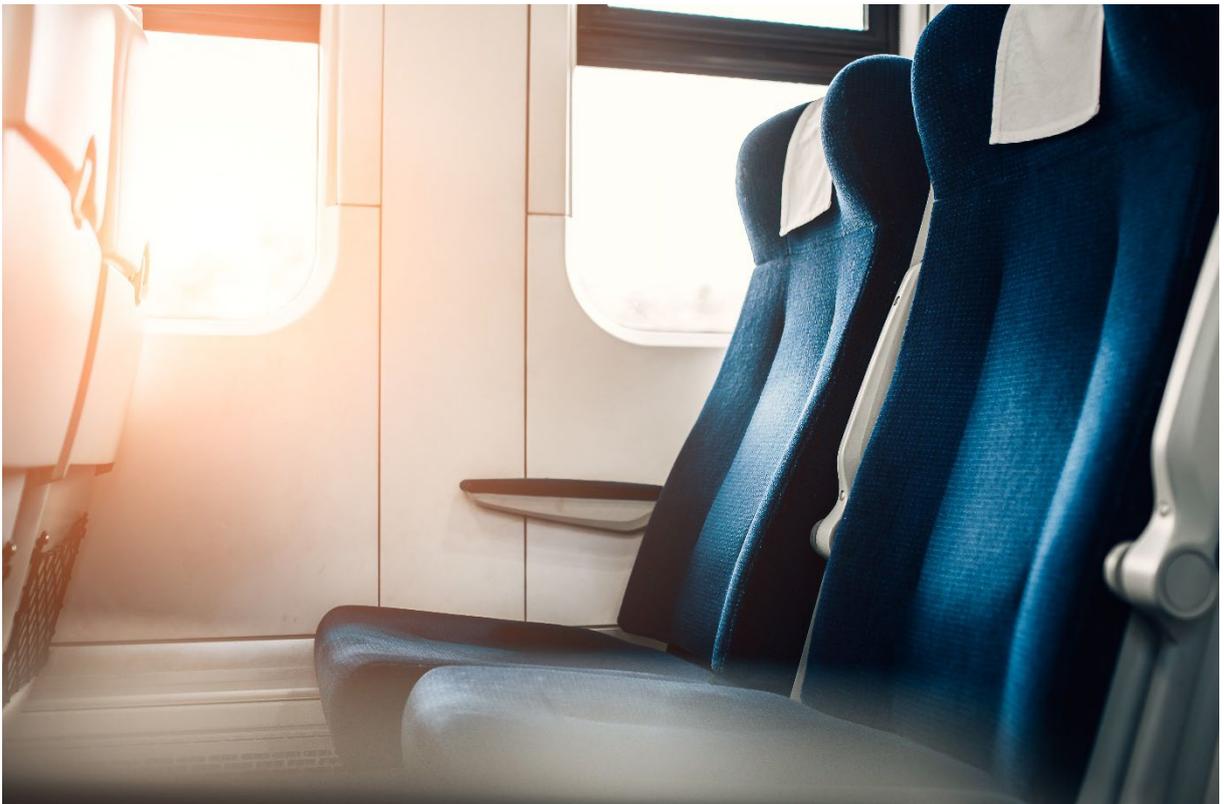




THERMISCHE BEHAGLICHKEIT UND NORMEN IM ÖFFENTLICHEN VERKEHR



Bildquelle: ©AdobeStock

Sina Büttner, sina.buettner@hslu.ch, www.hslu.ch

Franz Sidler, franz.sidler@hslu.ch, www.hslu.ch

Urs-Peter Menti, urs-peter.menti@hslu.ch, www.hslu.ch

Mathias Niffeler, mathias.niffeler@hslu.ch, www.hslu.ch

Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Technikumstrasse 21, 6048 Horw

Begleitgruppe

Thomas Lüthi, PostAuto AG

Gabriel Haller, RTA Rail Tec Arsenal

Matthias Tuchschnid, Schweizerische Bundesbahnen SBB

Roland Schmucki, Stadler Rail AG

Tristan Chevroulet, Bundesamt für Verkehr BAV

Stephan Husen, Bundesamt für Verkehr BAV

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

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

CH-3003 Bern

Programmleiter

Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: 229

Bezugsquelle

Kostenlos zu beziehen über das Internet

<http://www.bav.admin.ch>

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autor*innen dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 13.09.2023

Kurzzusammenfassung

Kundenzufriedenheit ist ein wichtiger Faktor für die Attraktivität des öffentlichen Verkehrs (öV). Die thermische Behaglichkeit ist dabei ein wesentliches Element, steht jedoch oft im Zielkonflikt mit den Themen Energieeffizienz sowie Investitions- und Betriebskosten. Wesentlich für einen angemessenen thermischen Komfort ist die Fahrzeughülle. Zusätzlich braucht es Systeme und Komponenten aus dem Bereich HLK (Heizung, Lüftung, Kühlung). Diese Systeme wirken sich jedoch meist negativ auf den Gesamtenergieverbrauch der Transportmittel aus und es entsteht ein Zielkonflikt. Durch die Realisierung von Energiesparmassnahmen kann dieser Verbrauch zwar optimiert werden, jedoch können diese Massnahmen die thermische Behaglichkeit beeinträchtigen. Welche Auswirkungen verschiedene Energiesparmassnahmen auf den Komfort haben und wie sich negative Auswirkungen minimieren lassen, wurde bisher nur wenig untersucht. Hier setzt das Projekt an.

Diese Studie stellt ein Kompendium zur Thematik der thermischen Behaglichkeit im öffentlichen Verkehr dar. Insgesamt konnten 31 Massnahmen eruiert und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die thermische Behaglichkeit und die Energieeffizienz beurteilt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die meisten Massnahmen sowohl einen positiven Effekt auf die thermische Behaglichkeit als auch auf die Energieeffizienz haben. Bestehende Normen und Richtlinien stellen differenzierte Anforderungen an die thermische Behaglichkeit in den verschiedenen Verkehrsmitteln (Bahn, Bus, Tram). Interviewgespräche mit 13 Akteuren von Transportunternehmen, Fahrzeugherstellern, Zulieferern, Test- und Forschungseinrichtungen sowie Designern haben gezeigt, dass die Vorgaben der Normen und Richtlinien fast immer eingehalten werden und die Bedürfnisse der Fahrgäste hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit dadurch gut abgedeckt werden (Anteil unzufriedener Personen i.d.R. < 5 %). Ein grösserer Handlungsbedarf wurde seitens Interviewpartnern bei den Vorgaben im Bereich der Energieeffizienz gesehen. Die Normen und Richtlinien stellen bisher nur wenig Anforderungen und sollten diesbezüglich geschärft werden. Dadurch könnte der öV künftig energieeffizienter und Innovationen in diesem Bereich vorangetrieben werden.

Im Rahmen der Studie konnten zahlreiche Projektideen generiert werden, die den Einfluss der Energiesparmassnahmen auf die thermische Behaglichkeit untersuchen. Diese gilt es in einem nächsten Schritt weiter zu vertiefen. Eine Weiterentwicklung sollte vorangetrieben werden, da viele dieser Ideen einen positiven Beitrag zur Erreichung der Ziele der Energiestrategie im öffentlichen Verkehr 2050 (ESöV 2050) leisten können.

Résumé exécutif

La satisfaction des clients est un facteur important pour l'attractivité des transports publics. Le confort thermique est un élément essentiel à cet égard, mais il est souvent en conflit avec les objectifs d'efficacité énergétique et de coûts d'investissement et d'exploitation. L'enveloppe du véhicule est essentielle pour assurer un confort thermique adéquat. En outre, des systèmes et des composants du domaine CVC (chauffage, ventilation, climatisation) sont nécessaires. Cependant, ces systèmes ont généralement un impact négatif sur la consommation d'énergie totale des moyens de transport, ce qui conduit à un conflit d'objectifs. La mise en œuvre de mesures d'économie d'énergie permet certes d'optimiser cette consommation, mais ces mesures peuvent nuire au confort thermique. Les effets des différentes mesures d'économie d'énergie sur le confort et la manière de minimiser les effets négatifs n'ont été que peu étudiés jusqu'à présent. C'est là qu'intervient le présent projet.

Cette étude constitue un compendium sur le thème du confort thermique dans les transports publics. Au total, 31 mesures ont été identifiées et évaluées quant à leur impact sur le confort thermique et l'efficacité énergétique. Les résultats montrent que la plupart des mesures ont un effet positif tant sur le confort thermique que sur l'efficacité énergétique. Les normes et directives existantes imposent des exigences différenciées en matière de confort thermique dans les différents moyens de transport (train, bus, tram). Des entretiens avec 13 acteurs d'entreprises de transport, de constructeurs de véhicules, de fournisseurs, d'instituts de test et de recherche ainsi que de designers ont montré que les exigences des normes et des directives sont presque toujours respectées et que les besoins des passagers en matière de confort thermique sont ainsi bien couverts (pourcentage de personnes insatisfaites généralement inférieur à 5 %). Les personnes interrogées estiment qu'il est nécessaire d'agir davantage dans le domaine de l'efficacité énergétique. Jusqu'à présent, les normes et les directives ne posent que peu d'exigences et devraient être renforcées à cet égard. Cela permettrait aux transports publics d'être plus efficaces sur le plan énergétique à l'avenir et de promouvoir les innovations dans ce domaine.

Dans le cadre de l'étude, de nombreuses idées de projets ont pu être générées pour étudier l'influence des mesures d'économie d'énergie sur le confort thermique. Il s'agit de les approfondir dans une prochaine étape. Il convient d'en poursuivre le développement, car nombre de ces idées peuvent apporter une contribution substantielle à la réalisation des objectifs de la stratégie énergétique des transports publics 2050 (SETP 2050).

Executive Summary

Customer satisfaction is an important factor for the popularity of public transport. Thermal comfort is an essential element in this context but is often in conflict with energy efficiency as well as investment and operating costs. The vehicle envelope is essential for adequate thermal comfort. In addition, systems and components from the HVAC sector (heating, ventilation, air-conditioning) are needed. However, these systems usually have a negative impact on the overall energy consumption of the transport vehicles and a conflict of objectives occurs. By implementing energy-saving measures, this consumption can be optimised, but these measures can affect the thermal comfort. What effects various energy-saving measures have on the thermal comfort and how negative effects can be minimised has been barely investigated so far. This is where the project comes in.

This study is a compendium on the topic of thermal comfort in public transport. A total of 31 measures were identified and evaluated in terms of their impact on thermal comfort and energy efficiency. The results show that most measures have a positive effect on both thermal comfort and energy efficiency. Existing standards and guidelines set different requirements for thermal comfort in the various transportation vehicles (train, bus, tram). Interviews with 13 stakeholders from transport companies, vehicle manufacturers, suppliers, testing and research institutions as well as designers have shown that the requirements of the standards and guidelines are almost always met and that the needs of passengers regarding thermal comfort are mostly well covered (percentage of dissatisfied persons is usually < 5 %). A bigger need for action was seen by the interview partners in the requirements regarding energy efficiency. The standards and guidelines have so far only set few requirements and should be tightened in this respect. This could make public transport more energy-efficient in the future and promote innovations in this area.

Within the study, numerous project ideas were generated that examine the influence of energy-saving measures on thermal comfort. These need to be further developed in a next step. Further development should be pursued, as many of these ideas can make a positive contribution to achieving the goals of the Energy Strategy for Public Transport 2050 (ESPT 2050).

Inhalt

Dank	7
Zusammenfassung	8
Résumé	12
1. Ausgangslage	16
2. Ziel der Arbeit.....	16
3. Vorgehensweise / Methodik.....	17
4. Grundlagen	19
4.1 Synthesebericht – Energieeffizienz im Bereich HLK und Fahrzeughülle im öV, 2021 [1]	19
4.2 Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit.....	20
4.3 Thermische Behaglichkeit im Gebäudebereich.....	22
4.4 Grundlagen aus dem Automobilbereich (Pkw).....	28
4.5 Grundlagen aus der Flugzeugindustrie	30
4.6 Analogien und Unterschiede zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln.....	31
5. Ergebnisse	35
5.1 Literaturrecherche zu Konzepten der thermischen Behaglichkeit.....	35
5.2 Literaturrecherche zu Normen und Anforderungen im Bereich HLK und Fahrzeughülle im öV.....	46
5.3 Erkenntnisse aus den Interviewgesprächen: Umsetzung der technischen Anforderungen bei Transportunternehmen und Herstellern.....	59
6. Analyse / Diskussion.....	62
6.1 Stellenwert der thermischen Behaglichkeit in Normen & Richtlinien.....	62
6.2 Stellenwert der thermischen Behaglichkeit bei Transportunternehmen & Herstellern.....	63
6.3 Übertragbarkeit von Massnahmen aus dem Gebäudebereich auf den öV	64
6.4 Übertragbarkeit von Massnahmen zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln.....	68
7. Projektideen, um die Auswirkungen von Energiesparmassnahmen im Bereich HLK auf die thermische Behaglichkeit zu untersuchen	70
7.1 Einordnung von gängigen Energiesparmassnahmen im Bereich HLK hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die thermische Behaglichkeit	71
7.2 Übersicht Projektideen	73
8. Empfehlungen	75
8.1 Empfehlungen für das BAV	75
8.2 Empfehlungen für Transportunternehmen und Hersteller.....	76
8.3 Empfehlungen für Forschung und Entwicklung.....	77
9. Fazit und Ausblick.....	78
10. Literaturverzeichnis.....	79
11. Anhang	81
11.1 Interviewleitfaden und Rückmeldungen	81
11.2 Umfrageergebnisse: Bewertung von Projektideen	95

Dank

Wir bedanken uns beim Bundesamt für Verkehr (BAV) für die Unterstützung. Ohne diese finanzielle Unterstützung und die inhaltlichen Inputs wäre es nicht möglich gewesen, dieses Projekt in dieser Form umzusetzen. Insbesondere bedanken wir uns bei allen Begleitgruppenmitgliedern für die vielen konstruktiven Anregungen im Rahmen ihrer Mitarbeit.

Danken möchten wir auch allen Interviewpartnern und Interviewpartnerinnen von verschiedenen Transportunternehmen, Herstellern, Designern und Forschungsanstalten im In- und Ausland, welche uns für Fragen zur Verfügung standen und welche uns mit Informationen und Dokumenten unterstützt haben. Das alles war für diese Arbeit sehr wertvoll.

Folgende Personen haben einen wertvollen Beitrag zum Projekt geleistet:

Lutz Boeck (Faiveley Transport Leipzig GmbH), Danilo Dorizzi (Rhätische Bahn AG), David Wiegatz (Rhätische Bahn AG), Elias Büchel (Rhätische Bahn AG), Gabriel Haller (Rail Tec Arsenal, Wien), Christoph Isenschmid (BLS AG), Holger Leukel (Siemens AG), Alexander Hildebrandt (Siemens AG), Hanspeter Fröhlich (Siemens AG), Christian Zumsteg (Verkehrsbetriebe Luzern), Nicolas Amacker (Hess AG), Therese Naef (milani design & consulting AG), Christian Böckmann (Verkehrsbetriebe Zürich), Alexander Warthmann (RWTH Aachen), Matthias Müri (Schweizerische Südostbahn AG), Ralf Hofer (Schweizerische Bundesbahnen AG), Thomas Lüthi (PostAuto AG), Matthias Tuchschnid (SBB), Roland Schmucki (Stadler Rail AG), Tristan Chevroulet (Bundesamt für Verkehr), Stephan Husen (Bundesamt für Verkehr), Thomas Graf (Hochschule Luzern Technik und Architektur, IET), Felix Lüönd (Hochschule Luzern Technik und Architektur, IET), Olivier Steiger (Hochschule Luzern Technik und Architektur, IGE)

Herzlichen Dank!

Zusammenfassung

Ausgangslage

Komfort ist ein wichtiger Faktor für die Attraktivität von öffentlichen Verkehrsmitteln. Die thermische Behaglichkeit ist dabei ein wesentliches Element (neben akustischer und visueller Behaglichkeit sowie Luftqualität und vielen weiteren Faktoren, wie bspw. Platzangebot, Ergonomie etc.). Wesentlich für einen angemessenen Komfort ist die Fahrzeughülle. Zusätzlich braucht es zur Gewährleistung eines hohen thermischen Komforts Systeme und Komponenten aus dem Bereich HLK (Heizung, Lüftung, Klima). Diese Systeme wirken sich jedoch meist negativ auf den Gesamtenergieverbrauch der Transportmittel aus und es entsteht ein Zielkonflikt. Durch die Realisierung von Energiesparmassnahmen kann dieser Verbrauch optimiert werden. Welche Auswirkungen diese Massnahmen jedoch auf die thermische Behaglichkeit haben und wie sich negative Auswirkungen minimieren lassen, wurde bisher nur wenig untersucht.

Ziel der Studie

Im Rahmen dieses Projekts wurde eine Übersicht über bestehende Konzepte und Strategien zur Bereitstellung der thermischen Behaglichkeit geschaffen. Dabei wurden verschiedene Verkehrsmittel des öV betrachtet, aber auch Referenzen aus der Automobil- und Flugzeugindustrie einbezogen und deren Übertragbarkeit bewertet. Die verschiedenen Anforderungen bestehender Normen und Richtlinien an die thermische Behaglichkeit im öV wurden zusammengetragen sowie deren Umsetzung bei Transportunternehmen und Herstellern diskutiert. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden abschliessend Projektideen entwickelt und evaluiert, wie die Auswirkungen von Energiesparmassnahmen im Bereich HLK auf die thermische Behaglichkeit untersucht werden können.

Massnahmen, Konzepte und Strategien zur Bereitstellung der thermischen Behaglichkeit

Mittels Literaturrecherchen konnte ein Überblick über bestehende Massnahmen zur Bereitstellung des thermischen Komforts im öV geschaffen werden. Insgesamt wurden 18 Massnahmen zusammengetragen, welche die thermische Hülle, den HLK-Bereich, Simulationsmassnahmen etc. betreffen. Ergänzt wurden diese mit Konzepten und Strategien aus der Automobil- und Flugzeugindustrie. Alle aufgeführten Massnahmen wurden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Parameter der thermischen Behaglichkeit (Lufttemperatur, Oberflächentemperatur, Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit) sowie den Einfluss auf die Energieeffizienz bewertet.

Überblick über relevante Normen und Richtlinien, Vergleich der Anforderungen

Relevante Normen und Richtlinien (national und international) wurden recherchiert und in einer Übersichtstabelle zusammengetragen. Des Weiteren wurden die Anforderungen der für den Schweizer öV relevanten Vorgaben weiter analysiert. Dazu gehören die EN 13129 (Schienenverkehr, Fernverkehr), die EN 14750-1 (Schienenverkehr, Nahverkehr) sowie die VDV 236 (Linienbusse). Die Anforderungen hinsichtlich Lufttemperatur, Oberflächentemperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit wurden im Vergleich zur EN 7730, welche häufig im Gebäudebereich zur Anwendung kommt, dargestellt.

Insgesamt kann gesagt werden, dass im Gebäudebereich tendenziell höhere Anforderungen an die verschiedenen Parameter der thermischen Behaglichkeit gestellt werden als in den unterschiedlichen Verkehrsmitteln. Dies ist mit Blick auf die Einsatzarten der Fahrzeuge und die Energieeffizienz durchaus sinnvoll. Bei einer längeren Aufenthaltsdauer der Passagiere werden höhere Anforderungen als bei kurzen Strecken gestellt. In den Fahrzeugen des Fernverkehrs (lange Aufenthaltsdauer) werden hinsichtlich der zulässigen Raumlufttemperatur im Winter ähnliche Anforderungen wie bei Gebäuden gestellt. Im Sommer sind die Vorgaben geringer. In Verkehrsmitteln ist die Umsetzbarkeit von Massnahmen oftmals durch den geringen Platzbedarf sowie das zusätzliche Gewicht - was sich negativ auf die Energieeffizienz auswirken kann - eingeschränkt. Ebenso gibt es weitere Herausforderungen bei Fahrzeugen, wie bspw. die schnell wechselnden Klima- und Wetterbedingungen in verschiedenen Regionen und Höhenlagen, weshalb der Vergleich zu Gebäuden nur bedingt möglich ist.

Erkenntnisse aus den Interviewgesprächen

Um herauszufinden, wie die Anforderungen der Normen und Richtlinien in der Praxis umgesetzt werden, wurden Interviews mit Transportunternehmen, Fahrzeughersteller, Zulieferer, Test- und Forschungseinrichtungen sowie Designer geführt. Dabei wurde auch auf Zielkonflikte und Synergien zwischen den Themenfeldern Komfort, Energieeffizienz sowie Investitions- und Betriebskosten eingegangen. Ebenso wurden typische Konzepte und Strategien diskutiert, Verbesserungspotentiale der Vorgaben analysiert und bestehende Forschungslücken zusammengetragen.

Die Gespräche mit Praxispartnern haben gezeigt, dass - wenn die Anforderungen der Normen eingehalten werden - die Bedürfnisse der Fahrgäste hinsichtlich des thermischen Komforts gut abgedeckt werden (Anteil unzufriedener Personen i.d.R. < 5 %).

Weniger Vorgaben werden seitens Normen und Richtlinien an die Energieeffizienz der Verkehrsmittel gestellt. Insbesondere mit Blick auf die Effizienz der HLK-Systeme besteht hier Verbesserungspotential. Betrachtet man die aktuell häufig umgesetzten Konzepte und Strategien, sind diese aus energetischer Sicht nicht sehr effizient (u.a. Konvektionsheizkörper, Lüftungsanlagen ohne Wärmerückgewinnung...). Wärmepumpensysteme oder Wärmerückgewinnungsanlagen werden derzeit nur in seltenen Fällen umgesetzt. Solche Massnahmen werden vor allem bei Elektrobussen thematisiert, da die Energieeffizienz hier in engem Zusammenhang mit der Reichweite der Fahrzeuge steht.

Stellenwert von thermischer Behaglichkeit, Energieeffizienz und Kosten bei Transportunternehmen

Welchen Stellenwert die thermische Behaglichkeit einnimmt ist stark von der jeweiligen Unternehmung abhängig. Die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit werden von den meisten Unternehmen gemäss Norm eingehalten. Es gibt aber auch einige Transportunternehmen, die einen besonders hohen Wert auf die thermische Behaglichkeit legen, da diese für die Kundenzufriedenheit essenziell ist – Dies betrifft meist den Fernverkehr oder vor allem für den Tourismus genutzte Bahnen.

