



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)

Leistungsmessung an Bussen mit Türluftschleibern

Schlussbericht



Franz Sidler, Hochschule Luzern

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

Frank Gubser, Hochschule Luzern

Technikumstrasse 21, 6048 Horw, frank.gubser@hslu.ch, www.hslu.ch

Begleitgruppe

BAV: Stefan Schnell

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

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

CH-3003 Bern

Programmleiter

Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: P-159

Bezugsquelle

Kostenlos zu beziehen über das Internet

www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren/innen dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 25.1.2021

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. Einführung in die Thematik	9
3. Methodik	11
3.1 Marktrecherche Luftschleier im Gebäudebereich	11
3.2 Laborexperimente	13
3.3 Messungen am Bus in der Klimakammer	20
4. Ergebnisse	22
4.1 Laborexperimente	22
4.2 Messungen in der Klimakammer	30
5. Diskussion	37
6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	38
7. Literaturverzeichnis	39
8. Anhang	40
8.1 Versuchsaufbau und Kennlinie Schlitzdüse	40
8.2 Messwerte im Labor der HLSU	42
8.3 Messwerte in der Klimakammer der SBB in Olten	44
8.4 Technische Daten Türluftschleier TTL-Trend 150 (TLS1)	46

Danksagung

Wir bedanken uns bei Postauto AG (Eveline Wüest) für die gute Zusammenarbeit sowie die Bereitstellung des Busses für den Einbau der Türluftschleier, sowie der Firma LSG engineering GmbH (Jimmy Brügger) für die Unterstützung und Bereitstellung des Türluftschleiers.

Des Weiteren möchten wir uns bei Solaris Schweiz GmbH (André Marti) für den Einbau der Messeinrichtung sowie allen am Projekt beteiligten Partnern für die gute Zusammenarbeit und den spannenden Austausch bedanken.

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

Zusammenfassung

Im Projekt «Messung Energieverlust durch Türöffnungen bei Linien-Bussen» [1] wurde am SwissTrolley Plus der Energiebedarf durch Türöffnungen gemessen. Die Messungen zeigten, dass bei geöffneten Türen und tiefen Aussenlufttemperaturen grosse Wärmeverluste auftreten und dabei der Komfort der Passagiere eingeschränkt wird. Zur Verbesserung des Komforts und zur Minimierung der Wärmeverluste werden in Gebäuden an Eingangstüren Türluftschleier eingesetzt.

Der Einsatz von Türluftschleiern im Linienbus wird in dieser Studie mit folgenden Zielen untersucht:

- Wie beeinflussen Türluftschleier den Heizenergiebedarf und die Behaglichkeit?
- Der Türluftschleier im Solaris-Bus der Postauto AG ist mit anderen Türluftschleiern aus dem Gebäudebereich bezüglich Effizienz und Komfort zu vergleichen.

Nach der Einführung in die Thematik der Türluftschleier (TLS) wurden drei Systeme für experimentelle Untersuchungen ausgewählt. Das erste System ist ein Standard Türluftschleier aus der Gebäudetechnik mit einem kompakten Luftstrahl über die gesamte Türöffnung. Im zweiten System wurde ein schmaler Schlitz als Luftstrahl über die gesamte Türöffnung getestet. Und als drittes System wurde das serienmässig im Solaris-Bus eingesetzte System ohne durchgängigen Luftstrahl über der Türe überprüft.

Alle drei Systeme wurden zuerst im Labor an einem Busmodell an einer stets offenen Einzeltür gemessen. Mit unterschiedlichen Parametern wie der Temperaturdifferenz der Innen- und der Aussenlufttemperatur, dem Volumenstrom, etc. wurden die Türluftschleier gemessen und miteinander verglichen. Die Messungen im Labor zeigen in Abbildung 1, dass mit steigender Temperaturdifferenz durch den Einsatz eines Türluftschleiers immer eine Reduktion der Heizleistung resultierte. Die grösste Einsparung wurde mit dem TLS Solaris erreicht. Der Komfort der Passagiere wurde durch den Einsatz eines TLS deutlich verbessert, indem die Temperaturschichtung kleiner wurde.

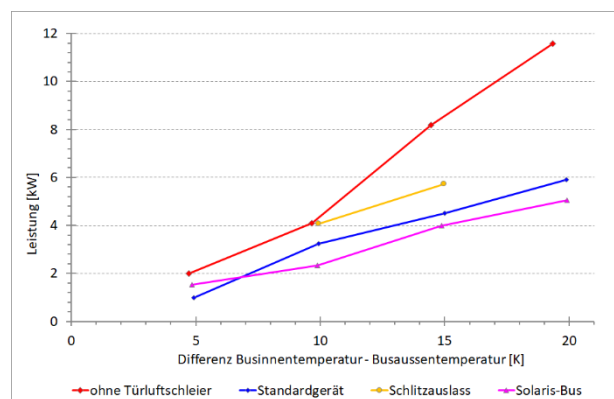


Abbildung 1 TLS Vergleich: Leistungsbedarf im Labor

Da in den Labormessungen mit einem vereinfachten Busmodell aus Holz mit stets offener Tür die realen Bedingungen nicht vollständig nachgebildet werden können, wurden die TLS-Messungen im Bus auch in der Klimakammer durchgeführt. Die Wirkung der TLS wurde bei unterschiedlichen Aussenlufttemperaturen analog dem Fahrbetrieb mit Türöffnungen durchgeführt. Die Resultate zeigen, dass auch im realen Betrieb bei allen gemessenen Aussenlufttemperaturen durch den Einsatz eines TLS Heizenergie eingespart wird. Der Komfort wird mit eingeschaltetem TLS verbessert, indem die Temperaturschichtung kleiner wird. Bei negativen Aussenlufttemperaturen wird mit dem TLS auch die Sicherheit erhöht, indem weniger Eisglätte das Ausrutschen der Passagiere reduziert (Abbildung 2).

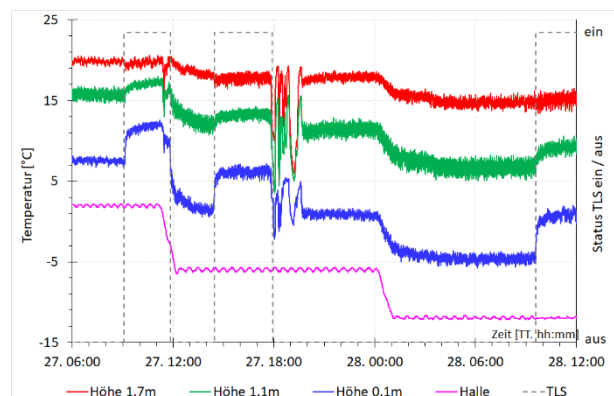


Abbildung 2 Einfluss TLS auf die Temperaturschichtung

In den Labormessungen wie auch in der Klimakammer wurde bei allen betrachteten Zuständen mit dem Betrieb eines Türluftschleiers der thermische Komfort bei geringerem Energiebedarf erhöht. Somit wird der Einbau von Türluftschleier in dieselbetriebenen sowie auch in elektrisch betriebenen Fahrzeugen empfohlen.

Die Unterschiede bei den Einsparungen im Labor und in der Klimakammer zeigen, dass noch Optimierungspotenzial vorhanden ist. Grosses Optimierungspotenzial wird bei der Geometrie des Luftauslasses und einer aussenlufttemperaturgesteuerten Luftmenge erwartet.

Résumé sommaire

Dans le cadre du projet «Mesure de la perte d'énergie par les ouvertures de portes dans les bus de transport public» [1], le SwissTrolley Plus a été utilisé pour mesurer les besoins en énergie par les ouvertures de portes. Les mesures ont montré que d'importantes pertes de chaleur se produisent lorsque les portes sont ouvertes et que la température de l'air extérieur est basse, ce qui réduit le confort des passagers. Pour améliorer le confort et minimiser les pertes de chaleur, des rideaux d'air sont utilisés aux portes d'entrée des bâtiments.

L'utilisation de rideaux d'air dans les autobus est étudiée dans cette étude avec les objectifs suivants :

- Comment les rideaux d'air influencent-ils la demande en énergie de chauffage et le confort ?
- Le rideau d'air dans le bus Solaris de Postauto AG doit être comparé à d'autres rideaux d'air dans le secteur du bâtiment en termes d'efficacité et de confort.

Après l'introduction au sujet des rideaux d'air pour les portes (TLS), trois systèmes ont été sélectionnés pour des études expérimentales. Le premier système est un rideau d'air standard de l'ingénierie des services du bâtiment avec un jet d'air compact sur toute l'ouverture de la porte. Dans le second système, une fente étroite a été testée sous forme de jet d'air sur toute l'ouverture de la porte. Et comme troisième système, le système utilisé en standard dans le bus Solaris a été testé sans jet d'air continu au-dessus de la porte.

Les trois systèmes ont d'abord été mesurés en laboratoire sur un modèle de bus à une seule porte toujours ouverte. En utilisant différents paramètres tels que la différence de température entre la température intérieure et extérieure, le débit, etc., les rideaux d'air ont été mesurés et comparés. Les mesures effectuées en laboratoire montrent à la figure 1 qu'avec l'augmentation de la différence de température, l'utilisation d'un rideau d'air entraîne toujours une réduction de la puissance de chauffage. Les plus grandes économies ont été réalisées par TLS Solaris. Le confort des passagers a été considérablement amélioré par l'utilisation d'un TLS, car la stratification des températures est devenue plus faible.

Comme les mesures en laboratoire avec un modèle simplifié de bus en bois dont la porte est toujours ouverte ne peuvent pas reproduire complètement les conditions réelles, les mesures TLS dans le bus ont également été effectuées dans la chambre climatique. L'effet du TLS a été effectué à différentes températures extérieures, comme pour la conduite avec ouverture des portes. Les résultats montrent que même en fonctionnement réel à toutes les températures extérieures mesurées, l'énergie de chauffage est économisée grâce à un TLS. Le confort est amélioré avec le TLS activé en réduisant la stratification de la température. En cas de températures extérieures négatives, le TLS augmente également la sécurité en réduisant le risque que les passagers glissent sur la glace glissante (figure 2).

Dans les mesures de laboratoire ainsi que dans la chambre climatique, le fonctionnement d'un rideau d'air a permis d'augmenter le confort thermique avec une consommation d'énergie plus faible dans toutes les conditions considérées. Il est donc recommandé d'installer des rideaux d'air dans les véhicules à moteur diesel et électrique.

Les différences entre les économies réalisées dans le laboratoire et dans l'enceinte climatique montrent qu'il existe encore un potentiel d'optimisation. Un grand potentiel d'optimisation est attendu dans la géométrie de la sortie d'air et un volume d'air à température extérieure contrôlée.

Executive summary

In the project «Measurement of energy loss through door openings in public transport buses» [1], the energy requirement through door openings was measured on the SwissTrolley Plus. The measurements showed that large heat losses occur when doors are open and the outside air temperature is low, thus reducing passenger comfort. To improve comfort and minimise heat loss, air curtains are used at entrance doors in buildings.

The use of air curtains in buses is investigated in this study with the following objectives:

- How do air curtains influence the heating energy demand and comfort?
- The air curtain in the Solaris bus of Postauto AG is to be compared with other air curtains in the building sector in terms of efficiency and comfort.

After the introduction of the topic of air curtains (TLS), three systems were selected for further investigation. The first system is a standard air curtain from the building technology with a compact air jet over the entire door opening. In the second system, a narrow slit was tested as an air jet over the door opening. And as the third system, the one used as a standard in the Solaris bus was tested without a continuous air jet over the door.

All three systems were first measured in the laboratory on a bus model on a single door that was always open. Using different parameters such as the temperature difference between the inside and outside temperature, the volume flow, etc., the air curtains were measured and compared. The measurements in the laboratory show in Figure 1 that the use of an air curtain always resulted in a reduction of the heating power with increasing temperature difference. The greatest savings were achieved by TLS Solaris. Passenger comfort was significantly improved by the use of a TLS, as the temperature stratification became smaller.

Since the laboratory measurements with a simplified bus model made of wood with the door always open cannot completely reproduce the real conditions, the TLS measurements in the bus were also carried out in the climate chamber. The effect of the TLS was carried out at different outside temperatures in the same way as driving with doors open. The results show that even in real operation at all measured outside temperatures, heating energy is saved by using a TLS. The comfort is improved with TLS switched on, as the temperature stratification becomes smaller. In the case of negative outside temperatures, the TLS also increases safety by reducing the risk of passengers slipping on slippery ice (Figure 2).

In the laboratory measurements as well as in the climatic chamber, the operation of an air curtain increased thermal comfort with lower energy consumption in all the conditions considered. Therefore, the installation of air curtains is recommended in diesel-powered as well as in electrically powered vehicles.

The differences in the savings in the laboratory and in the climatic chamber show that there is still potential for optimisation. Great optimisation potential is expected in the geometry of the air outlet and an outside temperature controlled air volume.

1. Ausgangslage und Zielsetzung

1.1 Ausgangslage

Die Universität Basel untersuchte zusammen mit der Hochschule Luzern – Technik & Architektur und weiteren Partnern die Energieeffizienz von HLK im öffentlichen Verkehr. 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. Im Projekt «Messung Energieverlust durch Türöffnungen bei Linien-Bussen» [1] wurde am SwissTrolley Plus der Energiebedarf durch Türöffnungen gemessen.

Die Messungen zeigten, dass bei geöffneten Türen und tiefen Aussenlufttemperaturen grosse Wärmeverluste auftreten und dabei der Komfort der Passagiere durch starke Temperaturschwankungen eingeschränkt wird. Darüber hinaus müssen diese Wärmeverluste durch eine erhöhte Heizleistung kompensiert werden.

Im Gebäude werden Türluftschleier (TLS) oft in Verkaufshäusern mit hohem Passagieraufkommen eingesetzt. Dabei stehen Komfortverbesserungen der Mitarbeiter, welche Arbeitsplätze im Türöffnungsreich haben, und der Einsparung von Energie im Vordergrund.

Auch in Bussen kann der Komfort bei geöffneten Türen mit Türluftschleiern verbessert werden. Ob dadurch ein zusätzlicher Energiebedarf resultiert, oder ob damit gar Energie gespart wird, kann mit dem heutigen Wissensstand nicht eindeutig beantwortet werden. Die Heizenergie sowie die Energie zum Betrieb der Türluftschleier muss zusätzlich aus elektrischer Energie bereitgestellt werden. In den beiden Studien «Using Air Walls for the Reduction of Open-Door Heat Losses in Buses» [2] und «Analysis of the influence of air curtain on reducing the heat infiltration and costs in urban electric buses» [3] wurden mittels CFD Simulation Einsparungen ausgewiesen.

In dieser Studie sollen die Auswirkungen von Luftschleiern auf den Heizungsbedarf durch Messungen geklärt werden. Die Erkenntnisse sollen als Empfehlung für den Einbau von Türluftschleiern bei der Anschaffung neuer Busse dienen.

1.2 Ziel der Arbeit

An einem Bus der Postauto AG soll die Auswirkung von Türluftschleiern auf den Heizenergiebedarf von Bussen mit Messungen im Labor und in der Klimakammer der SBB in Olten geklärt werden.

Folgende Fragen sollen beantwortet werden:

- 1) Wie beeinflussen die in den neuen Solaris-Bussen von Postauto AG installierten Luftschleier die Behaglichkeit im Bus und den Heizenergiebedarf?
- 2) Können die Luftschleier der Solaris-Busse im Vergleich mit den besten kommerziell erhältlichen Systemen aus dem Gebäudebereich verbessert werden?
- 3) Kann der Einfluss der Luftschleier auf den Heizenergiebedarf durch Optimierung der serienmässig eingebauten Luftschleier wesentlich verändert werden?

2. Einführung in die Thematik

Bei einem offenen Fenster im Winter entweicht die warme Luft durch den oberen Bereich und unten strömt die kalte Aussenluft nach. Verstärkt kann dieser Effekt durch Winddruck von aussen, oder durch möglichen Kamineffekt (statische Höhe und Temperaturunterschied) werden.

Um diesen thermischen Phänomen (hervorgerufen durch den Dichteunterschied der Luft) zu unterbinden, ist es möglich den abströmenden Bereich durch einen Luftstrom zu stören bzw. zu unterbrechen. Die abströmende Luftmenge ist abhängig von der Grösse der Öffnung sowie der Temperaturdifferenz von innen zu aussen.

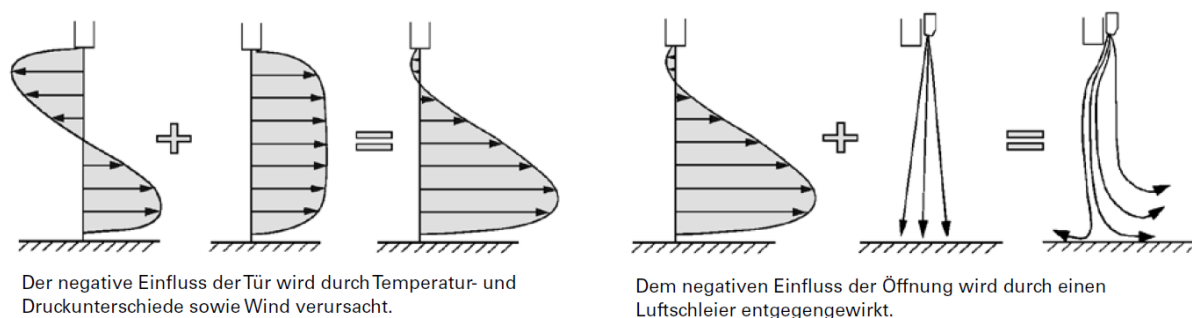


Abbildung 3 Schnitt durch offene Türe mit Geschwindigkeitsvektoren und dem Einfluss eines Luftschleiers

Quelle: <https://www.frico.net/de/werkzeuge/technisches-handbuch/>

Bis anhin waren im öffentlichen Busverkehr mehrheitlich Dieselfahrzeuge im Einsatz. Durch den Überschuss an Wärme der Verbrennungsmotoren war die Heizenergie nie ein Thema gewesen, da immer zu viel Wärme angefallen ist. Je mehr elektrisch betriebene Fahrzeuge zum Einsatz kommen, umso wichtiger werden die thermischen Verluste; auch im Sommer, bei einem gekühlten Fahrzeug, kann ein Türluftschleier dem Wärmeeintrag entgegenwirken.

Die Thematik ist im Gebäudebereich ein relevantes Thema. Bereits im 1998 wurde ein entsprechendes Merkblatt «Gebäudeeingänge mit grossem Publikumsverkehr» [4] von der Zürcher Energieberatung und dem Bundesamt für Energie veröffentlicht. Das Merkblatt ist auch nach über 20 Jahren immer noch aktuell, und von verschiedenen Energiefachstellen wird darauf verwiesen. Als gute Zusammenfassung wird hier das Kapitel 3.4 *Warmluftvorhänge* zitiert:

Richtig eingesetzt können Warmluftvorhänge Energieverluste vermindern helfen. Das ist sowohl mit vertikalen als auch mit horizontalen Vorhängen möglich, wenn der ausgeblasene Luftstrom gut gerichtet und stark genug ist. Horizontale Warmluftvorhänge sind aber weniger stabil und werden durch die ein- und austretenden Menschen stärker gestört.

Massgeblich für die Stabilität, ist neben der Ausströmgeschwindigkeit, die Gestaltung der Ausströmöffnungen. Der ausgeblasene Luftstrom muss so stark sein, dass an jedem Ort der Tür sich eine Geschwindigkeit einstellt, die grösser ist als die Geschwindigkeit der thermischen Ausgleichsströmung.

Bei einem normalen Eingang ist das ungefähr 0.7 m/s. Wichtig ist besonders, dass der Warmluftvorhang die ganze Türöffnung wirksam abdeckt und seitlich und oben gut an die Konstruktion anschliesst. Warmluftvorhänge müssen daher unmittelbar hinter der Türkonstruktion angebracht werden. Zwischen dem Ausblaskasten des Warmluftvorhangs und der Konstruktion darf es keine Öffnung geben, durch welche Kaltluft in den Raum bzw. Warmluft nach aussen strömen kann. Günstig ist es auch, wenn der Warmluftvorhang durch seitliche Blenden oder Wände, z.B. in einem Windfang, gefasst wird.

Der Luftvorhang kann mit dem Türöffner ein- und ausgeschaltet werden, obwohl er ein bis zwei Sekunden braucht, bis er über die volle Öffnung wirksam wird. Er muss aber mit dem Sensor für die Türöffnung gesteuert werden, damit keine Verzögerung eintritt. Bei einem Windfang muss der Luftvorhang starten, sobald eine Tür geöffnet wird. Ein Luftvorhang mit unterer Absaugung vermindert das Eindringen von Kaltluft und die Energieverluste; die Windstabilität des Luftvorhangs wird aber nicht verbessert. Da bei unterer Absaugung vorwiegend kalte Luft angesaugt wird, ist eine grosse Heizleistung des Warmluftvorhangs notwendig. Auch bei einem gut funktionierenden Warmluftvorhang tritt am Boden kalte Luft ein.

Zudem ist dieselbe Problematik im Bereich von Kühlhäusern ein bekanntes Thema. Dort liegt neben den thermischen Verlusten durch Transportöffnungen, der Fokus primär auf dem Feuchteintrag in den kalten Bereich. Die Lösungsansätze sind identisch mit den Ansätzen der Gebäudetechnik.

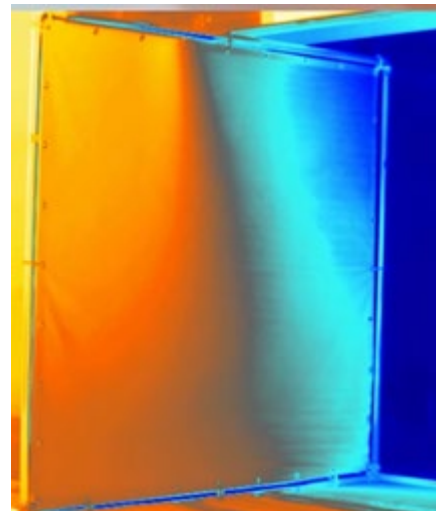
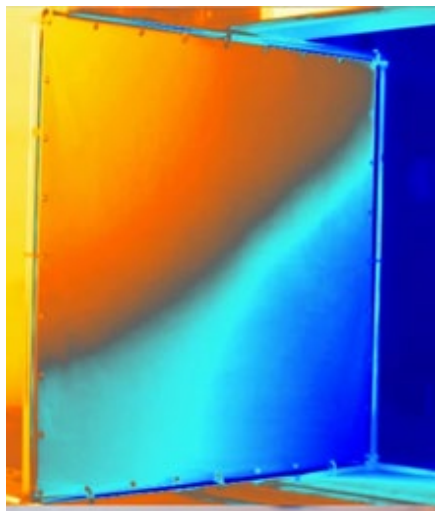


Ohne Luftschleier wird die kalte Luft sich unten am Boden verteilen und die wärmere im oberen Bereich in den kalten Bereich überströmen.



Mit einem Luftvorhang (hier ein doppelter horizontaler Luftvorhang) werden die beiden Raumluft-Konditionen voneinander getrennt.

Abbildung 4 Temperaturverlauf in einer Kühlhaus-Türe mit und ohne Einfluss eines Luftschleiers
Quelle: www.afim-airdoor.com/de/vorteile-lufttur/



Die gespannte Folie im Mittenbereich des offenen Durchganges wurde mit einer Thermografie Kamera fotografiert. Das Bild zeigt den Temperaturverlauf ohne Luftschleier. Die kalte Luft strömt unten am Boden in den wärmeren Bereich. Umgekehrt dazu die wärmere Luft: Diese wird oben in den kalten Bereich überströmen.

Der aktive Luftvorhang (hier eine vertikale Ausführung, mit Ausblas von oben) trennt die beiden Raumluft-Konditionen voneinander.

Abbildung 5 Infrarotaufnahme zeigt den Temperaturverlauf in einer Kühlhaus-Türe mit und ohne Luftschleier
Quelle: www.afim-airdoor.com/de/vorteile-lufttur/

3. Methodik

Im Gebäudebereich ist der Luftschleier schon seit Jahrzehnten eine technische Lösung, welche gleichzeitig die Wärmeverluste reduzieren und die thermische Behaglichkeit verbessern soll.



Die wohl bekannteste Luftschleieranlage:

„Das verflixte 7. Jahr“: Marilyn Monroe und Tom Ewell

(© imago images / Everett Collection)

Abbildung 6 Der Luftschleier mit Betrieb von unten

3.1 Marktrecherche Luftschleier im Gebäudebereich

3.1.1 Übersicht der wichtigsten Systeme

Abbildung 7 zeigt die Produktpalette eines Schweizer Produzenten – ähnliche Produkte sind von weiteren Lieferanten erhältlich, die Funktionen sind aber mehrheitlich vergleichbar.



Abbildung 7 Übersicht der vier Haupt-Prinzipien von Türluftschleier Anlagen

Quelle: www.relag.ch/de/produkte-und-leistungen/systeme-und-anwendungsbereiche

Standard (1)

Die Raumluft wird über das Ansauggitter des Luftvorhangs angesaugt, durch den Luftfilter gereinigt, über den Wärmetauscher aufgewärmt und als kompakter Luftstrahl über die gesamte Türöffnung ausgeblasen.

