), die an den unterschiedlichen Messstellen unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Die Erhöhung der relativen Luftfeuchte bei den Tunneldurchfahrten bleibt, bis auf wenige Ausnahmen, in einem unkritischen Bereich.

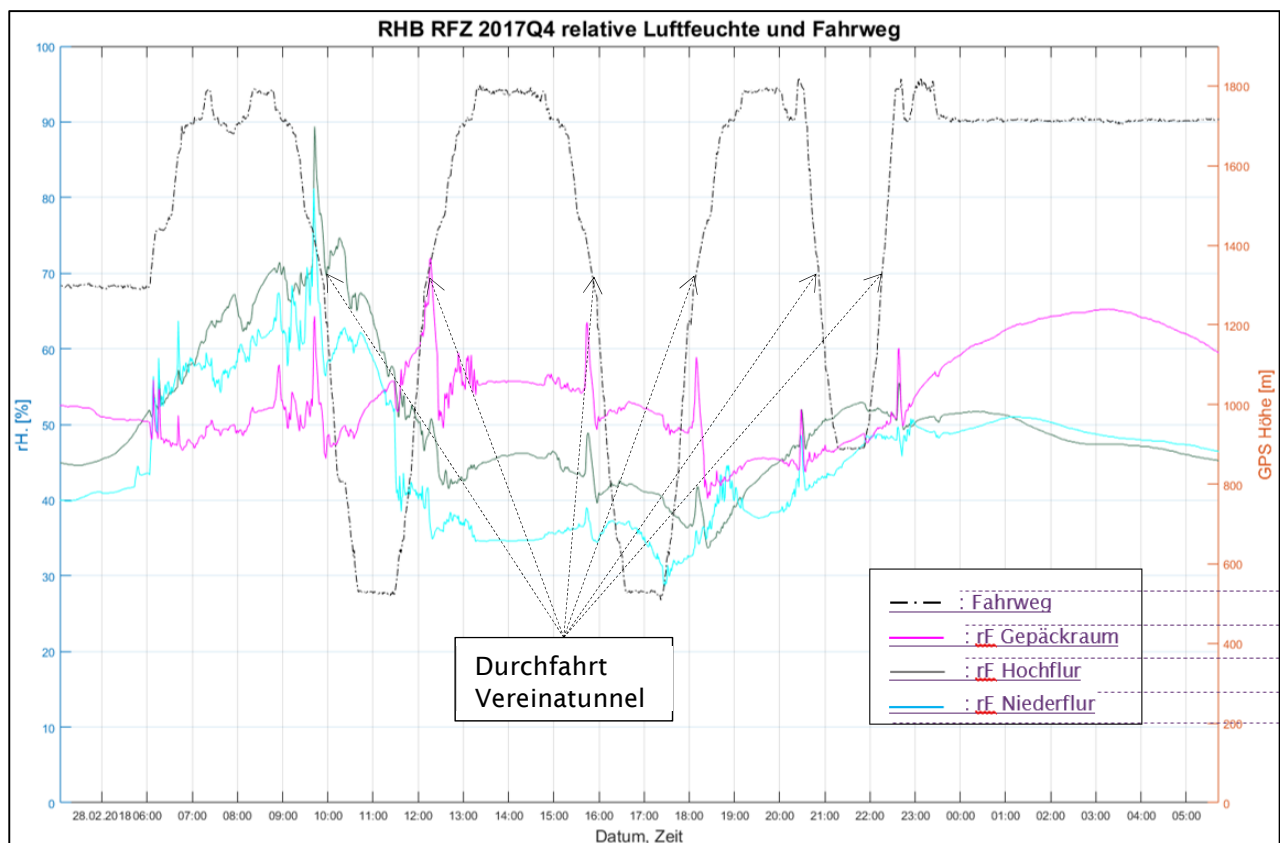


Abbildung 9: Fahrweg und Verlauf der relativen Luftfeuchte in der Wand über den Fenstern

- Die Spitzenwerte der relativen Feuchte in der Fahrzeugwand lassen sich keinem bestimmten Fahrweg zuordnen. Diese Spitzenwerte treten bei Fahrten im Oberengadin, im Unterengadin und bei Tunneldurchfahrten auf. Fahrten im Churer Rheintal führen nicht zu Spitzenwerten der Feuchtebelastung. Eine Gesetzmässigkeit ist nicht erkennbar.

Da die relative Luftfeuchte aufgrund ihrer Temperaturabhängigkeit für Vergleiche von unterschiedlichen Messstellen nicht geeignet ist, wurden die relativen Luftfeuchten in absolute Luftfeuchten umgerechnet. Damit ist ein aussagekräftiger Vergleich von unterschiedlichen Messstellen möglich. Weiterhin wurden die Taupunkttemperaturen der oberflächennahen Luftschichten errechnet und mit den Oberflächentemperaturen der zugehörigen Flächen verglichen.

- Die Auswertung über die absolute Feuchte und die Taupunkttemperatur der oberflächennahen Luftschichten deckt sich mit den Erkenntnissen aus der Auswertung der relativen Feuchte.
- Die absolute Feuchte der Raumluft (Gepäckraum und Personenabteil) ist im Fahrbetrieb tendenziell geringfügig höher als die absolute Feuchte der Aussenluft. Grundsätzlich ist erkennbar, dass die Feuchte der Raumluft und die Feuchte der Luft im Querschnitt der Fahrzeugwand der absolute Feuchte der Aussenluft folgen. Damit ist auch die niedere relative Luftfeuchte der Raumluft in den Wintermonaten erklärt.

Von Jannis Wernery (Empa) wurde untersucht, ob es einen Zusammenhang zwischen der relativen Feuchte im Personenabteil und der Personenbelegung (ermittelt aus der CO<sub>2</sub> Konzentration der Luft im Personenabteil) gibt. Das zusammenfassende Ergebnis lautet:  
«Aus den betrachteten Daten zu CO<sub>2</sub>-Konzentration und relativer Feuchte im Personenabteil ist kein direkter Zusammenhang zwischen diesen Variablen erkennbar. Hingegen korreliert die relative Feuchte innen mit der relativen Feuchte aussen. Dieser Zusammenhang ist ausgeprägter bei feuchtem Aussenklima, erklärt jedoch nur einen Teil der Variation der Innenfeuchte.»

#### **Luftströmung im Querschnitt der Fahrzeugwand**

- Nur an zwei von sieben Messstellen waren Luftströmungen erkennbar. Die gemessenen Luftgeschwindigkeiten lassen sich auf natürliche (nicht erzwungene) Konvektion zurückführen.
- Daher kann bei der Vorauswahl der Prototypkonzepte auf Lösungen mit Konvektionsbarriere verzichtet werden.

### **2.3 Stationäre Messungen am Referenzfahrzeug [4]**

Zur Erfassung des Ist-Zustandes des Steuerwagens wurden folgende Messungen durchgeführt:

#### **2.3.1 Aufheizversuch**

Der Aufheizversuch wurde in der Werkhalle Samedan bei abgeschaltetem Fahrzeug mit sechs Heizlüftern à ca. 2 kW Leistung durchgeführt. Aus der Kurve des Aufheizversuchs wurde die Zeitkonstante für den Steuerwagen mit 120 Minuten ermittelt.

Der mittlere U-Wert des Wagens wurde im eingeschwungenen Zustand aus der Temperaturdifferenz zwischen Innenlufttemperatur im Wagen und Aussenlufttemperatur in der Halle mit der eingebrachten Heizleistung der Heizlüfter und der Hüllfläche des Wagens berechnet. Der mittlere U-Wert 1.76 W/(m<sup>2</sup>·K) für den Wagen BDt 1758 war deutlich unter den Erwartungen. Der im Aufheizversuch ermittelte mittlere U-Wert gilt nur unter den bei diesem Versuch herrschenden Bedingungen in der Halle, mit konvektiver Wärmeinbringung im Inneren. Der äussere Wärmeübergangswiderstand dürfte dabei statt bei den normierten 0.04 m<sup>2</sup>K/W bei den für innen geltenden 0.125 m<sup>2</sup>K/W liegen. Im Wageninneren hingegen ist mit einem höheren Wärmeübergangswiderstand zu rechnen, da der Strahlungsanteil praktisch vollständig fehlt. Das wird vermutlich durch eine leicht erhöhte Konvektion infolge grösserer Luftbewegung durch die Heizlüfter teilweise kompensiert. Rechnet man den mittleren U-Wert aus dem Aufheizversuch auf Norm-Randbedingungen um, ergibt sich ein mittlerer U-Wert von  $U_m = 2.69 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

#### **2.3.2 Aussenluftvolumenstrom Lüftungsanlage**

Die vorhandenen Angaben zu den Aussenluftmengen der Lüftungsanlage waren mit grossen Unsicherheiten behaftet. Deshalb wurden die Aussenluftmengen im Anschluss an den Aufheizversuch am Fahrzeug BDt 1752 gemäss Abbildung 10 durchgeführt. Das Lüftungsgerät des Fahrzeugs besteht aus zwei Zuluftventilatoren, die die Aussenluft separat über den beiden Aussenlüftern ansaugen. Passend auf das Aussenluftgitter wurde eine Messbox luftdicht über das Aussenluftgitter angebracht und so der Aussenluftvolumenstrom gemessen. Bei der Messung wurde die Drehzahl des Ventilators und die IRIS-Blende so eingestellt, dass die Druckdifferenz  $dP_2$  in der Messbox zur Umgebung 0 war, um keinen zusätzlichen Druckverlust mit dem Messsystem zu erzeugen. Mit der Druckdifferenz  $dP_1$  und der Kennlinie der VV-Control-Einheit wurde der Aussenluftvolumenstrom für jede Seite und pro Lüftungsstufe bestimmt. Der Aussen-

Luftvolumenstrom ergibt sich aus der Summe der beiden Luftvolumenströme und ist in Funktion der Lüfterstufe in Abbildung 11 dargestellt. Gemäss Datenblatt des Herstellers ist der Volumenstrom 340 m<sup>3</sup>/h auf Stufe 1, 800 m<sup>3</sup>/h auf Stufe 2, 1300 m<sup>3</sup>/h auf Stufe 3 und 1800 m<sup>3</sup>/h auf Stufe 4. Auffallend ist, dass der Volumenstrom auf der rechten Seite nur ca. halb so gross ist wie auf der linken Seite. Abklärungen haben ergeben, dass aus noch nicht geklärten Gründen der Ventilator auf der rechten Seite eine geringere Drehzahl hatte als derjenige auf der linken Seite.