Betrachtet man die drei Themenfelder «Energie - Komfort - Kosten», so sind in den meisten Fällen die Kosten entscheidend. Der Fokus hat sich hier in den letzten 5 Jahren jedoch verändert. Während früher die Investitionskosten im Vordergrund standen, werden heutzutage vor allem die Lebenszykluskosten als Entscheidungsgrundlage genommen. Da sich die Energieeffizienz ebenso in den laufenden Kosten widerspiegelt, hat auch dieses Thema an Aufmerksamkeit gewonnen.

Bei Elektrobussen steht vor allem die Energieeffizienz und weniger die thermische Behaglichkeit im Vordergrund, da bei einer ineffizienten Anlage die Reichweite der Fahrzeuge abnimmt.

Tabelle 1: Stellenwert der thermischen Behaglichkeit, der Energieeffizienz und der Kosten bei den verschiedenen Fahrzeugtypen

	Stellenwert		
	Gering	Mittel	Hoch
Thermische Behaglichkeit	städtischer Nahverkehr (Kurzstrecke), Busse (inkl. Elektro- und Trolleybusse)	regionaler Nahverkehr (mittlere Aufenthaltsdauer)	Fernverkehr, lange Aufenthaltsdauern, Bahnen mit Fokus Tourismus
Energieeffizienz		übrige Verkehrsmittel, Energieeffizienz vor allem mit Blick auf die Betriebskosten	Elektrobusse
Kosten		Investitionskosten, alle Verkehrsmittel	Lebenszykluskosten (LCC), alle Verkehrsmittel

Übertragbarkeit von Massnahmen

Die Übertragbarkeit von Massnahmen aus anderen Verkehrsmitteln (Automobil- und Flugzeugindustrie) sowie aus dem Gebäudebereich wurden diskutiert und Herausforderungen aufgezeigt.

Massnahmen aus anderen Verkehrsmitteln können nach ersten Einschätzungen meist gut auf den öV übertragen werden. Ein Grund dafür sind ähnliche Anforderungen, wie bspw. ein begrenzter Platzbedarf, Gewicht, dynamische Umgebungsbedingungen etc. Massnahmen aus dem Gebäudebereich sind hingegen nur teilweise umsetzbar. Gerade bei den HLK-Systemen könnten hier noch effizientere Ansätze übertragen werden: Während im öV häufig noch Elektrodirektheizungen eingesetzt werden, sind diese im Gebäudebereich nicht mehr zugelassen und Wärmepumpensysteme Standard. Energieeffizientere HLK-Systeme sollten auch in Fahrzeugen künftig vermehrt umgesetzt werden.

Bewertung gängiger Energie- und Komfortmassnahmen

Es wurde untersucht, welchen Einfluss gängige Energieeffizienzmassnahmen auf den thermischen Komfort in Fahrzeugen haben, und umgekehrt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 1 zusammengefasst.

Die dargestellten Massnahmen sind zum einem Ergebnisse aus dem Workshop, welche mit Fachexperten aus Praxis und Forschung an der Hochschule Luzern im Rahmen des Projekts durchgeführt wurde. Zum anderen wurden die gängigsten Energieeffizienzmassnahmen aus der Studie «Synthesebericht – Energieeffizienz im Bereich HLK und Fahrzeughülle im öV» [1] ergänzt. Alle aufgeführten Massnahmen wurden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Energieeffizienz sowie auf die thermische Behaglichkeit bewertet. Die Reihenfolge ist nicht priorisiert. Die im Rahmen des Workshops diskutierten Projektideen / Massnahmen wurden zusätzlich hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit im öV bewertet (farblich gekennzeichnet).

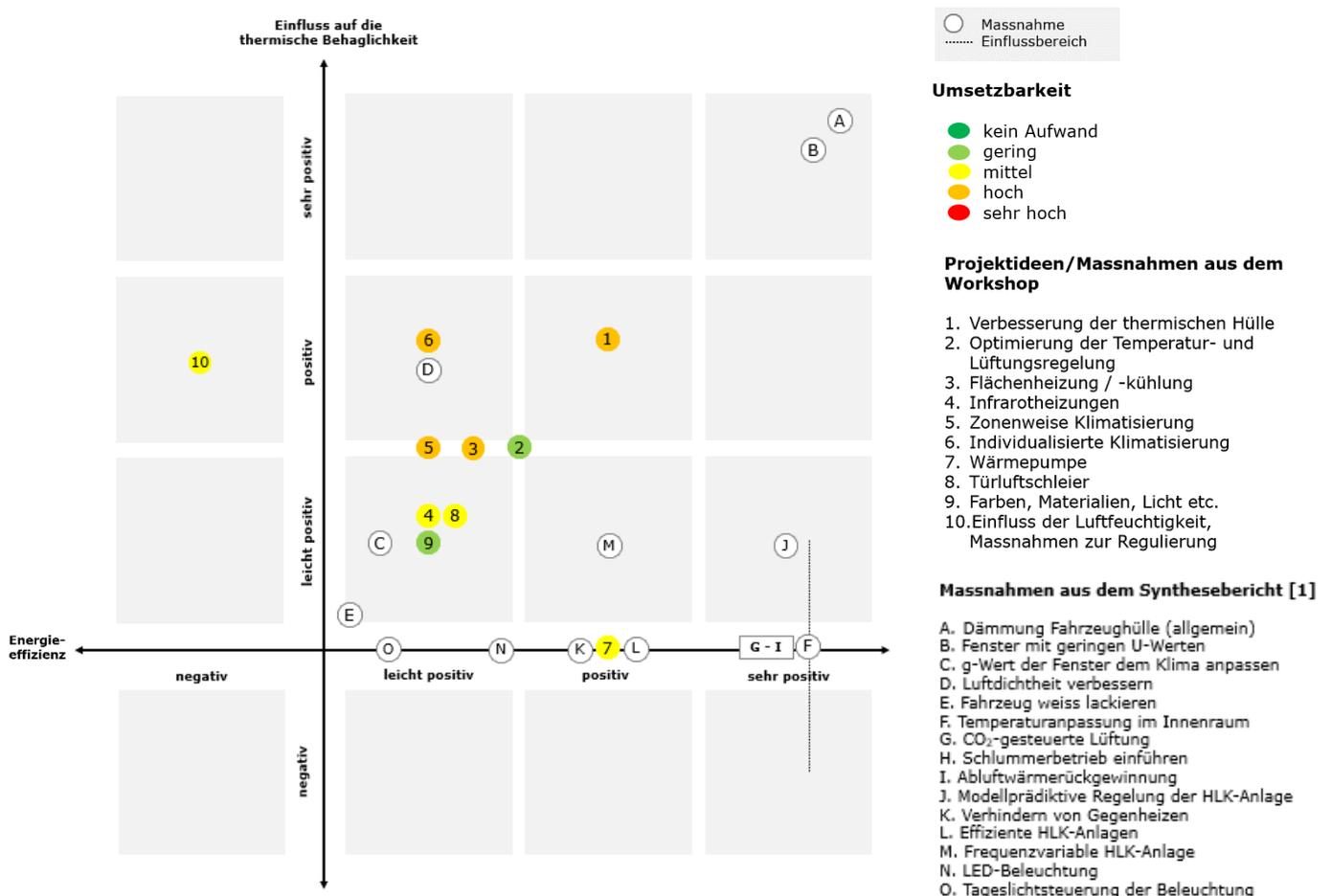


Abbildung 1: Übersicht über gängige Energie- und Komfortmassnahmen im öV, die Abbildung zeigt den Einfluss der Massnahmen auf die thermische Behaglichkeit sowie die Energieeffizienz, farblich gekennzeichnet ist die Umsetzbarkeit

Deutlich zu erkennen ist, dass Massnahmen, welche die Energieeffizienz positiv beeinflussen, nur selten im Konflikt mit der thermischen Behaglichkeit stehen. Massnahmen der thermischen Hülle (Dämmung, Fenster mit geringen U-Werten, Luftdichtigkeit etc.) wirken sich immer positiv auf Energie und Komfort aus. Der Aufwand zur Umsetzbarkeit der Massnahmen im öV kann aber zum Teil hoch, beim Refit sogar sehr hoch sein. Massnahmen, wie der Einsatz einer Wärmepumpe oder einer Abluftwärmehückgewinnung, bringen vor allem hinsichtlich der Energieeffizienz Vorteile, die thermische Behaglichkeit sollte dadurch jedoch nicht beeinflusst werden. Andere Massnahmen beeinflussen insbesondere den thermischen Komfort, wie bspw. eine individualisierte Klimatisierung.

Ein Faktor, welcher nicht direkt bewertet wurde, aber für die Umsetzbarkeit neuer Massnahmen und Projektideen unabdingbar ist, sind die Kosten. Bei einer weiteren Betrachtung der Idee, sollte dieser Aspekt unbedingt mit einbezogen werden (Lebenszyklusbetrachtung).

Fazit und Ausblick

Diese Studie stellt ein Kompendium zur Thematik der thermischen Behaglichkeit im öffentlichen Verkehr dar. Neben wichtigen Grundlagen im Bereich der thermischen Behaglichkeit (Einflussgrössen, Normen und Richtlinien etc.), wurden zahlreiche bestehende und neue Massnahmen / Projektideen zusammengetragen. Diese gilt es nun in gemeinsamer Zusammenarbeit zwischen Forschung und Praxis weiterzuentwickeln. Durch die Interviewgespräche und den Workshop konnten neue Kontakte hergestellt und verschiedene Akteure vernetzt werden.

Im Rahmen des Workshops wurden bereits 5 Projektideen für eine weitere Bearbeitung ausgewählt. Dazu gehörten:

- Einsatz von Türluftschleiern
- Individualisierte Klimatisierung
- Optimierung der thermischen Fahrzeughülle
- Einsatz von elektrochromen Gläsern im öV
- Qualitativer Behaglichkeitsleitfaden öV/CH

Das nächste Ziel ist die Eingabe beim Programm ESöV 2050.

Neben den ausgewählten, sollten ebenso weiter Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten gefördert werden. Weitere Projektideen in dieser Studie eignen sich ebenso für die Weiterentwicklung und können einen positiven Beitrag zur Erreichung der Ziele der Energiestrategie im öffentlichen Verkehr 2050 (E-SöV 2050) leisten. Regelmässige Veranstaltungen können dabei helfen Akteure der Branche weiter zu vernetzen, Erfahrungen auszutauschen und neue Projektideen / Massnahmen im Rahmen von Präsentationen vorzustellen.

Résumé

Situation initiale

Le confort est un facteur important pour l'attractivité des transports publics. Le confort thermique est un élément essentiel (en plus du confort acoustique et visuel, de la qualité de l'air et de nombreux autres facteurs tels que l'espace à disposition, l'ergonomie, etc.). L'enveloppe du véhicule est essentielle pour un confort approprié. De plus, pour garantir un confort thermique élevé, il faut des systèmes et des composantes dans le domaine du CVC (chauffage, ventilation, climatisation) adaptées. Cependant, ces systèmes ont généralement un impact négatif sur la consommation énergétique globale des moyens de transport, ce qui conduit à un conflit d'objectifs. La mise en œuvre de mesures d'économie d'énergie permet d'optimiser cette consommation. Cependant, peu d'études ont été menées jusqu'à présent sur les effets de ces mesures sur le confort thermique et sur la manière de minimiser les effets négatifs.

Objectif de l'étude

Le présent projet propose une vue d'ensemble des concepts et stratégies existants pour assurer le confort thermique. Différents moyens de transport publics ont été étudiés, mais aussi des références de l'industrie automobile et aéronautique, et leur transférabilité ont été évaluées. Les différentes exigences des normes et directives existantes en matière de confort thermique dans les transports publics ont été collectées et leur mise en œuvre par les entreprises de transport et les fabricants de matériel a été discutée. Sur la base de ces résultats, des idées de projets ont été développées et évaluées afin d'étudier les effets des mesures d'économie d'énergie dans le domaine du CVC sur le confort thermique.

Mesures, concepts et stratégies pour la mise à disposition du confort thermique

Des recherches bibliographiques ont permis d'obtenir une vue d'ensemble des mesures existantes pour assurer un confort thermique adéquat dans les transports publics. Au total, 18 mesures ont été collectées, qui concernent l'enveloppe thermique, le domaine CVC, les méthodes de simulation, etc. Elles ont été complétées par des concepts et des stratégies issus de l'industrie automobile et aéronautique. Toutes les mesures énumérées ont été évaluées en fonction de leur influence sur les paramètres du confort thermique (température de l'air, température de surface, humidité de l'air, vitesse de l'air) ainsi que de leur impact sur l'efficacité énergétique.

Aperçu des normes et directives pertinentes, comparaison des exigences

Nous avons effectué une recherche bibliographique sur les normes et directives pertinentes (nationales et internationales) et nous avons listé celles-ci dans un tableau récapitulatif. En outre, les exigences des directives pertinentes pour les transports publics suisses ont été analysées plus en détail. Il s'agit notamment de la norme EN 13129 (trafic ferroviaire, trafic longue distance), de la norme EN 14750-1 (trafic ferroviaire, trafic local) et de la norme VDV 236 (bus de ligne). Les exigences concernant la température de l'air, la température de surface, l'humidité de l'air et la vitesse de l'air ont été présentées en comparaison avec la norme EN ISO 7730, qui est souvent utilisée dans le secteur du bâtiment.

Dans l'ensemble, on peut dire que les exigences relatives aux différents paramètres du confort thermique ont tendance à être plus élevées dans le secteur du bâtiment que dans les différents moyens de transport. Cela est tout à fait logique au regard des types d'utilisation des véhicules et de l'efficacité énergétique. Lorsque les passagers restent plus longtemps, les exigences sont plus élevées que pour les trajets courts. Dans les véhicules de transport à longue distance (longue durée de séjour), les exigences relatives à la température de l'air ambiant admissible en hiver sont similaires à celles des bâtiments. En été, les exigences sont moins élevées. Dans les moyens de transport, la possibilité de mettre en œuvre des mesures est souvent limitée par le faible encombrement ainsi que par le poids supplémentaire – ce qui peut avoir un effet négatif sur l'efficacité énergétique. Les véhicules sont également confrontés à d'autres défis, tels que les changements rapides des conditions climatiques et météorologiques dans différentes régions et altitudes, ce qui limite la comparaison avec les bâtiments.

Enseignements tirés des entretiens

Afin de savoir comment les exigences des normes et des directives sont mises en œuvre en pratique, des entretiens ont été menés avec des entreprises de transport, des constructeurs de véhicules, des fournisseurs, des instituts de test et de recherche ainsi que des designers. Les conflits d'objectifs et les synergies entre les thèmes du confort, de l'efficacité énergétique et des coûts d'investissement et d'exploitation ont également été abordés. De même, les concepts et stratégies typiques ont été discutés, les potentiels d'amélioration des prescriptions analysés et les lacunes de recherche existantes ont été rassemblées.

Les discussions avec les partenaires de terrain ont montré que, si les exigences des normes sont respectées, les besoins des passagers en matière de confort thermique sont bien couverts (pourcentage de personnes insatisfaites généralement < 5 %).

Les normes et directives concernant l'efficacité énergétique des moyens de transport sont moins exigeantes. Il existe ici un potentiel d'amélioration, notamment en ce qui concerne l'efficacité des systèmes de chauffage, ventilation et climatisation. Si l'on considère les concepts et stratégies fréquemment mis en œuvre actuellement, ceux-ci ne sont pas très efficaces d'un point de vue énergétique (entre autres, radiateurs convectifs, systèmes de ventilation sans récupération de chaleur...). Les systèmes de pompes à chaleur ou les installations de récupération de chaleur ne sont actuellement mis en œuvre que dans de rares cas. De telles mesures sont surtout thématiques pour les bus électriques, car l'efficacité énergétique est ici étroitement liée à l'autonomie des véhicules.

Importance du confort thermique, de l'efficacité énergétique et des coûts pour les entreprises de transport

L'importance accordée au confort thermique dépend fortement de l'entreprise concernée. Les exigences en matière de confort thermique sont respectées par la plupart des entreprises conformément à la norme en vigueur. Il existe cependant quelques entreprises de transport qui accordent une importance particulière au confort thermique, car celui-ci est essentiel pour la satisfaction des clients - cela concerne généralement le trafic à longue distance ou les chemins de fer utilisés surtout pour le tourisme.

Si l'on considère les trois champs thématiques "énergie - confort - coûts", ce sont les coûts qui sont déterminants dans la plupart des cas. L'accent a toutefois changé au cours des cinq dernières années. Alors qu'auparavant, les coûts d'investissement étaient au premier plan, aujourd'hui, ce sont surtout les coûts du cycle de vie qui servent de base de décision. Comme l'efficacité énergétique se reflète également dans les coûts courants, ce sujet a également gagné en attention.

Pour les bus électriques, c'est surtout l'efficacité énergétique et moins le confort thermique qui est mis en avant, car une installation inefficace réduit l'autonomie des véhicules.

Tableau 2: Importance du confort thermique, de l'efficacité énergétique et des coûts pour les différents types de véhicules

	Importance		
	faible	moyen	élevé
Thermique Confort	transports urbains (courte distance), bus (y compris électriques et trolleybus)	transport régional de proximité (durée de séjour moyenne)	Trafic longue distance, longues durées de séjour, chemins de fer axés sur le tourisme
Efficacité énergétique		autres moyens de transport, efficacité énergétique, surtout en ce qui concerne les coûts d'exploitation	Bus électriques
Coûts		les coûts d'investissement, tous les moyens de transport	Coût du cycle de vie (CCV), tous modes de transport confondu

Transférabilité des mesures

La transférabilité des mesures issues d'autres moyens de transport (industrie automobile et aéronautique) et du secteur du bâtiment a été discutée et les défis ont été mis en évidence.

Selon les premières estimations, les mesures prises par les autres moyens de transport peuvent généralement être transposées aux transports publics. Cela s'explique notamment par des exigences similaires, telles qu'un encombrement et un poids limités, des conditions environnementales dynamiques, etc. En revanche, les mesures prises dans le domaine du bâtiment ne sont que partiellement applicables. Des approches et procédés plus efficaces pourraient être appliqués aux systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation : Alors que les transports publics utilisent encore souvent des chauffages électriques directs, ceux-ci ne sont plus autorisés dans le secteur du bâtiment et les systèmes de pompes à chaleur sont devenus la norme. Des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation plus efficaces sur le plan énergétique devraient également être mis en œuvre dans les véhicules à l'avenir.

Évaluation des mesures courantes d'efficacité énergétique et de confort

L'influence des mesures d'efficacité énergétique courantes sur le confort thermique dans les véhicules a été étudiée, et inversement. Les résultats sont résumés dans la figure 2.

Les mesures présentées sont d'une part les résultats du tour de table organisé avec des experts de la pratique et de la recherche à la Haute école spécialisée de Lucerne dans le cadre du projet. D'autre part, les mesures d'efficacité énergétique les plus courantes issues de l'étude "Synthesebericht - Energieeffizienz im Bereich HLK und Fahrzeughülle im öV" [1] (Efficacité énergétique dans le domaine de la CVC et de l'enveloppe des véhicules dans les transports publics) ont été rajoutées. Toutes les mesures mentionnées ont été évaluées en fonction de leur influence sur l'efficacité énergétique ainsi que sur le confort thermique. Un ordre de priorité n'a pas été établi. Les idées de projets / mesures discutées dans le cadre du tour de table ont en outre été évaluées quant à leur faisabilité dans les transports publics (code couleur).

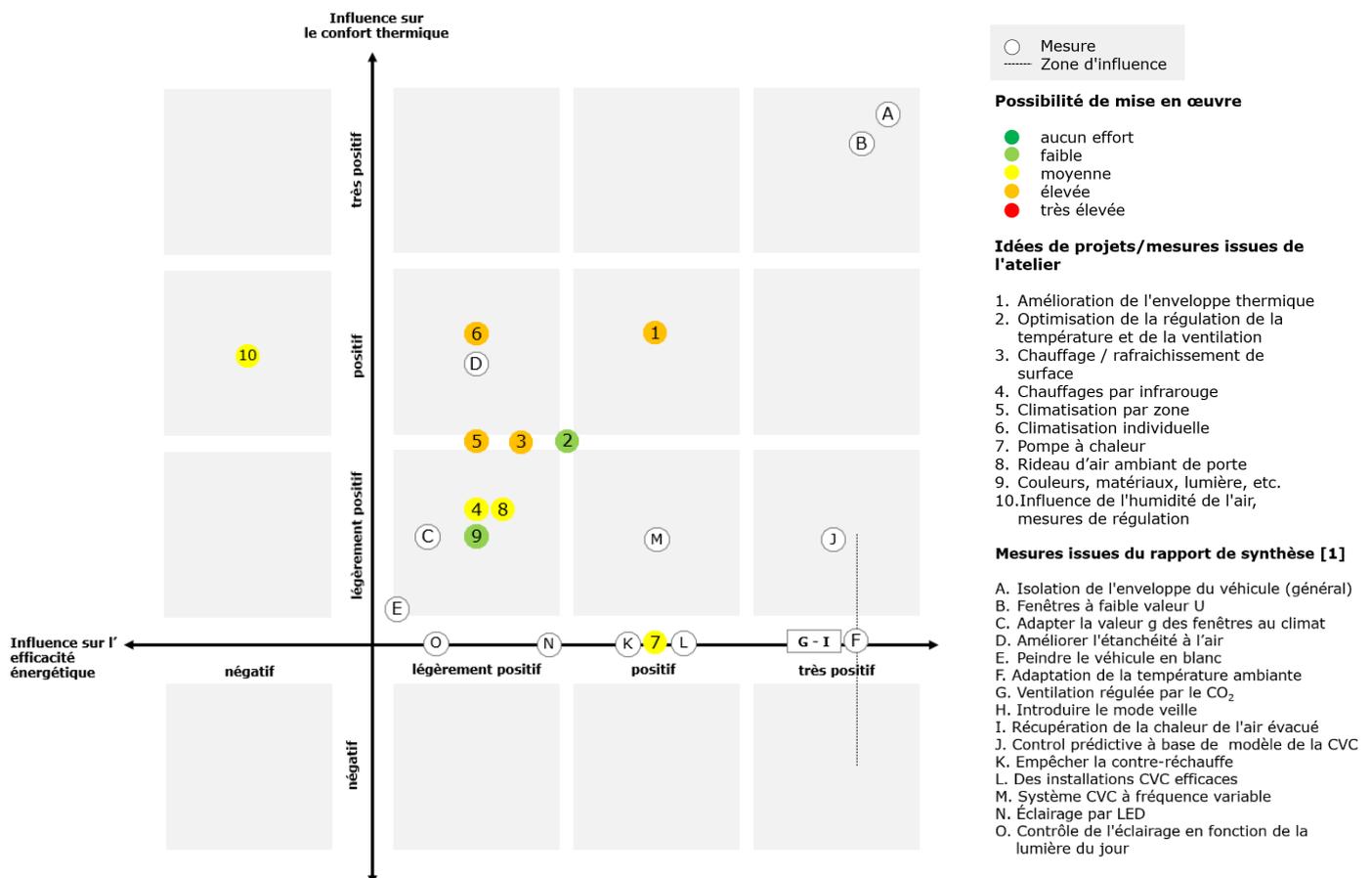


Figure 2: Aperçu des mesures courantes en matière d'énergie et de confort dans les transports publics, l'illustration montre l'influence des mesures sur le confort thermique ainsi que sur l'efficacité énergétique, la faisabilité est indiquée en couleur

On constate clairement que les mesures qui ont une influence positive sur l'efficacité énergétique sont rarement en conflit avec le confort thermique. Les mesures de l'enveloppe thermique (isolation, fenêtres à faible valeur U, étanchéité à l'air, etc.) ont toujours un effet positif sur l'énergie et le confort. Cependant, le coût de la mise en œuvre de ces mesures dans les transports publics peut parfois être élevé, voire très élevé en cas de rénovation. Des mesures telles que l'utilisation d'une pompe à chaleur ou d'un système de récupération de la chaleur de l'air vicié apportent surtout des avantages en termes d'efficacité énergétique, mais le confort thermique ne devrait pas en être affecté. D'autres mesures influencent particulièrement le confort thermique, comme par exemple une climatisation individualisée.