Umkehrprinzip (2)

Generell gleich wie die Standardlösung, jedoch mit umgekehrter Luftwalze – Details gemäss nachfolgendem Vergleich.

Duo (3)

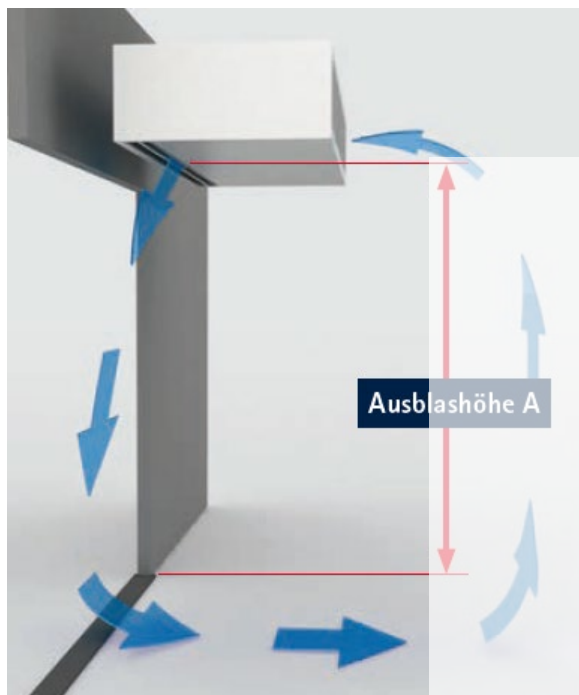
Türluftschleier mit hoher, doppelter Abschirmleistung durch eine äussere kalte und innere warme Luftwalze. Ideal bei Unterdruck, grossen Eingängen und Objekten mit schwierigen klimatischen Verhältnissen. Energiesparender doppelter Luftvorhang.

Seitliche Anlagen (4)

Seitlich angeordnete Torluftschleier mit horizontalem Luftauslass. Dadurch optimaler Abschirmeffekt auch im Fussbodenbereich. Ideal bei grossen Eingangshöhen, engen Platzverhältnissen und zum nachträglichen Einbau.

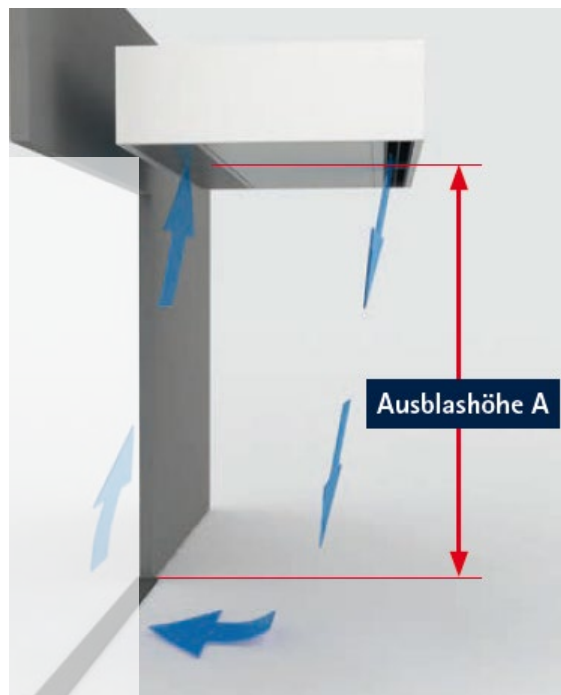
3.1.2 Vergleich der Systeme

Standard (1)



Standard-Einbau mit Luftansaugung aus Raumrichtung und Ausblas über der Tür. Ausbildung einer Luftschleierwalze, deren Drehsinn mit der einströmenden Kaltluft wirkt. Dadurch relativ große Zone erhöhter Luftbewegung im Türbereich. Eine Lösung für kleinere Räume, Gebäude ohne Unterdruck und Situationen, bei denen keine Dauerarbeitsplätze im Türbereich zugeordnet sind.

Umkehrprinzip (2)



Abschirmwalzen-Einbau mit Luftansaugung über der Tür und Ausblas im Raum. Ausbildung einer Abschirmwalze, deren Drehsinn entgegen der einströmenden Kaltluft wirkt. Dadurch deutliche Erhöhung der Abschirmleistung, Reduzierung der erforderlichen Abschirmluftmenge, des Geräuschpegels und Verkleinerung der Zone erhöhter Luftbewegung im Eingangsbereich.

Abbildung 8 Luftwalze eines Luftschleiers, Vergleich von Standard und Umkehrprinzip (Quelle: www.luftscheier.ch)

Da für den Nutzer nur die druckseitige Strömung (gerichteter Luftstrahl) wahrnehmbar ist, braucht die Standardlösung weniger Platz als mit dem Umkehrprinzip, weil der Luftstrom weiter in den Raum reicht. Noch mehr Raum benötigt die Kombination von beiden Lösungen (1) & (2), die Duo-Lösung. Eine Möglichkeit bei knappen Deckenhöhen ist der Einbau einer seitlichen Anlage. Die seitliche Lösung mit einem Gerät ergibt bei jedem Durchschreiten eine seitlich abgeschirmte Situation; die Abschirmung der ganzen Fläche wird durch die durchschreitende Person unterbrochen/aufgehoben. Um diesen Nachteil aufzuheben, ist eine beidseitige Aufstellung notwendig.

3.1.3 Geeignete Systeme zum Einsatz in Linienbussen

Resultierend aus dem Vergleich der Systeme, stechen die beiden Lösungen Standard und doppelte seitliche Anlage für eine Anwendung in einem Linienbus heraus. Beide Lösungen haben den Luftstrahl im Bereich der Tür und tangieren die Kunden nur beim Ein/Aussteigen. Bei der Standardlösung wird eine freie Deckenhöhe im Türbereich benötigt, welche mit dem Platzbedarf der Türautomatik zu koordinieren ist.

Zum Einbau einer doppelten seitlichen Anlage wird seitlich Platz benötigt und somit wertvoller Passagiererraum beansprucht. Durch die aufwendigere technische Lösung werden höhere Investitionskosten als bei der Standardlösung erwartet.

Die Lösung Umkehrprinzip wird ebenfalls zur Anwendung im Bus als ungeeignet eingestuft, da der Luftstrom weit in den Personenraum reicht und tendenziell von den durchlaufenden Personen abgeschirmt wird. Möglicherweise könnte dieser Nachteil durch eine spezielle Konstruktion mit Luftansaugung im Türmotoren-Bereich kompensiert werden.

Die Duo-Lösung wird durch den grossen Platzbedarf als weniger geeignet eingestuft.

3.2 Laborexperimente

Vor den Messungen der Türluftschleier im Bus wurden verschiedene Varianten im Labor untersucht und optimiert, sodass die Messungen effizienter mit den bereits voreingestellten Optimierungen durchgeführt werden konnten.

3.2.1 Messkonzept

Zur Messung der drei verschiedenen Türluftschleier von Solaris-Bus, TTL-Trend und einer Schlitzdüse (alle nach dem Standard Prinzip), wurde das folgende Messkonzept erstellt. Die Labormessungen wurden in der Klimakammer, welche im Grosslabor HLK der Hochschule Luzern steht, durchgeführt. Die Klimakammer und die Laborhalle können nur mit Plus Temperaturen betrieben werden. In der Klimakammer wurde eine Übertemperatur gegenüber der Laborhalle eingestellt. Für die experimentellen Untersuchungen wurde in der Klimakammer ein Busmodell aus Holz (OSB-Platten) gemäss Abbildung 9 mit der Breite des Buses von 2.4 m und einer verkürzten Länge von 5 m, sowie einer Türöffnung von 1.2 x 2.0 m nachgebaut. Alle Messungen im Labor wurden bei konstant offenen Türen durchgeführt. Die verschiedenen Türluftschleier wurden direkt über der Türöffnung montiert. Neun Heizlüfter, mit einer maximalen Heizleistung von je 2 kW und 180 m³/h Volumenstrom, wurden rechts neben der Tür platziert. Mit diesen Heizlüftern wurde die gewünschte Temperaturdifferenz zwischen der Aussentemperatur T_a und der Lufttemperatur im Bus T_B eingestellt. Die Lufttemperatur in der Klimakammer T_K wurde auf die gleiche Temperatur wie im Bus T_B eingestellt. Damit wird erreicht, dass kein Wärmefluss über die Wände vom Bus zur Klimakammer erfolgt und somit bei den Energie- und Leistungsmessungen nicht berücksichtigt werden muss. Mit der Platzierung der Heizlüfter in zwei Reihen mit Ausrichtung des Luftauslasses zur Mitte, wird der Einfluss der Luftströmung zur Türöffnung klein gehalten. Mit einem Ventilator wurden die beiden Türluftschleier Solaris und Schlitzdüse mit einem einstellbaren Volumenstrom aus der Fahrgastzone versorgt. Die Anordnung der Sensoren zur Messung der Temperaturen und Luftgeschwindigkeiten im Türbereich, die Heizlüfter und der Ventilator sind im Grundriss der Abbildung 10 dargestellt.

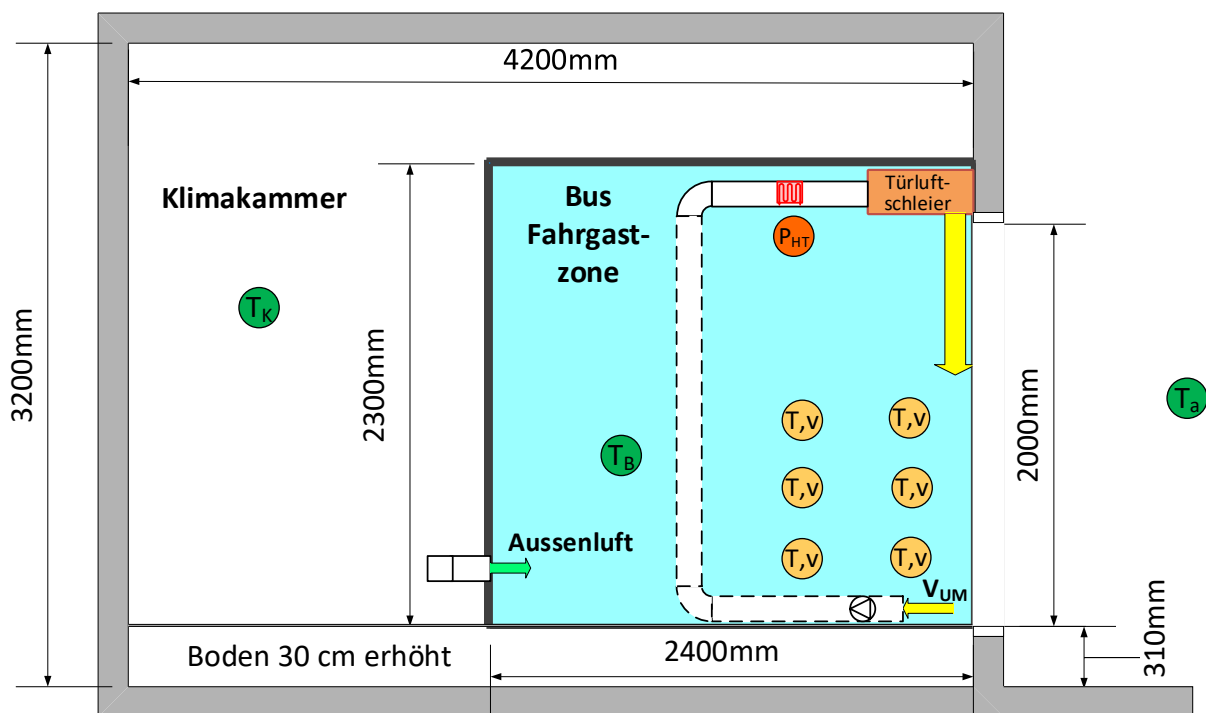


Abbildung 9 Querschnitt Klimakammer mit Buseinbau

Legende:

- T_a Aussentemperatur
- T_B Innenlufttemperatur im Busmodell
- T_K Lufttemperatur in der Klimakammer
- T,v Messstelle von Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit
- V_{UM} Volumenstrom Umluft
- P_{HT} Heizung Volumenstrom Umluft

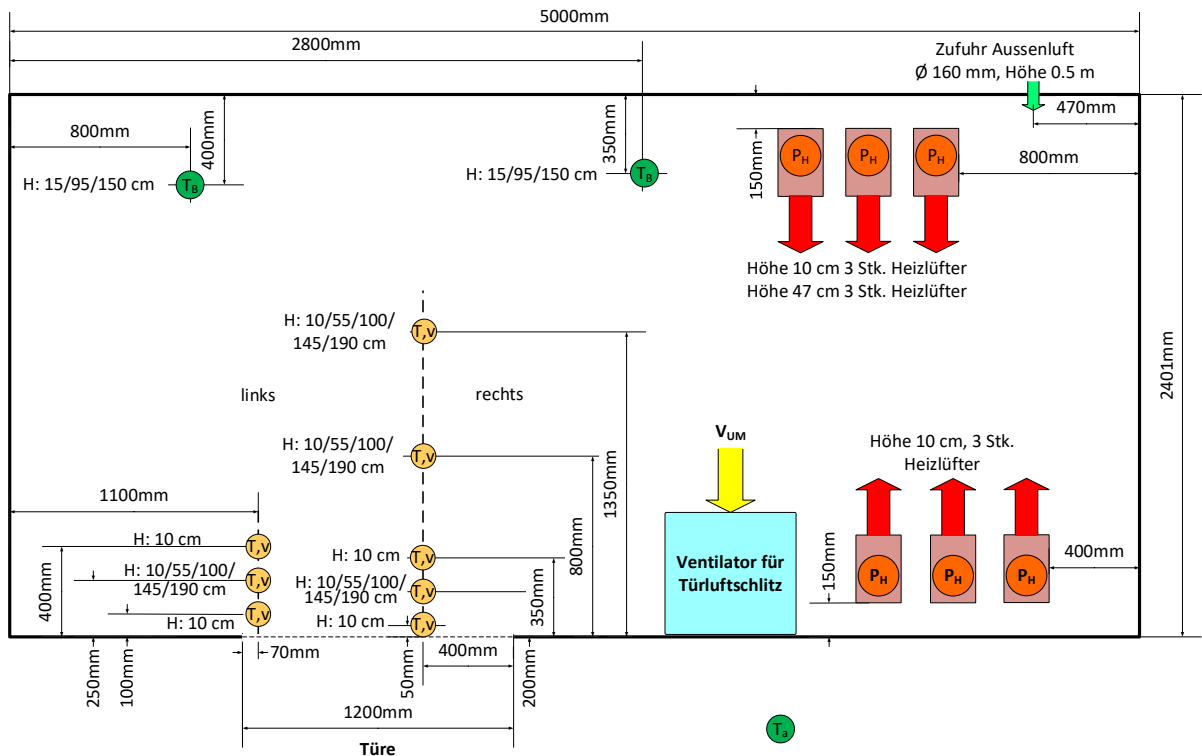


Abbildung 10 Grundriss Busmodell mit Platzierung der Sensoren und Heizlüftern

Legende:

T_a Lufttemperatur aussen

T_B Innenlufttemperatur im Busmodell

T, v 24 Messstellen Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit im Türbereich

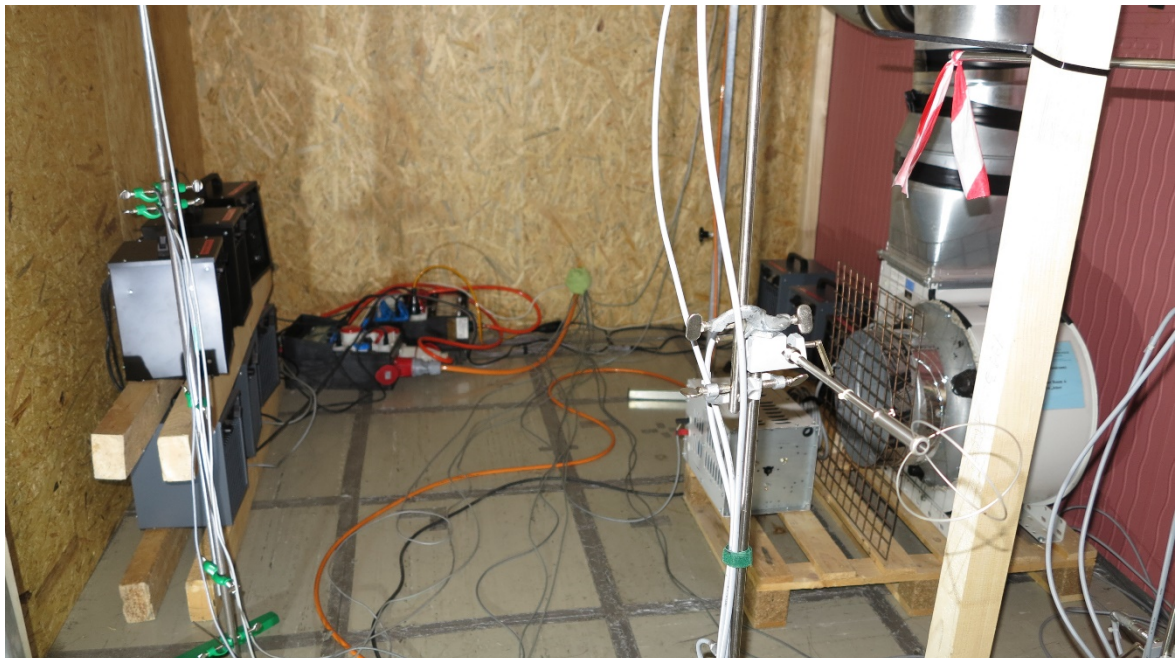


Abbildung 11 Aufbau der Heizlüfter und des Umluftventilators im Busmodell



Abbildung 12 Aufbau Luftgeschwindigkeitssensoren



Abbildung 13 Flies für IR-Aufnahmen

Das Schema der Messeinrichtung ist in Abbildung 14 dargestellt. Die Heizleistung im Bus wird vom Regler PI_1 auf eine konstante Differenz der Lufttemperatur ausserhalb des Buses und der Lufttemperatur im Bus geregelt. In der Klimakammer wird während den Messungen die gleiche Lufttemperatur T_K wie im Bus eingestellt, sodass der Wärmeaustausch zwischen dem Bus und der Klimakammer vernachlässigt werden kann.

Zur Messung des Energiebedarfs der Türluftschleier wird zuerst mit ausgeschaltetem Türluftschleier der Heizleistungsbedarf der Heizlüfter bei eingeschwungener konstanter Temperaturdifferenz zwischen der Businnenlufttemperatur T_B und der Aussenlufttemperatur T_a gemessen. Die Summe aller gemessenen Leistungen $P_H = P_{HL1} + P_{HL2} + P_{HL3} + P_L + P_{VAL}$ bei ausgeschaltetem Türluftschleier entspricht der Referenzmessung P_{R1} . Danach wird der Türluftschleier eingeschaltet und bei gleicher Temperaturdifferenz wieder im eingeschwungenen Zustand der Heizleistungsbedarf P_H und die Leistung des Türluftschleiers P_T gemessen. Die Summe aller gemessenen Leistungen bei eingeschaltetem Türluftschleier entspricht der Referenzmessung P_{R2} . Aus der Differenz der beiden Leistungsmessungen $P_{R2} - P_{R1}$ wird der Leistungsbedarf des Türluftschleiers berechnet. Da die Heizleistung bei offenen Türen abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen der Innen- und der Aussenlufttemperatur ist, wird die Messungen bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen durchgeführt und als Funktion der Temperaturdifferenz und dem Leistungsbedarf dargestellt. Mit der verfügbaren Heizleistung von 18 kW der Heizlüfter sind Messungen bis zu einer Temperaturdifferenz von ca. 15 K möglich.

Der Vorgang der Messung des Energiebedarfs wurde bei allen drei Türluftschleiern gleich durchgeführt. Es wurden verschiedene Einflussgrössen wie Volumenstrom der Aussenluft, Ausblaswinkel, Luftgeschwindigkeit und der Vorheizung der Zuluft zum Türluftschleier untersucht. Aus zeitlichen Gründen konnten nicht bei jedem Türluftschleier alle Varianten mit jedem Parameter gemessen werden.

Zur Visualisierung des Temperaturverlaufs in der Türöffnung wurde ein Flies in der Mitte der Öffnung gemäss Abbildung 13 in die Türöffnung montiert. Mit der Infrarotkamera wurde der Temperaturverlauf auf dem Flies aufgenommen. Das Flies wurde nur während den IR-Aufnahmen installiert, um die Luftvolumenströme während den Referenzmessungen nicht zu beeinflussen.

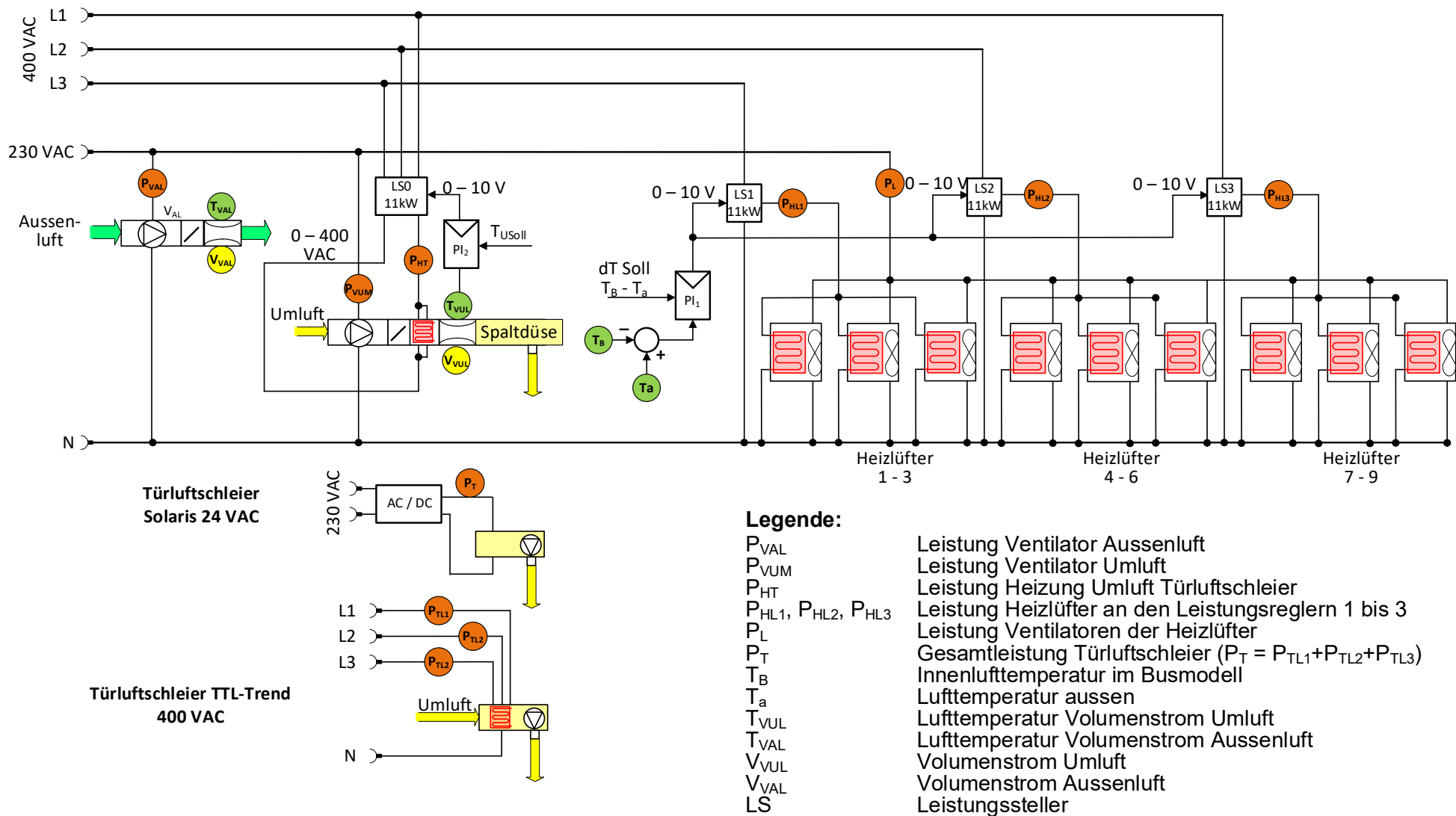


Abbildung 14 Schema Messungen Leistungsmessungen Türluftschleier

3.2.2 RTL-Trend Luftschleier (TLS1)

Der RTL-Trend Türluftschleier wurde auf ein Holzbrett, welches seitlich abgestützt wurde, montiert. Die Zuluft zum TLS1 wurde hinten aus dem Innenraum entnommen. Die Steuerung des Türluftschleiers wurde angepasst, sodass die Ventilatorstufe variabel in % eingestellt werden konnte. Die Kennlinien der Leistungsaufnahme, des Volumenstroms und der Förderdruck des Ventilators wurden bei den Ventilatorstufen von 15 bis 70 % im Labor mit dem Heizdrahtanemometer gemessen und in Abbildung 16 zusammengefasst. Die Ausblasrichtung konnte durch die verstellbaren Lamellen beim Luftauslass eingestellt werden. Mit einem Laserpointer wurde die Ausblasrichtung auf die untersuchten Abstände von der Türaussenkante nach innen mit den Abständen 0, 15 und 30 cm eingestellt. Weitere technischen Angaben zum Türluftschleier RTL-Trend sind im Anhang zu finden.



