



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)

Messung Energieverlust durch Türöffnungen bei Linien-Bussen

Schlussbericht



Franz Sidler, Hochschule Luzern

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

Stefan Ineichen, Hochschule Luzern

Technikumstrasse 21 6048 Horw, stefan.ineichen.01@hslu.ch, www.hslu.ch

Gerhard Zweifel, Hochschule Luzern

Technikumstrasse 21 6048 Horw, gerhard.zweifel@hslu.ch, www.hslu.ch

Begleitgruppe

Carrosserie Hess AG: Hans-Jörg Gisler, Nicolas Amacker, Hannes Aeberhard

BAV: Stefan Schnell, Tristan Chevroulet, Daniel Schaller (PO)

SBB: Ralf Hofer

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

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

CH-3003 Bern

Programmleiter

Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: 098 (des ESöV 2050-Programms)

Bezugsquelle

Kostenlos zu beziehen über das Internet

www.bav.admin.ch/energie2050

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

Bern, den 5.09.2019

Inhalt

Danksagung	4
Zusammenfassung	5
Résumé sommaire	6
Executive summary	7
1. Ausgangslage und Zielsetzung	8
1.1 Ausgangslage	8
1.2 Ziel der Arbeit	8
2. Methodik	8
2.1 Grundlagen des Fahrzeugs	8
2.2 Systembeschreibung HLK	9
2.3 Messung Energiebedarf Türöffnung	11
2.4 Türöffnung	12
2.5 Messkonzept Energieverlust Türöffnung	12
2.6 Messeinrichtung U-Wert	13
2.7 Messung Luftströmungen und Temperaturen	14
3. Ergebnisse	16
3.1 Energiebedarf Türöffnung	16
3.2 Berechnung Jahresenergiebedarf für die Türöffnung	19
3.3 Lufttemperaturen und Feuchte im Bus	20
3.4 Zulufttemperaturen und Feuchte in der Zuluft	22
3.5 U-Wert der Fahrzeughülle	23
3.6 Luftvolumenströme bei offenen Türen	23
4. Diskussion	25
5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	26
6. Anhang	27
6.1 Türöffnungszyklus	27
6.2 Luftgeschwindigkeiten in der Klimakammer	28
6.3 Messwerte Türöffnungsverluste	28
6.4 Auszug Versuchsbericht SBB	28

Danksagung

Wir bedanken uns bei der Firma Carrosserie Hess AG (Nicolas Amacker und Hannes Aeberhard) für die gute Zusammenarbeit sowie der Unterstützung beim Einbau des Messsystems, und den zur Verfügung gestellten Trolleybus.

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

Des Weiteren möchten wir uns bei allen am Projekt beteiligten Partnern für die gute Zusammenarbeit und den spannenden Austausch bedanken. Ein besonderer Dank gilt der SBB (Projektleiter Andreas Käser sowie den beteiligten Prüfsingenieuren), welche die Messungen in dieser kurzen Zeit durch Ihre Bereitschaft, tief in die Nacht zu arbeiten, ermöglicht haben.

Zusammenfassung

Es besteht die These, dass eine aufwendige Wärmedämmung der Fahrzeughülle keinen Sinn machen würde, da die Wärmeverluste durch die Türöffnungen den wesentlichen Wärmeverlust bei Fahrzeugen bestimmen. Diese Messungen geben Antworten zu den teilweise kontrovers diskutierten Wärmeverlusten durch Türöffnungen. Unter möglichst realitätsnahen Randbedingungen wurde am Linienbus der Energieverlust durch geöffnete Türen an den Haltestellen gemessen. Als Fahrzeug wurde der Swisstrolley plus von der Firma Carrosserie Hess zur Verfügung gestellt. Dieser Bus ist 18.7 m lang, hat vier Türen und kann maximal 163 Passagiere befördern. Geheizt und gekühlt wird das Fahrzeug mit einem Klimagerät. Bei sehr tiefen Aussentemperaturen werden zusätzlich elektrische Infrarotstrahler an der Decke zugeschaltet.

Nur in einer Klimakammer ist es möglich, definierbare und reproduzierbare Klimaverhältnisse zu erzeugen. Deshalb wurden die Messungen am Bus in der Klimakammer der SBB in Olten durchgeführt. Der Leistungs-Mehrbedarf infolge Türöffnungen wurde bei unterschiedlichen Aussenlufttemperaturen ermittelt. Bei gleicher Aussenlufttemperatur wurde die Verlustleistung durch Türöffnungen aus der Differenz ohne Türöffnung und mit Türöffnung berechnet und in Funktion der Temperaturdifferenz grafisch dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Verlustleistung durch Türöffnungen bei steigender Temperaturdifferenz nicht linear zunimmt. So wurde bei der Temperaturdifferenz von rund 10 Kelvin zwischen der Lufttemperatur im Bus und Aussen ein Leistungs-Mehrbedarf durch Türöffnungen von ca. 1.5 kW gemessen. Bei der rund doppelten Temperaturdifferenz von 21 Kelvin stieg die Verlustleistung auf ca. 11 kW an. Bezogen auf die gesamte Heizleistung werden dabei 33 % zur Deckung der Verluste durch Türöffnungen benötigt. Die Berechnung am Standort Luzern, basierend auf den Klimadaten nach SIA 2028, ergab für den Swisstrolley plus Verluste durch Türöffnungen von 16.3 MWh/a.

Die Auswertung der Bus-Innenlufttemperatur zeigte bei kalten Aussentemperaturen eine grosse vertikale Temperaturschichtung. Bei der Aussentemperatur von -12 °C wurden mehr als 10 Kelvin gemessen.

Zusätzlich zur Ermittlung der Türöffnungsverluste wurde der mittlere U-Wert des Busses gemäss Norm SN EN 14750-2 bei der Aussentemperatur von 5 °C mit internen Heizgeräten gemessen. Er beträgt $2.9 + 0.09/-0.08 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Die Resultate können aufgrund des unterschiedlichen Einsatzes nicht direkt auf andere Fahrzeuge wie Nahverkehrszüge oder Trams angewandt werden. Deshalb wird vorgeschlagen, dass basierend auf diesen Erfahrungen und Ergebnissen, in einem Folgeprojekt mit Hilfe von Simulationen und ev. vereinzelt Messungen der Einfluss der Türöffnung an anderen Fahrzeugen untersucht wird. Auch mögliche Massnahmen, um den Verlust infolge Türöffnungen zu reduzieren, sollten in einem weiterführenden Projekt untersucht werden.

Résumé sommaire

On suppose qu'une isolation thermique complexe de la coque d'un véhicule n'aurait pas de sens, puisque la perte de chaleur principale aurait lieu à l'ouverture des portes. Les mesures exposées dans ce rapport apportent des réponses à cette théorie controversée sur la perte de chaleur lors de l'ouverture des portes. Dans des conditions aussi proches de la réalité que possible, la perte d'énergie liée à l'ouverture des portes d'un bus aux arrêts a été mesurée. Le SwissTrolley plus a été fourni par l'entreprise Carrosserie Hess comme véhicule d'essai pour cette étude. Long de 18,7 m et muni de quatre portes, cet autobus peut transporter un maximum de 163 passagers. Un climatiseur permet de chauffer et refroidir le véhicule et, en cas de basses températures extérieures, des radiateurs infrarouges électriques supplémentaires sont raccordés au plafond.

Il n'est possible de générer des conditions climatiques prédéfinies et reproductibles qu'à l'intérieur d'une chambre climatique. C'est pourquoi les mesures sur le bus ont été effectuées dans la chambre climatique des CFF à Olten. La consommation électrique supplémentaire requise en raison des ouvertures des portes a été déterminée en fonction de différentes températures extérieures. Pour une même température extérieure, la perte de puissance liée aux ouvertures des portes a été calculée par la différence de température avec et sans ouvertures des portes, puis représentée graphiquement en fonction des différences de températures. Cette expérience démontre que la perte de puissance au travers des ouvertures des portes n'augmente pas linéairement avec l'écart de température. Ainsi, pour une différence de température d'environ 10 Kelvin entre de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de l'autobus, on mesure une consommation supplémentaire provoquée par l'ouverture des portes de 1,5 kW. Avec une différence de température de 21 Kelvin, soit environ le double, la perte de puissance a augmenté de près de 11 kW. Par rapport à la puissance calorifique totale, 33 % est nécessaire pour couvrir les pertes par les ouvertures des portes. Le calcul effectué sur le site de Lucerne, basé sur les données climatiques de la norme SIA 2028, a entraîné des pertes de 16,3 MWh/a pour le SwissTrolley plus par les ouvertures de portes.

L'évaluation de la température de l'air à l'intérieur de l'autobus a révélé une grande stratification verticale de la température pour des températures extérieures froides. Avec une température extérieure de -12 °C, une stratification verticale des températures de plus de 10 Kelvin a été mesurée.

Outre la détermination des pertes dues à l'ouverture des portes, la valeur U moyenne du bus selon la norme SN EN 14750-2 a été mesurée à 2,9 W/m²K pour une température extérieure de 5 °C et avec chauffage à l'intérieur du bus.

Les résultats ne peuvent pas être appliqués directement à d'autres véhicules tels que les trains locaux ou les trams en raison de la différence des conditions d'application. Il est donc suggéré, sur la base de ces expériences et de ces résultats, d'étudier l'influence de l'ouverture des portes d'autres véhicules au moyen de simulations et éventuellement de mesures individuelles dans le cadre d'un projet ultérieur. Les possibilités de réduction des pertes dues à l'ouverture des portes devraient également être étudiées dans le cadre d'un projet supplémentaire.

Executive summary

There is the thesis that a complex thermal insulation of the vehicle shell would not make sense, since the heat losses through the door openings determine the essential heat loss in vehicles. These measurements provide answers to the partly controversially discussed heat losses through door openings. Under conditions that were as realistic as possible, the energy loss on the public bus through open doors at the bus stops was measured. The SwissTrolley plus was provided as a vehicle by Carrosserie Hess. This bus is 18.7 m long, has four doors and can carry a maximum of 163 passengers. The vehicle is heated and cooled by an air conditioner. At very low outside temperatures, additional electric infrared radiators are connected to the ceiling.

Only in a climatic chamber is it possible to create definable and reproducible climatic conditions. Therefore, the bus measurements were carried out in the climate chamber of the SBB in Olten. The additional power requirement due to door openings was determined at different outside air temperatures. With the same outside air temperature, the power loss through door openings was calculated from the difference between door opening and door opening and graphically displayed as a function of the temperature difference. This shows that the power loss through door openings does not increase linearly with increasing temperature difference. For example, at a temperature difference of around 10 Kelvin between the air temperature in the bus and outside, an additional line requirement through door openings of approx. 1.5 kW was measured. With a temperature difference of around twice 21 Kelvin, the power dissipation increased to approx. 11 KW. In relation to the total heat output, 33 % is required to cover the losses through door openings. The calculation at the Lucerne location, based on the climate data of SIA 2028, resulted in losses of 16.3 MWh/a for the SwissTrolley plus through door openings.

The evaluation of the bus air temperature showed a large vertical temperature stratification at cold outside temperatures. At an outside temperature of -12 °C, a vertical temperature stratification of more than 10 Kelvin was measured.

In addition to determining the door opening losses, the mean U-value of the bus according to SN EN 14750-2 was measured at 2.9 W/m²K at an outside temperature of 5 °C with internal heaters.

The results cannot be applied directly to other vehicles such as local trains or trams due to the different applications. It is therefore proposed that, based on these experiences and results, the influence of the door opening on other vehicles be investigated in a follow-up project with the aid of simulations and possibly individual measurements. Possible measures to reduce the loss due to door opening should also be investigated in a follow-up project.

1. Ausgangslage und Zielsetzung

1.1 Ausgangslage

Der Energiebedarf für Heizung, Lüftung und Klima (HLK) bei Schienenfahrzeugen macht ca. 20-40 % des Gesamtenergieverbrauchs aus, wie im Projekt „Energieeffizienz von HLK im öffentlichen Verkehr“ von Prof. Peter Oelhafen aufgezeigt wurde. In diesem Rahmen wurden die Energieverbräuche der HLK-Systeme verschiedener Schienenfahrzeuge unterschiedlicher Betreiber (SOB, RhB, BLS, SBB, tl) im Detail ausgemessen und verschiedene Massnahmen mit Unterstützung von Simulationen ausgearbeitet und bewertet. Dabei besteht eine grosse Unsicherheit bezüglich des Wärmeverlusts infolge von Türöffnungen zum Ein- und Ausstieg der Passagiere. Vor allem bei Linien-Bussen mit kurzen Fahrzeiten zwischen den Haltestellen werden die Türen sehr häufig geöffnet. Bei den bisherigen Untersuchungen konnte der Energieverlust durch geöffnete Türen an den Haltestellen nicht detailliert berücksichtigt werden.

Mit diesem Projekt soll den Energieverlust durch geöffnete Türen an den Haltestellen gemessen und Antworten zu den teilweise kontrovers diskutierten Wärmeverlusten durch Türöffnungen geliefert werden. Es besteht die These, dass eine aufwendige Wärmedämmung der Fahrzeughülle keinen Sinn machen würde, da die Wärmeverluste durch die Türöffnungen den wesentlichen Wärmeverlust bei Fahrzeugen bestimmen. Um diese Behauptung zu bestätigen oder zu widerlegen, braucht es genaue und möglichst realitätsnahe Messungen an Fahrzeugen

1.2 Ziel der Arbeit

Mit diesem Projekt wurden folgende Ziele verfolgt:

- Durch die Messungen unter möglichst realitätsnahen Randbedingungen am Fahrzeug wird der Energieverlust infolge Türöffnungen bei unterschiedlichen Aussenlufttemperaturen ermittelt.
- Untersuchung und Visualisierung der Luftströmungen im Türbereich
- Die U-Wert-Messung nach Norm ermöglicht den Vergleich mit anderen Fahrzeugen.
- Den Herstellern und Betreibern von Fahrzeugen wird aufgezeigt, welchen Anteil im Vergleich zu den Gesamtverlusten die Wärmeverluste infolge der Türöffnungen ausmachen.

2. Methodik

Der für diese Arbeiten von der Firma Hess Carrosserie zur Verfügung gestellte Linienbus "SwissTrolley plus" ist ein moderner Gelenkbus, ca. 19 m lang. In diesem Bus wurde eine Messeinrichtung zur Messung der Heiz- und Kühlenergie eingebaut. Alle Messungen wurden in der Klimakammer der SBB in Olten durchgeführt.

2.1 Grundlagen des Fahrzeugs

In der Tabelle 1 sind die technischen Angaben des untersuchten Fahrzeugs aufgeführt.

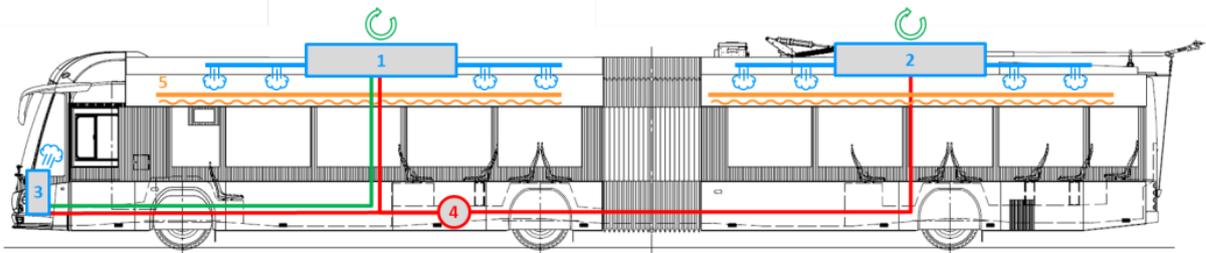
Was	Wert	Bemerkung
Marke und Typ	HESS BGT-N2D	Projektname: SwissTrolley plus
Art des Fahrzeugs	Gelenktrolleybus	
Sitzplätze	42 + Fahrer	
Maximale Personenzahl	163 + Fahrer	
Grundkonstruktion	Aluminium System "CO-BOLT"	
Kapazität des Akku	60 kWh	
Elektroantrieb	2 x 160 kW	Synchronmotor, Permanentmagnet
Türbreiten	Führer 0.9m Vorne 1.32m Mitte 1.32m Hinten 1.32m	Türhöhe 1.95 m Die Türen sind als Schwenkschiebetüren ausgeführt

Aussenmasse	Länge	18.741m	
	Breite	2.55m	
	Höhe	3.4m	
Gewichte	Leergewicht	18'850kg	
	Gesamtgewicht	30'000kg	

Tabelle 1 Technische Daten des untersuchten Fahrzeug

2.2 Systembeschreibung HLK

Die Klimatisierung des Passagierraums erfolgt über die Systeme Dachklimaanlage, Heizwasser und Infrarotheizung gemäss Abbildung 1.