Un facteur qui n'a pas été directement évalué, mais qui est indispensable pour la faisabilité de nouvelles mesures et idées de projets, est le coût. Lors d'une réflexion plus approfondie sur l'idée, cet aspect devrait absolument être pris en compte (considération du coût du cycle de vie).

Conclusion et perspectives

Cette étude constitue un compendium sur le thème du confort thermique dans les transports publics. Outre les bases importantes dans le domaine du confort thermique (facteurs d'influence, normes et directives, etc.), de nombreuses mesures et idées de projet existantes et de nouvelles idées ont été collectées. Il s'agit maintenant de les développer en collaboration entre la recherche et la maîtrise d'ouvrage. Les entretiens et le tour de table ont permis d'établir de nouveaux contacts et de mettre en réseau différents acteurs.

Dans le cadre de l'atelier, cinq idées de projets ont déjà été sélectionnées pour être traitées plus profondément. Il s'agissait notamment de

- L'utilisation de rideaux d'air de porte
- De la climatisation individualisée
- De l'optimisation de l'enveloppe thermique du véhicule
- De l'utilisation de verres électrochromes dans les transports publics
- Guide qualitatif du bien-être dans les transports publics TP/CH

Le prochain objectif est de déposer une demande de projet auprès du programme SETP 2050.

En plus de celles qui ont été sélectionnées, d'autres activités de recherche et de développement devraient également être encouragées. D'autres idées de projets de cette étude peuvent également être développées et contribuer positivement à la réalisation des objectifs de la Stratégie énergétique des transports publics 2050 (SETP 2050). Des manifestations et réunions régulières peuvent aider les acteurs du secteur à se mettre en réseau, à échanger leurs expériences et à présenter de nouvelles idées de projets / mesures dans le cadre de présentations.

1. Ausgangslage

Komfort ist ein wichtiger Faktor für die Attraktivität von öffentlichen Verkehrsmitteln. Die thermische Behaglichkeit ist dabei ein wesentliches Element (neben akustischer und visueller Behaglichkeit sowie Luftqualität und vielen weiteren Faktoren, wie bspw. Platzangebot, Ergonomie etc.). Komfort steht dabei oft im Zielkonflikt u.a. mit den Themen Energieeffizienz sowie Investitions- und Betriebskosten.

Wesentlich für einen angemessenen Komfort ist die Fahrzeughülle. Zusätzlich braucht es zur Gewährleistung eines hohen thermischen Komforts Systeme und Komponenten aus den Bereichen HLK (Heizung, Lüftung, Kühlung). Diese Systeme wirken sich jedoch meist negativ auf den Gesamtenergieverbrauch der Transportmittel aus und es entsteht ein Zielkonflikt. Durch die Realisierung von Energiesparmassnahmen kann dieser Verbrauch optimiert werden. Welche Auswirkungen diese Massnahmen jedoch auf die thermische Behaglichkeit haben und wie sich negative Auswirkungen minimieren lassen, wurde bisher nur wenig untersucht.

Die technischen Anforderungen im Bereich HLK im öV sind in den einschlägigen Normen definiert. In der Anwendung und Definition des Komforts durch die Transportunternehmen und Hersteller bestehen aber grosse Unterschiede in den verschiedenen Fahrzeugen wie Bahn, Bus oder Tram. Beispielsweise haben bei der Einstellung der Innentemperatur die Transportunternehmen unterschiedliche Vorstellungen wie die Sollwertkurve für den Fahrgastraum einzustellen ist. Die verfügbaren Normen lassen viel Freiraum und decken nicht alle Fahrzeugtypen gleich umfassend ab. Im Rahmen dieses Projekts soll diesem Thema nun eine erhöhte Aufmerksamkeit zugesprochen werden.

2. Ziel der Arbeit

Mit diesem Projekt wurde der Einfluss von Effizienzmassnahmen im Bereich HLK auf den thermischen Komfort in verschiedenen Transportmitteln (Bahn, Bus, Auto, Flugzeug etc.) untersucht. Für den öV gibt es derzeit nur vereinzelte Normen, welche jedoch viele Freiräume lassen (z.T. nur für einzelne Fahrzeugtypen, keine konkrete Bewertungsgrundlage für die thermische Behaglichkeit). Dies führt dazu, dass die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit je nach Verkehrsmittel und Unternehmen sehr unterschiedlich umgesetzt werden.

Ziel dieser Studie war es, eine Übersicht über bestehende Normen und Anforderungen an die thermische Behaglichkeit im öV zu schaffen. Ebenso wurde analysiert, wie diese Vorgaben heute von den einzelnen Transportunternehmen verstanden, behandelt und in den verschiedenen Fahrzeugtypen (Bahn, Bus, Tram) umgesetzt werden. Dazu wurden bestehende Konzepte analysiert. Dabei wurden insbesondere auch Referenzen aus der Automobil- und Flugzeugindustrie einbezogen und bewertet. Anforderungen an den öV im Bereich der thermischen Behaglichkeit wurden definiert sowie deren Umsetzung bei Transportunternehmen und Herstellern diskutiert. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden abschliessend Projektideen entwickelt und evaluiert, wie die Auswirkungen von Energiesparmassnahmen im Bereich HLK auf die thermische Behaglichkeit untersucht werden können.

3. Vorgehensweise / Methodik

Die Bearbeitung des Projekts erfolgte anhand von **6 Arbeitspaketen**:

AP 1: Übersicht Konzepte thermische Behaglichkeit

AP 2: Übersicht über die Anforderungen im Bereich HLK im öV

AP 3: Umsetzung der Anforderungen bei den Transportunternehmen und Herstellern

AP 4: Diskussion

AP 5: Projektideen entwickeln, wie die Auswirkungen von Energiesparmassnahmen im Bereich HLK auf die thermische Behaglichkeit untersucht werden können

AP 6: Schlussbericht

Für die Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete wurde dabei wie folgt vorgegangen.

AP 1: Übersicht Konzepte thermische Behaglichkeit

Im ersten Arbeitsschritt wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. Dabei wurde untersucht, welche Konzepte der thermischen Behaglichkeit (neben denen im Gebäudebereich) existieren und wie diese umgesetzt werden. Dazu wurden zum einen Konzepte betrachtet, welche die thermische Behaglichkeit im öV bewerten und aufzeigen, wie diese sichergestellt werden kann. Zum anderen wurden Konzepte analysiert, die unterschiedliche Strategien aufzeigen (bspw. Klimazonen, spezielle Lüftungen oder Temperaturregelungen), wie ein angemessener Komfort (mit wenig Energieverbrauch) erreicht werden kann.

Neben den Verkehrsmitteln Bahn, Bus und Tram wurden ebenso Ansätze aus dem Automobil- und Flugzeugbereich recherchiert und analysiert, um herauszufinden wie entsprechende Konzepte in anderen Bereichen umgesetzt werden. Die Erkenntnisse werden in einer Übersicht dokumentiert.

AP 2: Übersicht über die Anforderungen im Bereich HLK im öV

Ebenso wurde eine Literaturrecherche zu geltenden Normen und Anforderungen im Bereich HLK und Fahrzeughülle im öV durchgeführt. Dabei wurden sowohl nationale als auch europäische Normen sowie Richtlinien der verschiedenen Verbände (VDV, VöV etc.) berücksichtigt. Bei der Bearbeitung dieses Arbeitspaketes konnte insbesondere auf den Erkenntnissen aus dem «Synthesebericht Energieeffizienz im Bereich HLK und Hülle im Schweizer öV» zurückgegriffen werden, wobei diese in gewissen Bereichen zu vertiefen waren. Die Anforderungen wurden nach Fahrzeugtyp aufgeschlüsselt und die Erkenntnisse abschliessend in einer Übersicht zusammengetragen.

AP 3: Umsetzung der Anforderungen bei den Transportunternehmen und Herstellern

In diesem Arbeitspaket wurde eine Analyse zur Umsetzung der technischen Anforderungen im Bereich HLK bei den Herstellern und bei den technischen Kommissionen durchgeführt. Dabei sollten Antworten auf die nachfolgenden Fragen gefunden werden:

a) Wo und wie werden die technischen Anforderungen umgesetzt (bei der Beschaffung, dem Betrieb, beim Unterhalt)?

b) Wie wird der Aspekt der thermischen Behaglichkeit berücksichtigt, vor allem bei der Beschaffung und beim Betrieb?

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurden Interviews mit ausgewählten Personen von Transportunternehmen, Herstellern etc. geführt. Der Interviewleitfaden inkl. Rückmeldungen befindet sich in Anhang 11.1.

AP 4: Diskussion

Dieses Arbeitspaket baute auf den Ergebnissen aus den vorhergehenden Teilaufgaben (AP 1 bis AP 3) auf. Es wurde diskutiert, wie der Aspekt der thermischen Behaglichkeit im öV derzeit berücksichtigt wird. Dabei sollten Antworten auf die nachfolgenden Fragen gefunden werden:

- a) Welchen Stellenwert besitzt der Aspekt der thermischen Behaglichkeit in den geltenden Normen und Richtlinien sowie bei den Transportunternehmen und Herstellern?
- b) Welche Aspekte aus dem Gebäudebereich bzgl. Behaglichkeit werden bereits im öV berücksichtigt? Welche Aspekte liessen sich noch übertragen?
- c) Wie wird der Aspekt der Energieeffizienz im Bereich der thermischen Behaglichkeit im öV berücksichtigt?

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurden die Erkenntnisse aus den vorhergehenden Arbeitsschritten im Projektteam sowie gemeinsam mit der Begleitgruppe analysiert, zugeordnet, ausgewertet und entsprechend im Bericht aufbereitet.

AP 5: Projektideen entwickeln, wie die Auswirkungen von Energiesparmassnahmen im Bereich HLK auf die thermische Behaglichkeit untersucht werden können

In diesem Arbeitspaket wurden Projektideen entwickelt, wie die Auswirkungen von Energiesparmassnahmen im Bereich HLK auf die thermische Behaglichkeit untersucht werden können. Dabei wurden vor allem die folgenden Bereiche berücksichtigt:

- a) Sensitivitätsstudien, welche Parameter einen massgeblichen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit haben.
- b) Modellierungsstudien und/oder Experimente, wie Auswirkungen von Energiesparmassnahmen auf die thermische Behaglichkeit abgeschätzt werden können.
- c) Einordnung von gängigen Energiesparmassnahmen im Bereich HLK hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die thermische Behaglichkeit.

Eine Übersicht über die gängigen Energiesparmassnahmen findet sich im Abschlussbericht zum Projekt «Synthesebericht Energieeffizienz im Bereich HLK und Hülle im Schweizer öV». Zur Entwicklung konkreter Projektideen wurde zudem ein Workshop mit Fachexperten der HSLU T&A (Bereich Gebäudetechnik, Energie und Gebäudehülle) sowie mit Praxispartnern durchgeführt. Gemeinsam wurden Forschungslücken und Potentiale evaluiert und konkrete Projektvorschläge entwickelt.

AP 6: Schlussbericht

Sämtliche Ergebnisse wurden abschliessend in einem Schlussbericht auf Deutsch (mit französischer und englischer Zusammenfassung) dokumentiert und publiziert.

4. Grundlagen

4.1 Synthesebericht – Energieeffizienz im Bereich HLK und Fahrzeughülle im öV, 2021 [1]

Im Rahmen des Programms ESöV 2050 bilden Studien zu Heizung, Lüftung und Kühlung (HLK) sowie zur Wärmedämmung von Fahrzeugen (Hülle) einen thematischen Schwerpunkt. Mit der zunehmenden Dichte von Erkenntnissen ergab sich das Bedürfnis nach einer wissenschaftlichen Aufarbeitung und einer synoptischen Darstellung.

Aus diesem Grund beauftragte das BAV die Hochschule Luzern, einen «Synthesebericht» zu erstellen. Dieser Bericht sollte die in den letzten Jahren weltweit durchgeführten Studien sammeln, sichten und bewerten. Die relevantesten Studien betreffend Hülle und HLK wurden dabei im Detail analysiert und die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst.

Insgesamt wurden rund 100 Studien gefunden und analysiert. Eine umfangreiche Liste von Massnahmen wurde erstellt. Dabei konnten grosse Abweichungen zu Potential und Aufwand der verschiedenen Massnahmen festgestellt werden. Auch durch Experteninterviews konnten diese Aussagen nicht weiter präzisiert werden. Bei acht Massnahmen wurde jedoch ein hohes Einsparpotential vermutet, dazu gehören:

- Temperaturanpassung im Innenraum
- CO₂-gesteuerte Lüftung
- Schlumberbetrieb
- Wärmepumpennutzung
- Dämmung
- Bessere Fenster (tieferer Wärmedurchgangkoeffizient)
- Abluft-Wärmerückgewinnung
- Modellprädiktive Regelung

Abbildung 3 gibt eine Übersicht über die möglichen Energieeinsparpotentiale der genannten Massnahmen.

Legende

Art des Resultats (Form)	Erforschte Transportmittel (Farbe)	Spezielle Kennzeichnungen
● Schätzung	— Bahn	— Spannweite von Werten aus gleicher Studie
◆ Berechnung	— Bus	
— Simulation	— Tram	
✕ Messung Windkanal		
⊕ Messung Betrieb		
■ unbekannt		

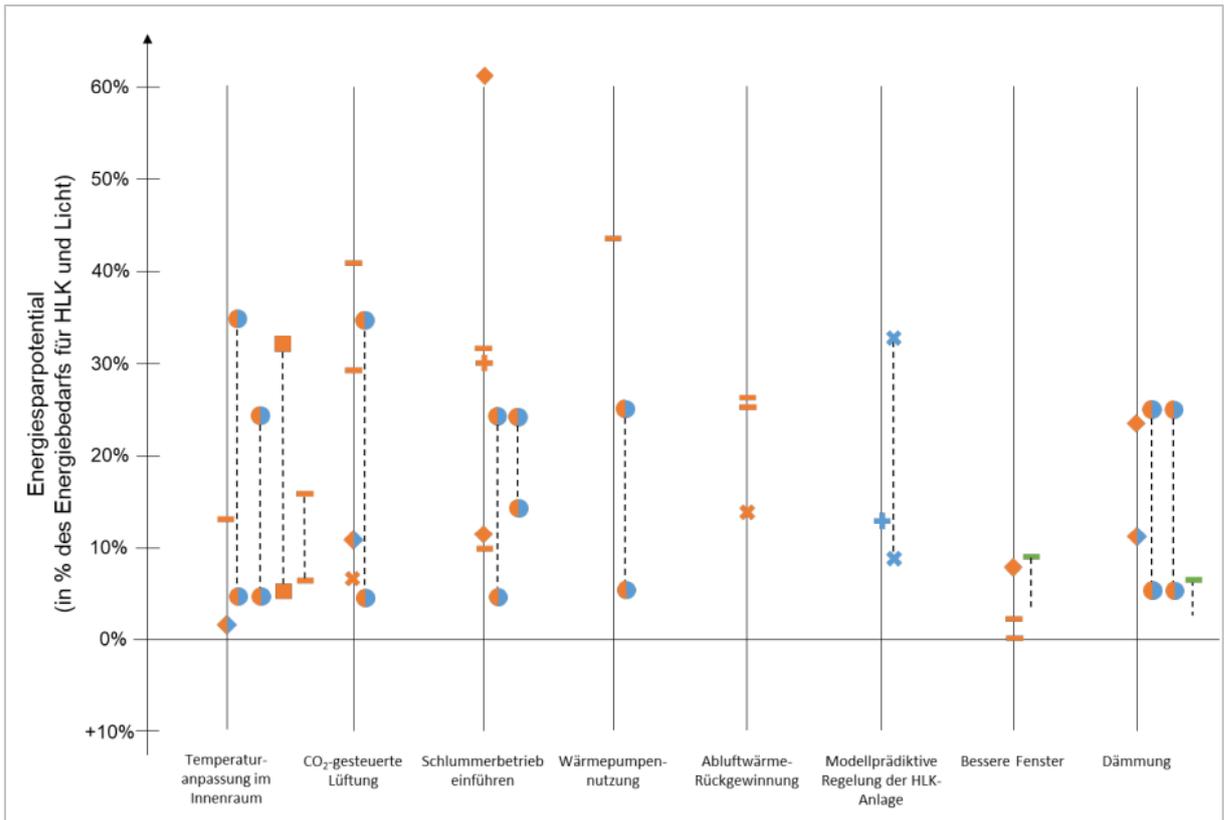


Abbildung 3: Übersicht Energiesparmassnahmen mit überdurchschnittlichen Einsparpotentials, unterschieden nach Verkehrsmittel: Bahn (orange), Bus (grün), Tram (blau) sowie der Art der Resultate. Die gestrichelte Linie gibt die Spannweite der Ergebnisse wieder [1]

Diese und weitere Massnahmen können einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Ziele der Energiestrategie 2050 des Bundes leisten. Neben der Energieeffizienz spielen aber ebenso die Wirtschaftlichkeit und die Zufriedenheit der Fahrgäste eine essenzielle Rolle.

Mit dem «Synthesebericht» entstand ein wertvolles Kompendium, welche für diese Studie eine wichtige Grundlage darstellt. Diese Erkenntnisse sollen nun mit Blick auf die thermische Behaglichkeit erweitert werden. Dabei wird u.a. untersucht, welchen Einfluss Energiesparmassnahmen auf die thermische Behaglichkeit haben und wie die Umsetzung in der Branche erfolgt.

4.2 Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit

«Thermische Behaglichkeit ist gegeben, wenn eine Person die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Luftbewegung und die Wärmestrahlung der Umgebung als optimal empfindet und weder wärmere noch kältere, weder trockenere noch feuchtere Raumluft wünscht.» [2]

4.2.1 Physikalische, physiologische und intermediäre Bedingungen

Abbildung 4 gibt eine Übersicht über verschiedene Bedingungen, welche einen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit des Menschen nehmen. Einige davon haben einen massgebenden, andere nur einen sekundären Einfluss.

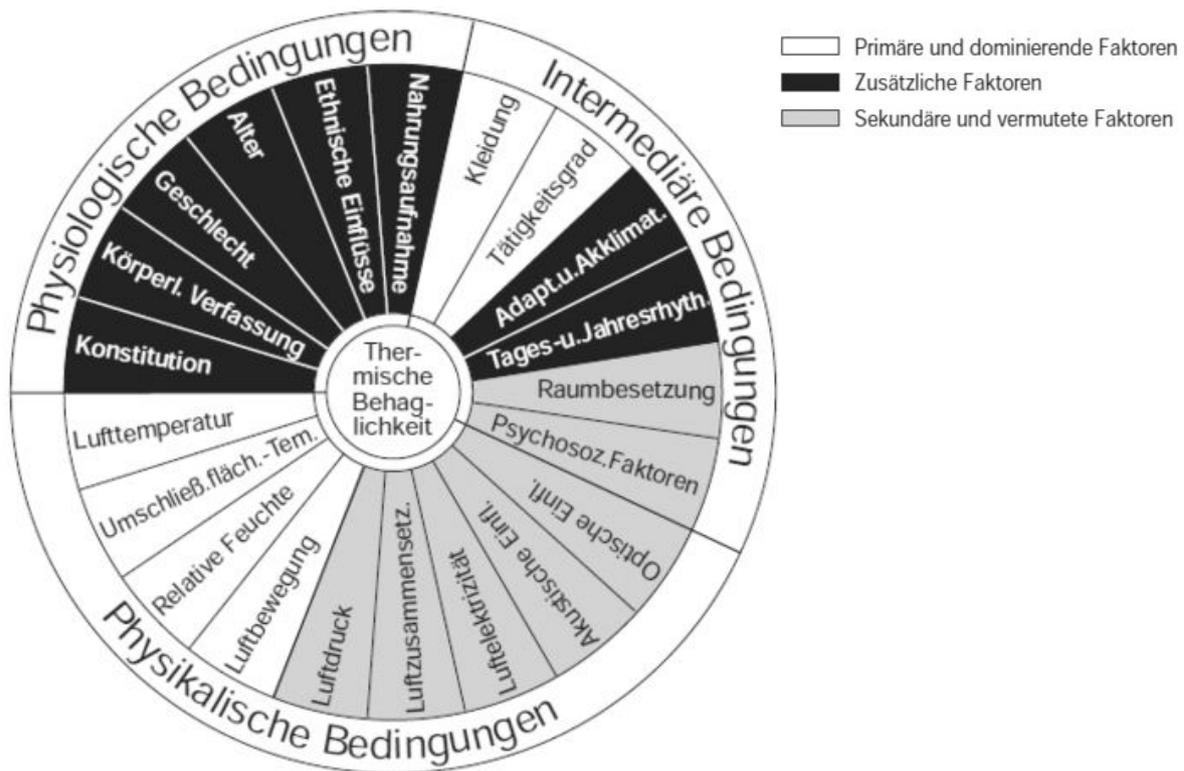


Abbildung 4: Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit, unterschieden nach physiologischen, intermediären und physikalischen Einflüssen sowie deren Einteilung in primäre, sekundäre und zusätzliche Faktoren. [3]

Gemäss der Übersicht können als **primäre und dominierende Faktoren** für die thermische Behaglichkeit die nachfolgenden genannt werden:

- Kleidung
- Tätigkeitsgrad
- Lufttemperatur
- Temperatur der Umschliessungsflächen
- Relative Luftfeuchte
- Luftbewegung

Die Kleidung und der Tätigkeitsgrad sind dabei subjektive Faktoren und können nur von den jeweiligen Personen selbst beeinflusst werden. Die übrigen Parameter (Lufttemperatur, Temperatur der Umschliessungsflächen, relative Luftfeuchte, Luftbewegung) sind hingegen beeinflussbare Faktoren und können durch entsprechende Massnahmen an der Fahrzeughülle oder technische Konzepte und Systeme reguliert werden. In Abschnitt 5.1 wurden einige Massnahmen zusammengetragen und ihr Einfluss auf die genannten Parameter bewertet.