Abbildung 15 Bilder vom Einbau des Türluftschleiers TLS1

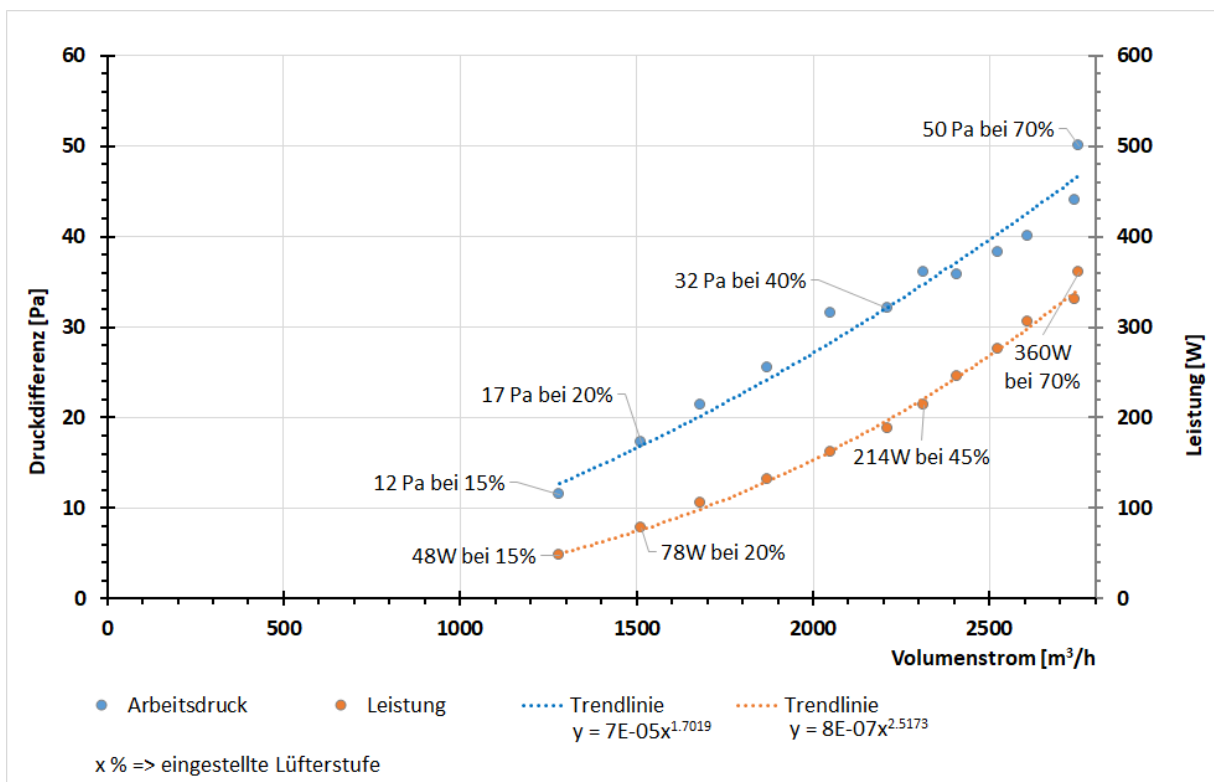


Abbildung 16 Kennlinien Leistung und Druckdifferenz vom TLS1

3.2.3 Schlitzdüse (TLS2)

Da die Platzverhältnisse im Bereich der Türautomatik tendenziell sehr eng sind, wurde der Einsatz einer technisch flexiblen Lösung als «Eigenbau» geprüft. Die einfache Schlitzdüse soll, entsprechend den herrschenden Platzverhältnissen, schlank eingebaut werden können – dazu hilft eine Split-Variante, welche den Schlitz und die Verteilkiste von der Ventilatoren-Lösung trennt.

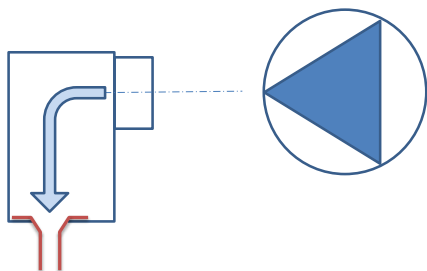


Abbildung 17 Funktionsprinzip vom TLS2 «Eigenlösung»

Um die Idee der Eigenlösung praktisch umzusetzen, wurde zuerst ein Testauslass auf dem «Grossen Luftkomponenten Prüfstand» (grosser LKP) ausgemessen. Es wurden bei verschiedenen Schlitzbreiten der Druckverlust und die Strahlgeschwindigkeit (am Boden) auf einer Distanz von 2 m gemessen.

Die Schlitzdüse ist verstellbar in der Breite und hat eine fixe Länge von 1.25 m. Ausgemessen wurden Schlitzbreiten von 6 bis 30 mm mit einer Mindest-Geschwindigkeit von 2 m/s im Bodenbereich.

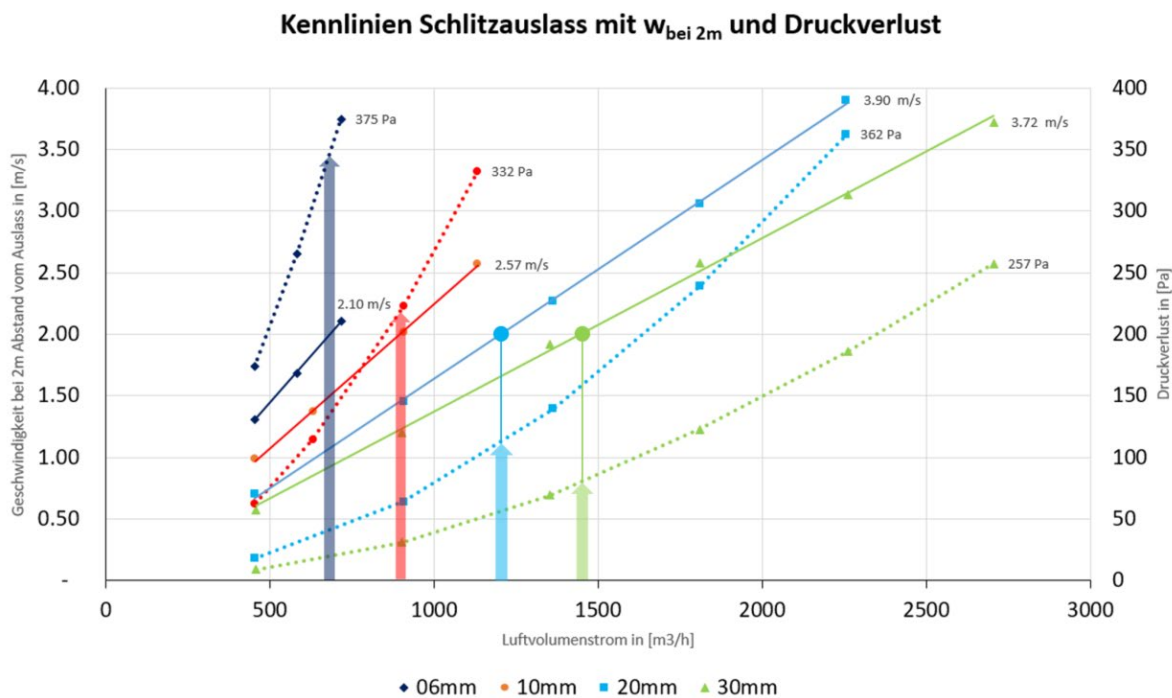


Abbildung 18 Messresultate der Schlitzdüse mit der Länge von 1.25 m, gemessen am grossen LKP

Mit den interpolierten Werten bei einer Bodengeschwindigkeit von ca. 2 m/s ergeben sich folgende Resultate für die berechnete hydraulische Leistung:

Schlitzbreite	mm	6	10	20	30
Volumenstrom	m³/h	700	900	1220	1440
Druckverlust	Pa	345	220	115	80
Hydraulische Leistung	Watt	67	55	39	32

Abbildung 19 Messwerte und Resultate der Interpolation bei 2 m/s Bodengeschwindigkeit

Da der Druckverlust im Quadrat mit der Erhöhung des Volumenstroms zu Buche schlägt, steigen die Druckverluste und so auch die hydraulische und die elektrische Leistung des Ventilators. Bei den durchgeführten Messreihen hatte eine grösserer Schlitzbreite eine tiefere Leistung zur Folge.

Der Türluftschleier mit Schlitzauslass wurde wie der TLS 1 vorne am Türanschlag positioniert mit der Ausblasrichtung senkrecht nach unten (Abbildung 20)



Abbildung 20 Einbausituation Schlitzauslass TLS2

3.2.4 System Solaris-Bus (TLS3)

Der im Postbus eingebaute Türluftschleier besteht aus zwei Radialventilatoren. Die beiden Ventilatoren decken nur ca. 2/3 der Türöffnung ab (Abbildung 21). Die Luft zum TLS3 wird aus dem Lüftungskanal der Zuluft im Bus entnommen. Die Zulufttemperatur wird abhängig von der Aussen- und Innentemperatur sowie weiteren Parametern durch die Klimaregelung eingestellt. Der Türluftschleier wird beim Öffnen der Tür eingeschaltet und bei geschlossener Tür wieder ausgeschaltet. Bei den Laborversuchen wurde die Tür nie geschlossen womit der TLS konstant eingeschaltet war. Für den Laborversuch wurden die beiden Ventilatoren im gleichen Abstand in eine Box aus Holz eingebaut. Die Box wurde von einem externen Ventilator mit Zuluft aus dem Busmodell versorgt. Der Volumenstrom konnte am externen Ventilator eingestellt werden. Mit dem Lufterhitzer in der Zuleitung, konnte die Zuluft zum TLS3 analog den Verhältnissen im Postbus angepasst werden. Zur Anpassung der Ausblasrichtung wurde die Box entsprechend gekippt.



Abbildung 21 Türluftschleier im Postbus



Abbildung 22 Ventilatoren vor dem Einbau in die Box



Abbildung 23 TLS Solaris eingebaut



Abbildung 24 Anschluss der Zuluft der TLS-Box

3.3 Messungen am Bus in der Klimakammer

In den Laborversuchen konnte die strömungs- und wärmetechnischen Phänomene eines Türluftschleiers in einem Bus nur modellhaft und statisch untersucht werden. Vor allem konnten der Klimaregler, die Zuluftvolumenströme und die Druckverhältnisse im Labor nur vereinfacht umgesetzt werden. Deshalb wurde der Türluftschleier ergänzend zu den Labormessungen der HSLU unter möglichst realen Bedingungen auch in der Klimakammer Olten gemessen.

Zur Messung der Wärmeleistung wurde im Flüssigkeitskreislauf eine Durchflussmessung mit den beiden Temperatursensoren im Vor- und Rücklauf gemäss Abbildung 25 und Abbildung 27 eingebaut. Der Flüssigkeitskreislauf wurde mit dem Fluid G30 Glysantin 50/50 gefüllt. Bei der Berechnung der Wärmeleistung wurden die Stoffeigenschaften entsprechend berücksichtigt. Die Betriebsart der Heizung und Kühlung des Fahrgastraumes wurde wie im Linienbetrieb auf automatisch eingestellt und der Dieselmotor im Leerlauf betrieben. Da die Abwärme des Dieselmotor im Leerlauf zur Beheizung bei grösserem Wärmebedarf nicht ausreicht, wurde mit der Standheizung entsprechend nachgeheizt, sodass die normale Betriebstemperatur von ca. 80 °C erreicht werden kann. Die Leistungsaufteilung der Radiatoren im Fussbereich und der Luftheizung wird vom Klimaregler abhängig von verschiedenen Parametern automatisch vorgenommen. Die Zuluft der Türluftschleier wird direkt aus dem Luftkanal entnommen.

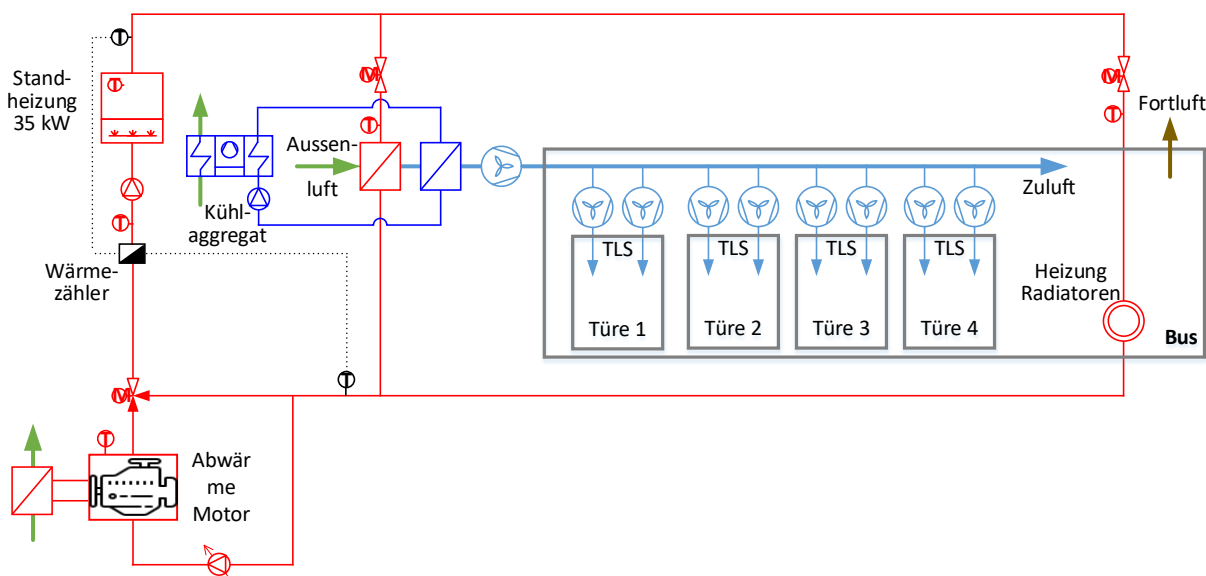


Abbildung 25 Prinzipschema HLK mit Wärmehähler im Postbus

Die Ermittlung des Leistungsbedarfs der Türluftschleier wurde wie bereits im Labor aus der Differenz der beiden Messungen mit eingeschaltetem und mit ausgeschaltetem Türluftschleier berechnet. Dazu wurde nach Erreichen der gewünschten Aussentemperatur in der Klimakammer und eingeschwungenen Temperaturen im Bus die Referenzmessung P_{R1} bei aktivem Türzyklus und ausgeschaltetem Türluftschleier durchgeführt. Anschliessend wurde der Türluftschleier eingeschaltet und die zweite Messung P_{R2} durchgeführt. Die Differenz der beiden Leistungen $P_{R2} - P_{R1}$ ergibt den Leistungsbedarf des Türluftschleiers. Dieser Vorgang wurde bei fünf verschiedenen Aussentemperaturen gemäss Abbildung 28 durchgeführt. Die Türen wurden mittels programmierbarem Relais ein- und ausgeschaltet. Es wurde der gleiche Türzyklus (Abbildung 30) wie bei den Messungen «Energieverlust durch Türöffnungen bei Linien-Bussen» verwendet. Die Begründung zur Wahl dieses Zyklus ist in [1] zu entnehmen.

Im Fahrgastraum wurden zur Komfortbeurteilung mehrere Lufttemperaturen in den Höhen 0,1, 1,1 und 1,7 m gemessen. Zur Beurteilung von Zugluft wurden an der Eingangstüre 2 Luftströmungssensoren montiert. Die Messung der Luftströmung erfolgte als 10 Minuten Mittelwert im eingeschwungenen Zustand. Die Anordnung der Fühler ist in Abbildung 29 beschrieben.

Der Temperaturverlauf wurde wie bereits in den Laborversuchen mit einem temporär für diese Messung angebrachten Fliess bei der Eingangstüre 3 ausgeführt.



Abbildung 26 Abgasabsaugung

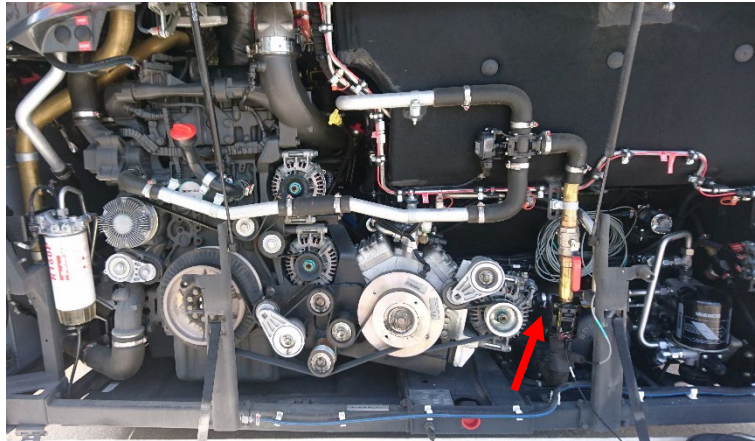


Abbildung 27 Einbau Durchflussmessung (roter Pfeil)

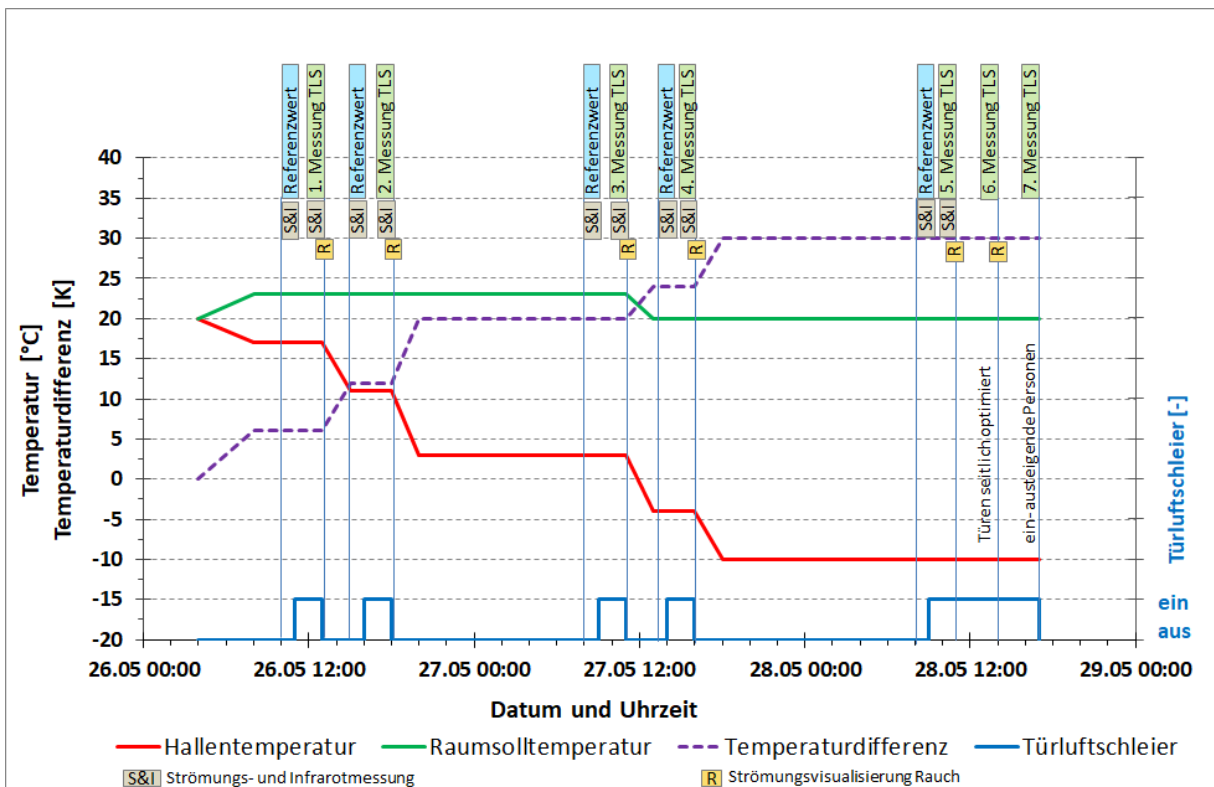


Abbildung 28 Ablauf Messung Energiebedarf Türluftschleier

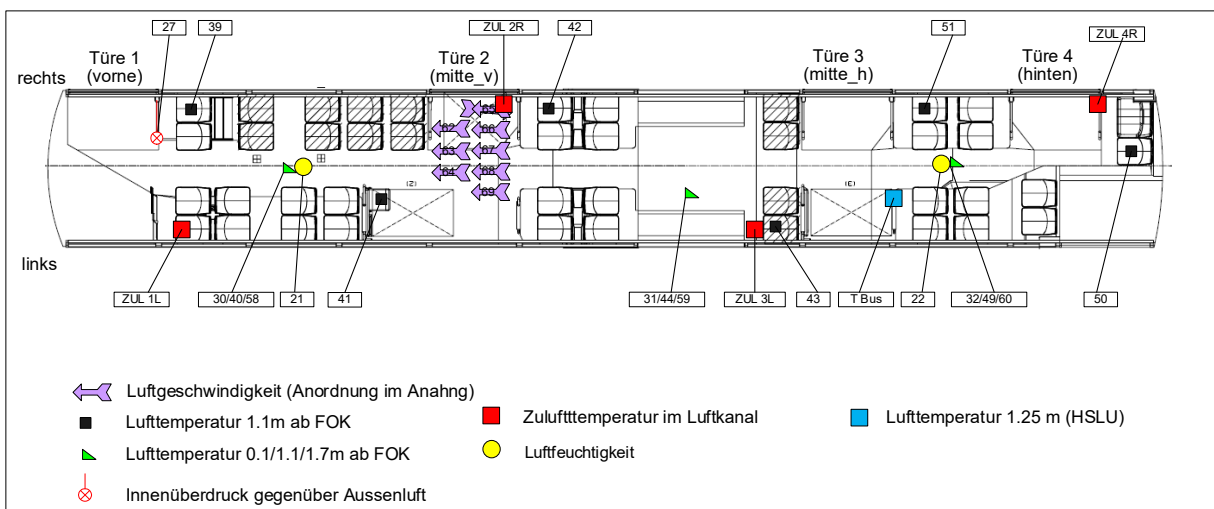


Abbildung 29 Messpunktplan

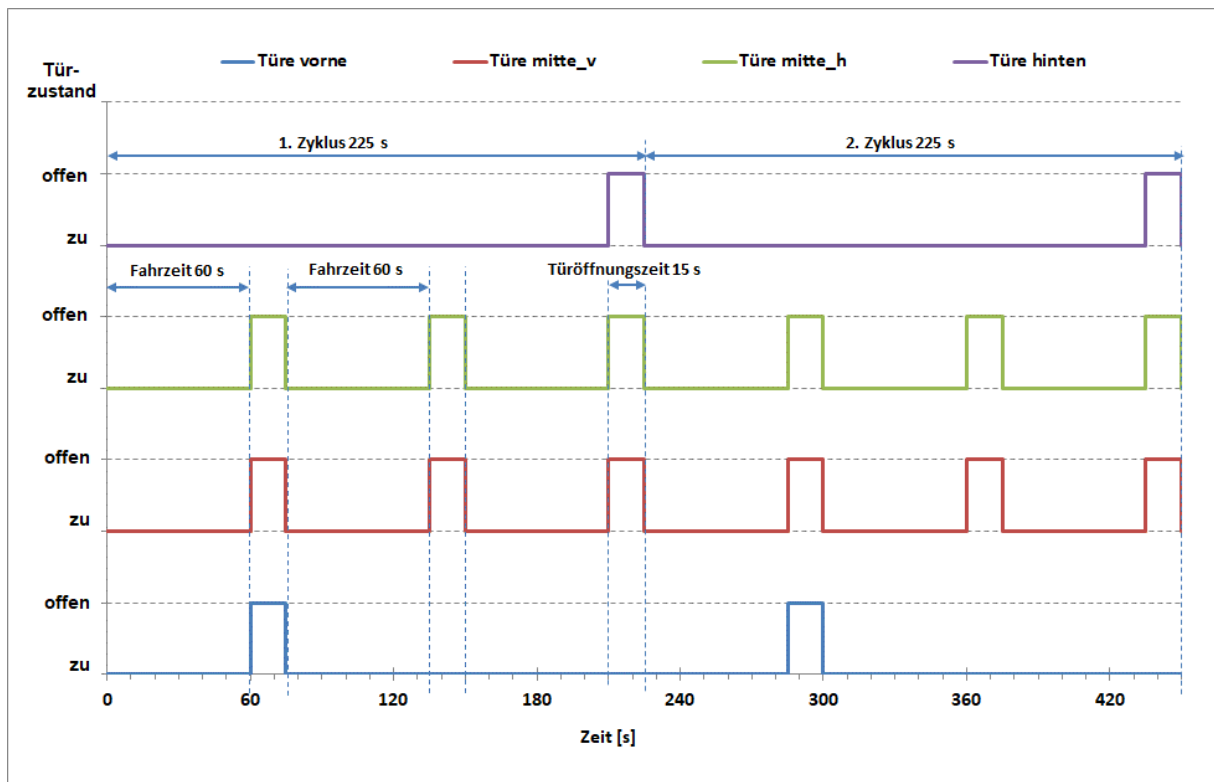


Abbildung 30 Türöffnungsprogramm

4. Ergebnisse

4.1 Laborexperimente

Im Labor wurden die drei verschiedenen TLS (TLS1: TTL-Trend, TLS2: Schlitzauslass, TLS3: Solaris) mit verschiedenen Einstellungen gemessen und die Ergebnisse in Abbildung 31 in Funktion der Temperaturdifferenz Businnenlufttemperatur und der Lufttemperatur aussen zusammengefasst. Ohne TLS wurde bei allen Temperaturdifferenzen mehr Leistung benötigt als mit einem TLS. Die Einsparungen sind für den TLS1 mit unterschiedlichen Volumenströme sowie für den TLS2 und TLS3 in Abbildung 32 dargestellt. Mit Ausnahme bei der Temperaturdifferenz 5 K wurden die grössten Einsparungen beim TLS3 (Solaris) gemessen, obwohl der Luftstrahl vom TLS3 nicht die ganze Türbreite abdeckt. Die Hauptanwendung des TLS1 sind für Eingänge von grösseren Gebäuden oder Verkaufsfächen nahe einem Eingang. In diesen Anwendungen können erhebliche Druckdifferenzen zwischen dem Innen- und Aussenraum entstehen. Deshalb werden diese Geräte für grössere Luftvolumenströme ausgelegt. Damit der Einsatz der TLS auch bei erhöhten Druckdifferenzen sinnvoll ist, wird vom Lieferant des TLS1 empfohlen, die Strömungsgeschwindigkeit 10 cm ab Boden auf ca. 2 m/s einzustellen. Der TLS1 erreichte diese Strömungsgeschwindigkeit mit 2700 m³/h mit der Lüfterstufe 70 %. Die Messungen zeigen, dass der Volumenstrom einen grossen Einfluss auf das Einsparpotenzial der Türluftschleier hat. Bei der Temperaturdifferenz von 15 K konnte durch die Reduktion des Volumenstroms am TLS1 von 2700 m³/h auf 1500 m³/h 11% Energie eingespart werden. Mit dem kleinsten Volumenstrom vom TLS3 von Solaris wurden die grössten Einsparungen im Labor gemessen. In den Labormessungen wurde der Druckunterschied zwischen dem Innenraum und aussen nicht untersucht. Im Betrieb von TLS im Bus ist von einer Druckdifferenz ca. 5 Pa auszugehen, da die Fortluft mit Überströmern nach aussen geführt wird und andere wetterbedingte Einflüsse wie Wind zu berücksichtigen sind.

