



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)



Potentialanalyse für Verbesserung der Wärmedämmung bei der Fahrzeug- Aussenhülle

S-Bahn-Gliederzug BLS RABe 525 NINA

Schlussbericht

Christoph Isenschmid, BLS AG, Bahnproduktion

Krattigstrasse 1a, CH-3700 Spiez, christoph.isenschmid@bls.ch, www.bls.ch

Version V04 vom 19. November 2018

Begleitgruppe

Herr Stefan Schnell, Bundesamt für Verkehr

Herr Tristan Chevroulet, Bundesamt für Verkehr

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

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

CH-3003 Bern

Programmleiter

Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: 010

Bezugsquelle

Kostenlos zu beziehen über das Internet

www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Spiez, den 19. November 2018.

Inhalt

1	Ausgangslage.....	9
2	Ziel der Arbeit	9
3	Forschungsansatz und Umsetzung.....	10
3.1	Planung der Arbeitsschritte	10
3.1.1	Zeitplan und Meilensteine	10
3.1.2	Arbeitsschritte.....	11
3.2	Modellierung der Aussenhülle	13
3.2.1	Aufnahme und Modellierung Ist-Zustand der Aussenhülle	13
3.2.2	Modellierung Soll-Zustand der Aussenhülle (Maximalvariante)	15
3.3	Isolationsmaterial.....	16
3.3.1	Auswahl der Isolationsmaterialien.....	16
3.3.2	Isolation von Wärmebrücken.....	18
3.4	Wärmedämmung der Seitenwand.....	20
3.4.1	Allgemeiner Aufbau	20
3.4.2	Minimale Verschiebung der Innenverkleidung	20
3.4.3	Infrarot-Reflektion	20
3.4.4	Variante 0 (Ist-Zustand).....	21
3.4.5	Variante 1a	22
3.4.6	Variante 1b	24
3.4.7	Variante 2	25
3.4.8	Variante 3	26
3.4.9	Variante 6	27
3.4.10	U-Wert-Messung an modifizierter Seitenwand von RABe 525 NINA 003.....	28
3.4.11	Messresultate und Bestimmung der Bestvariante.....	30
3.4.12	Wärmedämmung des Übergangs von Seitenwand und Dach (Variante 10)	32
3.5	Wärmedämmung des Dachs (Variante 12).....	35
3.6	Sollzustands der Aussenhülle (Bestvariante).....	36
4	Ergebnisse.....	37
4.1	Wärmedämmung beim Triebzug RABe 525 NINA 005.....	37
4.1.1	Umsetzung	37
4.1.2	Vorgeschnittene Wärmedämmung.....	38
4.1.3	Befestigung der Wärmedämmung im Deckenbereich.....	40
4.1.4	Arbeitsaufwand	41
4.1.5	Erkenntnisse aus Montagearbeiten.....	41
4.1.6	Abschätzung des Montageaufwands bei zukünftiger Serieausführung	41
4.1.7	Abschätzung der Energieeinsparung durch verbesserte Wärmedämmung	43
4.1.7.1	Methoden.....	43
4.1.7.2	Methode 1: Gemessene Innen- und Aussentemperaturen	43
4.1.7.3	Methode 2: Jahrestemperaturverteilung und Heizleistungs-Kennlinien.....	44
4.1.7.4	Energieeinsparung durch Vergleich der beiden Methoden	44
4.2	Wärmedämmglas mit hoher Durchlässigkeit für Mobilkommunikation	45

4.2.1	Prototyp und Messung beim Triebzug RABe 525 NINA 006	45
4.2.2	Konstruktive Einschränkungen bei U-Wert.....	46
4.2.3	Umsetzung bei 29 Zügen RABe 525 NINA	47
4.3	Verifikation der verbesserten Wärmedämmung.....	48
4.3.1	Methode	48
4.3.2	Grenzen der gewählten Methode	49
4.3.3	Datenerfassung und Messausrüstung für Heizversuche	50
4.3.4	U-Wert-Messung an Seitenwand	52
4.3.5	Heizleistung im Automatik-Betrieb	54
4.3.6	Auswertung mittels Heizenergie	56
4.3.7	Auswertung mittels Heizleistung in Abhängigkeit der Aussentemperatur	57
4.3.8	Vergleich mit Langzeitaufzeichnungen vom Triebzug RABe 525 NINA 006	58
4.3.9	Aufheizversuch	60
4.3.10	Wärmebilder	62
4.3.11	Verbesserung des U-Werts	63
4.3.12	Qualität des Resultats	63
4.4	Wissenstransfer, Publikationen	64
5	Diskussion	65
5.1	Energieeinsparung	65
5.2	Wirtschaftlichkeit.....	65
6	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	67
7	Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	68
8	Literaturverzeichnis	69
A.	Anhang: Montage der Wärmedämmung beim Triebzug RABe 525 NINA 005.....	70
B.	Anhang: Protokoll der Heizversuche vom 20./21. Januar 2018	87
C.	Anhang: Messgeräte für Heizversuche vom 20./21. Januar 2018	92

Kurzdarstellung

Die Potentialanalyse zeigt an einem bestehenden S-Bahn-Triebzug RABe 525 NINA der BLS die Möglichkeiten und Grenzen einer Verbesserung der Wärmedämmung bei der Fahrzeug-Aussenhülle auf. Die Ergebnisse sind mit einer Prototyp-Umsetzung der verbesserten Wärmedämmung bei allen drei Wagenkästen des Triebzugs RABe 525 NINA 005 auf Machbarkeit und Wirkung überprüft.

Die Verifikation mittels Heizversuchen zeigt eine Verbesserung des mittleren U-Werts der gesamten Fahrzeughülle des Triebzugs RABe 525 NINA 005 von rund 22 %. Damit senkt sich der mittlere U-Wert von bisher $2.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ auf rund $1.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Dies ermöglicht bei einem dreiteiligen Triebzug RABe 525 NINA eine jährliche Energieeinsparung von ca. 20 MWh.

Die Verbesserung der Wärmedämmung bei einem bestehenden Schienenfahrzeug für den Personenverkehr ist sinnvoll, falls die bisherige Wärmedämmung Schäden durch Alterung, Zersetzung, Kondensat oder ungenügende Befestigung aufweist. Der Einbau einer verbesserten Wärmedämmung verursacht aufwendige Konstruktions- und Montagearbeiten, die sich nur bei umfassenden Refit-Projekten zur halben Lebensdauer der Fahrzeuge sinnvoll und wirtschaftlich umsetzen lassen. Hingegen lässt sich die entsprechende Investition für die verbesserte Wärmedämmung mit den dadurch reduzierten Energiekosten und der verbleibenden Fahrzeug-Lebensdauer von 15 bis 20 Jahren kaum oder nur knapp amortisieren.

Die Erkenntnisse aus Prototyp-Umsetzung beim Triebzug RABe 525 NINA 005 dienen als Entscheidungsgrundlage für ein zukünftigen Refit der 25 Triebzüge RABe 535 Lötschberger.

Résumé

L'analyse démontre à l'exemple d'un train articulé RABe 525 NINA du réseau express régional du BLS les possibilités et les limites d'une amélioration de l'isolation thermique. La faisabilité et l'efficacité d'une isolation thermique améliorée sont vérifiés avec un montage prototype dans toutes les trois voitures du train articulé RABe 525 NINA 005.

Des essais de chauffage du train articulé RABe 525 NINA 005 montrent une amélioration du coefficient de transfert thermique (indice u), moyen de toute la surface extérieure d'environ 22 %. L'indice u moyen baisse de $2.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ à environ $1.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, ce qui permet des économies d'énergie annuelles de 20 MWh pour un train articulé RABe 525 NINA à trois voitures.

L'amélioration de l'isolation thermique d'un véhicule ferroviaire du trafic voyageur est justifiée, si l'isolation thermique existante montre des défauts par vieillissement, par décomposition, par humidité de condensation ou par une fixation défectueuse. Le montage d'une isolation thermique améliorée entraîne des travaux lourds, qui ne sont envisageables que dans des projets importants de rénovation à la moitié de la durée de vie d'un véhicule. Par contre, l'amortissement de l'investissement pour une isolation thermique améliorée par la réduction des coûts d'énergie, pendant la durée de vie restante de 15 à 20 ans du véhicule, n'est pas ou guère possible.

Les résultats et l'expérience de la réalisation prototype du train articulé RABe 525 NINA 005 serviront comme critères de décision pour le futur projet de rénovation des 25 trains articulés RABe 535 Lötschberger.

Executive Summary

The analysis shows for an existing electrical multiple-unit-train (EMU) RABe 525 NINA from BLS for suburban traffic the possibilities and the limits for a thermal insulation improvement of its outer surface. The feasibility and the efficiency of the results are tested by a prototype implementation on all three cars of the EMU RABe 525 NINA 005.

The verification by heating tests shows an improvement of the average thermal transmittance (U-value) of the total outer surface of 22 %. Therefore, the average U-value decreases from $2.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ to approximately $1.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, which means for one EMU RABe 525 NINA, consisting of three cars, an annual energy saving of 20 MWh.

The thermal insulation improvement of rolling stock for passenger traffic is justified, if the existing thermal insulation shows damage due to ageing, decomposition, humidity or fixation problems. The mounting of an improved thermal insulation generates extensive effort and cost, which need to be integrated into important projects of refurbishment at midlife of the vehicle. However, the amortisation of the investment for an improved thermal insulation by reduced energy costs is not or just hardly possible during the remaining vehicle lifetime of 15 to 20 years.

The results and experience of the prototype mounting by the EMU RABe 525 NINA provide decision-making support for the future refurbishment project of 25 EMUs RABe 535 Lötschberger.

Zusammenfassung

Die Potentialanalyse soll bei einem S-Bahn-Triebzug RABe 525 NINA die Möglichkeiten und Grenzen einer Verbesserung der Wärmedämmung bei der Fahrzeug-Aussenhülle aufzeigen.

Die Potentialanalyse umfasst folgende Ziele:

- Abklärung der technischen Machbarkeit für die Verbesserung der Wärmedämmung der Aussenhülle bei den Triebzügen RABe 525 NINA mit dem Ziel, den aktuellen U-Wert von $2.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ um mindestens 20 % auf einen Zielwert unter $1.92 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ zu verkleinern.
- Ausweisung allgemeiner Teile, die zur Verbesserung der U-Werte anderen Zuggattungen angewendet werden können.
- Umsetzung der verbesserten Wärmedämmung an einem dreiteiligen Triebzug RABe 525 NINA.

Die Potentialanalyse umfasst dazu folgende Arbeitsschritte:

- Aufnahme und Modellierung des Ist-Zustands mit der bisherigen Wärmedämmung für einen B-Wagenkasten. Berechnung des mittleren U-Werts für den Ist-Zustand von $2.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.
- Prototyp-Montage einer verbesserten Wärmedämmung in 7 Varianten für die Seitenwand, für die Verstärkungen zwischen Seitenwandrippen und Dachspriegel sowie für das Dach, umgesetzt bei einzelnen Partien der rechten Seitenwand des Mittelwagens B von Triebzug RABe 525 NINA 003.
- Die Verifikation der 7 Prototyp-Varianten der Seitenwand-Wärmedämmung mit einer U-Wert-Messung in der Nacht vom 24./25. März 2017. Bewertung der Varianten bezüglich Wärmedämmung, Oberflächentemperatur, Montageaufwand und Materialkosten. Bestimmung einer Bestvariante.
- U-Wert-Berechnung für den Soll-Zustand der Fahrzeughülle bei einem Mittelwagen B mit der Bestvariante der Wärmedämmung von Seitenwand und Dach. Der gerechnete mittlere U-Wert für die gesamte Fahrzeughülle des B-Wagenkastens senkt sich damit von $2.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ auf $1.83 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, dies entspricht einer Verbesserung von 25 %. In diesen Massnahmen sind alle Seitenfenster als Wärmeschutzverglasung mit hoher Durchlässigkeit für Mobilkommunikation berücksichtigt.
- Montage der verbesserten Wärmedämmung im Oktober und November 2017 beim Triebzug RABe 525 NINA 005 für Seitenwände, Dach sowie Stirnwände der Wagenübergänge bei allen drei Wagenkasten. Die Arbeiten erfolgten in der BLS-Werkstätte in Bönigen parallel zum den Arbeiten des Refit-Projekts.
- Verifikation der verbesserten Wärmedämmung mit Heizversuchen beim Triebzugs RABe 525 NINA 005 am 20. und 21. Januar 2018 im Stillstand auf einem Aussengleis im Bahnhof Huttwil. Als direkter Vergleich dient der zeitgleiche Heizversuch am selben Ort des Triebzugs RBe 525 NINA 006, der eine unveränderte herkömmliche Wärmedämmung aufweist.

Die Verifikation mittels Heizversuchen zeigt eine Verbesserung des mittleren U-Werts für die gesamte Fahrzeughülle des Triebzugs RABe 525 NINA 005 von rund 22 %. Damit senkt sich der mittlere U-Wert von bisher $2.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ auf rund $1.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Vorgängige Berechnungen zeigten einen verbesserten U-Wert um 25 % von $2.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ auf $1.83 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, der bei einem dreiteiligen Triebzug RABe 525 NINA eine jährliche Energieeinsparung von ca. 20 MWh ermöglicht.

Die Verbesserung der Wärmedämmung bei einem bestehenden Schienenfahrzeug für den Personenverkehr ist sinnvoll, falls die bisherige Wärmedämmung Schäden durch Alterung, Zersetzung, Kondensat oder ungenügende Befestigung aufweist. Der Einbau einer verbesserten Wärmedämmung verursacht aufwendige Montagearbeiten, die sich nur bei umfassenden Refit-Projekten zur halben Lebensdauer der Fahrzeuge sinnvoll umsetzen lassen. Hingegen lassen sich die entsprechende Investition für die verbesserte Wärmedämmung mit den dadurch reduzierten Energiekosten und der verbleibenden Fahrzeug-Lebensdauer von 15 bis 20 Jahren kaum oder nur knapp amortisieren.

Nach den positiven Messresultaten zur innovativen Wärmeschutzverglasung mit hoher Durchlässigkeit für Mobilkommunikation im Rahmen dieses Projekts hat BLS bei AGC VERRES INDUSTRIELS SA in Moutiers mit separater Finanzierung im September 2016 eine Bestellung ausgelöst, um bei 29 von insgesamt 36 Triebzügen RABe 525 NINA alle Seitenwandfenster der Fahrgasträume zu ersetzen. Gegenüber den bisherigen Seitenwandfenstern senkt sich damit deren U-Wert von $2.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ auf $1.87 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Die Erkenntnisse aus Prototyp-Umsetzung beim Triebzug RABe 525 NINA 005 dienen als Entscheidungsgrundlage für ein zukünftigen Refit der 25 Triebzüge RABe 535 Lötschberger.

Récapitulatif

L'analyse devrait démontrer à l'exemple d'un train articulé RABe 525 NINA du réseau express régional du BLS les possibilités et les limites d'une amélioration de l'isolation thermique.

L'analyse a pour but les points suivants :

- Etude de la faisabilité d'une l'isolation thermique améliorée à l'exemple des trains articulés RABe 525 NINA, avec le but de réduire le coefficient de transfert thermique (indice u) actuel de $2.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ au moins de 20 % à une valeur inférieure à $1.92 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.
- Désigner des parties ou composants généraux, qui peuvent être appliqués à d'autres séries de trains.
- Réalisation prototype d'une isolation thermique améliorée sur un train articulé RABe 525 NINA de trois voitures.

L'analyse comprend les étapes suivantes :

- Analyse et modélisation de l'état actuel de l'isolation thermique d'une voiture intermédiaire B. Calcul de l'indice u moyen de l'état actuel de $2.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Montage prototype d'une isolation thermique améliorée en 7 variantes pour la paroi latérale, les renforts entre la paroi latérale et la toiture ainsi que les renforts de la toiture. Le montage prototype est appliqué en parties limitées sur la paroi latérale droite de la voiture B du train articulé RABe 525 NINA 003.
- Vérification des 7 variantes d'isolation thermique prototype avec une mesure de l'indice u dans la nuit du 24 au 25 mars 2017. Evaluation des 7 variantes en fonction des critères suivants : l'isolation thermique, la température à la surface, la facilité au montage et les coûts de matériel. Evaluation de la meilleure variante de l'isolation thermique.
- Calcul de l'indice u d'une voiture intermédiaire B pour la meilleure variante de l'isolation thermique appliquée aux parois latérales et à la toiture. L'indice u moyen calculé baisse de $2.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ à $1.83 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, ce qui correspond à une amélioration de 25 %. L'amélioration comprend aussi le remplacement des fenêtres latérales par un vitrage à isolation renforcée et à haute transparence de microondes.
- Montage de l'isolation thermique améliorée dans le train articulé RABe 525 NINA 005 sur les parois latérales, sous la toiture et sur les parois frontales de toutes les trois voitures. Le montage est effectué aux ateliers de BLS à Bönigen, en même temps que les travaux d'un projet de rénovation en cours.
- Vérification de l'isolation thermique améliorée du train articulé RABe 525 NINA 005 avec des essais de chauffage, le 20 et 21 janvier 2018 à l'arrêt sur une voie de garage à la gare de Huttwil. Pour une comparaison directe, les essais de chauffage sont effectués au même endroit simultanément sur le train articulé RABe 525 NINA 005, équipé de l'isolation thermique ancienne, non-modifiée.

Des essais de chauffage du train articulé RABe 525 NINA 005 montrent une amélioration du coefficient de transfert thermique (indice u), moyen de toute la surface extérieure d'environ 22 %. L'indice u moyen baisse de $2.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ à environ $1.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Les simulations précédentes montraient un indice u amélioré de 25 % de $2.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ à $1.83 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, ce qui permettrait des économies d'énergie annuelles de 20 MWh pour un train articulé RABe 525 NINA à trois voitures.

L'amélioration de l'isolation thermique d'un véhicule ferroviaire du trafic voyageur est justifiée, si l'isolation thermique existante montre des défauts par vieillissement, par décomposition, par humidité de condensation ou par une fixation défectueuse. Le montage d'une isolation thermique améliorée entraîne des travaux lourds, qui ne sont envisageables que dans des projets importants de rénovation à la moitié de la durée de vie d'un véhicule. Par contre, l'amortissement de l'investissement d'une isolation thermique améliorée par réduction des coûts d'énergie, pendant la durée de vie restante de 15 à 20 ans du véhicule, n'est pas ou guère possible.

Les résultats et l'expérience de la réalisation prototype du train articulé RABe 525 NINA 005 serviront comme critères de décision pour le futur projet de rénovation des 25 trains articulés RABe 535 Löt-schberger.

1 Ausgangslage

In der Regel werden bei Schienenfahrzeugen für den Personenverkehr ungefähr nach 15 bis 20 Jahren zu deren Lebensmitte grössere Erneuerungsprojekte (Refitprojekte) umgesetzt, die eine Anpassung an die Bedürfnisse der Fahrgäste erlauben und sowie eine technische Erneuerung für die verbleibende Lebenszeit ermöglichen.

Die Potentialanalyse soll die Frage beantworten, mit welchem Aufwand und Nutzen die Verbesserung der Wärmedämmung bei einem bestehenden Fahrzeug anlässlich eines Refitprojekts möglich ist, um damit eine Entscheidungsgrundlage für zukünftige Projekte zu schaffen.

2 Ziel der Arbeit

Die Potentialanalyse soll bei einem Triebzug RABe 525 NINA die Möglichkeiten und Grenzen einer Verbesserung der Wärmedämmung bei der Fahrzeug-Aussenhülle aufzeigen.

Die Umsetzung der verbesserten Wärmedämmung erfolgt als Prototyp bei einem Triebzug RABe 525 NINA und dient als Entscheidungsgrundlage für das zukünftige Refit der 25 Triebzüge RABe 535 Lötschberger, da beide Fahrzeugserien eine sehr ähnliche Konstruktion der Wagenkasten und eine identische Wärmedämmung aufweisen.

Die Potentialanalyse umfasst folgende Ziele:

- Abklärung der technischen Machbarkeit für die Verbesserung der Wärmedämmung der Aussenhülle bei den Triebzügen RABe 525 NINA mit dem Ziel, den aktuellen U-Wert von $2.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ um mindestens 20 % auf einen Zielwert unter $1.92 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ zu verkleinern.
- Ausweisung allgemeiner Teile, die zur Verbesserung der U-Werte anderen Zugkategorien angewendet werden können.
- Umsetzung und Verifikation der verbesserten Wärmedämmung an einem dreiteiligen Triebzug RABe 525 NINA.

3 Forschungsansatz und Umsetzung

3.1 Planung der Arbeitsschritte

3.1.1 Zeitplan und Meilensteine

Der ursprüngliche Zeitplan gemäss dem BLS-Bericht <Projektplan> V09 vom 29. September 2015 ist auf Wunsch von Tristan Chevroulet des Bundesamts für Verkehr (BAV) mit einem Bericht zum Projektstand per 30. November 2015 mit einer dazugehörigen Rechnungstellung von BLS an BAV von CHF 60'000.— ergänzt worden.

Der aktuelle Stand der Arbeiten per 1. Mai 2017 basiert auf dem ursprünglichen Zeitplan sowie den Meilensteinen. Folgende Anpassungen sind bisher erfolgt:

- Termin für den Meilenstein 5 <Beschluss-Bericht> verschoben vom 31. Januar 2017 auf den 01. Mai 2017.
- Vorgezogene Umsetzung mit Prototyp-Einbauten bei Seitenwand-Partien sowie deren U-Wert-Messung beim Triebzug RABe 525 NINA 003 vom 24./25. März 2017.
- Termin für den Meilenstein 8 <Schlussbericht und Projektende> verschoben vom 31. Juli 2018 auf den 15. November 2018.

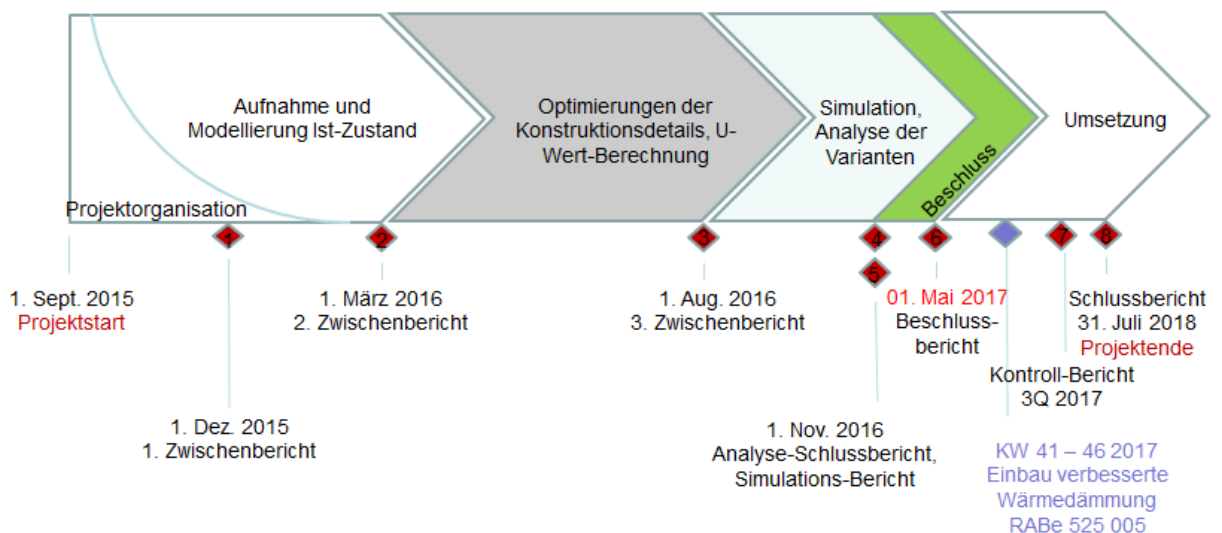


Abbildung 1. Projektphasen und Meilensteine gemäss ursprünglichem Zeitplan.

3.1.2 Arbeitsschritte

Der aktuelle Stand der Arbeitsschritte basiert auf dem ursprünglichen BLS-Bericht <Projektplan> V09 vom 29. September 2015. Angepasst ist der Termin für den Meilenstein 5 <Beschluss-Bericht>, verschoben vom 31.01.2017 auf den 01.05.2017, sowie für den Meilenstein 8 <Schlussbericht und Projektende>, verschoben vom 31. Juli 2018 auf den 15. November 2018

Legende zu Tabelle 1 bis Tabelle 3:

- schwarze Schrift: abgeschlossene Arbeiten respektive in Bearbeitung.
- graue Schrift: pendente Arbeiten.

Datum	Aufwand	Arbeitsschritte
Wer: Renato Gartner – Architektur und Bauphysik – Wettingen		
Ab 1.9.15	100h	Projektorganisation - Besprechungen mit BLS AG in Bern oder Spiez 40.0 h - Projekterfassung, Administratives 10.0 h - Planstudium, Einarbeitung in den Konstruktionsaufbau 20.0 h - Ist-Analyse, ermitteln der konstruktiven Schwachstellen 30.0 h
4Q15 1Q16	240h	Konstruktionsanalysen und Optimierungen am Wagenkasten - Optimierungsvorschläge ausarbeiten 30.0 h - Zusammenarbeit mit Ingenieuren und Technikern 100.0 h - Evaluation von geeigneten Wärmedämmstoffen 40.0 h - Bilanzieren möglicher Konstruktionsoptimierungen, Kosten/Nutzen 70.0 h
28.02.16		Meilenstein 1: Zwischenbericht 1
1-2Q16	240h	Analysen, Optimierungen und Einbau - am Fenster 80.0 h - an der Einstiegstüre 60.0 h - Analysen und Optimierungen am Personenübergang 50.0 h - Optimierungen bei Durchdringungen von Energie und HLK 50.0 h
31.07.16		Meilenstein 2: Zwischenbericht 2
3Q16	100h	U-Mittelwert-Berechnung - Flächen- und Massauszüge erstellen 16.0 h - Alle Bauteilübergänge mit ISO2 resp. Flixo berechnen 40.0 h - Punktstörungen / Bauteilanalysen mit ISO2 resp. Flixo berechnen 26.0 h - Auswertung der Resultate 14.0 h - Zusammenstellung / Tabellen U-Mittelwert im Stillstand 4.0 h
31.10.16		Meilenstein 3: Analyse-Schlussbericht
1Q17- 2Q18	100h	Umsetzung der Optimierungsvorschläge an einem NINA-Treibzug - Begleitung der Umsetzungsarbeiten am Fahrzeug 1:1 50.0 h - Örtliche Anpassungen bei Bedarf bestimmen 20.0 h - Messungen eines optimierten Reisezugwagens 30.0 h

Tabelle 1: Arbeiten Renato Gartner.