Im ganzheitlichen Sinne ist es aber auch notwendig, neben der Betrachtung der massgebenden Parametern, ebenso die sekundären Einflussfaktoren zu berücksichtigen, da diese für die Kundenzufriedenheit und Akzeptanz ebenso unabdingbar sind. Dazu gehören u.a.:

- Luftqualität (bspw. Staubgehalt, Gerüche)
- Akustische Einflüsse (bspw. Lärm)
- Optische und haptische Einflüsse (bspw. Materialien, Farbgebung)
- Räumliches empfinden (bspw. Platzangebot, Raumatmosphäre)
- Beleuchtung
- Aussicht, etc.

Deutlich wird, dass die Bereitstellung der thermischen Behaglichkeit ein komplexes System aus einer Vielzahl von Einflussfaktoren ist (Abbildung 3). Aufgrund des subjektiven Empfindens jedes Menschen wird es immer einen Teil an unzufriedenen Personen geben. Ziel sollte es sein, einen thermischen Zustand zu erreichen, der von einem möglichst hohen Prozentsatz der Fahrgäste als behaglich empfunden wird. [2]

4.2.2 Äussere und innere Einflussfaktoren, welche sich auf die Wärmebilanz und die Temperaturverteilung im Fahrzeuginnenraum auswirken

Äussere und innere Einflüsse bestimmen das **Raumklima** (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit, Oberflächentemperaturen) und die **Temperaturverteilung im Fahrzeuginnenraum** massgebend. Abbildung 5 gibt einen Überblick über die verschiedenen Einflussfaktoren. Dazu gehören u.a. die direkte und diffuse Sonneneinstrahlung (Wärmestrahlung), die Wärmeleitung durch die Fahrzeughülle (Transmission), die Luftzufuhr über die Klimaanlage (Konvektion) oder auch interne Wärmelasten über Personen, Beleuchtung oder andere technische Einrichtungen.

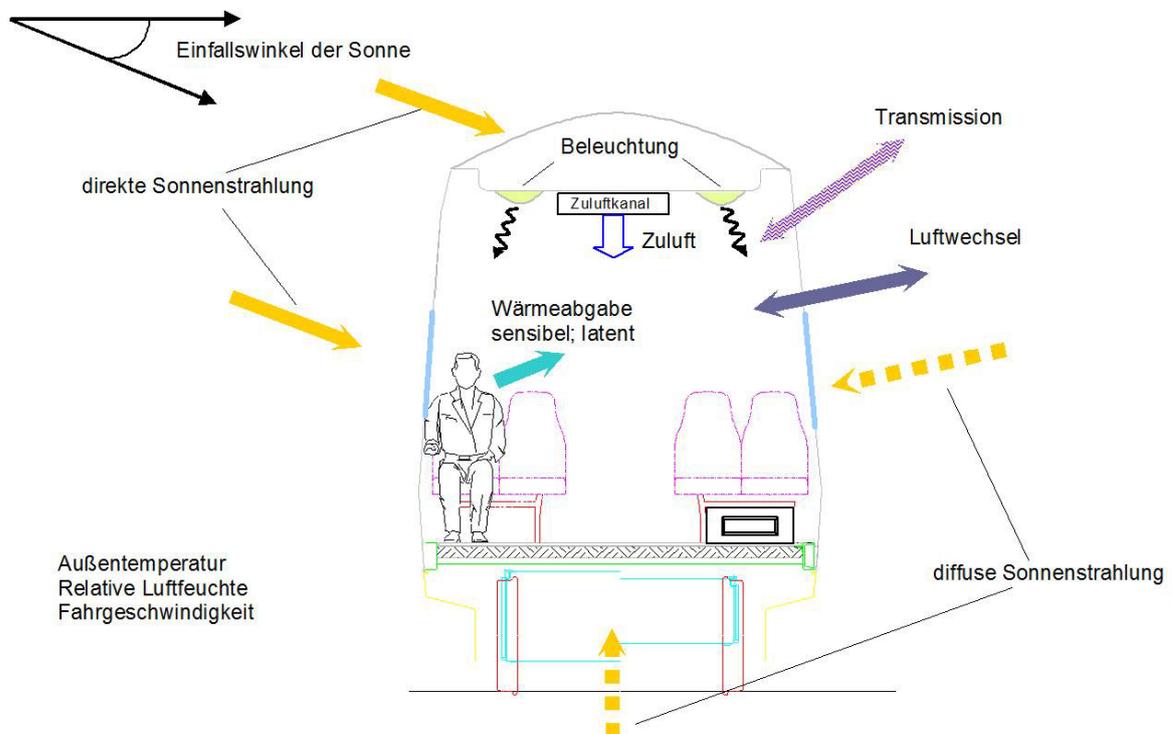


Abbildung 5: Innere und äussere Einflussfaktoren, welche einen Einfluss auf die Wärmebilanz und die Temperaturverteilung im Fahrzeuginnenraum haben (© Rail Tech Arsenal)

Diese Faktoren sind dabei i.d.R. nicht konstant, sondern ändern sich je nach Rahmenbedingung (u.a. Jahres- und Tageszeit, Standort/Fahrstrecke, Fahrgeschwindigkeit, Personenbelegung etc.). Bei der Bereitstellung der gewünschten Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit und Oberflächentemperaturen im Fahrzeug, gilt es diesen äusseren und inneren Einflüssen somit besondere Beachtung zu schenken. Wenn mögliche sollten entsprechende Massnahmen (vgl. Abschnitt 5.1) eingeleitet werden, um die Auswirkungen auf das Raumklima möglichst gering zu halten. Denn der richtige Umgang wirkt sich nicht nur auf die thermische Behaglichkeit, sondern auch auf die Energieeffizienz des Fahrzeugs aus.

4.3 Thermische Behaglichkeit im Gebäudebereich

4.3.1 EN ISO 7730:2006 [4]

Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit

Anwendungsbereiche und Verfahren

Die EN ISO 7730 ist international gültig und wurde zur Bewertung eines gemässigten Umgebungsklimas erarbeitet. Die Norm wurde parallel zur ASHRAE-Norm 55 aufbereitet, welche insbesondere in den USA zur Anwendung kommt (ASHRAE = American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). Ebenso gibt es eine Reihe von weiteren ISO-Dokumenten, welche Grundlagen zur Messung und Bewertung der thermischen Behaglichkeit in extremen Umgebungsbedingungen definieren. Dazu gehören insbesondere ISO 7243, ISO 7933 und ISO/TR 11079.

Die EN ISO 7730 findet im Gebäudebereich bereits eine breite Anwendung. Ursprünglich wurde sie zur Bereitstellung der thermischen Behaglichkeit für die Arbeitsumgebung erstellt, jedoch kann sie auch für jede andere Art der Umgebung Anwendung finden.

Mit den in der Norm beschriebenen Verfahren kann das allgemeine Wärmeempfinden des Menschen sowie der Grad der Unbehaglichkeit (thermische Unzufriedenheit) von Personen bestimmt werden. Durch die Berechnung von PMV (predicted mean vote) und PPD (predicted percentage of dissatisfied) sowie den Umgebungsbedingungen (örtlichen Kriterien) kann die thermische Behaglichkeit analytisch bestimmt und interpretiert werden. Die Norm wird zur Bestimmung der thermischen Behaglichkeit im Innenraum angewendet und gilt für gesunde Personen. Für Personen mit besonderen Anforderungen (bspw. physikalischen Einschränkungen) sollte die ISO/TS 14415 angewendet werden.

PMV (predicted mean vote)

Das Wärmeempfinden des Menschen ist abhängig vom thermischen Gleichgewicht des gesamten Körpers (Wärmebilanz). Dieses wird durch den Aktivitätsgrad und die Bekleidung der Person sowie durch das Umgebungsklima bestimmt. Beim Umgebungsklima spielen dabei insbesondere die Lufttemperatur, die mittlere Strahlungstemperatur, die Luftgeschwindigkeit und die Luftfeuchte eine wichtige Rolle. Sind all diese Faktoren bekannt, kann das Wärmeempfinden des Körpers vorausgesagt werden. Die Empfindung ist in sieben Punkte von kalt (-3) bis warm (+3) eingeteilt (Abbildung 6).

PPD (predicted percentage of dissatisfied)

Mit dem PPD kann der Prozentsatz an Menschen bestimmt werden, die ein bestimmtes Umgebungsklima wahrscheinlich als unbehaglich, d.h. zu warm oder zu kalt, empfinden. Der PPD lässt sich aus dem PMV berechnen.

In der nachfolgenden Grafik ist der Zusammenhang zwischen PMV und PPD dargestellt.

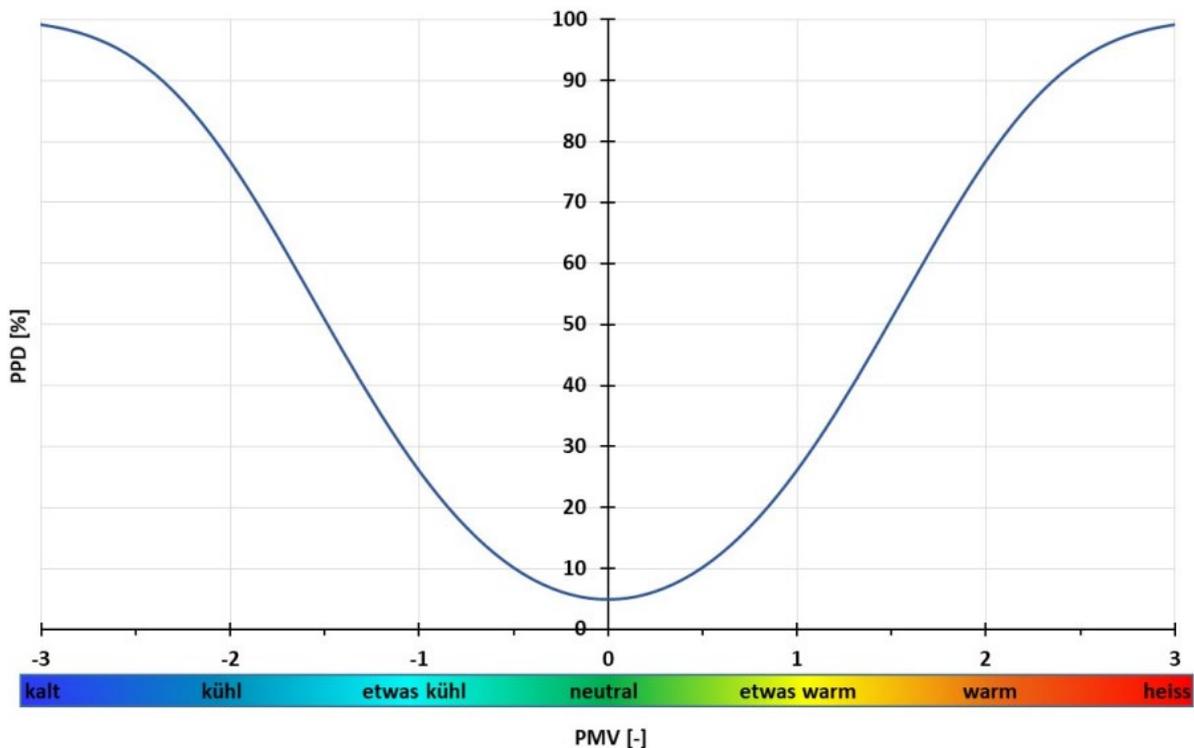


Abbildung 6: PPD als Funktion des PMV (gemäss EN ISO 7730:2006) [1]

Kriterien zur Bestimmung des PMV (predicted mean vote)

Aktivitätsgrad

Der Aktivitätsgrad des Menschen hat einen grossen Einfluss auf den Wärmeempfinden. Je höher die physische Tätigkeit, desto höher ist die Wärmeproduktion im Körper. Im öffentlichen Verkehr ist davon auszugehen, dass die Personen während der Fahrt überwiegend sitzen oder z.T. auch stehen. Das würde einer Wärmeproduktion von 58 W/m² bis 93 W/m² entsprechen.

Bekleidung

Die Bekleidung stellt die Schicht zwischen Körper und Raumklima dar und hat somit ebenso einen direkten Einfluss auf den Wärmehaushalt des Menschen. Die Bekleidung wirkt somit als Isolierschicht und führt zu einem entsprechenden Wärmewiderstand. Geht man von einer stillsitzenden Person bei einer Lufttemperatur von 21 °C, einer Luftgeschwindigkeit von 0.1 m/s und einer relativen Feuchte von 50 % aus, dann würde der Wärmewiderstand bei einer leichten Sommerbekleidung (offenes, kurzes Hemd, lange leichte Hose) bei 0.078 m²K/W liegen und bei einer Bekleidung für kaltes Wetter mit Mantel bei 0.25 – 0.30 m²K/W.

Im Gegensatz zum Gebäude, wo die Bekleidung meist ähnlich ist, sind im öffentlichen Verkehr grössere Abweichungen von einem Mittelwert zu erwarten. Je nach Jahreszeit (Sommer / Winter) sowie der Fahrzeit (Kurz- / Langstrecke) kann die Bekleidung der einzelnen Personen stark schwanken. Dies führt zu einer höheren Komplexität, wenn für möglichst viele Personen ein behagliches Klima bereitgestellt werden soll.

Umgebungs-klima

Das Umgebungs-klima wird insbesondere durch die Lufttemperatur, der mittleren Strahlungstemperatur der raumschliessenden Oberflächen, der Luftbewegung sowie der Luftfeuchtigkeit bestimmt. Welche Anforderungen an diese Kriterien gestellt werden, ist abhängig vom Aktivitätsgrad und der Bekleidung. Abbildung 7 zeigt dies am Beispiel der empfundenen Temperatur.

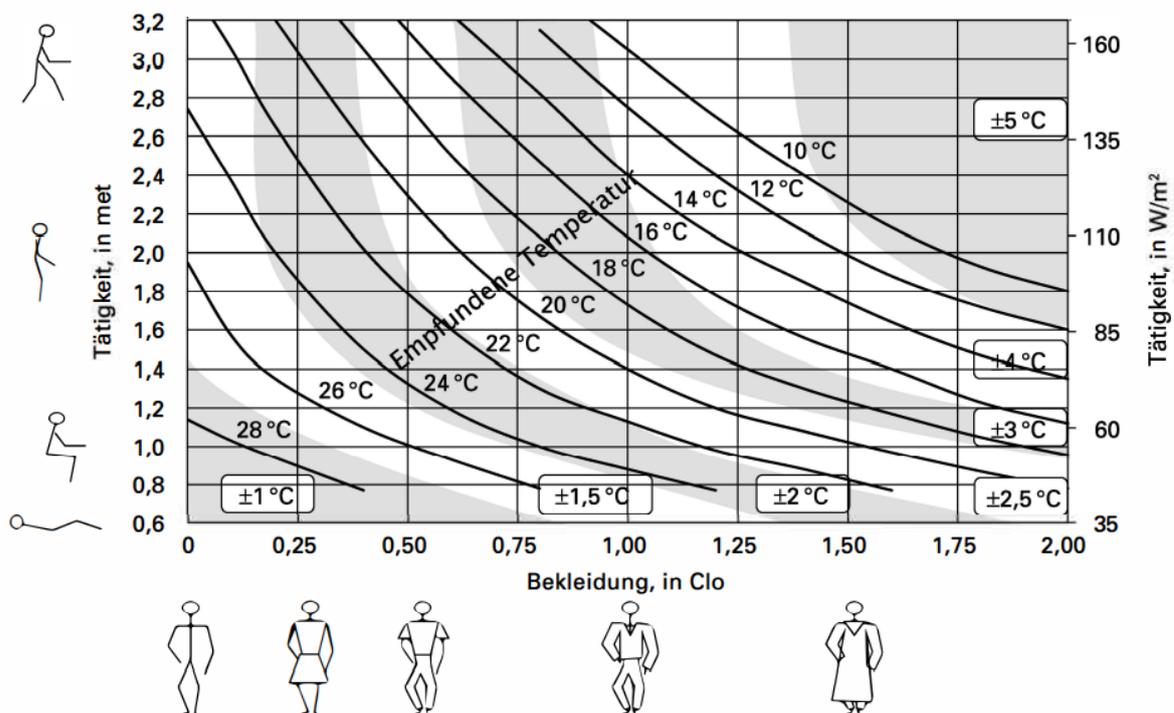


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Aktivitätsgrad, Bekleidung und der empfundenen Temperatur [4]; [5]

4.3.2 SIA 180:2014 [5]

Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden

Anwendungsbereich und Zweck

Zweck der Norm SIA 180 ist die **Sicherstellung eines behaglichen Raumklimas** und die **Vermeidung von Bauschäden**. Die Norm beschreibt Konzepte und Anforderungen, mit denen diese Ziele bei üblichem Gebrauch und normaler Instandhaltung des Gebäudes erreicht werden können. Ein behagliches Raumklima muss in erster Linie mit verschiedenen konstruktiven Massnahmen sichergestellt werden. Mit ausgeschalteten technischen Installationen soll das Gebäude thermisch mindestens so behaglich sein wie der Aussenraum. Ein Lüftungskonzept zeigt auf, wie eine gute Luftqualität gesichert wird. Ebenso wird dargestellt, wie Bauschäden durch Feuchte- und Temperatureinflüsse vermieden werden können. Die Anforderungen an die Wärmedämmung, insbesondere auch an die Wärmebrücken, zur Vermeidung von Kondensat und Schimmelpilz werden beschrieben.

Die vorliegende Norm gilt für alle **Gebäude**, bei denen sich infolge des geforderten Raumklimas bauphysikalische Anforderungen an die Gebäudehülle ergeben. Sie betreffen den **Schutz gegen Wärme, Kälte** und **Feuchte** sowie die **Luftqualität**. Die SIA 180 gilt für Neubauten und für massgebliche Umbauten an der Gebäudehülle sowie für Umnutzungen der Gebäude.

Inhalte

Die Norm behandelt u.a. folgende Themen:

- Thermische Behaglichkeit
- Raumluftqualität und Luftdichtigkeit der Gebäudehülle
- Wärmeschutz im Winter
- Wärmeschutz im Sommer
- Feuchteschutz

Thermische Behaglichkeit

Bei der thermischen Behaglichkeit nimmt die Norm häufig Bezug auf die EN ISO 7730 [4], bspw. bei der zulässigen lokalen Luftgeschwindigkeit oder der Berechnung der optimal empfundenen Temperatur in Räumen (Abbildung 7). Zudem werden Anforderungen hinsichtlich der vertikalen Temperaturverteilung sowie der Strahlungstemperatur von Oberflächen gestellt.

Wärmeschutz im Winter

Diesbezüglich werden insbesondere Anforderungen an die maximal zulässigen Wärmedurchgangskoeffizient der Bauteile und der Reduzierung von Wärmebrücken gestellt. Entsprechende Berechnungsmethoden werden beschrieben.

Wärmeschutz im Sommer

Des Weiteren stellt die Norm Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz. Das Gebäude ist so zu projektieren und auszuführen, dass bei Nutzungen mit mässigen internen spezifischen Wärmeeinträgen die Behaglichkeitsanforderungen bei bestimmungsgemässer Bedienung der beweglichen Sonnenschutzeinrichtungen und bei bedarfsgerechter natürlicher Lüftung ohne aktive Kühlung erfüllt sind. Dazu sind Vorgaben u.a. zu folgenden Punkten definiert: Wärmespeicherfähigkeit des Raumes, maximaler Glasanteil an der Fassade, Einsatz von beweglichem Sonnenschutz, max. zulässiger Wärmedurchgangskoeffizient des Daches oder auch einen Mindest-Aussenluftvolumenstrom für eine effiziente Nachtauskühlung.

4.3.3 SIA Merkblatt 2024:2015 [6]

Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik

Anwendungsbereich und Zweck

Mit dem Merkblatt 2024 soll eine Vereinheitlichung von Annahmen über die Raumnutzungen, insbesondere über die Personenbelegung und die Gerätebenutzung bezwecken. Auf diese Annahmen kann sich bei den Berechnungen und Nachweisen nach den Normen der Energie- und Gebäudetechnik gestützt werden, soweit keine genaueren Angaben vorliegen. Dadurch kann bei allen Normen von den gleichen Nutzungsbedingungen ausgegangen werden.

Des Weiteren beinhaltet das Merkblatt Angaben zu nutzungsabhängigen Anforderungen, welche die **thermische und schallschutztechnische Behaglichkeit**, die Beleuchtung und die Lüftung betreffen. Diese dienen als Anhaltswerte für die Auslegung von Anlagen.

Typische Werte für den Leistungs- und Energiebedarf in den Bereichen Beleuchtung, Lüftung, Kühlung, Befeuchtung, Heizung und Sanitär sind definiert und können in der frühen Planungsphase verwendet werden. Insgesamt sind 46 Raumnutzungen beschrieben.

4.3.4 Parameter der thermischen Behaglichkeit bei Gebäuden und Fahrzeugen

Die thermische Behaglichkeit wird durch verschiedene Parameter bestimmt. Dabei sind insbesondere die Lufttemperatur, Oberflächentemperatur, Luftbewegung und Luftfeuchtigkeit von hoher Bedeutung. Nachfolgend wird beschrieben, welche Annahmen diesbezüglich im Gebäudebereich i.d.R. zur Anwendung kommen, um einen hohen Komfort sicherzustellen. Zudem wird auf die Unterschiede zwischen Gebäuden und Fahrzeugen eingegangen.

4.3.4.1 Luft- und Oberflächentemperatur

Bei einer **Raumtemperaturen von 20 °C bis 22 °C** und einer **relativen Luftfeuchte von 35 % bis 65 %** fühlen sich Personen am wohlsten. Neben der Lufttemperatur haben aber ebenso die **Oberflächentemperaturen** einen entscheidenden Einfluss auf den thermischen Komfort, da durch Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung ein Wärmeaustausch mit dem menschlichen Körper stattfinden kann [7]. In verschiedenen Normen werden diesbezüglich verschiedene Anforderungen an die thermische Hülle (opake und transparente Bauteile) gestellt.