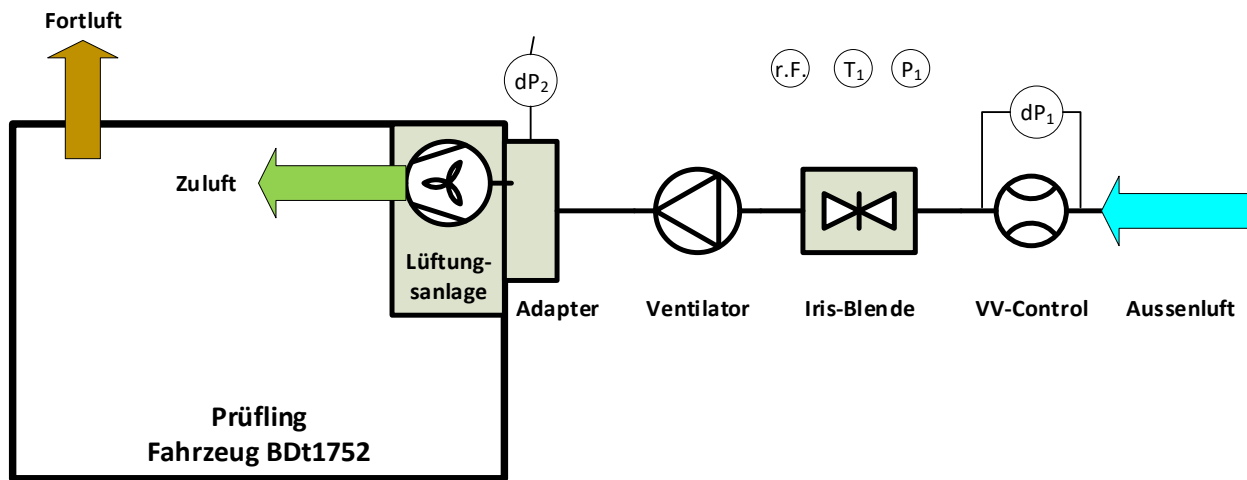


Abbildung 10: Messaufbau Aussenluftmengenmessung

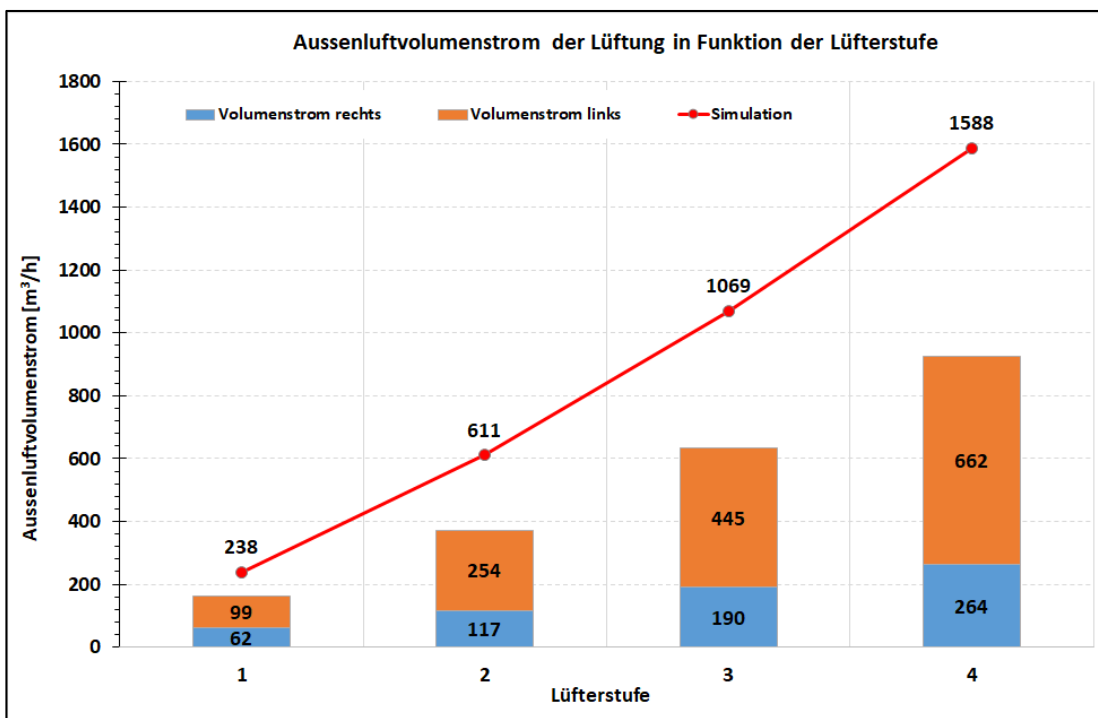


Abbildung 11: Messung und angewandter Aussenluftvolumenstrom der Lüftungsanlage in der Simulation

### 2.3.3 Luftdichtheit

Die Luftdichtigkeit wurde zum einen im Unter- und Überdruck mit einer Blowerdoor-Messung und zum anderen ohne Druckdifferenz mit einer Tracergasmessung ermittelt.

Beim Blowerdoor-Test wurden alle Fortlufthauben, die Zu- und Abluft der Klimaanlage des Führerstands und die Aussenluftgitter abgedichtet. Im Fahrzeug wurde bei verschiedenen Unter- und Überdrücken von 5 bis 50 Pascal (50 Pa entspricht einem Winddruck von ca. 30 km/h) der Luft-Volumenstrom gemessen. Nach EN 13829, Verfahren B wurde für den Steuerwagen die Luftdurchlässigkeit  $q_{50}$  von 1.7 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h) bei 50 Pa ermittelt. Die Anforderung an die Luftdichtheit von Gebäuden nach SIA 180:2014 (Neubauten, mechanisch gelüftet) beträgt  $q_{50} = 1.6$  m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h). Damit liegt der Steuerwagen um 0.1 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h) über dem Grenzwert für mechanisch belüftete Gebäude.

Mit der Tracergasmessung wird die Infiltration der Aussenluft (volumenbezogener Leckagestrom der Aussenluft) unter natürlichen Bedingungen im Stillstand bei ausgeschalteter Lüftung ohne das Abdichten von Öffnungen bestimmt. Mit dem Aussenluftvolumenstrom konnte der Wärmeverlust im Stillstand berechnet und in der Simulation berücksichtigt werden. Im Anschluss an den Aufheizversuch wurden in den beiden Zonen «Abteil» und «Gepäck» Tracergas SF<sub>6</sub> über die Heizlüfter eingeblasen. Nach dem Erreichen von ca. 35 ppm SF<sub>6</sub> im Abteil wurden die Heizlüfter ausgeschaltet und das Abklingen der Gaskonzentration gemessen. Beide Innentüren vom Abteil zum Gepäck sowie die Türe zum Führerstand waren geschlossen. Die Berechnung der eindringenden Aussenluft über die Abnahme der Gaskonzentration wurde im Bereich ähnlicher Gaskonzentration für Abteil und Gepäckraum durchgeführt und in Tabelle 3 zusammengefasst.

Wo	Was	Einheit	Wert
Abteil	Raumvolumen	m <sup>3</sup>	66
	Luftwechselrate	1/h	0.13
	Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h	9
Gepäck	Raumvolumen	m <sup>3</sup>	49
	Luftwechselrate	1/h	0.34
	Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h	17
Mittelwert (Volumengewichtet)	Luftwechselrate	1/h	0.22
	Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h	26

Tabelle 3: Infiltration Aussenluft im Stillstand in der Halle

### 2.3.4 Infrarotaufnahmen

Die folgenden Infrarotaufnahmen wurde am Ende der Aufheizphase in der Halle in Samedan durchgeführt. Abbildung 12 zeigt die Wärmebrücken auf beiden Seiten am Dachübergang. Die seitliche Eingangstüre mit dem Senkfenster im Gepäckraum zeigt Abbildung 13. In der Mitte des Bilds stört der Stahlträger der Halle und rechts unten die Messeinrichtung des Aufheizversuchs. Abbildung 14 wurde während der Fahrt bei einer Aussentemperatur von ca. -10°C erstellt. Im linken Bild sind die unterschiedlichen Oberflächen-temperaturen und Wärmebrücken an der Aussenwand und den Türen ersichtlich. Abbildung 15 zeigt die hohen Temperaturen während einer Aufheizphase im Bereich der Radiatoren. Infolge der hohen Radiator-temperatur wird die Wärme nicht nur konvektiv, sondern auch via Strahlung an die umliegenden Oberflächen abgegeben. In der Simulation konnten diese lokalen Verhältnisse nicht berücksichtigt werden, da dies mit den verfügbaren Modellen nicht möglich ist.

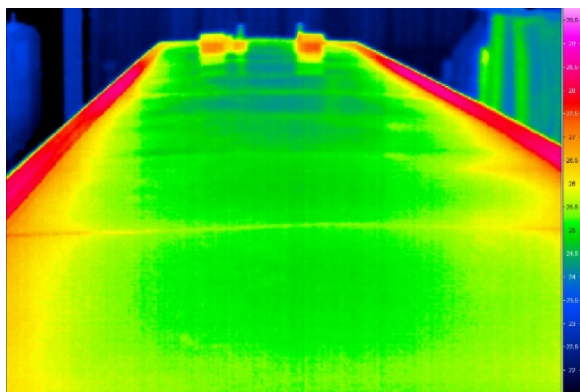


Abbildung 12: Wärmebrücke Übergang Dach - Wand

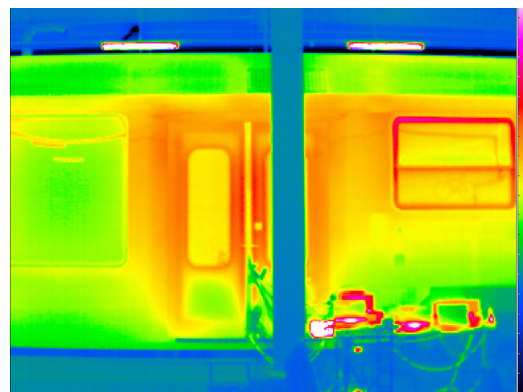


Abbildung 13: Einstiegstüre und Senkfenster

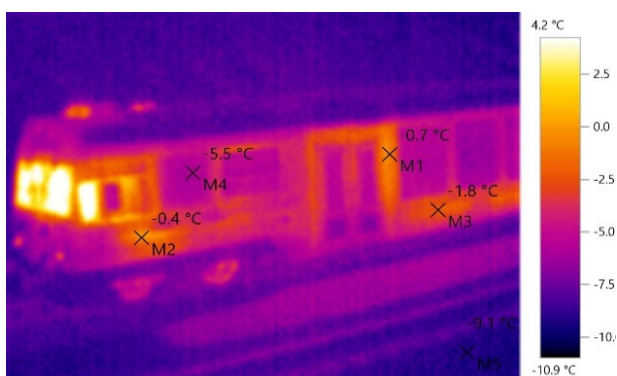


Abbildung 14: Seitenwand während der Fahrt bei -10 °C

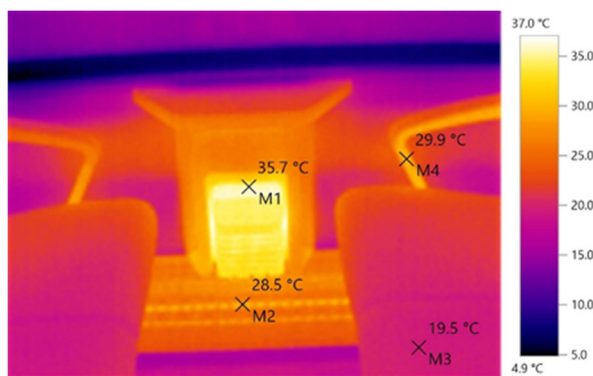


Abbildung 15: Radiator im Abteil

## 2.4 Auswertung Messdaten Uni Basel [2]

Die Auswertung mittels multipler Regression hat einen effektiven mittleren U-Wert der Fahrzeughülle ergeben. Nach der Berücksichtigung aller Parameter, wurde für den Steuerwagen BDt 1751ff der RhB im jetzigen Zustand vor dem Retrofit ein U-Wert von  $2.77 \pm 0.13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  berechnet. Dieses Ergebnis ist plausibel im Vergleich zum U-Wert aus dem Aufheizversuch (U-Wert:  $2.69 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ).