Luftkonditionierung, Wärmestrahlung, Heizwasser, Kältekreis

Abbildung 1 Systemübersicht SwissTrolley plus

System (Nr)	Funktionen / Technische Daten
Dachklimaanlage (1), (2)	<ul style="list-style-type: none"> - Klimatisierung des Passagierraums (Heizen/Lüften/Kühlen) im Frischluft-/Umluftbetrieb <ul style="list-style-type: none"> o Heizen mittels Wärmeübertragung Heizwasser-Luft o Heizen mittels Wärmeübertragung Kältekreis-Luft (WP-betrieb) o Kühlen mittels Wärmeübertragung Luft-Kältekreis (Kältebetrieb) - Bereitstellung der Kälte für die Fahrerklimateilung (1) - Kühlen des Kühlwassers der Traktionsbatterie mittels Wärmeübertragung Wasser-Kältekreis (2)
	<ul style="list-style-type: none"> - Kälteleistung max. ca. 2x 36kW - Heizleistung Wärmepumpe (WP) max. ca. 2x 15kW - Heizleistung Heizwasser max. ca. 2x 19kW - Energieversorgung: 400VAC, Heizwasser
Fahrerklimateilung (3)	<ul style="list-style-type: none"> - Klimatisierung des Fahrerplatzes (Heizen/Kühlen) sowie Befreiung der Frontscheibe von Beschlag in Frischluft-/ Umluftbetrieb <ul style="list-style-type: none"> o Heizen mittels Wärmeübertragung Heizwasser-Luft o Kühlen mittels Wärmeübertragung Luft-Kältekreis
	<ul style="list-style-type: none"> - Heizleistung max. ca. 22kW (Heizwasser) - Kälteleistung max. ca. 8kW - Energieversorgung: 24VDC, Heizwasser, Kältekreis
Wasserheizgerät (4)	<ul style="list-style-type: none"> - Erwärmung des Heizwassers
	<ul style="list-style-type: none"> - Heizleistung 20-30kW (abhängig vom Ladestand der Antriebsbatterie) - Energieversorgung: 600..800VDC
Infrarotheizung (5)	<ul style="list-style-type: none"> - Beheizung des Fahrgastraums mittels Wärmestrahlung
	<ul style="list-style-type: none"> - Heizleistung: ca. 16 Platten mit jeweils ca. 170W - Betriebstemperatur max. ca. 70°C - Abmessungen je Platte ca. 1000x250mm - Energieversorgung: 24VDC

2.2.1 Bedienung / Zusammenspiel der Systeme

Die Klimatisierung am Fahrerplatz kann durch den Fahrer individuell eingestellt werden (Temperatur, Gebläse, Frischluft/Umluft, Luftverteilung). Für den Passagierraum werden beim vorliegenden Fahrzeug Wärmepumpen-Klimaanlagen eingesetzt. Diese können Ihren Kältekreis so umschalten, dass sich die Funktion der beiden Elemente Verflüssiger und Verdampfer ändert:

	Kältebetrieb	Wärmepumpenbetrieb
Durch Aussenluft durchströmter Wärmeübertrager (klassisch Verflüssiger)	Kondensation (warm)	Verdampfung (kalt)
Durch Innenluft durchströmter Wärmeübertrager (klassisch Verdampfer)	Verdampfung (kalt)	Kondensation (warm)

Der Passagierraum wird automatisch und in Abhängigkeit der Aussentemperatur geregelt unter Berücksichtigung der Einsatzgrenzen gemäss Abbildung 2. Hierbei wird den Dachklimaanlagen vorgegeben, auf welche Temperatur sie regeln und in welcher Betriebsart sie arbeiten soll (heizen, lüften, kühlen oder Automatik). Die Klimaanlage steuert entsprechend eigenständig den Anteil der eingetragenen Frischluft, den Durchfluss des Heizwassers, die Gebläseleistungen, den Betrieb des Kompressors (ein/aus) sowie die Ventile zur Umschaltung zwischen Kälte- und Wärmepumpenbetrieb. Zudem versorgt die vordere Dachklimaanlage die Fahrerklimatisierung mit Kältemittel und die hintere enthält ein Modul zur Kühlung des Kühlwassers für die Batterie.

Im Wärmepumpenbetrieb entziehen die Dachklimaanlagen der Umgebung und im Fall der hinteren Anlage zudem dem Kühlmittel des Antriebssystems Wärme und überträgt diese an den Innenraum. Der Wärmepumpenbetrieb wird bei Bedarf zur Erhöhung der Heizleistung durch Heizwasser unterstützt. Das Wasserheizgerät und dessen Umwälzpumpe werden entsprechend dem Bedarf der obengenannten Funktionen automatisch aktiviert.

Zusätzlich wird die Heizung des Passagierraums durch in die Decke integrierte Heizelemente ergänzt („Infrarotheizung“). Die damit erzeugte Wärmestrahlung soll direkt oder durch Erwärmung anderer Oberflächen des Fahrzeugs das Wärmeempfinden für die Fahrgäste erhöhen und so eine Absenkung der Lufttemperatur ermöglichen.

Der Sollwert der Raumluft wird mit dem Kunden besprochen und als Raumsollwertkurve in Abhängigkeit der Aussentemperatur in der Steuerungssoftware gespeichert. Das getestete Fahrzeug wurde mit der Sollwertkurve gemäss Abbildung 3 gemessen. Die Umschaltung vom Heizbetrieb in den Lüftungs- und Kühlbetrieb sowie die Regelung der Drehzahl des Verdampferlüfters und die Steuerung der Frisch-/Umluftklappen erfolgt automatisch durch die in den Dachgeräten integrierten Steuergeräte.

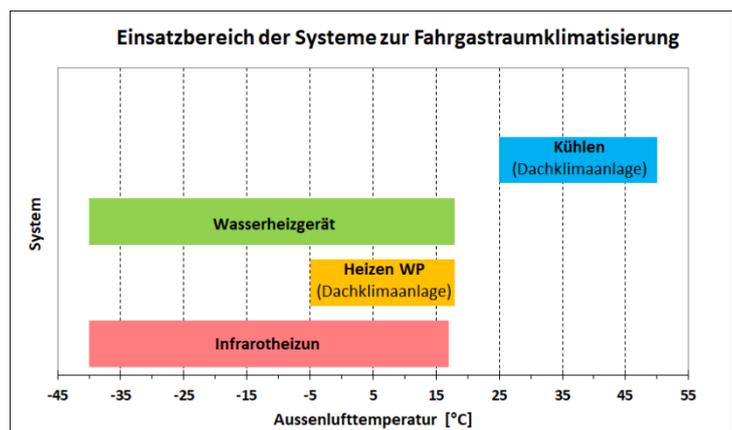


Abbildung 2 Einsatzbereich der Systeme

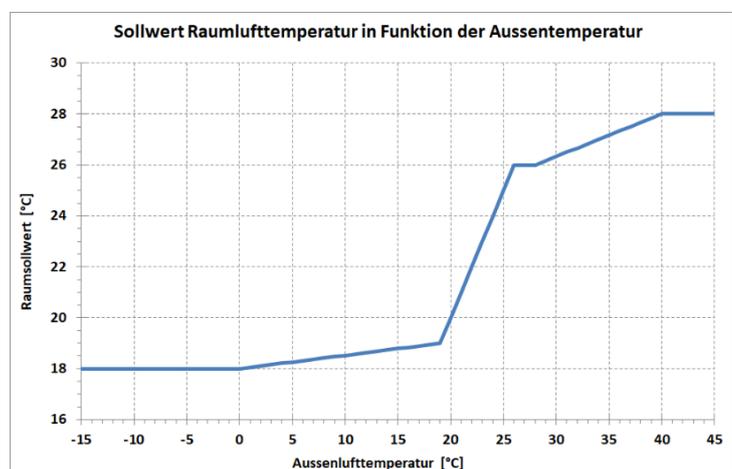


Abbildung 3 Sollwertkurve

2.3 Messung Energiebedarf Türöffnung

Zur Beurteilung des Energiebedarfs durch Türöffnungen muss der Heiz- und Kühlenergiebedarf gemessen werden. Andere Verbraucher wie Umrichter, Luftkompressoren oder das Laden des Akkus dürfen nicht berücksichtigt werden. Deshalb war die Messung der Gesamtenergie am Stromabnehmer nicht geeignet, da diverse andere Verbraucher und der Akku nachgeschaltet sind. Der Akku konnte weder entfernt noch überbrückt werden, da ohne Akku kein normaler Betrieb der HLK sichergestellt werden kann. Deshalb wurden die einzelnen Leistungen aller Verbraucher die zur Heizung und Kühlung benötigt werden gemäss Abbildung 4 gemessen. Aus diesen Messgrößen wurden die Leistungen und Energien der HLK berechnet.

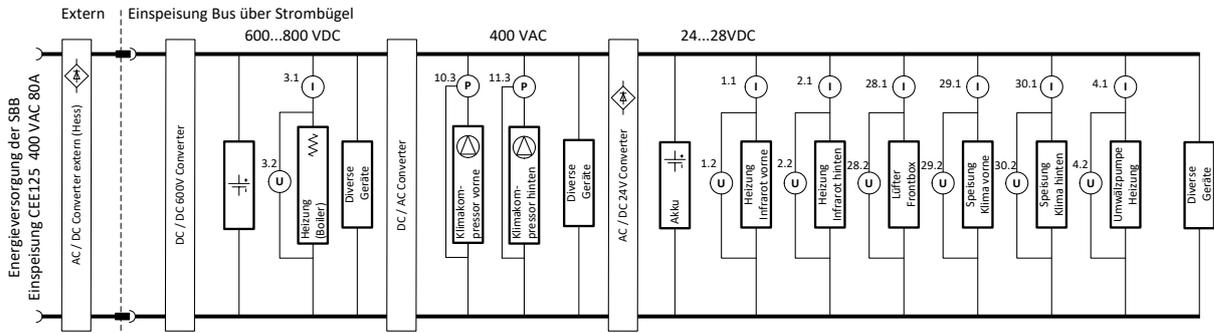


Abbildung 4 Schema Energiemessung

Die Messgeräte wurden nahe der Messstelle im oder ausserhalb des Busses platziert. Alle erforderlichen Kabel wurden durch das leicht geöffnete Seitenfenster des Fahrers in den Bus eingeführt. Die Öffnung wurde mit Klebband abgedichtet, sodass die folgenden Messungen nicht beeinträchtigt wurden.

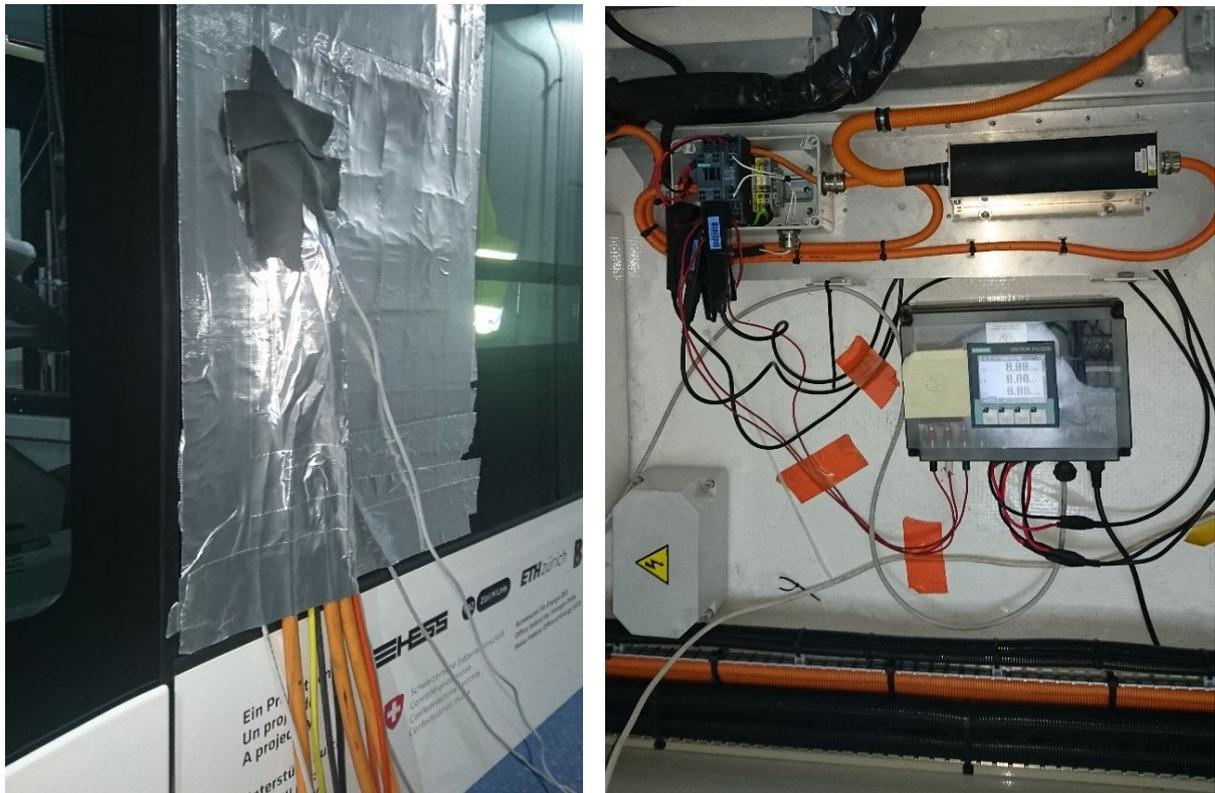


Abbildung 5 links Kabeldurchführung und rechts AC Leistungsmessgerät auf dem Dach am Kompressor

2.4 Türöffnung

Die UITP (Internationaler Verband für öffentliches Verkehrswesen) hat ein modulares Konzept von Verbrauchstests, SORT (Standardised On Road Testcycles), für Busse auf der Strasse entwickelt. Diese real gefahrenen Testzyklen ermöglichen reproduzierbare Verbrauchsmessungen für verschiedene Einsätze der Busse. Dazu wird in Zusammenarbeit mit dem Busbetreiber ein genauer Testablauf erstellt. Da diese Zyklen stark vom Streckenverlauf abhängig sind und die Haltezeiten unrealistisch lange angenommen werden, wurde entschieden, basierend auf den Messungen der Uni Basel und einem Streckenprofil der Verkehrsbetriebe Luzern einen vereinfachten Zyklus für diese Messung zu definieren. Der definierte Zyklus bildet einen durchschnittlichen Tagesfahrbetrieb für Schweizer Städte und Agglomerationen ab. Der angewandte Türöffnungszyklus ist in Abbildung 6 dargestellt und im Anhang detaillierter beschrieben.