Die Arbeiten von Stephan Menth der Firma emkamatik, mit Simulationen am bereits vorhandenen thermischen Modell des Triebzugs RABe 525 NINA, sind in Tabelle 2 dargestellt.

Datum	Aufwand	Arbeitsschritte
Wer: Stephan Menth – emkamatik – Wettingen		
2-3Q16	25h	Simulation an vorhandenem Modell - Simulation - Extrapolation der Studienergebnisse auf gesamte Flotte RABe 525 NINA
31.10.16		Meilenstein 4: Simulations-Bericht
1Q17- 2Q18	25h	Kontrolle und Nachweis der umgesetzten Isolation - Analyse der Messdaten auf RABe 525 NINA 006
31.05.18		Meilenstein 6: Kontroll-Bericht

Tabelle 2. Arbeiten EMKAMATIK.

Die Arbeiten von BLS sind in Tabelle 3 dargestellt.

Datum	Aufwand	Arbeitsschritte
Wer: BLS		
Laufend	250h	Laufende Arbeiten, Berichterstattung - Begleitung des Projektes - Koordination - Begehungen auf Fahrzeug - Bereitstellung der vorhandenen Zeichnungen - Erstellen der Zeichnungen der Konstruktionsdetails (ECOTRANS) - Verfassen eines Beschluss-Berichtes (Synthese der Resultate aus den Studien Gartner und emkamatik sowie nächste Schritte).
01.05.17		Meilenstein 5: Beschluss-Bericht
3Q17- 4Q18	1030h	Umsetzung am Fahrzeug, Berichterstattung, Publikationen - Demontage der Inneneinrichtung und –Verkleidung - Entfernung bisherige Isolation - Montage neue Isolationsmaterialien - Montage Innenverkleidung und -Einrichtung - Verfassen eines Schluss-Berichtes - Verfassen von Zusammenfassung (D/F, 3-5 Seiten) und Executive Summary (D/F/E, 300 Wörter) des Synthese-Berichtes. - Publikation von Zusammenfassung und Executive Summary. - Publikation Artikel in Eisenbahnrevue.
15.11.18		Meilenstein 8: Schluss-Bericht und Projektende

Tabelle 3: Arbeiten BLS.

3.2 Modellierung der Aussenhülle

3.2.1 Aufnahme und Modellierung Ist-Zustand der Aussenhülle

Renato Gartner hat die Aufnahme des Ist-Zustands sowie die Modellierung der Aussenhülle durchgeführt sowie den entsprechenden Berechnungsbericht [1] erstellt.

Zur Vereinfachung erfolgte die Modellierung und Berechnung für den Mittelwagen B. Die Modellierung berücksichtigt die einzelnen Bauteile von Böden, Wänden, Fenstern und vom Dach sowie der Wellenbälgen der Wagenübergänge und der Einstiegstüren. Zudem sind im Berechnungsbericht [1] die thermischen Schwachstellen der Konstruktion wie Wärmebrücken, Gläser und Durchdringungen der Wärmedämmebene als Punkt- und Linienstörungen enthalten. Die Modellierung und Berechnung erfolgte mit den Software-Programmen ISO2 und FLIXO.

Der gerechnete mittlere U-Wert für die gesamte Fahrzeughülle des B-Wagenkastens von $2.42 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ stimmt gut mit dem bisher bekannten mittleren U-Wert für den gesamten dreiteiligen Triebzug RABe 525 NINA, gemessen mit einem Aufheizversuch am 11. Dezember 2011 [2], überein.

BLS RABe 525 NINA B - W A G E N			
Bauphysikalische Konstruktionsanalyse - 1. Berechnung			2
U-Mittelwert-Bestimmung im Stillstand, $h_e = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$ (windstille)			10.02.2016
Bauphysikalisches Modell B - Wagen			
	A [m ²]	U [W/m ² K]	W-Fluss [W/K]
TOTAL FLÄCHE (Berechnungsbase)	169.434		
TOTAL WÄRMEFLUSS (Berechnungsbase)			410.096
U - MITTEL W/m ² K		2.420	
	A [m ²]	U [W/m ² K]	[W/K]
U x A B - Wagen total	169.434	2.420	410.096

Abbildung 2. Mittlerer U-Wert von $2.42 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ für den Ist-Zustand der Aussenhülle. Auszug aus Berechnungsbericht [1].

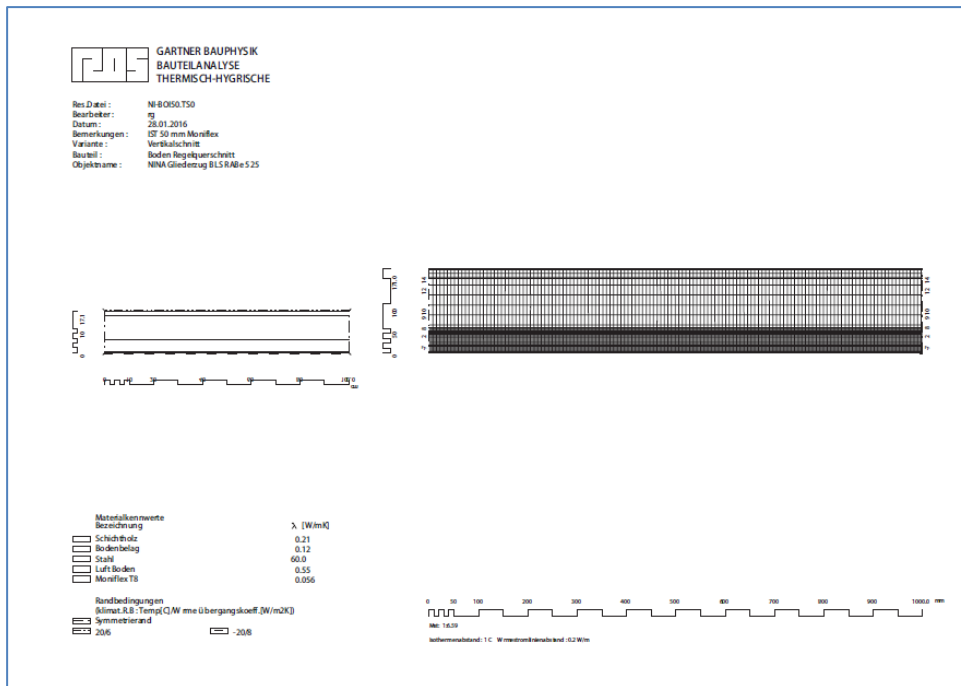


Abbildung 3. Modellierung des Bodens für U-Wert-Berechnung, Auszug aus Berechnungsbericht [1].

3.2.2 Modellierung Soll-Zustand der Aussenhülle (Maximalvariante)

Mit den Ergebnissen der Berechnung aus dem Ist-Zustand werden die Details mit hohem Verbesserungspotential eruiert und für die Optimierung analysiert.

Bei mehreren Besichtigungen auf Triebzügen RABe 525 NINA in der BLS-Werkstätte Bönigen hat Renato Gartner Potentialanalysen für thermische Optimierungen der ausgewählten Konstruktionsdetails erarbeitet und diese als Fotoskizzen [3] festgehalten.

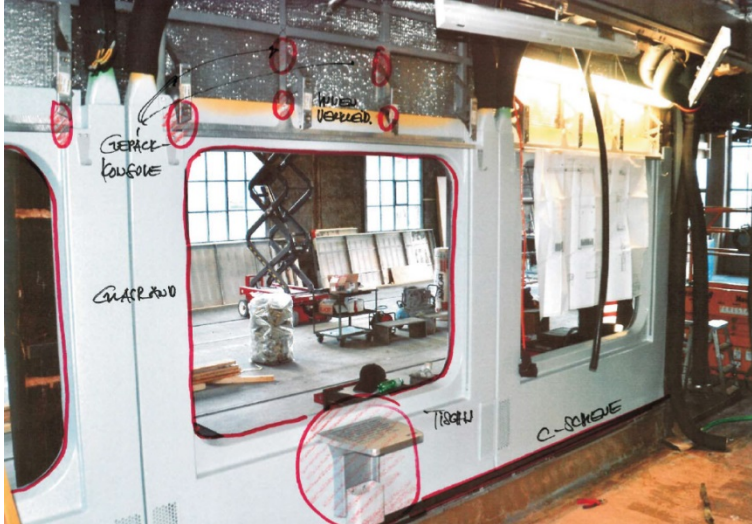


Abbildung 4. Fotoskizze der bestehenden Seitenwand, im Fensterbereich mit GFK-Innenverkleidungen.

Aus den thermischen Optimierungen der Konstruktionsdetails resultiert ein maximal möglicher Soll-Zustand für die thermische Isolation der Aussenhülle. Der Soll-Zustand ist im Berechnungsbericht [4] dargestellt.

Der maximal mögliche Soll-Zustand repräsentiert eine theoretische Grösse und geht von einer Umsetzung aller Optimierungs-Massnahmen aus, ohne Berücksichtigung von Detailkonstruktion, Aufwand und Machbarkeit. Der gerechnete mittlere U-Wert für die gesamte Fahrzeughülle des B-Wagenkastens kann bei Umsetzung aller Optimierungs-Massnahmen von $2.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ auf $1.38 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ gesenkt werden. Dies entspricht einer Verbesserung von 43 %.

3.3 Isolationsmaterial

3.3.1 Auswahl der Isolationsmaterialien

Die Auswahl der Isolationsmaterialien erfolgt durch Renato Gartner in Zusammenarbeit mit ECOTRANS Peter Wüst.

Für die Auswahl dient ein pragmatischer Ansatz, der neben Materialeigenschaften auch die Serienreife sowie die Liefermöglichkeit von Zuschnitten und Formteilen berücksichtigt. Bei der Potentialanalyse steht nicht ein umfassender Vergleich von allen bekannten Dämmmaterialien im Vordergrund. Das Auswahlverfahren konzentriert sich insbesondere auf Isolationsmaterialien, die auch im feuchten Zustand geringe Wärmeleitfähigkeiten behalten [5].

Folgende Isolationsmaterialien aus Polyethylen mit geschlossen-poriger Zellstruktur der Firma SSC in Goldach erweisen sich im Auswahlverfahren als geeignet:

- SSC Q1: Verwendung bei Seitenwand und Decke, Anordnung zwischen den Rippen des Wagenkastens, spezifisches Gewicht 15 kg/m^3 .

Wärmeleitfähigkeit λ [5]:

- trocken: $0.041 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$
- feucht: $0.045 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$

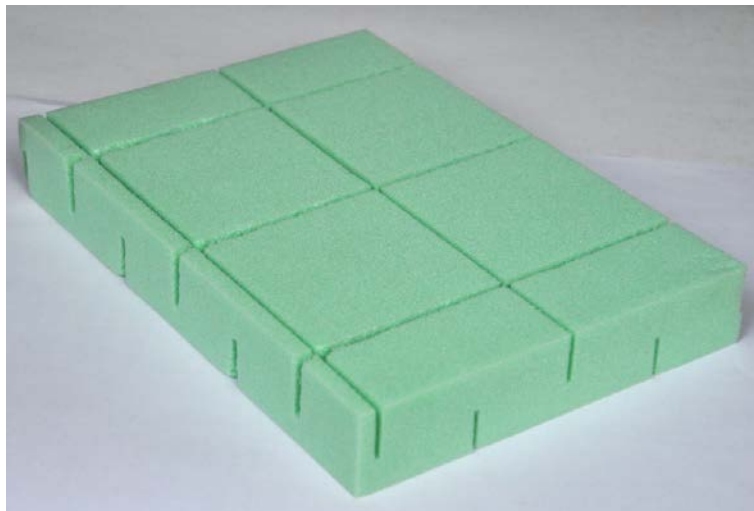


Abbildung 5. Isolierschaum SSC Q1 mit orthogonalen Einschnitten zur Aufnahme der Schwind- und Quellsbewegungen unter Temperaturschwankungen. Foto SSC.

- SSC Q20 6 mm: Für Seitenwand als zusätzliche Wärmedämmung über dem Isolierschaum SSC Q1 zur Überdeckung der Wärmebrücken an den Z-Profilen der Seitenwandrippen.

Mit beidseitiger aussenliegender Aluminiumfolie sowie einer innenliegenden Aluminiumfolie, Dicke 6 mm, spezifisches Gewicht 75 kg/m^3 .

Die zwei aussenliegenden Aluminiumfolien sind je durch in einer wabenförmigen Polyethylenfolie eingeschlossene Luftschicht getrennt. Zwischen diesen Schichten liegt eine dritte, innenliegende Aluminiumfolie.

Wärmeleitfähigkeit λ [5]:

- trocken: $0.034 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$
- feucht: $0.039 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$

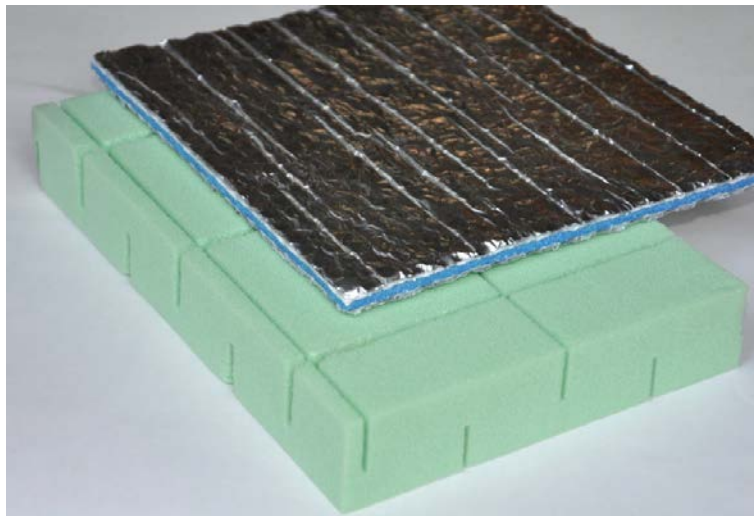


Abbildung 6. Isoliermaterial SSC Q20 als zusätzliche Wärmedämmung über dem Isolierschaum SSC Q1. Foto SSC.

- SSC Q20 10 mm: Für Seitenwand als zusätzliche Wärmedämmung über dem Isolierschaum SSC Q1 zwischen den Z-Profilen der Seitenwandrippen, mit beidseitiger aussenliegender Aluminiumfolie sowie zwei innenliegenden Aluminiumfolie, Dicke 10 mm, spezifisches Gewicht 75 kg/m^3 .

Aufbau analog SSC Q20 10 mm, jedoch mit zweiter innenliegender Aluminiumfolie, integriert in einer Mittelschicht mit 4mm Polyethylenschaum.

Wärmeleitfähigkeit λ [5]:

- trocken: $0.034 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$
- feucht: $0.039 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$

Die Firma SSC weist als Zulieferer von STADLER gute Erfahrung mit der Verwendung dieser Materialien in Schienenfahrzeugen auf. Zudem ist die Herstellung der Isolation in Zuschnitten und Formteilen möglich.

3.3.2 Isolation von Wärmebrücken

Bei Neufahrzeugen lässt sich die Anzahl der Wärmebrücken relativ einfach konstruktiv minimieren und mit Spezialkunststoffen thermisch dämmen. Generell sind alle die Dämmschicht der Aussenhülle durchdringenden Strukturteile thermisch zu entkoppeln. Bei Refit-Projekten mit bereits gegebenen Konstruktionen ist jedoch für jede Wärmebrücke eine spezifische Detailkonstruktion, die eine gute thermische Entkopplung bei vertretbarem Kostenaufwand aufweist, zu erarbeiten.

Bestehende Wärmebrücken bei den Befestigungspunkten werden mittels thermischer Entkopplung verbessert. Dazu dienen Zwischenlagen aus dem Kunststoff ISOVAL FR4-H mit einer Dicke von 5 mm bis 10 mm. Bestimmend sind hier möglichst einfache Konstruktionslösungen, die zu keinen Verschiebungen von relevanten Befestigungspunkten in Innenverkleidungen, Seitenwandtischen oder der Bestuhlung führen.

Isolation von Wärmebrücken im Bereich der Seitenwände:

- Überdecken der Z-Profile (Wärmebrücken) mit 6 mm Isoliermaterial SSC Q20 6 mm.
- Befestigung der Seitenwandtische sowie der Deckenelemente mit Hutablagen an Seitenwand mit 5 mm Zwischenlagen aus Kunststoff ISOVAL FR4-H.
- Stuhlbefestigung an Seitenwand mit 5 mm Zwischenlagen aus Kunststoff ISOVAL FR4-H.

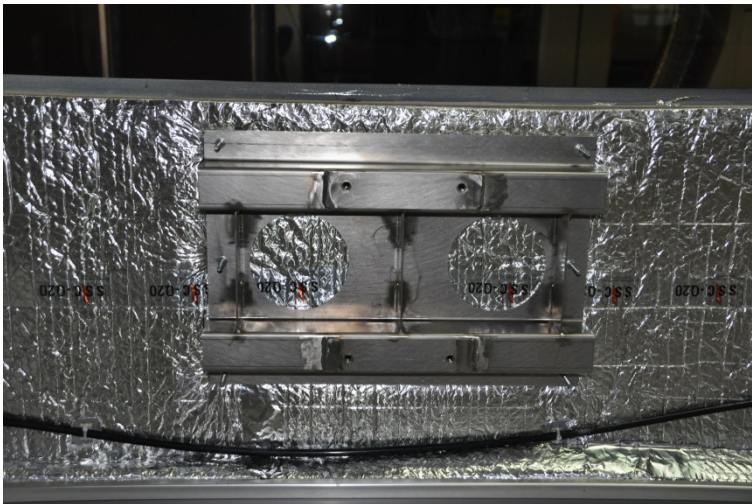


Abbildung 7. Neue Halterung für Seitenwandtische unterhalb des Fensters, montiert mit thermischer Entkopplung auf die Seitenwandprofile. Foto: Renato Gartner, 14.11.2017.

Isolation von Wärmebrücken im Bereich des Dachs:

- Befestigungselemente für Deckenverkleidung, Beleuchtung und Lüftungskanäle mit 5 mm Zwischenlagen aus Kunststoff ISOVAL FR4-H.
- Umhüllen der Konstruktionsrippen im Übergang von Wand zu Dach Wärmedämmmaterial SSC Q1 (siehe Abbildung 24).

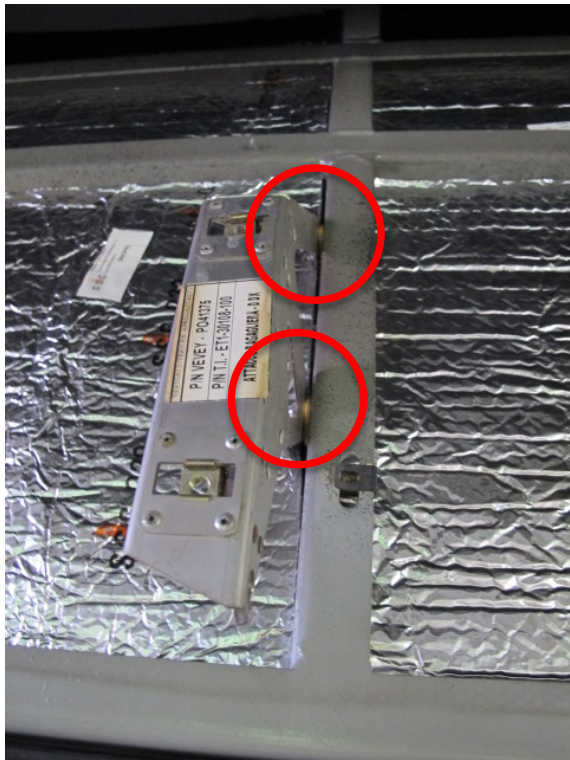


Abbildung 8. Thermische Entkopplung der Wärmebrücke zwischen Seitenwandprofil und Befestigung der des Deckenelements. Auf dem Bild sind in den roten Kreisen die Zwischenlagen aus Kunststoff ISOVAL FR4-H erkennbar. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 12.10.2017.

3.4 Wärmedämmung der Seitenwand

3.4.1 Allgemeiner Aufbau

Für die Wärmedämmung der Seitenwand werden die Varianten 0, 1a, 1b, 2, 3 und 6 näher untersucht. Die Variante 0 stellt den Ist-Zustand mit dem Wärmedämmmaterial MONIFLEX dar.

Diese Varianten sind in den Kap. 3.4.4 bis 3.4.9 detailliert dargestellt und in Kap. 3.4.11 bewertet.

Die als unrealistisch eingestuften Varianten 4 und 5 wurden vorzeitig verworfen und sind in diesem Bericht nicht weiter dargestellt. Die Variante 7 (bestehende Flächendämmung MONIFLEX 50 mm, neu Deckschicht Q20 6 mm, ohne Wärmedämmung der Seitenwand-Rippen) wurde aus Zeitgründen nicht als Prototyp-Einbau verwirklicht.

3.4.2 Minimale Verschiebung der Innenverkleidung

Bei allen Varianten für die Wärmedämmung der Seitenwand ist sicherzustellen, dass die Seitenwandverkleidung allenfalls nur im Bereich von wenigen Millimetern gegen innen verschoben wird.

Damit ist kein aufwändiges Verschieben der bisherigen Stuhlanordnung respektive deren Befestigungspunkte in Boden und Seitenwand notwendig. Ebenfalls bleiben die Übergänge von Seitenwand- zu Deckenverkleidung nahezu identisch und benötigen keine Anpassungen und keine Neufertigungen der GFK-Verkleidungselemente.

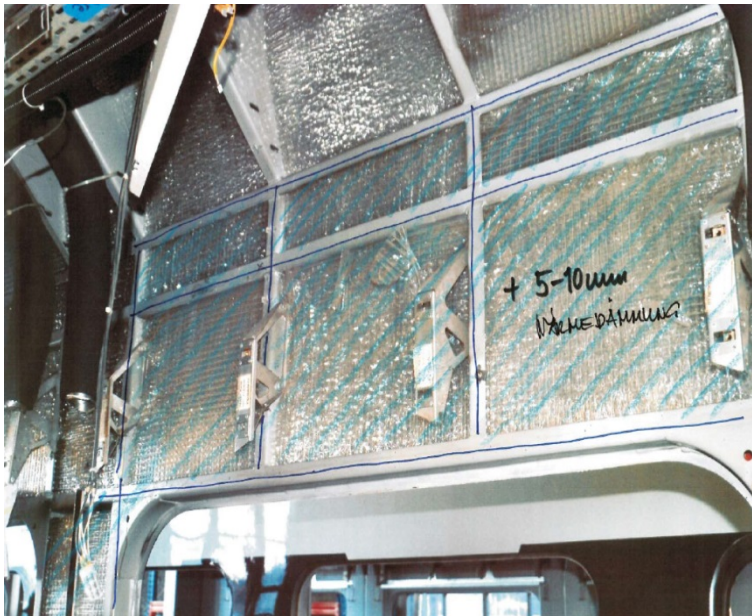


Abbildung 9. Bestehender Aufbau der Seitenwand über dem Fenster, mit Halterungen für Deckenelemente, mit bisherigem Isolationsmaterial MONIFLEX zwischen den Z-Profilen der Seitenwandrippen. Foto und Skizze R. Gartner.

3.4.3 Infrarot-Reflektion

Die Alukaschierung des Isolationsmaterials SSC Q20 erlaubt die Ausnutzung der Infrarot-Reflektion von Wärmestrahlung aus dem Fahrgastraum.

Durch die Infrarotreflektion ergeben sich tiefere U-Werte der Wärmedämmung, als dies nur durch die Berücksichtigung der Wärmeleitfähigkeit λ möglich ist. Die U-Wert-Messungen in Kap. 3.4.10 bestätigen die Wirksamkeit der Infrarot-Reflektion.

3.4.4 Variante 0 (Ist-Zustand)

Aufbau, von aussen nach innen:: MONIFLEX 50 mm, Seitenwandgerippe nicht gedämmt.