Gebäude verfügen heutzutage meist über eine gut bis sehr gut gedämmte Hülle, wodurch die Oberflächentemperatur der Wände meist sehr nah bei der Innenraumtemperatur liegt. Bei den Fenstern kann es im Winter zu deutlich tieferen Temperaturen und somit zu Zugerscheinungen kommen. Bei Fahrzeugen kann im Vergleich zu Gebäuden aus verschiedenen Gründen (u.a. Platzbedarf, Gewicht etc.) nicht der gleiche Dämmstandard erreicht werden. Die schlechter gedämmte Fahrzeughülle und die grossen Fensterflächen im öffentlichen Verkehr führt dazu, dass es zu einem deutlichen Unterschied zwischen der mittleren Strahlungstemperatur der raumumschliessenden Flächen und der Lufttemperatur kommen kann. Im Vergleich zu Gebäuden, kann es somit bei Fahrzeugen häufiger zu weniger behaglichen Situationen kommen. Dies kann bedeuten, dass höhere Raumlufttemperaturen bereitgestellt werden müssen, um angenehme Temperaturen im Fahrgastraum bereitzustellen. [1]

4.3.4.2 Luftbewegung

Die Luftbewegung hat einen grossen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit. Zugluft beschreibt eine Luftbewegungen aus einer bestimmten Richtung und mit einer geringeren Temperatur als die der Raumluft. Dies führt häufig zu Unbehaglichkeit und sollte möglichst vermieden werden. Zugluft kann beispielsweise durch Lüftungsanlagen oder offene Fenster und Türen entstehen. Ebenso können kalte Oberflächentemperaturen (Kaltluftströmungen an Aussenwänden und Fenstern) zu störenden Luftbewegungen im Innenraum führen. Die kalte Luft sinkt (Kaltluftabfall) und kann u.a. zu einem unangenehmen Luftzug im Fussbereich führen.

Im Gegensatz zum Gebäude, kann Zugluft in Fahrzeugen ein häufig anzutreffendes Problem darstellen. Durch das regelmässige Öffnen der Türen sowie die schlechteren Dämmeigenschaften der thermischen Hülle, kann es insbesondere im Ein-/Ausstiegsbereich und im Bereich der Fensterflächen zu einem unangenehmen Luftzug kommen. [1]

4.3.4.3 Luftfeuchtigkeit

Bei Raumtemperaturen von 20 °C hat die Luftfeuchtigkeit nur einen geringen Einfluss auf den thermischen Komfort von Personen. Je höher die Temperaturen, desto mehr gewinnt die Luftfeuchte an Bedeutung. Das ist damit zu erklären, dass der menschliche Körper bei 20 °C in der Regel weniger Wärme über Verdunstung abgibt. Dies ändert sich jedoch mit zunehmenden Temperaturen [7]. In den verschiedenen Normen werden die Anforderungen an die relative Luftfeuchte somit immer in Bezug zur Temperatur betrachtet.

Vergleicht man Fahrzeuge mit Gebäuden, kann auch hier eine höhere Dynamik festgestellt werden. Zum einen kann es teilweise zu einem starken Feuchteintrag durch zusteigende Personen kommen

(bspw. durch nasse Kleidung). Zum anderen kann es beim öffentlichen Verkehr ebenso zu veränderten klimatischen Bedingungen in der Umgebung kommen, bspw. bei Tunneldurchfahrten oder bei Durchfahrten von verschiedenen Klimazonen. [1]

4.3.5 Analogien und Unterschiede zwischen Gebäuden und Fahrzeugen

Der Fahrgastraum eines Fahrzeugs wird mit Hilfe von technischen Einrichtungen geheizt und gekühlt, sodass ein angenehmer thermischer Komfort bereitgestellt werden kann. Die Technik kommt da zum Einsatz, wo die Fahrzeughülle nicht oder nur ungenügend zu leisten vermag. Diesbezüglich unterscheiden sich Gebäude und Fahrzeuge nicht voneinander. [1]

Im Synthesebericht [1] wurden die Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen Gebäuden und Fahrzeugen ausführlich analysiert. Der Vergleich ist im Abschnitt 4.1, Tabelle 7 des Berichts zu finden, wo u.a. die Nutzung, Vorgaben (Energievorschriften), Hülle, HLK-Technik sowie spezielle Rahmenbedingungen verglichen wurden.

Dabei konnten mit Blick auf Energie, Raumklima und Behaglichkeit die nachfolgenden **Gemeinsamkeiten** identifiziert werden: [1]

- Anforderungen an die thermische Behaglichkeit werden sowohl an Gebäude als auch an Fahrzeuge gestellt
- Dynamik des Aussenklimas (z.B. Tunneldurchfahrt beim Fahrzeug, wechselhafte Bewölkung beim Gebäude) und der Nutzung (z.B. zusteigende respektive eintretende Personengruppen, stark abhängig vom Fahrzeug-, respektive von der Gebäudenutzung)
- Bau- und anlagentechnische Lösungen (viele Gemeinsamkeiten, wenig grundsätzliche Unterschiede)
- Energiekosten haben wenig Relevanz betreffend den Gesamtbetriebskosten
- Zukünftig zunehmende Bedeutung der Grauen Energie

Die Analyse ergab zudem insbesondere die nachfolgenden **Unterschiede** zwischen Fahrzeugen und Gebäuden: [1]

- weniger gut gedämmte Hülle bei Fahrzeugen
- ungünstigeres Verhältnis zwischen Oberfläche und Raumvolumen
- höherer Anteil Wärmebrücken
- geringere thermisch wirksame Masse / thermische Trägheit
- geringeres Platzangebot für Installationen, höhere Restriktionen betreffend Gewicht, Einfluss von verbautem Gewicht auf den Energieverbrauch
- weniger geeignet für die Verwendung von lagerbaren Energieträgern (Öl, Holz) aus Platz-, Sicherheits- und Gewichtsgründen
- in der Regel kein aktiver Sonnenschutz
- geringerer Reifegrad der HLK-Technik
- geringerer Regulierungsgrad zur Energieeffizienz durch den Gesetzgeber

Viele der genannten Punkte haben nicht nur einen Einfluss auf die Energieeffizienz der Verkehrsmittel, sondern führen auch zu höheren Anforderungen zur Bereitstellung der thermischen Behaglichkeit. Hinzu kommt die höhere Komplexität durch dynamische Einflussfaktoren, wie bspw. sich ändernde Umgebungssituationen oder die hohe Anzahl an Personen, welche unterschiedliche Ansprüche an den thermischen Komfort stellen. Je nach Geschlecht, Alter, Aktivität, Kleidung, Stimmung, Gesundheitszustand etc. gelten für jeden einzelnen Menschen andere Anforderungen an ein maximal behagliches Klima. Des Weiteren können weitere Einflussfaktoren, wie Gerüche, Sauberkeit, Lärm etc. die Toleranzschwelle verändern. [8]

Auch wenn der Eindruck entsteht, dass betreffend HLK-Technik und Hülle zwischen Gebäuden und Fahrzeugen mehr Unterschiede und weniger Analogien bestehen, gibt es doch auch viele Gemeinsamkeiten. Zur Bereitstellung der thermischen Behaglichkeit können viele bewerte Konzepte und Massnahmen aus dem Gebäudebereich auf den öV übertragen werden. Das gleiche gilt für Energieeffizienzmassnahmen. Die Umsetzung der Massnahmen kann jedoch oft komplexer sein als bei Gebäuden. [1] In Abschnitt 6.3 wird aufgezeigt, welche Massnahmen aus dem Gebäudebereich bereits im öV angewendet werden und welche Massnahmen noch übertragen werden könnten.

4.4 Grundlagen aus dem Automobilbereich (Pkw)

Im Automobilbereich ist ein hoher thermischer Komfort nicht nur für die Kundenzufriedenheit, sondern insbesondere auch für die Fahrsicherheit essenziell. Denn sie beeinflusst die Konzentrations- und Leistungsfähigkeit sowie die Reaktionsschnelligkeit des Fahrers im Straßenverkehr maßgeblich. Neben dem Komfort gewinnt aber auch das Thema der Energieeffizienz zunehmend an Bedeutung. Dabei rücken neben dem Energiebedarf für die Antriebsleistung insbesondere die Nebenverbraucher (Klima-, Multimedia- oder Navigationsgeräte) in den Fokus, da diese einen grossen Anteil an der Gesamtenergiebilanz der Fahrzeuge ausmachen. Dies wird sich in Zukunft weiter verschärfen. Denn neben den steigenden Komfortansprüchen der Nutzenden, stellt auch die zunehmende Elektrifizierung die Branche vor neue Herausforderungen. Eine hohe Effizienz von Heizung, Kühlung und Lüftung unter Berücksichtigung eines hohen thermischen Komforts ist das gegenwärtige Ziel von Entwicklungsarbeiten. [9]

Bei der Entwicklung von neuen Lösungen, orientiert sich auch die Automobilbranche u.a. an vorhandenen Massnahmen aus dem Gebäudebereich. Dabei ist die Übertragbarkeit dieser Massnahmen zum Teil aber nur begrenzt möglich. Die Inhomogenität der Aussentemperatur, der Fahrgeschwindigkeit sowie der Strahlungseinflüsse stellen dabei die grössten Herausforderungen dar. [9] Hier besteht eine Gemeinsamkeit zu den Verkehrsmitteln des öffentlichen Verkehrs.

4.4.1 Pkw-Klimatisierung

Abbildung 8 gibt einen Überblick über Randbedingungen, Aufgaben und Wechselwirkungen einer Pkw-Klimaanlage mit dem Fahrzeug, der Umgebung und den Insassen. [9] Im Vergleich zu Gebäuden gibt es bei Fahrzeugen deutlich höhere flächenbezogenen Heiz- und Kühllasten. Die für die Aufheiz- und Abkühlvorgänge benötigten Leistungen sind mindestens doppelt so gross wie der für eine stationäre Betriebsweise notwendige Bedarf. [10]

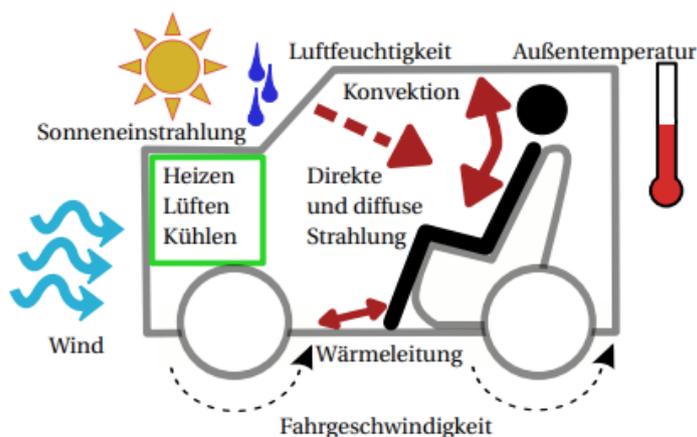


Abbildung 8: Randbedingungen, Aufgaben und Wechselwirkungen einer Pkw-Klimaanlage mit dem Fahrzeug, der Umgebung und den Insassen. [9]

4.4.1.1 Heizen (Winterbetrieb)

Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren wird die **Abwärme des Motors** genutzt, um den Innenraum zu beheizen. Da der Motor jedoch ca. 10 – 20 min. benötigt, um sich ausreichend zu erwärmen, werden häufig **Standheizungen** eingesetzt. Dadurch können in den Wintermonaten auch zu Fahrtbeginn angenehme Innenraumtemperaturen bereitgestellt werden. [11]

Bei Fahrzeugen mit einem besonders niedrigen Verbrauch kann es vorkommen, dass die Heizleistung bei sehr niedrigen Aussenlufttemperaturen nicht ausreicht, um die gewünschten Temperaturen bereitzustellen. In diesem Fall werden die Fahrzeuge i.d.R. serienmässig mit **Zusatzheizungen** ausgestattet. Zusatzheizungen werden meistens elektrisch mit einer maximalen Leistung bis 1,2 kW betrieben. [11]

4.4.1.2 Kühlen (Sommerbetrieb)

Bis heute besteht keine Pflicht zum Einbau einer Klimaanlage. Jedoch werden diese aus Gründen des thermischen Komforts mittlerweile fast standardmässig eingebaut. Die Klimaanlage in Fahrzeugen vereint dabei die Funktionen Heizen, Kühlen und Lüften meist in einer kompakten Einheit. [9]

4.4.1.3 Lüften

Luft ist das wichtigste Transportmedium, um Wärme und Kälte in den Fahrgastraum zu übertragen sowie die Frischluftzufuhr zu gewährleisten. Die Klimaanlage (Heizen, Kühlen, Lüften) wird dabei i.d.R. mit Aussenluft und nur in Sonderfällen mit Umluft betrieben. [11]

Aussenluftbetrieb

Die Umgebungsluft strömt meist vor der Windschutzscheibe über die Wasser- und Partikelabscheidung und das Klimagerät in den Fahrgastraum. Im Klimagerät wird diese Luft dann erwärmt oder abgekühlt (mittels Wärmeübertrager). Gleichzeitig wird Wasser am Verdampfer auskondensiert. Durch die Frischluftzufuhr werden Luftinhaltsstoffe, welche den Fahrgastraum belasten können, weitestgehend beseitigt (bspw. CO₂-Belastungen oder Gerüche). Dementsprechend wird dieser Betriebsform bevorzugt eingesetzt. Der Luftstrom ist in diesem Fall von der Fahrgeschwindigkeit abhängig. [11]

Umluftbetrieb

Die Luft vom Fahrgastraum wird für die Klimatisierung verwendet. Dies kann nützlich sein, um bspw. Geruchsbelastungen durch die Aussenluft zu vermeiden oder den Fahrzeuginnenraum schneller abzukühlen. Da bei dieser Betriebsform jedoch nur wenig Frischluft in das Fahrzeug gelangt (Unterdruck im Fahrzeug, Aussenluft wird in geringen Mengen über Undichtigkeiten der Fahrzeughülle angesaugt), wird in unseren Klimazonen eher der Aussenluftbetrieb angewendet. Der Luftstrom ist in diesem Fall von der Fahrgeschwindigkeit unabhängig. [11]

Zu- und Abluftöffnungen

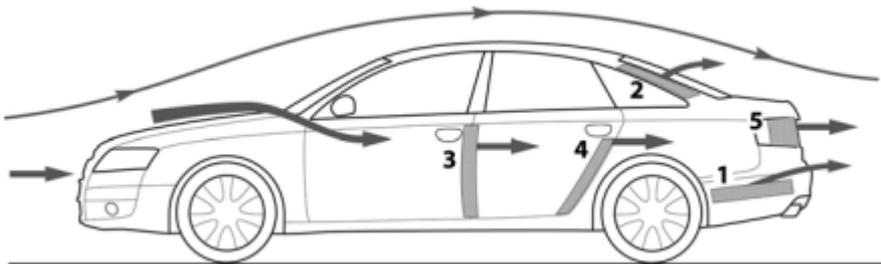


Abbildung 9: Typische Stellen für den Lufteintritt und verschiedene Anordnungen von Abluftöffnungen [11]

Zuluftöffnungen befinden sich im vorderen Teil des Fahrzeuges, vorzugsweise vor der Windschutzscheibe (positives Druckgebiet). Die Abluft kann über das Entlüftungssystem und die Karosserie abgeführt werden und befinden sich am hinteren Teil des Fahrzeuges oder den Fahrzeigtüren. Abbildung 9 zeigt typische Positionierungen für den Lufteintritt und die Abluftöffnungen. [11]

Luftgeschwindigkeiten

Im Pkw-Bereich wird bei der Klimatisierung häufig mit hohen Luftvolumenströmen gearbeitet. Je nach Querschnitt der Zuluftdurchlässe kann dies zu hohen Luftgeschwindigkeiten führen. Neben unangenehmen Zuglufterscheinungen kann dies ebenso zu Geräuschen führen. [9]

4.4.2 Elektromobilität

Im Automobilbereich wird eine zunehmenden Elektrifizierung der Fahrzeuge angestrebt. Effiziente Lösungen für das Heizen, Kühlen und Lüften sind dabei essenziell, da sich ein hoher Energiebedarf der Klimatisierung negativ auf die Reichweite der Fahrzeuge auswirken kann. Dieser Herausforderung stellen sich derzeit auch die Hersteller von batteriebetriebenen Bussen, da auch in diesem Bereich vermehrt auf die Elektrifizierung gesetzt wird.

In der Automobilindustrie gibt es verschiedene Ansätze, welche sich sowohl auf den thermischen Komfort als auch auf die Energieeffizienz positiv auswirken. Diese sind in Abschnitt 5.1.2 zusammengetragen.

4.5 Grundlagen aus der Flugzeugindustrie

Auch bei Flugzeugen stellt die thermische Behaglichkeit einen zentralen Faktor dar. Nicht nur für die Zufriedenheit der Passagiere, sondern auch hinsichtlich der Flugsicherheit. Insbesondere beim Piloten darf die Konzentrations-, Leistungs- und Reaktionsfähigkeit nicht negativ beeinflusst werden. Neben dem thermischen Komfort ist hier ebenso die Luftqualität entscheidend.

Ähnlich wie bei den Verkehrsmitteln Auto, Bus, Bahn und Tram ändert sich auch bei Flugzeugen der Standort und das Umgebungsklima dynamisch. Dabei können die Unterschiede jedoch viel extremer sein, da aufgrund der Flughöhe nicht nur die verschiedenen Klimaverhältnisse, sondern auch die hohen Druckunterschiede berücksichtigt werden müssen. Hinzu kommen die verschiedenen Wetterverhältnisse.

Flugzeuge fliegen im Reiseflug in Höhen von 8.000 – 12.000 m bei einer Außentemperatur von -30 bis -60 °C. [12] Hinzu kommen die deutlich geringeren Druckverhältnisse: Je höher das Flugzeug steigt, desto geringer ist der Luftdruck. Ein geringer Luftdruck bedeutet zwar einen geringen Flugwiderstand, jedoch müssen im Flugzeug selbst ähnliche Druckverhältnisse wie am Boden bereitgestellt werden. Die Klimatisierung erhält bei diesem Verkehrsmittel somit eine besonders hohe Bedeutung, da zu jederzeit der thermische Komfort, die notwendigen Druckverhältnisse sowie eine genügende Frischluftzufuhr garantiert werden muss.

4.5.1 Klimatisierung von Passagierflugzeugen

Zur Bereitstellung des thermischen Komforts der Passagiere sowie der Besatzung, aber auch zur Wahrung der Funktionsfähigkeit der technischen Systeme an Board, muss das Flugzeug konditioniert werden. Die Luftzufuhr erfolgt i.d.R. über Einlassöffnungen in der Kabinendecke, die Abluft wird anschließend im Bodenbereich an den Seiten abgesaugt. [12] Abbildung 10 zeigt, wie die Luftzufuhr und Luftabfuhr in der Flugkabine standardmässig erfolgt.

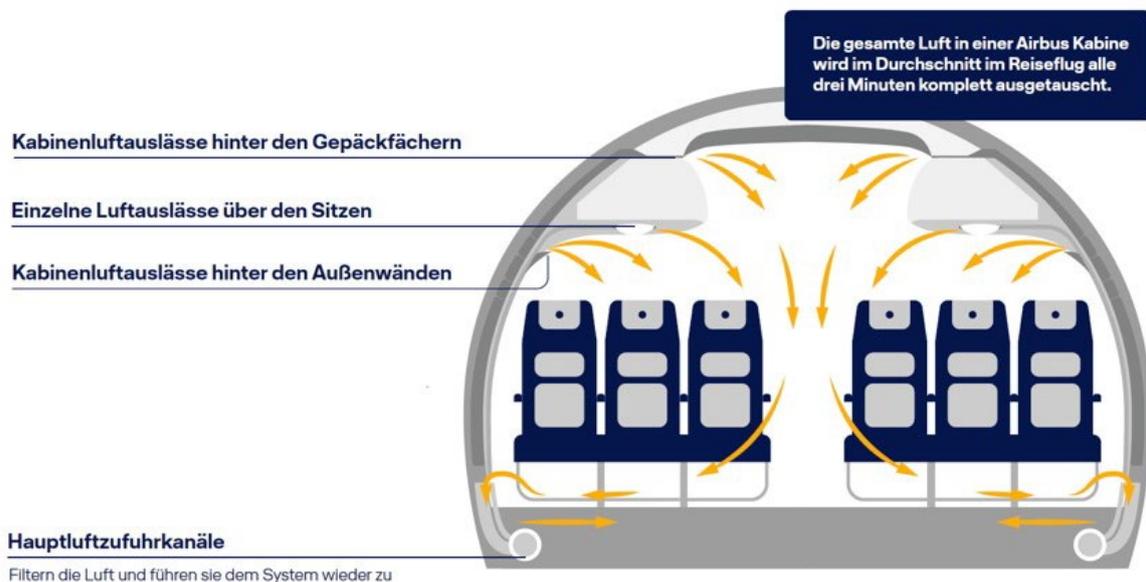


Abbildung 10: Luftzirkulation in einer Airbus-Kabine (Standard), © Lufthansa Group

Die Klimaanlage im Flugzeug übernimmt dabei drei Hauptaufgaben: Luftaustausch, Druck- und Temperaturregelung.

4.5.1.1 Heizen

In grösseren Flugzeugen werden häufig **Verbrennungsheizer** eingesetzt. Durch die Verbrennung von Kraftstoff entsteht Wärme, welche den Luftstrom erwärmt. [13]

Des Weiteren kann die Wärmebereitstellung u.a. auch über **Wärmetauscher** erfolgen. Diese werden meistens bei den Turbinen eingebaut und nutzen die durch den Flugantrieb entstehende Abwärme. Über Mischregler werden dann die Kabinenluft und die temperierte Aussenluft so zusammengeführt, dass die gewünschten Temperaturen im Flugzeuginneren bereitgestellt werden. [12]

4.5.1.2 Kühlen

Die Kühlung von Flugzeugen ist nicht nur am Boden, sondern auch in der Luft ein **wichtiges Thema**. Dabei wird zwischen äusseren und inneren Wärmequellen unterschieden. Von aussen kann Wärme zum einen über die Kabinenwände (Transmission) eintreten, aber auch über Sonneneinstrahlung. Interne Wärmequellen sind einerseits die anwesenden Personen (Passagiere und Besatzung), ebenso entstehen Wärmelasten durch elektronische und mechanische Ausstattungen. Die zur Klimatisierung benötigte Energie wird i.d.R. über die **Hilfstriebwerke** bereitgestellt. [13]

4.5.2 Flugzeughülle

Neben der Klimatisierung kommt aber auch der Flugzeughülle eine besondere Bedeutung zu. Neben thermischen Aspekten (Reduzierung Wärmeübertragungen, angenehme Oberflächentemperaturen), werden ebenso weitere Anforderungen gestellt, wie bspw. geringes Gewicht, guter Schallschutz, etc. Dementsprechend kommen im Flugzeugbereich hocheffiziente Dämmmaterialien zum Einsatz. Diese zeichnen sich u.a. durch eine sehr tiefe Wärmeleitfähigkeit, einen geringen Platzbedarf und ein geringes Gewicht aus. Zudem sollten die Dämmstoffe schallabsorbierend sein. [14]

4.5.3 Entwicklungen und Innovationen

Im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln (Auto, Bus, Bahn und Tram), schneiden Flugzeuge in der CO₂-Bilanz deutlich schlechter ab.¹ Da Themen der Nachhaltigkeit und des Klimaschutzes immer mehr in den Fokus rücken, entsteht ein zunehmender Druck auf die Flugzeugindustrie. Entsprechend wird an verschiedenen Lösungen gearbeitet, um auch dieses Verkehrsmittel umweltfreundlicher zu gestalten.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) untersucht alternative Lösungen für den Flugzeugantrieb. Dazu gehört bspw. der direkte Einsatz von Wasserstoff anstelle von Kerosin als Energieträger oder die Stromerzeugung mittels Wasserstoff-Brennstoffzellen, wobei der erzeugte Strom für den Antrieb von Elektromotoren eingesetzt werden kann. Eine weiterer Ansatz könnte ebenso die Nutzung von synthetischem Kerosin sein (CO₂-neutrale Lösung).² Entsprechende Technologien befinden sich aber noch in der Entwicklung.