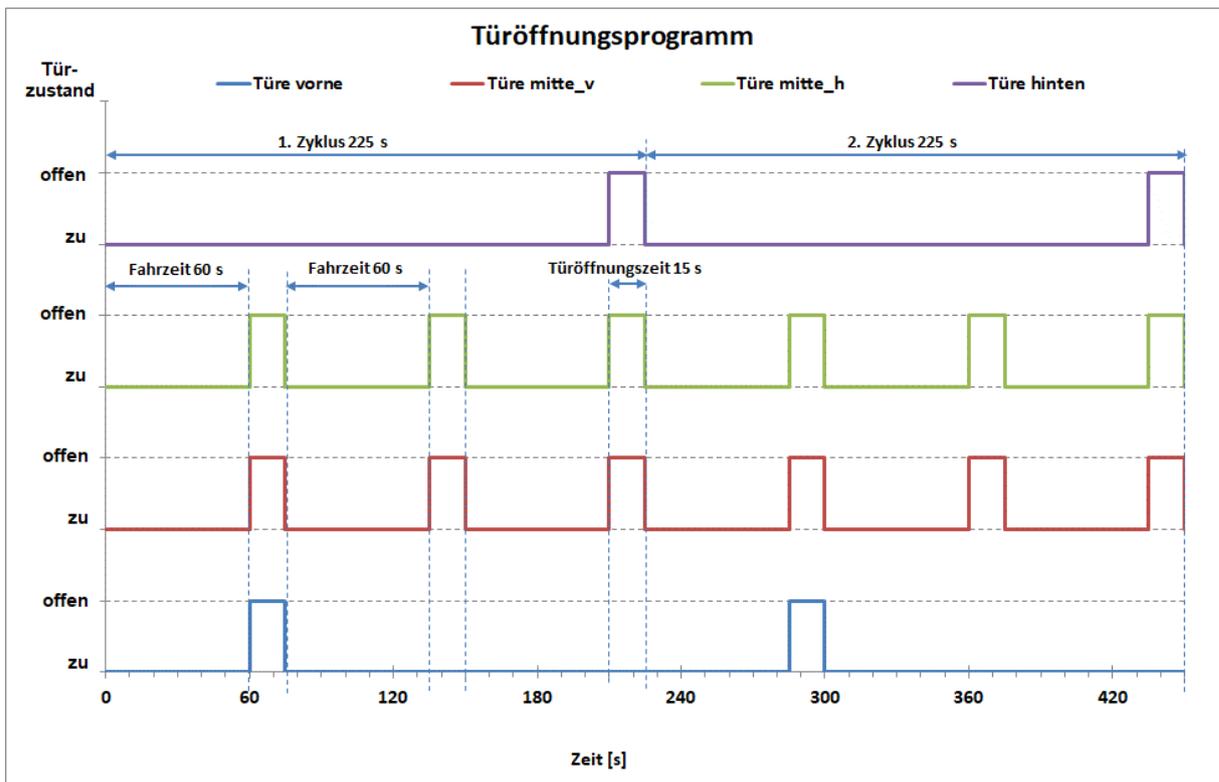


Abbildung 6 Türöffnungsprogramm aller Türen

2.5 Messkonzept Energieverlust Türöffnung

Der Energieverlust durch die Türöffnungen konnte nicht durch die Messung des eintretenden Luftvolumenstromes gemessen werden, da diese Grösse nicht einfach erfasst werden kann. Deshalb wurde die Messung des Energieverlusts in eine Referenzmessung ohne Türöffnung und eine Messung während des Türöffnungsbetriebs gemäss Abbildung 7 aufgeteilt. Im ersten Schritt wurde die Klimakammer auf die gewünschte Temperatur eingestellt. Am Ende des Einschwingens, also wenn die Hallentemperatur und die Heizleistung im Bus konstant waren, wurde eine Referenzmessung der Heizleistung durchgeführt. Im zweiten Schritt wurde bei gleichbleibenden Bedingungen das Türöffnungsprogramm gemäss Abbildung 6 gestartet. Nach dem Einschwingen der Leistung wurde die Heizleistung erneut gemessen. Mit der Differenz aus der Referenzheizleistung ohne Türöffnung und der Heizleistung während der Türöffnung wurde der Heizleistungs-Mehrbedarf für die ausgewählten Temperaturen berechnet. Der Energieverlust durch Türöffnungen ist abhängig von der Differenz der Innenraumlufttemperatur im Bus und der Aussenlufttemperatur (ΔT_{ia}). Um diesen Zusammenhang aufzuzeigen wurden mehrere Messungen mit ΔT_{ia} von 5 Kelvin bis 20 Kelvin durchgeführt. Aus zeitlichen Gründen konnten nur sieben Messpunkte gemessen werden. Die visuelle Betrachtung der Luftströmung bei geöffneten Türen wurde bei der zweiten, vierten und siebten Messung durchgeführt und ist in Kapitel 2.7 beschrieben. Einflüsse durch ein- und aussteigende Passagiere, oder unterschiedliche Wetterverhältnisse konnten nicht berücksichtigt werden.

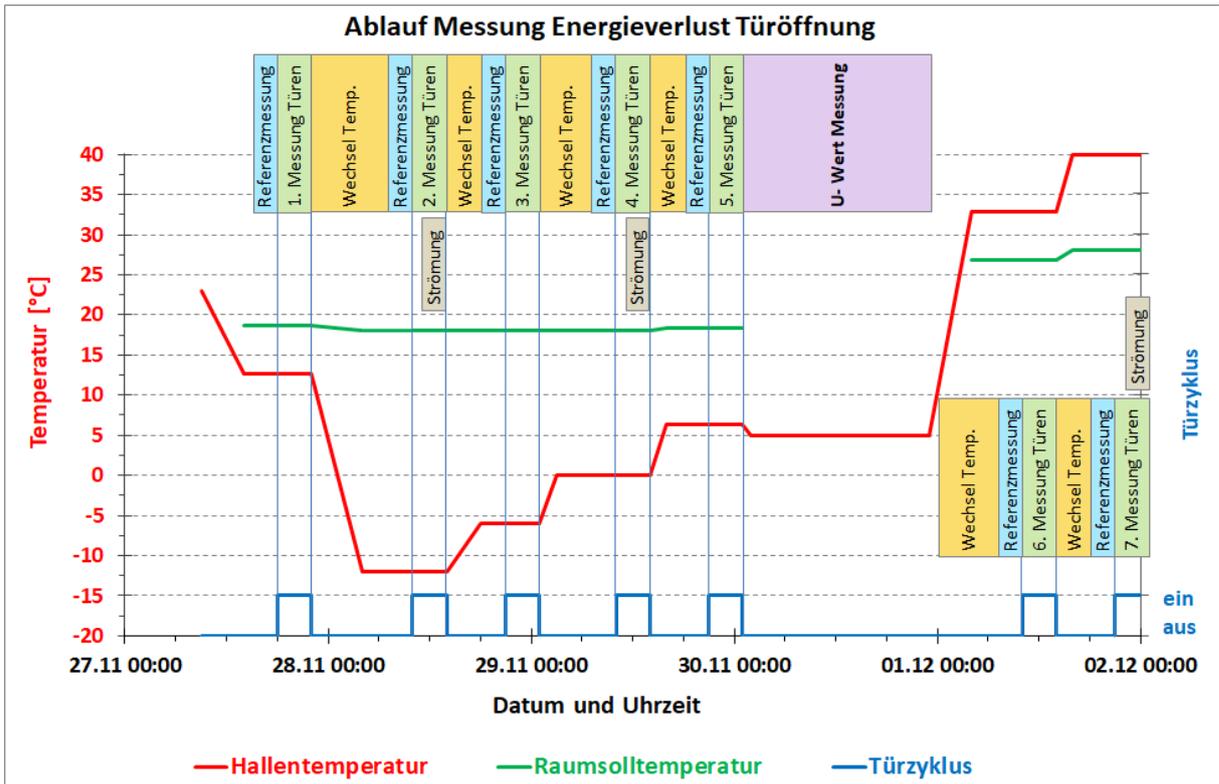


Abbildung 7 Geplantes Messprogramm

2.6 Messeinrichtung U-Wert

Der U-Wert des SwissTrolley plus wurde gemäss Norm SN EN 14750-2 in der Klimakammer bei einer Hallentemperatur von 5 °C, sodass sich eine Temperaturdifferenz zur Innenraumlufttemperatur von ca. 20 K ergibt. Um lange Einschwingzeiten der Hallentemperatur zu vermeiden, wurde die U-Wertmessung am Ende des Heizbetriebs durchgeführt. Während der U-Wertmessung wurden im Bus alle Systeme ausgeschaltet. Die Öffnungen der Aussenluft und Fortluft wurden verschlossen. Der Bus wurde mit regelbaren konvektiven Heizgeräten geheizt. Damit die Temperaturschichtung vertikal klein gehalten werden konnte, wurden kleine Ventilatoren, welche die Luft nach unten blasen, eingesetzt. Die Anordnung der Heizer und Ventilatoren ist in Abbildung 8 im Grundriss und im Bus in Abbildung 9 dargestellt.

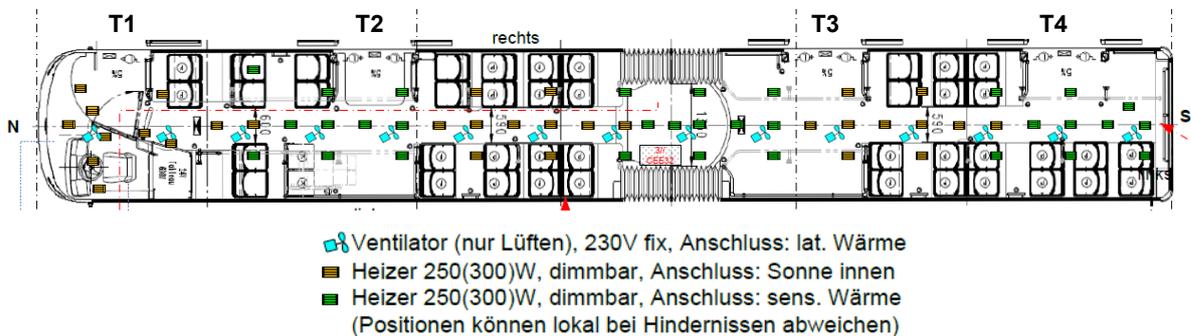


Abbildung 8 Anordnung der Heizer und Ventilatoren zur U-Wertmessung

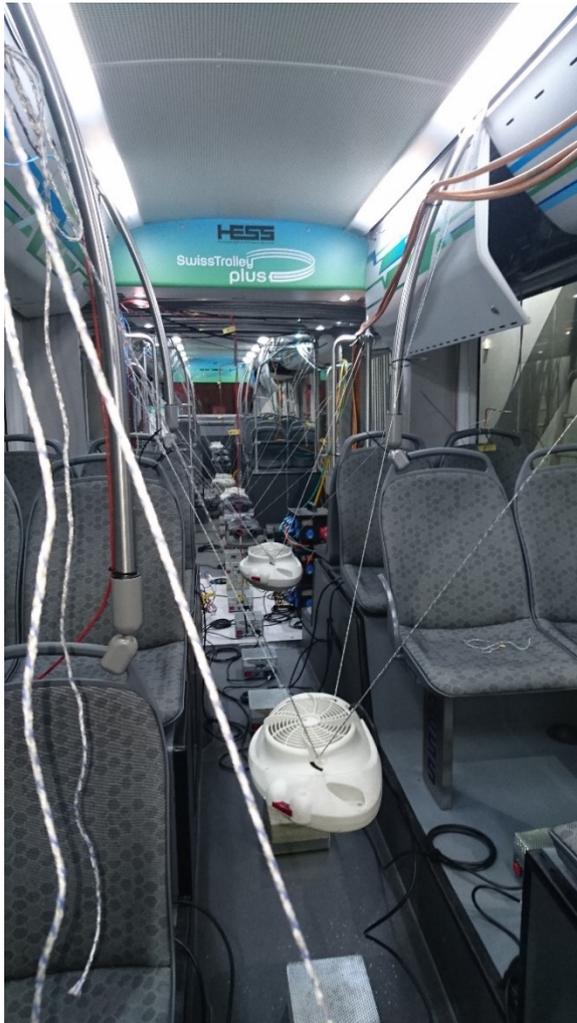


Abbildung 9 links Anordnung der Lüfter, rechts Heizer und Stromverteiler

2.7 Messung Luftströmungen und Temperaturen

Zur Visualisierung der Luftströmung bei offenen Türen wurde an zwei Türen im inneren des Busses im Türbereich Rauch erzeugt, welcher mit Laserlicht beleuchtet wurde. Zur Erfassung der Luftgeschwindigkeit im Türbereich wurden an der zweiten und vierten Tür je fünf Hitzdraht-Anemometer (als violette Pfeile in Abbildung 10 dargestellt) platziert. Die Sonden wurden links ab Bodenkante Bus in den Höhen 0.5m und 1.4m und rechts auf den Höhen 0.1m, 1.1m und 1.7m montiert. Mit den verwendeten Sonden kann die Luftgeschwindigkeit, nicht aber die Richtung gemessen werden. Ein Laser wurde zur Visualisierung der horizontalen und ein weiterer für die vertikale Ebene ausgerichtet. Mithilfe des künstlichen erzeugten Rauchs im Fahrzeug konnten die Luftströmungen im Türbereich qualitativ beobachtet werden. Zusätzlich wurden die Luftströmungen als Video aufgezeichnet.

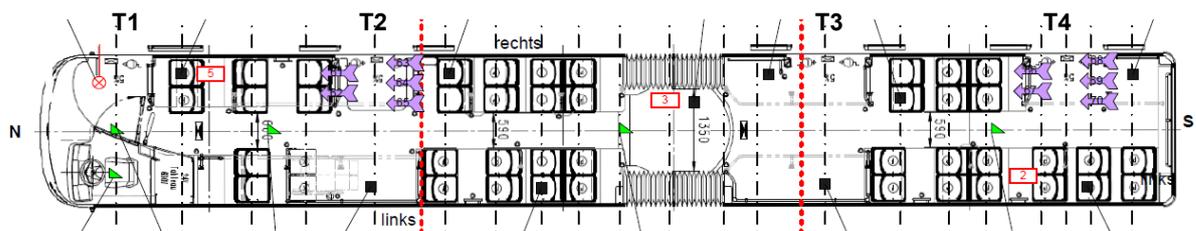


Abbildung 10 Messeinrichtung Luftströmungen



Abbildung 11 links Hitzdrahtsonden an der Türe 2 und rechts Laser

Die Lufttemperaturen im Fahrgastraum wurden auf den Höhen 0,1 m, 1,1 m und 1,7 m, welche oben in der Abbildung 10 als grüne Dreiecke eingezeichnet sind, gemessen. Mit schwarzen Quadraten sind die Temperaturfühler auf der Höhe 1,1 m eingezeichnet. Die Messung der Zulufttemperatur erfolgte mit vier Temperaturfühlern pro Klimagerät (zwei Temperaturfühler pro Seite) welche nach den Heiz- und Kühlregistern vor den Zuluftventilatoren auf dem Dach gemäss Abbildung 12 eingebaut wurden.

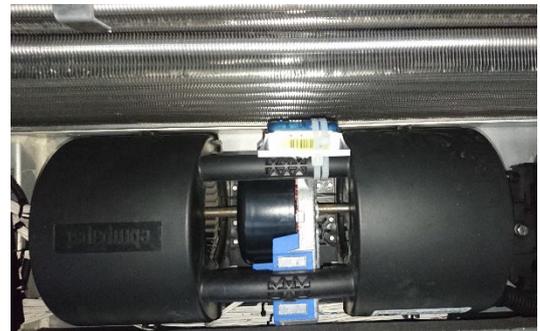
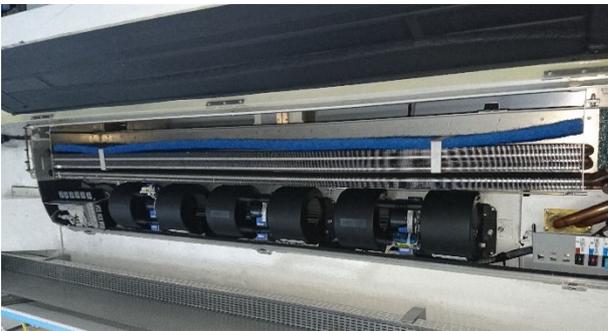


Abbildung 12 Einbauorte der Temperaturfühler in der Zuluft

3. Ergebnisse

3.1 Energiebedarf Türöffnung

In Abbildung 13 ist der Verlauf der Temperaturen während der Messdauer vom 27.11 bis am 1.12.2017 dargestellt. Die Temperaturen und Leistungen sind im Diagramm als 20 Minuten-Mittelwerte dargestellt. Die Leistung entspricht der gesamten elektrischen Leistung zum Heizen oder Kühlen. Die Leistungen sowie die Temperatur waren bei den Referenzmessungen stets eingeschwungen.