Weiterhin wurde aufgezeigt, dass der Energieverbrauch der Heizung:

- stark vom U-Wert der Fahrzeughülle abhängt
- mit dem Lüftungsvolumenstrom und der Solarenergieeinstrahlung korreliert

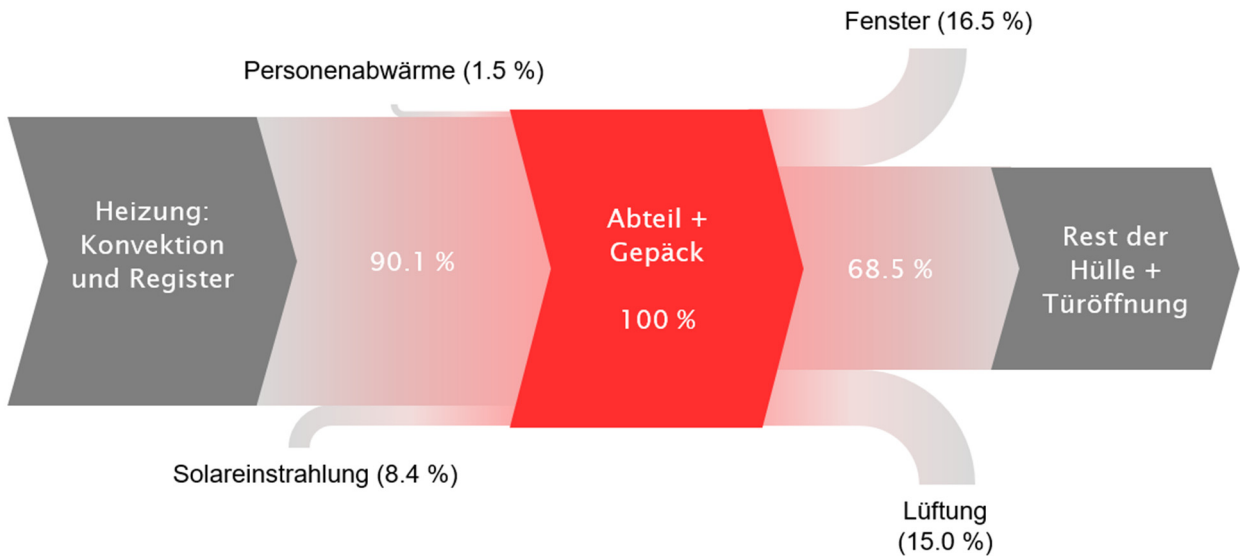


Abbildung 16: Sankey-Energieflussdiagramm Abteil und Gepäck im Winterhalbjahr 2017-18

Wie in Abbildung 16 dargestellt ist, gehen beim Ist-Zustand des Fahrzeugs 16.5 % der thermischen Energie über die Fenster, 15.0 % durch die Lüftung und 68.5 % über den Rest der Hülle verloren. Verluste durch die Türöffnung sind im «Rest der Hülle» berücksichtigt. Das Energiesparpotential durch eine verbesserte Fahrzeughülle ist demzufolge als erheblich einzustufen.

## 2.5 Thermische Simulation [4]

Das Simulationsmodell zur Berechnung der IST-Situation wurde auf Basis der vorhandenen Pläne von Stadler Rail als 3D-Modell in SketchUp erstellt und in die Simulationssoftware IDA-ICE importiert. Das 3D-Modell wurde in die drei Zonen Abteil, Gepäck und Führerstands aufgeteilt. Die Hüllfläche wurde in 18 konstruktiv abweichende Flächen aufgeteilt. In der nachfolgenden Seitenansicht des Steuerwagens ist die Einteilung der Fenster-, Tür-, Pfosten-, Wand-, Brüstungs- und Dachflächen mit entsprechender Kennzeichnung erkennbar. Für jede dieser Flächen wurde im Modell die Konstruktion gemäss Plänen implementiert.

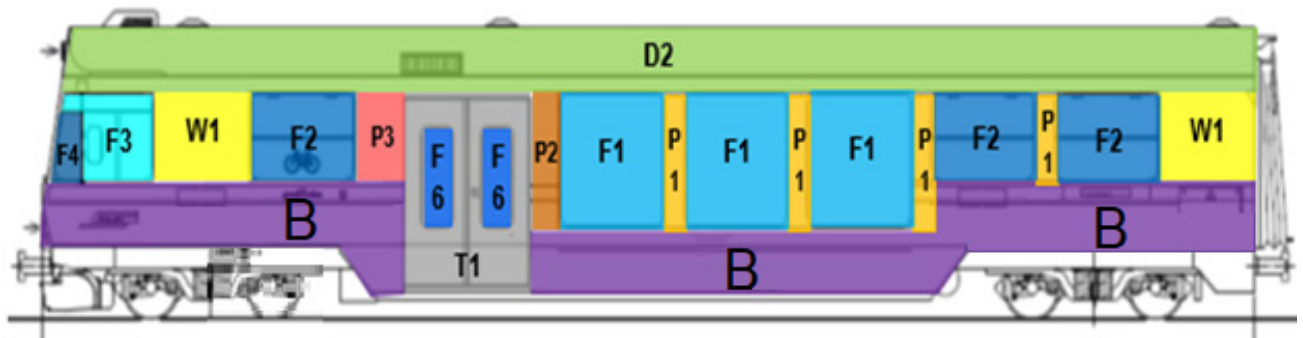


Abbildung 17: Flächeneinteilung Zugwagenhülle, Seitenansicht Steuerwagen BDt 1751ff

In der Jahressimulation wurde das Fahrzeug konstant nach Südwest ausgerichtet. Die Umgebungsbedingungen wie Aussentemperatur und -feuchte, Solarstrahlung und Fahrgeschwindigkeit konnten aus den Messungen der Universität Basel für das Jahr 2017 entnommen werden. Die Türöffnungen wurden durch das Öffnen der Seitentüre und der Innentüre zum Abteil für 20 Sekunden bei jedem Halt berücksichtigt. Die Passagierzahlen wurden in Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration und der Aussenluftmenge berechnet. Die gemessene Aussenluftmenge der Infiltrationsmessung wurde in der Simulation als konstanter Aussenluftvolumenstrom berücksichtigt. Das Modell wurde mit den Daten aus dem Aufheizversuch, der Infiltrationsmessung, der gemessenen Jahresenergie für Heizung und Lüftung mit einer Abweichung von 0.1 % kalibriert. Das Energieflussdiagramm zeigt die Aufteilung der erforderlichen Energie von 52 MWh/a vor der Sanierung. 73.9 % der Energie werden zur Deckung der Transmissionsverluste durch die Wagenhülle benötigt. Der Wärmebrückenanteil wurde in den einzelnen Bauteilen integriert und beträgt ca. 10 MWh/a.

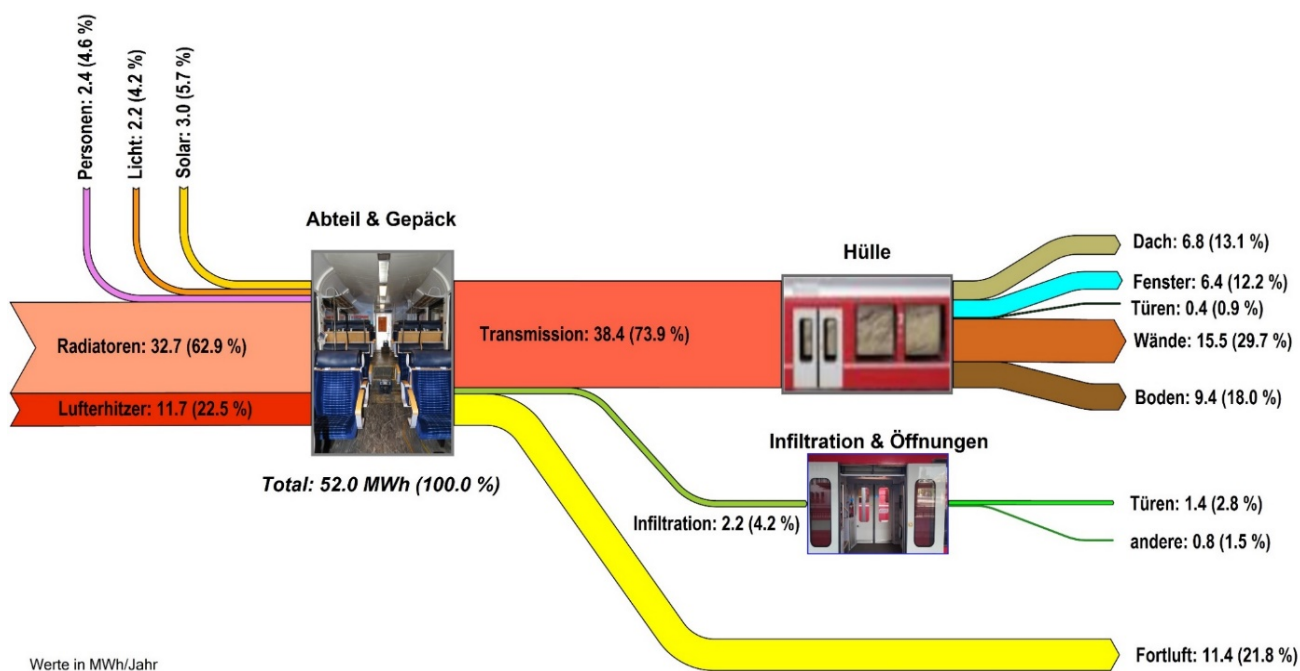


Abbildung 18: Energieflussdiagramm des Steuerwagen BDt 1758 vor der Sanierung

## 2.6 Konstruktionsanalyse Steuerwagen [5]

Durch die In-Situ-Analyse des Steuerwagens BDt 1753 bei der RhB in Landquart wurden Abweichungen zwischen der Ausführung und den Konstruktionsplänen von Stadler Rail festgestellt. Insbesondere die Ausbildung der Wärmedämmung, der Wärmebrückenüberdämmung, der Brüstungskonstruktion und der Verglasung ergaben wesentlichen Differenzen zwischen ursprünglicher Werkplanung und vorhandener Hüllkonstruktion. Der tatsächliche Konstruktionsaufbau wurde für alle Teilflächen in einer Bauteiltabelle erfasst.