Neben den genannten Ansätzen gibt es ebenso noch weitere Strategien, um die Energieeffizienz, aber auch den thermischen Komfort in Flugzeugen zu steigern. Diese sind in Abschnitt 5.1.3 beschrieben.

4.6 Analogien und Unterschiede zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln

In der nachfolgenden Tabelle werden die verschiedenen Verkehrsmittel gegenübergestellt, sodass Analogien und Unterschiede zwischen öV, Auto und Flugzeug schnell erkennbar sind. Davon ausgehend kann u.a. geprüft werden, inwiefern sich Massnahmen übertragen lassen (Abschnitt 6.4).

¹ Energie-Experten.ch

² <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/gruenes-fliegen-2054386>

Tabelle 3: Analogien und Unterschiede zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln

	Verkehrsmittel			
	Schieneverkehr	Bus	Auto (Pkw)	Passagierflugzeug
Nutzung (typische Kennwerte)				
Anzahl Sitzplätze	≤ 1`300	≤ 60	≤ 5 (7)	≤ 800
Verweildauer der Personen	Ø 5 – 120 min.	Ø 5 – 60 min.	Ø 5 – 120 min.	Ø 60 – 600 min.
Belegungsschwankungen im Betrieb	im Allgemeinen hoch	im Allgemeinen hoch	meist konstant	während dem Flug konstant
Bekleidung im Winter	unterschiedlich je nach Aufenthaltsdauer	unterschiedlich, aber meist Winterbekleidung	unterschiedlich je nach Fahrzeit	Bekleidungsgrad mittel
Bekleidung im Sommer	leichte Bekleidung	leichte Bekleidung	leichte Bekleidung	Bekleidungsgrad mittel
Tätigkeit	meist sitzend, aber auch stehend	meist sitzend, aber auch stehend	sitzend	sitzend
Thermische Hülle				
Abstand der Personen zur Hülle	~ 0 – 0.5 m	~ 0 – 0.5 m	~ 0 m	~ 0 – 1.5 m
U-Werte Hülle	1.5 - 3.0 W/m²K	2.5 – 5.0 W/m²K		
Qualität der Verglasung	Einfach- bis Zweifach-Verglasung	Einfach- bis Zweifach-Verglasung	Einfachverglasung	mehrschichtiger Aufbau
Fensteranteil an der Hülle	~ 20 – 30 %	~ 20 – 30 %		
Wärmebrücken	wenig optimiert	wenig optimiert		
Luftdichtheit	bei Hochgeschwindigkeitszügen optimiert, sonst wenig optimiert	sehr klein, da Luftüberströmungen		
Aussenliegender Sonnenschutz	Nein	Nein	Nein	Nein
Innenliegender Sonnenschutz	teilweise	selten, bei Fernbussen durch Vorhänge	Nein	Ja

Verkehrsmittel

	Schienenverkehr	Bus	Auto (Pkw)	Passagierflugzeug
Technik				
Fahrzeugantrieb	Elektrischer Antrieb	Verbrennungsmotor, batteriebetriebene Fahrzeuge zunehmend	Verbrennungsmotor, batteriebetriebene Fahrzeuge zunehmend	Verbrennungsmotor (Kerosin)
Elektrodirektheizung	Standard	Standard	Nein, Abwärmenutzung	
Wärmepumpen	Nein	teilweise, bei batteriebetriebenen Fahrzeugen	teilweise, bei batteriebetriebenen Fahrzeugen	
Nutzung von Solarenergie (PV)	Nein	Nein	selten, teils zur Vorklimatisierung (Standlüftung)	Nein
Betriebsweise Klimaanlage Luftheizung	Aussenluft- und Umluftbetrieb, teils CO ₂ -gesteuerte Regelung	Aussenluft- und Umluftbetrieb	Aussenluftbetrieb, selten im Umluftbetrieb (bspw. bei Tunneldurchfahrten)	
Betriebsweise Klimaanlage Luftkühlung	Umluftbetrieb (Standard)	Umluftbetrieb (Standard)	Aussenluftbetrieb, selten im Umluftbetrieb	
Wärmerückgewinnung (WRG) Lüftung	Nein	Nein	Nein	
Fensterlüftung	selten möglich, eher in älteren Fahrzeugen	Teilweise, in neuen Fahrzeugen weniger	Ja	Nein
Sitzheizungen	Nein	Nein	meist vorhanden	Nein
Türöffnungen	Fahrzeugabhängig, mehrfach in der Stunde	mehrfach in der Stunde	zum Ein- und Ausstieg	zum Ein- und Ausstieg

Spezielle Rahmenbedingungen

Standort	dynamisch	dynamisch	dynamisch	dynamisch
Klimazone	bleibt gleich	bleibt gleich	bleibt i.d.R. gleich	verschiedene Klimazonen
Höhe ü.M.	≤ 2'000 m	≤ 2'000 m	≤ 2'000 m	≤ 12'000 m
Temperaturschwankungen Aussenluft	-20°C bis 40°C	-20°C bis 40°C	-20°C bis 40°C	-60°C bis 50°C

Als wesentliche Gemeinsamkeiten zwischen den beschriebenen Verkehrsmitteln, können vor allem die nachfolgenden Punkte genannt werden:

- Anforderungen an die thermische Behaglichkeit müssen erfüllt werden
- geringeres Platzangebot für Installationen und Dämmung
- möglichst wenig Gewicht, verbautes Gewicht hat einen direkten Einfluss auf den Energieverbrauch (grösster Einfluss im Flugzeug)
- Dynamik des Aussenklimas, wechselnder Standort
- Regelung der Innenraumtemperaturen mittels Klimaanlage (Medium Luft)
- Einsatz erneuerbarer Energien und das Thema der Energieeffizienz rücken mit der Entwicklung hin zu batteriebetriebenen Fahrzeugen in den Fokus (Reichweite)
- im öffentlichen Verkehr sowie in Flugzeugen wird i.d.R. eine hohe Anzahl Personen transportiert

Die Verkehrsmittel unterscheiden sich vor allem durch:

- Anzahl Personen im Pkw deutlich geringer (Individualverkehr)
- sehr gute Dämmeigenschaften der Flugzeughülle, weniger gut gedämmte Hülle bei den übrigen Verkehrsmitteln
- Wärmebrücken vor allem bei Flugzeugen optimiert, bei den anderen Verkehrsmitteln nicht bis wenig optimiert
- Luftdichtheit vor allem bei Flugzeugen sehr gut, bei den anderen Verkehrsmitteln nicht bis wenig optimiert (ausser bei Hochgeschwindigkeitszügen)
- individualisierte Klimatisierungen im Pkw (Sitzheizungen, zonenweise Klimatisierung)
- Grosse Temperaturschwankungen des Aussenklimas in kurzer Zeit sind insbesondere bei Flugzeugen sehr hoch

Deutlich wird, dass zwischen den unterschiedlichen Verkehrsmitteln **viele Gemeinsamkeiten** bestehen. Entsprechend könnten Optimierungsmassnahmen aus dem Automobil- und Flugzeugbereich, welche den Komfort und die Energieeffizienz betreffen, auch für den öffentlichen Verkehr interessante Ansätze darstellen.

5. Ergebnisse

5.1 Literaturrecherche zu Konzepten der thermischen Behaglichkeit

Um einen hohen thermischen Komfort bei Fahrzeugen zu garantieren, gibt es verschiedene Massnahmen und Strategien. Diese können sich ganz unterschiedlich auf die einzelnen Faktoren des Umgebungsklimas (insbesondere Luft- und Oberflächentemperatur, Luftbewegung und Luftfeuchte) auswirken. Normen und Richtlinien stellen verschiedene Anforderungen an diese Einflussfaktoren, diese werden in Abschnitt 5.2 genauer beschrieben.

Mittels Literaturrecherche wurden vorhandene Konzepte und Strategien zur Bereitstellung der thermischen Behaglichkeit bei unterschiedlichen Verkehrsmitteln zusammengetragen (Tabelle 4).

Tabelle 4: Übersicht Rechercheergebnisse zu Massnahmen der thermischen Behaglichkeit bei verschiedenen Verkehrsmitteln

Massnahmen	Einfluss auf...				Verkehrsmittel				
									
Fahrzeughülle (opak)									
Dämmung der Fahrzeughülle	x	x	x						
Hocheffiziente Dämmstoffe	x	x	x						
Wärmebrücken reduzieren	x	x	x						
Luftdichtigkeit verbessern	x	x	x						
Fahrzeug weiss lackieren	x	x							
Fahrzeughülle (transparent)									
Fenster mit tiefen U-Wert	x	x	x						
Reduktion der Fensterfläche	x	x	x						
Anstellwinkel der Frontscheibe	x	x							
g-Wert der Fenster	x	x							
Reflektierende Scheiben	x	x							
Sonnenschutzfolie	x	x							
Elektrochrome Gläser	x	x							
Fahrzeugsür									
Türöffnungen (individuell, optimiert)	x		x						
Türluftschleier	x		x						
Lüftungsregulierung bei Türöffnung	x		x						
HLK Massnahmen									
HLK-Anlagen (allgemein)	x		x	x					
Kaltluftabfall an Fenstern reduzieren			x						
Berücksichtigung von internen Lasten	x								
Modellprädiktive Regelung	x								
Zonenweise Klimatisierung	x		x						
Körpernah wirkende Heiz- und Kühlsysteme	x		x						
Wärmekapazitäten reduzieren (Innenraum)	x								
PV - Personal Ventilation	x		x						
Wärmerückgewinnung (WRG) Entlüftung	x								
Bauteilintegrierte Infrarotstrahlungselemente	x	x	x						
Solarzellen betriebene Lüftung (Stillstand)	x	x							
Vorkonditionierung Flugzeug am Boden	x	x							
Design durch Simulation									
Thermische Simulationsmodelle	x	x	x	x					
Behaglichkeitssimulation	x	x	x	x					
Sonstige									
Farbgebung des Lichts	x								
Material der Sitze	x								

Legende

- | | | | |
|---|-----------------------|---|-------------------------------|
|  | Lufttemperatur |  | Schienerfahrzeug (Bahn, Tram) |
|  | Oberflächentemperatur |  | Bus |
|  | Luftbewegung |  | Auto |
|  | Luftfeuchte |  | Flugzeug |

Die in der Tabelle dargestellten Massnahmen werden nachfolgend detaillierter beschrieben. Ebenso wird der Einfluss der Massnahme auf die einzelnen Kriterien der thermischen Behaglichkeit wie folgt bewertet:

- 0 = keinen Einfluss
- 1 = geringer Einfluss
- 2 = mittlerer Einfluss
- 3 = hoher Einfluss

Beispiel:

 hoher Einfluss auf die Lufttemperatur

 geringer Einfluss auf die Luftbewegung

Zudem werden neben der thermischen Behaglichkeit ebenso Aussagen zur Energieeffizienz ergänzt. Bei einigen Massnahmen, insbesondere im Bereich der Fahrzeughülle, gibt es diesbezüglich Synergien (positiv für Komfort und Energie). In anderen Bereichen, bspw. bei HLK-Massnahmen, gehen dies nicht immer einher. Der Einfluss der Massnahmen mit Blick auf die Energieeffizienz des Fahrzeugs wird wie folgt dargestellt:

-  Positiv
-  Negativ

Wie hoch dieser Einfluss ist, wird analog den zuvor beschriebenen Angaben (0 bis 3) definiert. Für weitere Informationen zu Energieeffizienzmassnahmen im öffentlichen Verkehr wird auf den «Synthesebericht» [1] der Hochschule Luzern verwiesen, dieser stellt ein umfangreiches Kompendium in diesem Bereich dar. Die Bewertungen basieren auf den Einschätzungen der Autoren.

5.1.1 Verkehrsmittel: Bus, Bahn und Tram

a.) Massnahmen im Bereich der Fahrzeughülle (opake Bauteile)

Ziel: Wärmeaustausch über die Hülle reduzieren

Tabelle 5: Massnahmen für einen hohen thermischen Komfort bei Bus, Bahn und Tram (opake Bauteile) [1]

Massnahme Kurzbeschreibung	Einfluss auf...	
	Komfort	Energie
<p>Dämmung der Fahrzeughülle</p> <p>Dämmmassnahmen der thermischen Hülle können nicht nur zur Senkung des Energiebedarfs beitragen, sondern wirken sich ebenso positiv auf das Innenraumklima aus.</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung: 20 bis 40-jähriges Fahrzeug</i></p>	  	
<p>Wärmebrücken reduzieren</p> <p>Je nach Konstruktion, verwendetem Material sowie der Geometrie der Fahrzeuge können Wärmebrücken entstehen. Diese führen zum einen zu Energieverlusten durch Transmission, ebenso können sie sich negativ auf den thermischen Komfort auswirken.</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung: 20 bis 40-jähriges Fahrzeug</i></p>	  	

Massnahme Kurzbeschreibung	Einfluss auf...	
	Komfort	Energie
<p>Luftdichtigkeit verbessern</p> <p>Die Fahrzeughülle sollte so luftdicht wie möglich sein. Unge- wollter Luftaustausch zwischen dem Fahrzeuginneren und dem Aussenraum erhöht den thermischen Energieverlust und wirkt sich negativ auf das Wohlbefinden aus.</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung: 20 bis 40-jähriges Fahrzeug</i></p>		
<p>Helle Oberflächenfarben</p> <p>Durch die hohe Reflexion von hellen Oberflächen kann das Aufheizen des Fahrzeugs im Sommer reduziert werden. In den Wintermonaten könnte sich dies jedoch leicht negativ auswirken (weniger Wärmegewinne). Bei der Farbwahl ver- schiedener Oberflächen sollte der Sonnenstand berücksich- tigt werden und der Einfluss der Massnahme auf die Gesam- tenergiebilanz betrachtet werden.</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung: Fahrzeughülle anthrazit lackiert</i></p>		

b.) Massnahmen im Bereich der Fahrzeughülle (transparente Bauteile)

Ziel: Wärmeaustausch über die Hülle reduzieren

Tabelle 6: Massnahmen für einen hohen thermischen Komfort bei Bus, Bahn und Tram (transparente Bauteile) [1]

Massnahme Kurzbeschreibung	Einfluss auf...	
	Komfort	Energie
<p>Fenster mit tiefem U-Wert</p> <p>Der U-Wert der Fenster ist entscheidend für den Wärmeaus- tausch zwischen dem Innen- und Aussenraum. Tiefe U- Werte reduzieren die Wärmeverluste und verbessern den thermischen Komfort. Insbesondere im Bereich der Fenster kommt es häufig zu einem Kaltluftabfall (Winter), wodurch es zu unangenehmen Zegerscheinungen im Fahrgastraum kom- men kann.</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung: Doppelverglasung ohne IR-Be- schichtung</i></p>		
<p>Reduktion der Fensterfläche</p> <p>Bei dieser Massnahme gilt es das Gleichgewicht zwischen Energie, thermischer und visueller Behaglichkeit zu finden. Eine Reduktion der Fensterfläche kann die Transmissionswär- meverluste senken (wenn die Fenster die Schwachstelle der thermischen Hülle darstellen). Gleichzeitig können insbeson- dere die Wärmelasten im Sommer reduziert und das Aufhei- zen des Fahrgastraums gemindert werden. Ein kleinerer Fen- sterflächenanteil kann sich somit positiv auf die Energie und den thermischen Komfort auswirken. Es ist jedoch darauf zu achten, dass eine gute Sicht nach aussen sowie eine ausrei- chende Tageslichtversorgung garantiert werden.</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung: Fensterflächenanteil von 20 %</i></p>		

Massnahme Kurzbeschreibung	Einfluss auf...	
	Komfort	Energie
<p>g-Wert der Fenster</p> <p>Wird der Gesamtenergiedurchlassgrad dem Klima angepasst, kann dies einen positiven Einfluss auf Energie und den thermischen Komfort haben. Ein tiefer g-Wert reduziert den Kühlenergiebedarf im Sommer, der Fahrgastraum erhitzt sich weniger schnell. Gleichzeitig erhöht sich dadurch aber der Heizwärmebedarf im Winter. Die Energiebilanz über das gesamte Jahr sollte betrachtet werden.</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung: Gesamtenergiedurchlassgrad von 50 %</i></p>	 	 / 
<p>Elektrochrome Gläser</p> <p>Mit elektrochromen Gläsern kann der Wärmeeintrag ins Fahrzeug durch Veränderung des g-Wertes der Gläser der jeweiligen Situation angepasst werden. Dadurch können solare Wärmegewinne im Winter genutzt und Wärmelasten im Sommer reduziert werden. Im Gebäudebereich kommt diese Massnahme bereits zur Anwendung.</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung: Doppelverglasung ohne IR-Beschichtung, g-Wert 50%</i></p>	 	
<p>Sonnenschutzfolien</p> <p>Schutzfolien dienen in erster Linie zur Reflexion des Sonnenlichts. Der Innenraum des Fahrzeugs heizt sich im Sommer weniger stark auf (besserer thermischer Komfort und geringere Wärmelast). Im Winter reduziert diese Massnahme jedoch die Wärmegewinne (höherer Heizwärmebedarf). Ebenso lassen Sonnenschutzfolien weniger Tageslicht in den Fahrzeuginnenraum [15]. Eine saisonale Anwendung (Sommermonate) dieser Massnahme könnte aber durchaus in Betracht gezogen werden. Jedoch ist dabei vorab zu prüfen, inwieweit dabei der Komfort der Passagiere eingeschränkt wird (u.a. Sicht nach aussen, Abdunklung des Fahrgastinnenraums).</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung: Doppelverglasung ohne IR-Beschichtung, g-Wert 50%, keine Sonnenschutzfolie</i></p>	 	 / 

c.) Massnahmen im Bereich der Fahrzeugtüren

Ziel: Direkten Luftaustausch reduzieren

Tabelle 7: Massnahmen für einen hohen thermischen Komfort bei Bus, Bahn und Tram (Fahrzeugtür) [1]

Massnahme Kurzbeschreibung	Einfluss auf...	
	Komfort	Energie
<p>Türöffnungen (Öffnungszeiten, Steuerung)</p> <p>Durch Türöffnungen findet ein direkter Luftaustausch zwischen dem Fahrzeuginneren und dem Aussenraum statt. Kurze Öffnungszeiten und individuell gesteuerte Türöffnungen können diesen Austausch reduzieren (geringere Wärmelasten im Sommer, geringere Wärmeverluste im Winter)</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung; automatische Türöffnung, Türöffnungszeiten von ca. 20 s</i></p>	 	

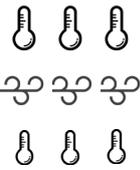
Massnahme Kurzbeschreibung	Einfluss auf...	
	Komfort	Energie
Türluftschleier Parallel zur Fahrzeugtür wird Luft eingeblasen damit der Luftaustausch zwischen Fahrzeuginnenraum und Aussenraum reduziert wird. Dies kann den thermischen Komfort im Fahrzeuginnenraum erhöhen und unangenehme Zugluft reduzieren. <i>Basiswert für die Bewertung: kein Türluftschleier vorhanden</i>		
Lüftungsregulierung bei Türöffnung Bei dieser Massnahme wird die Druckdifferenz zwischen Innen- und Aussenluft minimiert. Dadurch kann der Luftaustausch über die Türen reduziert werden. Dies kann sich positiv auf Energie und thermische Behaglichkeit auswirken. <i>Basiswert für die Bewertung: keine Lüftungsregulierung</i>		

Weitere Massnahmen, wie die Installation von schweren Türvorhängen, geringere Türöffnungszeiten, schnellere Türöffnungen & -schliessung oder der Einbau von Drehtüren, werden als weniger zielführend eingestuft, da die Akzeptanz nicht gegeben ist oder diese Massnahmen schwer / nicht umsetzbar sind und werden deshalb nicht empfohlen. [1]

d.) HLK-Massnahmen

Ziel: Bereitstellung eines angenehmen Innenraumklimas

Tabelle 8: Massnahmen für einen hohen thermischen Komfort bei Bus, Bahn und Tram (HLK) [1]

Massnahme Kurzbeschreibung	Einfluss auf...	
	Komfort	Energie
HLK-Anlagen (allgemein) Anlagen für Heizung, Lüftung und Klima sind essenziell zur Bereitstellung eines angenehmen Innenraumklimas. Dabei können die verschiedensten Anlagen eingesetzt werden, für die Passagiere ist wichtig, dass ein hoher Komfort erreicht wird (thermisch, akustisch, visuell). Dabei sind u.a. folgende Faktoren zu beachten: <ul style="list-style-type: none"> • angenehme (konstante) Lufttemperaturen • gleichmässige Temperaturverteilung im Innenraum (vertikal, horizontale Schichtung) • Ausgleich von möglichen Zugerscheinungen (wenn nötig, Anpassung der Lufttemperatur) • Regulierung der Luftfeuchte • geringe Geräuschbelastung • hohe Lufthygiene • wenn möglich, nicht sichtbar (visueller Komfort) Mit Blick auf die Energieeffizienz ist die Wahl der HLK-Elemente jedoch von hoher Bedeutung. Hier kann u.a. der Einsatz von Wärmepumpen oder die Abwärmerückgewinnung genannt werden. <i>Basiswert für die Bewertung: Elektrodirektheizung</i>		 <i>abhängig von den Massnahmen</i>