Während des Türöffnungszyklus sank die Raumlufttemperatur im Bus jeweils etwas ab und wurde gegenüber der Messung ohne Türzyklus durch die Regelung nicht vollständig ausgeglichen. Die ermittelte Leistungsdifferenz ist somit der Mehrbedarf infolge Türöffnungen unter Berücksichtigung des realen Betriebs an diesem Bus mit dem erwähnten Effekt. Ohne Absinken der Innenlufttemperatur während dem Türöffnungsprogramm wäre der Leistungsbedarf grösser. Bei der Hallentemperatur von -12 °C sank die Lufttemperatur im Bus während den Türöffnungen um 4.3 Kelvin. Dieser Effekt ist bei tiefen Aussentemperaturen ausgeprägter und beim Kühlen kaum vorhanden. Die Verlustleistung während des Türzyklus ohne Absinken der Innenlufttemperatur wurde mit folgender Formel berechnet und wird in diesem Dokument als «Heizleistung korrigiert» bezeichnet

$$P_k = \frac{(P_1 - P_2) \cdot (T_1 - T_2)}{T_3 - T_2}$$

P_k Heizleistung korrigiert

P_1 Leistung während dem Türöffnungszyklus

P_2 Leistung bei geschlossenen Türen

T_1 Lufttemperatur im Bus bei geschlossenen Türen

T_2 Lufttemperatur in der Halle

T_3 Lufttemperatur im Bus bei während dem Türöffnungszyklus

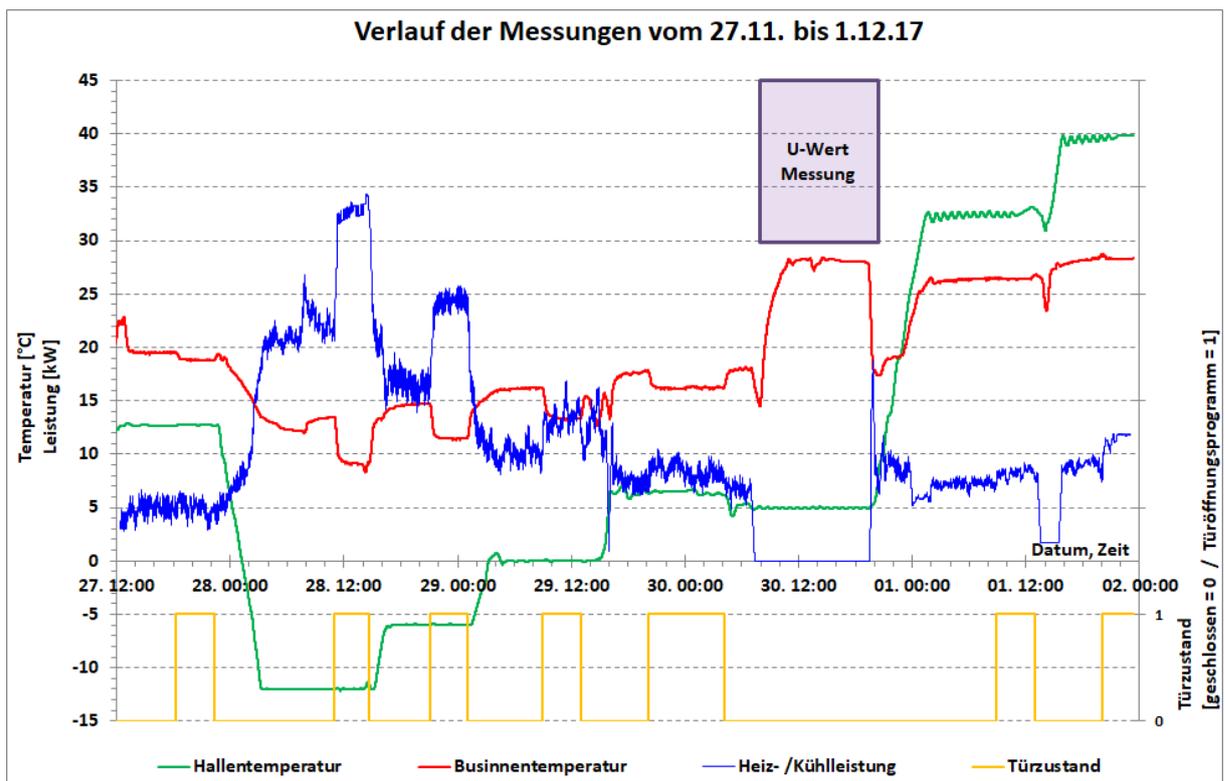


Abbildung 13 Verlauf von Temperaturen, Heiz- Kühlleistung und Türprogramm während der Messung

Die elektrischen Leistungen in Abhängigkeit der Lufttemperaturdifferenz zwischen der Hallentemperatur und der Innentemperatur sind in Abbildung 14 für den Fall Heizen und Kühlen dargestellt. Der Verlauf der Leistung ohne Türzyklus entspricht dem totalen elektrischen Leistungsbedarf für Heizung Lüftung und Kühlung. Im Bereich Kühlen wurden nur zwei Messpunkte gemessen. Der Kurvenverlauf der Gesamtleistung ist nicht linear, weil nicht die thermischen, sondern die elektrischen Leistungen gemessen und dargestellt wurden. Insbesondere wird bei milden Aussentemperaturen mit der taktenden Wärmepumpe geheizt, welche bei tiefen Aussentemperaturen an Effizienz verliert und mit der Infrarotheizung ergänzt wird. In der elektrischen Leistung sind alle Verluste der Heizungs- und Kühlanlage enthalten.

Aus der Differenz der Leistung ohne Türzyklus (also bei konstant geschlossenen Türen) und der Leistung mit Türzyklus (die Türen werden gemäss obigen Türprogramm geöffnet und geschlossen) wurde der Leistungs-Mehrbedarf während des Türöffnungsprogramms berechnet. Dieser Mehrbedarf sowie die korrigierte Heizleistung sind in Abbildung 15 dargestellt. Letztere stellt den Fall dar, bei dem Regelung den hier vorhandenen Abfall der Innentemperatur ausgleichen könnte und wird hier zwecks besserer Übertragbarkeit auf andere Fahrzeuge gezeigt. Bei grösseren Differenzen zwischen der Bus-Innen- und der Aussenlufttemperatur nimmt der Leistungsbedarf durch Türöffnungen stark zu. Theoretisch ist für die thermische Verlustleistung ein Verlauf mit einem Exponenten $3/2$ zu erwarten, da der Volumenstrom mit der Quadratwurzel der Dichtedifferenz (und somit der Temperaturdifferenz) zunimmt, und die thermische Leistung dazu linear zur Temperaturdifferenz. Der gemessene Verlauf weicht davon aus den oben angeführten Gründen (gemessen wird die elektrische Leistung, Temperaturschichtung, etc.) ab.

Da der Mittelwert und die Standardabweichung von dem manuell gewählten Zeitfenster abhängen, wurde das Zeitfenster in 100 Iterationen zufällig variiert. Für jede Iteration wurde ein Mittelwert und eine Standardabweichung berechnet, welche im Folgenden zu einem Wert zusammengefasst wurden. Damit ist die Berechnung unabhängig von der exakten Wahl des Zeitfensters. Die Berechnung der Standardabweichung wurden unter Berücksichtigung der Autokorrelation in den zeitlich hochaufgelösten Messungen der Leistung und der Businnentemperatur berechnet (Standard Plug-in Verfahren mit den ersten $n \log(n)$ -Werten der ACF). Die Standardabweichung für die Differenz zwischen den Mittelwerten konvergiert gegen 0 mit zunehmender Stichprobengrösse (Grenzwertsatz) und ist damit vernachlässigbar klein. In der Berechnung der Standardabweichung konnten Fehler infolge noch nicht optimal eingeschwungener Temperaturen (z.B. bei -12 °C Hallentemperatur) oder das zum Teil ändernden Verhalten der Steuerung (z.B. bei 0 °C Hallentemperatur) nicht berücksichtigt werden. Die detaillierten Messwerte sind im Anhang 6.3 aufgeführt.

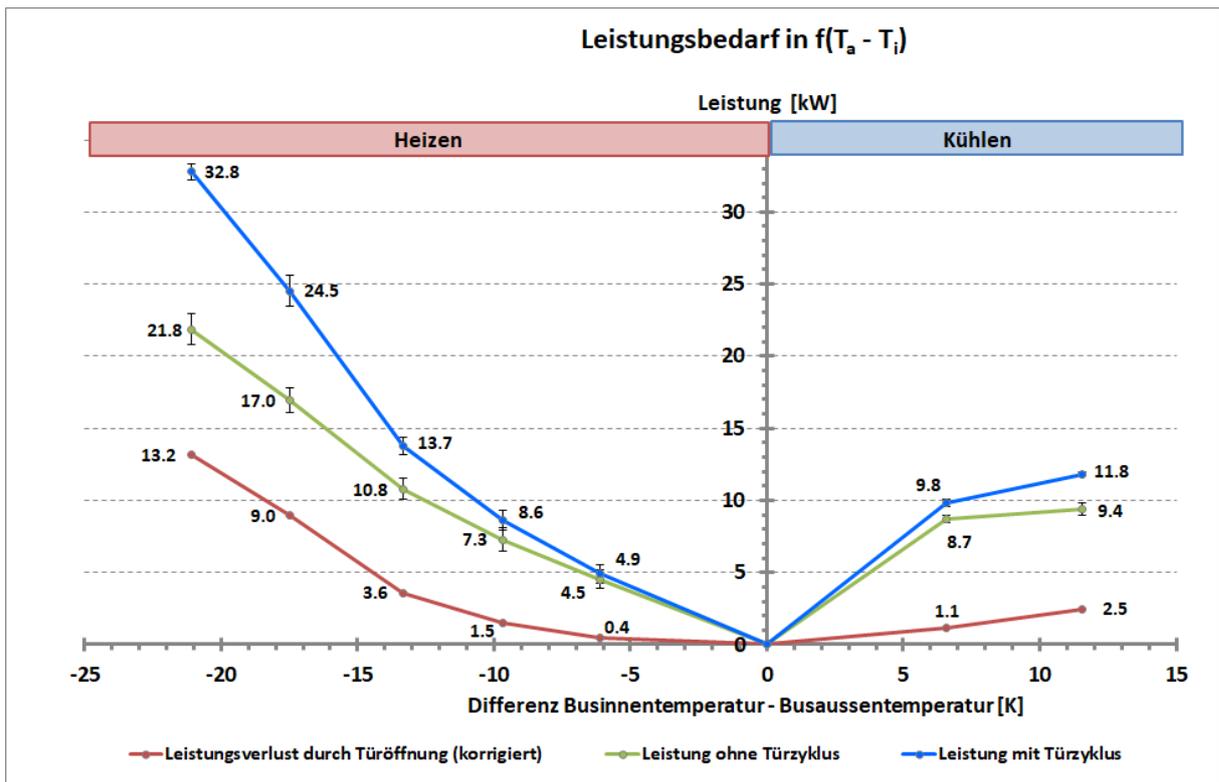


Abbildung 14 Leistungsbedarf in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz

Der relative Verlust der Türöffnung zur Gesamten Heiz- /Kühlleistung ist in Abbildung 16 dargestellt. Der Verlust der Türöffnung ist kein konstanter Anteil der Heiz- oder Kühlleistung, sondern nimmt näherungsweise linear mit der Temperaturdifferenz zu. Diese Linearisierung wurde als gestrichelte Linie für Heizen und Kühlen eingetragen.

Der Einfluss der Luftströmung, welche durch die Umluftventilatoren an der Decke der Klimakammer verursacht wurden, konnte mit einer Messung bei der Hallentemperatur von 6.3 °C am 29.11 23:00 Uhr direkt im Anschluss der Messung Türöffnung überprüft werden. Dazu wurden die Lüfterleistungen in der

Klimakammer, welche bei allen anderen Messung auf 50 % eingestellt waren, auf 15 % reduziert. Die Luftgeschwindigkeiten bei den Eingangstüren wurden 0.5 m vom Bus entfernt mit den Werten 0.26 m/s (15 % Ventilatorleistung) und 0.59 m/s (50 % Ventilatorleistung) gemessen (Siehe Anhang 6.2). Die erforderliche Leistung im Bus stieg bei 15 % Ventilatorleistung von 8.7 kW auf 8.9 kW an. Womit anzunehmen ist, dass der Betrieb der Umluftventilatoren bei dieser Temperatur keinen wesentlichen Einfluss auf den Leistungsbedarf des Busses hat.

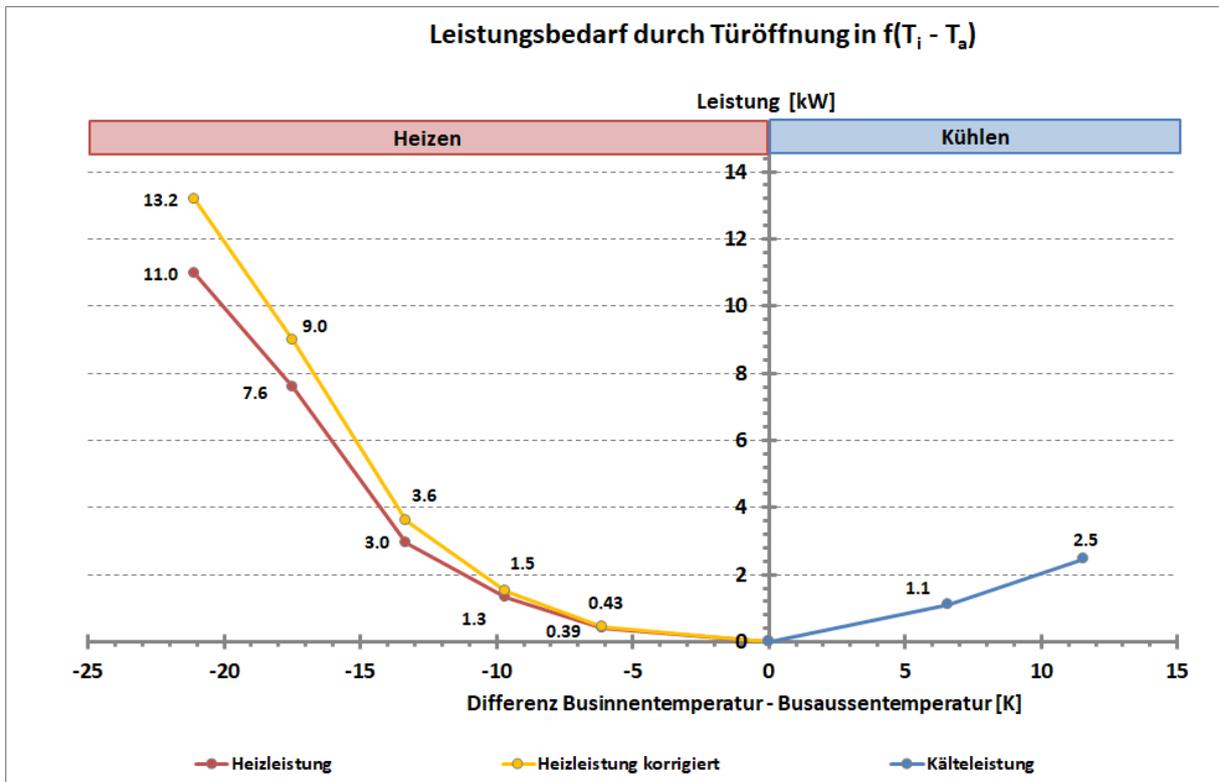


Abbildung 15 Heiz- und Kühlleistungsbedarf durch Türöffnungen

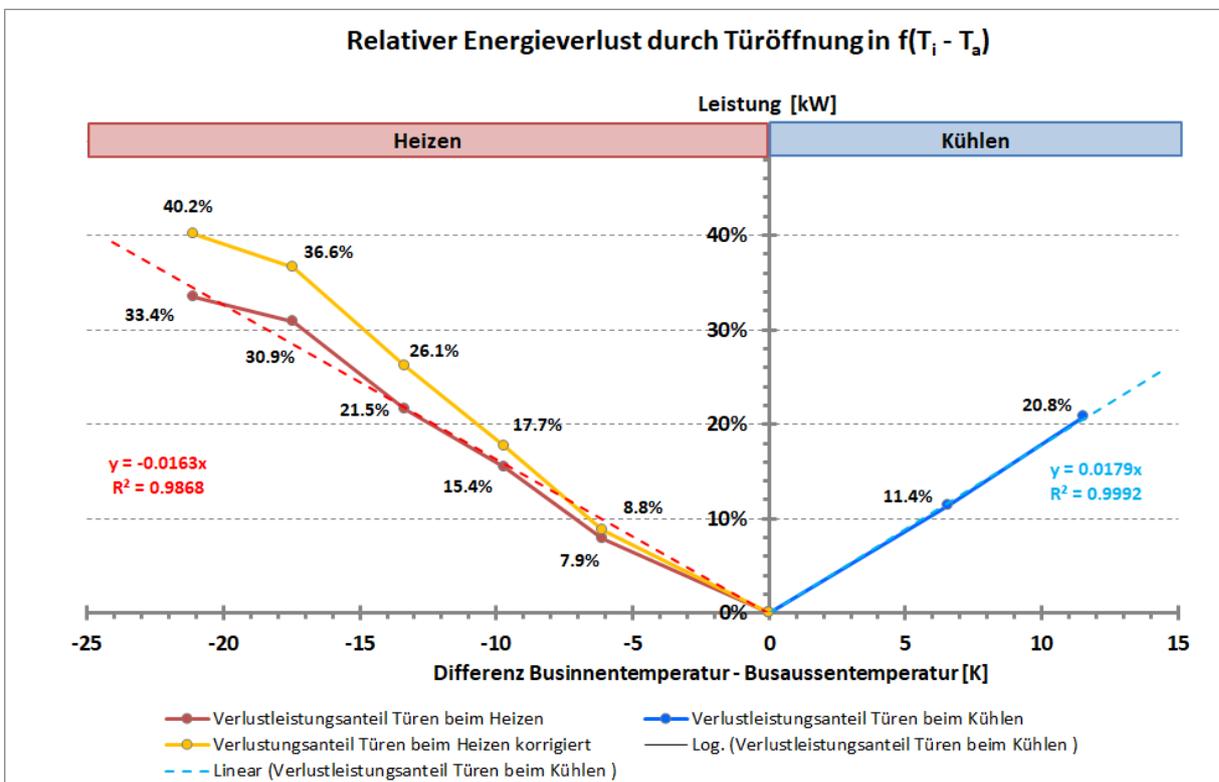


Abbildung 16 Relativer Energieverlust mit Trendlinien

3.2 Berechnung Jahresenergiebedarf für die Türöffnung

Der Energiebedarf zur Deckung des Wärmeaustausches infolge der Türöffnungen ist von Einflüssen wie der Belegung, der Sonneneinstrahlung und dem U-Wert unabhängig. Deshalb konnte mit obigen Ergebnissen die Jahresenergie infolge der Türöffnungen für den Standort Luzern näherungsweise berechnet werden. Als Grundlage wurden die Lufttemperaturen der Klimadaten in Stundenwerten für den Standort Luzern nach SIA 2028 verwendet. In der Annahme, dass die Innenlufttemperatur im Bus der Sollwertkurve folgt, wurde die Sollwertkurve von Abbildung 3 als Innenlufttemperatur verwendet. Der Wärmebedarf Türöffnung wurde gemäss den Messresultaten aus Abbildung 15 die nicht korrigierte Leistung stückweise linear berechnet.