Eine wichtige Erkenntnis war, dass die Freiräume in den Seitenwänden, in welchen die Wärmedämmung installiert wird, unterschiedlich gross sind. Die detaillierte Untersuchung hat gezeigt, dass eine Vielzahl von unterschiedlich ausgeprägten Wärmebrücken besteht (vgl. Abbildung 19ff.).

Bei der Festverglasung F1 im Niederflurbereich wurden Glastypen mit und ohne Beschichtung entdeckt (vgl. Abbildung 21). Im Hochflurbereich waren zu diesem Zeitpunkt nur unbeschichtete Fenstergläser F2 eingebaut. In den Produktionsplänen der Firma Stadler wird der U-Wert für die Seitenfenster F1 mit 1.5 W/(m<sup>2</sup>·K) und für die Senkfenster F2 mit 3.1 W/(m<sup>2</sup>·K) angegeben. Gemäss AGC Glass Europe wurden bei der Fahrzeugproduktion ausschliesslich Verglasungen ohne Wärmedämmbeschichtung eingesetzt. Der U-Wert dieser Isolierverglasungen beträgt 3.1 W/(m<sup>2</sup>·K)<sup>1</sup>.

Bei der Untersuchung der konstruktiven Anbindung der Heizung an die Fahrzeughülle hat sich bestätigt, dass hier ein grosses Potential für Wärmeverluste besteht (vgl. Abbildung 22). Die weiterführenden Entwicklungsarbeiten und die numerischen Berechnungen wurden auf die neuen Erkenntnisse der In-Situ-Analyse abgestimmt.

<sup>1</sup> Angabe gemäss AGC Glass Europe



Abbildung 19: Wärmebrücke Seitenwandkonstruktion



Abbildung 20: Wärmebrücken mit Korkstreifen abgedeckt



Abbildung 21: Untersuchung einer Verglasung mit IR-Reflexionsschicht (Glas F1 - Niederflurbereich)



Abbildung 22: Anbindung der Heizung

### 3 Prototypkonzepte

#### 3.1 Recherche nach innovativen Wärmedämmstoffen [6]

Ein Besuch beim Bahnproduzenten Stadler<sup>2</sup> verschaffte einen Überblick über die aktuell in Neufahrzeugen verbaute Wärmedämmung. Ein Augenmerk galt dabei der Konstruktion und Überdämmung von Wärmebrücken. Aus einem vorgängigen Projekt ist eine Bibliothek über Wärmedämmmaterialien [7] für Bahnfahrzeuge vorhanden. Ausgehend von dieser Bibliothek wurde gezielt nach innovativen Wärmedämmstoffen auf Webseiten von Herstellern, in branchenspezifischen Online-Magazinen und mittels Direktkontakt bei internationalen Spezialisten der Bahnfahrzeugindustrie gesucht.

Der Besuch bei Stadler zeigte auf, welche Wärmedämmmaterialien zurzeit in Neufahrzeugen eingebaut werden. Dies ist hauptsächlich Melaminharzschaum mit einer selbstklebenden Fläche. Im Bodenbereich und an kritischen Stellen hinsichtlich Kondenswasserbildung wird Melaminharzschaum mit einer Drainageschicht eingesetzt. Wärmebrücken werden durch konstruktive Massnahmen so weit wie möglich vermieden. Bei der Verbindung von Seitenwandkonstruktion und Innenbekleidung werden Kunststoff- bzw. Hartgummierelemente zur thermischen Trennung eingesetzt. Einzig der Anschluss zum Fahrgastsitz wird aufgrund der notwendigen Festigkeit mit einer starren Metallverbindung ausgeführt.

Die branchenspezifische Recherche ergab folgende Erkenntnisse:

- Chinese railway company (CRRC) dominiert den Markt der Zughersteller, v.a. im Bereich der Hochgeschwindigkeitszüge. Nächstgrössere Player sind Kawasaki, Hitachi, Alstom und Indian Railways.
- «Lightweight» ist ein Thema, welches aktuell die komplette Branche beschäftigt.
- Vergleichbare Forschungsprojekte zur Energieeinsparung in den USA haben Finanzierungsvolumen von mehreren 10 bis 100 Millionen Dollar. Bei diesen Projekten werden mehrere Aspekte gleichzeitig betrachtet: Heizung-Lüftung-Klimatisierung, Beleuchtung, Bodenbelag und Bodendämmung, Bestuhlung und Wandisolation. Wärmedämmmaterialien werden in solchen Projektbeschreibungen nicht im Detail aufgeführt oder beschrieben.
- Die durchgeführte Recherche hat keine neuen Ergebnisse erbracht, die über die Informationen in der erwähnten Bibliothek zu Wärmedämmmaterialien hinausgehen.

Nachdem die Recherche im Umfeld der Bahnindustrie keine nützlichen Neuerungen erbracht hat, wurde eine Zusatzrecherche ohne Fokussierung auf den Bahnbereich durchgeführt. In erster Linie wurden Dämmstoffe mit einer Wärmeleitfähigkeit  $< 0.03 \text{ W/(mK)}$  gesucht. Die nachfolgende Auflistung gibt einen Überblick über potentielle Materialien:

Material	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Dampfdiffusionswiderstand	Brandverhalten		Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
			DIN 4102	DIN EN 13501	
Phenolharz (PF)	0,021 - 0,024	55	B2	C-s1/s2, d0	35 - 45
Polyurethan- und Polyisocyanurat (PUR/PIR)	0,02 - 0,025	60	B1 o. B2	E, D-s2-d0, C-s3-d0	30 - 100
Pyrogene Kieselsäure	0,018 - 0,021	6	N/A	A1	120 - 350
Keramikfaserplatte	0,014	N/A	A1	N/A	355
Steinwolle Nanogel-Verbundplatte	0,019	60	B1	N/A	180
VIP	0,007 - 0,009	∞	B2	N/A	170 - 210
Aerogel	0,018 - 0,021 (lose)	2 - 3(lose)	A1	E	85 - 80 (lose)
	0,014 - 0,017 (Matten)	11 (Matten)			130 - 350 (Mat.)

Tabelle 4: Potentielle Wärmedämmstoffe zur Dämmung der Fahrzeughülle mit  $\lambda < 0.03 \text{ W/(mK)}$

Das Verbundsystem aus einem Kern mit VIP mit ummantelten ESP-Formteilen wird bei der Sanierung von Fassaden in einer dünnen Ausführung verwendet. Ein U-Wert von  $0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  ist auf Bestandswänden aus üblichen Mauerwerksmaterialien mit einer Dämmschichtdicke von 10 cm realisierbar. Das System erlaubt eine Bearbeitung der EPS-Ränder in zwei Dimensionen und ermöglicht eine Anpassung an die bestehende Struktur.

Aufgrund der tiefen Wärmeleitfähigkeit, guten Brandschutzeigenschaften und ökologischen Kriterien sind VIP- und Aerogel-Dämmstoffe potentielle Materialien für den Einsatz bei Refit-Projekten.

<sup>2</sup> Fa. Stadler: Stadler Rail AG, Ernst-Stadler-Strasse 1, 9565 Bussnang, Schweiz

## 3.2 Wissenschaftliche Untersuchung Dämmstoffe und Zugverglasung

Im Rahmen der wissenschaftlichen Arbeiten wurden neuartige Hochleistungswärmedämmstoffe (Aerogel und VIP), offenporige Materialien mit wasserabstossender Wirkung (Melaminharzschaum mit Plasmabehandlung), geschlossenporige Wärmedämmmaterialien (z.B. Produkte von Vibraplast AG), der Effekt von Drainagezonen zur Kondensatentwässerung und innovative Zugverglasungen mit verbesserten U-Werten bei gleichzeitig hoher Mikrowellentransmission untersucht.

### 3.2.1 Aerogel- und Vakuumdämmung [8]

Basierend auf dem bisherigen Kenntnisstand und den Ergebnissen aus dem Kapitel 3.1 wurden alle bekannten Hochleistungsdämmstoffe für die Verwendung im Refit evaluiert (Kriterium:  $\lambda \leq 26 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ). Dazu wurden die deklarierten Eigenschaften von zwei Silikat-Aerogel-Platten (Heck AERO sowie ein Material aus dem Labor), von Vakuumisulationspanelen der Hersteller va-Q-tec und Porextherm, von einem PU-Aerogel (BASF Slentite, noch in der Entwicklung), von hochdämmenden PU-Platten (Swisspor) sowie der Silikat-Platte Calostat von Evonik betrachtet. Aufgrund der Materialanforderungen im Zug – hier insbesondere mechanische Stabilität, Brandschutz sowie tiefe Wärmeleitfähigkeit – wurde diese Liste auf die beiden Mineralwolle-verstärkten Silikat-Aerogele sowie die Vakuumpaneele reduziert. Diese drei Materialien wurden auf ihre **Wärmeleitfähigkeit**, ihre **Brandeigenschaften**, auf ihre **mechanischen Eigenschaften** sowie im Falle des Aerogels auf ihre **Staubabgabe** hin untersucht.