U-Wert (gemessen) $1.02 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

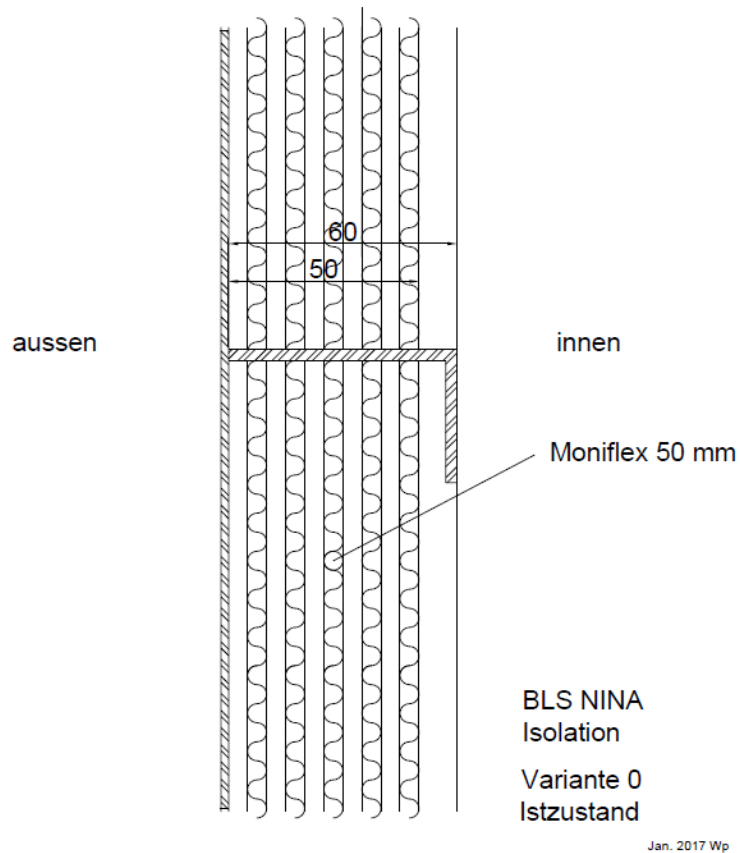


Abbildung 10. Wärmedämmung der Seitenwand, Variante 0 (Ist-Zustand), Ansicht von oben. Zeichnung: ECOTRANS Peter Wüst, 01.2017.

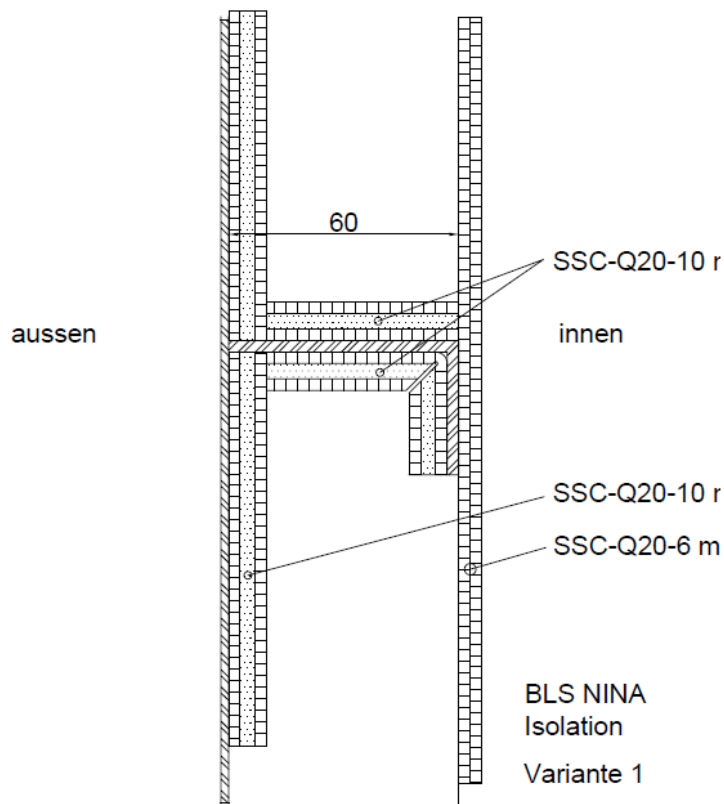


Abbildung 11. Wärmedämmung der Seitenwand, Variante 0 (Ist-Zustand). Wärmedämmung MONIFLEX zwischen den Seitenwandrippen des Fahrgastraums von RABe 525 NINA 002. Die Innenflächen der Seitenwandrippen sind nicht gedämmt. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 19.11.2015.

3.4.5 Variante 1a

Aufbau, von aussen nach innen:: Q20 10 mm, Luft 50 mm, Deckschicht Q20 6 mm.

U-Wert (gemessen) $0.70 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, Innen-Oberflächentemperatur $15.3 \text{ }^\circ\text{C}$.



Jan. 2017 V

Abbildung 12. Wärmedämmung der Seitenwand, Variante 1a, Ansicht von oben. Zeichnung: ECOTRANS Peter Wüst, 01.2017.

Das Isolationsmaterial SSC Q20 mit einer Dicke von 6 mm liegt vollflächig auf den Z-Profilen der Seitenwandrippen auf und ermöglicht dadurch eine thermische Entkopplung der direkt auf dem Aussenblech aufgeschweissten Z-Profile. Durch die mögliche Kompression des Isolationsmaterials SSC Q20 bei den Befestigungspunkten der Seitenwandverkleidung auf den Z-Profilen sind keine zusätzlichen Distanzelemente notwendig: Die Seitenwandverkleidung hebt sich nur ca. 2 bis 3 mm von der bisherigen Lage gegen Innenseite des Fahrgastraums ab.

Die vollflächige Überdeckung der Seitenwandprofile mit dem Isolationsmaterial SSC Q20 6 mm ist bei allen Varianten 1a, 1b, 2, 3 und 6 enthalten.

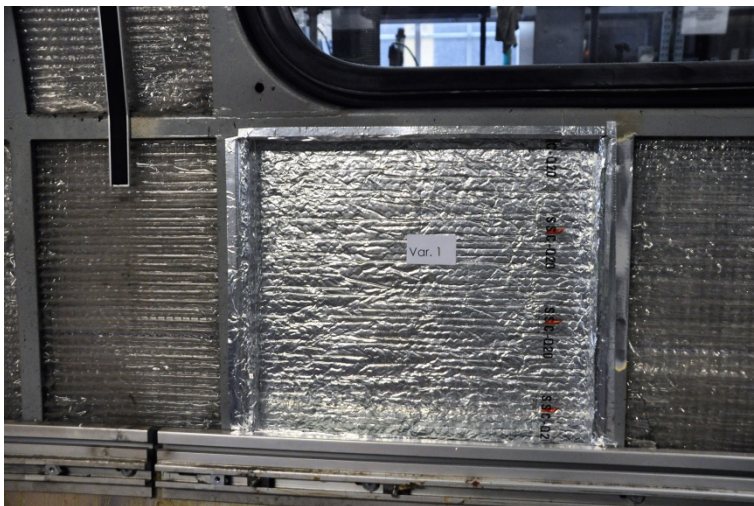
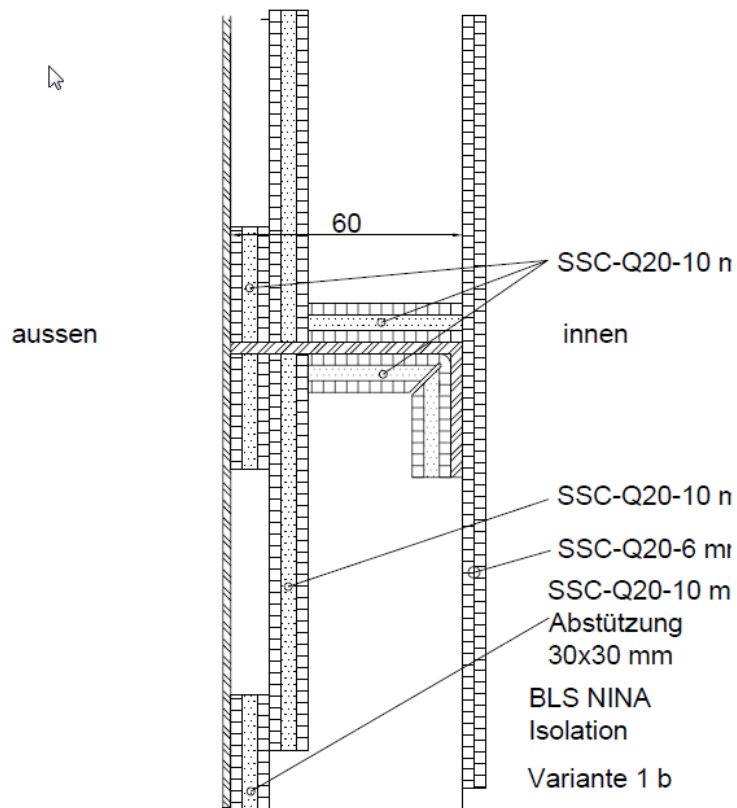


Abbildung 13. Wärmedämmung Variante 1a als partieller Vorversuch an der rechten Seitenwand des Mittelwagens B vom Triebzug RABe 525 NINA 003. Ansicht noch ohne durchgehende Deckschicht Q20 6 mm. Foto: ECOTRANS Peter Wüst 12.01.2017.

3.4.6 Variante 1b

Aufbau, von aussen nach innen:: Luft 10 mm, Q20 10 mm, Luft 40 mm, Deckschicht Q20 6 mm.

Hoher Montageaufwand, U-Wert (gemessen) $0.76 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, Innen-Oberflächentemperatur 15.2°C .



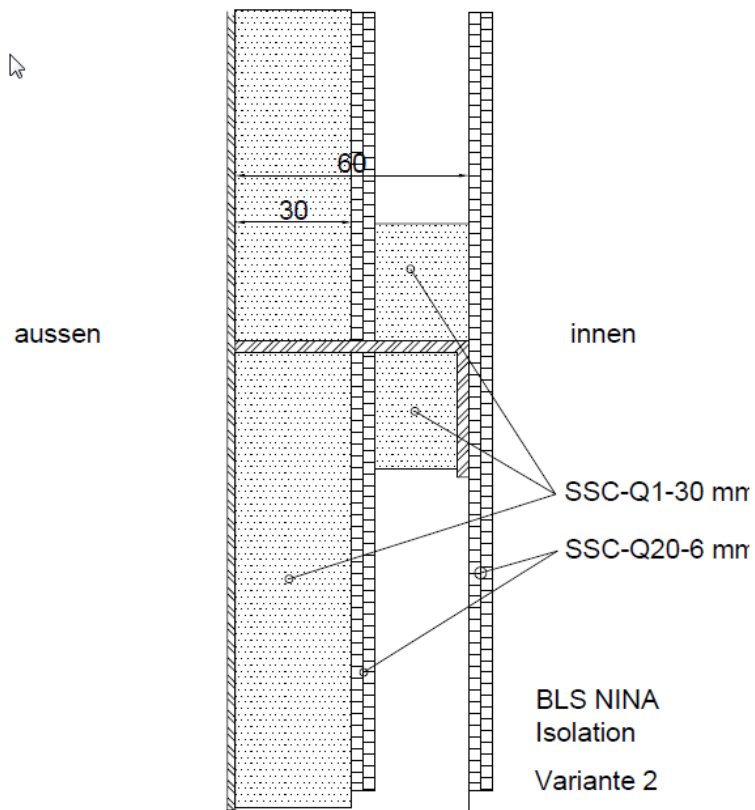
Jan. 2017 W

Abbildung 14. Wärmedämmung der Seitenwand, Variante 1b, Ansicht von oben. Zeichnung: ECOTRANS Peter Wüst, 01.2017.

3.4.7 Variante 2

Aufbau, von aussen nach innen: Q1 30 mm, Q20 6 mm, Luft 24 mm, Deckschicht Q20 6 mm.

U-Wert (gemessen) $0.57 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, Innen- Oberflächentemperatur $15.0 \text{ }^\circ\text{C}$, geringer Montage Aufwand, verhältnismässige Kosten des Rohmaterials.



Jan. 2017 Wp

Abbildung 15. Wärmedämmung der Seitenwand, Variante 2, Ansicht von oben. Zeichnung: ECOTRANS Peter Wüst, 01.2017.



Abbildung 16. Wärmedämmung Variante 2 als partieller Vorversuch an der rechten Seitenwand des Mittelwagens B vom Triebzug RABe 525 NINA 003. Ansicht noch ohne durchgehende Deckschicht Q20 6 mm. Foto: ECOTRANS Peter Wüst 12.01.2017.

3.4.8 Variante 3

Aufbau, von aussen nach innen: Q1 30 mm, Luft 30 mm, Deckschicht Q20 6 mm.

Guter U-Wert (gemessen) $0.39 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, jedoch tiefere Innen-Oberflächentemperatur $12.5 \text{ }^\circ\text{C}$.

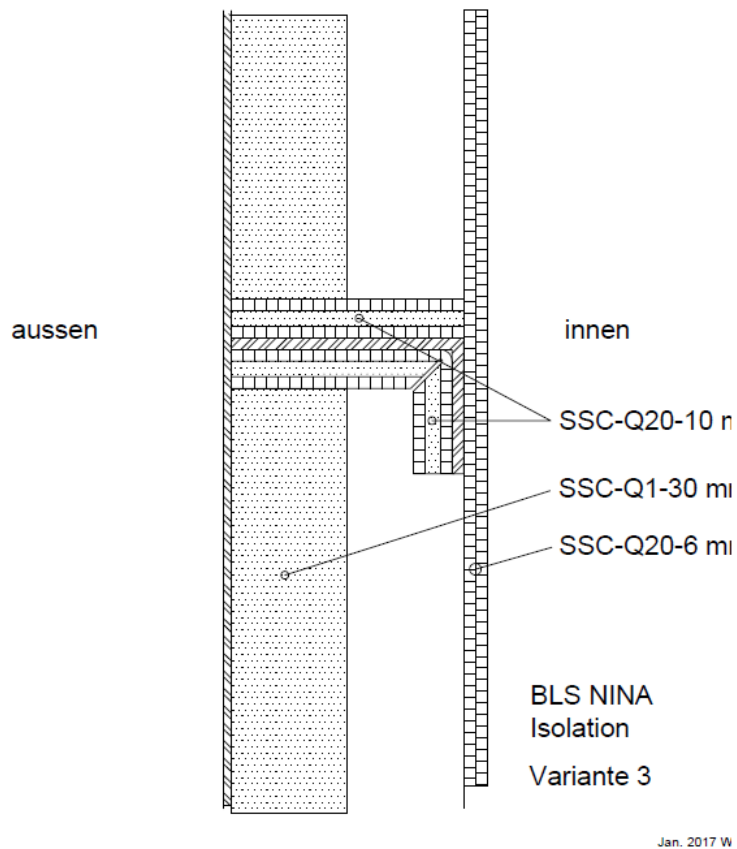


Abbildung 17. Wärmedämmung der Seitenwand, Variante 3, Ansicht von oben. Zeichnung: ECOTRANS Peter Wüst, 01.2017.

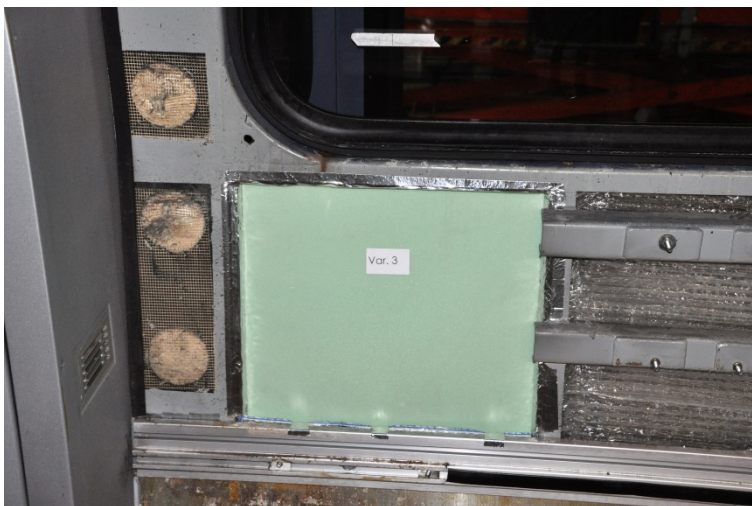
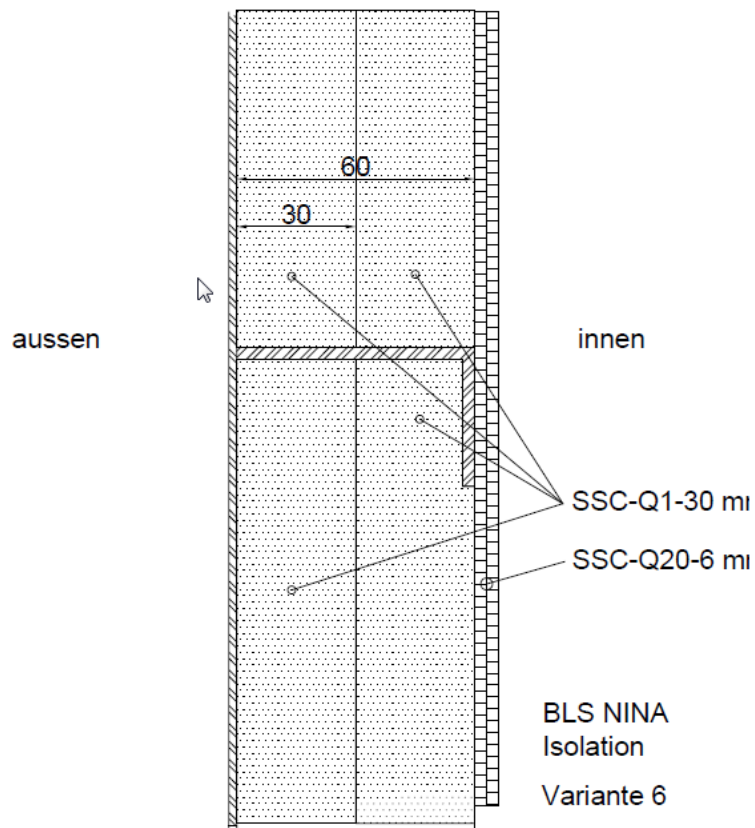


Abbildung 18. Wärmedämmung Variante 3 als partieller Vorversuch an der rechten Seitenwand des Mittelwagens B vom Triebzug RABe 525 NINA 003. Ansicht noch ohne durchgehende Deckschicht Q20 6 mm. Foto: ECOTRANS Peter Wüst 12.01.2017.

3.4.9 Variante 6

2 x Q1 30 mm, Deckschicht Q20 6 mm.

Guter U-Wert (gemessen) $0.32 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, jedoch tiefere Innen-Oberflächentemperatur $12.0 \text{ }^\circ\text{C}$.



Jan. 2017 W

Abbildung 19. Wärmedämmung der Seitenwand, Variante 6, Ansicht von oben. Zeichnung: ECOTRANS Peter Wüst, 01.2017.



Abbildung 20. Wärmedämmung Variante 6 (rechts) als partieller Vorversuch an der rechten Seitenwand des Mittelwagens B vom Triebzug RABe 525 NINA 003. Ansicht noch ohne durchgehende Deckschicht Q20 6 mm. Foto: ECOTRANS Peter Wüst 12.01.2017.

3.4.10 U-Wert-Messung an modifizierter Seitenwand von RABe 525 NINA 003

Die U-Wert-Messung für 6 Varianten der Seitenwand-Wärmedämmung erfolgte in der Nacht vom 24. auf den 25. März 2017 auf einem Aussengleis der BLS-Werkstätte in Oberburg.

Die 6 Varianten der Seitenwand-Wärmedämmung sind bei einzelnen Partien der rechten Seitenwand des Mittelwagens B von Triebzugs RABe 525 NINA 003 umgesetzt.



Abbildung 21. Wärmedämmung als partieller Vorversuch an der rechten Seitenwand des Mittelwagens B vom Triebzug RABe 525 NINA 003. Ansicht mit durchgehender Deckschicht Q20 6 mm über allen Varianten der Wärmedämmung. Foto: ECOTRANS Peter Wüst 12.01.2017.

Die U-Wert-Messung erfolgte mit 2 Messgeräten gSKIN KIT-2615C der Firma GREENTEG gemäss der Norm ISO 9869-1. Jedes Messgerät besteht aus folgenden Komponenten:

- 1 Stk. Wärmeflussensor gSKIN-XO 67 7C, 30mm x 30mm
- 2 Stk. Temperatursensoren, davon 1 Stk. für Innentemperatur und 1 Stk. für Aussentemperatur
- 1 Stk. Daten-Logger gSKIN® DLOG-4231

Das Messgerät errechnet aus dem Wärmefluss sowie der Innen- und Aussentemperatur den U-Wert in $W/(m^2 \cdot K)$. Die Messdauer für eine U-Wert-Messung beträgt bei stabilen Innen- und Aussentemperaturen etwa 2 h.



Abbildung 22. U-Wert-Messgerät GREENTEG gSKIN KIT-2615C. Quelle: <http://shop.greenteg.com>.

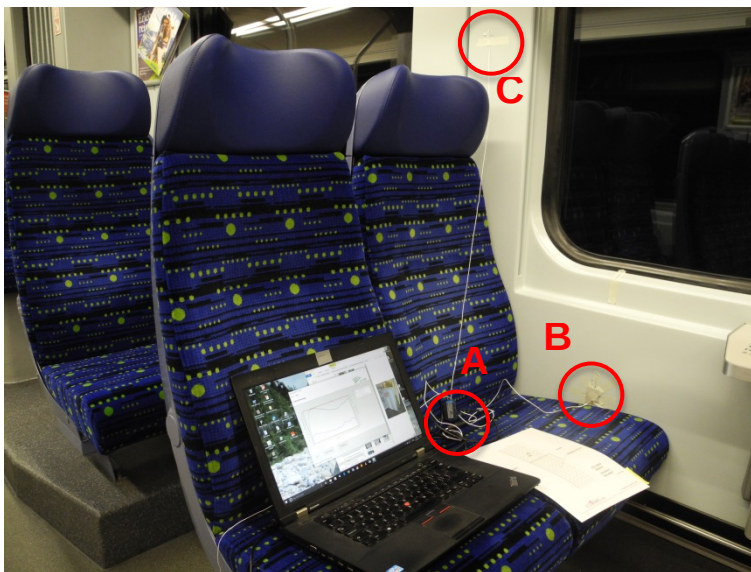


Abbildung 23. U-Wert-Messung mit GREENTEG gSKIN KIT-2615C und Laptop-Rechner zur Visualisierung.

Bildlegende:

- A: Daten-Logger.
- B: Wärmefluss-Sensor.
- C: Innentemperatur-Sensor.
- Nicht auf dem Bild: Aussentemperatur-Sensor.

Foto BLS Christoph Isenschmid.

3.4.11 Messresultate und Bestimmung der Bestvariante

Die Zusammenstellung der Resultate der Messung vom 25./26. März 2017 sowie die Bewertung bezüglich Montagefreundlichkeit und Materialkosten zeigt Tabelle 4. Die gemessenen U-Werte beinhalten die gesamte Seitenwandkonstruktion inkl. Innenverkleidung. Die Innenverkleidung besteht aus einer Wabenkonstruktion mit einer Dicke von 10 mm.

Potenzialanalyse thermische Isolation BLS RABe 525 NINA 003					gemessene Werte greenTEG Depot BLS Oberburg 24.3.2017		Gartner Renato	Ecotrans IR- Reflektion berücksichtigt	Beurteilung SSC	
Zeitplan Laufzeit 2 Std mit Umrüstung von 0,5 Std		Testobjekt Varianten NINA	Isolationsaufbau Seitenwand	Material- stärke	Wärme- strom- dichte gemessen	U-Wert Seiten- wand gemessen	U-Wert Seiten- wand gerechnet	U-Wert Seiten- wand gerechnet	Rang Bewertung Montage	Rang Bew. Preis Rohmat.
Gerät 1	Gerät 2			mm	W/m2	W/m2K	W/m2K	W/m2K		
	gemietet		Einrichten							
	00:45 bis 02:57	Variante 0 Istzustand Reverenz	Moniflex, Gerippe nicht geschützt	50	13,7	1,02		1,01	0	0
	22:23 bis 00:24	Variante 1a	Q20-10 + Q20-6, Gerippe geschützt mit Q20-10	10 + 6	8,8	0,7	1,19	0,61	1	1
22:24 bis 00:26		Variante 1b	Q20-10 + Q20-6, Gerippe geschützt mit Q20-10	10 + 6	9,7	0,76	1,01	0,5	4	3
	03:21 bis 05:16	Variante 2	Q1-30 + Q20-6 + Q20-6, Gerippe geschützt mit Q20-11	31 + 6 + 6	7,4	0,57	0,67	0,72	2	4
03:19 bis 05:11		Variante 3	Q1-30 + Q20-6, Gerippe geschützt mit Q20-10	30+6	4,9	0,39	0,76	0,79	3	2
00:48 bis 02:50		Variante 6	Q1-30 + Q1-30 + Q20-6, Gerippe geschützt mit Q20-10	30+30+6	4	0,32	0,52	0,46	5	5
		Variante 7	Moniflex 50 + Q20-6, Gerippe nicht geschützt	50+6			0,7	0,57		

Tabelle 4. Bewertung der Varianten für die Wärmedämmung der Seitenwand. Quelle: ECOTRANS Peter Wüst 28. März 2017.

Die Beurteilung der Varianten bezüglich Kosten und Montageaufwand gemäss den gelben Spalten in Tabelle 4 basiert auf der Erfahrung der Firma SSC (Lieferant Wärmedämmmaterialien).

Bei der nachfolgenden Bestimmung der Bestvariante sind neben dem U-Wert auch die Materialkosten und der Montageaufwand berücksichtigt. Zudem wird aus Komfortgründen für den Fahrgast eine höhere Oberflächentemperatur positiv berücksichtigt.

Die Variante 7 (bestehende Flächendämmung MONIFLEX 50 mm, neu Deckschicht Q20 6 mm, ohne Wärmedämmung der Seitenwand-Rippen) auf der Tabelle wurde nicht als Prototyp-Einbau verwirklicht. Daher sind keine Messresultate aufgeführt.

Beurteilung, Bestvariante:

- Variante 2: Q1 30 mm, Q20 6 mm, Luft 24 mm, Deckschicht Q20 6 mm.

Bestvariante: U-Wert (gemessen) $0.57 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, Innen-Oberflächentemperatur 15.0°C , geringer Montage Aufwand, verhältnismässige Kosten des Rohmaterials.