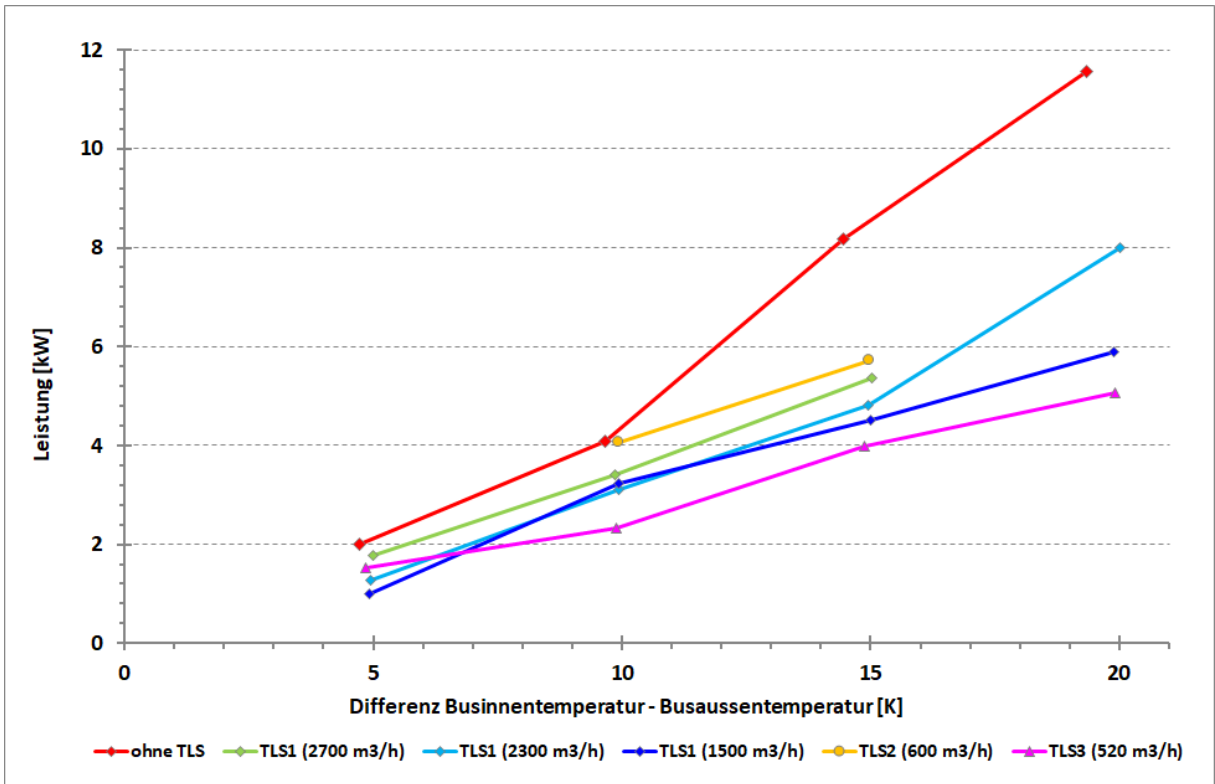


Abbildung 31 Leistungsbedarf in Funktion ($T_a - T_i$) bei unterschiedlichen Volumenströmen

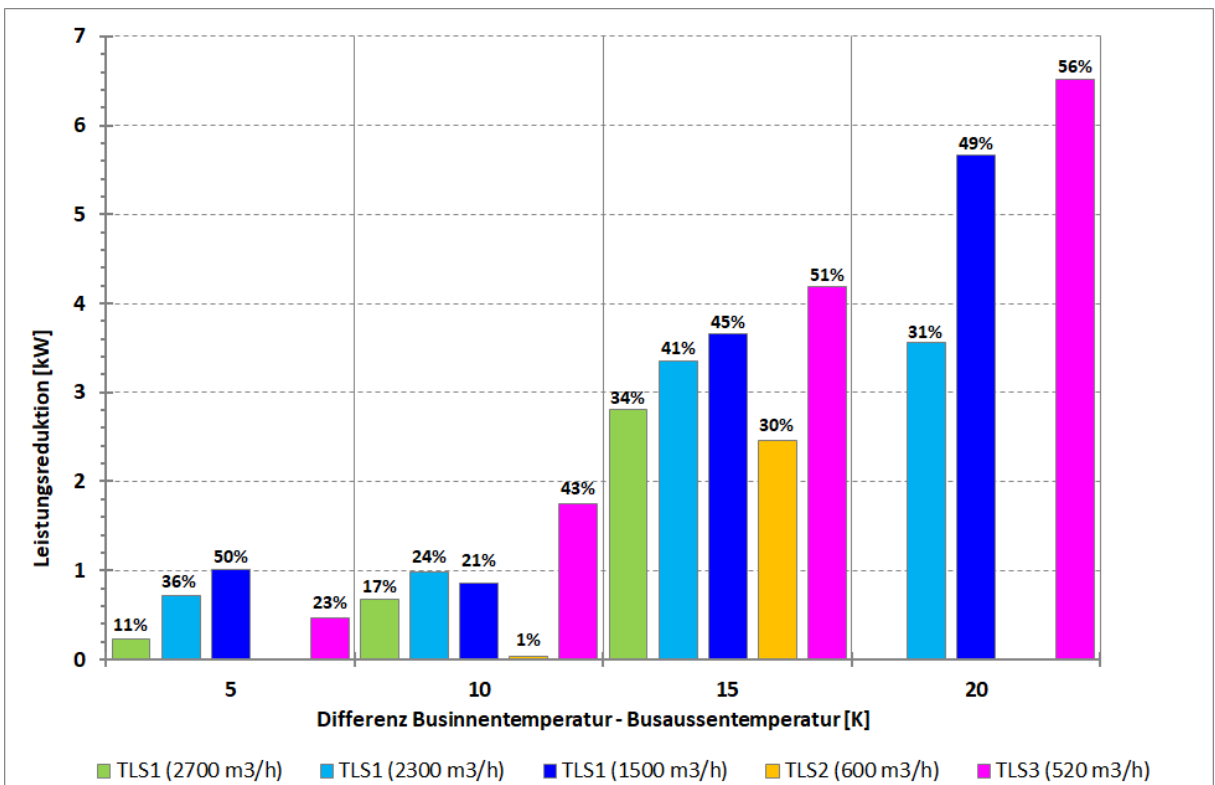


Abbildung 32 Leistungsreduktion mit Türluftschleiern bei unterschiedlichen Volumenströmen (absolut und relativ)

Bei der Anwendung von Türluftschleiern hat die Ausblasrichtung des Luftstroms einen grossen Einfluss auf den Energiebedarf. Der TLS1 verfügte über Lamellen zum Einstellen der Ausblasrichtung. Mit der Einstellung, dass der Luftstrahl direkt auf die Türkante trifft, wurde mehr Energie als bei den Einstellungen weiter innen gemessen. In Abbildung 33 wird die erforderliche gesamte Heizleistung mit unterschiedlichen Ausblasrichtungen bei der Temperaturdifferenz 15 K bei 2700 m³/h Volumenstrom dargestellt. Es wurde bei der Einstellung mit der Ausrichtung von 30 cm weiter innen 27 % weniger Heizleistung benötigt als mit der Ausrichtung auf die Türkante.

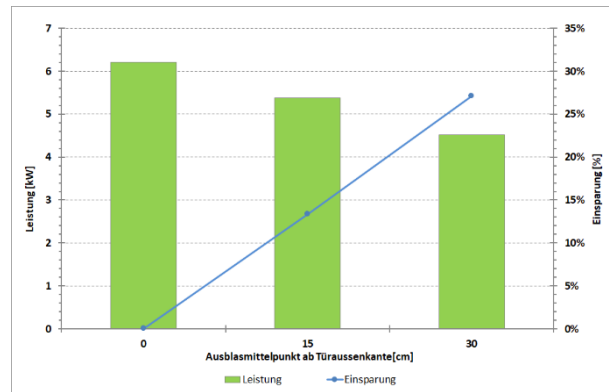


Abbildung 33 Einfluss Ausblasrichtung am TLS1

Der Einfluss eines zusätzlichen Aussenluftvolumenstromes, welcher durch die Lüftungsanlage ohne Luftrückführung im Bus entsteht, wurde mit dem TLS1 bei der Temperaturdifferenz 15 K bei 2700 m³/h Volumenstrom gemessen (Abbildung 34). Die kalte Aussenluft wird im Bus auf den Sollwert aufgeheizt und strömt als warme Luft in der gleichen Menge wie der kalte Aussenluftvolumenstrom bei der Tür wieder nach aussen. Die Berechnung ergab, dass für das Erwärmen um 15 K des 440 m³/h Aussenluftvolumenstroms 1300 W Leistung erforderlich ist. Gemessen wurde 1170 W mehr Leistung. Die etwas grösseren Abweichungen der Berechnung gegenüber der Messung bei 220 m³/h entspricht nicht ganz dem erwarteten linearen Verhalten.

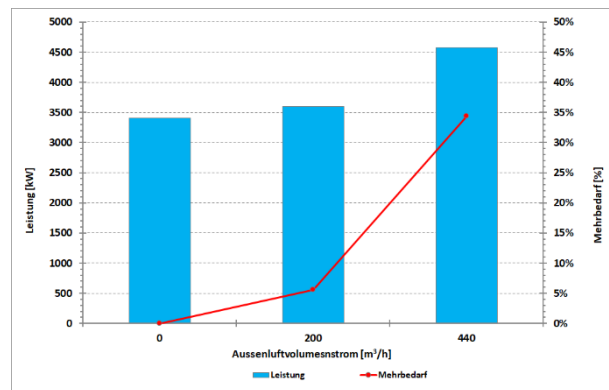


Abbildung 34 Einfluss Aussenluftvolumenstrom am TLS1

Der Einfluss der Luftvorwärmung wurde mit dem TLS2 untersucht. Im TLS2 wurde die Zuluft, welche aus dem Bus entnommen wurde, um ca. 5 K erwärmt. Der Einfluss der Vorwärmung der Zuluft wurde mit dem Volumenstrom 620 m³/h und 770 m³/h durchgeführt. Die Messungen (Abbildung 35) zeigen keinen wesentlichen Unterschied beim Leistungsbedarf bei Vorheizung der Zuluft.

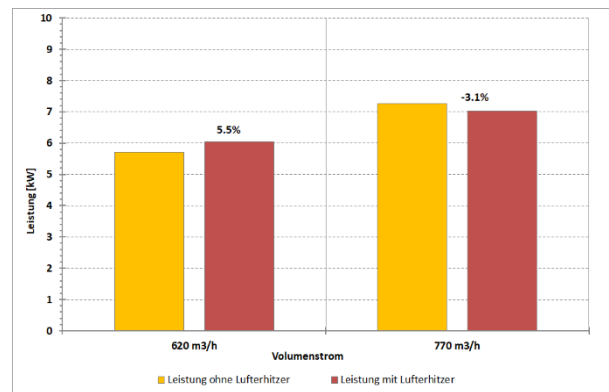


Abbildung 35 Einfluss Lufterwärmung am TLS2

Der Einfluss der Spaltbreite wurde mit dem TLS2 untersucht. Dieses Gerät hatte einen deutlich schmäleren Luftaustritt als die beiden anderen Geräte (TLS1 70 mm, TLS2 variabel, TLS3 40 mm). Da der Druckverlust vom Ventilator mit der langen Luftführung bis zum Luftaustritt relativ gross war, konnte mit dem eingesetzten Ventilator nur Volumenströme bis 770 m³/h gemessen werden. Der Druckverlust im TLS2 ist bei schmalen Luftaustritten recht gross. Um diesen Druckverlust aufzubringen sind spezielle Ventilatoren erforderlich. Beim Volumenstrom 620 m³/h benötigte der Ventilator 340 W und bei 770 m³/h 760 W. Eine Verbreiterung der Schlitzdüse von 6 mm auf 18 mm zeigte einen um 22 % geringeren Leistungsverbrauch.

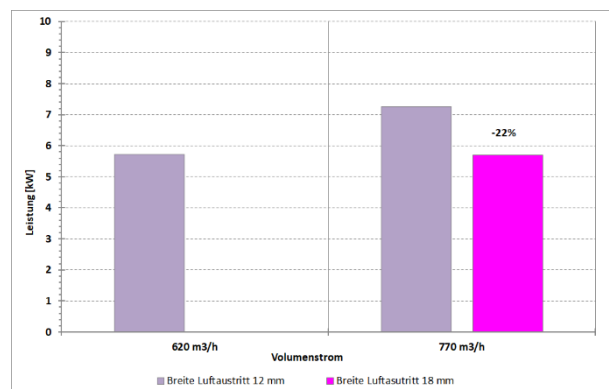


Abbildung 36 Einfluss Spaltbreite am TLS2

Im Busmodell wurde keine Zuluft von der Decke realisiert. Die Durchmischung der Luft erfolgte nur durch die seitlich angeordneten Heizlüfter auf Fuss- und Kniehöhe mit je 180 m³/h Volumenstrom. Bei ausgeschaltetem TLS bildet sich in der untersten Luftschicht (0.15 m) ein Kaltluftsee, der nur wenige Kelvin über der Aussentemperatur lag. Bei 1'500 m³/h wurden auf der Höhe 1.5 m links und rechts stark unterschiedliche Temperaturen gemessen, was mit unterschiedlichen lokalen Luftströmungen zu begründen ist. In Abbildung 37 ist der Verlauf der Temperaturschichtung vom TLS1 bei unterschiedlichen Volumenströmen dargestellt.

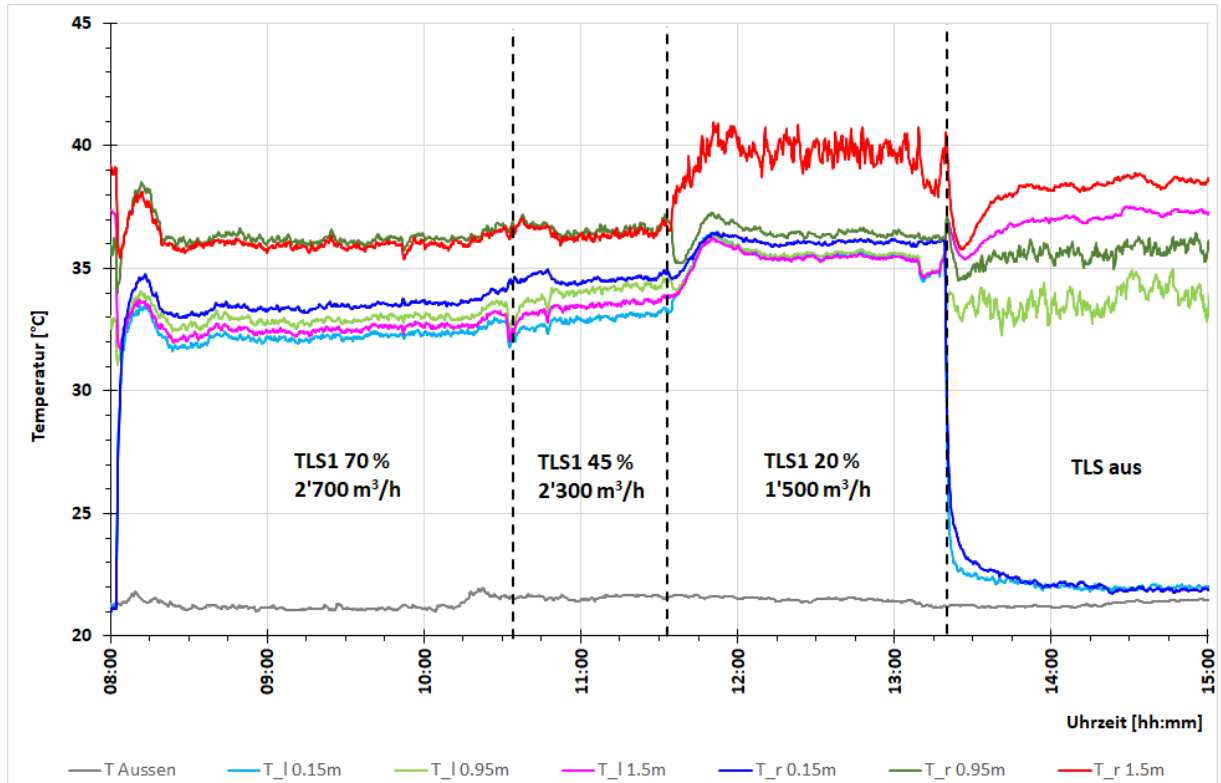


Abbildung 37 Temperaturschichtung mit TLS1 bei dT 15K bei unterschiedlichem Volumenstrom

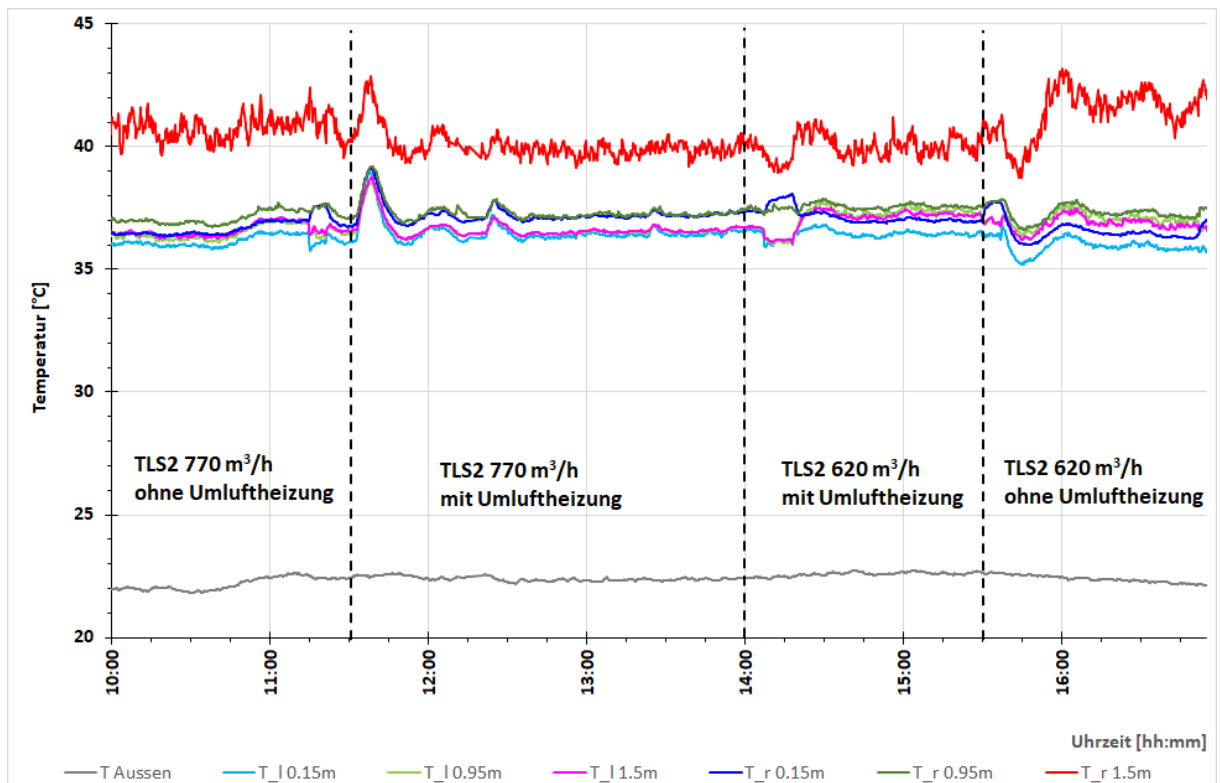


Abbildung 38 Temperaturschichtung mit TLS2 bei dT 15K

Die Temperaturschichtung mit dem Schlitzauslass TLS2 zeigte bei deutlich kleinerem Volumenstrom ähnliche Werte wie bei den Messungen am TLS1. Auch beim TLS2 wurde auf der rechten Seite auf der Höhe 1.5 m eine leicht höhere Temperatur gemessen (Abbildung 38). Mit dem kleinsten Volumenstrom von 520 m³/h von Solaris wurde die kleinste Temperaturschichtung von ca. 2 K im Türbereich gemessen (Abbildung 39).