Die Messungen der Wärmeleitfähigkeit hat im Wesentlichen die deklarierten Werte für Aerogel (ca.  $19 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$  für Heck AERO und ca.  $17.5 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$  für das Labormaterial) und für VIP (ca.  $3\text{-}4 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , Produkt Vacupor NT) bestätigt. Im Vergleich zum bisher verwendeten Melaminharzschaum (gemessen mit ca.  $32.5 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) sind Aerogel und VIP wesentlich bessere Dämmmaterialien. Weiterhin sind sie hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit sehr gut kombinierbar. Das VIP hat die tiefere Wärmeleitfähigkeit aber eine geringe Flexibilität hinsichtlich Form und Grösse, während Aerogel sich gut schneiden und bearbeiten lässt. So können grosse, homogene Flächen mit VIP gedämmt werden und kleinere Flächen oder komplexe Geometrien mit Aerogel ausgeführt werden.

VIP und Aerogel wurden auch auf ihr Brandverhalten hin untersucht. Es hat sich herausgestellt, dass das Heck AERO den Anforderungen nach EN 45545-2 für die Betriebsklasse 4 und die Gefahrenstufe HL3 für den Einsatz in Wänden und im Boden genügt. Für die betrachteten Vakuumpaneele (va-Q-vip von va-Q-tec) steht aufgrund des Projektabbruchs noch der entsprechende Entzündbarkeitstest aus, um dieselben Anforderungen nachzuweisen. Die restlichen Prüfungen wurden für das VIP eingehalten.

Sowohl das Vakuumpaneel als auch die beiden Aerogel-Materialien wurden einem Vibrationstest in Anlehnung an die Norm IEC 61373:2010 "Railway applications – Rolling stock equipment – Shock and vibration tests" unterzogen. Dazu wurden die Materialien auf einem Shaker mit einem Beschleunigungsprofil nach genannter Norm angeregt (vgl. Abbildung 23). Die Testdauer mit über 55 h wurde deutlich länger gewählt als in der Norm vorgesehen, um das Langzeitverhalten der Materialien unter Vibration abzuschätzen. Die Materialien wurden an einer vertikalen Metallplatte angeklebt, welche durch einen Shaker angeregt wurde. Im Falle des VIPs wurde die Verklebung mit doppelseitigem Klebeband realisiert, für das Aerogel mit einem Spezialkleber nach Empfehlungen des Vertriebs. Die Aerogelplatten wurden von einer Plastiktüte umschlossen, um abgegebenen Staub aufzufangen. Es zeigte sich, dass das VIP durch die Vibration nicht beschädigt wurde – das Vakuum blieb bestehen. Bei den Aerogel-Materialien wurde eine geringe Staubabgabe festgestellt. Die AERO-Platte gab während der Testdauer ca. 0.05 % seiner Masse als Staub ab. Bei dem Labor-Aerogel lag die Staubabgabe unter der Messgenauigkeit von 0.008 %.

Somit eignen sich die untersuchten Aerogel-Platten und das Vakuumpaneel gut für den Einsatz als Dämmstoff in Bahnfahrzeugen. Sehr tiefe mittlere Wärmeleitfähigkeiten können durch die Kombination dieser beiden Materialien erreicht werden. Ihre mechanischen Eigenschaften sind ausreichend für den Einsatz im Bahnverkehr und die geringe Staubabgabe der getesteten Aerogele ist vertretbar, solange sie gegen den Fahrgastraum kaschiert sind. Der Brandschutz für die höchsten Anforderungen konnte sowohl für die AERO-Platte als auch das va-Q-vip nachgewiesen werden, vorbehaltlich des Entzündbarkeitstests beim VIP.

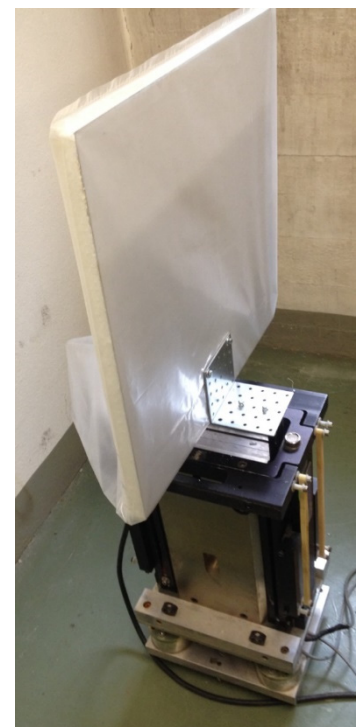


Abbildung 23: Shaker mit AERO Silikat-Aerogel-Probe

### 3.2.2 Offen- und geschlossenporige Dämmstoffe mit und ohne Drainageschicht [2]

Bei 15 verschiedenen Kombinationen von Wärmedämmmaterialien mit und ohne Drainageschichten (DS) wurde in der Dreifachklimakammer bei Klimabedingungen von 30°C / 90% r.F. (Innenklima) und 5°C / 20% r.F. (Aussenklima) die Kondensatmenge quantitativ ermittelt. Geprüft wurden offenporiger Melaminschaumstoff mit/ohne Hydrophobierung und geschlossenporiger Polyethylen-Schaumstoff. Die Drainageschicht wurde mittels Polyamidfaser-Vlies, Carbonfaser-Vlies oder der genoppter Dämmmaterialstruktur hergestellt. Die Wärmedämmmaterialien wurden als Kleinproben mit den Abmessungen 100 x100 mm auf einem länglichen Aluminiumprofil befestigt. Der Wasserfluss durch das Material wurde untersucht.



Abbildung 24: Prüfanordnung zur Ermittlung der Kondensatmenge



Abbildung 25: Polyamidfaser-Vlies als DS

Die Ergebnisse zum Melaminschaumstoff haben gezeigt, dass einerseits die Proben mit einer Drainageschicht und andererseits hydrophobiertes Material weniger Wasser einlagern. PE-Schaumstoffproben mit und ohne Noppenstruktur zeigen aufgrund der geschlossenen Porenstruktur keine nennenswerte Feuchtezunahme. Aufgrund der Ergebnisse kann der Einsatz von Drainageschichten in Fahrzeughüllen mit Kondensationsbildung empfohlen werden. Bezüglich Brandschutzverhalten erfüllt Melaminschaumstoff (Basotect) und PE-Schaumstoff die Anforderungen nach EN45545 HL2.

### 3.2.3 Zugverglasung mit tiefem U-Wert und hoher Mikrowellentransmission

Eine Low-E Beschichtung trägt zur guten Wärmedämmung bei. Die elektrisch leitfähige Beschichtung kann mit neuen Technologien der Laserbehandlung für die Wellen der Mobilkommunikation durchlässig gemacht werden. Doppelverglasungen mit Low-E Beschichtung wurden im Labormassstab mit einem Laser behandelt. Proben mit Linienabstand unter 2 mm wurden erfolgreich hergestellt. Durch den geringeren Linienabstand wird eine höhere Mikrowellentransmission bei Frequenzen um 3.5 GHz erreicht. Es ist möglich, die Zugverglasungen zunächst zusammensetzen und anschliessend mit dem Laser zu behandeln. Hierdurch wird der Arbeits- und Materialfluss vereinfacht und die Produktion der Zugverglasung kann effizienter gestaltet werden.

Durch die Anpassung des Innendrucks der Gasfüllung kann auf eine Druckausgleichskapillare bei den Doppelverglasungen verzichtet werden. Demzufolge wird es möglich, die Verglasung mit Edelgas (Argon / Krypton) zu füllen. Mit einer Edelgasfüllung im Zwischenraum der neuen Zugverglasung wird beim Seitenfenster F1 ein U-Wert von 1.1 W/(m<sup>2</sup>·K), beim unteren Glasteil des Senkfensters F2 ein U-Wert von 1.2 W/(m<sup>2</sup>·K) und beim oberen Glasteil des Senkfenster F2 ein U-Wert von 1.5 W/(m<sup>2</sup>·K) erreicht.

## 3.3 Entwicklung Prototypkonzept Steuerwagen BDt1751ff [5]

Auf Basis der Plangrundlagen von Stadler Rail, der gewonnenen Kenntnisse aus der Konstruktionsanalyse vor Ort und den wissenschaftlichen Untersuchungen wurden potentielle Prototypkonzepte für die grössten Flächenzonen der Fahrzeughülle erarbeitet. Aufgrund der geringen Flächenanteile, minimalen Stückzahlen und der verhältnismässig hohen Umsetzungskosten, wurden die Fenster F3 - F7 und Türenkonstruktionen bei der Optimierung nicht berücksichtigt (Flächenzonierung gem. Abbildung 17). Aus einer Vielzahl von Möglichkeiten wurde das beste Konzept für jede Zone herausgefiltert. Hierbei wurden Kriterien wie Umsetzbarkeit, Zulassung für Fahrzeuge im ÖV, Emissionen, ökonomische und ökologische Gesichtspunkte berücksichtigt.

Im Verlauf der Messungen am Referenzfahrzeug unter API hat sich gezeigt, dass die konstruktive Anbindung der Heizung an die Aussenwand des Fahrzeugs und die Funktionsweise der Heizung eine Quelle für relevante Wärmeverluste darstellt. Daher wurde auch die Heizung in die Ausarbeitung der Prototypkonzepte mit einbezogen. Eine fundierte Analyse zur Energieeinsparung durch optimierte Heizkörper konnte aufgrund der systembasierten Softwaregrenzen nicht durchgeführt werden.

Der finale Konzeptvorschlag zur Umsetzung des Prototypfahrzeugs basiert auf vier Prinzipien.

1. Zur massgeblichen Verbesserung der Wärmedämmung und der Wärmebrücken wird die seitliche Innenbekleidung inklusive Dachrundung um 9mm in Richtung Innenraum verschoben. Der gewonnen Hohlraum wird mit Hochleistungswärmedämmstoff gefüllt.  
Der Spalt zwischen Innenbekleidung und Stuhllehne wird beim Refit um 4mm reduziert. Die Stuhlkonstruktion wird um 5mm pro Stuhllehne in den Gang verschoben. Aufgrund der variablen Beinverankerung der Stühle, kann dies ohne grossen Aufwand umgesetzt werden. Die Breite des Gangs muss folglich um 10 mm reduziert werden.
2. Optimierung bei geringen Bauteilstärken (Brüstung, Pfosten, Dachwölbung, Boden, Wand, Stirnfläche): Grosse homogene Flächen werden mit VIP gedämmt. Kleine Flächen mit komplexen Geometrien werden mit Aerogel ausgeführt.
3. Ist genügend Platz vorhanden, werden aus Gewichtsgründen leichte Melaminharzschäumplatten mit einer Rohdichte von 12 kg/m<sup>3</sup> eingebaut (Dachbereich).
4. Die Zugverglasung wird mit edelgasgefüllten Gläsern umgesetzt. Der Aufbau der zweischichtigen Isolierverglasung wird dabei soweit optimiert, wie dies die Konstruktion beim Fensteranschluss zulässt.