- Variante 0: MONIFLEX 50 mm, Seitenwandgerippe nicht gedämmt.
U-Wert (gemessen) $1.02 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.
- Variante 1a: Q20 10 mm, Luft 50 mm, Deckschicht Q20 6 mm.
U-Wert (gemessen) $0.70 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, Innen-Oberflächentemperatur 15.3°C .
- Variante 1b: Luft 10 mm, Q20 10 mm, Luft 40 mm, Deckschicht Q20 6 mm.
Hoher Montageaufwand, U-Wert (gemessen) $0.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, Innen-Oberflächentemperatur 15.2°C .
- Variante 3: Q1 30 mm, Luft 30 mm, Deckschicht Q20 6 mm.
Guter U-Wert (gemessen) $0.39 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, jedoch tiefere Innen-Oberflächentemperatur 12.5°C .
- Variante 6: 2 x Q1 30 mm, Deckschicht Q20 6 mm.
Guter U-Wert (gemessen) $0.32 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, jedoch tiefere Innen-Oberflächentemperatur 12.0°C .

3.4.12 Wärmedämmung des Übergangs von Seitenwand und Dach (Variante 10)

Im Übergang von Seitenwand und Dach ist insbesondere die Wärmedämmung der Verstärkungs-Dreiecke wichtig, da diese als Kühlkörper in die Zwischendecke hineinragen.



Abbildung 24. Isolation der Verstärkungs-Dreiecke zur Versteifung von Decken- und Seitenwandrippen im Dachbereich mit Formteilen. Foto und Skizze R. Gartner.

Die gewählte Lösung für die Wärmedämmung der Verstärkungs-Dreiecke ist aus den Varianten der Wärmedämmung für die Seitenwand-Rippen abgeleitet und ist als Variante 10 bezeichnet. Andere Varianten dazu wurden nicht betrachtet respektive verworfen.

Die Wärmedämmung der Dreieck-Spicken erfolgt mit dem Dämmmaterial SSC Q20 10 mm.



Ausgangslage: Blechfelder isoliert mit 50 mm Moniflex
Eckverstärkungen nicht isoliert



Nach dem Entfernen von Moniflex



1.Schritt Blechfelder isoliert mit 30 mm SSC-Q1
Das Detail zeigt Lösung bei Versteifungswinkel 20 mm



2.Schritt SSC-Q20-10 überdeckt aus einem Stück SSC-Q1

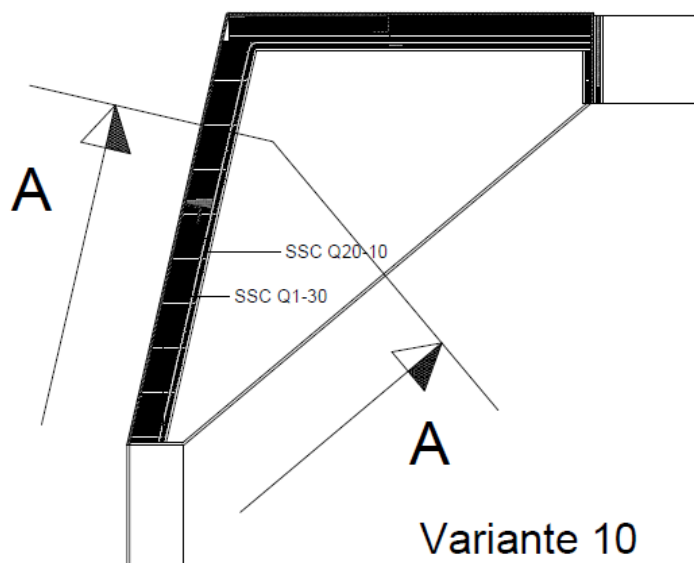


3. Schritt Die Eckverstärkungen werden beidseitig mit SSC-Q20-10 Zuschnitten beschichtet



4. der senkrechte Steg zum Dachblech mit Sicken wird beidseitig mit SSC-Q20-10 isoliert

Abbildung 25. Wärmedämmung des Übergangs von Seitenwand und Dach. Quelle: ECOTRANS Peter Wüst 02 2017.



Variante 10 BLS NINA Seitendach

Feb. 2017 Wp

Abbildung 26. Wärmedämmung des Übergangs von Seitenwand und Dach. Quelle: ECOTRANS Peter Wüst 02.2017.

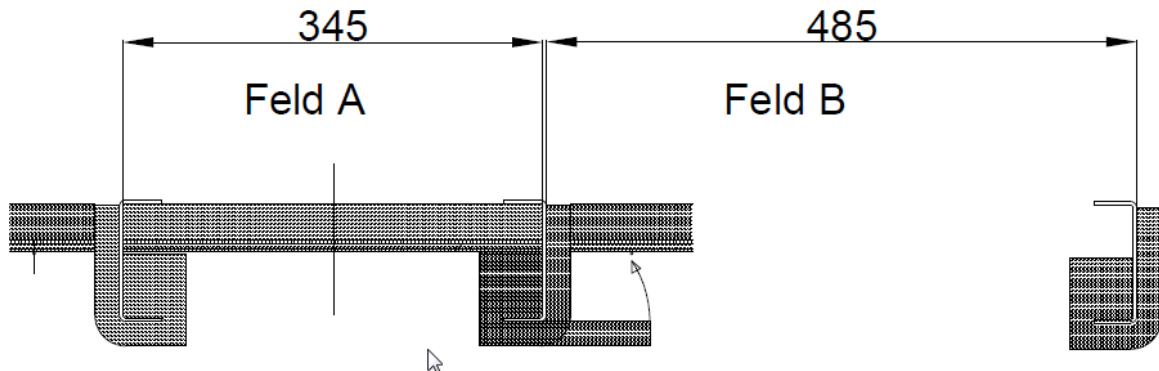


Abbildung 27. Wärmedämmung der Verstärkungs-Dreiecke zwischen Seitenwand und Dach. Foto: ECOTRANS Peter Wüst 02.2017.

3.5 Wärmedämmung des Dachs (Variante 12)

Wärmedämmung der Fläche zwischen den Dachspriegeln mit Q1 30 mm, Deckschicht Q20 10 mm.
Wärmedämmung L-förmiger Dachspriegel mit Formteil aus Q1 20/30 mm.

Die Variante 11 mit identischer Flächen-Wärmedämmung wie Variante 12, jedoch ohne Wärmedämmung der Dachspriegel, wurde wegen den hohen Wärmeverlusten durch die Dachspriegel als ungenügend erachtet und verworfen.



Ecotrans 5.4.17 Wp

Abbildung 28. Wärmedämmung des Dachs, Variante 12, Seiten-Ansicht in Fahrzeug-Querrichtung.
Quelle: ECOTRANS Peter Wüst, 05.04.2017.

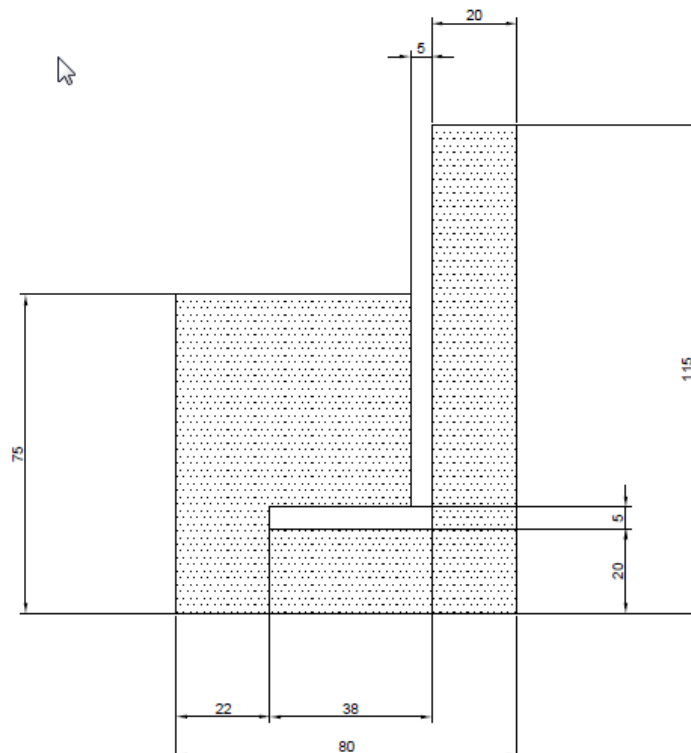


Abbildung 29. Wärmedämmung der Dachspriegel, Variante 12, Detail-Seiten-Ansicht in Fahrzeug-Querrichtung. Quelle: ECOTRANS Peter Wüst, 05.04.2017.

3.6 Sollzustands der Aussenhülle (Bestvariante)

Aufgrund der Variantenbewertung aus den Kap. 3.4.11, 3.4.12 und 3.5 resultiert folgende verbesserte Wärmedämmung als Sollzustands des Wagenkastens.

- Seitenwand:
Wärmedämmung Variante 2:
 - Fläche zwischen den Seitenwandrippen Q1 30 mm, Q20 6 mm, Luft 24 mm, Deckschicht Q20 6 mm.
 - Seitenwandrippen Q1 30 mm
- Übergang von Seitenwand zu Dach:
Wärmedämmung Variante 10:
 - Dreieck- beidseitig Q20 10 mm.
 - Fläche zwischen den Verstärkungsdreiecken Q1 30 mm und Q20 10 mm
- Dach:
Wärmedämmung Variante 12:
 - L-förmiger Dachspiegel mit Formteil Q1 20/30 mm
 - Fläche zwischen den Dachspiegeln Q1 30 mm und Q20 10 mm

Folgende Bauteile werden aufgrund der erschwerten Zugänglichkeit und dem daraus resultierenden hohem Arbeitsaufwand nicht isoliert:

- Seitenwand, Dach und Boden in den Führerständen der Endwagen ET1 und ET2.
Erschwerter Zugang durch Führerpult sowie Verkabelung und Verrohrung in den Apparateschränke
- Dach über Einstiegsplattformen des Fahrgastraums.
Erschwerter Zugang durch Lüftungsgruppe in Zwischendecke, mit Verrohrung für Kältekreise und grosse Verkabelungsdichte.
- Boden im Fahrgastraum.
Aufwändige Demontage: Entfernen, Neuverlegung und Fugenabdichtung von Holzboden und Bodenbelag.

Der gerechnete mittlere U-Wert für die gesamten Fahrzeughülle des B-Wagenkastens kann unter Berücksichtigung der evaluierten Wärmedämmungen von Seitenwand und Dach von $2.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ auf $1.83 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ gesenkt werden [6]. Dieser U-Wert berücksichtigt auch die Wärmeschutzverglasung mit hoher Durchlässigkeit für Mobilkommunikation.

4 Ergebnisse

4.1 Wärmedämmung beim Triebzug RABe 525 NINA 005

4.1.1 Umsetzung

Beim Triebzug RABe 525 NINA 005 erfolgte anlässlich des Refit-Projekts im Oktober und November 2017 die Montage der Bestvarianten der neuen Wärmedämmungen in den Fahrgasträumen der beiden Endwagen ET1 und ET2 sowie des Mittelwagens AB. Die neuen Wärmedämmungen entsprechen dem Variantenentscheid gemäss Kap. 3.6.



Abbildung 30. Montage der Wärmedämmung an den Seitenwänden im Endwagen ET2 von RABe 525 NINA 005. An der Decke ist der Lüftungskanal noch nicht demontiert. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 13.10.2017.

Die zusätzlichen Arbeiten zur Wärmedämmung durften den Zeitplan des Refitprojekts nicht verlängern. Daher war ein paralleles Arbeiten neben den Refit-Tätigkeiten notwendig.

Ausführliche Fotos zur Montage der Wärmedämmung beim Triebzug RABe 525 NINA 005 sind im Anhang A zu finden.

4.1.2 Vorgeschnittene Wärmedämmung

Die Lieferung der Wärmedämmung erfolgte durch die Firma SSC.

Die Mehrheit der Wärmedämmung war bereits im Werk von SSC gemäss den Plänen von ECOTRANS Peter Wüst zu montagegerechten Teilen vorgeschnitten und mit Etiketten gekennzeichnet. Dies erlaubte den Handwerkern eine rasche Identifikation und Montage der Wärmedämmung in den Wagen, ohne weitere Zuschnitte.

Die Auslieferung der Dämmung für die Dachspriegel erfolgte als geschweisste Formteile, die ebenfalls eine direkte Montage ohne weitere Klebung auf dem Zug erlauben.



Abbildung 31. Verwendung von vorgeschnittener Wärmedämmung. Die erkennbaren Etiketten erlauben eine rasche Identifikation und Positionierung der verschiedenen Teile. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 13.10.2017.

Der Zuschnitt der Wärmedämmung für den Deckenbereich über dem Lüftungskanal entsprach nicht der tatsächlichen Montagesituation. Durch viele Verstärkungsprofile in Wagen-Längsrichtung unter den Befestigungspunkten der Dachapparate waren weitere zahlreiche Zuschnitte erforderlich. Die Verstärkungsprofile waren erst nach Demontage der Lüftungskanäle gut erkennbar.

Ebenfalls war für die eher kleinen Flächen der Stirnwände bei den Wagenübergängen keine vorgeschnittene Wärmedämmung vorhanden. Auch für die in den Innenraum ragenden Abstützungen des Haupttransformators, der auf dem Dach des Endwagens ET1 angebracht ist, wurden die Zuschnitte am Fahrzeug angepasst.

Das individuelle Ausmessen und der Zuschnitt der Wärmedämmung für diese Bereiche führten zu einem beträchtlichen zusätzlichen Zeitaufwand bei den Montagearbeiten.



Abbildung 32. Aufwändige, kleinflächige Einzelzuschnitte für erste Lager der Wärmedämmung Q1 30 mm (grün) wegen zusätzlichen Profilen in Längsrichtung des Wagenkastens der darüber liegenden Haltepunkte der Dachapparate.



Abbildung 33. Aufwändige Wärmedämmung ohne vorgefertigte Zuschnitte bei den Abstützungen des Haupttransformators an der Decke des Endwagens ET1. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 13.10.2017.

4.1.3 Befestigung der Wärmedämmung im Deckenbereich

Die Befestigung der Wärmedämmung im Deckenbereich erfolgt durch drei Stahldrähte, die in Wagenlängsrichtung, in gleichmässigen Abständen auf der Breite der Decke verteilt sind. Die Stahldrähte sind an den Enden der Fahrgastabteile, nahe der Lüftungsgruppe bei den Einstiegsplattformen respektive nahe beim Wagenübergang oder dem Führerstand, an den Dachspriegeln mittels Schraubenösen abgespannt. Die dazwischenliegenden Dachspriegel weisen Bohrungen auf, durch die der Stahldraht durchgeführt wird.

Die vorhandene schalldämmende Spritzbeschichtung (Bitumenemulsion AFRAPLAST) erlaubte keine Klebung des Dämmmaterials an das Deckenblech. Die Befestigung des Dämmmaterials mittels Stahldraht stellt auch bei den erhöhten, dauerhaften Fahr vibrationen eines Schienenfahrzeugs eine dauerhafte Lösung dar.

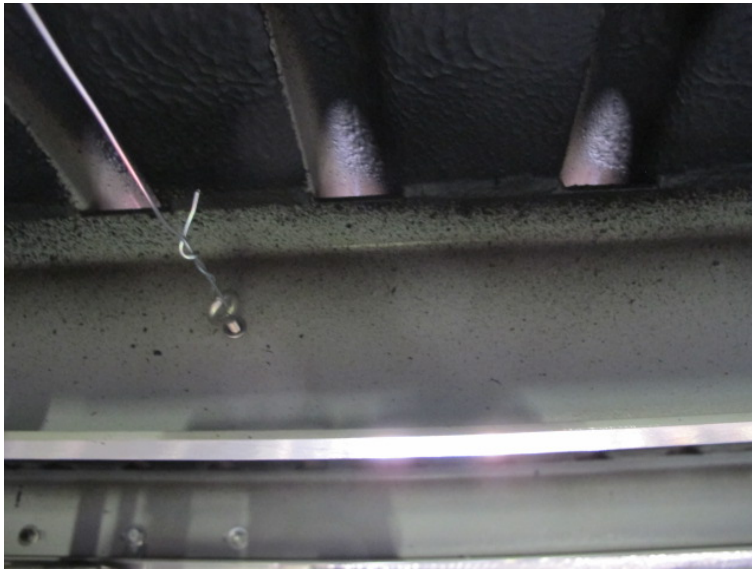


Abbildung 34. Abspannung des Stahldrahts am Dachspriegel am Ende des Fahrgastabteils mittels Schraubenöse. Auf dem Bild ist die Wärmedämmung am Dachspriegel und zwischen Stahldraht und Deckenblech noch nicht vorhanden. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 13.10.2017.



Abbildung 35. Abspannung des Stahldrahts am Dachspriegel am Ende des Fahrgastabteils mittels Schraubenöse, mit Wärmedämmung am Dachspriegel und an der Decke. Foto ECOTRANS Peter Wüst, 13.10.2017.

4.1.4 Arbeitsaufwand

Der Zeitaufwand der BLS-Mitarbeiter für die Montage der verbesserten Wärmedämmung in den Fahrgasträumen der beiden Endwagen ET1 und ET2 sowie des Mittelwagens B den beläuft sich auf 1'090 h.

Der relativ grosse Zeitaufwand begründet sich wie folgt:

- Das Projekt zur Verbesserung der Wärmedämmung weist Prototyp-Charakter auf. Durch noch fehlende Erfahrung bei Engineering, Arbeitsvorbereitung und Montage ist der Zeitaufwand gegenüber einer Serieausführung deutlich höher.
- Die Montage der Wärmedämmung parallel zu den üblichen Arbeiten des Refitprojekts erlaubte keine effiziente Arbeitsweise.
- Für die Deckenbereiche über den Lüftungskanälen, die Stirnwände bei den Wagenübergängen sowie die Abstützungen des Haupttransformators an der Decke des Endwagens ET1 fehlten die vorgeschchnittene Wärmedämmung. Dies bedingte ein zeitaufwändiges individuelles Ausmassen und Zuschneiden der Wärmedämmung in diesen Bereichen.
- Die BLS-Mitarbeiter verschiedener Berufe weisen noch keine Erfahrung für die effiziente Montage von Wärmedämmung auf. Ebenso fehlte die Erfahrung bei der Demontage der Deckenlüftungskanäle.

4.1.5 Erkenntnisse aus Montagearbeiten

Die Montagearbeiten der Wärmedämmung beim Triebzug RABe 525 NINA führen zu folgenden Erkenntnissen.

- Eine effiziente Montage ist nur mit vorgeschchnittener Wärmedämmung möglich.
- Die vorgeschchnittene Wärmedämmung muss für alle zu isolierenden Bereiche vorliegen.
- Der Zeitaufwand für Demontage von bestehenden Verkleidungen oder Apparaten ist zu berücksichtigen und bestimmt massgebend die Wirtschaftlichkeit einer Wärmedämmung.



Abbildung 36. Besprechung der fertigen Wärmedämmung im Triebzug RABe 525 NINA 005, mit ECOTRANS Peter Wüst (links), SSC Ernst Fehr (Mitte) und BAV Stefan Schnell (rechts). Foto: Renato Gartner, 14.11.2017.

4.1.6 Abschätzung des Montageaufwands bei zukünftiger Serieausführung

Aufgrund der Erfahrung aus anderen Umbauprojekten verkürzt sich der Montageaufwand von einem Prototyp zu einer eingelaufenen Serieausführung um den Faktor 3 bis 4.

Somit lässt sich der Arbeitsaufwand für eine zukünftige Serieausführung von 25 vierteiligen Triebzügen RABe 535 Lötschberger, mit identischem Arbeitsumfang bei einem ähnlichen Wagenkastenaufbau, sowie mit Optimierung bei Engineering, Arbeitsvorbereitung und Montage ein durchschnittlicher Montageaufwand für einen Wagenkasten von 90 h respektive für einen Triebzug von ca. 270 h abschätzen.

4.1.7 Abschätzung der Energieeinsparung durch verbesserte Wärmedämmung

4.1.7.1 Methoden

Die Abschätzung der Energieeinsparung mit der verbesserten Wärmedämmung erfolgt durch EMKA-MATIK Stefan Menth mit zwei unterschiedlichen Methoden. Beide Methoden basieren auf den mehrjährigen Messdaten des Triebzugs RABe 525 NINA 006, ausgerüstet seit April 2011 mit insgesamt 13 Energiezählern sowie mit weiteren Sensoren für Innen- und Aussentemperaturen, Luftfeuchtigkeit, Innenraum-Luftqualität und Solarstrahlung.

Die nachfolgenden Abschätzungen der Energieeinsparung berücksichtigen in beiden Methoden einen mittleren U-Wert der verbesserten Wärmedämmung von $1.87 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ anstatt $1.83 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Wegen einem geringen Fehler von 2 % ist der Einfluss auf die Energieeinsparung jedoch gering. Zudem wirken weitere unsichere Einflussgrößen wie das Wetter oder der Betriebseinsatz der Züge stärker auf die effektive Energieeinsparung ein.

4.1.7.2 Methode 1: Gemessene Innen- und Aussentemperaturen

Methode 1 basiert auf den gemessenen Innen- und Aussentemperaturen des Triebzug RABe 525 NINA 006 für das Jahr 2014.

Der Wärmestrom durch die Fahrzeughülle beträgt:

$$P_{W,FH} = U \times A \times (T_{Innen} - T_{Aussen})$$

$P_{W,FH}$: Wärmestrom durch Fahrzeughülle

U : Wärmedurchgangskoeffizient, U-Wert

A : Aussenfläche der Fahrzeughülle

T_{Innen} : Innentemperatur

T_{Aussen} : Aussentemperatur

Die Absenkungen der Innentemperatur durch den Schlumberbetrieb sind dabei berücksichtigt.

Die jährliche durch die Fahrzeughülle entweichende Energie ist das Integral des spezifischen Wärmestroms über das ganze Jahr 2014:

$$E_{W,FH} = \int_0^{365 \text{ d}} P_{V,FH}$$

$E_{W,FH}$: Wärmeenergie durch Fahrzeughülle

$P_{V,FH}$: Wärmestrom durch Fahrzeughülle

Die jährliche durch die Fahrzeughülle entweichende Energie entspricht nicht der gesamten Heizenergie, da die Heizenergie die Wärmeeintragungen durch die Aussenluftzufuhr sowie die parasitären Wärmequellen (Bildschirme, Steuerungen, Innenbeleuchtung, Fahrgäste) nicht berücksichtigt. Für den Vergleich der U-Werte ist dies jedoch nicht relevant, weil bei beiden untersuchten U-Werten die Wärmeeintragungen von Aussenluft und parasitärer Wärme identisch sind.

Die Aussenfläche der Fahrzeughülle beträgt:

$$A = 47 \text{ m} \times (2 \times 3 \text{ m} + 2 \times 2.5 \text{ m}) = 517 \text{ m}^2$$

Mit einer Fläche der Fahrzeughülle von 517 m² ergeben sich folgende spezifischen Wärmeströme:

- U-Wert von 2.42 W/(m²·K): 1'251.1 W/K
- U-Wert von 1.87 W/(m²·K): 966.8 W/K

Damit ergeben sich mit den gemessenen Innen- und Aussentemperaturen im Jahr 2014 folgende Energie durch die Fahrzeughülle:

- U-Wert von 2.42 W/(m²·K): 104.73 MWh
- U-Wert von 1.87 W/(m²·K): 80.93 MWh

Die jährliche Einsparung durch die verbesserte Fahrzeughülle bildet sich durch die Differenz der beiden Energien. Somit beträgt die Energieeinsparung für einen 3-teiligen Triebzug RABe 525 NINA mit verbesserter Fahrzeughülle ca. 24 MWh respektive ca. 25% der jährlichen Heizenergie.

4.1.7.3 Methode 2: Jahrestemperaturverteilung und Heizleistungs-Kennlinien

Methode 2 basiert auf dem Vergleich Heizleistungs-Kurven (Heizleistung in Abhängigkeit der Aussentemperatur), jeweils für Schlummerbetrieb und für Normalbetrieb. Die Heizleistungs-Kurven sind gebildet aus den Messungen für das Jahr 2016, mit dem ursprünglichen U-Wert der Fahrzeughülle von 2.42 W/(m²·K) sowie mit bedarfsgesteuerter Aussenluftzufuhr durch CO₂-Sensoren.

Für den Schlummerbetrieb gilt ein Aussenluft-Volumenstrom von 0 m³/h. Der Normalbetrieb berücksichtigt ein mittlerer Aussenluft-Volumenstrom von 1'000 m³/h (Annahme bei bedarfsgesteuerter Aussenluftzufuhr durch CO₂-Sensoren).

In einem weiteren Schritt erfolgt für die gleichen Luftmengen die Bestimmung der Heizleistungs-Kurven für eine Fahrzeughülle mit einem U-Wert von 1.87 W/(m²·K).

Die Jahres-Temperaturverteilung von Innen- und Aussentemperatur für das Jahr 2014 ergibt folgende mittleren Heizleistungen, wobei im Normalbetrieb eine Annahme für die parasitäre Heizleistung von 3.5 kW respektive im Schlummerbetrieb von 1.5 kW berücksichtigt ist:

- U-Wert von 2.42 W/(m²·K):
Normalbetrieb: 13.14 kW
Schlummerbetrieb: 1.87 kW
- U-Wert von 1.87 W/(m²·K):
Normalbetrieb: 10.30 kW
Schlummerbetrieb : 1.32 kW

Bei einer Annahme von 365 Betriebstagen pro Jahr, jeder mit einer täglichen Normalbetriebs-Dauer von 20 h/d respektive einer täglichen Schlumberbetriebs-Dauer von 4 h/d, bewirkt die verbesserte Fahrzeughülle für den 3-teiligen Triebzug RABe 525 NINA eine jährliche Energieeinsparung von 21.5 MWh respektive ca. 22 % der jährlichen Heizenergie.