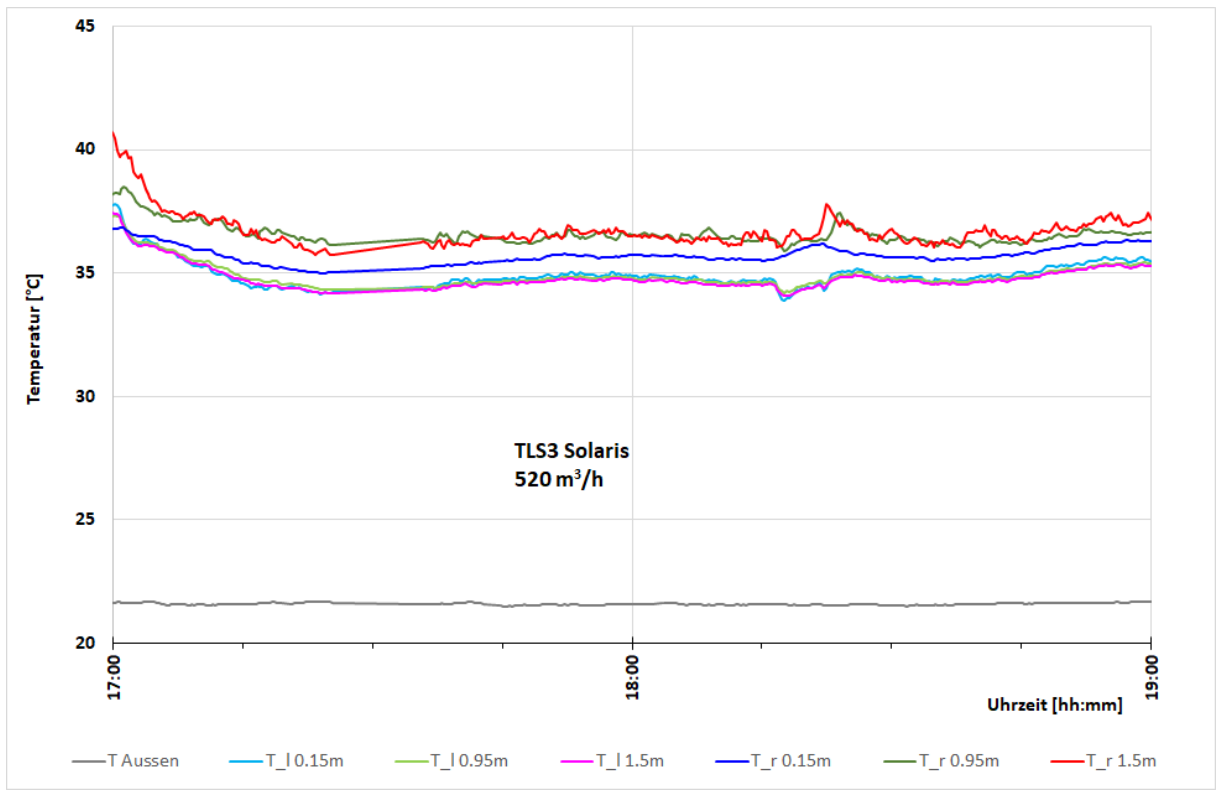


Abbildung 39 Temperaturschichtung mit TLS3 bei dT 15K

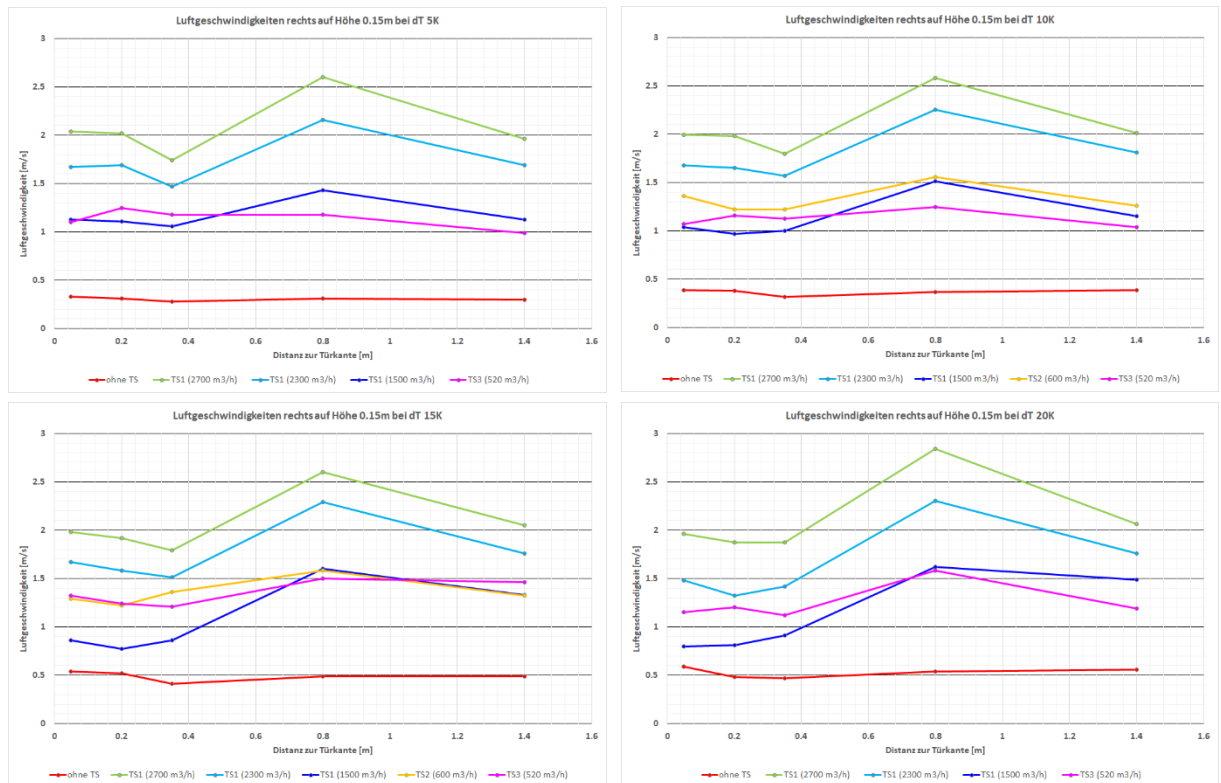


Abbildung 40 Luftgeschwindigkeiten auf Fushöhe der TLS

Die Luftgeschwindigkeiten im Türbereich sind auf Fushöhe (0.15 m) der rechten Messstelle in Abbildung 40 bei den Temperaturdifferenzen von 5 bis 20 K dargestellt. Die Temperaturdifferenz hatte keinen

wesentlichen Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit auf Fushöhe. Ohne TLS beträgt die Luftgeschwindigkeit ca. 0.5 m/s, unabhängig von der Distanz zur Türkante. Die Strömungsgeschwindigkeit ist abhängig vom Volumenstrom und vom Luftaustritt des TLS.

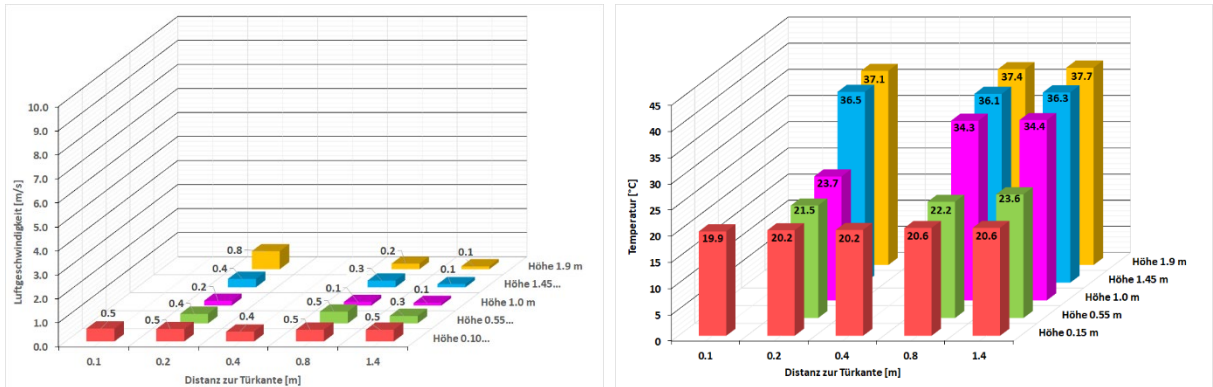


Abbildung 41 Strömungsgeschwindigkeiten (links) und Temperaturen im Türbereich (rechts) ohne TLS

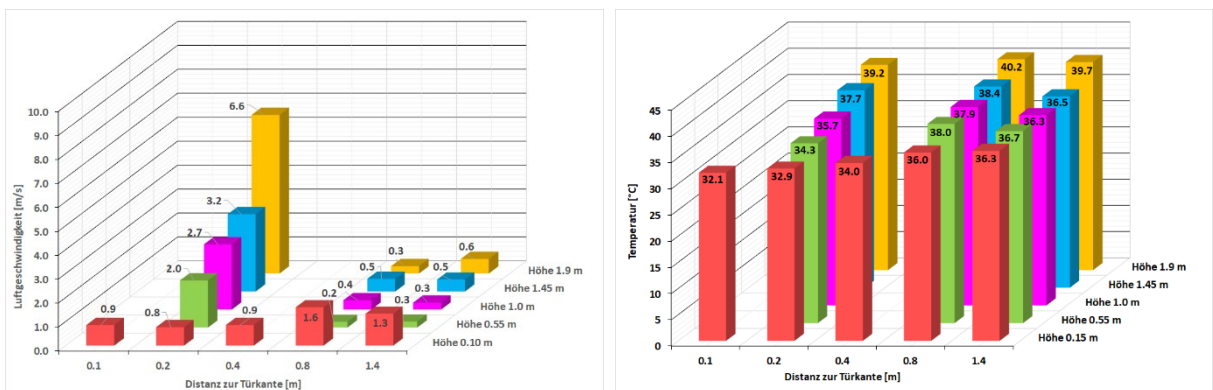


Abbildung 42 Strömungsgeschwindigkeiten (links) und Temperaturen im Türbereich (rechts) mit TLS1 1500 m³/h

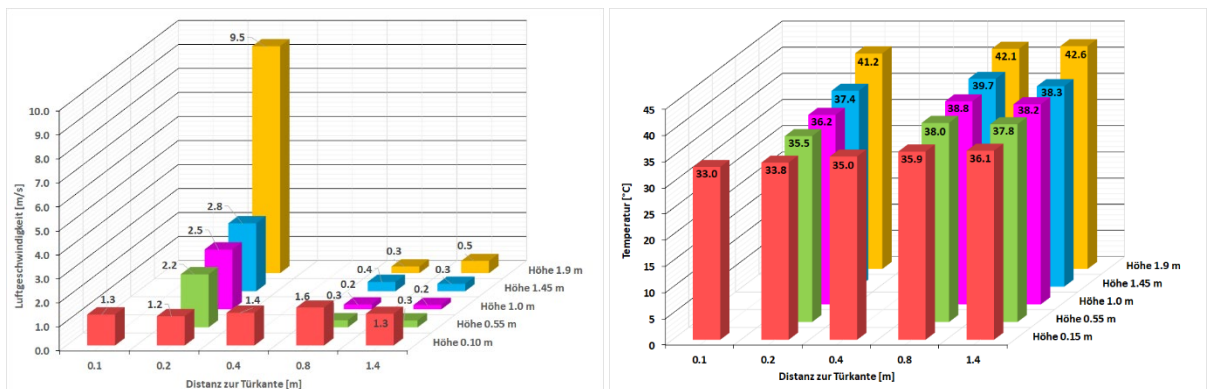


Abbildung 43 Strömungsgeschwindigkeiten (links) und Temperaturen im Türbereich (rechts) mit TLS2 620 m³/h

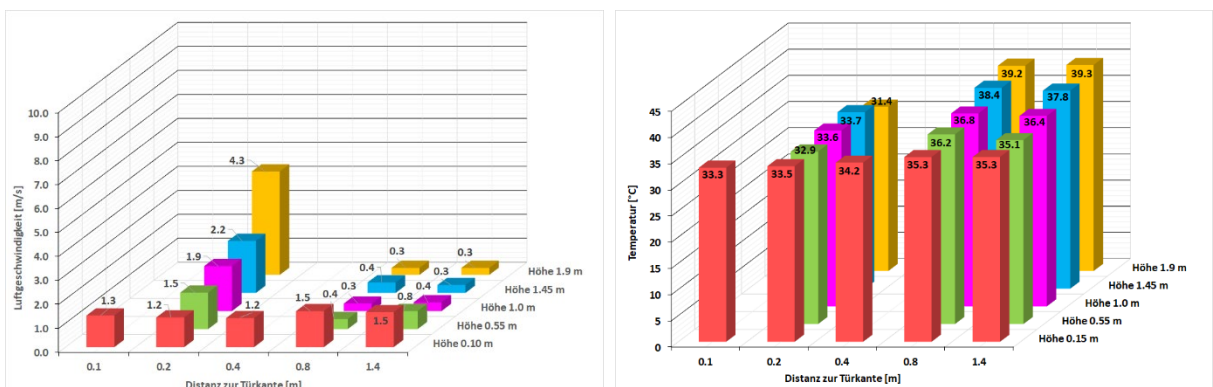


Abbildung 44 Strömungsgeschwindigkeiten (links) und Temperaturen im Türbereich (rechts) mit TLS3 520 m³/h

In der Abbildung 41 bis Abbildung 44 sind die Strömungsgeschwindigkeiten auf allen gemessenen Höhen und Distanzen zur Türkante für alle TLS bei 15 K Temperaturdifferenz zusammengefasst. Die grössten Strömungsgeschwindigkeiten wurden im Abstand 0.2 m zur Türkante im oberen Türbereich auf der Höhe 1.9 m gemessen. Die zugehörigen Temperaturen sind in der rechten Grafik dargestellt. Ohne TLS ist die Temperaturschichtung mit ca. 17 K am grössten. (Abbildung 41). Beim Einsatz der TLS wurden deutlich kleinere Temperaturschichtungen im Bereich von 5 K gemessen.

Die Temperaturschichtung im Türbereich ist auch in den Infrarotaufnahmen gut zu erkennen. Abbildung 45 und Abbildung 46 zeigen bei 15 K Temperaturunterschied den Temperaturverlauf mit unterschiedlichen Volumenströmen mit dem TLS1. Ohne TLS bleibt der untere Türbereich kalt. Es strömt unten viel kalte Luft in den Bus, welche oben als warme Luft wieder weit nach aussen ausströmt. Mit eingeschaltetem TLS1 bei 2700 m³/h Volumenstrom wird eine deutlich schärfere Trennung über den ganzen Türbereich der warmen Innenluft an der Türkante erreicht. Der Fussboden bleibt bis zur Türkante warm. Wird der Volumenstrom weiter reduziert, wird der untere Bereich kälter. Im oberen Türbereich bleibt die scharfe Trennung der Innen- und Aussenluft bestehen.

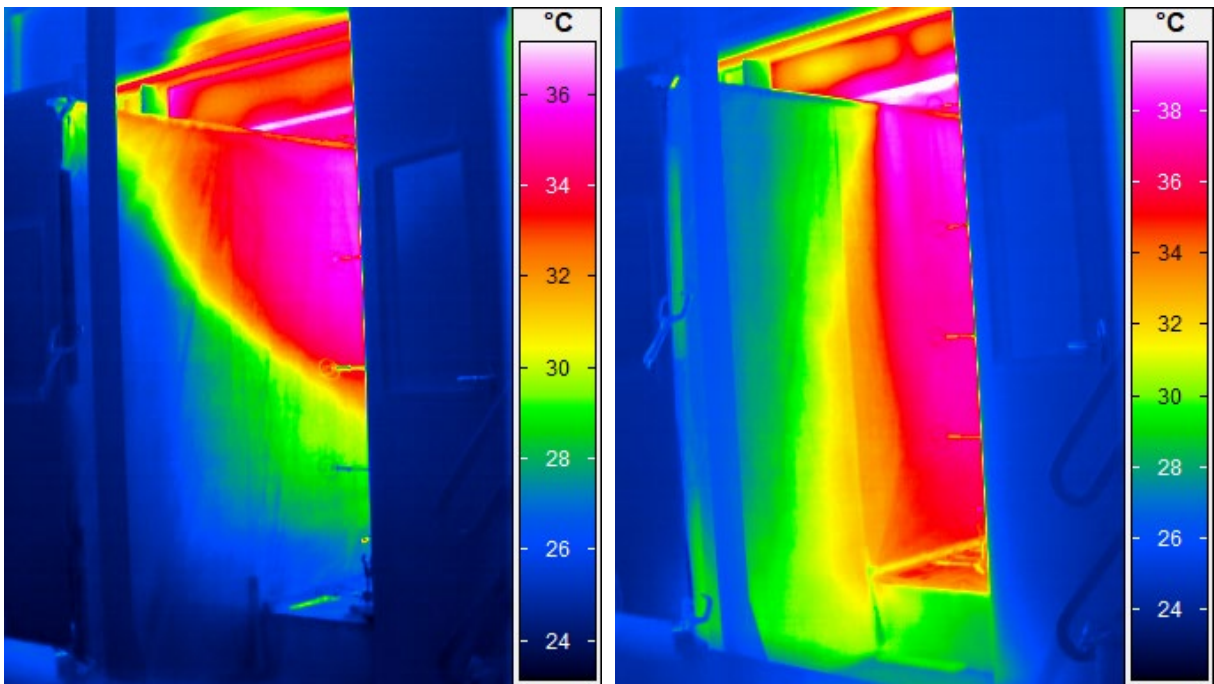


Abbildung 45 Temperaturverlauf bei ΔT 15 K; links TLS aus, rechts TLS1 2700 m³/h

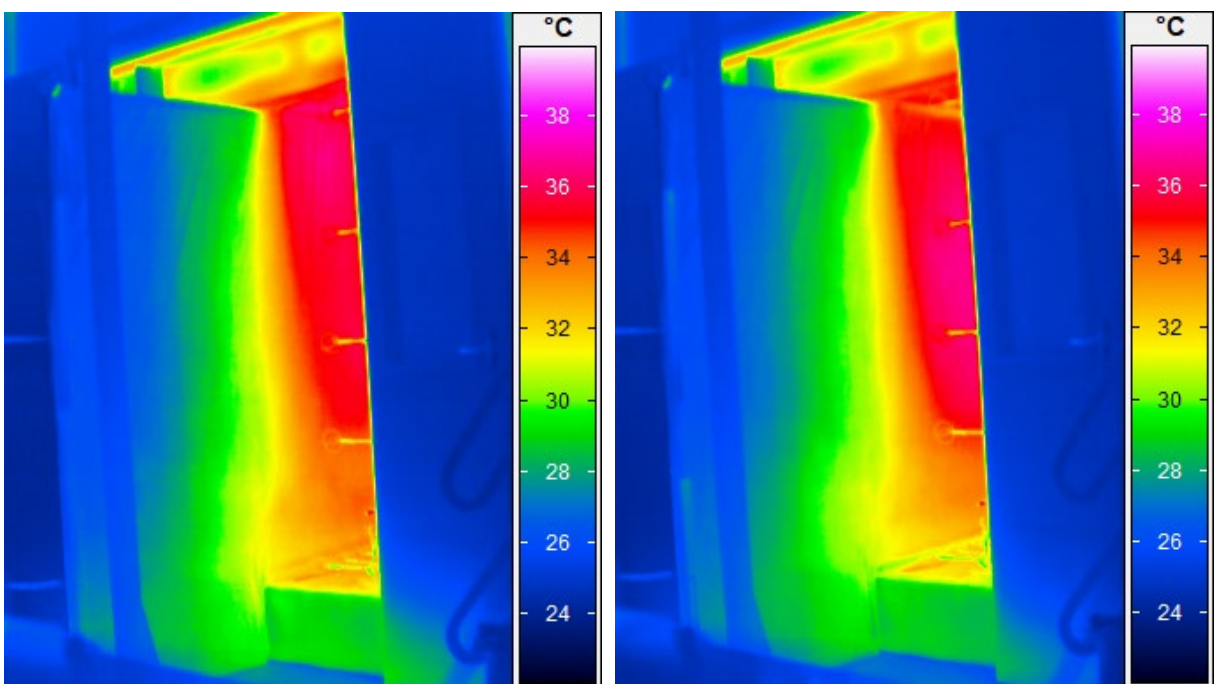


Abbildung 46 Temperaturverlauf bei ΔT 15 K mit TLS1; links 2300 m³/h, rechts 1500 m³/h

In der Abbildung 47 und Abbildung 48 werden die drei TLS bei der Temperaturdifferenz von 10 K miteinander verglichen. Ohne TLS strömt unten wie bereits bei 15 K Temperaturdifferenz viel kalte Luft in den Bus. Die roten Punkte im unteren Bereich zeigen die Heizlüfter im Hintergrund, was für die Betrachtung im Türbereich nicht relevant ist. Der Schlitzauslass (TLS2) zeigt die schärfste Trennung der Luftschichten bis kurz vor der Türkante. Beim TLS3 ist die Trennung der beiden Luftmassen nur im oberen Drittel gut. Beim TLS1 mit dem deutlich grösseren Volumenstrom ist die Trennung der beiden Luftmassen etwas besser als beim TLS3, aber schlechter als beim TLS2. Der Energiebedarf kann nicht direkt aus diesen Bildern abgeleitet werden, denn zur Abschätzung der Leistung fehlt die Information der ein- und ausströmenden Luftvolumenströme. Gemäss Abbildung 31 benötigt der TLS3 bei der gleichen Temperaturdifferenz von 10 K am wenigsten Energie und der TLS2 nur 1 % weniger als ohne Türflussschleier der Abbildung 47.

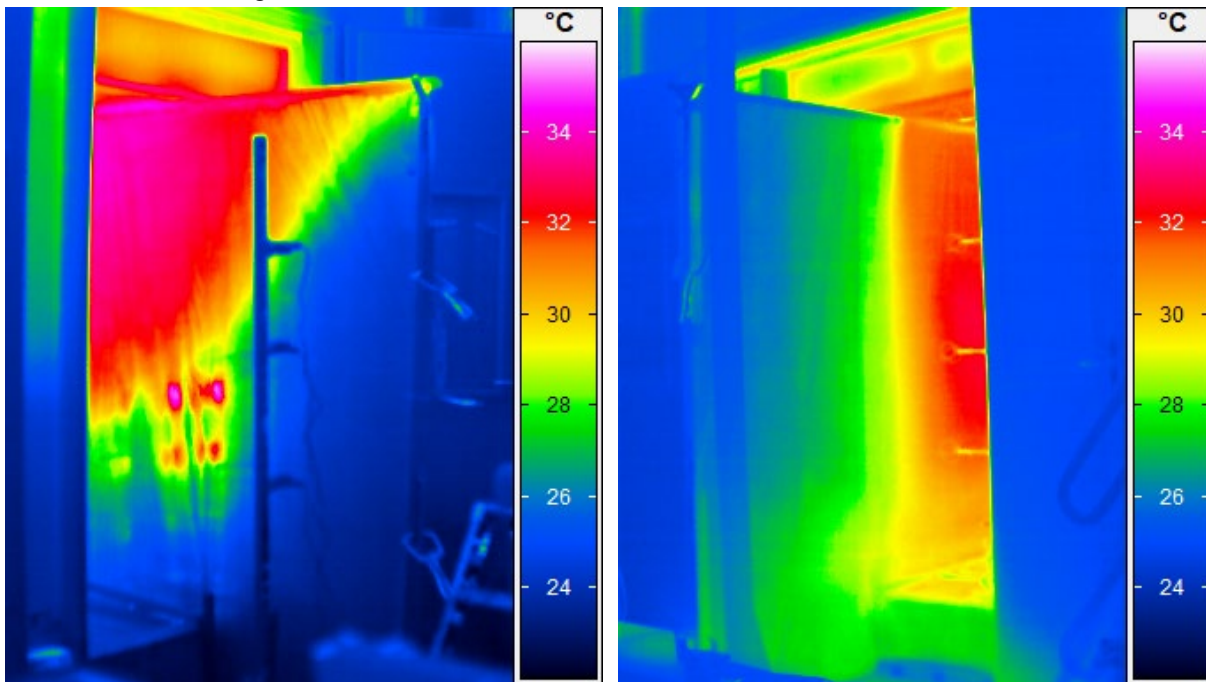


Abbildung 47 Temperaturverlauf im Türbereich bei dT 10 K; links kein, TLS rechts TLS1 2300 m³/h

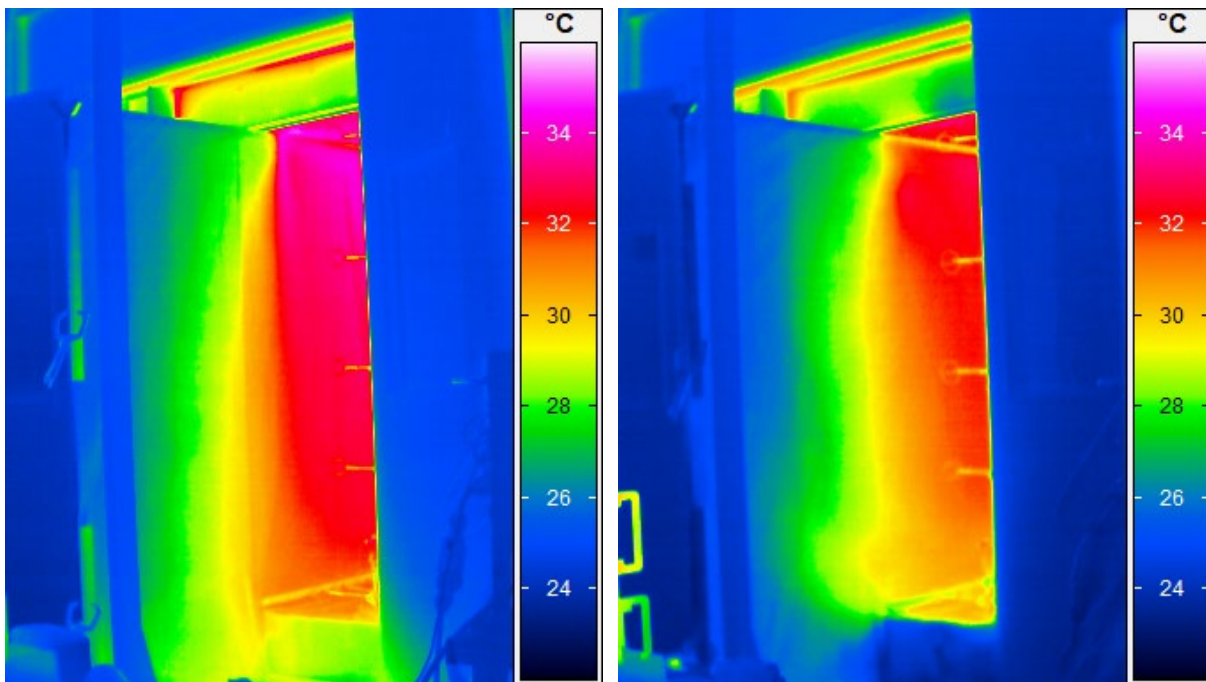


Abbildung 48 Temperaturverlauf im Türbereich bei dT 10 K; links TLS2 620 m³/h, rechts TLS3 520 m³/h

4.2 Messungen in der Klimakammer

Der Bus wurde für den Einbau der Messeinrichtung am 25.5.2020 in der Klimakammer der SBB in Otten positioniert. Die Messungen wurden an den drei Tagen vom 26.5. bis 28.5.2020 durchgeführt.

4.2.1 Messung Leistungsbedarf

Nach dem Einschwingen der Temperaturen wurde die Referenzmessung ohne TLS und anschließend mit TLS bei fünf Hallentemperaturen von 15 °C bis -12 °C durchgeführt. In Abbildung 49 ist der Verlauf der Messungen mit markierten Bereichen der Auswertungen zusammengefasst. Eine Mittelwertbildung von 1 Stunde war bei den Leistungsmessungen und den Vor- und Rücklauftemperaturen erforderlich, um verschiedene Schwankungen wie das Takten der Standheizung auszugleichen. Im Anhang sind für alle Auswertungen der Versuche die detaillierten Messwerte zusammengefasst.