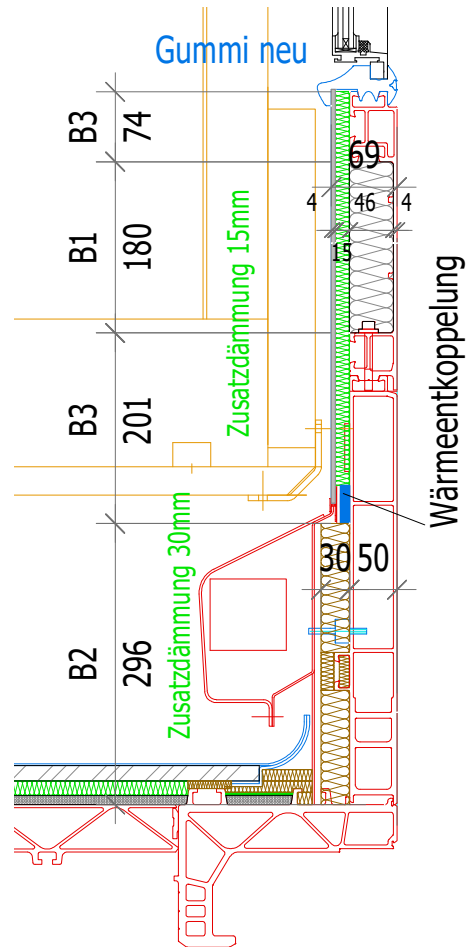


Abbildung 26: Konzept Boden - Brüstung - Schiebefenster

Beispiel: Finales Konzept Flächenzone B2

B2-V1: Aufbau Zone B2 PFZ gemäss Expertenworkshop "Prototypkonzepte" (U-Wert Bestand: 1.365 W/m <sup>2</sup> K)						
Schicht	Dicke [m]	Schichtenfolge (von innen nach aussen)	Wärmeleitfähigkeit	Dichte	Wärmekapazität	Widerstand
			[W/(mK)]	kg/m <sup>3</sup>	J/(kg K)	[(m <sup>2</sup> K)/W]
			Wärmeübergang innen			0.130
1	0.004	Abdeckung (Metallblech)	160	1050	1000	0.000
2	0.007	Luft Vertikal	0.054	1.23	1008	0.130
3	<b>0.030</b>	<b>CH-Aerogel</b>	0.018	122	470	1.667
4	0.008	Alu-Profil 50mm (mit Hohlraum ca. 42 mm)	160	1050	1000	0.000
Total	0.049		Wärmeübergang aussen			0.040
			Summe der Widerstände			1.966
<b>Wärmedurchgangskoeffizient, U-Wert</b>			<b>[W/(m<sup>2</sup>K)]</b>		<b>0.509</b>	

Tabelle 5: Konstruktionsaufbau Brüstungsfläche B2 unterhalb der Fenster

In der nachfolgenden Tabelle sind die U-Werte des Referenzfahrzeugs und der finalen Prototypkonzepte aufgeführt. Die Werte mit berücksichtigter Wärmebrücke (WB) wurden in der abschliessenden Simulation zur Berechnung der Energieeinsparung implementiert [4]. Der definierte Wärmedurchgangskoeffizient der Bestandsfenster F1 basiert auf der In-Situ-Analyse, dass die 6 Scheiben im Niederflurberiech eine Reflexionsschicht mit Low-e-Funktion aufweisen.

Bauteil	Nr.	Fläche	U-Wert Bestand [W/(m <sup>2</sup> ·K)]		U-Wert saniert [W/(m <sup>2</sup> ·K)]		Verbesserung
			homogen	mit WB	homogen	mit WB	
Boden	U1	41.08	1.436	2.731	0.923	2.218	19 %
Brüstung1	B1	3.37	0.566	1.838	0.257	1.035	44 %
Brüstung2	B2	9.00	1.365	2.650	0.509	1.071	60 %
Brüstung3	B3	8.79	2.766	4.054	0.840	1.623	60 %
Pfosten1	P1	3.19	1.015	2.257	0.260	0.728	68 %
Pfosten2	P2	3.38	1.015	2.377	0.396	0.864	64 %
Pfosten3	P3	1.26	1.015	1.808	0.215	0.769	57 %
Wand1	W1	4.83	0.908	2.215	0.387	0.863	61 %
Dach1	D1	24.73	0.366	1.660	0.251	1.545	7 %
Dach2	D2	25.33	0.621	1.915	0.372	1.276	33 %
Wand Stirnseite	S1	4.40	0.821	2.064	0.493	1.047	49 %
Seitenfenster	F1		1.5		1.1		27 %
Senkfenster oben	F2		3.1		1.5		52 %
Senkfenster unten	F2		3.1		1.2		61 %

Tabelle 6: U-Wert Bestand und U-Wert saniert (Steuerwagen BDt1751ff)

### 3.4 3D-Wärmebrückenanalyse [9]

Es werden Berechnungen des Wärmeschutzes der Fahrzeughülle des Steuerwagens BDt1751ff der Rhätischen Bahn durchgeführt. Dabei wird der Wärmeschutz der Fahrzeughülle mit Hilfe von stationären Wärmebrückenberechnungen bestimmt. Durch Berechnung des Ist-Zustands wird der vorhandene Wärmeschutz ermittelt. Durch Berechnung von verschiedenen Sanierungsvarianten wird die Sanierungsmethode zur Verbesserung des Wärmeschutzes mit dem grössten Verbesserungspotential bestimmt.

Auf der Grundlage von zweidimensionalen Plänen der Fahrzeughülle der Firma Stadler wurde ein dreidimensionales CAD-Modell erstellt. Dieses dreidimensionale CAD-Modell wurde in das Finite Elemente Programm ANSYS eingelesen. Diesen geometrischen Volumenkörper nähert das Programm ANSYS mit Volumenelementen nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) an.

Die Wärmeströme durch die Fahrzeughülle werden mit stationären Temperaturrandbedingungen von 20 °C für die Innenlufttemperatur und von 0 °C für die Außenlufttemperatur berechnet. Aus diesen Wärmestromdichten und der Innenfläche der Fahrzeughülle wird für Regelquerschnitte der Fahrzeughülle im Niederflur- und Hochflurbereich ein effektiver Wärmedurchgangskoeffizient berechnet.

Die Regelquerschnitte bestehen aus einem dreidimensionalen Segment, welches von der Mitte eines Fensters bis zur Mitte des Postens zwischen zwei Fenstern reicht. Es wird jeweils ein Segment für den Hochflurbereich und ein Segment für den Niederflurbereich berechnet. Es ergeben sich effektive Wärmedurchgangskoeffizienten zwischen 2,5 W/(m<sup>2</sup>K) bzw. 3,4 W/(m<sup>2</sup>K) für den Niederflur- bzw. den Hochflurbereich für den Ist-Zustand.

Mit einer verbesserten Wärmedämmung, welche auch die Wärmebrücken überdämmt, werden diese Wärmedurchgangskoeffizienten auf 1,9 W/(m<sup>2</sup>K) für den Niederflurbereich und 2,2 W/(m<sup>2</sup>K) für den Hochflurbereich reduziert.

### 3.5 Messeinrichtung BFH im Prototypfahrzeug [3]

Gemäss Projektauftrag sollten in Arbeitspaket 4 und 5 Oberflächentemperatur, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Luft- und Wärmeströme messtechnisch ermittelt und die Daten ausgewertet werden.

Die im AP1 gewonnen Erkenntnisse bei der Planung, Beschaffung, Einbau und Auswertung der Messungen sind in die Konzeption für die Messeinrichtung im Prototypfahrzeug eingeflossen. Die beim RFZ festgestellten geringen Feuchtemengen und niedrigen Luftströmungen in der Fahrzeughülle haben bei der Planung der PFZ-Messeinrichtung dazu geführt, dass die Prioritäten wie folgt angepasst wurden:

- Alle bisherigen Messgrössen werden beibehalten
- Alle Messstellen im Hochflurbereich werden aufgegeben
- Die Messstellen zur Messung der Luftströmung in der Fahrzeughülle werden bis auf eine Messstelle aufgegeben
- Es werden zusätzliche Thermoelemente im Bereich der konstruktiven Anbindung der Konvektionsheizung angebracht
- Zusätzlich wird im PFZ der Luftvolumenstrom der Lüftungsanlage gemessen.

Da das Projekt zum Zeitpunkt der detaillierten Planung am 11.10.2018 vom BAV abgebrochen wurde [10], fand die Beschaffung und der Einbau der Messeinrichtung im Prototypfahrzeug nicht statt.

## 4 Analyse Energiebedarf

### 4.1 Energieeinsparung bei konservativen Annahmen

Basierend auf der Abhängigkeit einer konstruktiven Umsetzung wurden diverse Massnahmenpakete (MP) gemäss Tabelle 7 definiert und deren energetisches Einsparpotential mittels thermischer Simulation durch die Hochschule Luzern berechnet [4]. Der Energiebedarf und die erwarteten Kosteneinsparungen der Massnahmenpakete sind in Abbildung 27 dargestellt. Mit der kompletten Sanierung des Fahrzeugs können 12.2 MWh (27.5 %) Heizenergie pro Jahr eingespart werden. Dies entspricht einer Einsparung von Fr. 1'342 bei einem Energiepreis von 11 Rp/kWh (Tarif der RhB).