4.1.7.4 Energieeinsparung durch Vergleich der beiden Methoden

Die Resultate der beiden Methoden ergeben, dass die jährliche Energieeinsparung für einen 3-teiligen Triebzug RABe 525 NINA ca. 20 MWh bis 25 MWh/a beträgt.

Die konkrete Energieeinsparung ist jedoch vom Einfluss des Wetters und vom Einsatz des Zugs abhängig, insbesondere durch die Verteilung von Normal- und Schlummerbetrieb.

4.2 Wärmedämmglas mit hoher Durchlässigkeit für Mobilkommunikation

4.2.1 Prototyp und Messung beim Triebzug RABe 525 NINA 006

Im Rahmen des Forschungsprogramms <Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Klimaanlage im öffentlichen Verkehr> arbeitet das Departement für Physik der Universität Basel sowie die ETH Lausanne zusammen mit AGC VERRES INDUSTRIELS SA in Moutier an einem 2-Scheiben-Isolierglas. Dieses weist zwar eine Metallbeschichtung und somit eine gute Wärmedämmung (U-Wert) auf, bietet als Neuheit aber auch eine gute Durchlässigkeit für die elektromagnetische Strahlung der Mobilkommunikation. Damit wären trotz metallbeschichteten Wärmedämmfenstern nun Energieeinsparungen möglich, ohne dass dadurch die ansonsten übliche teure Installation von Mobilkommunikations-Signalverstärkern in den Zügen notwendig ist.

BLS hat die Wärmedämmfenster mit hoher Durchlässigkeit für Mobilkommunikation vorerst als Ersatz für alle 36 Stk. Seitenwandfenster des Fahrgastraums beim ersten Refit-Triebzug RABe 525 NINA 006 im Oktober 2015 eingebaut.



Abbildung 37. Triebzug RABe 525 NINA 006 in der BLS-Werkstätte Bönigen. Fahrgastraum mit 36 Stk. Wärmedämmfenstern mit hoher Durchlässigkeit für Mobilkommunikation, eingebaut anlässlich Refit-Projekt im Oktober 2015. Foto: BLS Ch. Isenschmid.

Die Messungen zur Durchlässigkeit für Mobilkommunikation erfolgten zusammen mit ETH Lausanne (EPFL), SWISSCOM und der Universität Südschweiz (SUPSI) am 16. Dezember 2015 im Stillstand des Zugs sowie durch SWISSCOM am 19. Februar und 1. März 2016 bei Messfahrten auf der S-Bahnlinie S1 zwischen Thun und Ostermundigen.

Alle durchgeführten Messungen bestätigen die erwartete hohe Durchlässigkeit für Mobilkommunikation. Details sind in den beiden ausführlichen Publikationen zu finden [7], [8].



Abbildung 38. Damiano Scanferla (links) von SWISSCOM und Bernard Cuttat (rechts) von AGC VERRES INDUSTRIELS SA während den Messfahrten mit dem Triebzug RABe 525 NINA 006 am 1. März 2016. Foto: BLS Ch. Isenschmid.



Abbildung 39. Messausrüstung von SWISSCOM für Messung von Signalstärke sowie Datenübertragungsrate für die Mobilfunkstandards 3G und LTE während den Messfahrten am 1. März 2016. Foto BLS Ch. Isenschmid.

4.2.2 Konstruktive Einschränkungen bei U-Wert

Gegenüber den bisherigen Seitenwandfenstern senkt sich der U-Wert bei der Wärmeschutzverglasung mit hoher Durchlässigkeit für Mobilkommunikation von $2.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ auf $1.87 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Aus Kostengründen wurden die mechanischen Abmessungen der Seitenwandfenster identisch belassen. Somit weist die neue Wärmeschutzverglasung mit hoher Durchlässigkeit für Mobilkommunikation als 2-Scheiben-Verglasung weiterhin eine identische Dicke von 21 mm sowie einem Luftspalt von 12 mm zwischen den beiden Gläsern auf. Dadurch konnten insbesondere die bisherigen Dichtrahmen, die die Seitenwandfenster im Ausschnitt des Wagenkastens halten, unverändert belassen werden. Der Luftspalt zwischen den beiden Scheiben weist eine normale Luftfüllung auf (keine Argon- oder Krypton-Füllung).

Dickere Fenster mit grösserem Luftspalt und damit noch tieferem U-Wert hätten einen Ersatz der Dichtrahmen erfordert. Damit wären auch hohe Einmalkosten für Neukonstruktion der Dichtrahmen sowie den Festigkeitsnachweis bei Druckstössen (Zugsbegegnung, Tunneldurchfahrt) angefallen.

4.2.3 Umsetzung bei 29 Zügen RABe 525 NINA

Nach den positiven Messresultaten im Rahmen dieses Projekts hat BLS im September 2016 bei AGC VERRES INDUSTRIELS SA in Moutiers mit separater Finanzierung eine Bestellung ausgelöst, um bei 29 von insgesamt 36 Triebzügen RABe 525 NINA alle Seitenwandfenster der Fahrgasträume durch die innovative Wärmeschutzverglasung mit hoher Durchlässigkeit für Mobilkommunikation zu ersetzen.

4.3 Verifikation der verbesserten Wärmedämmung.

4.3.1 Methode

Die Verifikation der verbesserten Wärmedämmung beim Triebzug RABe 525 NINA 005 erfolgt mit Heizversuchen am 20. und 21. Januar 2018 auf einem Abstellgleis ohne Überdachung im Bahnhof Huttwil (Abbildung 40).

Um die Aussagekraft der Ergebnisse abzusichern und den Einfluss von Nebeneffekten gering zu halten, erfolgen die Heizversuche zeitgleich und am denselben Aussenstandort mit folgenden zwei Triebzügen:

- RABe 525 NINA 005 mit der verbesserten Wärmedämmung.
- RABe 525 NINA 006 mit unveränderter, herkömmlicher Wärmedämmung.



Abbildung 40. Triebzüge RABe 525 NINA 005 (vorne) mit verbesserter Wärmedämmung und 006 (hinten) mit herkömmlicher Wärmedämmung, anlässlich der Heizversuche vom 20./21. Januar 2018 auf Gleis 4 im Bahnhof Huttwil. Foto: BLS Ch. Isenschmid.

Das Einbringen der Heizwärme erfolgt bei beiden Triebzügen ausschliesslich über die fahrzeugeigene Warmluftheizung des Fahrgastraums und damit über die vorhandenen Ventilatoren und Heizelemente der Lüftungsgruppen in der Zwischendecke über den Einstiegsplattformen sowie den vorhandenen Luftkanälen in der Zwischendecke und der Seitenwand. Im Fahrgastraum sind keine fahrzeugeigenen Flächenheizelemente oder Konvektionsheizkörper vorhanden. Die Heizversuche erfolgen ohne zusätzliche, mobile Heizgeräte im Fahrgastraum.

Die verbesserte Wärmedämmung wird mit folgenden Heizversuchen der Fahrgast-Klimaanlage verifiziert:

- **Heizleistung im Automatik-Betrieb:** Beide Triebzüge befinden sich zeitgleich und damit bei identischen Aussenbedingungen (Temperatur, Wind, Sonneneinstrahlung) im automatischen Heizbetrieb der Fahrgast-Klimaanlage (identische Solltemperatur des Fahrgastraums; identischer Umluftbetrieb mit geschlossenen Aussenluftklappen; Abluftventilatoren auf 1. Stufe). Dabei erfolgt die Aufzeichnung der individuellen Heizleistung beider Züge über die Einschaltzyklen der Heizschützen jedes einzelnen Wagens. Die Differenz der Heizleistung beider Triebzüge ist ein Mass für die Differenz der Transmissions-Wärmeverluste respektive die Güte der Wärmedämmung, da diese der einzige Unterschied beider Triebzüge darstellt.
- **Aufheizversuch mit konstanter Heizleistung:** Bei beiden Triebzüge erfolgt zeitgleich und damit bei identischen Aussenbedingungen (Temperatur, Wind, Sonneneinstrahlung) die Aufheizung der Fahrgasträume mit identischer Heizleistung. Die Differenz beim Anstieg der Innentemperaturen ist ein Mass für die Differenz der Transmissions-Wärmeverluste respektive die Güte der Wärmedämmung, da diese der einzige Unterschied beider Triebzüge darstellt.

4.3.2 Grenzen der gewählten Methode

Die gewählte Methode zur Verifikation der verbesserten Wärmedämmung entspricht einem einfachen, pragmatischen Ansatz. Präzise U-Wert-Messungen gemäss der EN-Norm 14750-2 [9], insbesondere in einer Klimakammer mit einer Gleislänge von 50 m, würden das vorhandene gesamte Projektbudget um stark überschreiten.

Die Heizversuche erfolgen ohne zusätzliche, mobile Heizgeräte im Fahrgastraum. Damit variieren die Innentemperaturen im Fahrgastraum beim Aufheizversuch mit konstanter Heizleistung innerhalb des Triebzugs erheblich, insbesondere durch den grösseren Luftvolumenstrom in den Hochflur-Abteilen der beiden Endwagen. Für die Auswertungen beim Heizversuch im Automatik-Betrieb sowie beim Aufheizversuch dient jeweils der Mittelwert aller 6 Fahrgastraum-Temperaturfühler des entsprechenden Triebzugs.

Zudem bleiben Spaltöffnungen an den Dichtungen der Einstiegstüren und an den Aussenluftklappen sowie die Kamine über den Abluftventilatoren auf dem Fahrzeugdach unverändert und sind nicht zusätzlich abgeklebt.

Die gewählte Methode zeigt damit nicht nur die reinen Transmissions-Wärmeverluste der Fahrzeug-Aussenhülle, sondern, trotz Umluftbetrieb mit geschlossenen Aussenluftklappen, auch zusätzliche Wärmeverluste durch Luftleckagen. Zudem ist der absolute U-Wert nicht eindeutig bestimmbar, da durch die Luftkanäle in den Zwischendecken respektive in den Seitenwänden partiell höhere Temperaturen entstehen und damit die Temperaturdifferenz von innen nach aussen nicht homogen ist.

Durch die zeitgleichen Heizversuche mit identischen Bedingungen bei je einem Triebzug mit und ohne verbesserte Wärmedämmung lässt sich jedoch der relative Unterschied genügend genau feststellen.

Die gewählte Methode bietet den Vorteil, dass die gemessene Heizleistung alle auch in normalen Fahrgastbetrieb auftretenden Verluste durch Luft-Leckagen und partielle Temperaturüberhöhungen korrekt beinhaltet. Somit erlaubt der damit ermittelte, „umfassende“ absolute U-Wert korrekte Simulationen des tatsächlichen Jahresverbrauchs an Heizenergie eines Triebzugs RABe 525 NINA.

4.3.3 Datenerfassung und Messausrüstung für Heizversuche

Zur Datenerfassung dienen die Fahrgast-Klimarechner der beiden Triebzüge RABe 525 NINA 005 und 006. Diese erlauben mit einem Intervall von 1 s die Aufzeichnung aller digitalen Ein- und Ausgänge, alle Innen-, Aussen und Zulufttemperaturen sowie alle analogen Signale, wie zum Beispiel die Einschaltdauer der Heizschützen.

Die Innentemperaturfühler der Fahrgast-Klimarechner sind an der Decke des Fahrgastraums angebracht.

Die Aussentemperaturfühler der Fahrgast-Klimarechner sind unmittelbar vor der Aussenluftklappe des Mittelwagens B platziert. Da die Heizversuche bei geschlossener Aussenluftklappe durchgeführt werden, ist die Anströmung dieser Aussentemperaturfühler ungenügend; die gemessenen Temperaturwerte sind nicht aussagekräftig. Daher sind zur korrekten Erfassung der Aussentemperatur weitere, unabhängige Temperaturfühler vorhanden.

Zur Erfassung weiter Innentemperaturen im Fahrgastraum sind in jedem Triebzug weitere 6 Temperaturfühler auf einer Höhe von 1.1 m (ab Fussboden) vorhanden, verteilt auf je 2 Temperaturfühler pro Wagenkasten (Abbildung 41). An einem Fahrleitungsmast ist auf einer Höhe von 2 m, mit einem seitlichen Abstand von ca. 3 m zum Triebzug RABe 525 NINA 006, ein Aussentemperaturfühler befestigt. Die Aufzeichnung dieser Innen- und Aussentemperaturfühler erfolgt mit einem Datenlogger QUANTUM X.



Abbildung 41. Temperaturfühler zu Datenlogger QUANTUM X für Innentemperatur im Fahrgastraum des Triebzugs RABe 525 NINA 006, auf einer Höhe von 1.1 m an den Fahrgastsitzen befestigt. Foto BLS Ch. Isenschmid.

Zudem ist beim Triebzug Rabe 525 NINA 006 seit März 2011 eine fest eingebaute Messausrüstung vorhanden, die mit insgesamt 13 Energiezählern sowie zahlreichen Sensoren für Temperatur, Feuchte, CO₂ und Solarstrahlung in einem Intervall von 1 min bis 3 min im Innenraum sowie auf der Fahrzeug-Aussenseite die Zustände aufzeichnet [10].

Die verwendete Messausrüstung ist detailliert im Anhang C aufgeführt.

Zusammenstellung der Datenerfassung:

- RABe 525 NINA 005 (mit verbesserter Wärmedämmung):
 - o 6 Temperaturfühler im Fahrgastraum, auf 1.1 m Höhe ab Boden, je 2 Temperaturfühler pro Wagenkasten.
 - o 1 Temperaturfühler für Aussentemperatur, ca 3 m von Zug entfernt.
 - o 1 Energiemessung ECOMODULE bei Pantograph (15kV, 16.7 Hz), Aufzeichnungsintervall 5 min. Bestimmung der Grundleistung des Zugs während Auskühl- und Stabilisierungsphase (mit ausgeschalteter Fahrgastraum-Heizung), damit Kontrolle der Heizleistung des Fahrgastraums während Aufheizphase.
 - o Aufzeichnung aller Ein-/Ausgänge des Fahrgast-Klimarechners im 1s-Intervall, insbesondere auch der Heizschützen.

- RABe 525 NINA 006 (mit herkömmlicher Wärmedämmung):
 - o wie RABe 525 005
 - o zusätzlich detaillierte Energieerfassung mit 13 fest installierten Energiezählern sowie Temperatursensoren für Innen- und Aussentemperatur, installiert seit März 2011.

4.3.4 U-Wert-Messung an Seitenwand

Zur Kontrolle erfolgt eine erneute U-Wert Messung an der Seitenwand der Triebzüge RABe 525 NINA 005 und 006 (Abbildung 42), mit identischen Messgeräten gSKIN KIT-2615C der Firma GREENTEG wie bei den bereits durchgeführten Vorversuchen für die Variantenbewertung (Kapitel 3.4.10).

Die U-Wert-Messung findet während dem Automatik-Betrieb in der Nacht vom 19./20. Januar 2018 statt.

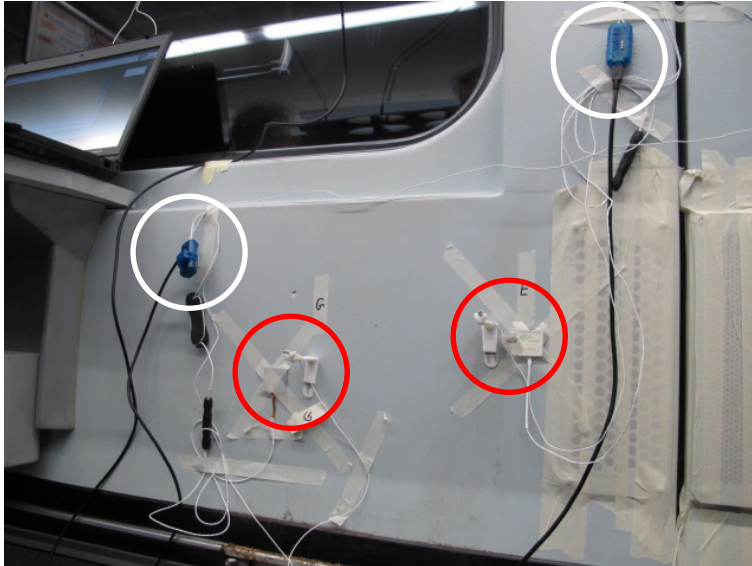


Abbildung 42. Zwei U-Wert-Messgeräte (weisse Kreise) mit Wärmestrom-Sensoren und Innentemperaturfühlern für Blechfeld (roter Kreis links) und für Seitenwandrippe (roter Kreis rechts) auf Innenseite der Seitenwand, bei demontiertem Fahrgastsitz, während Automatik-Betrieb der Fahrgast-Klimaanlage in der Nacht vom 19./20. Januar. Zur Verhinderung der Beeinflussung der Wärmestrom-Sensoren sind die Ausblasöffnungen für Warmluft abgeklebt (rechts).
Foto: ECOTRANS, Peter Wüst, 19. Januar 2018.

Die U-Wert-Messungen erfolgen in der Mitte eines Blechfelds unterhalb eines Seitenfensters sowie auf einer Seitenwandrippe als thermische Störstelle.

	RABe 525 NINA 005 verbesserte Wärme- dämmung Mitte Blechfeld Messung SSC 122	RABe 525 NINA 006 herkömmliche Wärme- dämmung Mitte Blechfeld Messung SSC 117
Wärmefluss H_F $[W/m^2]$	7.4	20.6
Innentemperatur T_i $[^\circ C]$	18.7	18.5
Aussentemperatur T_a $[^\circ C]$	4.0	2.3
Temperaturdifferenz ΔT $[K]$	14.7	16.2
U-Wert $[W/(m^2 \cdot K)]$	0.50	1.27

Tabelle 5. U-Wert-Messung in Mitte eines Blechfelds der Seitenwand von RABe 525 NINA 005 und 006. Messung: SSC Jusuf Hujdur und ECOTRANS Peter Wüst, 19. Januar 2018.

Der gemessene U-Wert von $0.50 W/(m^2 \cdot K)$ für die Mitte des Blechfelds bei der verbesserten Wärmedämmung (Tabelle 5) stimmt gut dem Messwert von $0.57 W/(m^2 \cdot K)$ des Vorversuchs vom 24./25. März 2017 überein (Kapitel 3.4.10., Tabelle 4). Die im Dezember 2017 im Labor der Firma SSC AG durchgeführten U-Wert-Messungen mit einer partiellen Nachbildung des Seitenwandaufbaus zeigten einen tieferen U-Wert, jedoch aufgrund der fehlenden Luftzirkulation hinter der Innenverkleidung.

		RABe 525 NINA 005 verbesserte Wärme- dämmung Seitenwandrippe Messung SSC 123	RABe 525 NINA 006 herkömmliche Wärme- dämmung Seitenwandrippe Messung SSC 118
Wärmefluss H_F	$[W/m^2]$	17.1	24.6
Innentemperatur T_i	$[^{\circ}C]$	18.3	18.5
Aussentemperatur T_a	$[^{\circ}C]$	1.1	1.9
Temperaturdifferenz ΔT	$[K]$	17.2	16.6
U-Wert	$[W/(m^2 \cdot K)]$	0.99	1.48

Tabelle 6. U-Wert-Messung auf einer Seitenwandrippe als Störstelle von RABe 525 NINA 005 und 006. Messung: SSC und ECOTRANS Peter Wüst, 19. Januar 2018.

Die U-Wert-Messungen auf den Seitenwandrippen (Tabelle 6) dienen zu informativen Zwecken.

4.3.5 Heizleistung im Automatik-Betrieb

Die Aufzeichnung der Heizleistung während dem Automatik-Betrieb der Fahrgast-Klimaanlagen erfolgt zeitgleich bei den Triebzügen RABe 525 NINA 005 und 006 vom 20. Januar 2018 von 04:00 bis 14:00, bei bedecktem Himmel mit nur geringer Solarstrahlung (Abbildung 43) [11].

Die Sollwerte für die Innentemperatur betragen im Automatik-Betrieb bei beiden Zügen 23 °C, jeweils mit Temperaturfühlern der Fahrgast-Klimarechner an der Decke gemessen. Wegen der vertikalen Temperaturschichtung im Fahrgastraum zeigen die Temperaturfühler auf einer Höhe von 1.1 m (Abbildung 41) gegenüber den Temperaturfühlern an der Decke eine plausible, um ca. 2 K tiefere Innentemperatur (Abbildung 43, Diagramm oben). Somit beträgt die Temperatur im Sitzbereich ca. 21 °C.

Die Temperaturregelung auf dem Triebzug RABe 525 NINA 006 funktioniert stabil, mit nur geringer Welligkeit (Abbildung 43, Diagramm oben).

Auf dem Triebzug RABe 525 NINA 005 ist die Innentemperatur im Mittel ca. 0.2 K tiefer, und die Temperaturregelung ist unruhiger. Die höhere Welligkeit ist sowohl bei den Temperaturfühlern als auch bei der Heizleistung sichtbar. Ursache könnte eine schlechter gedämpfte Eigenschwingung des geschlossenen Temperatur-Regelkreises sein: Die unterschiedlichen Wärmedämmungen bewirken eine geänderte Zeitkonstante und Verstärkung der Regelstrecke und führen dazu, dass die bisher optimalen Regler-Parameter nicht mehr stimmen. Allenfalls ist auch die Welligkeit der Temperaturfühler direkte und einzige Ursache der Welligkeit der Heizleistung.

Sowohl die Heizleistung als auch der Leistungsbezug an der 15kV-Fahrleitung sind beim Triebzug RABe 525 NINA 005 mit verbesserter Wärmedämmung geringer als beim RABe 525 NINA 006 mit herkömmlicher Wärmedämmung (Abbildung 43, Diagramm unten). Diese Differenz erklärt sich aus den geringeren Transmissions-Wärmeverlusten durch die verbesserte Wärmedämmung.

Die Leistungen der Nebenverbraucher beider Triebzüge sind praktisch identisch und betragen zwischen 10 kW bis 15 kW (Abbildung 43, Diagramm unten). Die leichte Abhängigkeit von der Aussentemperatur ist auf die Heizung der Führerstände zurückzuführen, die ebenfalls in der Leistung der Nebenverbraucher enthalten ist. Die periodisch auftretenden Leistungsspitzen sind durch die Druckluftkompressoren verursacht, wegen den gekuppelten Triebzügen jeweils synchron auf beiden Fahrzeugen.

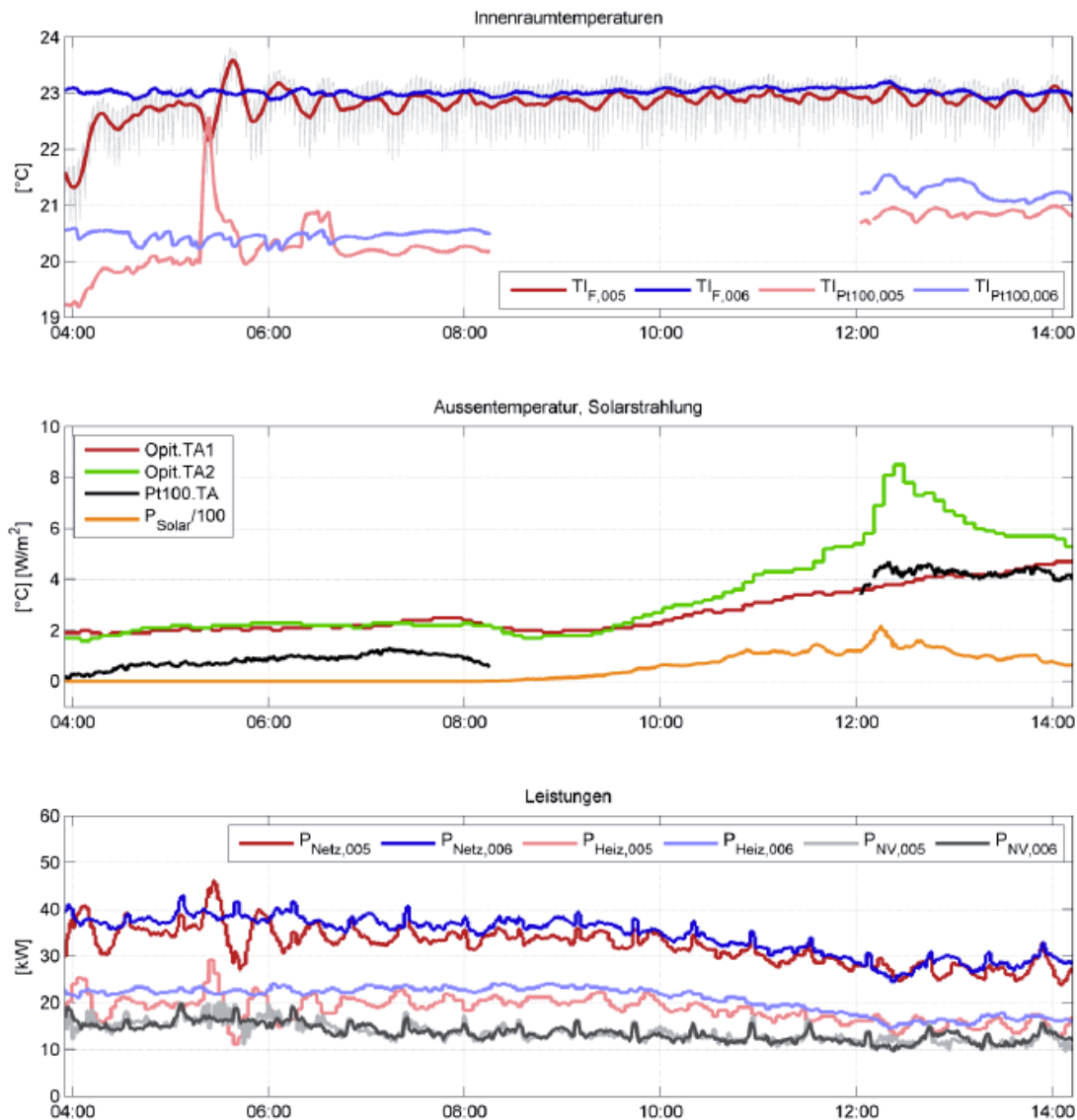


Abbildung 43. Heizleistung im automatischen Heizbetrieb der Triebzüge RABe 525 NINA 005 und 006 vom 20. Januar 2018 04:00 bis 14:00. Diagramme: emkamatik, Stefan Menth.