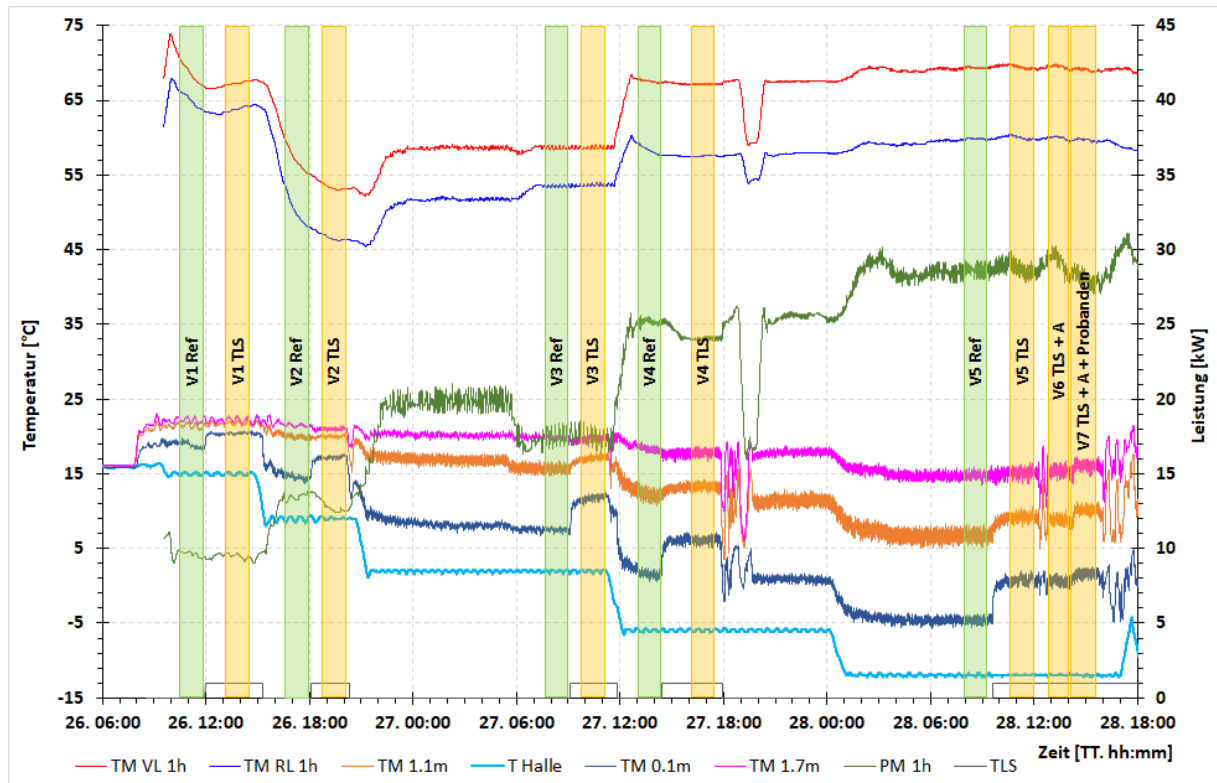


Abbildung 49 Übersicht der Messungen

Legende:

TM VL 1h	Vorlauftemperatur im Heizkreis (gleitender Mittelwert von 1 Stunde)
TM RL 1h	Vorlauftemperatur im Heizkreis (gleitender Mittelwert von 1 Stunde)
T Halle	Temperatur in der Halle (Klimakammer)
TM 0.1m	Lufttemperatur im Bus auf der Höhe 0.1 m (Mittelwert aller Fühler)
TM 1.1m	Lufttemperatur im Bus auf der Höhe 1.1 m (Mittelwert aller Fühler)
TM 1.7m	Lufttemperatur im Bus auf der Höhe 1.7 m (Mittelwert aller Fühler)
PM 1h	Wärmeleistung (gleitender Mittelwert 1 Stunde)
TLS	Status Türluftschleier (ein / aus)
Vx	Versuchsnummer

Der Leistungsbedarf mit Türluftschleier und ohne TLS sowie die Einsparungen sind in Abhängigkeit der Aussentemperatur in Abbildung 50 dargestellt. Die gemessenen fünf Werte sind markiert. In der Grafik wurden die Wärmeleistungen mit der Formel aus Abbildung 50 linearisiert. Bei eingeschaltetem TLS stieg die Businnentemperatur um 0.8 bis 2.9 K an. Dieser Temperaturanstieg bei eingeschaltetem TLS muss beim Vergleich der Heizleistung berücksichtigt werden. Bei der Berechnung der korrigierten Wärmeleistung mit TLS wurde die Aussenlufttemperatur um den Anstieg der Businnentemperatur erhöht, sodass die Wärmeleistung mit der gleichen Temperaturdifferenz berechnet wurde. Bei allen Temperaturen wurde beim Einsatz des TLS weniger Energie benötigt. Über den Messbereich der Aussenlufttemperatur von -15 °C bis 15 °C wurden Einsparungen von 8 bis 12 % mit Korrektur und 3 bis 5 % ohne Korrektur gemessen (Abbildung 51).

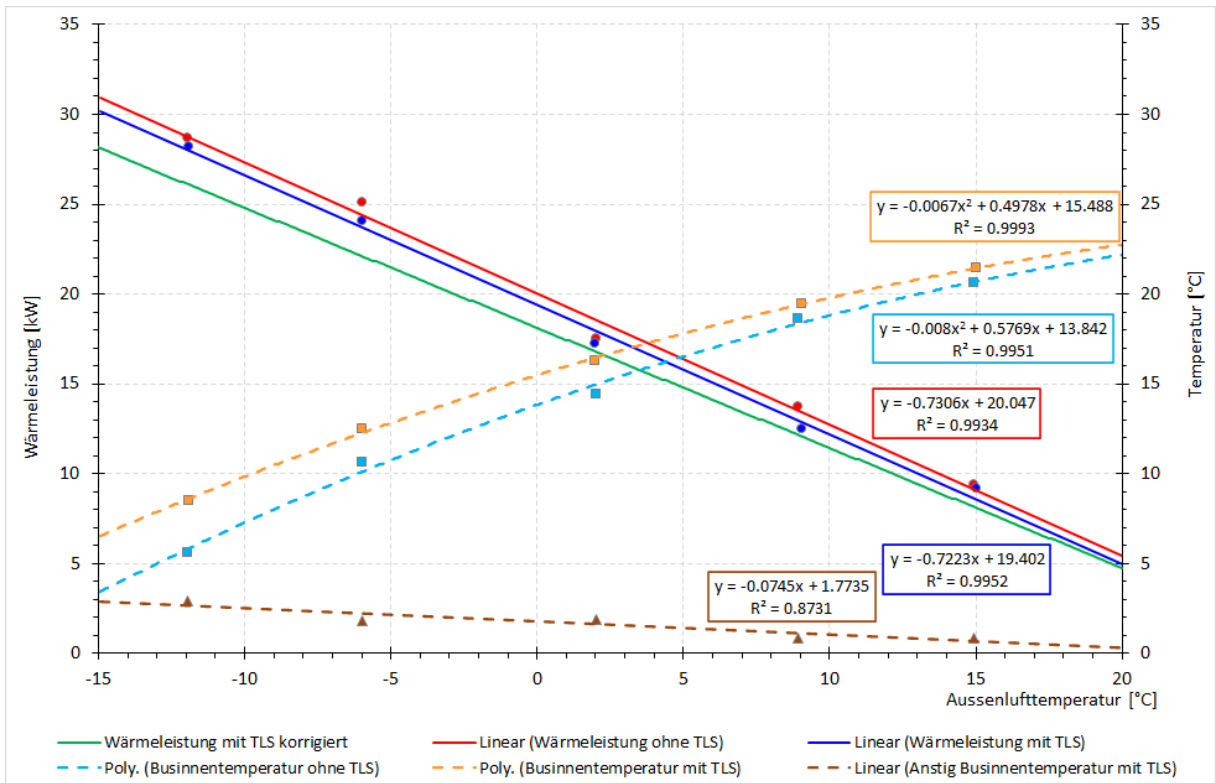


Abbildung 50 Wärmeleistung und Temperaturanstieg mit TLS

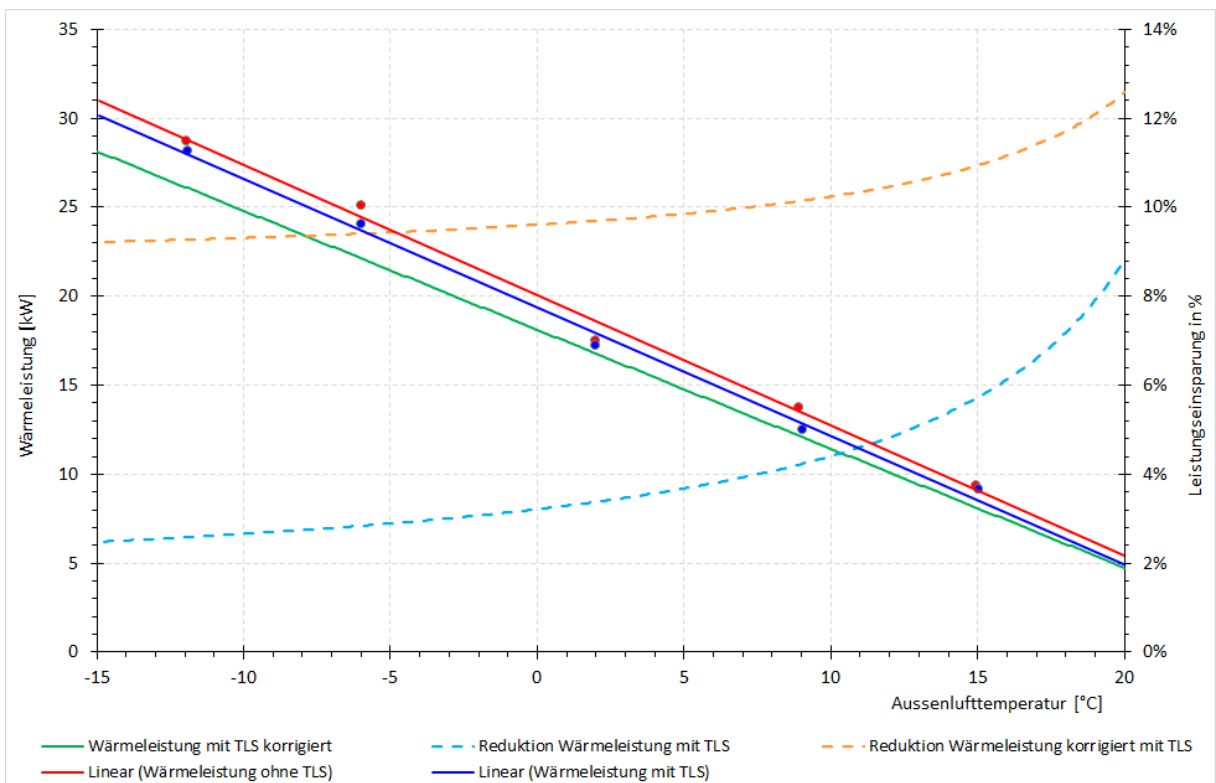


Abbildung 51 Leistungseinsparung mit TLS

Die Berechnung des Heizenergiebedarfs für ein Jahr wurde mit den Klimadaten aus der Gebäudetechnik SIA 2028 für die Station Luzern durchgeführt. Dabei wurde mit Stundenmitteltemperatur der Aussenlufttemperatur die erforderliche Wärmeleistung mit obiger Formel in Abbildung 50 mit TLS und ohne TLS berechnet. Die Jahresenergie entspricht der Summe der stündlichen Leistungen. Ohne TLS werden 73.8/a MWh und bei Verwendung von TLS werden 66.4/a MWh benötigt (Abbildung 52). Somit kann beim Einsatz des Solaris TLS 10 % Wärmeenergie bei erhöhtem Komfort eingespart werden. Mit der aktuell eingebauten Klimaregulierung sinkt der Energiebedarf bei eingeschaltetem TLS nur um 4 % auf

70.9 MWh/a. Die geringe Einsparung wird mit der Regulierung begründet, weil mit eingeschaltetem TLS eine höhere Businnentemperatur resultiert, was zum Vergleich und der Beurteilung der Effizienz nicht gewünscht wird.

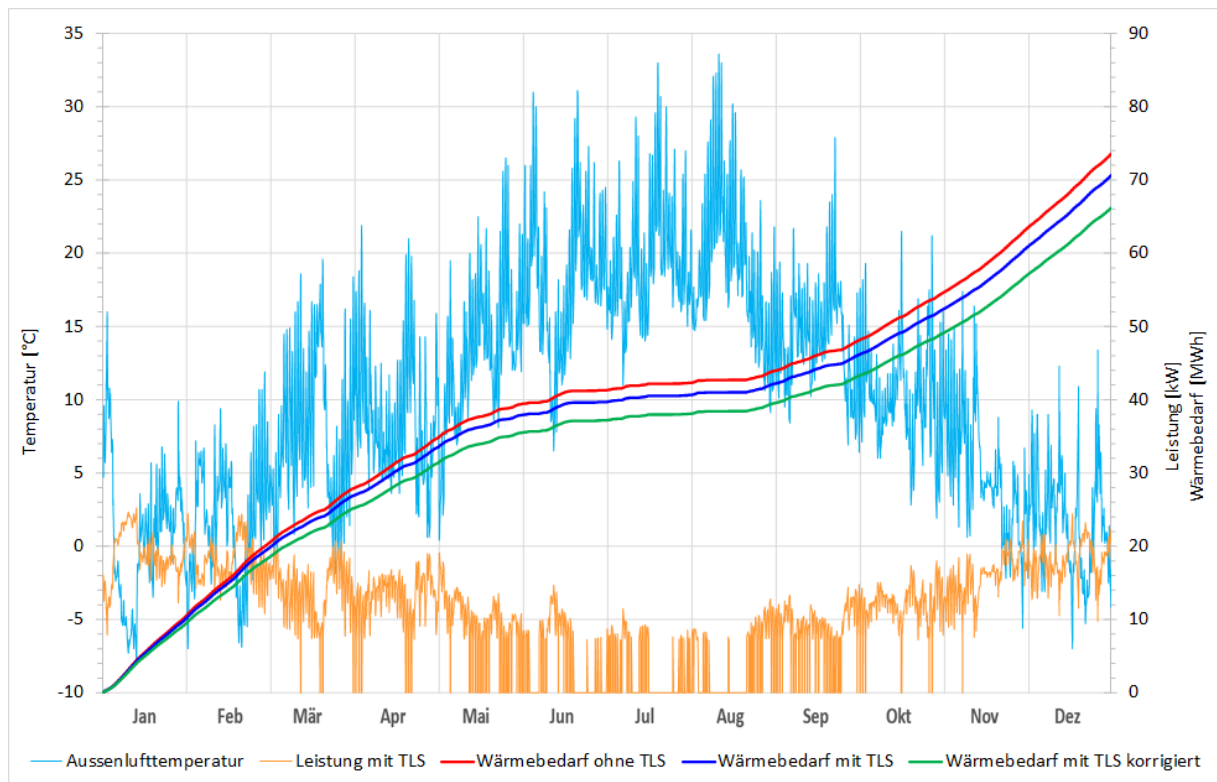


Abbildung 52 Wärmebedarf am Standort Luzern

4.2.2 Luftschichtung

Durch das Öffnen der Türen gelangt viel kalte Luft in den Bus. Im Fussbereich auf der Höhe 0.1 m sinken die Temperaturen sehr stark ab. In Abbildung 53 sind die Temperaturverläufe auf den drei Höhen 0.1 m 1.1 m und 1.7 während den Messungen abgebildet. Der Temperaturanstieg bei eingeschaltetem TLS nimmt mit abnehmender Hallentemperatur zu. Bei der Aussentemperatur von $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ sank die Temperatur bei 0.1 m unter den Gefrierpunkt, was bei nassem Wetter zu Eisbildung am Boden führen kann und die Gefahr des Ausrutschens der Fahrgäste erhöht. Auch in der obersten Schicht bei 1.7 m weichte die Businnentemperatur zum Teil erheblich vom Sollwert ab. Der Türluftschleier reduzierte die Abweichungen zum Sollwert auf allen Höhen. Der stärkste Einfluss zeigte sich im Fussbereich bei der Aussentemperatur von $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit einem Temperaturanstieg von 6.2 K ($-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Der thermische Komfort der Fahrgäste konnte mit einem TLS bei allen Aussentemperaturen verbessert werden. Die Steuerung der Heizung und Lüftung war nicht in der Lage, den Einfluss des Türzyklus genügend auszugleichen und den Raumsollwert ohne grosse Temperaturschichtung auf allen Höhen bereitzustellen.

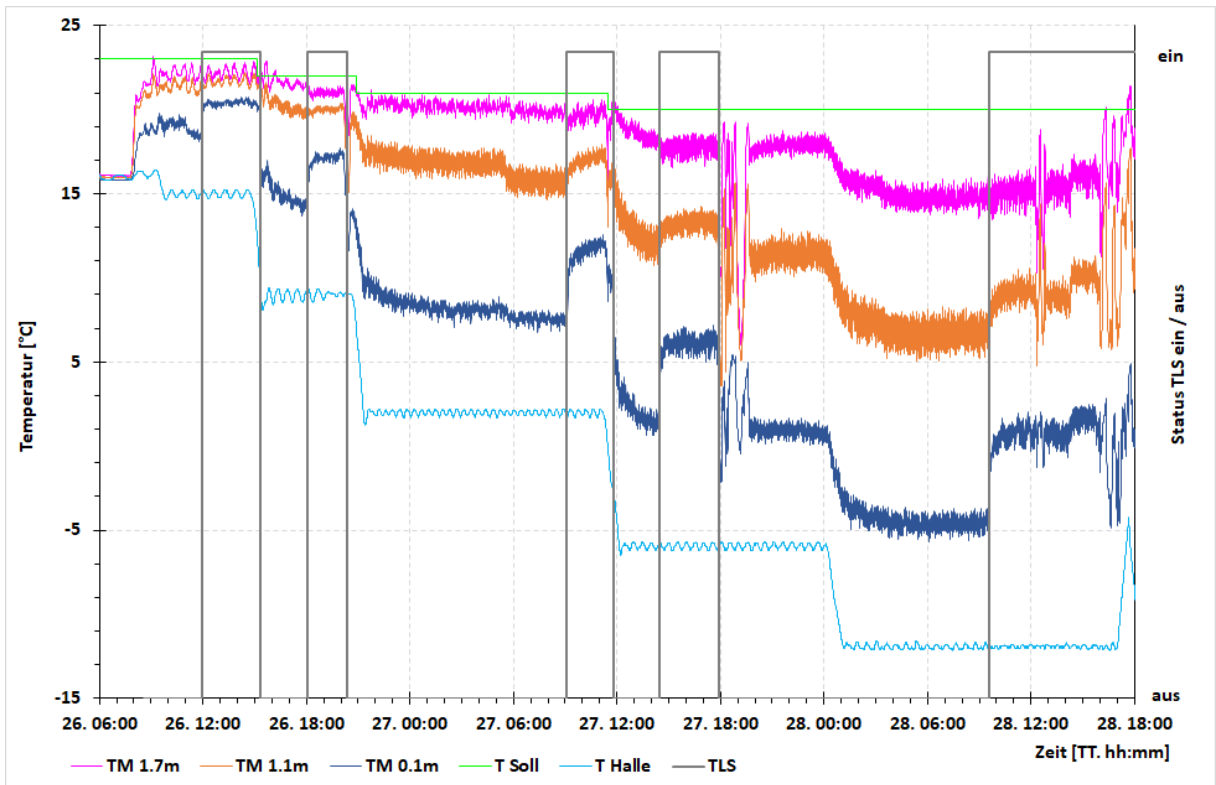


Abbildung 53 Temperaturschichtung (Legende gemäss Abbildung 49)

4.2.3 Luftgeschwindigkeiten

Bei der Eingangstüre 2 wurde an verschiedenen Positionen Luftgeschwindigkeiten bei ein- und ausgeschaltetem TLS bei allen fünf Temperaturen im eingeschwungenen Zustand während 10 Minuten gemessen. Zur Darstellung der Luftströmung im Türbereich wurden nur die Daten bei geöffneten Türen betrachtet. Die Detektion vom Türzustand wurde mit der Druckdifferenz innen und aussen ausgewertet und der Mittelwert Luftströmung in den Abbildung 54 bis Abbildung 58 dargestellt. In den Abbildungen wird jeweils links die Luftströmung bei ausgeschaltetem TLS und rechts mit eingeschaltetem TLS dargestellt.

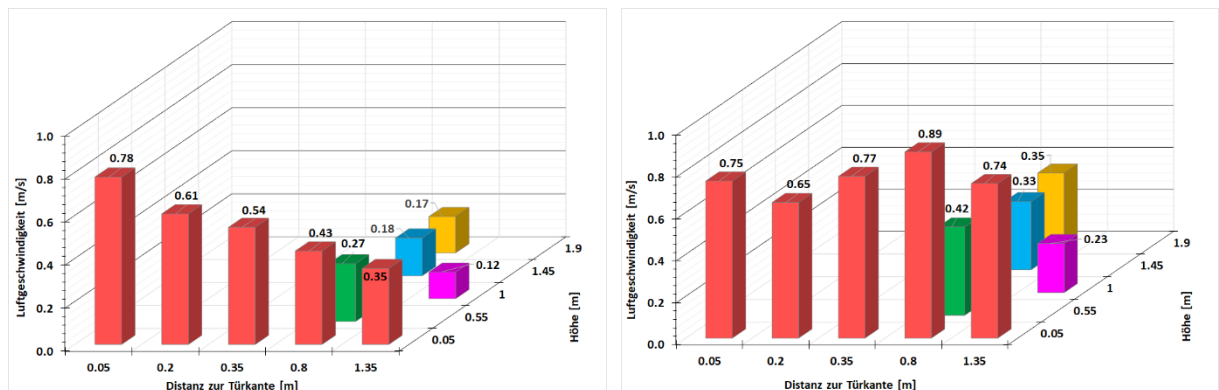


Abbildung 54 Luftströmung bei Hallentemperatur 15 °C, links ohne TLS und rechts mit TLS

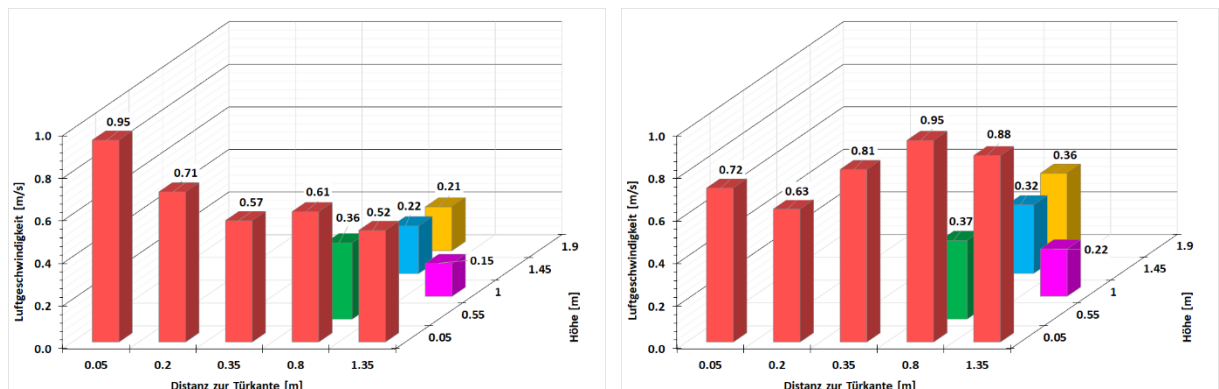


Abbildung 55 Luftströmung bei Hallentemperatur 9 °C, links ohne TLS und rechts mit TLS

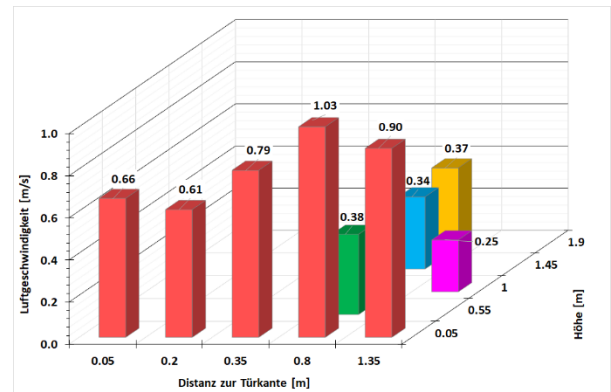
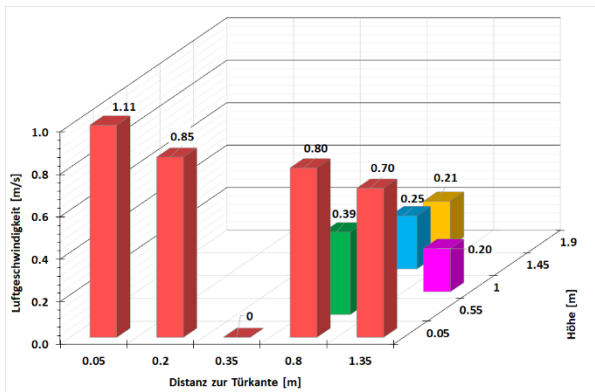