$$E = \sum_{n=1}^{8760} P_n = f(T_i - T_a)_n$$

E Jahresenergie Wärmeaustausch durch Türöffnung

n Jahresstunde

P Wärmeaustausch durch Türöffnung berechnet nach Abbildung 15

T_i Lufttemperatur im Passagierraum gemäss Sollwert

T_a Aussenlufttemperatur gemäss Klimadaten

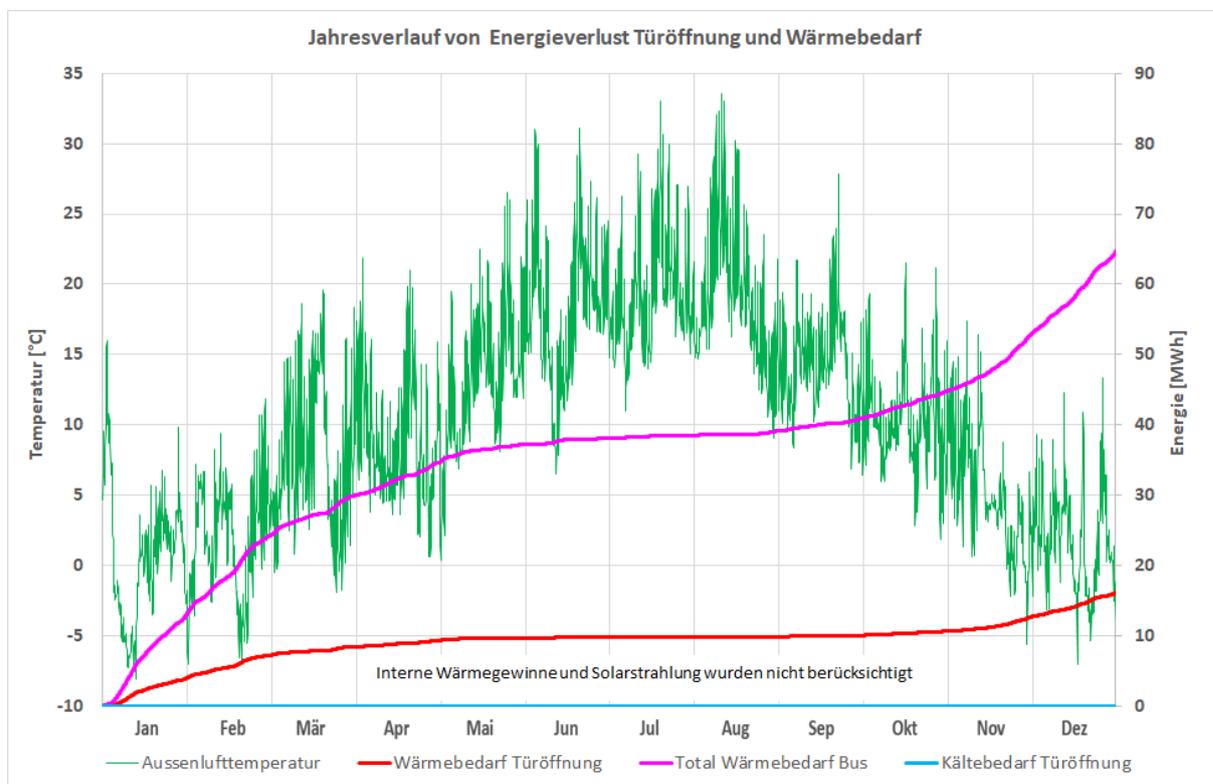


Abbildung 17 Verlauf Jahresenergie, Leistungen und Temperaturen am Standort Luzern

Am Standort Luzern beträgt der Wärmebedarf zur Deckung der Wärmeverluste durch Türöffnungen an den Haltestellen 16.3 MWh/a (Abbildung 17). Ohne Absinken der Lufttemperatur im Bus mit der korrigierten Leistungsberechnung wird 19.4 MWh/a Wärmeenergie für die Türöffnungen benötigt. Dies sind 30 % des gesamten Wärmebedarfs (65 MWh/a). Da bei den Messungen in der Klimakammer Wärmeinträge durch Passagiere und Solarstrahlung nicht berücksichtigt wurden, wird der Wärmebedarf im realen Betrieb bei geschlossenen Türen um diesen Beitrag geringer ausfallen. Der Wärmeaustausch in der Kühlphase ergab 73.7 kWh/a. Der geringe Wärmeverlust bei Kühlen wird durch die geringe Anzahl der Stunden (184 h), an denen die Aussenlufttemperatur im Standardklimafile Luzern über der Raumsollwertkurve stieg, begründet. In den Berechnungen wurde angenommen, dass der Bus mit dem oben definierten Türöffnungsprogramm 6'570 h im Jahr täglich von 6:00 Uhr bis 24:00 Uhr konstant in Betrieb ist.

3.3 Lufttemperaturen und Feuchte im Bus

Während des gesamten Versuchs wurden im Bus die Lufttemperaturen auf den drei Höhen 0.1 m, 1.1 m und 1.7 m ab Fussboden gemessen und als Mittelwerte in Abbildung 18 dargestellt. Je tiefer die Hallentemperatur, desto grösser waren die Temperaturunterschiede zwischen der untersten und der obersten Luftschicht. Auf der Höhe von 0.1 m wurde bei der Hallentemperatur von -12 °C im Bus ca. 1 °C als Mittelwert gemessen. In Die Bodentemperatur sinkt in diesem Fall unter den Gefrierpunkt, was bei Nässe zu Eisbildung mit erhöhtem Risiko zum Ausrutschen der Passagiere führen kann. In Abbildung 19 ist der Ausschnitt bei -12 °C während des Türöffnungszyklus ohne Mittelwertbildung dargestellt. Der Mittelwert der Lufttemperatur im Bus (T_m Bus) aller drei Höhen war ca. 9 °C . Auf der Höhe 0.1 m wurden Temperaturen kleiner als -5 °C und auf der Höhe von 1.7 m 19 °C gemessen. Daraus resultierte eine maximale Lufttemperaturschichtung im Bus von 24 Kelvin bei -12 °C Hallenlufttemperatur. Im Kühlbetrieb wurde nur eine geringe Luftschichtung von ca. 1 Kelvin gemessen.

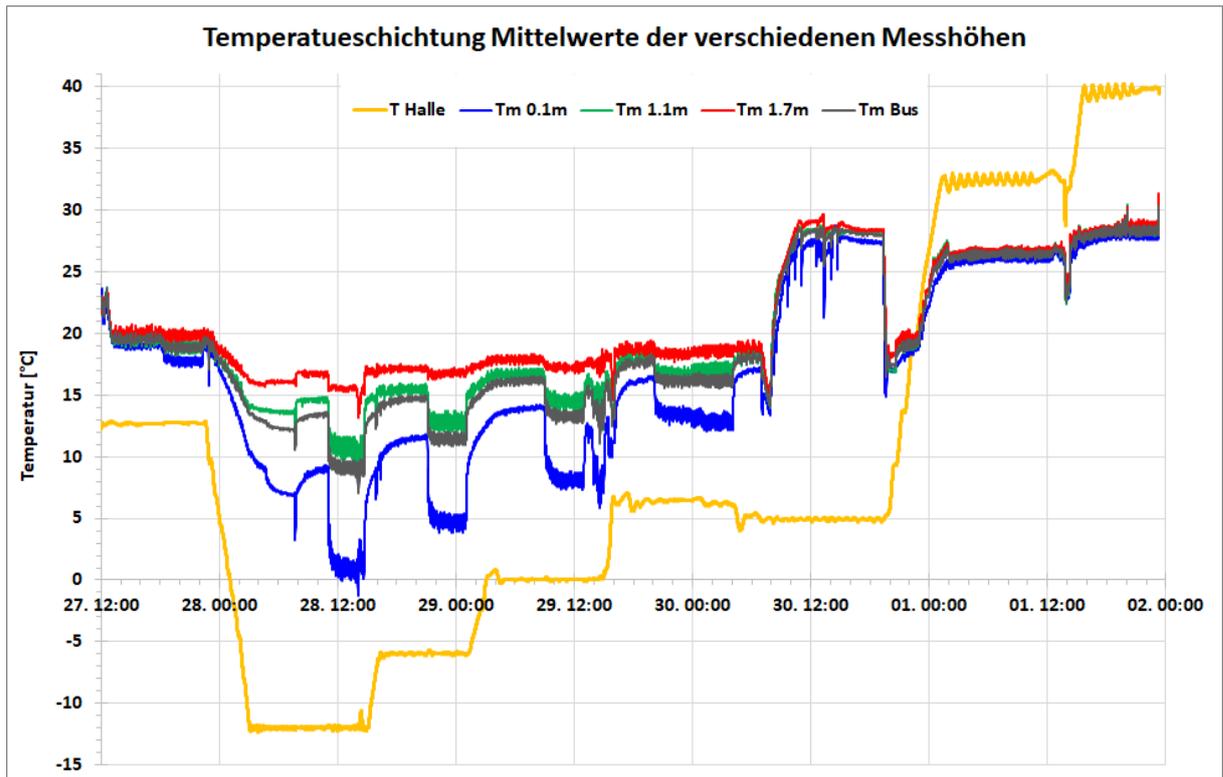


Abbildung 18 Lufttemperaturschichtungen im Bus

In Abbildung 20 ist der Verlauf der relativen Raumluftfeuchte im Bus und in der Halle dargestellt. Im Heizbetrieb sinkt die rel. Feuchte durch das Aufwärmen der Luft im Bus, und im Kühlbetrieb steigt sie, wie erwartet. Die Schwankungen der relativen Feuchte im Kühlbetrieb sind die Folge der aktiven Kühlung (Entfeuchtung durch Kondensation an den kalten Oberflächen) ohne nachträgliche Behandlung der Luft.

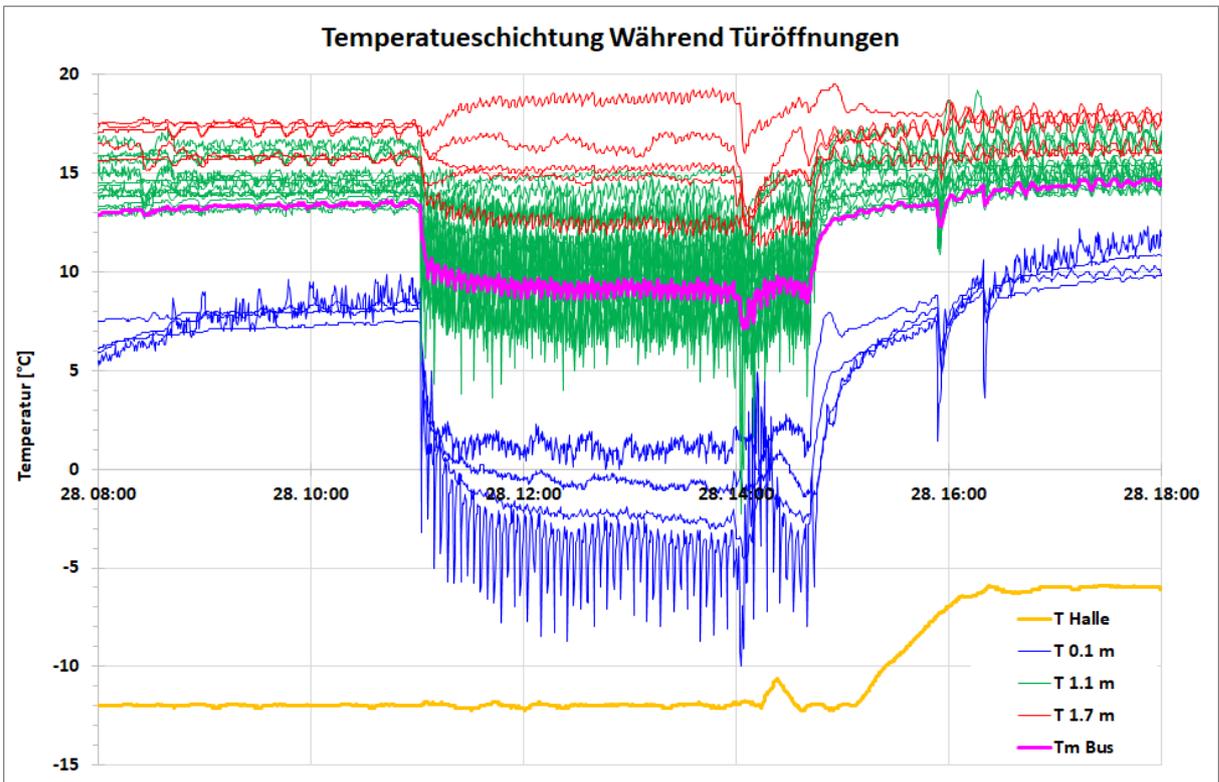


Abbildung 19 Temperaturschichtung bei -12 °C Hallenlufttemperatur

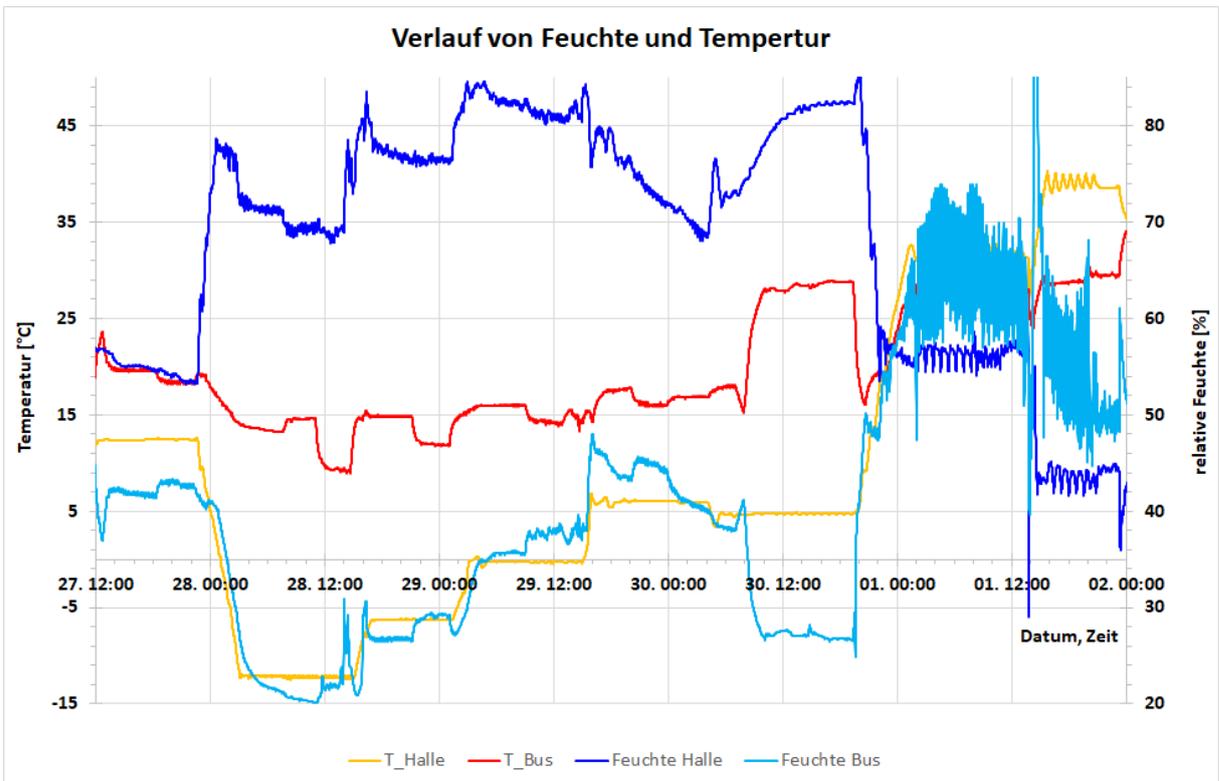


Abbildung 20 Verlauf von Temperatur und Feuchte im Bus

3.4 Zulufttemperaturen und Feuchte in der Zuluft

In Abbildung 21 sind die Zulufttemperaturen der beiden Klimageräte hinten (H) und vorne (V), aufgeteilt für den linken (L) und rechten (R) Zuluftkanal, dargestellt. Die Temperaturen wurden direkt nach dem Heiz- und Kühlregister gemessen. Die höchsten Zulufttemperaturen von 40 °C wurden bei der Hallen-temperatur von -12 °C und 0 °C gemessen. Bei -12 °C wird die Heizleistung nicht mehr getaktet. Die relative Feuchte in der Zuluft ist in Abbildung 22 dargestellt.