Diagramm oben:

$T_{l,F,005}$: Mittelwert der Innentemperatur von RABe 525 005, Fahrgast-Klimarechner.

$T_{l,F,006}$: Mittelwert der Innentemperatur von RABe 525 006, Fahrgast-Klimarechner.

$T_{l,Pt100,005}$: Mittelwert der Innentemperatur von RABe 525 005, Datenlogger QUANTUM X.

$T_{l,Pt100,006}$: Mittelwert der Innentemperatur von RABe 525 006, Datenlogger QUANTUM X.

Diagramm mitte:

Opit.TA1: Aussentemperatur linke Seite von RABe 525 006, permanente Messausrüstung.

Opit.TA2: Aussentemperatur rechte Seite von RABe 525 006, permanente Messausrüstung.

Pt100.TA: Aussentemperatur an Fahrleitungsmast, Datenlogger QUANTUM X.

$P_{Solar}/100$: Solarstrahlung in W/m^2 auf Dach von RABe 525 006, Skalenwert mit Faktor 100.

Diagramm unten:

$P_{Netz,005}$: Bezogene Gesamtleistung am Pantograph von RABe 525 005, Energiezähler ECOMODULE.

$P_{Netz,006}$: Bezogene Gesamtleistung am Pantograph von RABe 525 006, Energiezähler ECOMODULE.

$P_{Heiz,005}$: Fahrgastraum-Heizleistung von RABe 525 005, gerechnet aus Heizschützen-Einschaltdauer.

$P_{Heiz,006}$: Fahrgastraum-Heizleistung von RABe 525 006, gerechnet aus Heizschützen-Einschaltdauer.

$P_{NV,005}$: Leistung der Nebenverbraucher von RABe 525 005, gerechnet aus $P_{Netz,005}$ und $P_{Heiz,005}$.

$P_{NV,006}$: Leistung der Nebenverbraucher von RABe 525 006, gerechnet aus $P_{Netz,006}$ und $P_{Heiz,006}$.

4.3.6 Auswertung mittels Heizenergie

Die Auswertung der Gesamt- respektive Heizenergie beider Triebzüge im Automatik-Betrieb am 20. Januar 2018 von 04:00 bis 14:00 zeigt folgende Resultate [11]:

Triebzug	Gesamtenergie	Heizenergie
RABe 525 006	345.9 kWh	208.7 kWh
RABe 525 005	323.6 kWh	185.7 kWh
Einsparung absolut	22.3 kWh	23.0 kWh
Einsparung relativ zu RABe 525 006	6.4 %	11.0 %

Tabelle 7. Energieverbrauch im Automatik-Betrieb der Fahrgastklimaanlage am 20. Januar 2018 von 04:00 bis 14:00. Auswertung: emkamatik, Stefan Menth.

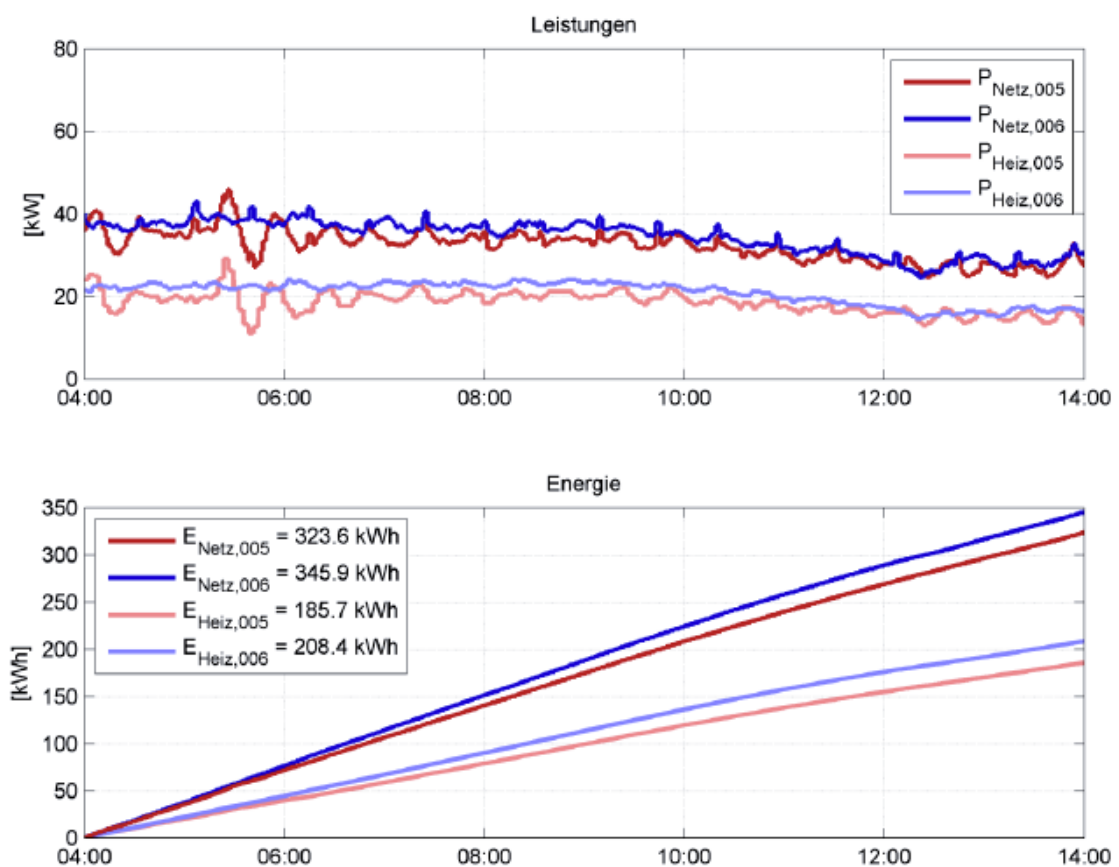


Abbildung 44. Gesamt- (P_{Netz}) und Heizleistung (P_{Heiz} , Diagramm oben) sowie Gesamt- (E_{Netz}) und Heizenergie (E_{Heiz} , Diagramm unten) der Triebzüge RABe 525 NINA 005 und 006 während Automatik-Betrieb vom 20. Januar 2018 von 04:00 bis 14:00. Diagramme: emkamatik, Stefan Menth.

Da die Heizenergie jedoch neben den Transmissions-Wärmeverlusten auch die Lüftungs-Wärmeverluste deckt, ist damit keine Bewertung der verbesserten Wärmedämmung respektive des U-Werts möglich.

4.3.7 Auswertung mittels Heizleistung in Abhängigkeit der Aussentemperatur

Eine weitere Möglichkeit zur Auswertung bietet die Auswertung der Heizleistung in Abhängigkeit der Aussentemperatur. Dabei lassen sich die Anteile der Lüftungs- und Transmissions-Wärmeverluste separat bestimmen.

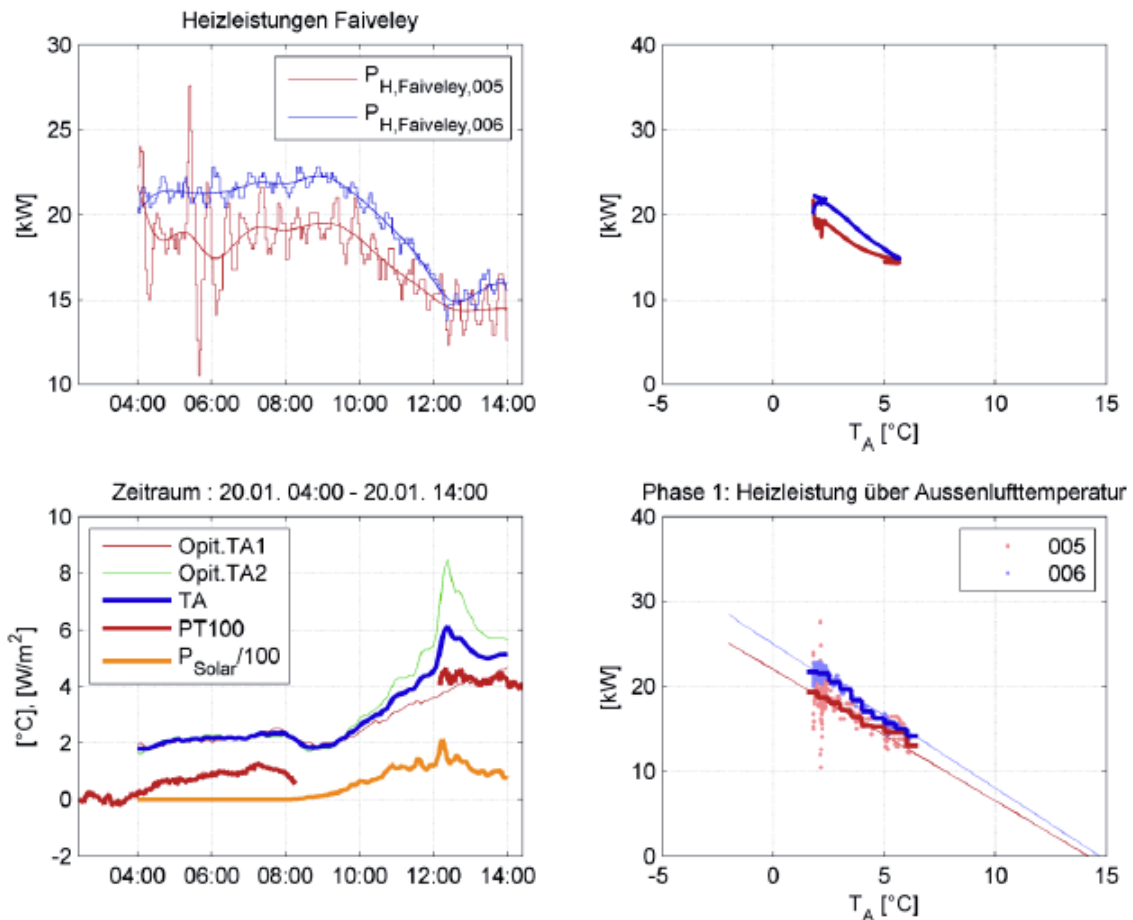


Abbildung 45. Triebzüge RABe 525 NINA 005 und 006 während Automatik-Betrieb vom 20. Januar 2018 von 04:00 bis 14:00. Alle Diagramme: emkamatik, Stefan Menth.

Diagramm oben links: Heizleistungen (P_H , Faiveley) als Rohwert und mit Tiefpassfilter geglättet.

Diagramm unten links: Aussentemperaturen und Solarstrahlung

Diagramm oben rechts: geglättete Heizleistung in Abhängigkeit der Aussentemperatur.

Diagramm unten rechts: Heizleistung als Rohwert in Abhängigkeit der Aussentemperatur, mit Trend-Gerade der Heizleistung, unter Berücksichtigung von 9 kW parasitärer Heizleistung (Beleuchtung, Steuerungssysteme). Dies bedeutet, dass im Stillstand oberhalb von 15 °C Aussentemperatur keine Heizleistung mehr benötigt wird.

Es bietet sich an, für die Auswertung die mittlere Heizleistung während der Phase von 04:00 bis 09:00 mit konstanter Aussentemperatur von 2 °C zu betrachten [11]. Um die Transmissionsverluste und damit die Wärmedämmung zu beurteilen, sind jedoch die Lüftungsverluste von der mittleren Heizleistung abzuziehen.

Beim Automatik-Betrieb ergibt sich für einen Triebzug RABe 525 NINA mit geschlossenen Zuluft-Klappen sowie den Abluftventilatoren auf der 1. Stufe ein Abluft-Volumenstrom von 1'250 m³/h. Bei einer mittleren Innentemperatur von 21 °C und einer Aussentemperatur von 2 °C betragen für diesen Abluftvolumenstrom die Lüftungswärmeverluste 8.6 kW [11].

	Mittlere Heizleistung	Lüftungs-Wärmeverluste bei 1'250 m ³ /h	Transmissions-Wärmeverluste
RABe 525 006	21.6 kW	8.6 kW	13.0 kW
RABe 525 005	18.8 kW	8.6 kW	10.2 kW
Absolute Differenz	2.7 kW	0 kW	2.8 kW
Relative Differenz RABe 525 005 zu 006	12.7 %	0 %	21.5 %

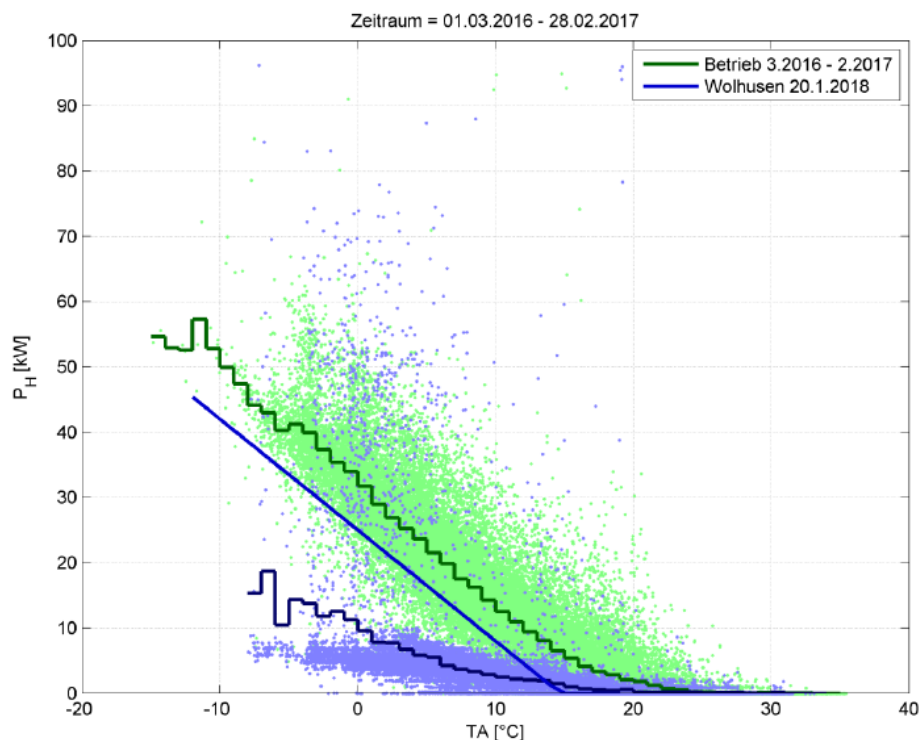
Tabelle 8. Mittlere Heizleistung, Lüftungs- und Transmissions-Wärmeverluste der Triebzüge RABe 525 NINA 005 und 006 während Automatik-Betrieb vom 20. Januar 2018 von 04:00 bis 09:00. Auswertung: emkamatik, Stefan Menth.

Die relative Differenz der Transmissions-Wärmeverluste des Triebzugs RABe 525 NINA 005 mit verbesserter Wärmedämmung zu RABe 525 NINA 006 mit herkömmlicher Wärmedämmung während der Phase von 04:00 bis 09:00 mit konstanter Aussentemperatur von 2 °C beträgt 21.5 %.

4.3.8 Vergleich mit Langzeitaufzeichnungen vom Triebzug RABe 525 NINA 006

Zu einer weiteren Plausibilisierung der Ergebnisse bietet sich für den Triebzug RABe 525 NINA 006 mit unveränderter, herkömmlicher Wärmedämmung ein Vergleich der während dem Heizversuch ermittelten Heizleistungscharakteristik mit derjenigen aus dem normalen Betriebseinsatz an [11].

Die Auswertung basiert auf den im Zeitraum vom 1. März 2016 bis 28. Februar 2018 ermittelten Heizleistungen in Abhängigkeit der Aussentemperatur. In diesem Zeitraum wies der Triebzug RABe 525 NINA 006 bereits die CO₂-gesteuerte Aussenluftzufuhr auf. Auswertungen zeigen, dass die CO₂-Werte in den allermeisten Betriebssituationen unterhalb von 1'200 ppm liegen, mit geschlossenen



Aussenluftklappen, genau wie bei den Heizversuchen vom 20./21. Januar 2018 in Huttwil. Damit sind der Heizversuch und der normale Betriebseinsatz vergleichbar.

Abbildung 46. Langzeitauswertung der Heizleistung in Abhängigkeit der Aussentemperatur vom 1. März 2016 bis 28. Februar 2018 des Triebzugs RABe 525 NINA 006: Trendlinie für Heizleistung im Schlumberbetrieb (dunkelblau), Trendlinie für Heizleistung im Normalbetrieb (grün). Zudem Trendlinie für Heizversuch im Automatik-Betrieb (blau) von Triebzug RABe 525 NINA 006 vom 20. Januar 2018 04:00 bis 09:00, mit $P_H(T_A) = 25 \text{ kW} - 1.70 \text{ kW/K} \cdot T_A$.

Die Steigung der Trendlinie (Abbildung 46, blaue Linie) vom Heizversuch im Automatik-Betrieb vom 20. Januar 2018 stimmt gut mit der Mittelwertkurve aus der Langzeitmessung (Abbildung 46, grüne Linie) überein. Die identische Steigung der Trendlinie ist ein Mass für den identischen U-Wert.

Auffallend ist die vertikale Verschiebung der beiden Trendlinien: Bei einer Aussentemperatur von 0 °C resultiert Heizversuch eine Heizleistung von 25 kW respektive 33 kW bei der Langzeitmessung im Normalbetrieb. Ein Unterschied ist der Luftaustausch durch die Türöffnungen, welche im Betriebseinsatz zu einer höheren Aussenluftzufuhr und damit auch zu einem höheren Heizleistungsbedarf führt.

Weiter ist der Wärmeübergang zwischen der Fahrzeug-Aussenfläche und der Umgebungsluft von der Fahrzeuggeschwindigkeit respektive der Relativgeschwindigkeit zwischen Aussenluft und Fahrzeugoberfläche abhängig. Im Stillstand respektive Windstille bildet sich um das Fahrzeug eine Warmlufthülle, die den Wärmefluss zwischen der Fahrzeugoberfläche und der Umgebungsluft reduziert. Beim Fahren respektive bei Wind wird Warmlufthülle abgestreift und der Wärmefluss wird stärker.

Der Wärmeübergangskoeffizient h_e und h_i zwischen der Fahrzeugoberfläche und der Umgebungsluft ist von der Fahrzeuggeschwindigkeit v abhängig:

$$\frac{h_i}{h_e} = 9 \frac{W}{m^2 \times K} + 3.5 \times v^{0.66} \quad 1$$

h_i :

h_e :

v : Fahrzeuggeschwindigkeit

¹ Renato Gartner: angewendete Formel zur Bestimmung der Wärmeverluste bei fahrenden Zügen.

4.3.9 Aufheizversuch

Der Aufheizversuch in der Nacht vom 20./21. Januar erfolgt gleichzeitig bei beiden Triebzügen RABe 525 NINA 005 und 006 auf dem Aussengleis G4 im Bahnhof Huttwil. Durch den unterschiedlichen Verlauf des Temperaturanstiegs im Fahrgastraum lässt sich damit die relative Verbesserung des U-Werts beurteilen.

Das Aufheizen der Fahrgasträume beider Triebzüge mit einer konstanten Heizleistung von 39.6 kW pro Wagenkasten. Die Ansteuerung der Heizschützen geschieht durch die Forcierung der Fahrgast-Klimarechner auf einer Heizleistung von 44 %, was zu einer Einschaltdauer von 44 % während einem 3-min-Zyklus der Heizschützen führt. Bei einer installierten Nenn-Heizleistung von 30 kW pro Wagenkasten entspricht dies einer mittleren Heizleistung von 13.2kW, respektive bei einem dreiteiligen Triebzug RABe 525 NINA einer mittleren Heizleistung von 39.6 kW.

Während dem Aufheizversuch sind die Aussenluftklappen geschlossen sowie die Abluftventilatoren ausgeschaltet. Die Aufheizung erfolgt damit im reinen Umluftbetrieb, mit den Heizelementen der fahrzeugeigenen Lüftungsgruppen über Luftkanäle in Decke und Seitenwänden mit Ausblasöffnungen im Bodenbereich.

Vor dem Aufheizversuch werden bei beiden Triebzügen die Fahrgasträume ab 15:00 bei ausgeschalteten Heizelementen, eingeschalteter Zu- und Abluftventilatoren sowie vollständig geöffneten Aussenluftklappen ausgekühlt. Der Aufheizversuch startet danach um 20:50 respektive 20:52 und dauert bis 5:22 respektive 5:28.

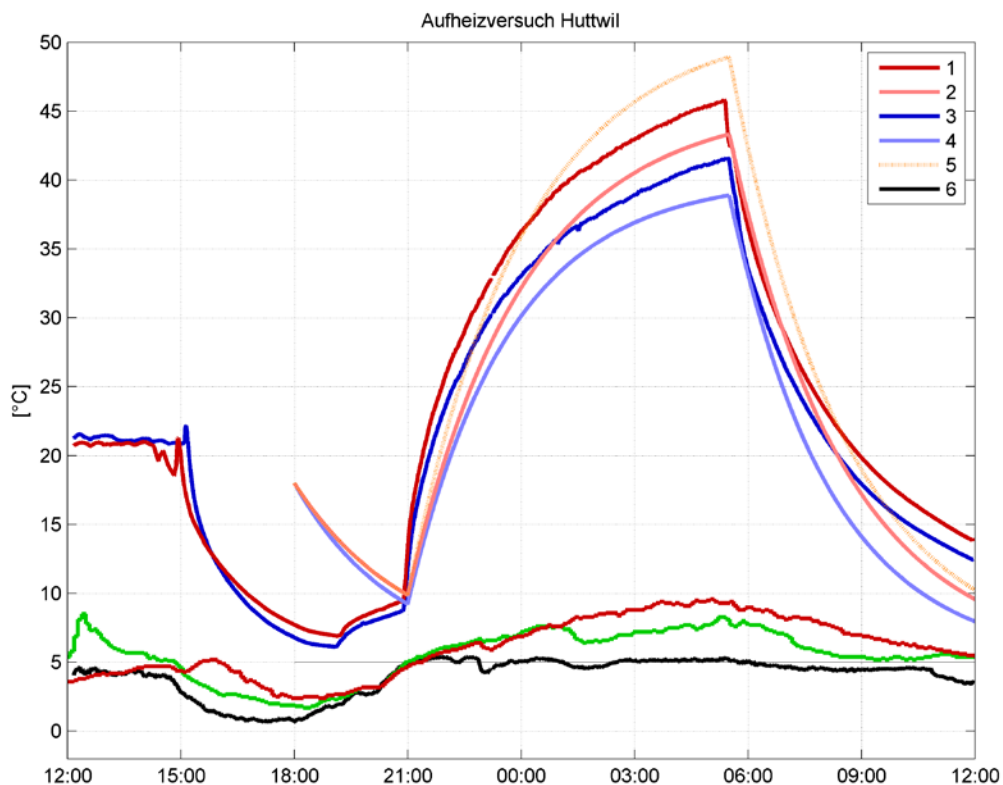


Abbildung 47. Aufheizversuch gleichzeitig bei den Triebzügen RABe 525 NINA 005 und 006.

Legende:

- 1: Messung, mittlere Fahrgastraumtemperatur RABe 525 005 (verbesserte Wärmedämmung).
- 2: Simulation mit $2.1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, mittlere Fahrgastraumtemperatur.
- 3: Messung, mittlere Fahrgastraumtemperatur RABe 525 006 (herkömmliche Wärmedämmung).
- 4: Simulation mit $2.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, mittlere Fahrgastraumtemperatur.
- 5: Simulation mit $1.83 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, mittlere Fahrgastraumtemperatur.
- 6: Aussentemperatur am Fahrleitungsmasten.

grün, rot: Aussentemperaturfühler des OPIT-Datenloggers, direkt am Fahrzeugkasten von RABe 525 005 und 006.

Diagramm: emkamatik Stefan Menth.

Während der Auskühlphase sowie dem Aufheizversuch sind die Durchgangstüren vom Fahrgastraum in die Führerstände geschlossen. Die Führerstands-Klimaanlagen verbleiben während der gesamten Versuchsdauer im Automatikbetrieb mit einer Solltemperatur von ca. 22 °C.

Die mittlere Fahrgastraum-Temperatur wird mit den Temperaturfühlern auf einer Höhe von 1.1 m ermittelt. Zur Erfassung der Aussentemperatur dient der Temperaturfühler am Fahrleitungsmasten, in genügender Entfernung zum Triebzug RABe 525 NINA .

Die beim Aufheizversuch gemessenen mittleren Innentemperaturen sind jedoch bei beiden Triebzügen unterschiedlich zu den simulierten Innentemperaturen (Abbildung 47).

Beim Triebzug RABe 525 NINA 006 mit herkömmlicher Wärmedämmung liegt die simulierte Innentemperatur unter der gemessenen Innentemperatur. Beim Ausschalten der Heizelemente liegen gemessene und simulierte Innentemperatur identisch, so dass die gemessene Temperaturüberhöhung wahrscheinlich durch den Warmluftstrom verursacht ist. Dieser ist in der Simulation nicht berücksichtigt.