Abbildung 56 Luftströmung bei Hallentemperatur 2 °C, links ohne TLS und rechts mit TLS

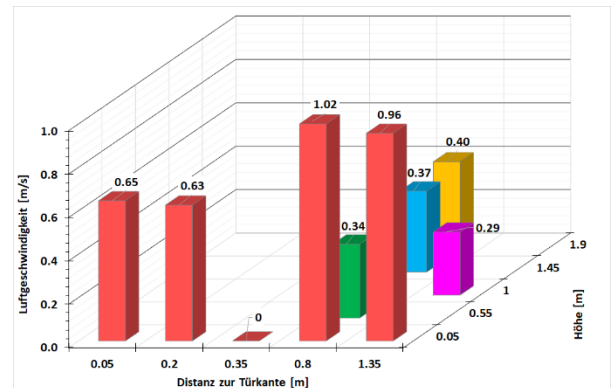
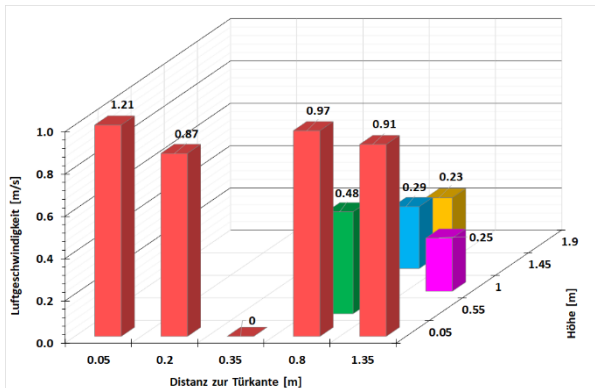


Abbildung 57 Luftströmung bei Hallentemperatur -6 °C, links ohne TLS und rechts mit TLS

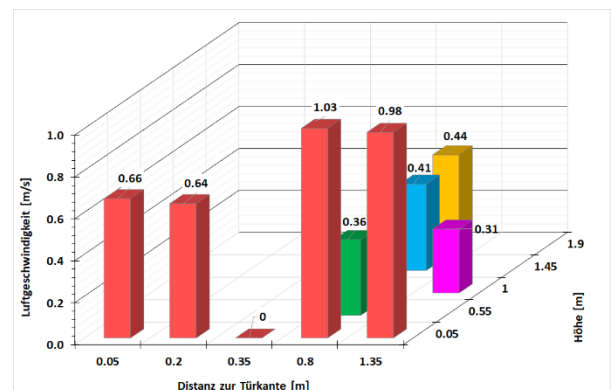
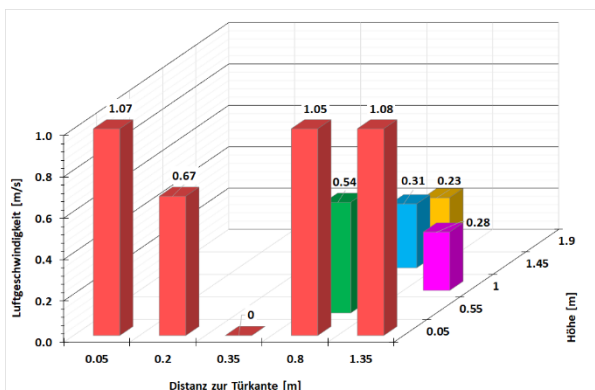


Abbildung 58 Luftströmung bei Hallentemperatur -12 °C, links ohne TLS und rechts mit TLS

gestellt. Auf der x-Achse ist die Distanz zur Türkante und auf der z-Achse die Höhe der Sensoren dargestellt. Bei 15 °C Hallentemperatur nimmt die Luftgeschwindigkeit ohne TLS auf der Höhe 5 cm nach innen ab. Mit eingeschaltetem TLS wurden bei allen Messpunkten grössere Luftgeschwindigkeiten gemessen. Die grösste Luftgeschwindigkeit hat sich weiter nach innen auf die Distanz 0.8 m zur Tür verschoben. Bei allen Aussentemperaturen nimmt die Luftgeschwindigkeit ohne TLS bei der Distanz 0.8 m mit zunehmender Höhe ab. Mit eingeschaltetem TLS wurde mit zunehmender Höhe grössere Luftgeschwindigkeiten gemessen. Bei -12 °C Hallentemperatur ist die Luftströmung im vorderen Türbereich (0.05 m und 0.2 m) grösser als mit eingeschaltetem TLS. Bei den Messungen bei -6 °C und -12 °C lieferte der Sensor bei 0.35 m keine gültigen Werte und ist deshalb in den Grafiken mit dem Wert 0 aufgeführt. Die Einzelwerte der Messungen sind im Anhang aufgeführt.

Die Luftströmungen im Türbereich wurden auch mit einer Lanze und Lasern untersucht. Ohne TLS strömt die warme Luft oben aus dem Bus. Bei eingeschaltetem TLS wirkt der TLS wie ein Vorhang und reduziert den direkten Luftstrom nach aussen (Abbildung 59).

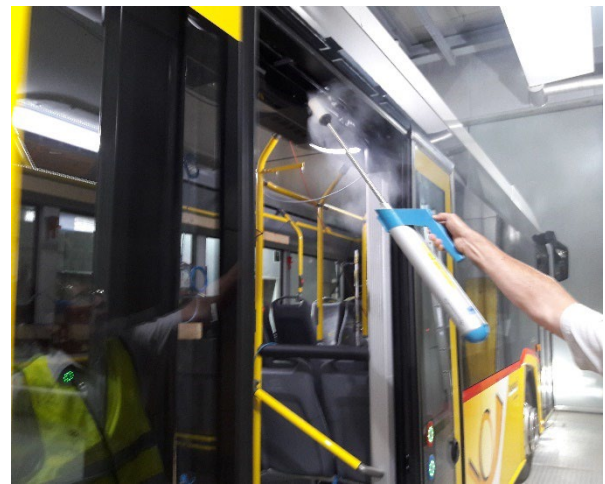


Abbildung 59 Strömungsvisualisierung mit Rauch an ET3, 15 °C Hallentemperatur; links TLS aus, rechts TLS ein

4.2.4 Thermografie im Türbereich



An der Eingangstüre 3 wurde temporär ein Flies montiert, um mit der Infrarotkamera Bilder zur Visualisierung des Temperaturverlaufs im Türbereich zu erstellen. Der Messaufbau ist in Abbildung 60 zu sehen. In der Abbildung 61 bis Abbildung 63 sind die Temperaturverläufe mit eingeschaltetem und ausgeschaltetem TLS bei unterschiedlichen Hallentemperaturen gegenübergestellt. Bei ausgeschaltetem TLS wurden im unteren Türbereich tiefere Temperaturen gemessen als im oberen Bereich. Bei eingeschaltetem TLS sind die Temperaturen im ganzen Türbereich höher. Der grösste Unterschied bei eingeschaltetem TLS zeigte der untere Türbereich, welcher beim Einsatz des TLS deutlich wärmer war. Bei -12 °C Hallentemperatur wurden im unteren Türbereich keine wesentliche Temperaturerhöhung gemessen. Der Volumenstrom vom TLS ist zu klein, um die kalte Luft auch an der Türeinstiegskante zu verdrängen und so der Zustrom von kalter Luft stärker zu unterdrücken. Trotzdem waren im Bus die Lufttemperaturen im Fussbereich auf der Höhe 0.1 m deutlich höher als bei ausgeschaltetem TLS. Mit TLS wurde kein erhöhter Energiebedarf zum Heizen festgestellt.

Abbildung 60 Flies für IR Aufnahmen

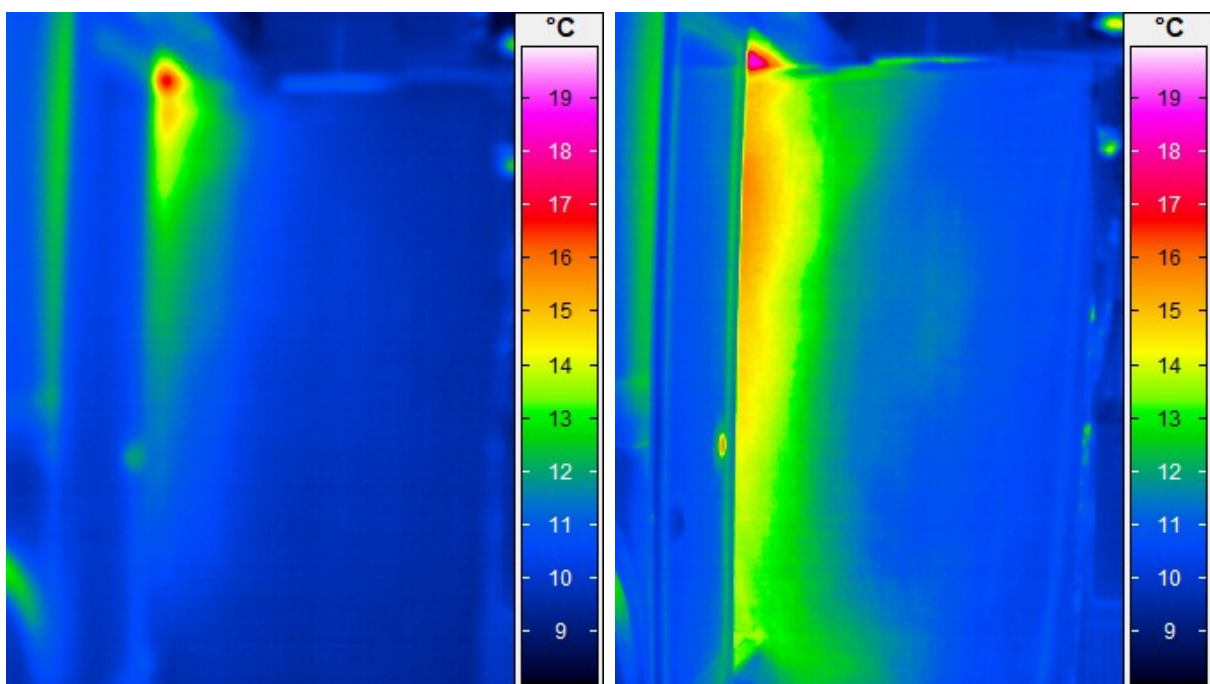


Abbildung 61 Temperaturverlauf bei 9 °C Hallentemperatur an ET3: links TLS aus, rechts TLS ein

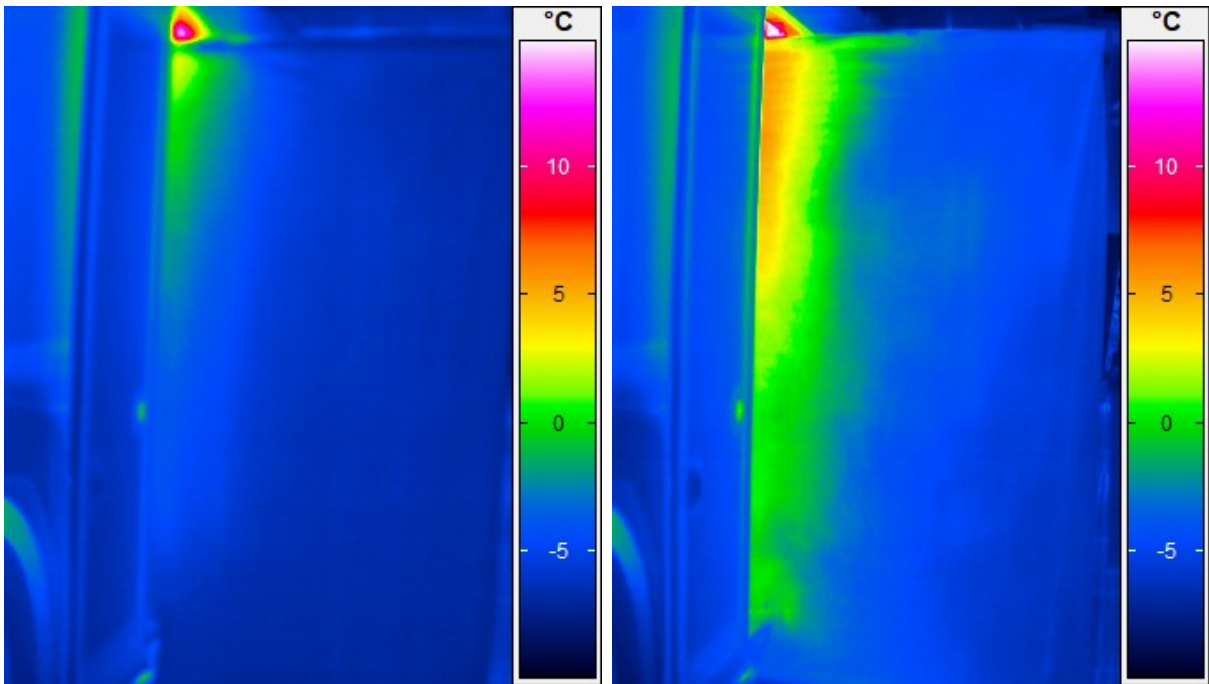


Abbildung 62 Temperaturverlauf bei -6 °C Hallentemperatur an ET3: links TLS aus, rechts TLS ein

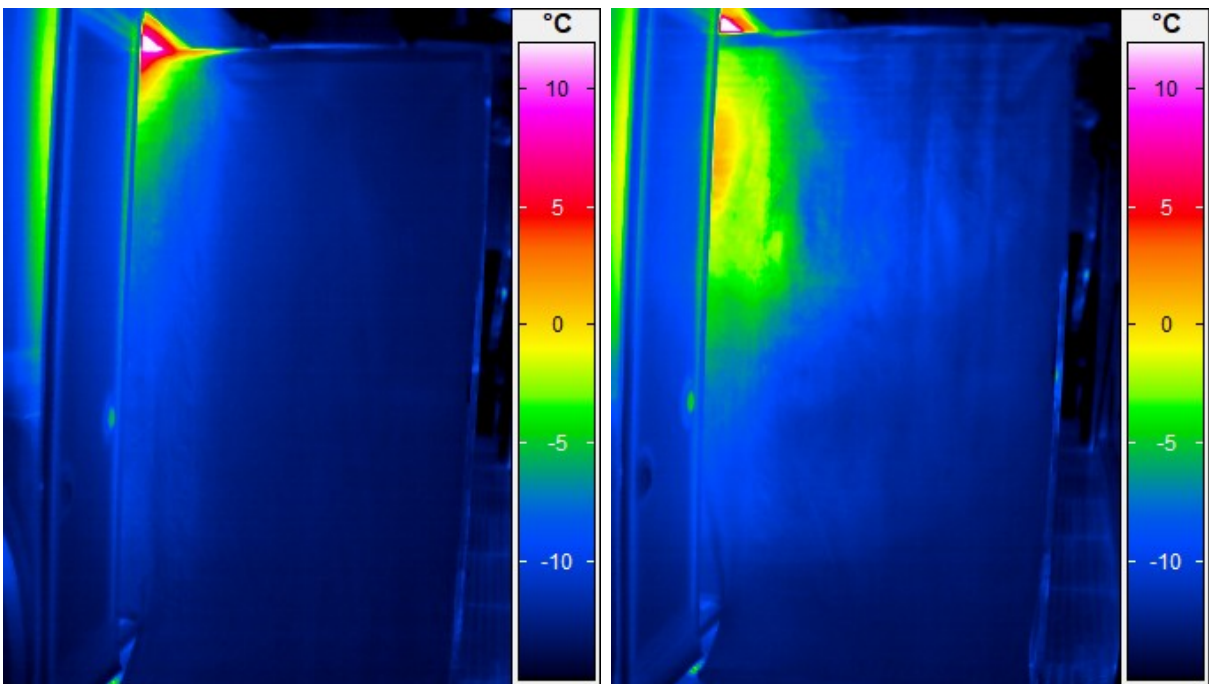


Abbildung 63 Temperaturverlauf bei -12 °C Hallentemperatur an ET3: links TLS aus, rechts TLS ein

Durch Anbringen einer Folie links und rechts der Einstiegstüren wurde im Versuch 6 eine seitliche Luftströmung verhindert. Die Messdauer nach dem Umbau erwies sich als zu kurz zur Auswertung der Energieeinsparung.

Der letzte Versuch mit elf Personen wurde beim gleichen Türöffnungsprogramm durchgeführt. Dabei ist die Hälfte der Gruppe jeweils bei der Türe 2 ausgestiegen und innerhalb der Türöffnung von 15 Sekunden bei der Türe 3 wieder eingestiegen. Die andere Hälfte der Gruppe bewegte sich in umgekehrter Richtung. Während dem 45-minütigen Versuch stiegen die Innentemperaturen auf allen drei Messhöhen um ca. 1.2 K leicht an (Abbildung 49 Versuch 7). Der Leistungsbedarf nahm um 0.5 kW leicht ab. Eine Auswertung der Energieeinsparung wurde nicht durchgeführt, da die gemessene Leistung vom vorangegangenen Versuch nicht vollständig eingeschwungen war. Zudem wäre ein direkter Vergleich der Heizleistung mit den anderen Versuchen ohne Personenwärme nicht aussagekräftig. Für diesen Vergleich wäre eine zweite Messung mit elf dauernd im Bus sitzenden Personen erforderlich.

5. Diskussion

In den Labormessungen mit dem vereinfachten Modell sowie bei den Messungen in der Klimakammer am realen Bus wurden grosse Temperaturschichtungen festgestellt. Dies kann bei kalten Aussenlufttemperaturen mit vielen Türöffnungen zu kritischen Bodentemperaturen führen, und so das Sturzrisiko der Fahrgäste erhöhen. Mit weniger Türöffnungen sinkt die Temperaturschichtung im Bus und die Innentemperatur weicht weniger vom Sollwert ab.

Die Regelung der Temperaturdifferenz der Innen- und der Aussenlufttemperatur wurde bei den Laborversuchen nur durch einen einzelnen Referenzfühler geregelt. Abhängig von der inneren lokalen Luftströmung waren Abweichungen an diesem Fühlerstandort möglich. Die Methodik der Regelung der Temperaturdifferenz hat sich bewährt, sollte aber zukünftig mit der Mittelwertbildung von mehreren Fühlern erfolgen.

Die gemessenen Einsparungen der Türluftschleier im Labor sind zum direkten Vergleich der Geräte untereinander gut geeignet. Zur Berechnung der zu erwartenden Energieeinsparungen im realen Bus ist diese Messung nur bedingt geeignet, da im Linienbetrieb die Türen nicht konstant geöffnet sind und so zusätzliche dynamische Effekte unberücksichtigt bleiben. Mit den Öffnungszeiten der Türen vom Postbus kann die Öffnungsfläche, welche äquivalent zur stets offenen Tür ist, wie folgt berechnet werden:

$$A = \frac{A_{T1} * T_{1g} + A_{T2} * T_{2g} + A_{T3} * T_{3g} + A_{T4} * T_{4g}}{T} = 1.28 \text{ m}^2$$

A	äquivalent Türfläche bei dauernder Öffnung mit Türzyklus Abbildung 30 [m ²]
A_{T1}	Fläche Türe x [m ²]
T_{1g}	Öffnungszeit Türe x [s]
T	Periodendauer [s]

Bei den Labormessungen wurde die gleiche Türfläche wie im Bus mit 2.4 m² verwendet. Werden diese beiden offenen Türflächen miteinander verglichen (1.28 m²/2.4 m²), ist die äquivalente Türfläche im Postbus bei den Klimakammermessungen um 53 % kleiner. Ohne weiter dynamische Effekte beim Öffnen und Schliessen der Türen zu berücksichtigen, können die Energieeinsparungen der Labormessungen grob geschätzt mit diesem Faktor übertragen werden. Mit dieser stark vereinfachten Annahme sollten im Bus mit Türluftschleiern je nach Temperaturdifferenz zwischen 5 und 28 % Energieeinsparungen möglich sein und nicht wie gemessen nur 8 bis 12 %.

Eine Berechnung der zu erwartenden Energieeinsparungen von einem Betriebsjahr im regulären Fahrbetrieb ist schwierig und nur mit grossen Unsicherheiten möglich, da viele Einflüsse ungenügend bekannt sind. Gemäss den Labormessungen steigen die Energieeinsparungen mit zunehmender Temperaturdifferenz zwischen der Lufttemperatur im Bus und der Aussenlufttemperatur. Die Messungen am realen Bus in der Klimakammer konnten diese zu erwartende Temperaturabhängigkeit nur bedingt bestätigen. Weshalb in der Klimakammer die Einsparungen mit steigender Temperaturdifferenz nicht wie erwartet zunehmen, kann folgende Gründe haben: Von der Aussentemperatur abhängige Aussenluftmenge der Lüftungsanlage, Regelung der Innenlufttemperatur bei Türöffnung, zu kleiner Volumenstrom des Türluftschleiers bei tiefen Aussentemperaturen oder Einfluss der an der Hallendecke montierten Umluftventilatoren der Klimakammer.

Bei den Labormessungen wurde bei den Auswertungen der Ergebnisse festgestellt, dass beim TLS2 die Spaltbreite zu schmal gewählt wurde. Ein schmaler Luftaustritt benötigt einen grösseren Druck des Ventilators, um den Luftstrahl bis zum Boden zu werfen. Der höhere Druck erfordert mehr elektrische Leistung und ist somit weniger effizient. Das Optimum der Grösse des Luftaustritts sollte weiter untersucht werden, um die Effizienz der TLS zu verbessern.

Die besten Ergebnisse wurden in den Labormessungen bei kleinen Volumenströmen erzielt. In der Klimakammer waren die Einsparungen mit dem kleinen Volumenstrom von TLS3 unter den Erwartungen aus dem Labor. Somit bleibt die Frage nach dem optimalen Volumenstrom noch unbeantwortet. Der Nutzen, den Volumenstrom aussentemperaturabhängig einzustellen, sollte weiter untersucht werden, um das Potenzial dieser Steuerung aufzuzeigen.

Bei den Messungen in der Klimakammer Olten konnte die Regelung der Heizung und Lüftung die Solltemperatur auf Kopfhöhe (1.7 m) nicht erreichen. Zum Erreichen der Sollwerte sollte auch der Messfühler auf dieser Höhe platziert werden und nicht unter dem Dach oder im Luftkanal.

Die Druckdifferenz im Bus zur Klimakammer wurde deutlich kleiner als die Hallentemperatur unter 6 °C eingestellt wurde. Möglicherweise wurde durch den Lüftungsregler die Umluft erhöht und die Aussenluftmenge reduziert.

Die Vorlauftemperatur war zu wenig stabil. Je nach Betriebspunkt wurden im Vorlauf durch das Takten der Standheizung Temperaturschwankungen bis 12 K festgestellt. Analog dazu variierte die Heizleistung ebenfalls. Die Auslegung der Verbraucher wurde basierend auf den Betriebstemperaturen des Antriebsmotors auf 80 °C bis 85 °C ausgelegt. Diese Temperaturen wurden mit der Standheizung nicht erreicht. Dadurch ist teilweise zu begründen, dass die Innenlufttemperaturen nicht erreicht wurden. Bei zukünftigen Komfortmessungen sollte mittels externem Wärmeerzeuger eine konstante Vorlauftemperatur analog zur Betriebstemperatur im Fahrplanbetrieb bereitgestellt werden.

Energetisch nicht relevant ist die Lärmemission der Ventilatoren der Türluftschleier. Beim Postbus wurde die Lärmemission als störend empfunden. Eine Verbesserung der Lärmbelastung wird sich positiv auf die Akzeptanz der Fahrgäste auswirken.

Im Antrag war vorgesehen, im Bus in der Klimakammer eine Vergleichsmessung mit einem für den Bus optimierten Türluftschleier durchzuführen. Nach den Labormessungen stellten wir fest, dass der eingebaute TLS3 von Solaris bei einigen Betriebspunkten weniger Energie benötigte als die anderen getesteten Geräte. Der Einbau vom TLS1 oder TLS 2 wäre nur unterhalb des bestehenden TLS möglich gewesen, was die Öffnung der Türe in der Höhe um 30 cm (15%) verkleinert hätte. Zudem stand nur ein Gerät zur Verfügung. Ein Vergleich mit dem gleichen Türöffnungsprogramm mit dem Einbau von nur einem Gerät an einer Türe mit reduziertem Türquerschnitt wäre nicht aussagekräftig. Deshalb wurde in Absprache mit dem Auftraggeber auf diese Messung verzichtet und anstelle dieser Messung Versuche mit ein- und aussteigenden Personen durchgeführt.

6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

In den Labormessungen wie auch in der Klimakammer wurde bei allen betrachteten Zuständen mit dem Betrieb eines Türluftschleiers der thermische Komfort erhöht, indem die Temperaturschichtung deutlich verbessert wurde und weniger Heizenergie erforderlich war. Somit ist in dieselbetriebenen sowie auch in elektrisch betriebenen Fahrzeugen der Einbau eines Türluftschleiers zu empfehlen.