MP	Sanierung betrifft folgende Bauteile	Bemerkung
MP1	F1, F2	Fenster
MP2	B1, B2, B3, P1, P2, P3, F1, F2,	Seitenwand excl. W1 + MP1
MP4	U1, F1, F2, B1, B2, B3, P1, P2, P3,	Boden + MP1, MP2
MP5	D1, D2, F1, F2, B1, B2, B3, P1, P2, P3, U1	Dach + MP1 bis MP4
MP6	W1, D1, D2, F1, F2, B1, B2, B3, P1, P2, P3, U1	Seitenwandteil W1 + MP1 bis MP5
MP7	S1, F1, F2, B1, B2, B3, P1, P2, P3, U1, D1, D2, W1	Komplette Sanierung MP1 bis MP7

Tabelle 7: Massnahmenpakete am Steuerwagen

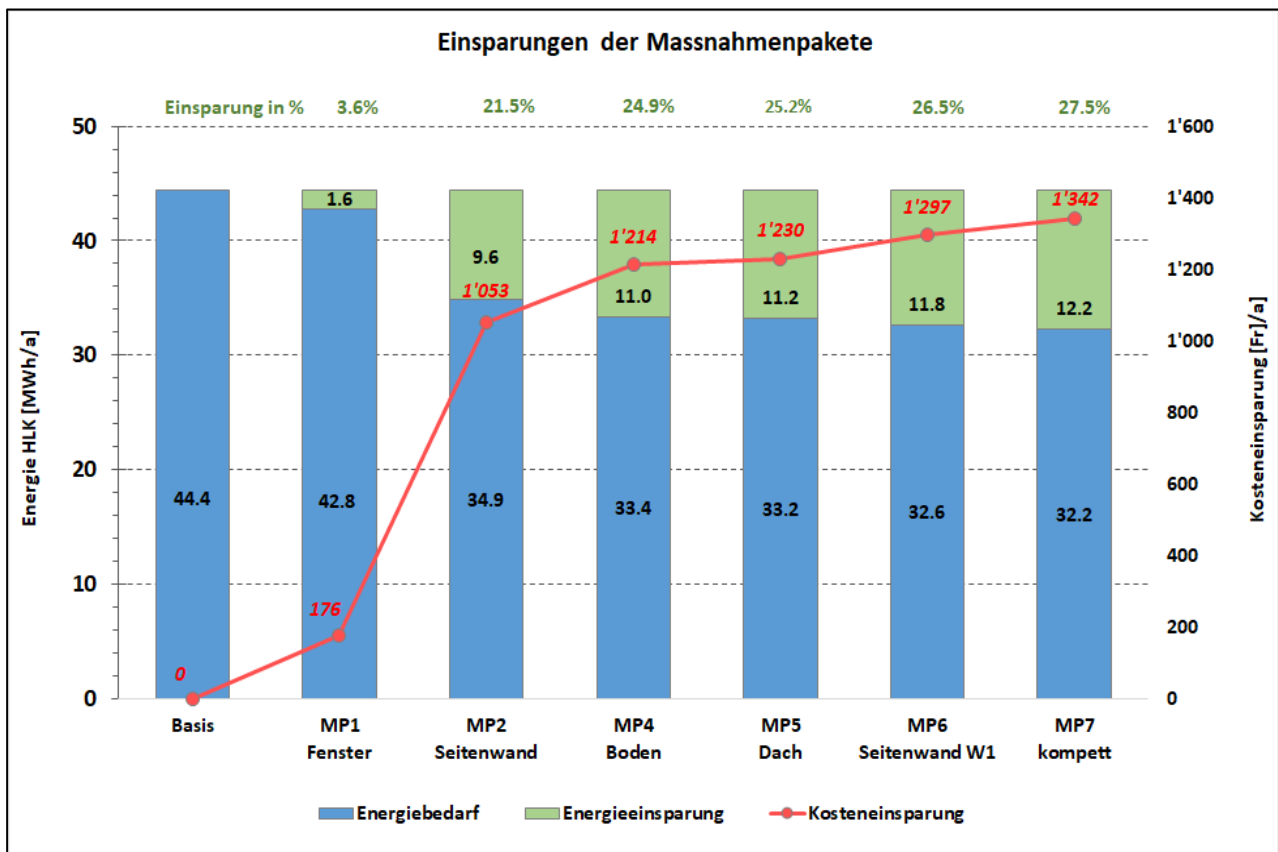


Abbildung 27: Energieeinsparung durch MP 1 - 7, konservative Annahme zu Fensterersatz F1

Bei der Ist-Analyse des RhB-Steuerwagens wurde festgestellt, dass die Fenster F1 im Niederflurbereich im Gegensatz zu den restlichen Fenstern teilweise mit einer Beschichtung ausgeführt sind (vgl. Kap 2.6). Die restlichen Verglasungen F2 - F7 haben keine Beschichtung aufgewiesen. Es ist davon auszugehen, dass die Fenster F1 im Laufe der Fahrzeugnutzung vereinzelt ersetzt wurden.

In den Produktionsplänen der Firma Stadler wird der U-Wert für die Seitenfenster F1 mit  $1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  und für die Senkfenster F2 mit  $3.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  angegeben. Gemäss AGC Glass Europe wurde bei der Fahrzeugproduktion ausschliesslich Verglasungen ohne Wärmedämmbeschichtung eingesetzt. Der U-Wert der initial eingebauten Isolierverglasungen beträgt gemäss AGC Glass Europe  $3.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

Für eine konservative Ermittlung der Energieeinsparung wurde entschieden, den U-Wert für die Fenster F1 mit  $1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  und für die Fenster F2 mit  $3.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  anzunehmen (vgl. Tabelle 6). Unter dieser Annahme beträgt die Energieeinsparung durch den Glasersatz der Fenster F1 und F2 1.6 MWh/a respektive 3.6%.

## 4.2 Energieeinsparung bei optimistischen Annahmen

Werden bei einem baugleichen Steuerwagen die verbauten Seitenfenster F1 ohne Low-E Funktion durch die innovativen Zugverglasungen ersetzt, wird eine Reduktion des U-Werts von 2.0 W/(m²K) erreicht (3.1 - 1.1 W/(m²K)). Der Fensterersatz F1 und F2 würde somit eine Energieeinsparung von 3.7 MWh/a respektive 7.9 % ergeben. Ausgehend von dieser optimistischen Annahme, würde die Energieeinsparung durch den Fensterersatz einen deutlich höheren Beitrag leisten. Die Energieeinsparung bei kompletter Umsetzung der Massnahmen beträgt somit 30.7%.

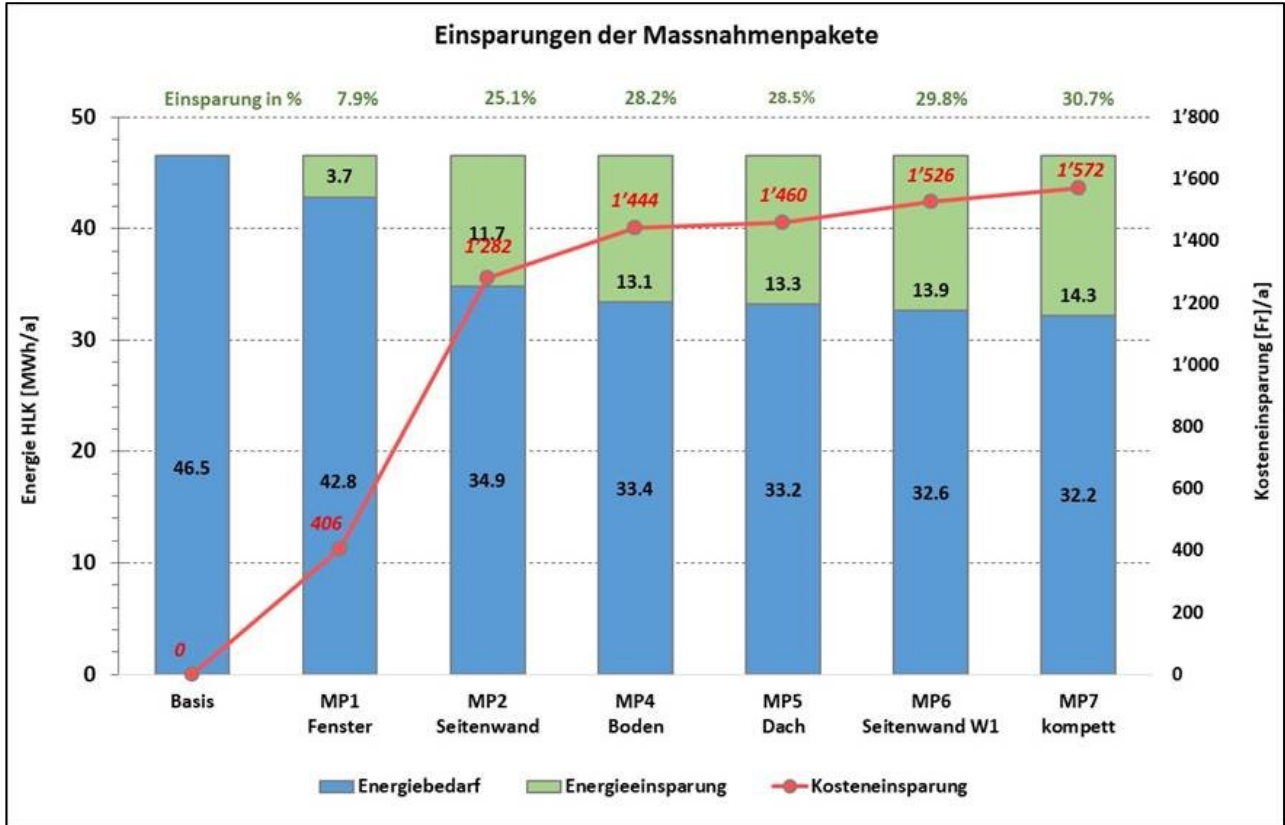


Abbildung 28: Energieeinsparung durch MP 1 - 7, optimistische Annahme zu Fensterersatz F1

## 4.3 Energieverluste über die Fenster, Zusatzanalyse EPFL

Die Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Aussenklima wurden durch das Messsystem der Universität Basel erfasst. Die Fensterflächen sind genau bekannt. Bei den Fenstern handelt es sich um weitgehend ebene Bauteile mit geringer Wärmekapazität. Daher kann unter Annahme eines bestimmten U-Werts der Fenster, der Wärmeverlust durch die Fenster bestimmt werden. Die Resultate sind in Tabelle 8 vorgestellt.

### Resultate:

Szenario «Konservativ»	Szenario «Optimistisch»
<b>Ist-Zustand Gläser:</b> F1: $U = 1.5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ F2 oben/unten: $U = 3.1 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ Energieverluste von <b>11.3%</b> über die Fenster.	<b>Ist-Zustand Gläser:</b> F1: $U = 3.1 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ F2 oben/unten: $U = 3.1 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ Energieverluste von <b>16.5 %</b> über die Fenster.
<b>Einsparung durch neue Gläser:</b> F1: $= 1.5 \rightarrow 1.1 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ , Delta $0.4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ F2 oben = $3.1 \rightarrow 1.5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ , Delta $1.6 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ F2 unten = $3.1 \rightarrow 1.2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ , Delta $1.9 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ Energieeinsparung von <b>5.0 %</b> .	<b>Einsparung durch neue Gläser:</b> F1 = $3.1 \text{ W}/(m^2 \cdot K) \rightarrow 1.1 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ , Delta $2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ F2 oben = $3.1 \rightarrow 1.5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ , Delta $1.6 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ F2 unten = $3.1 \rightarrow 1.2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ , Delta $1.9 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ Energieeinsparung von <b>10.1 %</b> .