Beim Triebzug RABe 525 NINA 005 mit verbesserter Wärmedämmung liegt die gemessene Innentemperatur unter der für einen U-Wert von $1.83 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ simulierten Innentemperatur. Ursache könnten unterschiedliche Luft-Leckagen durch die ausgeschalteten Abluft-Ventilatoren sein, allenfalls bedingt durch die höheren Innentemperaturen in der Zwischendecke des Fahrgastraums.

Die Auswertung des Aufheizversuchs gestaltet sich schwierig, da durch die Wärmeeinbringung über die Lüftungskanäle in der Zwischendecke respektive der Seitenwand sowie durch die hohen Ausblastemperaturen lokale Stellen mit deutlich höheren Temperaturdifferenzen zur Aussentemperatur entstehen. Zusammen mit den unbekannten Luft-Lackagen ist damit keine zufriedenstellende Aussage zur verbesserten Wärmedämmung möglich.

4.3.10 Wärmebilder

Die Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera während dem Aufheizversuch am 20./21. Januar 2018 mit einer Aussentemperatur von 5 °C und bei hohen Innenraumtemperaturen von 30.7 °C respektive 39.7 °C. Die Wärmebilder zeigen deutlich die verminderten Oberflächentemperaturen durch die verbesserte Wärmedämmung (Abbildung 48, Abbildung 49). Die Oberflächentemperaturen durch die ausgeprägten Wärmebrücken der Seitenwandrippen sind deutlich geringer.

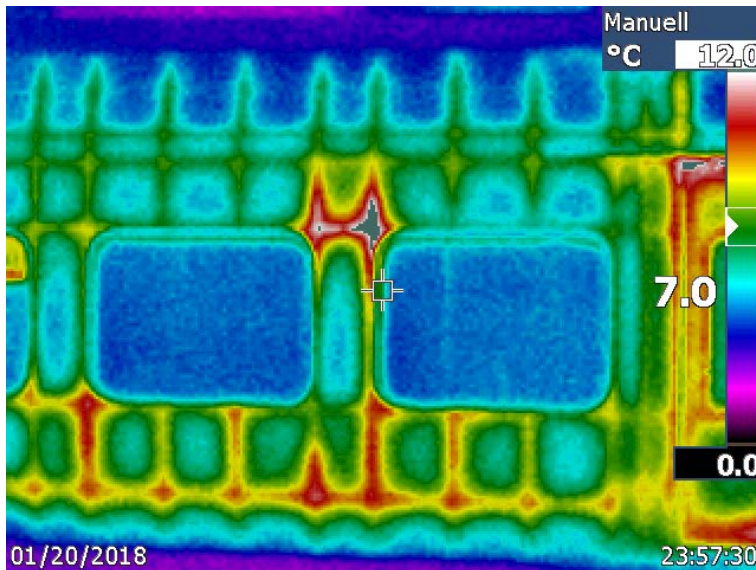


Abbildung 48. Wärmebild der linken Aussenseite beim 1-Klasse-Abteil von Mittelwagen B von RABe 525 NINA 006 mit herkömmlicher Wärmedämmung. Aufnahme am 20. Januar 23:57 während Aufheizversuch, Aussentemperatur 5 °C, Innentemperatur 30.7 °C. Die Wärmebrücken bei den Seitenwandrippen sind gut sichtbar.

Wärmebildkamera FLUKE Thermal Imager Ti25. Foto: BLS, Ch. Isenschmid.

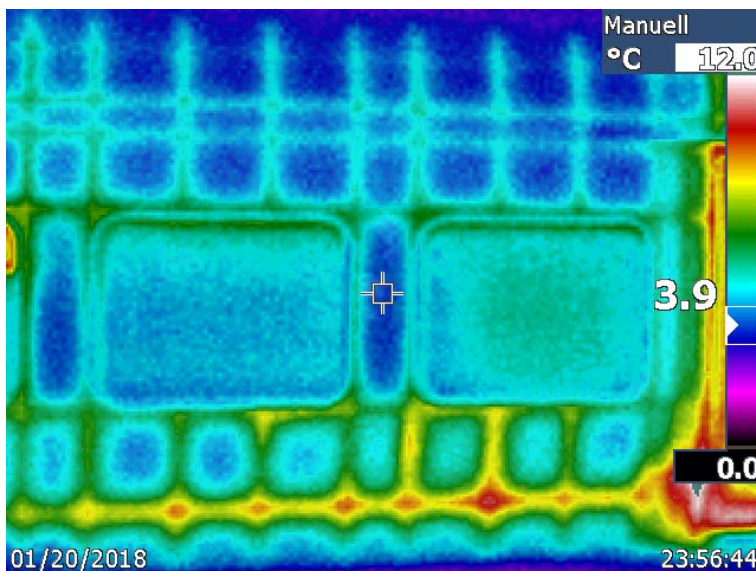


Abbildung 49. Wärmebild der linken Aussenseite beim 1-Klasse-Abteil von Mittelwagen B von RABe 525 NINA 005 mit verbesserter Wärmedämmung. Aufnahme am 20. Januar 23:56 während Aufheizversuch, Aussentemperatur 5 °C, Innentemperatur 39.7 °C. Die Wärmebrücken bei den Seitenwandrippen sind weniger ausgeprägt vorhanden. Im Bodenbereich und beim unteren Seitenwandabschluss blieb die Wärmedämmung unverändert, dies ist auf dem Wärmebild mit hohen Oberflächentemperaturen weiterhin sichtbar.

Wärmebildkamera FLUKE Thermal Imager Ti25. Foto: BLS, Ch. Isenschmid.

Im Gegensatz zur Seitenwand und dem Dach ist im Bodenbereich und bei den unteren Seitenwandanschlüssen des Triebzugs RABe 525 NINA 005 die bisherige Wärmedämmung unverändert geblieben. Die weiterhin hohen Oberflächentemperaturen in diesem Bereich sind auf dem Wärmebild deutlich sichtbar (Abbildung 49).

4.3.11 Verbesserung des U-Werts

Der Heizversuch im Automatikbetrieb vom 20. Januar 2018 zeigt als Vergleich des Triebzugs RABe 525 NINA 005 mit verbesserter Wärmedämmung zum Triebzug RABe 525 NINA 006 mit herkömmlicher Wärmedämmung eine relative Abnahme der Transmissions-Wärmeverluste von 21.5 %. Da die verbesserte Wärmedämmung der einzige Unterschied zwischen den beiden Triebzügen darstellt, verbessert sich der ursprüngliche U-Wert von $2.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ auf $1.90 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Die Verbesserung des U-Werts stimmt damit relativ gut mit den Simulationsberechnungen (Kapitel 3.6) überein, bei denen sich der U-Wert um 25 % auf $1.83 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ verbessern sollte. Die Abweichung lässt sich wahrscheinlich durch die Ungenauigkeit der Heizversuche begründen.

4.3.12 Qualität des Resultats

Die Quervergleiche für den U-Wert von $2.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ im Ursprungszustand zeigen plausible Resultate (Kapitel 3.2.1 und 4.3.8), so dass die Berechnung des verbesserten U-Werts über die relative Abnahme der Transmissions-Wärmeverluste als richtig erscheint.

Zur Qualitätssicherung erfolgten während den Heizversuchen mehrere Kontrollen bei beiden Triebzügen, um bestimmende Parameter der Heizleistung zu verifizieren. Die für die Heizleistung relevante Ansteuerung der Aussenluftklappen sowie der Abluftventilatoren sind in den Aufzeichnungen der Fahrgast-Klimarechner bei beiden Triebzügen identisch. Zudem könnten mechanische Defekte bei den Aussenluftklappen die Heizleistung stark beeinflussen. Die Sichtkontrolle aller Aussenluftklappen in geschlossener Stellung ergab am 20. Januar 2018 bei beiden Triebzügen keine Abweichungen (Anhang B).

Die Heizleistung für den Fahrgastraum basiert auf den Einschaltzyklen der Heizschützen. Ein defektes Heizelement mit geringerer Leistung würde die Resultate stark verfälschen. Die Kontrolle der Heizelemente aller Lüftungsgruppen bei beiden Triebzügen erfolgte mittels Strommesszange am 20. Januar 2018 und zeigte keine Abweichung (Anhang B).

Für die Bestimmung der reinen Transmissionswärmeverluste ist die Kenntnis des Abluftvolumenstroms relevant. Die Annahme des Abluftvolumenstroms von $1'250 \text{ m}^3/\text{h}$ für einen dreiteiligen Triebzug RABe 525 NINA stammt aus bereits verwendeten und abgeglichenen Simulationsmodellen.

Um die Lüftungs- und Transmissionswärmeverluste respektive den U-Wert einer Fahrzeughülle bei zukünftigen Messungen genauer zu bestimmen, wäre folgendes Vorgehen vorteilhaft:

- Heizversuch im Automatikbetrieb sowie Aufheizversuch mit abgeklebten Spaltöffnungen (Einstiegstüren, Ansaug-Luftgitter, Kamine der Abluftventilatoren).
- Heizversuch im Automatikbetrieb sowie Aufheizversuch ohne abgeklebte Spaltöffnungen.

Präzise U-Wert-Messungen gemäss der EN-Norm 14750-2 [9], insbesondere in einer Klimakammer mit der entsprechenden Gleislänge eines Triebzugs, sind relativ teuer und würden die bereits kritische Wirtschaftlichkeit einer Wärmedämmungs-Verbesserung weiter verschlechtern.

4.4 Wissenstransfer, Publikationen

Die Wärmedämmfenster mit hoher Durchlässigkeit für Mobilkommunikation stossen bei Transportunternehmen des öffentlichen Verkehrs auf grosses Interesse. Folgende Publikationen sind dazu bisher erfolgt:

- Vortrag von Andreas Schöler (ETH Lausanne) sowie von Christoph Isenschmid (BLS) zum Stand der Arbeiten mit Vorträgen an der Fachtagung <Eisenbahnfahrzeuge> des Verbands öffentlicher Verkehr VöV vom 25. November 2015 in Ittigen, mit rund 140 Teilnehmer.
- Pressemitteilung am 29. August 2016 von BLS und EPFL zum Einsatz der Wärmedämmfenster mit hoher Durchlässigkeit für Mobilkommunikation bei der NINA-Flotte.
- Präsentation von AGC VERRES INDUSTRIELS SA des Wärmedämmglases mit hoher Durchlässigkeit für Mobilkommunikation an der internationalen Eisenbahn-Fachmesse INNOTRANS vom September 2016 in Berlin.
- Wissenschaftliche Publikation im Magazin <Applied Physics A> [7] vom 22. Dezember 2016 zur Charakteristik und Machbarkeit der Wärmedämmfenster mit hoher Durchlässigkeit für Mobilkommunikation.
- Wissenschaftliche Publikation im Magazin <IET Microwaves, Antennas & Propagation> [8] vom 17. Juli 2017 zur Charakteristik und industrieller Umsetzung der Wärmedämmfenster mit hoher Durchlässigkeit für Mobilkommunikation.
- Vortrag von Andreas Schöler (ETH Lausanne) sowie von Christoph Isenschmid (BLS) zum Stand der Arbeiten am 5. Energieforums des Verbands öffentlicher Verkehr VöV vom 30. Januar 2018 in Lausanne.

5 Diskussion

5.1 Energieeinsparung

Gemäss dem Heizversuch vom 20. Januar 2018 reduziert sich beim Triebzug RABe 525 NINA 005 mit verbesserter Wärmedämmung der mittlere U-Wert von $2.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ auf $1.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Die Simulationsberechnung zeigt für die verbesserte Wärmedämmung einen U-Wert von $1.83 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Mit den beiden Methoden (Kapitel 4.1.7) ergibt sich damit für einen dreiteiligen Triebzug RABe 525 NINA eine jährliche Energieeinsparung rund 20 MWh.

Beim aktuellen Energiepreis von 0.12 CHF/kWh für 15kV-Bahnstrom ab Fahrleitung [12] (Verrechnung Ist-Verbrauch und Netzlastfaktor 1.0) resultiert eine jährliche Reduktion der Energiekosten von CHF 2'400.--.

Bei der proportionalen Übertragung der eingesparten Energiekosten des dreiteiligen Triebzugs RABe 525 NINA auf eine vierteiligen Triebzug RABe 535 Lötschberger lässt sich für diesen eine jährliche Reduktion der Energiekosten von CHF 3'200.--.

5.2 Wirtschaftlichkeit

Aus den Erfahrungen mit der Prototyp-Umsetzung zur verbesserten Wärmedämmung beim Triebzug RABe 525 NINA 005 lässt sich die Wirtschaftlichkeit für eine allfällige Umsetzung beim zukünftigen Refit der 25 vierteiligen Triebzüge RABe 535 Lötschberger abschätzen.

Da die Wagenkasten sowie die bestehende Wärmedämmung der Triebzüge RABe 535 Lötschberger sehr ähnlich zum Triebzug RABe 525 NINA 005 sind, lassen sich die Vorarbeiten aus dem Projekt <Potentialanalyse für Verbesserung der Wärmedämmung bei der Fahrzeug-Aussenhülle> in weiten Teilen übertragen und anwenden. Notwendig sind lediglich Einmalkosten für Projektleitung sowie Anpassung bei den Produktionsunterlagen der Wärmedämmungs-Zuschnitte sowie bei der Arbeits-Dokumentation.

Die nachfolgende Kostenzusammenstellung (Tabelle 9) basiert auf Schätzungen und dem Preisstand von 2018. Die Kostenschätzung setzt voraus, dass das Entfernen der Bestuhlung sowie der Seitenwand- und Deckenverkleidungen für andere Arbeiten des Refitprojekts notwendig ist, und dass damit Synergieeffekte für die Verbesserung der Wärmedämmung nutzbar sind. Die Kostenschätzung berücksichtigt somit keine Arbeitsstunden für das Entfernen der Bestuhlung sowie der Seitenwand- und Deckenverkleidungen. Die Kostenschätzung berücksichtigt bei Material- und Arbeitskosten den Serieneffekt für eine Umsetzung bei 25 Triebzügen. So sind die Arbeitsstunden für die Serie-Montage der Wärmedämmung gegenüber der Prototyp-Ausführung beim Triebzug RABe 525 NINA 005 um den Faktor 3 reduziert.

Bezeichnung	Kosten 1 Triebzug RABe 535	Kosten 25 Triebzüge RABe 535
Einmalkosten Projektleitung, Einmalkosten für Produktionsunterlagen von Zuschnitten der Wärmedämmung, Adaptation der Konstruktionslösungen von RABe 525 005 sowie von Arbeits-Dokumentationen und Zeichnungen. Basis: Alle Einmalkosten des Projekts <Potentialanalyse für Verbesserung der Wärmedämmung bei der Fahrzeug-Aussenhülle> fallen nicht mehr an: Simulation und Berechnungen in mehreren Varianten, Auswahl der Isolationsmaterialien, Detailkonstruktion der verbesserten Wärmedämmung, Überprüfung der Wirksamkeit.	CHF 20'000.--	CHF 20'000.--
Materialkosten Wärmedämmmaterial inkl. Einmalkosten für Zuschnitte und Produktionsunterlagen, Kleinmaterial; 48 Stk. Seitenfenster als Wärmeschutzglas mit hoher Durchlässigkeit für Mobilkommunikation. Basis: Materialkosten des Projekts <Potentialanalyse für Verbesserung der Wärmedämmung bei der Fahrzeug-Aussenhülle>, mit Reduktion von 70 % durch Seriengrösse und öffentliche Ausschreibung, ohne Einmalkosten für Produktionsunterlagen für Zuschnitte, mit Serienfertigung (anstatt Prototyp-Herstellung) für Wärmeschutzglas mit hoher Durchlässigkeit für Mobilkommunikation.	CHF 27'000.--	CHF 675'000.--
Arbeitskosten Montage des Wärmedämmmaterials, Montage der Seitenfenster bei allen 4 Wagenkasten- Basis: 480 h für alle 4 Wagenkasten zu CHF 120.--/h. Vergleich: RABe 525 005 (Prototyp) total 1'110 h bei 3 Wagenkasten.	CHF 57'600.--	CHF 1'440'000.--
Total 25 Züge RABe 535 Lötschberger		CHF 2'135'000.--
Durchschnitt 1 Zug RABe 535 Lötschberger		CHF 85'400.--

Tabelle 9. Kostenschätzung für verbesserte Wärmedämmung bei 25 Triebzügen RABe 535 Lötschberger.

Mit einer stark vereinfachten Wirtschaftlichkeitsrechnung, die keine Energiepreis-Teuerung, jedoch auch keine Kapitalverzinsung berücksichtigt, ergibt sich mit einer Reduktion der jährlichen Energiekosten für einen vierteiligen Triebzug RABe 535 Lötschberger von CHF 3'200.— eine Amortisation der Investitionskosten von CHF 85'400.— in rund 24 Jahren.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die durchgeführten Arbeiten für die Verbesserung der Wärmedämmung beim Triebzug Rabe 525 NINA 005 weisen eine relativ grosse Komplexität auf.

Die Wirtschaftlichkeit einer verbesserten Wärmedämmung, amortisiert einzig über die eingesparten Energiekosten, ist gering. Für einen vierteiligen Triebzug RABe 535 Lötschberger ist die Amortisation der Investitionskosten in 24 Jahren möglich (Kapitel 5.2, Tabelle 9).

Die Verbesserung der Wärmedämmung bei einem bestehenden Schienenfahrzeug für den Personenverkehr ist sinnvoll, falls die bisherige Wärmedämmung Schäden durch Alterung, Zersetzung, Kondensat oder ungenügende Befestigung aufweist. Der Einbau einer verbesserten Wärmedämmung verursacht aufwendige Montagearbeiten, die sich nur bei umfassenden Refit-Projekten zur halben Lebensdauer der Fahrzeuge sinnvoll umsetzen lassen.

7 Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

NINA	Niederflur-Nahverkehrszug
RABe	Bezeichnungsschlüssel für Schienenfahrzeuge: R: Triebfahrzeug für Zugreihe R. A: mit Fahrgast-Abteil der 1. Klasse. B: mit Fahrgast-Abteil der 2. Klasse. e: Triebfahrzeug mit elektrischem Antrieb.
SSC AG	Swiss Shieldung Corporation AG
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient in $W/(m^2 \cdot K)$

8 Literaturverzeichnis

- [1] R. Gartner, BLS RABe 525 NINA, B-Wagen, Bauphysikalische Konstruktionsanalyse, 1. Berechnung, Ist-Zustand, U-Mittelwert-Bestimmung im Stillstand und Windstille, Wettingen: Gartner Architektur und Bauphysik, 10.02.2016.
- [2] S. Menth, Stillagermessungen Nina 006, Sparpotential Schlummerbetrieb, Dokument 11-0417, Wettingen: emkamatik GmbH, 23.12.2011.
- [3] R. Gartner, BLS RABe 525 NINA, Fotoskizzen für Potentailanalyse für thermischen Optimierung von Konstruktionsdetails, Wettingen: Gartner Architektur und Bauphysik, 27.06.2016.
- [4] R. Gartner, BLS RABe 525 NINA, B-Wagen, Bauphysikalische Konstruktionsanalyse, 2. Berechnung, Soll-Zustand, U-Mittelwert-Bestimmung im Stillstand und Windstille, Wettingen: Gartner Architektur und Bauphysik, 21.06.2016.
- [5] P. Wüst und M. Tuchschnid, Bibliothek Wärmedämmmaterialien in Schienenfahrzeugen, SBB AG, 07.07.2016.
- [6] R. Gartner, BLS RABe 525 NINA, B-Wagen, Bauphysikalische Konstruktionsanalyse, Prototyp auf Basis V2/V12, U-Mittelwert-Bestimmung im Stillstand und Windstille, Wettingen: Gartner Architektur und Bauphysik, 30.04.2017.
- [7] O. Bouvard, M. Lanini, L. Burnier, R. Witte, B. Cuttat, A. Salvadè und A. Schü ler, «Structured transparent low emissivity coatings with high microwave transmission,» *Applied Physics A*, Nr. 123:66, pp. 1 - 10, 22.12.2016.
- [8] L. Burnier, M. Lanini, O. Bouvard, D. Scanferla, A. Varathan, C. Genoud, A. Marguerit, B. Cuttat, N. Dury, R. Witte, A. Salvadè und A. Schü ler, «Energy saving glazing with a wide band-pass FSS allowing mobile communication: upscaling and characterisation,» *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, pp. 1449 - 1455, 17.07.2017.
- [9] EN-Norm, «EN 14750-2: Bahnanwendungen - Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs - Teil 2: Typprüfungen,» Europäisches Komitee für Normierung CEN, Brüssel, 2006.
- [10] C. Isenschmid, S. Menth und P. Oelhafen, «Energieverbrauch und Einsparpotential des S-Bahn-Gliederzugs RABe 525 NINA der BLS,» *Schweizer Eisenbahn-Revue*, pp. 398 - 403, 8/9 2013.
- [11] S. Menth, Validierung HLK-Energieverbrauch RABe 525 005, Dokument 18-0804, Wettingen: emkamatik GmbH, 19.11.2018.
- [12] SBB Infrastruktur, «Leistungskatalog Infrastruktur 2018,» Nr. Oktober 2016, pp. 21 - 22.

A. Anhang: Montage der Wärmedämmung beim Triebzug RABe 525 NINA 005



Abbildung 50. Seitenwand mit erster Lage von Dämmmaterial SSC Q1 30 mm. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 12.10.2017.



Abbildung 51. Seitenwand im Endwagen ET2 beim WC unter Fenster nach Demontage der bisherigen Wärmedämmung MONIFLEX sowie nach Entfernung der bisherigen Halterungen für die Seitenwand-tische. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 12.10.2017.



Abbildung 52. Entfernen der bisherigen Halterungen für die Seitenwandtische. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 12.10.2017.

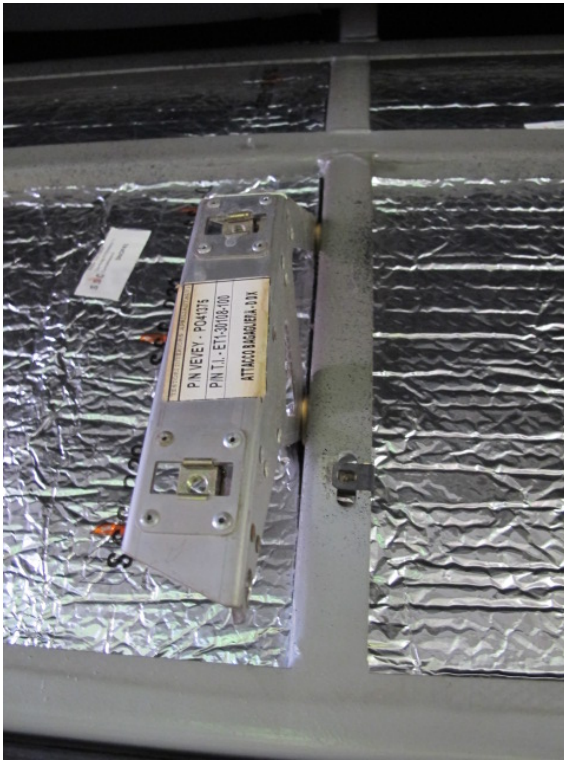


Abbildung 53. Thermische Entkopplung der Wärmebrücke zwischen Seitenwandprofil und Befestigung der des Deckenelements. Auf dem Bild sind in den roten Kreisen die Zwischenlagen aus Kunststoff ISOVAL FR4-H erkennbar. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 12.10.2017.



Abbildung 54. Wärmedämmung der Seitenwand. Die erste Lage der Wärmedämmung Q1 30 mm ist mit der zweiten Lage alubeschichteter Wärmedämmung Q20 6 mm überdeckt. Die horizontalen und vertikalen Z-Profile sind mit Wärmedämmung Q1 30 mm isoliert. Die durchgehende Deckschicht mit der Wärmedämmung Q20 6 mm ist noch nicht montiert. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 12.10.2017.



Abbildung 55. Wärmedämmung der Seitenwand (links). Die bisherigen Halterungen der Seitenwandstruktur sind noch nicht entfernt. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 12.10.2017.



Abbildung 56. Endwagen ET2 kurz vor Demontage des Decken-Lüftungskanals. Vor dem Ausbohren der seitlichen Befestigungsnieten ist der Decken-Lüftungskanal bereits mit Spliessen abgestützt. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 12.10.2017.



Abbildung 57. Endwagen ET2 mit abgesenktem Decken-Lüftungskanal. Der Decken-Lüftungskanal des gesamten Niederflurabteils wird bis zur Lüftungsgruppe an einem Stück abgesenkt. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 12.10.2017.



Abbildung 58. Demontierter Decken-Lüftungskanal aus Niederflur-Abteil von Endwagen ET2. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 12.10.2017.



Abbildung 59. Anschlussrohre für Ausblasöffnungen im Bodenbereich nach Demontage des Decken-Lüftungskanals. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 13.10.2017.



Abbildung 60. Seitenwand teilweise mit neuer Wärmedämmung. Die bisherigen Halterungen der Seitenwandtische sind noch nicht demontiert. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 13.10.2017.



Abbildung 61. Wärmedämmung der Seitenwand. Die erste Lage der Wärmedämmung Q1 30 mm ist mit der zweiten Lage alubeschichteter Wärmedämmung Q20 6 mm überdeckt. Die vertikalen Z-Profile sind mit Wärmedämmung Q1 30 mm isoliert. Die durchgehende Deckschicht mit der Wärmedämmung Q20 6 mm ist noch nicht montiert. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 13.10.2017.