Massnahme Kurzbeschreibung	Einfluss auf...	
	Komfort	Energie
<p>Kaltluftabfall an Fenstern reduzieren</p> <p>Lüftungsanlagen sollten so konzipiert sein, dass sie durch die Führung der Zuluft dem Kaltluftabfall an den Fenstern entgegenwirken. Dadurch können unangenehmen Zuglufterscheinungen reduziert werden.</p> <p>Basiswert für die Bewertung: ohne Massnahmen zur Vermeidung des Kaltluftabfalls an Fenstern</p>		
<p>Berücksichtigung von internen Lasten (Regulierung der Heizung)</p> <p>Interne Lasten (durch Personen, Beleuchtung etc.) können einen direkten Einfluss auf das Innenraumklima haben. Können diese bestimmt und berücksichtigt werden, kann die notwendige Innenraumtemperatur noch genauer erreicht werden. Dies kann bspw. durch Innentemperatursensoren erfolgen.</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung: Regulierung der Heizung ohne Berücksichtigung interner Lasten</i></p>		
<p>Modellprädiktive Regelung (Softwarelösung)</p> <p>Durch eine Software kann eine vorausschauende, auf Algorithmen basierende Regelung der Komfortfunktionen erfolgen. Durch Algorithmen wird versucht, verschiedene Einflussfaktoren aufgrund von modellierten Vorhersagen zu berücksichtigen. Dazu gehören u.a. Sonneneinstrahlung, Anzahl Fahrgäste, Aussenlufttemperatur, Fahrgeschwindigkeit etc.). Dadurch kann eine geringere Solwertabweichung der Raumlufttemperatur sichergestellt werden, was sich nicht nur auf den thermischen Komfort, sondern auch positiv auf die Energieeffizienz im Betrieb auswirken kann.</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung: ohne modellprädiktive Regelung</i></p>		

e.) Design durch Simulation

Ziel: Unterstützung bei der Konzeptionierung

Tabelle 9: Massnahmen für einen hohen thermischen Komfort bei Bus, Bahn und Tram (Simulationen) [1]

Massnahme Kurzbeschreibung	Einfluss auf...	
	Komfort	Energie
<p>Thermische Simulationsmodelle</p> <p>Thermische Simulationsmodelle von Fahrzeugen dienen vor allem dazu Schwachstellen in der Hülle oder der HLK-Anlage aufzudecken und alternativen zu den Schwachstellen zu testen. Die Simulationsmodelle sind oft eine Vereinfachung der realen Gegebenheiten.</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung; ohne Berücksichtigung thermischer Simulationsmodelle</i></p>	   	<p><i>abhängig von der Umsetzung</i></p>

Massnahme Kurzbeschreibung	Einfluss auf...	
	Komfort	Energie
Behaglichkeitssimulationen Es gibt verschiedenen Methoden die thermische Behaglichkeit für den Fahrgast bereits in der Konzeption zu überprüfen, bspw. durch ein CFD-Modell für verschiedene Zonen des Fahrgastraums. <i>Basiswert für die Bewertung; ohne Berücksichtigung von Behaglichkeitssimulationen</i>	   	<i>abhängig von der Umsetzung</i>

Deutlich zu erkennen ist, dass es bereits viele bekannte Massnahmen gibt, um ein angenehmes Innenraumklima bei Transportmitteln zu garantieren. Ausschlaggebend für die Umsetzung dieser Massnahmen sind dabei jedoch insbesondere die Kosten. Es wird empfohlen, immer eine ganzheitliche Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus durchzuführen. Dadurch können sich die anfangs hoch erscheinenden Investitionskosten durchaus über die Nutzungsdauer der Fahrzeuge amortisieren.

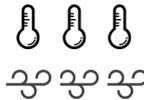
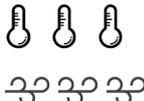
5.1.2 Verkehrsmittel: Automobil

Die Literaturrecherche wurde ebenso auf andere Verkehrsmittel ausgeweitet. Nachfolgend werden Konzepte und Strategien zur Bereitstellung der thermischen Behaglichkeit in der Automobilbranche vorgestellt.

Dabei konnten diverse Studien zu dieser Thematik gefunden werden. Massnahmen im Bereich der Fahrzeughülle überschneiden sich dabei mehrheitlich mit denen in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgeführten Punkten. Unterschiede konnten vor allem im HLK-Bereich festgestellt werden. Tabelle 10 gibt eine Übersicht über weitere Massnahmen aus der Automobilbranche.

Tabelle 10: Massnahmen aus der Automobilbranche – Fahrzeughülle und HKL-Massnahmen

Massnahme Hülle & HLK Kurzbeschreibung	Einfluss auf...	
	Komfort	Energie
Geometrie und Ausführung der Scheiben Die Fläche und der Anstellwinkel der Frontscheibe haben einen wesentlichen Einfluss auf den Heiz- bzw. Kühlbedarf des Fahrzeugs. Kleinere und steiler angestellte Flächen reduzieren den Eintritt der Sonneneinstrahlung in den Fahrgastraum sowie die direkte Bestrahlung des Fahrers und Beifahrers. Dies kann insbesondere im Sommer einen Beitrag zur Reduzierung von Wärmelasten und zur Steigerung des thermischen Komforts leisten. [11] Durch den Einsatz von Wärmeschutzverglasung kann die Strahlungsdurchlässigkeit zusätzlich verringert werden (Sommer) und die Wärmeverluste über die Fahrzeughülle (Winter) reduziert werden. [11] <i>Basiswert für die Bewertung; Anstellwinkel der Frontscheibe nicht optimiert, keine Wärmeschutzverglasung</i>	 	 

Massnahme Hülle & HLK	Einfluss auf...	
	Komfort	Energie
<p>Reflektierende Scheiben</p> <p>Der Innenraum eines Fahrzeuges kann sich beim Parken in der Sonne stark aufheizen. Reflektierende Scheiben können den Wärmeeintritt reduzieren (sommerlicher Wärmeschutz). [11] In den Wintermonaten, wo die solaren Wärmegewinne gewünscht sind, kann sich dadurch möglicherweise der Energiebedarf erhöhen.</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung: Fensterscheiben sind nicht reflektierend</i></p>		
<p>Wärmekapazitäten im Fahrzeuginnenraum reduzieren</p> <p>Im Fahrgastraum haben Baugruppen, wie bspw. die Sitze, die Schalttafel, die Verkleidungen, der Teppich etc., große Massen und damit Wärmekapazitäten. Für ein schnelles Ansprechen der Heizung, Lüftung und Klimaanlage sollte die Summe der Wärmekapazitäten so gering wie möglich gehalten werden [11]. Gleichzeitig kann durch die Reduktion des Materialaufwands i.d.R. auch der Anteil der Grauen Energien reduziert werden.</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung: Wärmekapazitäten nicht optimiert</i></p>		
<p>Zonenweise Klimatisierung</p> <p>Die Klimatisierung erfolgt in den meisten Fällen Zonenweise (Sitzbereiche), da dadurch die individuellen Bedürfnisse der verschiedenen Insassen am besten gedeckt werden können. [16] Regeltechnisch besteht das Risiko einer gegenseitigen (negativen) Beeinflussung der Anlagen.</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung; keine zonenweise Klimatisierung vorgesehen</i></p>		
<p>Körpernah wirkende Heiz- und Kühlsysteme</p> <p>Heiz- und Belüftungsmöglichkeiten an Sitzen, Lenkrad & Armauflagen können einen positiven Einfluss auf die thermische Behaglichkeit haben. Gleichzeitig müssen weniger hohe Temperaturen (Winter) aufgrund des direkten Kontakts zum Körper bereitgestellt werden und auch die Lufttemperatur im Fahrzeuginnenraum kann dadurch ein tieferes Niveau aufweisen. [17], [18]</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung; keine körpernahen Heiz- und Kühlflächen</i></p>		
<p>Solarzellen betriebene Lüftung</p> <p>Mit einem Solarpaneel auf dem Dach des Pkw (vorzugsweise auf dem Schiebe-Ausstelldach) kann Strom erzeugt werden und damit eine Standbelüftung zur Verbesserung des Einstiegskomforts betrieben oder in der Batterie gespeichert werden. [11]</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung; keine Vorkonditionierung</i></p>		

Massnahme Hülle & HLK Kurzbeschreibung	Einfluss auf...	
	Komfort	Energie
Wärmerückgewinnung (WRG) aus der Abluft des Entlüftungssystems Die WRG funktioniert nur im Aussenluftbetrieb und ist im Vergleich zu Gebäuden (Standardmassnahme) eher aufwendig. Die WRG liegt unter Idealbedingungen (Aussenlufttemperatur 0°C, Einsatz einer WP) bei 75 %, ohne WP nur bei max. 50 %. Bei Kurzstrecken ist eine WRG zudem wenig zielführend, da sich der Fahrgastraum langsam aufheizt und somit die Abwärme erst nach einiger Zeit genutzt werden kann. [11] <i>Basiswert für die Annahme: ohne Wärmerückgewinnung</i>	 <i>Allerdings keinen direkt spürbaren Einfluss (Person), eher energetische Massnahme</i>	

Im Vergleich zu Bahn, Bus und Tram wird deutlich, dass in der Automobilbranche mehr auf die individuellen Ansprüche der Nutzenden eingegangen wird. Eine zonenweise Klimatisierung oder auch körpernah wirkende Heiz- und Kühlsysteme sind Standard und bringen hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit deutliche Vorteile: Jeder Mensch stellt andere Ansprüche an das Innenraumklima und kann dadurch genau die gewünschten Einstellung vornehmen. Die Anzahl unzufriedener Personen sollte dadurch deutlich reduziert werden. Welchen Einfluss die Umsetzung dieser Massnahmen im öffentlichen Verkehr auf andere Themen wie die Energieeffizienz, Installationsaufwand etc. haben, gilt es zu prüfen.

5.1.3 Verkehrsmittel: Flugzeug

Nachfolgend werden Ansätze aus der Flugzeugindustrie beschrieben, welche ebenso für die Anwendung im öffentlichen Verkehr interessant sein könnten (Tabelle 11 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Tabelle 11: Massnahmen aus der Flugzeugbranche – Flugzeughülle und HLK-Massnahmen

Massnahme Hülle & HLK Kurzbeschreibung	Einfluss auf...	
	Komfort	Energie
Hocheffiziente Dämmstoffe Vor allem in der Luft- und Raumfahrt kommen häufig hocheffiziente Dämmstoffe zum Einsatz. Das Bauteil hat einen sehr tiefen U-Wert, wodurch Wärmeverluste reduziert und angenehme Oberflächentemperaturen bereitgestellt werden können. [14] <i>Basiswert für die Bewertung; U-Wert von 3.0 W/m²K (Anforderung EN 14750-1:2006, Zone II, Kategorie B)</i>	  	 
Personalisierte Ventilation Diese Lösung ist sehr individuelle und kann deshalb einen sehr guten thermischen Komfort garantieren. Ebenso kann eine bessere Luftqualität bereitgestellt werden. Bei der personalisierten Ventilation werden Zu- & Abluftauslässe bspw. an der Rückseite des Vordersitzes oder in den Armlehnen vom Sitz positioniert. [19] <i>Basiswert für die Bewertung; keine personalisierte Ventilation, Klimatisierung des gesamten Fahrgastraums</i>	 	 / 

Massnahme Hülle & HLK	Einfluss auf...	
	Komfort	Energie
<p>Bauteilintegrierte Infrarotstrahlungselemente</p> <p>Infrarotstrahlung wird i.d.R. als sehr angenehm empfunden. Durch diese Art der Wärmeübertragung auf Personen, kann die thermische Behaglichkeit erhöht werden. Auch aus energetischer Sicht kann diese Massnahme sinnvoll sein, da i.d.R. geringere Lufttemperaturen genügen, um einen angenehmen Komfort bereitzustellen. [20]</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung; Elektrodirektheizung, keine Flächenheizung</i></p>		
<p>Farbgebung des Lichts</p> <p>«Warme» bzw. «kühle» Lichtfarben können sich auf das Temperaturempfinden der Passagiere auswirken und sollten manuell einstellbar sein. [19]</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung: Lichtfarbe «neutralweiss», nicht veränderbar</i></p>		
<p>Material der Sitze</p> <p>Das Material der Sitze kann sich auf den thermischen Komfort der Passagiere auswirken: Stoffbezüge haben beispielsweise einen besseren Feuchtigkeitstransport als Leder. [21]</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung: Kunstleder</i></p>		
<p>Vorklimatisierung der Flugzeuge</p> <p>Zur Klimatisierung der Flugzeuge wird der Strom i.d.R. über das Hilfstriebwerk bereitgestellt (geringer Wirkungsgrad). Um diesen Strombedarf während des Fluges zu reduzieren, werden die Flugzeuge am Flughafen vorkonditioniert (Bodenstromversorgung). Dies soll einerseits effizienter sein, gleichzeitig können angenehme Innenraumtemperaturen bereits zu Beginn der Reise bereitgestellt werden. [22]</p> <p><i>Basiswert für die Bewertung; keine Vorklimatisierung</i></p>		<p><i>Nur geringfügig effizienter, abhängig von der Herkunft des Stroms</i></p>

Die genannten Massnahmen können dabei auch für die Verkehrsmittel des öffentlichen Verkehrs interessant sein. Ziel sollte es sein, ein Optimum zwischen thermischen Komfort und Energieeffizienz zu finden. Ebenso könnten alternative Massnahmen, wie die Farbgebung des Lichts und die Verwendung verschiedener Materialien, weitere Ansätze zur Verbesserung des Wohlbefindens der Passagiere liefern – Die tatsächliche Wirkung dieser Massnahmen gilt es zu überprüfen.

Die Übertragbarkeit der in Tabelle 10 und Tabelle 11 aufgeführten Massnahmen und Konzepte auf die Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs werden in Abschnitt 6.4 diskutiert.

Im nachfolgenden werden die **EN 13129** (Schienenverkehr, Fernverkehr), die **EN 14750-1** (Schienenverkehr, Nahverkehr) sowie die **VDV 236** (Linienbusse) näher betrachtet, um die Anforderungen der verschiedenen Transportmittel des öffentlichen Verkehrs miteinander zu vergleichen (Tabelle 12, «orange»). Auf eine genauere Analyse der EN 14813-1 (Schienenverkehr, Führerräume) wird verzichtet, da der Führerstand in der Gesamtbilanz des Fahrzeugs nur einen kleinen Anteil ausmacht. Für die genannten Normen im Schienenverkehr gibt es zudem noch einen **Teil 2 «Typenprüfung»**. Darin sind Versuchsprogramm und Messverfahren zur Beurteilung der Behaglichkeitsparameter und Leistungsfähigkeit des Klimasystem definiert.

Dabei ist zu erwähnen, dass die genannten Normen und Schriften im Bereich der thermischen Behaglichkeit Empfehlungen und damit nicht zulassungsrelevant sind. Anders verhält es sich bei sicherheitsrelevanten Vorgaben für die Fahrzeuge im öV, wie bspw. Anforderungen an den Brandschutz. Bezieht sich der Besteller im Pflichtenheft jedoch auf die Anforderungen der Normen, dann sind diese seitens Hersteller einzuhalten (Abschnitt 5.3).

5.2.1 Europäische Norm EN 13129:2016 [23]

Diese Europäische Norm findet ihre Anwendung bei **Schienenfahrzeugen** (ein- oder doppelstöckig) im **Fernverkehr**. Sie definiert Behaglichkeitsparameter von Klimaanlage für Fahrgastabteile oder Grossräume, d.h. für Räume, die für das Zugbegleitpersonal bestimmt sind. Für Vorortbahnen, U-Bahnen, Strassenbahnen und Führerräume ist diese Norm nicht gültig.

Die Anforderungen werden in Abhängigkeit von **Klimazone und Qualitätsstufe** bestimmt. Bei den Qualitätsstufen gibt es folgende Unterscheidungen:

q1 – Soll-Qualitätsstufe die eine 100 % Übereinstimmung ergibt;

q2 – Qualitätsstufe, die mindestens erfüllt werden muss.

Diese Qualitätsstufen sind dabei in Abhängigkeit von der Außentemperatur für einen **normalen und erweiterten Bereich** definiert. Die Schweiz ist der **Klimazone II** zugeordnet, wobei von den nachfolgenden Mittelwerten der Aussentemperatur (T_{em}) ausgegangen wird.

Tabelle 13: Aussentemperatur für einen normalen und erweiterten Bereich in Winter und Sommer (Klimazone II, gemäss EN 13129)

	Winter	Sommer
Normalbereich (q1, q2)	$T_{em} \geq -10 \text{ °C}$	$T_{em} \leq +28 \text{ °C}$
Erweiterter Bereich (q1, q2)	$-20 \text{ °C} \leq T_{em} < -10 \text{ °C}$	$+28 \text{ °C} < T_{em} \leq +35 \text{ °C}$

Der normale Bereich repräsentiert den für gewöhnlich auftretenden Außentemperaturbereich und ist daher höchst wichtig für die Behaglichkeitsqualität. Der erweiterte Bereich ist für extreme Bedingungen gültig, bei denen eine leichte Absenkung des thermischen Komforts akzeptabel ist.

Lufttemperatur

Die EN 13129 gibt die nachfolgenden Regeltemperaturen im Fahrgastraum von Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs vor (Abbildung 11).

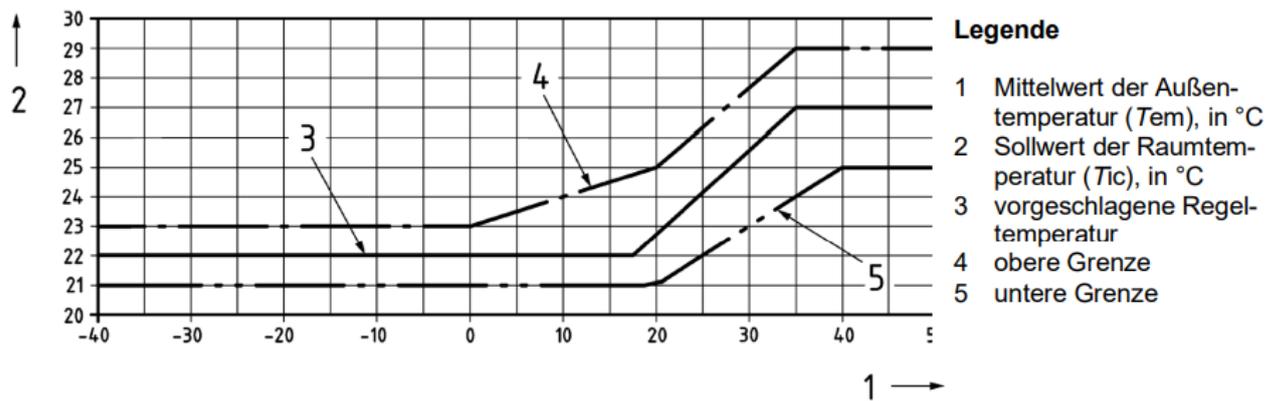


Abbildung 11: Vorgeschlagene Regelkurve und Grenzen für die Raumtemperatur im Fahrgastraum im Fernverkehr

Bezüglich der Anforderungen an die Sollwerte der Raumtemperatur gibt es keine Unterscheidung zwischen den Qualitätsstufen 1 und 2. Diese sind jedoch für die weiteren Anforderungen relevant.

Oberflächentemperaturen

Die Norm definiert Vorgaben für die Oberflächentemperaturen in den Behaglichkeitsbereichen. Die Anforderungen variieren dabei zwischen den Qualitätsstufe 1 und 2 sowie dem normalen und erweiterten Bereich. Nachfolgend sind die Temperaturbereiche (alle Anforderungsstufen) beschrieben. Diese beziehen sich auf die mittlere Raumtemperatur (T_{im}).

Wände und Decken:		$\leq 7 \text{ K bis } 11 \text{ K}$
Fenster:	Glas:	$\leq 10 \text{ K bis } 15 \text{ K} / \leq 15 \text{ K bis } 20 \text{ K}$ (ohne / mit Sonneneinstrahlung)
	Rahmen:	$\leq 12 \text{ K bis } 16 \text{ K}$
Fussböden:	unbeheizt:	$\leq 10 \text{ K bis } 14 \text{ K}$ (jedoch mindestens 3 °C)

Luftbewegung

Die Grenzwerte für die maximale Luftgeschwindigkeit im Behaglichkeitsbereich können durch die nachfolgenden Funktionsgleichungen bestimmt werden.

Funktionsgleichung für q_1 :	$T_{im} \leq 22 \text{ °C}$:	$v = 0,25 \text{ m/s}$
	$T_{im} > 22 \text{ °C}$:	$v = (0,00506 T_{im}^2 - 0,179 T_{im} + 1,74) \text{ m/s}$
Funktionsgleichung für q_2 :	$T_{im} \leq 21 \text{ °C}$:	$v = 0,25 \text{ m/s}$
	$T_{im} > 21 \text{ °C}$:	$v = (0,00506 (T_{im} + 1)^2 - 0,179 (T_{im} + 1) + 1,74) \text{ m/s}$

Relative Luftfeuchte

Auch bei der relativen Luftfeuchte gibt es nur Anforderungen im oberen Grenzbereich (max. Wert). Eine Mindestanforderung ist in der Norm nicht beschrieben. Ebenso wird auch bei diesem Kriterium zwischen den Qualitätsstufen 1 und 2 unterschieden.

q1:	Relative Luftfeuchte $\leq 65 \%$ (bis 23 °C mittlere Raumtemperatur T_{im})
	Relative Luftfeuchte $\leq 36 \%$ (bei 33 °C mittlerer Raumtemperatur T_{im})
q2:	Relative Luftfeuchte $\leq 90 \%$ (bis 23 °C mittlere Raumtemperatur T_{im})
	Relative Luftfeuchte $\leq 48 \%$ (bei 33 °C mittlerer Raumtemperatur T_{im})

5.2.2 Europäische Norm EN 14750-1:2006 [24]

Diese Europäische Norm legt einheitliche Behaglichkeitsparameter für Eisenbahnen sowie die Leistungsfähigkeit der klimatechnischen Einrichtungen fest. Die Norm gilt für **Vorortbahnen, Regionalbahnen, U-Bahnen** sowie **Strassenbahnen**, welche mit einer Kühlanlage oder Heizungs-/Lüftungsanlage ausgerüstet sind. Für Fahrzeuge des Fernverkehrs und Führerräume ist diese Norm nicht gültig.