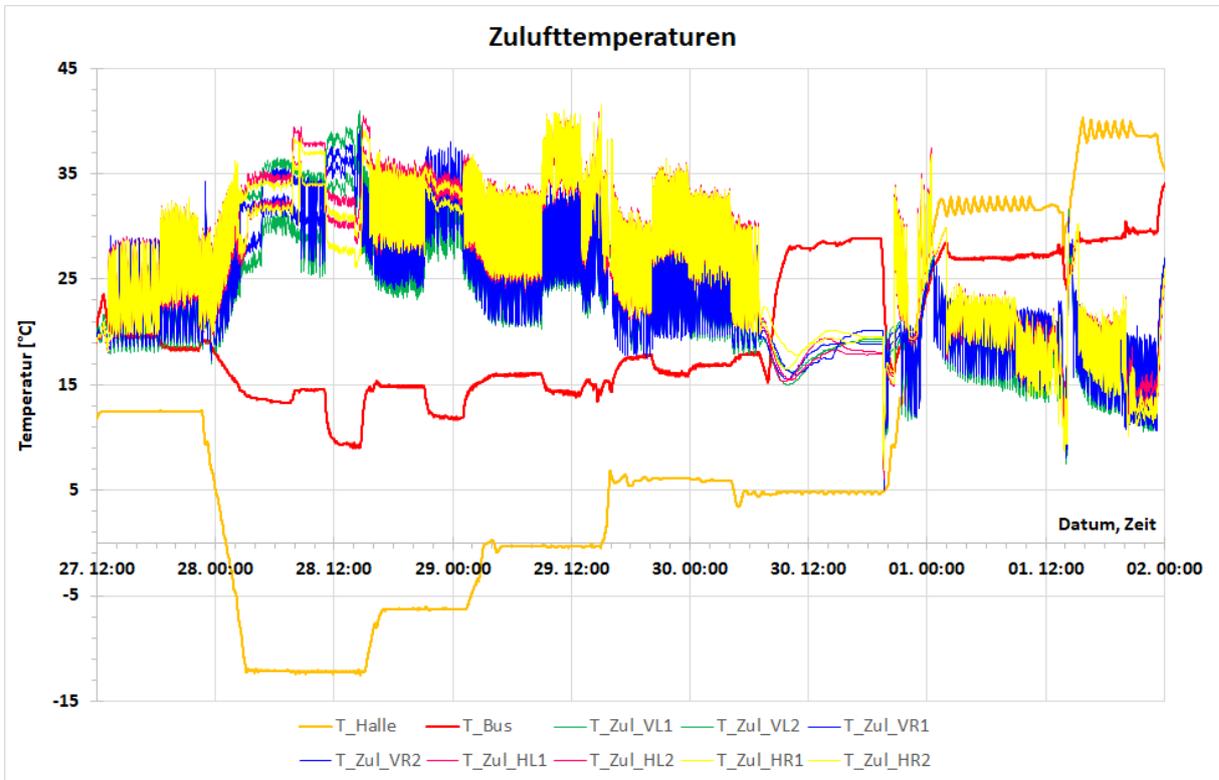


Abbildung 21 Verlauf der Zulufttemperaturen während den Messungen

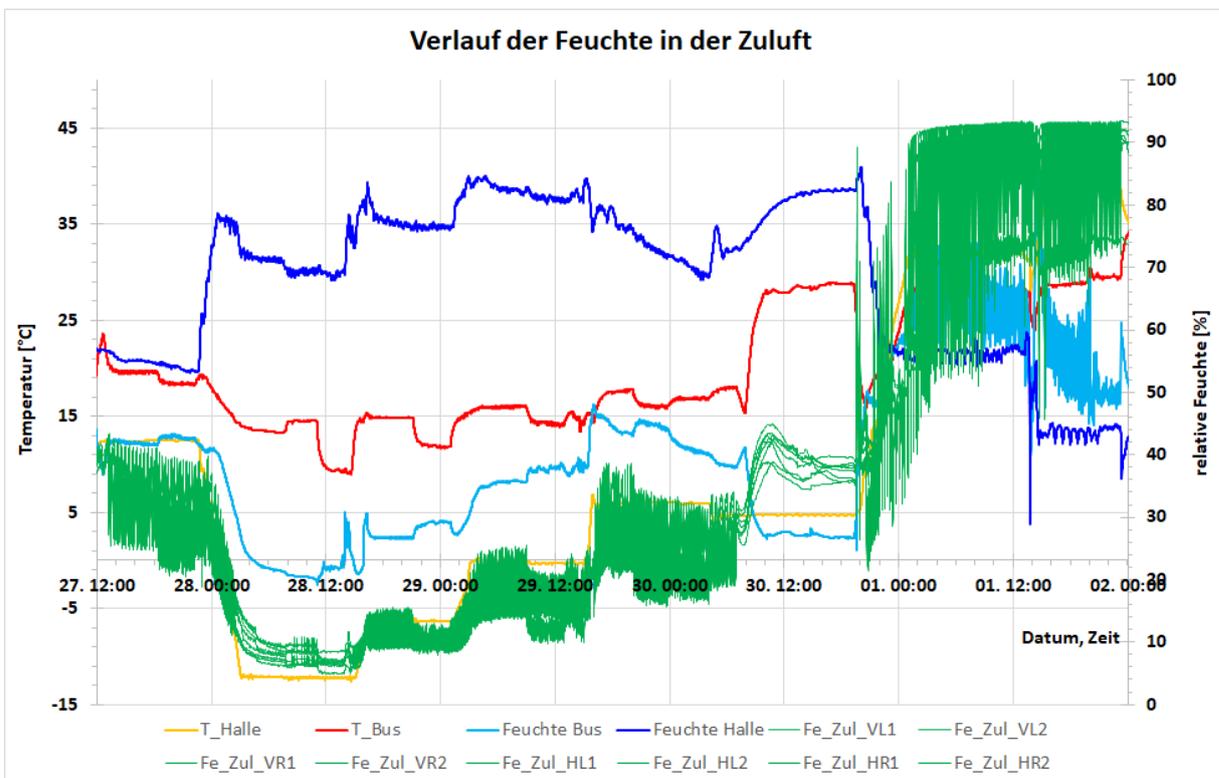


Abbildung 22 Verlauf der relativen Feuchte in der Zuluft

3.5 U-Wert der Fahrzeughülle

Die Messung des U-Werts erfolgte bei der Hallenlufttemperatur von 5 °C im Anschluss an die letzte Messung der Türöffnung im Heizbetrieb bei der Innenlufttemperatur 28.2 °C. Die Bedingungen zur Messung des U-Wertes gemäss Prüfverfahren wurden am 30.11.2017 im Zeitraum von 16:00 bis 19:00 erfüllt. Der U-Wert für den Trolleybus Plus ergab 2.91 +0.09/-0.08 W/(m²*K). Der Messbericht mit weiteren Details ist im Anhang zu finden.

3.6 Luftvolumenströme bei offenen Türen

Die Luftströmungen wurden bei drei Temperaturen nach Abschluss eines Messpunktes beobachtet. Beim ersten Versuch wurde zu viel Rauch verwendet, sodass nach kurzer Zeit die ganze Halle mit Nebel gefüllt war. Im zweiten Versuch bei 0 °C Hallentemperatur konnte beobachtet werden, dass kalte Luft im unteren Türbereich einströmt und warme oben ausströmt. Dieser Prozess des Luftaustausches kehrte sich bei der Hallentemperatur von 32 °C bei der Businnentemperatur von 27 °C um. Dabei strömte die warme Hallenluft im oberen Türbereich in den Bus ein und kühlere im unteren Türbereich nach aussen. Der Strömungsverlauf kann in den beigefügten Videos durch Klicken auf das entsprechende Bild in Abbildung 23 und 24 betrachtet werden.



Abbildung 23 Video Luftströmungen im oberen Türbereich links bei 0 °C und rechts bei 32 °C Hallentemperatur



Abbildung 24 Video Luftströmungen im unteren Türbereich links bei 0 °C und rechts bei 32 °C Hallentemperatur

Die gemessenen Luftgeschwindigkeiten ohne Richtungsangabe, da dies bei den verwendeten Messgeräten nicht messbar war, sind bei den Hallentemperaturen $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ in Abbildung 25 der beiden Türen 2 und 4 dargestellt. Bei der Türe 2 in der Mitte nimmt die Luftgeschwindigkeit mit Ausnahme der untersten Schicht bei 0.1 m mit steigender Hallentemperatur, und damit geringerer Temperaturdifferenz zwischen der der Lufttemperatur im Bus- und der Lufttemperatur ausserhalb des Buses, ab. Die maximale Geschwindigkeit wird dabei auf der Höhe 0.1 m mit 2 m/s bei $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen.

Die Türe 4 hinten wird nur jedes dritte Mal geöffnet. Bei dieser Türe wird die höchste Luftgeschwindigkeit mit 2.8 m/s bei $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf der Höhe 0.5 m gemessen. Die Luftgeschwindigkeiten nehmen wie bei Türe 2 bei abnehmender Temperaturdifferenz zwischen der Businnen- und der Aussentemperatur ab.

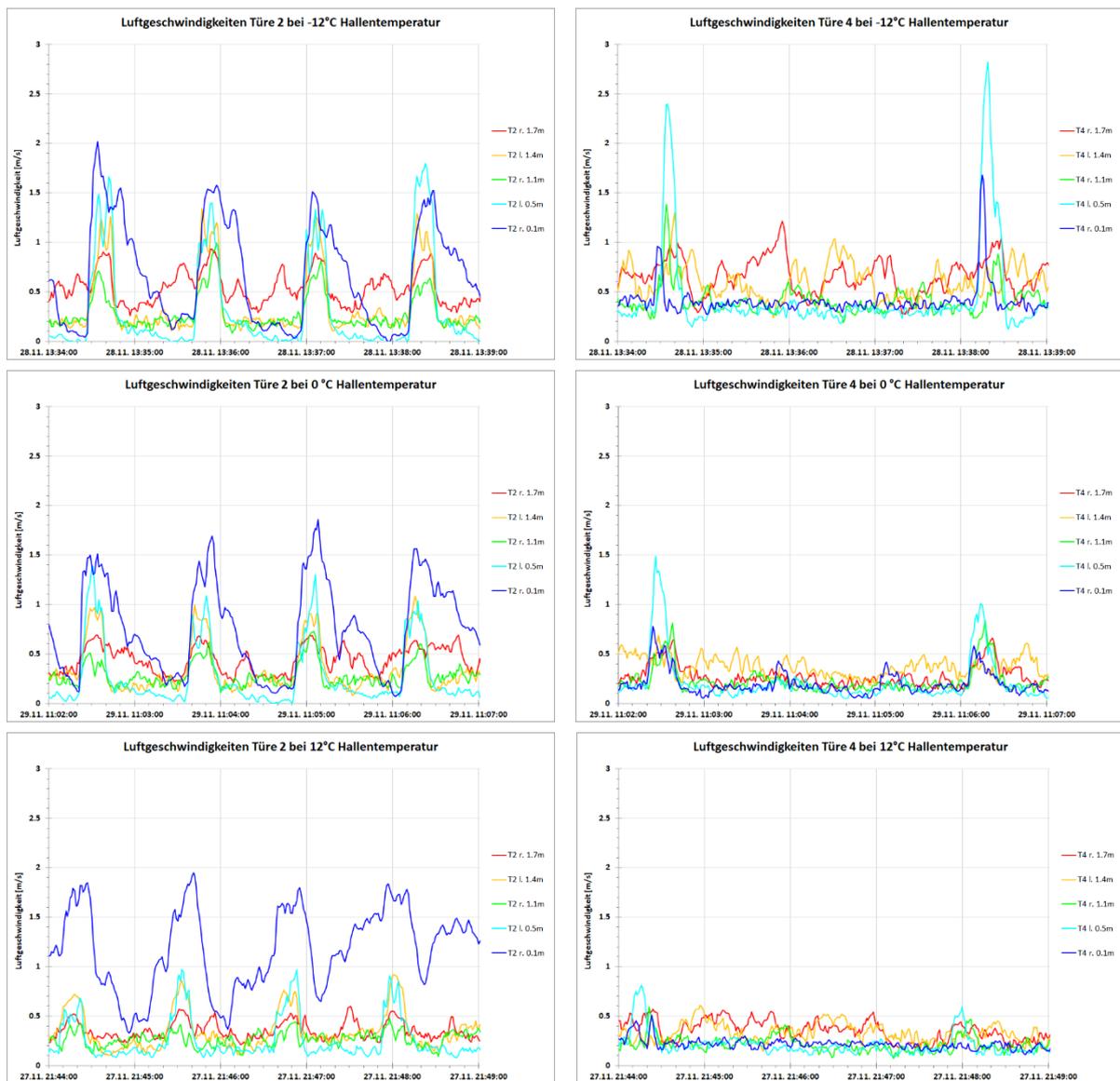


Abbildung 25 Luftgeschwindigkeiten bei den Türen 2 und 4 bei den Hallentemperaturen $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $12\text{ }^{\circ}\text{C}$

4. Diskussion

Die Messungen konnten ohne wesentliche Abweichungen gemäss Planung durchgeführt werden. Die Türöffnungsdauer war etwas länger als geplant, denn das Steuersignal zur Türöffnung wurde durch die Steuerung im Bus ca. 2 Sekunden verzögert. Ein einzelner Türöffnungszyklus dauerte dadurch ca. 17 Sekunden, also 2 s mehr als geplant, von Beginn der Öffnung bis die Türen wieder geschlossen waren.

Die Verluste nehmen erwartungsgemäss mit steigender Lufttemperaturdifferenz zwischen innen und aussen zu. Die Zunahme ist nicht linear, sondern steigt bei grösserer Temperaturdifferenz stärker an.

Zur Messung des Leistungsbedarfs infolge der Türöffnungen wurde die Differenz vor Beginn des Türöffnungszyklus und am Ende des Türöffnungszyklus berechnet. Die Innenlufttemperatur sank vor allem bei grossen Temperaturdifferenzen des Türöffnungszyklus ab, weil der Raumsollwertregler diese Temperaturänderung nicht ausgeregelte. Deshalb wurde der Leistungsbedarf bei Türöffnungen entsprechend der Temperaturabsenkung korrigiert in der Annahme, dass die Heizenergie sich in diesem Bereich linear verhält. Theoretisch wäre eine Zunahme mit Exponent $3/2$ zu erwarten.

Bei den Messungen konnten einige Einflussfaktoren nicht genauer untersucht werden. Der Türöffnungszyklus hat einen sehr grossen Einfluss auf den Verlust. Die Berechnungen beruhen auf einem konstanten mittleren Türöffnungszyklus, welcher den Mittelwert über einen Tag darstellt. Je nach Fahrstrecke und Passagieraufkommen können Abweichungen entstehen. Der Einfluss unterschiedlicher Türöffnungszeiten konnte nicht untersucht werden. Geringfügige Änderungen der Türöffnungszeiten können vermutlich linear berücksichtigt werden. Auf andere Fahrzeuge wie zum Beispiel Schienenfahrzeuge oder Tram können die Resultate nicht direkt übertragen werden. Diese Fahrzeuge haben andere Türöffnungsflächen, unterschiedliche Fahrpläne und dementsprechend andere Türöffnungszeiten.

Der Einfluss durch ein- und aussteigende Personen, welche die Luftmassen zusätzlich bewegen, ist nicht bekannt. Dazu müsste eine eigenständige Testeinrichtung mit automatisch zu bewegendem Dummys erstellt werden. Mit einer solchen Testeinrichtung wäre die Untersuchung bei unterschiedlich belegtem Bus ebenfalls möglich, denn es ist anzunehmen, dass die Luftströmungen in einem voll belegten Bus ein anders Verhalten zeigen als in einem nicht belegten Bus.

Die Strömung wurde mithilfe von Rauch und Laserlicht visuell an einigen Punkten bei kleinen Luftströmungen ausserhalb des Busses beobachtet. Die Windgeschwindigkeit und deren Richtung wird die Luftströmungen im Bus bei geöffneten Türen an den Haltestellen verändern. In unserer Testumgebung war eine genauere Betrachtung der Windeinflüsse nicht möglich. Diese Einflüsse könnten durch CFD-Simulationen besser untersucht werden.