Der Heizenergiebedarf zeigte in den Laborversuchen grosse Unterschiede bei den untersuchten Geräten und Parameter. Es besteht ein erhebliches Optimierungspotenzial in der Grösse der Luftauslässe und des Volumenstroms. Bei der Optimierung der Geräte sollten Druckunterschiede infolge des eingebautem Lüftungssystems sowie das Aussenklima berücksichtigt werden.

Die Energieeinsparungen zeigten in den Labormessungen steigende Einsparungen mit zunehmender Temperaturdifferenz zwischen der Innenluft im Bus und der Aussenluft. Bei den Messungen in der Klimakammer am realen Bus wurden entgegen den Erwartungen der Labormessungen und der Theorie keine von der Temperaturdifferenz abhängigen Einsparungen, sondern unabhängig der Temperaturdifferenz konstant ca. 5 % gemessen. Somit wird vermutet, dass erhebliches Einsparpotenzial beim Türluftschleier von Solaris vorhanden ist.

Die Berechnung der zu erwarteten Energieeinsparungen basierend auf den Klimadaten von Luzern ergab temperaturkorrigiert 7.4 MWh/a. Bei einem Dieselfahrzeug resultiert aus diesen Energieeinsparungen kein Minderverbrauch an Treibstoff, da der Bus mit Abwärme geheizt wird. Bei einem elektrisch betriebenen Bus betragen die jährlichen Energieeinsparungen Fr. 1'100 bei 15 Rp/kWh. Somit ist die Amortisationsdauer der Investition der TLS von Fr. 3'700 im Postbus ohne Berücksichtigung der Kapitalkosten 3.4 Jahre in einem elektrisch betriebenen Bus.

Die im Solaris-Bus eingebauten Ventilatoren wurden als störend laut wahrgenommen. Um den Komfort der Fahrgäste sowie die Akzeptanz von Türluftschleiern zu verbessern, sollte die Lärmemission der Geräte verbessert werden.

Das Potenzial einer nach Aussentemperatur gesteuerten Luftmenge sollte detaillierter untersucht werden. Dies könnte in einer ersten Phase mittels Simulation und in einer zweiten Phase im Labor vor einer Umsetzung im Fahrzeug ausgeführt werden.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Franz Sidler: *Messung Energieverlust durch Türöffnungen bei Linien-Bussen* Bern 2019, Bundesamt für Verkehr BAV
- [2] Mike Liebers: *Using Air Walls for the Reduction of Open-Door Heat Losses in Buses* 2017, SAE International
- [3] Aditya Pathak: *Analysis of the influence of air curtain on reducing the heat infiltration and costs in urban electric buses*, International Journal of Automotive Technology, Vol. 21 2020
- [4] Merkblatt *Gebäudeeingänge mit grossem Publikumsverkehr 805.150.2d*, 1998, Bundesamt für Energie

8. Anhang

8.1 Versuchsaufbau und Kennlinie Schlitzdüse

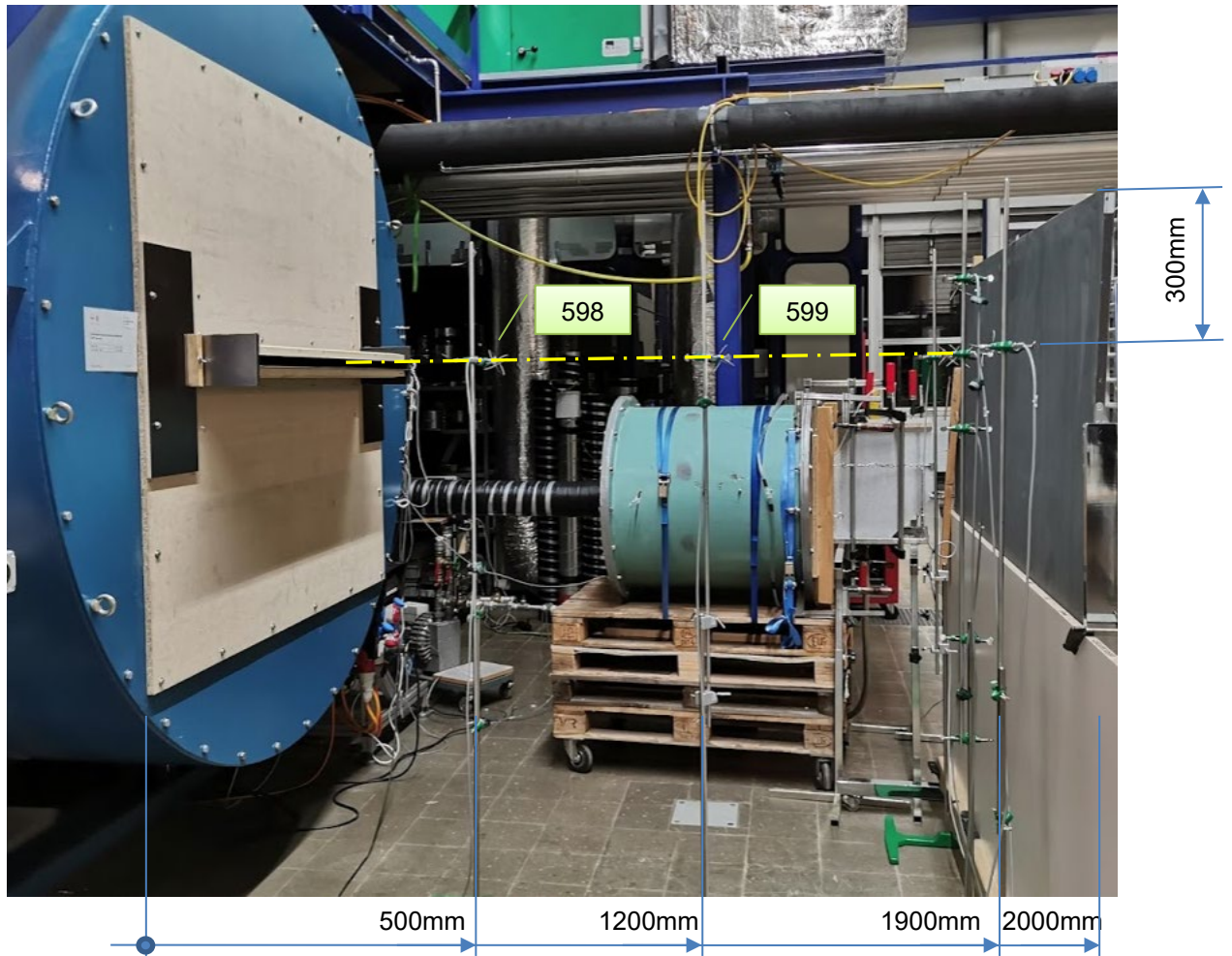


Abbildung 64 Der Wurfweitenversuch der Schlitzdüse wurde am «grossen LKP» horizontal ermittelt

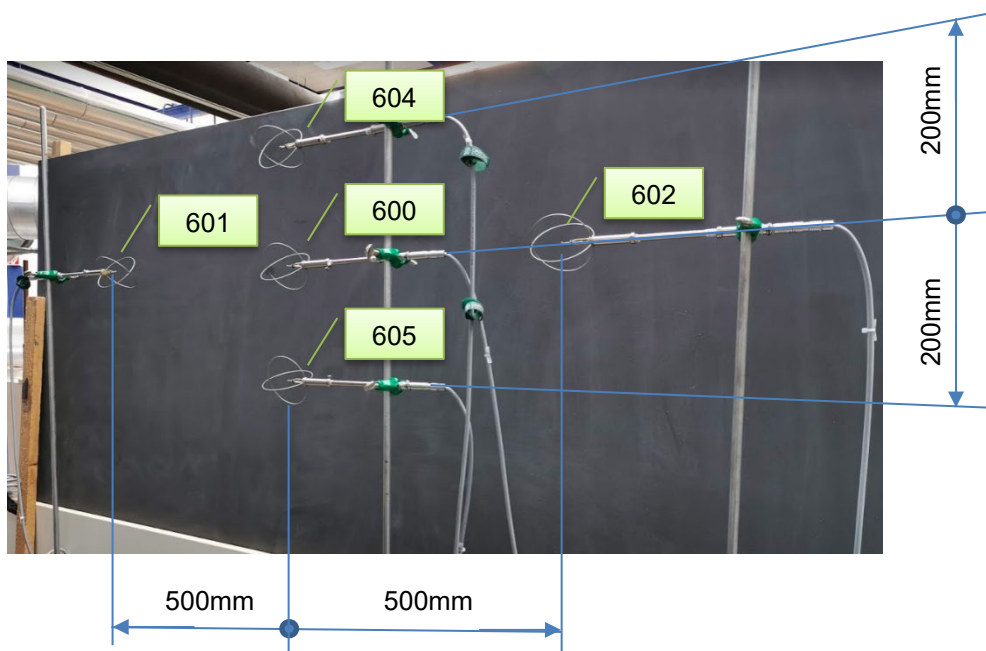


Abbildung 65 Die Bodenbegrenzung erfolgte durch eine Vertikale Platte im Abstand von 2m ab Auslass.

Kennlinien Schlitzauslass mit $w_{\text{bei } 2m}$ und Druckverlust

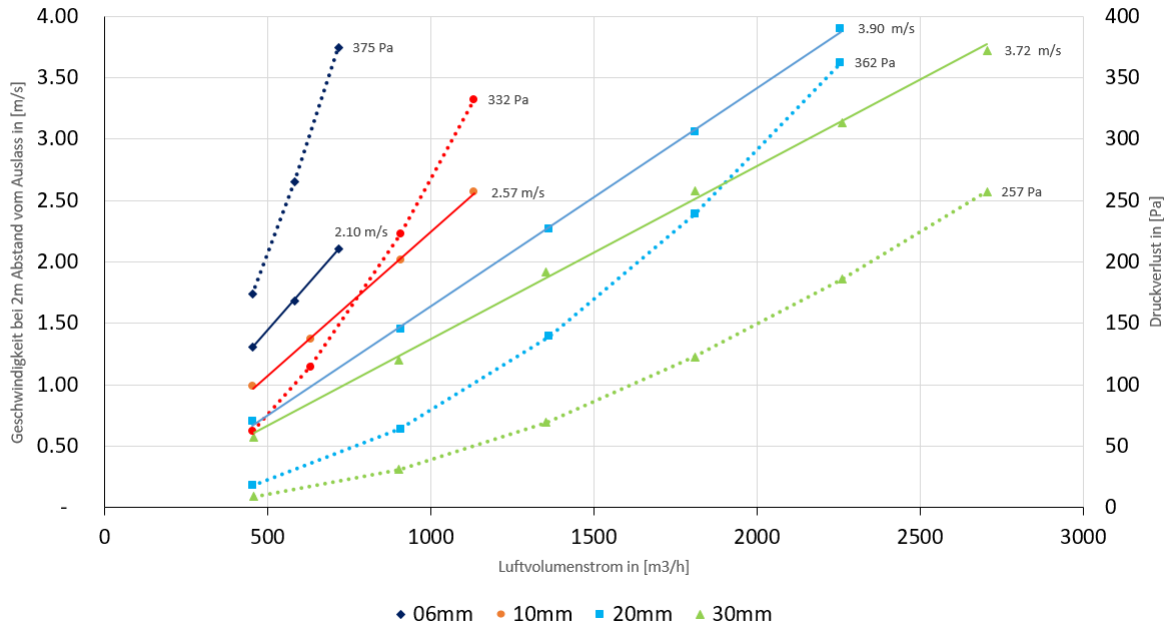


Abbildung 66 Messwerte der Schlitzdüse: Luft-Geschwindigkeit (y-Achse links) und Druckverlust (y-Achse rechts)

Kennlinien Schlitzauslass mit $w_{\text{bei } 2m}$ und Druckverlust

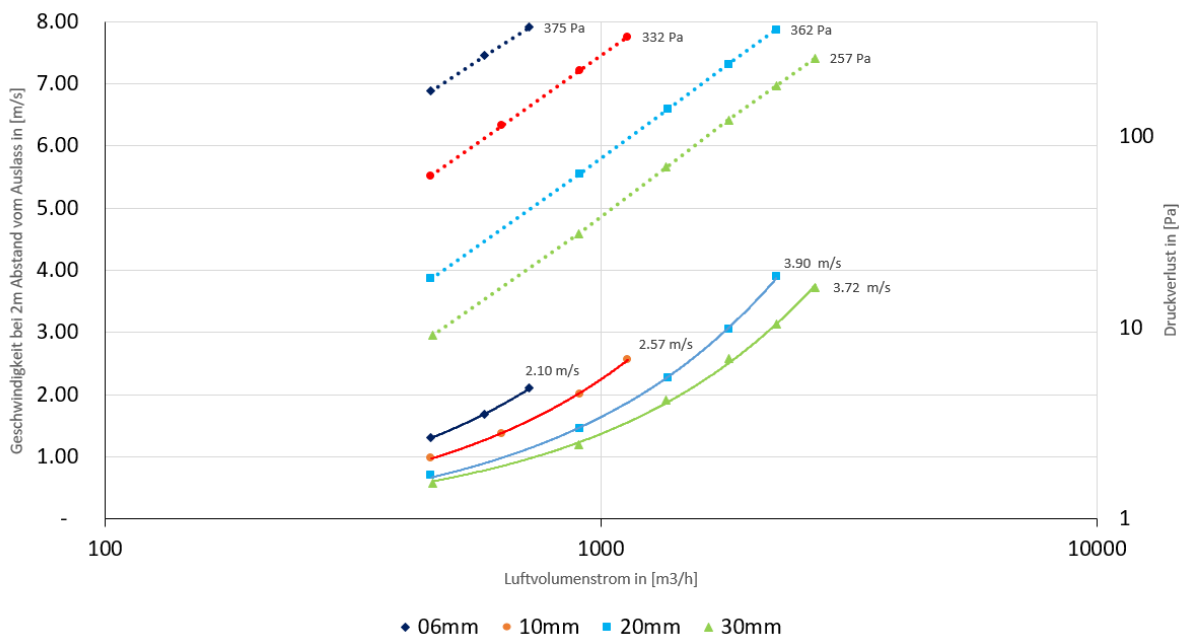


Abbildung 67 Gleich wie vorgehende Abbildung, x-Achse und y-Achse rechts mit log. Teilung

Die Geraden in beiden Diagrammen, bestätigen eine gute Qualität der Messdaten (Plausibilisierung).

8.2 Messwerte im Labor der HLSU

Messwerte der Laborversuche

Variante	Temperaturen			Heizleistung			Parameter				
	Hallen- temperatur Ta [°C]	Businnen- temperatur Ti [°C]	dT (Ti-Ta) [K]	Leistung [W]	Einspa- rung [W]	Einspa- rung [%]	Luftaustritt [cm]	Heizung [kW]	Aussenluft [m3/h]	Volumenstrom [m3/h]	Spaltbreite [mm]
ohne Türluftschleier (ausgeschaltet)											
ohne TLS	22.2	26.9	4.7	2004				0	0	0	
	21.6	31.2	9.7	4091				0	0	0	
	21.5	36.0	14.4	8181				0	0	0	
	22.2	41.5	19.3	11565				0	0	0	
TLS1 (TTL-Trend)											
2700 m³/h	22.1	27.1	5.0	1779	225	11.2%	15	0	0	2754	70
	22.0	31.8	9.9	3409	682	16.7%	15	0	0	2754	70
	21.1	36.2	15.0	5376	2805	34.3%	15	0	0	2754	70
2300 m³/h	21.6	26.5	5.0	1282	722	36.0%	15	0	0	2314	70
	22.1	32.0	9.9	3116	975	23.8%	15	0	0	2314	70
	21.6	36.5	15.0	4826	3356	41.0%	15	0	0	2314	70
	22.2	42.2	20.0	8008	3558	30.8%	15	0	0	2314	70
1500 m³/h	21.6	26.5	4.9	995	1009	50.3%	15	0	0	1512	70
	22.0	32.0	9.9	3231	860	21.0%	15	0	0	1512	70
	21.3	36.3	15.0	4516	3666	44.8%	15	0	0	1512	70
	21.5	41.4	19.9	5897	5668	49.0%	15	0	0	1512	70
Winkel	22.6	37.5	14.9	6205	0	0.0%	0	0	0	2754	70
	21.1	36.2	15.0	5376	829	13.4%	15	0	0	2754	70
	21.2	35.9	14.7	4524	1681	27.1%	30	0	0	2754	70
Aussenluft	22.0	31.8	9.9	3409	0	0.0%	15	0	0	2754	70
	22.1	32.0	9.9	3600	-191	-5.6%	15	0	204	2754	70
	22.8	32.7	9.9	4580	-1171	-34.3%	15	0	436	2754	70

TLS2 (Schlitzauslass)											
600 m³/h	21.7	31.7	9.9	4059	32	0.8%	20	0	0	618	12
	22.3	37.3	15.0	5717	2464	30.1%	20	0	0	621	12
Varianten Luftherhitzer (LE) am TLS2											
ohne Luft- erhitzer	22.3	37.3	15.0	5717	0	0.0%	20	0	0	621	12
	22.3	37.2	14.9	7254	0	0.0%	20	0	0	772	12
mit Luft- erhitzer	22.6	37.6	15.0	6034	317	5.5%	20	1	0	630	12
	22.4	37.3	14.9	7030	-224	-3.1%	20	1	0	776	12
Varianten Spaltbreite am TLS2											
620 m³/h	22.3	37.3	15.0	5717	2464	0.0%	20	0	0	621	12
770 m³/h	22.3	37.2	14.9	7254	0	0.0%	20	0	0	772	12
800 m³/h	22.1	37.1	15.0	5693	-1561	-22%	20	0	0	791	18
TLS3 (Solaris)											
520 m³/h	22.4	27.2	4.9	1534	470	23.5%	25	0	0	517	40
	21.9	31.8	9.9	2340	1751	42.8%	25	0	0	532	40
	21.6	36.4	14.9	3995	4186	51.2%	25	0	0	527	40
	22.5	42.4	19.9	5054	6511	56.3%	25	0	0	529	40

8.3 Messwerte in der Klimakammer der SBB in Olten

Messwerte Leistungsmessung in der KKL

V-Nr.	dT_{Ref} [K]	dT_{TLS} [K]	$dT_{TLS-Ref}$ [K]	P_{Ref} [kW]	P_{TLS} [kW]	$P_{k\ TLS}$ [kW]	P_{0_dT} [kW]	P_{k_dT} [kW]	$P_{0_dT\%}$ [%]	$P_{k_dT\%}$ [%]
V1	5.7	6.4	0.8	9.4	9.2	8.1	0.2	1.3	2.1%	13.6%
V2	9.7	10.4	0.7	13.7	12.5	11.62	1.2	2.1	9.1%	15.4%
V3	12.4	14.3	1.9	17.5	17.2	14.94	0.3	2.6	1.6%	14.8%
V4	16.6	18.4	1.8	25.1	24.0	21.67	1.1	3.4	4.2%	13.7%
V5	17.5	20.4	2.9	28.7	28.2	24.20	0.5	4.5	1.7%	15.6%

Legende:

- V-Nr. *Versuchsnummer*
- dT_{Ref} *Temperaturdifferenz ohne TLS: Businnentemperatur - Hallentemperatur*
- dT_{TLS} *Temperaturdifferenz mit TLS: Businnentemperatur - Hallentemperatur*
- $dT_{TLS-Ref}$ *Businnentemperaturdifferenz mit / ohne TLS: $dT_{TLS} - dT_{Ref}$*
- P_{Ref} *Wärmeleistung Heizung ohne TLS*
- P_{TLS} *Wärmeleistung Heizung mit TLS*
- $P_{k\ TLS}$ *temperaturkorrigiert Wärmeleistung Heizung mit TLS*
- P_{0_dT} *Reduktion der Heizleistung mit TLS*
- P_{k_dT} *Reduktion der Heizleistung temperaturkorrigiert mit TLS*
- $P_{0_dT\%}$ *relative Reduktion der Heizleistung mit TLS*
- $P_{k_dT\%}$ *relative Reduktion der Heizleistung temperaturkorrigiert mit TLS*

Zusammenfassung der Messergebnisse Luftgeschwindigkeiten in der Klimakammer						
Hallen- temperatur	Versuchs- nummer	Tiefe	Höhe	TLS aus	TLS ein	Vergleich
				Luftgeschwindigkeit		TLS ein/aus
° C	-	x [m]	y [m]	v [m/s]		[%]
15 °C	V1 Ref V1 TLS	0.05	0.1	0.78	0.75	-4%
		0.2	0.1	0.61	0.65	7%
		0.35	0.1	0.54	0.77	42%
		0.8	0.1	0.43	0.89	105%
		1.35	0.1	0.35	0.74	109%
		0.8	0.55	0.27	0.42	57%
		1.35	1.0	0.12	0.23	90%
		0.8	1.45	0.18	0.33	86%
0.8	1.9	0.17	0.35	109%		
9 °C	V2 Ref V2 TLS	0.05	0.1	0.95	0.72	-24%
		0.2	0.1	0.71	0.63	-11%
		0.35	0.1	0.57	0.81	42%
		0.8	0.1	0.61	0.95	55%
		1.35	0.1	0.52	0.88	67%
		0.8	0.55	0.36	0.37	3%
		1.35	1.0	0.15	0.22	44%
		0.8	1.45	0.22	0.32	44%
0.8	1.9	0.21	0.36	77%		
2 °C	V3 Ref V3 TLS	0.05	0.1	1.11	0.66	-40%
		0.2	0.1	0.85	0.61	-29%
		0.35	0.1	-	0.79	-
		0.8	0.1	0.80	1.03	29%
		1.35	0.1	0.70	0.90	28%
		0.8	0.55	0.39	0.38	-2%
		1.35	1.0	0.20	0.25	21%
		0.8	1.45	0.25	0.34	37%
0.8	1.9	0.21	0.37	76%		
-6 °C	V4 Ref V4 TLS	0.05	0.1	1.21	0.65	-47%
		0.2	0.1	0.87	0.63	-28%
		0.35	0.1	-	-	-
		0.8	0.1	0.97	1.02	4%
		1.35	0.1	0.91	0.96	5%
		0.8	0.55	0.48	0.34	-29%
		1.35	1.0	0.25	0.29	16%
		0.8	1.45	0.29	0.37	27%
0.8	1.9	0.23	0.40	77%		
-12 °C	V5 Ref V5 TLS	0.05	0.1	1.07	0.66	-38%
		0.2	0.1	0.67	0.64	-5%
		0.35	0.1	-	-	-
		0.8	0.1	1.05	1.03	-2%
		1.35	0.1	1.08	0.98	-9%
		0.8	0.55	0.54	0.36	-32%
		1.35	1.0	0.28	0.31	8%
		0.8	1.45	0.31	0.41	33%
0.8	1.9	0.23	0.44	93%		

8.4 Technische Daten Türluftschleier TTL-Trend 150 (TLS1)

TREND ... E-5 für E-Heizung

Typ	Türbreite [cm]	Luftmenge		Heizleistung			Elektro-Anschluss Luftschleieranlagen
		min. [m³/h]	max. [m³/h]	Stufe 1 [kW]	Stufe 2 [kW]	Stufe 3 [kW]	
TREND 100 E-5	100	570	1900	3,0	6,0	9,0	400 V / 3 Ph + PE + N / 50 Hz
TREND 150 E-5	150	1200	3200	4,5	7,5	12,0	400 V / 3 Ph + PE + N / 50 Hz
TREND 200 E-5	200	1800	4000	6,0	12,0	18,0	400 V / 3 Ph + PE + N / 50 Hz
TREND 250 E-5	250	2300	5100	9,0	15,0	24,0	400 V / 3 Ph + PE + N / 50 Hz
TREND 300 E-5	300	2750	6100	12,0	18,0	30,0	400 V / 3 Ph + PE + N / 50 Hz

E = Rippenrohrheizkörper, Anschluss 400 V / 3 Ph / 50 Hz, Sonderschaltungen auf Anfrage

Motordaten / Gehäusedaten TREND -5

Typ	Türbreite [cm]	Ventilator		Netz-Anschluss (mit Elektro-Heizung)	Schallpegel***		Gerätegewicht [kg]	
		[kW]	[A]		min. [dB(A)]	max. [dB(A)]	Ansaug frontal	Ansaug von unten
TREND 100 N/E-5	100	0,24	1,90	230 V / 1 Ph / 50 Hz (400 V / 3 Ph / 50 Hz)	38	52	46	55
TREND 150 N/E-5	150	0,45	3,50		42	55	70	81
TREND 200 N/E-5	200	0,50	3,70		42	57	92	103
TREND 250 N/E-5	250	0,67	5,00		43	57	116	133
TREND 300 N/E-5	300	0,72	5,20		43	58	140	155

*** = Schalldruckpegel in 3 m Abstand von der Schallquelle bei 300 m² Sabin

Typ	Maße			... N/NT -5		... N/NT -8/ -LNS		... N/NT -HE		Anzahl Aufhängepunkte	
	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [mm]	E [mm]	F [mm]	E [mm]	F [mm]	STD	AK
TREND 100	990	960	-	86	85	94	77	128	43	4	6
TREND 150	1490	1460	-	86	85	94	77	128	43	4	6
TREND 200	1990	1960	-	86	85	94	77	128	43	4	6
TREND 250	2490	2460	1245	86	85	94	77	128	43	6	9
TREND 300	2990	2960	1495	86	85	94	77	128	43	6	9