Abbildung 62. Dach bei Abluftventilator des Endwagens ET2. Die Dachspriegel sind mit vorgefertigter Wärmedämmung aus Q1 30 mm isoliert. Zwischen den Dachspriegeln ist die erste Lage der Wärmedämmung Q1 30 mm (grün) respektive bereits der zweiten Lage mit der alubeschichteten Wärmedämmung Q20 6 mm erkennbar. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 13.10.2017.



Abbildung 63. Bereich zwischen Seitenwand und Dach im Niederflurabteil von Endwagen ET2 beim WC, vor Montage der Wärmedämmung. Enge Platzverhältnisse durch Kabeltrasse sowie Abluftrohr des WC (mit schwarzer Dämmung), befestigt mit Kabelbindern an den Dreieck-Spickeln. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 20.10.2017.



Abbildung 64. Bereich zwischen Seitenwand und Dach im Niederflrabteil von Endwagen ET2 beim Wagenübergang, vor Montage der Wärmedämmung, bei bereits demontiertem Decken-Lüftungskanal. Abluftrohr des WC (mit schwarzer Dämmung), befestigt mit Kabelbindern an den Dreieck-Spickeln. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 20.10.2017.



Abbildung 65. Seitenwand und Dach teilweise mit neuer Wärmedämmung. Die bisherigen Halterungen der Seitenwandtische sind bereits demontiert. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 20.10.2017.



Abbildung 66. Bereich zwischen Seitenwand und Dach mit neuer Wärmedämmung. Flächen zwischen Dreieck-Spickeln mit erster Lage der Wärmedämmung Q1 30 mm (grün) und teilweise bereits mit zweiter Lage alubeschichteter Wärmedämmung Q20 6 mm isoliert. Dreieck-Spickel zwischen Seitenwandprofil und Dachspriegel mit alubeschichteter Wärmedämmung Q20 10 mm isoliert. Die Anschläge der Deckenverkleidung (beige) sind aus der Wärmedämmung Q20 10 mm ausgeschnitten. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 20.10.2017.

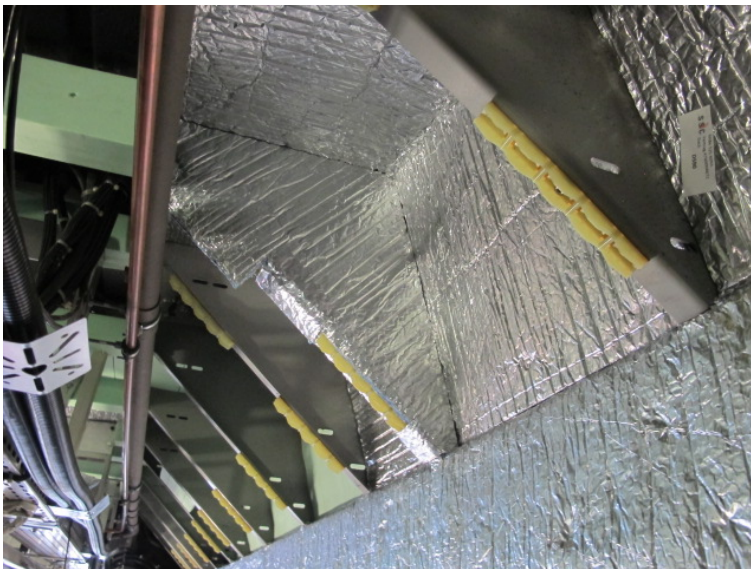


Abbildung 67. Bereich zwischen Seitenwand und Dach mit neuer Wärmedämmung, mit verschiedenen Arbeitsfortschritten. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 20.10.2017.

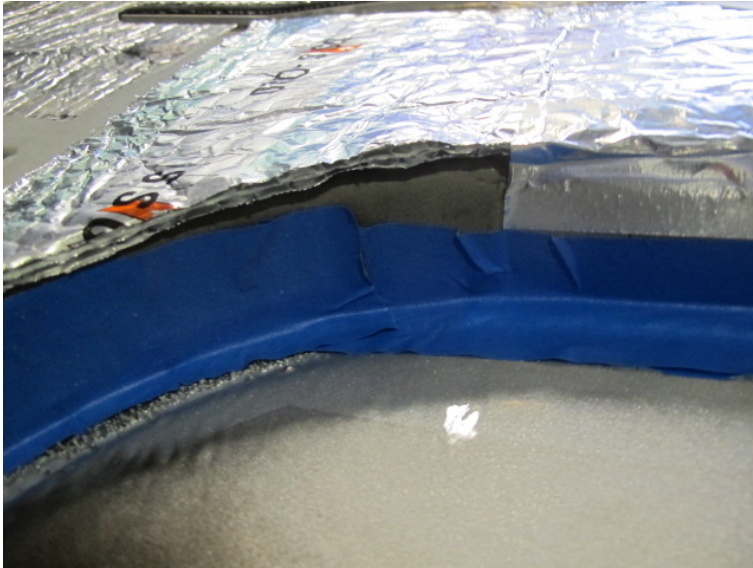


Abbildung 68. Ecke des Seitenfensters, Stahlrahmen mit blauem Abdeck-Klebeband für Malerei. Durchgehend überdeckende Wärmedämmung Q20 6 mm. Es fehlt die Wärmedämmung Q20 6 mm des Stahlrahmens, die bei allen Seitenfenstern der drei Wagenkasten ET1, ET2 und AB nicht montiert wurde. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 20.10.2017.

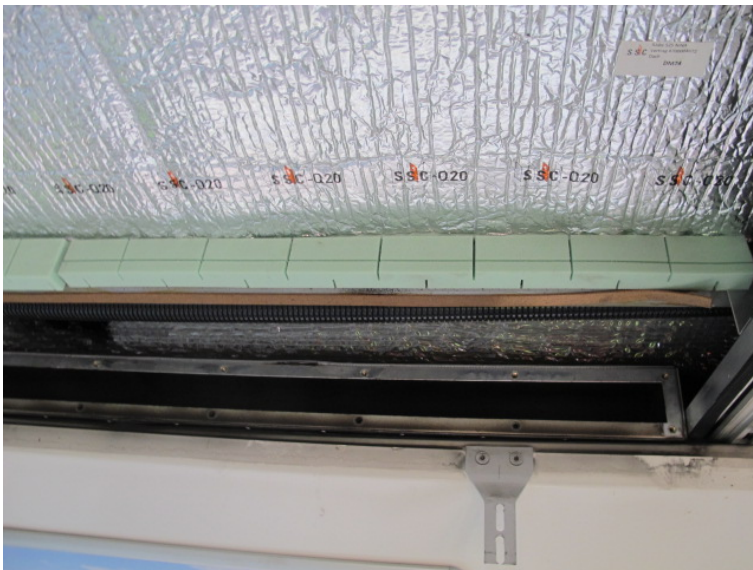


Abbildung 69. Dach beim Treppenaufgang im Hochflurabteil von Endwagen ET1 bei demontiertem Decken-Lüftungskanal. Ausblasöffnung der Lüftungsgruppe sichtbar. Bei Dachspiegel Wärmedämmung Q1 30 mm sowie bei Fläche zwischen den Dachspiegeln zweite Lage mit Wärmedämmung Q20 6 mm sichtbar. Zwischen Lüftungsgruppe und Dach ist die bisherige Wärmedämmung MONIFLEX erkennbar. Wegen hohem Arbeitsaufwand für Demontage der Lüftungsgruppe wird dort keine neue Wärmedämmung für Dachspiegel und Dachfläche montiert. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 14.11.2017.



Abbildung 70. Dach bei Führerstands-Türe im Hochflurabteil von Endwagen ET1 bei demontiertem Decken-Lüftungskanal. Bei Dachspiegel Wärmedämmung Q1 30 mm sowie bei Fläche zwischen den Dachspiegeln zweite Lage mit Wärmedämmung Q20 6 mm sichtbar. Am Dach über den Apparateschränken und über dem Führerstand verbleibt dort die bisherige Wärmedämmung MONIFLEX. Wegen hohem Arbeitsaufwand für Demontage der Apparateschränke wird dort keine neue Wärmedämmung für Dachspiegel und Dachfläche montiert. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 14.11.2017.

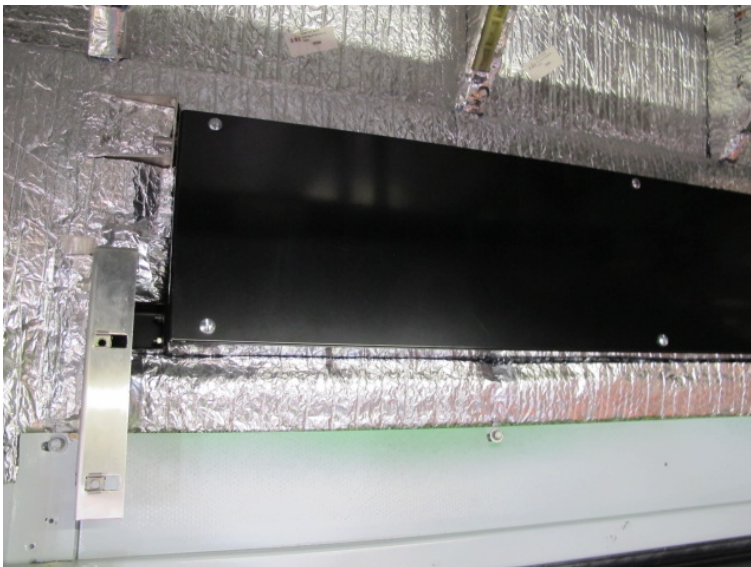


Abbildung 71. Fahrzielanzeige über Seitenfenster im Niederflurabteil des Endwagens ET1. Deckel wegen Zugang zur Fahrzielanzeige bei Reparaturen ohne Wärmedämmung. Damit verbleibt eine wesentliche Wärmebrücke. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 14.11.2017.



Abbildung 72. Dach bei Abluftventilator des Endwagens ET1. Die Dachspriegel sind mit vorgefertigter Wärmedämmung aus Q1 30 mm isoliert. Zwischen den Dachspriegeln ist die zweite Lage alube-schichteter Wärmedämmung Q20 6 mm erkennbar. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 14.11.2017.



Abbildung 73. Dach im Niederflurabteil von Endwagen ET1 bei demontiertem Decken-Lüftungskanal. Beide Ausblasöffnungen der Lüftungsgruppe sichtbar. Bei Dachspriegel Wärmedämmung Q1 30 mm sowie bei Fläche zwischen den Dachspriegeln zweite Lage mit Wärmedämmung Q20 6 mm sichtbar. Bei der Wärmedämmung der Dachspriegel sind die Durchführungen für die drei in Wagen-Längsrichtung verlaufenden Stahldrähte zur Befestigung der Wärmedämmung erkennbar. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 14.11.2017.



Abbildung 74. Ecke des Seitenfensters beim Führerstand des Endwagens ET1. Seitenwand mit durchgehend überdeckender Wärmedämmung Q20 6 mm. Es fehlt die Wärmedämmung Q20 6 mm des Stahlrahmens, die bei allen Seitenfenstern der drei Wagenkasten ET1, ET2 und AB nicht montiert wurde. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 14.11.2017.



Abbildung 75. Bereich zwischen Seitenwand und Dach beim Endwagen Et2, nahe dem WC. Fertige Wärmedämmung der Seitenwand und der Dreieck-Spicket. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 14.11.2017.



Abbildung 76. Decke im Hochflurabteil von Endwagen ET2 bei Führerstands-Türe, mit montiertem Decken-Lüftungskanal. Bei den Innenflächen des Decken-Lüftungskanals erfolgt der Ersatz der bisherigen Wärmedämmung mit Mineralwollmatten durch Wärmedämmung Q20 6 mm. Dies ist bereits Bestandteil des Refit-Arbeitsumfangs bei allen 36 Zügen Rabe 525 NINA, unabhängig von der Verbesserung der Wärmedämmung. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 14.11.2017.



Abbildung 77. Fertige Wärmedämmung im Niederflurabteil beim Wagenübergang des Endwagens ET2. Erkennbar ist die Wärmedämmung bei der Stirnwand des Wagenkastens, analog der Wärmedämmung der Seitenwand. Foto: ECOTRANS Peter Wüst, 14.11.2017.



Abbildung 78. Fertige Wärmedämmung des Dachs im Niederflurabteil des Endwagens ET1, bei demontiertem Decken-Lüftungskanal. In der Bildmitte ist der Zugangsdeckel zu Hauptschalter, Primärstromwandler und Primärspannungswandler sichtbar.

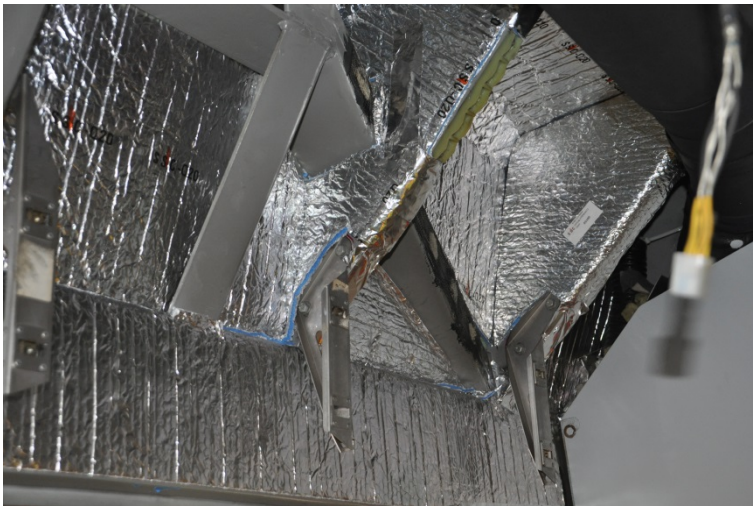


Abbildung 79. Aufwendige Wärmedämmung ohne vorgefertigte Zuschnitte bei den Abstützungen des Haupttransformators an der Decke des Endwagens ET1. Foto: Renato Gartner, 14.11.2017.



Abbildung 80. Aufwendige Wärmedämmung ohne vorgefertigte Zuschnitte bei den Abstützungen des Haupttransformators an der Decke des Endwagens ET1. Foto: Renato Gartner, 14.11.2017.



Abbildung 81. Fertige Wärmedämmung der Seitenwand im Hochflurabteil des Endwagens ET1. Foto: Renato Gartner, 14.11.2017.



Abbildung 82. Fertige Wärmedämmung der Seitenwand im Hochflurabteil des Endwagens ET1, mit Detail der Wärmedämmung bei Füllrohr des Sanderbehälters. Foto: Renato Gartner, 14.11.2017.



Abbildung 83. Seitenwand im Hochflurabteil des Endwagens ET1, mit neuer Halterung für Seitenwandtische unterhalb des Fensters, montiert mit thermischer Entkopplung auf die Seitenwandprofile. Foto: Renato Gartner, 14.11.2017.

B. Anhang: Protokoll der Heizversuche vom 20./21. Januar 2018

Bahnhof Huttwil, Fr 19. bis So 21. Januar 2018. Die gesamten Aufheizversuch erfolgen auf dem Ausengleis G4.

Freitag, 19. Januar

- 19:36 Ankunft NINA 006 in Gleis G4 West im Bahnhof Huttwil.
- 20:36 Ankunft NINA 005 in Gleis G4 Ost im Bahnhof Huttwil.
- 20:45 Beide Züge gekuppelt. Ausrichtung und Komposition:
West (Langenthal) <I 525 006 II> - <I 525 005 II> Ost (Wolhusen).
- 21:00 Installation der Messeinrichtung.
NINA 006: Wegen ungenügender Kabellänge ist Temperaturfühler für Hochflurabteil ET2 an Haltestange der Einstiegsplattform auf ca 1 m Höhe angebracht.
- 23:00 NINA 005: Serviceschnittstelle des Klimarechners funktioniert nicht. Ersatz-Klimarechner im Lager in Oberburg abgeholt und Klimarechner ausgetauscht.

Samstag, 20. Januar

- 03:30 NINA 005: Serviceschnittstelle des neuen Klimarechners funktioniert. Jedoch weisen alle Temperaturfühler-Signale eine Wellenbewegung auf, gleichförmig zum Temperaturverlauf der Ausblastemperatur. Zudem ist ein Masseschluss auf dem 36VDC-Netz vorhanden.
- 05:17:35 NINA 005: Forcierung
- Zuluftventilator 2. Stufe (05:17:35)
- Aussenluftklappe aus Stellung Umluft (05:17:54)
- 05:23:18 NINA 005: Forcierung von Aussenluftklappe und Zuluftventilator entfernt.
Damit bis 14:14:39 im Automatikbetrieb (ohne Forcierung).
- 14:52:47 NINA 005: Forcierung für Auskühlen aktiviert:

- Heizleistung <Taux Chauffage> für alle Wagenkasten 0 %
- Kühlleistung <Taux Réfrigération> für alle Wagenkasten 0 %
- Zuluftventilatoren 2. Stufe Q-VT und Q-VTE
- max. Aussenluft Q-P1AT
- oben und unten einblasen Q-P3AM
- Abluftventilatoren auf 2. Stufe eingeschaltet S-GEX-GV, 1. Stufe ausgeschaltet S-GEX-PV

- Führerstands-Klimaanlage auf <A> und Solltemperatur-Drehknopf auf Mittelstellung
- Türe von Führerstand zu Fahrgastraum geschlossen
- Abteiltüren von 1-KI-Abteil geöffnet und ausgeschaltet.
- Alle Einstiegstüren sowie Führerstands-Aussentüren geschlossen
- Innenbeleuchtung ausgeschaltet.
- 15:05:24 NINA 006: Forcierung für Auskühlen aktiviert:

- Heizleistung <Taux Chauffage> für alle Wagenkasten 0 %
- Kühlleistung <Taux Réfrigération> für alle Wagenkasten 0 %
- Zuluftventilatoren 2. Stufe Q-VT und Q-VTE
- max. Aussenluft Q-P1AT

- oben und unten einblasen Q-P3AM
 - Abluftventilatoren auf 2. Stufe eingeschaltet S-GEX-GV, 1. Stufe ausgeschaltet S-GEX-PV
 - Führerstands-Klimaanlage auf <A> und Solltemperatur-Drehknopf auf Mittelstellung
 - Türe von Führerstand zu Fahrgastraum geschlossen
 - Abteiltüren von 1-KI-Abteil geöffnet und ausgeschaltet.
 - Alle Einstiegstüren sowie Führerstands-Aussentüren geschlossen
 - Innenbeleuchtung ausgeschaltet.
- 15:20 NINA 005 und 006: Alle Aussenluftklappen auf maximale Öffnung kontrolliert: Alle Aussenluftklappen sind identisch und weisen eine Öffnungsmass von Unterkante Umluftansaugung zur Luftklappenkante von 300 mm auf.
- 19:00 Regen.
- 19:07:10 NINA 006: Von maximalen Aussenluftanteil Q-P1AT auf Umluftbetrieb Q-P2AT geändert.
- 19:11:27 NINA 005: Von maximalen Aussenluftanteil Q-P1AT auf Umluftbetrieb Q-P2AT geändert.
- 19:15 NINA 005 und 006: total 12 Stk. Zuluftfilter bei allen Lüftungsgruppen ersetzt. Alle Aussenluftklappen in geschlossener Stellung kontrolliert.
- 20:50:42 NINA 006: Heizung eingeschaltet:
- Heizleistung <Taux chauffe> 44 % respektive 40 kW für alle Wagenkasten
 - Zuluftventilatoren 2. Stufe Q-VT und Q-VTE
 - Abluftventilatoren Q-GEX-PV und Q-GEX-GV ausgeschaltet
 - Umluftbetrieb Q-P2AT
 - unten Einblasen Q-P2AM
- 20:52:20 NINA 005: Heizung eingeschaltet:
- Heizleistung <Taux chauffe> 44 % respektive 40 kW für alle Wagenkasten
 - Zuluftventilatoren 2. Stufe Q-VT und Q-VTE
 - Abluftventilatoren Q-GEX-PV und Q-GEX-GV ausgeschaltet
 - Umluftbetrieb Q-P2AT
 - unten Einblasen Q-P2AM
- 21:00 – 22:10 Abendessen.
- 22:20 Starker Regen.
- 22:30 NINA 005 und 006: Kontrolle der Heizregister der Fahrgast-Klimaanlagen, alle Heizregister zeigen Ströme bei Heizregister 1 und 2 von je ca. 44 A respektive einen gemeinsamen Nullleiter von ca. 88 A.
Keine Ausfälle von Heizregistern.
- 23:30

Wärmebilder, starker Regen, ca. 5 °C

Alle Aufnahmen von Perron Gleis 2/3 auf RABe 525 NINA 005 und 006 auf Gleis G4

Datei	Bezeichnung
RABe 525 NINA 005, verbesserte Wärmedämmung	
IR001100.BMP	ET1 li
IR001101.BMP	ET1 li, Hochflur
IR001102.BMP	ET1 li, Niederflur
IR001103.BMP	Faltenbalg ET1/AB li
IR001104.BMP	AB li
IR001105.BMP	AB und ET2 li
IR001106.BMP	ET2 li, Niederflur
IR001107.BMP	ET2 li, Niederflur
IR001108.BMP	ET2 li, Niederflur
IR001109.BMP	AB, Einstiegstüre
IR001110.BMP	AB, 2 Kl li
IR001111.BMP	AB li, Einstiegstüre
R001112.BMP	AB/ET2 li, Faltenbalg
R001113.BMP	AB, 2 Kl li
R001114.BMP	AB/ET2 li, Faltenbalg
R001115.BMP	ET2 li, Niederflur
R001116.BMP	ET2 li, Niederflur
R001117.BMP	ET2 li, Einstiegstüre
R001118.BMP	ET2 li, Einstiegstüre
R001119.BMP	ET2 li, Führerstand
R001120.BMP	ET2 li, Führerstand
R001121.BMP	ET2 li, Einstiegstüre
R001122.BMP	ET2 li, Niederflur
R001123.BMP	AB li, Einstiegstüre
R001124.BMP	ET1 li, Niederflur
R001125.BMP	AB li, 1 Kl
R001126.BMP	ET1 li
R001127.BMP	ET1/AB li, Faltenbalg

Datei	Bezeichnung
RABe 525 NINA 006, herkömmliche Wärmedämmung	
R001128.BMP	ET2 li, Hochflur
R001129.BMP	ET2 li, Hochflur
R001130.BMP	ET2 li, Hochflur und Einstiegstüre
R001131.BMP	ET2 li, Niederflur
R001132.BMP	AB li, 2 KI
R001133.BMP	AB/ET2 li, Faltenbalg
R001134.BMP	AB li
R001135.BMP	AB li, 1 KI
R001136.BMP	AB li, 2 KI
R001137.BMP	ET1 li, Niederflur
R001138.BMP	ET1 li, Niederflur
R001139.BMP	ET1 li, Niederflur
R001140.BMP	ET1 li, Niederflur
RABe 525 NINA 005, verbesserte Wärmedämmung	
R001141.BMP	ET2, Führerstand
R001142.BMP	ET2 re, Führerstand
R001143.BMP	ET2 li, Führerstand
R001144.BMP	ET2 und AB li
R001145.BMP	AB li, 1 KI
RABe 525 NINA 006, herkömmliche Wärmedämmung	
R001146.BMP	AB li, 1 KI

Sonntag, 21. Januar

- 05:22 NINA 005: Heizung ausgeschaltet:
- Heizleistung <Taux chauffage> 0 % für alle Wagenkasten
 - Zuluftventilatoren 1. Stufe Q-VT, Q-VTE ausgeschaltet.
 - Abluftventilatoren Q-GEX-PV und Q-GEX-GV ausgeschaltet
 - Umluftbetrieb Q-P2AT
 - oben und unten Einblasen Q-P3AM
- 05:28 NINA 006: Heizung ausgeschaltet:
- Heizleistung <Taux chauffage> 0 % für alle Wagenkasten
 - Zuluftventilatoren 1. Stufe Q-VT, Q-VTE ausgeschaltet.
 - Abluftventilatoren Q-GEX-PV und Q-GEX-GV ausgeschaltet
 - Umluftbetrieb Q-P2AT
 - oben und unten Einblasen Q-P3AM
- 11:45 Regen.
- 11:58 Datenlogger QUANTUM-X gestoppt.
- 12:39 NINA 006: Forcierung und Aufzeichnung auf Klimarechner gestoppt.
- 12:58 NINA 005: Forcierung und Aufzeichnung auf Klimarechner gestoppt.

C. Anhang: Messgeräte für Heizversuche vom 20./21. Januar 2018

- Datenlogger QUANTUM X mit:
 - o 1 Stk. Datenlogger CX22W mit Software CATMAN EASY
 - o 2 Stk. Eingangsmodul MX 840A zu je 8 Eingängen
 - o 1 Stk. Netzgerät
 - o 1 Stk Ethernet-Kabel
 - o 2 Stk Verbindungskabel FireWire
 - o 1 Rechner zur Überwachung des Datenloggers, mit Netzgerät
 - o 14 Stk Temperaturfühler Pt 100 (8 Stk. 50 m, 2 Stk. 60 m, 4 Stk. 15 m)
- 2 Rechner mit Serviceprogramm FAIVELEY für forcieren der Fahrgast-Klimaanlagen von RA-Be 525 005 und 006.
 - o Aufzeichnung im 1s-Intervall aller Signale der Fahrgast-Klimarechner, (Innen- und Aus-sentemperaturen, Heizschützen, Luftklappen, ...)
 - o 6 Stk Verbindungskabel DSUB 9pol 1-1, 2 x 3 m, 4 x 15 m
- 2 Stk Netzgeräte für Computer.
- 1 Stk. digitales Thermometer FLUKE 971, Handmessgerät.
- 1 Stk. Wärmebildkamera FLUKE Thermal Imager Ti25.
- 1 Stk. Multimeter FLUKE mit Temperaturfühler (für Oberflächenmessung).
- 1 Stk. Strommesszange.