Mit dieser Messung kann der Leistungsanteil bei Türöffnung gemessen werden. Wird die Leistung bei gegebener Lufttemperaturdifferenz zwischen innen und aussen über eine Periode integriert, kann der Energiebedarf infolge der Türöffnung für das obige Türöffnungsprogramm mit anderen Klimadaten berechnet werden.

5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Messungen zeigten, dass durch den Wärmeaustausch bei offenen Türen bei tiefen Aussentemperaturen bis zu 40 % der Heizenergie benötigt wird. Die Berechnung des erforderlichen Energiebedarfs infolge Türöffnung in einem Jahr für den Standort Luzern ergab, dass die Verluste durch Türöffnungen im Winter einen erheblichen Anteil der Heizenergie ausmachen. Im Sommer ist der Verlust deutlich kleiner, weil grosse Temperaturunterschiede zwischen der Lufttemperatur im Bus und der Aussenluft weniger häufig vorkommen als in den Wintermonaten.

Es sollten Optimierungen gesucht werden um die Verluste durch Türöffnungen in Linienbussen zu reduzieren. Eine nicht vollständige Auswahl und ohne Überprüfung von deren Umsetzung und Nutzen ist in der folgenden Liste aufgeführt:

- Kürzere Öffnungs- und Schliesszeiten durch schnellere Türantriebe
- Türen nach dem Einsteigen des letzten Passagiers schneller schliessen
- Weniger Türen bei geringerem Passagieraufkommen öffnen. So könnte z. B. mit entsprechender Benutzerführung nur eine oder jede zweite Türe freigegeben werden.
- Luftvorhang bei den Türen (ob damit Einsparungen möglich sind, muss überprüft werden)
- Luftvolumenstrom der Lüftungsanlage während der Türöffnung vergrössern oder verkleinern damit der einströmende Luftvolumenstrom kleiner wird.
- Türvorhänge
- Drehtüren

In einem ersten Schritt sollten diese Vorschläge genauer bezüglich deren Nutzen und Umsetzbarkeit überprüft werden, und im zweiten Schritte die beste Massnahme an einem Demonstrationsfahrzeug überprüft werden.

Auf andere Fahrzeuge wie Trams oder Züge sind die Resultate nicht direkt übertragbar. Deshalb sollten auch andere Fahrzeugklassen, bei denen die Fahrzeit zwischen den Haltestellen klein ist, genauer untersucht werden. Dies kann, basierend auf den Daten dieser Messung, mithilfe von Simulationen erfolgen. Der Einfluss der Öffnungsfläche oder der Öffnungsdauer kann in einer Simulation schneller und kostengünstiger untersucht werden als mit Messungen in der Klimakammer. Mit CFD-Simulationen könnte auch der Einfluss von ein- und aussteigenden Personen untersucht werden.

Der Anteil des Energieverlusts in Bezug auf die Gesamtenergie kann mit Klimadaten ohne Berücksichtigung von Wärmeeinträgen berechnet werden. Zur genaueren Berechnungen Berechnung der Gesamten Wärmeenergie ist der gesamte Energiefluss zu betrachten. Dieser Energiefluss mit Berücksichtigung der verschiedenen Heiz- und Kühlsysteme sollte, um weitere Details des SwissTrolley plus besser zu kennen, mithilfe der thermischen Simulation erstellt werden. Mit einem kalibrierten Simulationsmodell nach den vorliegenden Messdaten sind Einflüsse wie Fahrzeughülle, Luftmengen, unterschiedliche Türöffnungen oder den einen anderen Standort einfach zu berechnen.

6. Anhang

6.1 Türöffnungszyklus

Die UITP (Internationaler Verband für öffentliches Verkehrswesen) hat ein modulares Konzept zur Ermittlung von Verbrauchstest SORT (Standardised On Road Testcycles) für Busse auf der Strasse entwickelt. Diese real gefahrenen Testzyklen ermöglichen reproduzierbare Verbrauchsmessungen für verschiedene Einsätze der Busse. Dazu wird in Zusammenarbeit mit dem Busbetreiber ein genauer Testablauf erstellt. Der Testablauf nach SORT wird auf das Gelände, der mittleren Geschwindigkeit und den Stopps durch Ampeln und Haltestellen anwenderspezifisch erstellt mit dem Ziel einen im Fahrbetrieb realistischen Gesamtenergieverbrauch für das Fahrzeug zu erhalten. In diesen SORT-Zyklen sind zu wenig Informationen bezüglich der Anzahl zu öffnenden, unterschiedliches Passagieraufkommen und Türöffnungszeiten enthalten. Deshalb wurde entschieden, basierend auf den Busfahrplänen der beiden Verkehrsbetriebe Luzern (VBL) und Lausanne (tl) einen einfachen Zyklus für diese Messungen zu definieren. Als Grundlage diente der Fahrplan der VBL Buslinie 3 Würzenbach - Littau Tschuopis nach Tabelle 2. Danach steht der Bus im Durchschnitt 17.7 Sekunden an einer Haltestelle. Bei einem Halt werden in Abhängigkeit des Passagieraufkommens die erforderlichen Türen bedarfsgerecht geöffnet. Die Anzahl der einzelnen Türöffnungen, wurde aus den Messdaten der Uni Basel am Trolleybus in Lausanne abgeleitet. Mit diesen Informationen wurde der Türöffnungszyklus gemäss Abbildung 26 definiert. Ein voller Türöffnungszyklus betrug 225 s. Darin werden die beiden mittleren Türen alle 60 s für 15 s geöffnet und die vorderste sowie die hinterste Tür nur jedes dritte Mal geöffnet. Während der Energiemessung der Türöffnung wird dieser Zyklus dauernd wiederholt. Dieser Zyklus wurde als Mittelwert erstellt, um ein Tageszyklus möglichst realitätsnah abzubilden. Je nach Einsatzgebiet und Fahrstrecke sind Abweichungen zu erwarten, welche den Wärmeverlust durch Türöffnungen verändern können.

Was	Verkehrszeit			Durchschnitt
	06:00 - 08:00 15:30 - 18:30	08:00 - 15:30 18:30 - 20:00	20:00 - 06:00	
Anzahl Haltestellen	26	26	26	26
Fahrzeit zwischen Haltestellen [s]	58	52	48	52.7
Haltezeit an Haltestellen [s]	22	17	14	17.7

Tabelle 2 Übersicht von Haltestellen und Fahrzeiten in Abhängigkeit der Verkehrszeit

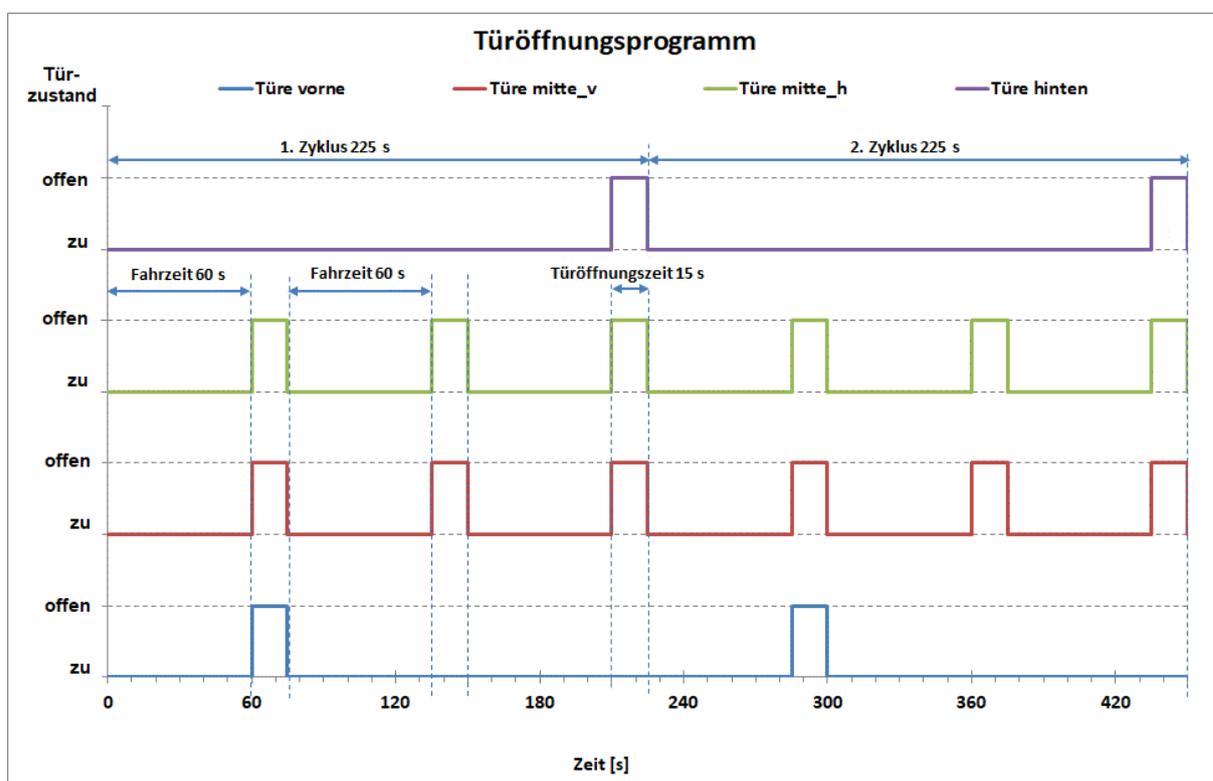


Abbildung 26 Angewandter Türöffnungszyklus

6.2 Luftgeschwindigkeiten in der Klimakammer

Mit einem Handanemeter wurden die folgenden Luftgeschwindigkeiten in einem Abstand von ca. 0,5 m zum Bus auf drei verschiedenen Höhen gemessen. Die Ventilatoren der Klimakammer wurden dabei auf 15 % für die erste Messung und auf 50 % für die zweiten Messungen eingestellt. Die Messungen der Türöffnungsverluste wurden mit 50 % Ventilatorleistung durchgeführt.

Ventilator- Leistung	Höhe	Türe 1 vorne			Türe 2			Türe 3			Türe 4			Türe 1..4
		min	max	Mittel	min	max	Mittel	min	max	Mittel	min	max	Mittel	Mittel
15%	0.5	0.25	0.3	0.28	0.25	0.3	0.28	0.24	0.24	0.24	0.23	0.23	0.23	
	1.5	0.3	0.3	0.30	0.3	0.42	0.36	0.2	0.2	0.2	0.24	0.29	0.27	
	2	0.25	0.25	0.25	0.25	0.3	0.28	0.24	0.24	0.24	0.25	0.25	0.25	
		Mittelwert			0.28			0.30			0.23			0.25
50%	0.5	0.5	0.5	0.50	0.8	1	0.90	0.4	0.4...0.6	0.4	0.4	0.7	0.55	
	1.5	0.7	0.9	0.80	0.5	0.8	0.65	0.4	0.4...0.7	0.4	0.4	0.8	0.60	
	2	0.6	0.7	0.65	0.5	0.7	0.60	0.5	0.5...0.6	0.5	0.4	0.6	0.50	
		Mittelwert			0.65			0.72			0.43			0.55
Differenz			0.38			0.41			0.207			0.30		
rel. Diff.			58%			58%			48%			55%	54%	

Tabelle 3 Luftgeschwindigkeiten der Klimakammer bei den Türen bei den Ventilatorleistungen Werte in m/s

6.3 Messwerte Türöffnungsverluste

In der folgenden Tabelle 4 sind alle verwendeten Messwerte gemittelt auf 20 Minuten aufgeführt.

Lufttemperaturen				mittlere Heiz- /Kühlleistung				Verluste durch Türöffnung		
Halle [°C]	Passagierraum		Differenz [K]	Türzyklus aus		Türzyklus ein		Leistung		
	Türzyklus aus [°C]	Türzyklus ein [°C]		Wert [kW]	SD [kW]	Wert [kW]	SD [kW]	unkorrigiert [kW]	korrigiert [kW]	korrigiert [%]
-12.0	13.4	9.1	-21.1	21.84	1.07	32.81	0.56	10.97	13.18	40.2%
-6.0	14.7	11.5	-17.5	16.96	0.86	24.53	1.04	7.57	8.97	36.6%
0	16.2	13.3	-13.3	10.78	0.72	13.74	0.59	2.96	3.59	26.1%
6.5	17.6	16.2	-9.7	7.28	0.78	8.61	0.66	1.33	1.53	17.7%
12.7	19.5	18.8	-6.1	4.53	0.65	4.92	0.63	0.39	0.43	8.8%
33.0	26.4	26.4	6.6	8.71	0.29	9.83	0.24	1.12	1.12	11.4%
39.9	28.3	28.3	11.6	9.37	0.41	11.84	0.13	2.47	2.47	20.9%

Tabelle 4 Messwerte Türöffnungsverluste

6.4 Auszug Versuchsbericht SBB

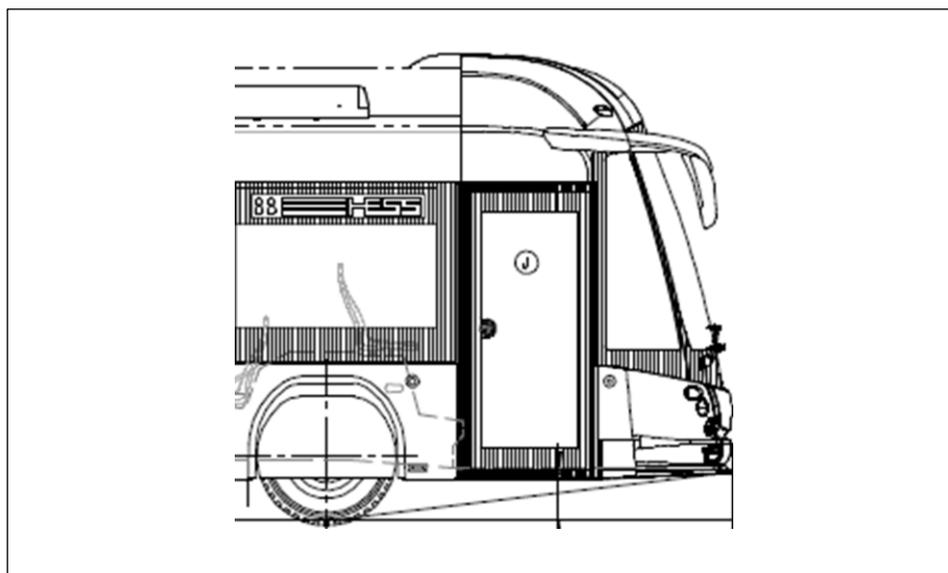
Auszug aus dem Versuchsbericht der akkreditierten Prüfstelle STS 0614 - SBB ohne Anhang mit den Seiten 1 bis 10 von 54 Seiten.



Versuchsbericht

Zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizient «k-Wert» gemäss Prüfverfahren BBA 200091638 und nicht akkreditiertes Prüfverfahren zum Bestimmen der Energieverluste bei Türöffnungszyklen

SwissTrolley plus



CAA 20177045

Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt - © Copyright SBB.

Ohne schriftliche Genehmigung der Prüfstelle darf der Bericht nicht auszugsweise und vollständig vervielfältigt oder weiterverwendet werden. Angaben zur Messunsicherheit werden auf Anfrage bekanntgegeben, falls sie im Bericht nicht angegeben sind. Die Versuchsergebnisse beziehen sich auf das im Versuchsbericht beschriebene Prüfobjekt. Im Falle einer Vervielfältigung oder Veröffentlichung dieses Versuchsberichts darf der Inhalt in keiner Art und Weise verändert werden.