Tabelle 8: Energieeinsparung durch den Ersatz der Fenstergläser

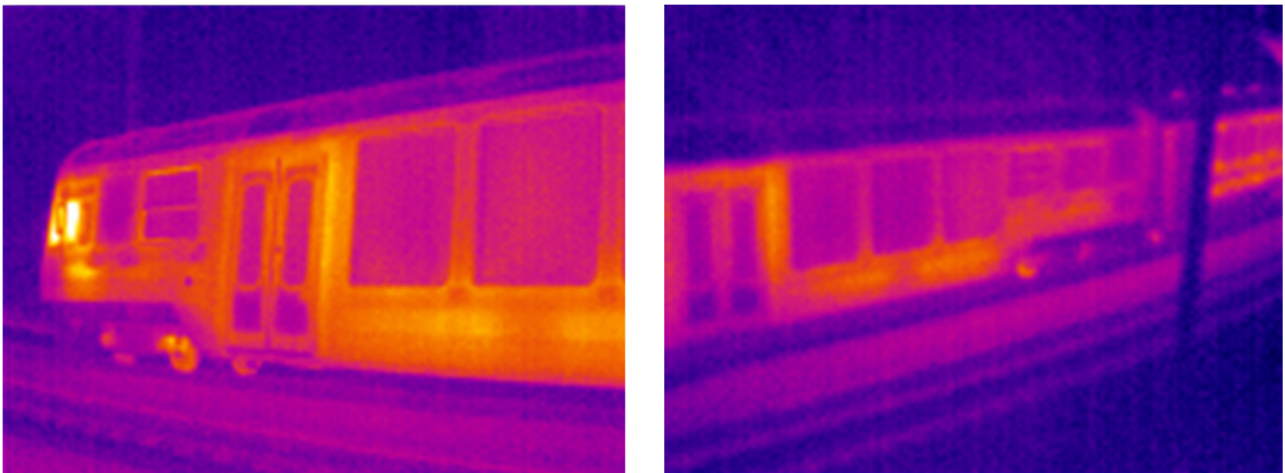


Abbildung 29: Wärmebildaufnahmen der Empa bei einer Aussentemperatur von  $-10^{\circ}\text{C}$ .

In den Wärmebildaufnahmen der Empa ist die Infrarotemission der Fenster bei einer Aussentemperatur von  $-10^{\circ}\text{C}$  dargestellt (siehe Abbildung 29).

Die Infrarotemission der grossen Seitenfensterflächen F1 und der kleineren zweiteiligen Senkfensterflächen F2 ist vergleichbar. Die Zugfenster sind aussen nicht beschichtet, daher ist die thermische Emissivität für beide Flächen die von unbeschichtetem Glas ( $\approx 85\%$ ). Die IR-Reflektivität ist also etwa  $15\%$ , und die Hintergrundstrahlung bei einer Aussentemperatur von  $-10^{\circ}\text{C}$  vergleichsweise gering. Der Temperaturunterschied innen/aussen ist von der Grössenordnung  $30^{\circ}\text{C}$ . Ein Unterschied im U-Wert der Fensterflächen F1 und F2 von der Grössenordnung eines Faktors zwei ist daher eher unwahrscheinlich. Der Randeffect ist durch die Wärmebrücken der Abstandshalter und Fassung/Rahmen zu erklären.

Die Abweichung der Berechnungen HSLU/EPFL ist auf die völlige Unabhängigkeit der Lösungswege zurückzuführen. Zum Beispiel wurden die Personenabwärme, die Solareinstrahlung und der Lüftungsvolumenstrom mit verschiedenen Methoden bestimmt.

Die EPFL bestimmt den Lüftungsvolumenstrom direkt aus den Betriebsdaten mit multipler Regression. Dies ist möglich, da es Tage mit viel Lüftung und Tage mit weniger Lüftung gibt, und Verbrauchsdaten von allen diesen Tagen zur Verfügung stehen. In analoger Weise kann mit den Solarenergieeinträgen verfahren werden, da es Tage mit viel und Tage mit weniger Solareinstrahlung gibt. Zudem stehen Messdaten von vertikalen Pyranometern zur Verfügung, was die Analyse vereinfacht. Der Anteil der Geräteabwärme (Beleuchtung etc.) wurde von der EPFL nicht mit einbezogen. Eine Einbeziehung dieser würde noch zu geringen Korrekturen führen.

Wenn in diesem Fahrzeugtyp alte Fenster ohne Low-E Funktion durch neue Fenster mit Low-E Funktion ersetzt werden, kann eine Heizenergieeinsparung von **7.9 – 10.1 %** erzielt werden.

## 5 Zielerreichung

Durch das entwickelte Prototypkonzept wird die Wärmedämmung der Fahrzeughülle massgeblich verbessert. Fenster F1 und F2 werden mit innovativen Gläsern ersetzt, die opaken Bauteile mit Aerogel, VIP und Melaminschaum bestückt und die Wärmebrücken zusätzlich überdämmt. Die jährliche Einsparung der Heizenergie beträgt beim konservativen Szenario  $12.2 \text{ MWh}$  ( $27.5 \%$ ) und beim optimistischen Szenario  $14.3 \text{ MWh}$  ( $30.7 \%$ ). Die im Auftrag formulierte Erwartung zur Einsparung der Heizenergie von  $20 - 25 \%$  wird beim konservativen Szenario um maximal  $7.5 \%$  und beim optimistischen Szenario um maximal  $10.7 \%$  übertroffen.

## 6 Verzeichnisse

### 6.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht Gesamtprojekt.....	5
Abbildung 2: Projektorganigramm.....	5
Abbildung 3: U-Wertmessdaten an einer Fahrzeugwand mit verschiedenen Melaminharz­dämmstoffen und div. Feuchtegehalt.....	7
Abbildung 4: Vertikalschnitt Steuerwagen, Positionierung der Sensoren (S) im Niederflurbereich.....	8
Abbildung 5: Anordnung der Sensoren im Pfosten zwischen den Fenstern.....	8
Abbildung 6: Lufttemperatur im Personenabteil (blau gestrichelt), Oberflächentemperatur an der Innenbekleidung im Brüstungsbereich hinter der Heizung (Niederflurbereich: rot und Hochflurbereich: grün) und Heizleistung der Konvektionsheizung im Personenabteil (schwarz gestrichelt).....	9
Abbildung 7: Vertikalschnitt Fahrzeughülle, Heizung inkl. Befestigung an der Fahrzeugwand.....	10
Abbildung 8: Vertikalschnitt Fahrzeughülle – Wand über dem Fenster.....	11
Abbildung 9: Fahrweg und Verlauf der relativen Luftfeuchte in der Wand über den Fenstern.....	11
Abbildung 10: Messaufbau Aussenluftmengenmessung.....	13
Abbildung 11: Messung und angewandter Aussenluftvolumenstrom der Lüftungsanlage in der Simulation...	13
Abbildung 12: Wärmebrücke Übergang Dach - Wand.....	14
Abbildung 13: Einstiegstüre und Senkfenster.....	14
Abbildung 14: Seitenwand während der Fahrt bei -10 °C.....	14
Abbildung 15: Radiator im Abteil.....	14
Abbildung 16: Sankey-Energieflussdiagramm Abteil und Gepäck im Winterhalbjahr 2017-18.....	15
Abbildung 17: Flächeneinteilung Zugwagenhülle, Seitenansicht Steuerwagen BDt 1751ff.....	15
Abbildung 18: Energieflussdiagramm des Steuerwagen BDt 1758 vor der Sanierung.....	16
Abbildung 19: Wärmebrücke Seitenwandkonstruktion.....	17
Abbildung 20: Wärmebrücken mit Korkstreifen abgedeckt.....	17
Abbildung 21: Untersuchung einer Verglasung mit IR-Reflexionsschicht (Glas F1 - Niederflurbereich).....	17
Abbildung 22: Anbindung der Heizung.....	17
Abbildung 23: Shaker mit AERO Silikat-Aerogel-Probe.....	19
Abbildung 24: Prüfanordnung zur Ermittlung der Kondensatmenge.....	20
Abbildung 25: Polyamidfaser-Vlies als DS.....	20
Abbildung 26: Konzept Boden – Brüstung – Schiebefenster.....	21
Abbildung 27: Energieeinsparung durch MP 1 – 7, konservative Annahme zu Fensterersatz F1.....	23
Abbildung 28: Energieeinsparung durch MP 1 – 7, optimistische Annahme zu Fensterersatz F1.....	24
Abbildung 29: Wärmebildaufnahmen der Empa bei einer Aussentemperatur von -10°C.....	25

### 6.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projektbeteiligte Wirtschafts- und Forschungspartner.....	6
Tabelle 2: Relative Feuchte der Raumluft im Beobachtungszeitraum.....	10
Tabelle 3: Infiltration Aussenluft im Stillstand in der Halle.....	14
Tabelle 4: Potentielle Wärmedämmstoffe zur Dämmung der Fahrzeughülle mit $\lambda < 0.03 \text{ W}/(\text{mK})$ .....	18
Tabelle 5: Konstruktionsaufbau Brüstungsfläche B2 unterhalb der Fenster.....	21
Tabelle 6: U-Wert Bestand und U-Wert saniert (Steuerwagen BDt1 751 ff).....	22
Tabelle 7: Massnahmenpakete am Steuerwagen.....	23
Tabelle 8: Energieeinsparung durch den Ersatz der Fenstergläser.....	24

### 6.3 Quellenverzeichnis

- [1] Projektantrag «Reduzierung des Heizenergiebedarfs von Bahnfahrzeugen durch eine verbesserte Wärmedämmung der Fahrzeughülle», Datum der Einreichung: 07.12.2016
- [2] Fleury J., Schüler A.: RHB-Projekt – Forschungsbericht EPFL, EPFL Lausanne, aktualisiert am 24.05.2019
- [3] Rädle W.: RHB-Projekt – Forschungsbericht Messeinrichtung BFH, BFH-AHB Biel, 21.11.2018
- [4] Sidler F., Zweifel G.: RHB-Projekt – Forschungsbericht HSLU, HSLU Luzern, 11.12.2018
- [5] Hausammann R., Rädle W.: RHB-Projekt – Forschungsbericht Prototypkonzepte, BFH-AHB Biel, 15.12.2018
- [6] Rädle W.: RHB-Projekt – Forschungsbericht Recherche Wärmedämmstoffe, BFH-AHB Biel, 20.11.2018
- [7] Tuchschnid M.: Bibliothek Wärmedämmmaterialien, SBB AG Bern, 07.07.2016
- [8] Brunner S., Wernery J.: RHB-Projekt – Forschungsbericht Empa, Empa Dübendorf, 10.12.2018
- [9] Geyer Ch.: RHB-Projekt – Forschungsbericht, Wärmebrückenanalyse mittels FEM-Simulationen, BFH-AHB Biel, 06.12.2018
- [10] Bundesamt für Verkehr, Widerruf des Auftrages P-070, BAV Ittigen, 11.10.18