Kunde: Franz Sidler, Hochschule Luzern, Technikumstrasse 21, CH 6048 Horw
Hannes Aeberhard, Carrosserie Hess AG, Bielstrasse 7, CH 4512 Bellach

Bearbeiter:

	Name	Firma	Funktion
Ersteller	Andreas Käser	P-OP-AM-FT-TE-KT-V	Projektleiter
Prüfer	Stefan Graf	P-OP-AM-FT-TE-KT-V	Prüfingenieur
Freigeber	Ralf Hofer	P-OP-AM-FT-TE-KT-V	Leiter Prüfstelle

Allgemeiner Änderungsnachweis:

Datum	Ersteller	Art der Änderung	Version
19.12.2017	Andreas Käser	Erstausgabe für Review	01
27.02.2018	Andreas Käser	Ausgabe nach Review	02

P-OP-AM-FT-TE-KT-V

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines.....	3
1.1	Ausgangslage & Ziel.....	3
1.2	Abkürzungen	3
1.3	Versuchsinfo	5
1.4	Quellen.....	5
2	Management Summary	6
3	Messergebnisse	7
3.1	Erläuterungen.....	7
3.2	Detailbeurteilung der Messresultate	7
3.3	K-Wert.....	7
3.4	Messunsicherheiten.....	8
4	Anlagen	11
Anlage 1	Messaufbau (Generelle Übersicht).....	11
Anlage 2	Installation der Simulation	12
Anlage 3	Messpunktplan.....	13
Anlage 4	Messpunktliste	14
Anlage 5	Versuchsjournal	17
Anlage 6	Fehlerjournal.....	33
Anlage 7	Grafiken	34
Anlage 8	Fotodokumentation	39
Anlage 9	Reviewprotokoll	53

Detaillierter Änderungsnachweis:

Seite (n)	Kapitel	Art der Änderung	Version
Diverse	Diverse	Gemäss Review/Kommentierung in Anlage 9	02

1 Allgemeines

1.1 Ausgangslage & Ziel

a) Messung k-Wert

Es soll der k-Wert des Prüfobjektes ermittelt werden. Dazu kommt das Prüfverfahren gemäss /1/ zur Anwendung.

b) Energieverlust durch Türöffnungszyklen (**nicht akkreditiertes Prüfverfahren**)

Bei verschiedenen Aussenlufttemperaturen soll der Energieverbrauch bei geschlossenen Türen, sowie bei definierten Türöffnungszyklen gemäss Kundenvorgaben, ermittelt werden. Der Vergleich dieser Energiewerte lässt Rückschlüsse auf die Verlustenergie während den Türöffnungszyklen zu. Die Prüfstelle stellt hierfür nur die Daten der Aussen- und Innenlufttemperaturen, sowie die Luftgeschwindigkeiten im Türportal zur Verfügung ohne diese auszuwerten.

Im Journal wurden jeweils auch die mittlere Leistungsaufnahme ab «Steckdose» CEE eingetragen um einen einfachen Vergleich zu haben.

c) Luftströmungsmessungen an den Türportalen

An zwei Einstiegstüren werden jeweils 5 omnidirektionale Luftgeschwindigkeitssensoren zur Aufzeichnungen der Strömungsgeschwindigkeiten installiert und die Daten dem Kunden zur Verfügung gestellt.

d) Visualisierung der Lüftströmungen mit Rauch

Mittels Rauch («Nebelkanonen») sollen die Luftströmungen visualisiert werden. Damit die Bewegungen besser sichtbar werden, wird der Rauch mit grünen Lasern in horizontaler und vertikaler Richtung angestrahlt. Mit Videos und Fotos wurden die Luftströmungen festgehalten.

Als Basis dient das Versuchsprogramm gemäss /11/.

1.2 Abkürzungen

a	Wert für Abweichung
ALT	Aussenlufttemperatur
ALK	Aussenluftklappe
ASR	Antriebsstromrichter
AUL	Aussenluft
BBA	Arbeitsanweisung (DMS SBB)
BK	Bodenkanal (Zuluft)
BLG	Batterieladegerät
CAA	Nachweisdokument (DMS SBB)
CO ₂	Kohlendioxid
DL	Druckluft
DK	Deckenkanal (Zuluft)
DMS	Document management system
EN	Europäische Norm
ET	Einstiegstüre
EV	Energieversorgung
Extrem	Horizontale Temperaturverteilung auf Höhe Kopf (1.1m)
FGR	Fahrgastraum
FOK	Fussbodenoberkante
FT-TE-KT	Flottentechnik / Team Elektrik / Klimatechnik (Organisationseinheit SBB)
Fzg	Fahrzeug
HBU	Hilfsbetriebeumrichter
HD	Hochdruck (Kältekreis)
HLK	Heizung Lüftung Klima

k	Erweiterungsfaktor (Statistik)
KK	Klimakammer
LAA	Luftaufbereitungsaggregat
Lf	Lokführer
LAeq	äquivalenter Schalldruckpegel [dB(A)]
Laeq,10s	äquivalente Schalldruckpegel über der Zeit t=10s
LAEX,8h	Tages-Lärmexpositionspegels [dB(A)]
MB	Messbox
MF	Messfahrt
MP	Messpunkt
MPP	Messpunktplan
mcps	Messsystem Klimakammer Olten (Software)
MW	Mittelwert
ND	Niederdruck (Kältekreis)
OFT	Oberflächentemperatur
ppm	parts per million
RH	Relative Luftfeuchtigkeit (relative humidity)
RLT	Raumlufttemperatur
s	Standardabweichung (Normalverteilung)
SBB	Schweizerische Bundesbahnen (Chemins de fer fédéraux suisses CFF, Ferrovie federali svizzere FFS)
SOK	Schienenoberkante
SR	Sitzreihe
SW	Software (oder Seitenwand)
u	Messunsicherheit (Standardunsicherheit der Grösse x)
U	Erweiterte Messunsicherheit
v	Geschwindigkeit [km/h]
VH	Vorheizen
VK	Vorkühlen
VVA	Verdichter-Verflüssiger-Aggregat
WS	Wagenseite
ZUL	Zuluft
#	Messkanal mcps/MPP
t_e	Aussenlufttemperatur
φ_e	Aussenluftfeuchte
t_{ic}	Sollwert Fahrgastraum (Temperaturwähler)
t_{im}	Mittelwert Fahrgastraum auf Höhe Kopf sitzend (1.1m)
t_{OFT}	Oberflächentemperatur
t_{Zul}	Zulufttemperatur
t_e / t_{em}	Aussenlufttemperatur

1.3 Versuchsinfo

Einrichten:	24.11.2017
Versuchsdurchführung:	27.11.2017 bis 01.12.2017
Rückbau:	04.12.2017
Prüfobjekt:	SwissTrolley plus
T_{em} :	5°C (k-Wert) -12°C ... 40°C (Türöffnungszyklen)
T_{im} :	>25°C (k-Wert) 18°C ... 28°C (Sollwertvorgabe Fahrzeug entsprechend t_e)
Prüfingenieure:	Stefan Graf, Stephan Geiger, Roger Felder, Christian Rogger
Projektleiter:	Andreas Käser
Leiter Prüfstelle:	Dr. Ralf Hofer
Anschrift Prüfstelle: STS 0614	SBB Personenverkehr Operating Prüfstelle Versuche / Klimakammer Industriestrasse 153 4600 Olten

1.4 Quellen

/1/	BBA 20091638	Prüfverfahren Bestimmung Wärmedurchgangskoeffizient «k-Wert»
/2/	EAA 20088760	Messpunktliste (Vorlage)
/3/	EAA 20088771	Messpunktplan (Vorlage)
/4/	EAA 20088553	Reviewprotokoll (Vorlage)
/5/	BBA 20088757	Handling von Prüfobjekten
/6/	EAA 20092230	Checkliste «Bestimmung k-Wert» (Vorlage)
/7/	EAA 20088962	Versuchsjournal «Typprüfungen» (Vorlage)
/8/	EAA 20092303	Versuchsbericht «Bestimmung k-Wert» (Vorlage)
/9/	BAB 20088757	Verfahrensanleitung Mess- und Prüfmittelmanagement (Kalibriernachweise sind in der Datenbank "Aptobase" zu finden)
/10/	SN 13005	Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, Juli 2007
/11/	BBA 20174889	Versuchsprogramm zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizient «k-Wert» gemäss Prüfverfahren BBA 200091638 und nicht akkreditiertes Prüfverfahren zum Bestimmen der Energieverluste bei Türöffnungszyklen
/12/	JCGM 100	Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, Juli 2007
/13/	BCA 20170087	Messmittelliste, Normvorgabe inkl. Messunsicherheiten und Verwendung im Zusammenhang mit den Prüfverfahren
/14/	Aptobase	Datenbank Messmittel
/15/	CAA 20170125	Prüfstelle Versuche/Klimakammer, Messkette

2 Management Summary

a) Messung k-Wert

Die Messung des k-Wertes konnte gemäss /1/ durchgeführt werden. Das Resultat für den k-Wert beträgt:

$$k=2.91 +0.09/-0.08 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$$

Weitere Informationen finden sich in den nachfolgenden Kapiteln.

b) Energieverlust durch Türöffnungszyklen (nicht akkreditiertes Prüfverfahren)

Die Türöffnungsversuche und Energiemessungen konnten gemäss Vorstellungen der Fachhochschule Luzern und dem Fahrzeughersteller Firma Hess erfolgreich durchgeführt werden. Die mcps Messdaten sowie Videos von den Versuchen werden separat an die Kunden abgegeben und hier nicht weiter dargestellt.

Die gemittelten Leistungsunterschiede bei geschlossenen Türen und Türöffnungszyklen lassen sich sogar an der CEE125A Einspeisung feststellen.

c) Luftströmungsmessungen an den Türportalen

Die Luftströmungsmessungen zeigen bei tiefen Aussenlufttemperaturen signifikante Ausschläge auf bestimmten Höhen ab FOK. Bei hohen Aussenlufttemperaturen ist es eher diffus. Zwei Grafiken finden sich in Anlage 7 zur Illustration.

d) Visualisierung der Lüftströmungen mit Rauch

Die Visualisierung mittels Rauch («Nebelkanonen») und Beaufschlagung mit grünem Laserlicht war sehr aufschlussreich und wurde auf Videos festgehalten. Wie zu erwarten trat die Luft bei den Türöffnungszyklen bei tiefen Aussentemperaturen über den Boden und bei warmen Aussenlufttemperaturen über die Oberkante der Türöffnung ins Fahrzeug ein.

3 Messergebnisse

In den Grafiken wurden die Messunsicherheiten nicht ausgewiesen. Die Achsen sind beschriftet und selbsterklärend, siehe Abbildungen in Anlage 7.

3.1 Erläuterungen

Die stabile Phase für die Auswertung des k-Wertes ist zwischen den beiden Cursorsoren «C1» und «C2» ersichtlich, siehe Abbildungen in Abbildung 4-4.

3.2 Detailbeurteilung der Messresultate

Die Bedingungen gemäss Prüfverfahren /1/, Kapitel 6.2, wurden am 30.11.2017 im Zeitraum von 16:00 bis 19:00 erfüllt. Die Berechnung des k-Wertes basieren auf den Mittelwerten der letzten 60 Min. dieses Zeitraums. Die Mittelwerte und Standardabweichungen wurden mit dem Statistiktool des mcps generiert und herbeigezogen um die Stabilität nachzuweisen.

3.3 K-Wert

Der k-Wert beträgt: $k=2.91 \pm 0.09/-0.08 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Als Vergleich dient noch der k-Wert aller Sensoren dh inklusive der Sensoren auf 0.1m und 1.7m. Dieser beträgt $k=2.95 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Die geringe Abweichung zum k-Wert gemäss /1/ auf 1.1m zeigt auf, dass die Raumluft sehr homogen durchmischt war und das Resultat somit relevant ist. Siehe dazu auch den Vergleich in Abbildung 4-5.

Die horizontale Extremwertabweichung auf 1.1m Höhe ab FOK beträgt $\Delta T_{\#82}=1.48\text{K}$ mit $s=0.08\text{K}$ und liegt somit unterhalb den geforderten $\Delta T \leq 2\text{K}$.

Die Überprüfung der Luftgeschwindigkeiten ist im Journal vom 27.11.2017/14:45 festgehalten und erfüllt die Anforderung gemäss /1/ ($v \leq 2\text{m/s}$).

3.4 Messunsicherheiten

Die Angaben zu den Messmitteln sind gemäss dem Prüfverfahren /1/ in /13/ und /14/ ersichtlich.

Die Messunsicherheiten für Einzelmesswerte und kompl. Messkette werden nach dem Prüfverfahren /1/, basierend auf den Normen /10/ und /12/ bestimmt.

Die notierte erweiterte Messunsicherheit wurde mit einem Erweiterungsfaktor $k=2$ und mit einer Rechteck-Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung nach Typ B berechnet. Unter Beachtung dieser Messunsicherheit liegt der Messwert der Messgrösse im Regelfall mit einer Wahrscheinlichkeit von 95.4% im zugeordneten Überdeckungsintervall einer angenommenen Normalverteilung. Im Falle der Temperatur- und Geschwindigkeits-Sensorik ergibt sich die resultierende erweiterte Messunsicherheit (U) entsprechend den in Tabelle 1 und Tabelle 2 ersichtlichen Werten. Alle anderen Messunsicherheiten sind in c) bis g) aufgeführt.

a) Lufttemperaturen (mcps)

In Tabelle 1 ist ein Auszug aus /13/ Tabellenblatt 4.2, erweiterte Messunsicherheit mit $k=2$ (Wahrscheinlichkeit von 95.4%) abgebildet.

Tabelle 1 Erweiterte Messunsicherheit Lufttemperaturen

Temperatur	Erweiterte Messunsicherheit der Luft-/Oberflächentemperaturen
t [°C]	$U_i(t)$ [K]
-25	0.43
-20	0.42
-15	0.42
-10	0.41
-5	0.40
0	0.39
5	0.40
10	0.41
15	0.42
20	0.42
25	0.43
30	0.44
35	0.45
40	0.46
45	0.47
50	0.48
55	0.49
60	0.50

b) Luftgeschwindigkeit (mcps)

In Tabelle 2 ist ein Auszug aus /13/ Tabellenblatt 4.5, erweiterte Messunsicherheit mit $k=2$ (Wahrscheinlichkeit von 95.4%) abgebildet.

Tabelle 2 Erweiterte Messunsicherheit der Luftgeschwindigkeiten

Luftgeschwindigkeit	Erweiterte Messunsicherheit der Luftgeschwindigkeiten
v [m/s]	U_v [m/s]
0.015	0.036
0.05	0.036
0.1	0.036
0.2	0.036
0.3	0.036
0.4	0.037
0.5	0.037
0.6	0.038
0.7	0.038
0.8	0.039
0.9	0.039
1.0	0.040
1.5	0.044
2.0	0.050
2.5	0.056
3.0	0.063
3.5	0.071
4.0	0.078
4.5	0.086
5.0	0.094

c) Lufttemperatur Klimakammer

Gemäss /15/ beträgt die Messunsicherheit für die Lufttemperatur $U=\pm 0.45K$.

d) Luftfeuchtigkeit Klimakammer

Gemäss /15/ beträgt die Messunsicherheit für die Luftfeuchtigkeit $U=\pm 2.31\%$ relF.

e) Leistungsmessung Simulation

Gemäss /13/ Tabellenblatt 2 beträgt erweiterte Messunsicherheit $U=1.75\%$

f) Leistungsmessung CEE125 (Leistungsbedarf Trolley mit AC/DC Speisegerät)

Gemäss /13/ Tabellenblatt 2 beträgt erweiterte Messunsicherheit $U=4.5\%$

g) k-Wert

Der k-Wert berechnet sich nach der Formel $k=P/(\Delta T \cdot A)$. Folgende Voraussetzungen für die Betrachtung der Messunsicherheit werden angenommen:

- Messunsicherheit der Fläche (A) 1%
- Die Messunsicherheiten von ΔT (t_e zu t_{im}) heben sich gegenseitig auf, da nur die Temperaturdifferenz interessiert und diese stabil ist. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Mittelwert der Normalverteilung jeweils nahe am richtigen Wert befindet.
- Die Standardabweichung für $t_{e\#2}$ betrug $s=0.09K$ die Standardabweichung für $t_{im\#74}$ betrug $s=0.02K$. Somit wird noch eine Unsicherheit von $\Delta s=0.07K$ in der Rechnung mit in Betracht gezogen.
- Die Messunsicherheit der Leistungserfassung wird gemäss e) mit $U=1.75\%$ berücksichtigt.
- Gemäss Fehlerjournal Punkt Nr. 5 werden beim Leistungsbezug noch $P=600W$ hinzugerechnet für interne Wärmequellen des Fahrzeugs.

Daraus ergeben sich folgende Max/Min Werte, bezogen auf die Mittelwerte von 18:00 bis 19:00Uhr:

$P_{\max\#18}$	$P_{\min\#18}$	$\Delta T_{(\#74 - \#2)}$	ΔT_{\max}	ΔT_{\min}	A_{\max}	A_{\min}
[kW]	[kW]	[K]	[K]	[K]	[m ²]	[m ²]
$P_{\max}=12.75 \cdot 1.0175$	$P_{\min}=12.75 \cdot 0.9825$	$\Delta T=28.23-4.99$	$\Delta T_{\max}=23.24+0.07$	$\Delta T_{\min}=23.24-0.07$	$A_{\max}=197.1 \cdot 1.01$	$A_{\min}=197.1 \cdot 0.99$
12.97	12.53	23.24	23.31	23.17	199.07	195.13

Berechnung Messunsicherheit k-Wert:

k_{\min}	k_{\max}
[W/(m ² *K)]	[W/(m ² *K)]
$(12530+600)/(199.07 \cdot 23.31)$	$(12970+600)/(195.13 \cdot 23.17)$
2.83	3.00

Der k-Wert für den SwissTrolley kann somit mit **$k=2.91 \pm 0.09/-0.08$ W/(m²*K)** ausgewiesen werden.