Auch in dieser Norm werden die Anforderung in Abhängigkeit der **Klimazone** bestimmt. Zudem unterscheidet die EN 14750-1 für den Nahverkehr zwischen **zwei Fahrzeugkategorien**:

Tabelle 14: Kriterien für die Aufteilung von Schienenfahrzeugen im Nahverkehr in die Kategorien A und B (gemäss EN14750-1)

	Kategorie A	Kategorie B
Stehende Fahrgäste	< 4 Fahrgäste/m ²	≥ 4 Fahrgäste/m ²
Durchschnittliche Verweildauer der Fahrgäste	> 20 min	≤ 20 min
Durchschnittliche Fahrzeit zwischen zwei Halten	> 3 min	≤ 3 min

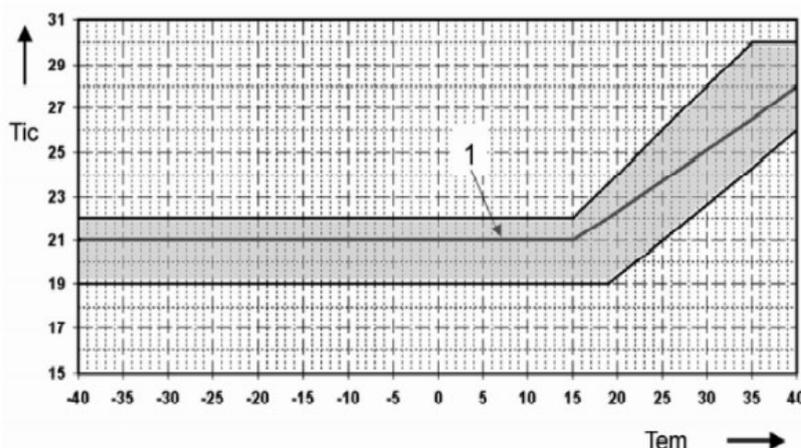
Bei Fahrzeugen der Kategorie A mit einer Verweildauer der Fahrgäste von mehr als 1 h, ist die Norm EN 13129 (Schienenfahrzeuge, Fernverkehr) anzuwenden.

Fahrzeuge von Straßen-, Stadt- und U-Bahnen sind im Allgemeinen der Kategorie B zuzuordnen. Bei erhöhten Komfortansprüchen, z. B. bei Fahrzeugen von Regional-Stadtbahnen, kann der Betreiber unterschiedliche Kategorien für den Heizbetrieb und den Kühlbetrieb wählen.

Bei den Klimazonen gibt es in dieser Norm keinen normalen und erweiterten Bereich. Für die Schweiz (Klimazone II) wird von folgenden Mittelwerten der Aussentemperatur (Tem) ausgegangen: Tem ≥ -20 °C im Winter und Tem ≤ +35 °C im Sommer, was dem erweiterten Bereich in der EN 13129 entspricht.

Lufttemperatur

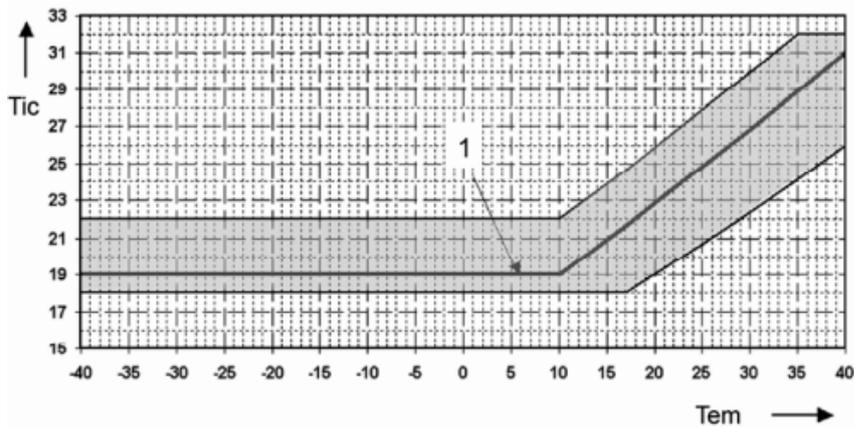
Die Norm gibt für die zwei Fahrzeugkategorien A und B unterschiedliche Komfortbereiche für die Raumlufttemperatur vor (Abbildung 12 und Abbildung 13).



Legende

- Tem Mittelwert der Aussentemperatur, in °C
- Tic Sollwert der Raumlufttemperatur, in °C
- 1 Empfohlener Wert für die Raumlufttemperatur

Abbildung 12: Regelkurve für den Sollwert der Raumlufttemperatur in Fahrzeugen der Kategorie A



Legende

- Tem Mittelwert der Ausserentemperatur, in °C
- Tic Sollwert der Raumlufttemperatur, in °C
- 1 Empfohlener Wert für die Raumlufttemperatur

Abbildung 13: Regelkurve für den Sollwert der Raumlufttemperatur in Fahrzeugen der **Kategorie B**

Oberflächentemperatur

Die Abweichung der Temperatur der inneren Oberflächen von dem Mittelwert der Raumtemperatur (Tim) darf die nachfolgenden Angaben nicht übersteigen.

- Wände und Decken: ≤ 10 K (Kategorie A)
≤ 13 K (Kategorie B)
- Fensterscheiben: ≤ 15 K

Allgemein gilt, dass die Oberflächentemperaturen von Wänden, Decken und Fussböden nicht unter 3 °C liegen dürfen. Davon ausgenommen sind die Fenster.

Luftbewegung

Die Norm stellt zum einen Anforderungen an die maximale Luftgeschwindigkeit für Belüftung im Heizbetrieb sowie für Fahrzeuge der Kategorie B und zum anderen an die maximale Luftgeschwindigkeit für Fahrzeuge der Kategorie A. Diese werden in Abhängigkeit der mittleren Raumtemperatur (Tim) bemessen.

Tabelle 15: Zulässige Luftgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der mittleren Raumtemperatur (gemäss EN 14750-1)

Tim °C	Kategorie A m/s	Kategorie B m/s
+ 18	0,2	0,3
+ 22	0,25	0,35
+ 25	0,5	0,7
+ 28	1,0	1,4
+ 30	1,5	2,0
≥ + 35	3,0	4,0

Relative Luftfeuchte

Eine Mindestanforderung an die relative Luftfeuchte wird auch in dieser Norm nicht gestellt. Lediglich gibt es Angaben zu den max. zulässigen Werten in der Behaglichkeitszone. Die relative Luftfeuchte wird in Abhängigkeit der mittleren Raumtemperatur (Tim) sowie der Fahrzeugkategorie A und B bestimmt. Die lineare Funktion wird durch die nachfolgenden Anfangs- und Endwerte bestimmt.

Kategorie A: Tim = 17 °C, dann Rh = 92 %
Tim = 30 °C, dann Rh = 50 %

Kategorie B: Tim = 17 °C, dann Rh = 92 %
Tim = 30 °C, dann Rh = 55 %

VDV-Schrift 181

Die deutsche VDV-Schrift 181 spezifiziert die in der EN 14750 vorgegebenen Normen für verschiedene Regionen Deutschlands und kann als Interpretationswerk der EN 14750 verstanden werden. Die durch die EN 14750-1 vorgegebenen Anforderungen werden etwas relativiert und Informationen gegeben, in welchen Situationen weniger leistungsstarke Anlagen genügen, um trotzdem eine gute thermische Behaglichkeit sicherzustellen. Zum Beispiel beschreibt die VDV 181, dass in vielen Zonen Deutschlands leistungsschwächere Kühlanlagen genügen und dass es im Sommer durchaus akzeptabel ist, wenn der Sollwert der Raumtemperatur (T_{ic}) gleich dem Mittelwert der Aussentemperatur (T_{em}) entspricht. Dies wird damit begründet, dass die Luft im Fahrzeuginnenraum in aller Regel entfeuchtet ist, was bereits einen entscheidenden Beitrag zur thermischen Behaglichkeit leistet.

Ebenso können geringe Abweichungen bei den Anforderungen an die Wärmedurchgangskoeffizienten (k -Wert) festgestellt werden. Die EN 14750-1 stellt konkrete Anforderungen an die maximalen Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile gegliedert nach Fahrzeugkategorie und geographische Zone. In der VDV-Schrift 181 wird lediglich verlangt, dass die k -Werte der Aussenbauteile zu berechnen sind. [1]

5.2.3 VDV-Schrift 236:2018 [25]

Die VDV-Schrift 236 stellt Anforderungen an die thermische Behaglichkeit in **Omnibussen**. Die Schrift stellt dabei die technische Möglichkeiten dar, um die Klimatisierung eines Linienomnibusses effektiv zu gestalten. Denn neben den Komfortansprüchen steht ebenso die Reduzierung des Energieverbrauchs im Vordergrund. Sie basiert auf den in den VDV-Mitgliedsunternehmen gesammelten Erfahrungen und berücksichtigt die allgemein anerkannten Regeln der Technik.

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Normen, werden in dieser Schrift keine genauen Aussagen zu den **Oberflächentemperaturen** gestellt. Es wird lediglich folgende Aussage definiert: *«Zur Erzielung einer ausreichenden Behaglichkeit dürfen die Oberflächentemperaturen der einzelnen Raumumschließungsflächen möglichst wenig vom Durchschnittswert der Raumlufttemperatur abweichen.»* [25]

Lufttemperatur

Anbieter haben nach Vorgaben der Schrift die Aufgabe zwei Kennlinien zu definieren:

1. **Komfort-Kennlinie**, welche für längere Reiseweiten anzuwenden ist.
2. **Economy-Kennlinie**, welche für geringere Reiseweiten / kurze Aufenthaltsdauern der Fahrgäste und E-Mobilität sinnvoll ist.

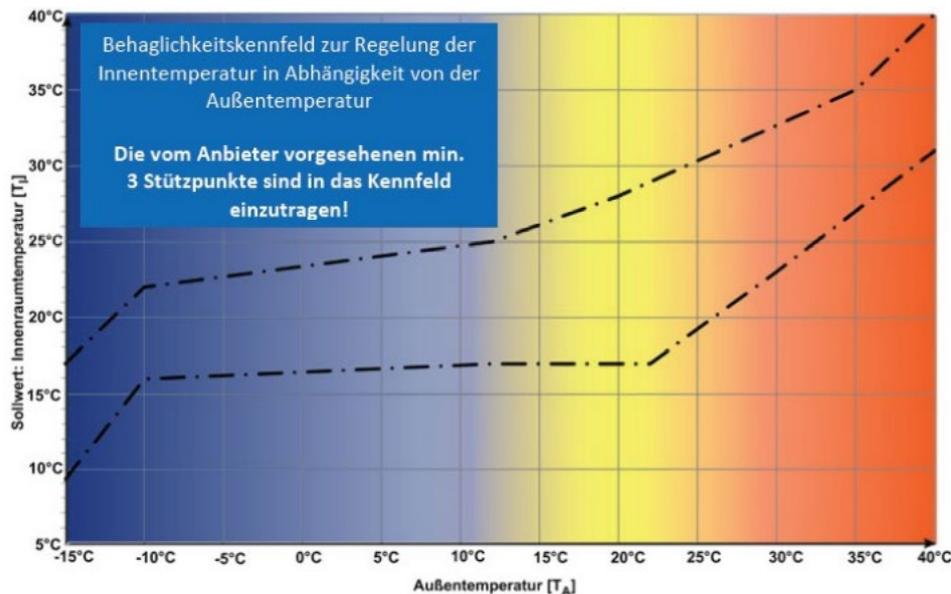


Abbildung 14: Behaglichkeitskennfeld nach VDV-Schrift 236

Entscheidend für einen hohen thermischen Komfort im Heiz- und Kühlbetrieb ist ebenso eine möglichst gleichmässige Temperaturverteilung im Fahrgastraum (vorne – mitte – hinten). In Längs- und Querachse sollte die Temperaturdifferenz max. 5 K betragen.

Luftbewegung

Die zulässigen Luftgeschwindigkeiten sind nach DIN EN 14750 [24] auszulegen. Bei Ausblasungen am Fenster sind die Werte im Schulterbereich eines sitzenden Fahrgasts (1.10 m ü. Höhe Fussboden) zu messen. Bei Ausblasungen im Voutenbereich / Mitteldecke wird die Messung bei 1.60 m Höhe im Mittelgang und / oder Stehplatzbereich durchgeführt.

Bei Bussen die primär vom Dach heizen und batterieelektrisch betrieben werden, dürfen aus Effizienzgründen die Grenzwerte für die Luftgeschwindigkeit im Lüftungs- und Heizbetrieb überschritten werden.

Relative Luftfeuchte

Bei vollklimatisierten Fahrzeugen ist maximal eine relative Luftfeuchte von 70 % zulässig. Bei Raumtemperaturen ≥ 30 °C, darf diese 50 % nicht überschreiten.

5.2.4 Gegenüberstellung der Anforderungen an die thermische Behaglichkeit

Deutlich wird, dass die beschriebenen Normen und Richtlinien ganz unterschiedliche Anforderungen an die entsprechenden Fahrzeugtypen stellen und einen gewissen Spielraum lassen. In diesem Abschnitt werden diese Anforderungen nun gegenübergestellt und mit den Anforderungen der EN 7730:2006 (Abschnitt 4.2) verglichen.

5.2.4.1 Lufttemperatur

Abbildung 15 gibt einen Überblick über die Anforderungen an die Sollwerttemperatur im Innenraum in Abhängigkeit vom Mittelwert der Aussenlufttemperatur. Die Werte werden dabei für einen extremeren Sommerfall mit einer mittleren Aussenlufttemperatur von **+ 35 °C** und für einen extremeren Winterfall mit einer mittleren Aussenlufttemperatur von **- 10 °C** dargestellt. Die Angaben zur EN 7730 beziehen sich auf Empfehlungen für einen Büroraum der Kategorie A.

Mit Blick auf die **Heizperiode** ist erkennbar, dass die Anforderungen der EN 13129 (Schienenfahrzeuge, Fernverkehr) mit denen der EN 7730 übereinstimmen. Im Nachverkehr (EN 14750) sowie bei Omnibussen (VDV 236) werden ebenso niedrigere Temperaturen in den Wintermonaten akzeptiert. Im Vergleich zu den übrigen Normen erscheint der Temperaturbereich der VDV 236 relativ gross. Hier gilt es aber zu berücksichtigen, dass bei längeren Reiseweiten die Sollwerttemperatur im oberen Bereich (ca. 22 °C) und bei kurzen Strecken im unteren Bereich (ca. 16 °C) liegen sollte. Somit werden bei längeren Aufenthalten im Fahrzeug ebenso ähnliche Anforderungen wie in der EN 7730 gestellt. Für Kurzstrecken genügen geringere Temperaturen im Fahrgastbereich, da Passagiere i.d.R. einen höheren Bekleidungsgrad (warme Kleidung im Winter wird nur selten abgelegt) haben und sich eine thermische Unbehaglichkeit erst nach einer längeren Reisedauer einstellen würde. Dies ist auch aus energetischer Sicht durchaus sinnvoll.

Im **Kühlbetrieb** ist erkennbar, dass im öffentlichen Verkehr deutliche höhere Temperaturen zugelassen werden als in der EN 7730. Der Temperaturbereich der VDV 236 liegt mit ≥ 27 °C sogar deutlich darüber. Bei kurzen Reisedrecken der Busse wird bei einer Aussentemperatur von **+ 35 °C** lediglich die Anforderung gestellt, diese Temperatur selbst bei einer Vollbelegung nicht zu überschreiten.

Legende

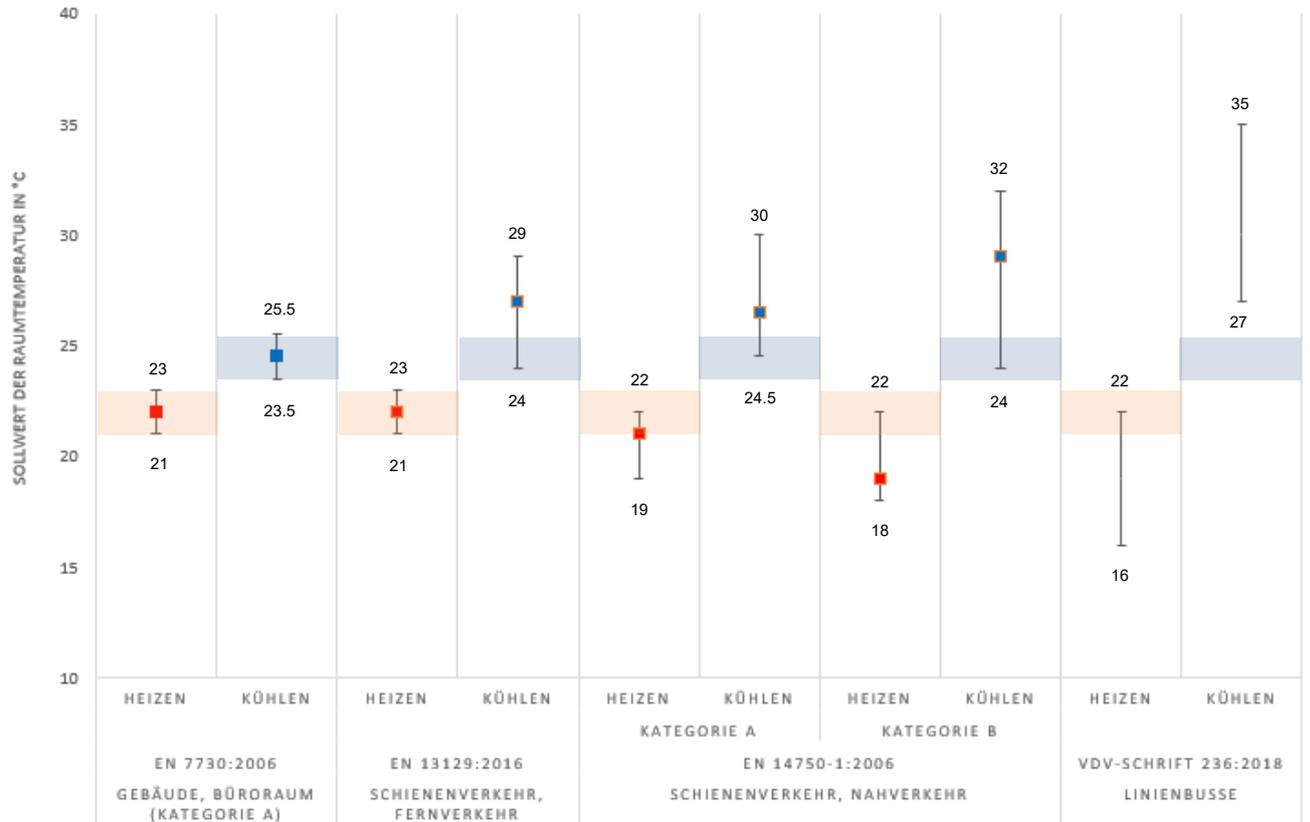
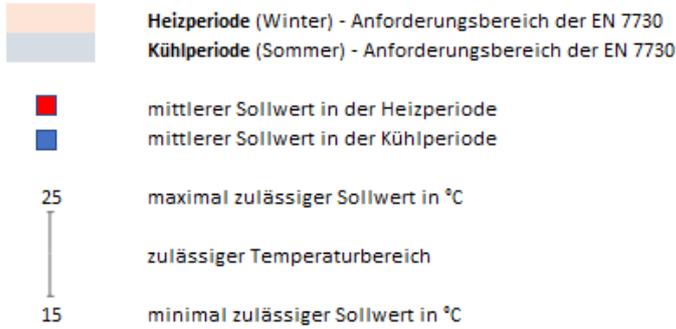


Abbildung 15: Vergleich der Anforderungen an den Sollwert der Raumtemperatur. Deutlich erkennbar ist, dass der Anforderungsbereich des Fernverkehrs nahe an dem der EN 7730 liegt, insbesondere in der Heizperiode werden gleiche Innenraumtemperaturen gefordert. Beim innerstädtischen und regionalen Nahverkehr sowie bei Bussen gibt es grössere Toleranzbereiche.

5.2.4.2 Oberflächentemperaturen

Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) der thermischen Fahrzeug- bzw. Gebäudehülle ist entscheidend für die thermische Behaglichkeit und die Energieeffizienz. Je geringer der U-Wert, desto geringer der Wärmeverlust im Winter bzw. der Wärmeeintrag im Sommer. Dies wirkt sich gleichzeitig auf die Oberflächentemperaturen und somit auch auf die thermische Behaglichkeit im Innenraum aus. Gibt es eine hohe Abweichung zwischen der Lufttemperatur im Innenraum und der Temperatur der umschliessenden Oberflächen, so können unangenehme Zegerscheinungen die Folge sein (asymmetrische Strahlung durch Temperaturdifferenz).

Deshalb stellen die verschiedenen Normen ganz unterschiedliche Anforderungen an die maximalen Wärmedurchgangskoeffizienten. Bei den Verkehrsmitteln wird ein Gesamtwärmedurchgangskoeffizient definiert, im Gebäudebereich sind Anforderungen an die einzelnen Bauteile in der SIA 180 definiert (Abschnitt 4.3.2).

Die VDV 236 definiert keine genauen Werte und trifft lediglich folgende Aussagen «Sämtliche Seitenwände und Dachflächen sind vollflächig zu isolieren. Eine mögliche Isolation der Fußbodenoberfläche ist vorzusehen. Besondere Vorkehrungen zur Wärmeisolation sind zwischen der Antriebs-, Kühl- und Abgaseinheit und dem Fahrgastraum vorzunehmen. Für möglichst kleine K-Werte sind geeignete Werkstoffe und/oder konstruktive Maßnahmen wie z. B. beschichtete Scheiben, Isoglas etc. zu wählen.» [25]

In den Normen EN 13129 und EN 14750-1 werden zudem zusätzliche Anforderungen an die maximal zulässige Abweichung der Oberflächentemperatur in Abhängigkeit zur mittleren Raumtemperatur (T_{im}) gestellt (Differenz der Oberflächen- zur Raumtemperatur in Kelvin (K)). Diese unterscheiden sich je nach Verkehrsmittel, Kategorie und Bauteil (Abschnitt 5.2.1). Die EN 7730 definiert hingegen Maximalwerte für die Asymmetrie der Strahlungstemperatur in °C, welche u.a. durch die Temperaturen der verschiedenen umschliessenden Oberflächen des Raumes beeinflusst wird. Ein direkter Vergleich der Anforderungen der EN 7730 und denen im öV (zulässige Abweichung der Oberflächentemperatur) ist somit nicht möglich. In Abbildung 16 werden die Anforderungen für den Schienenverkehr gegenübergestellt.

Legende

- maximale Temperaturdifferenz vertikaler Flächen
- 15 maximal zulässige Abweichung der Temperatur der vertikalen Oberflächen in K

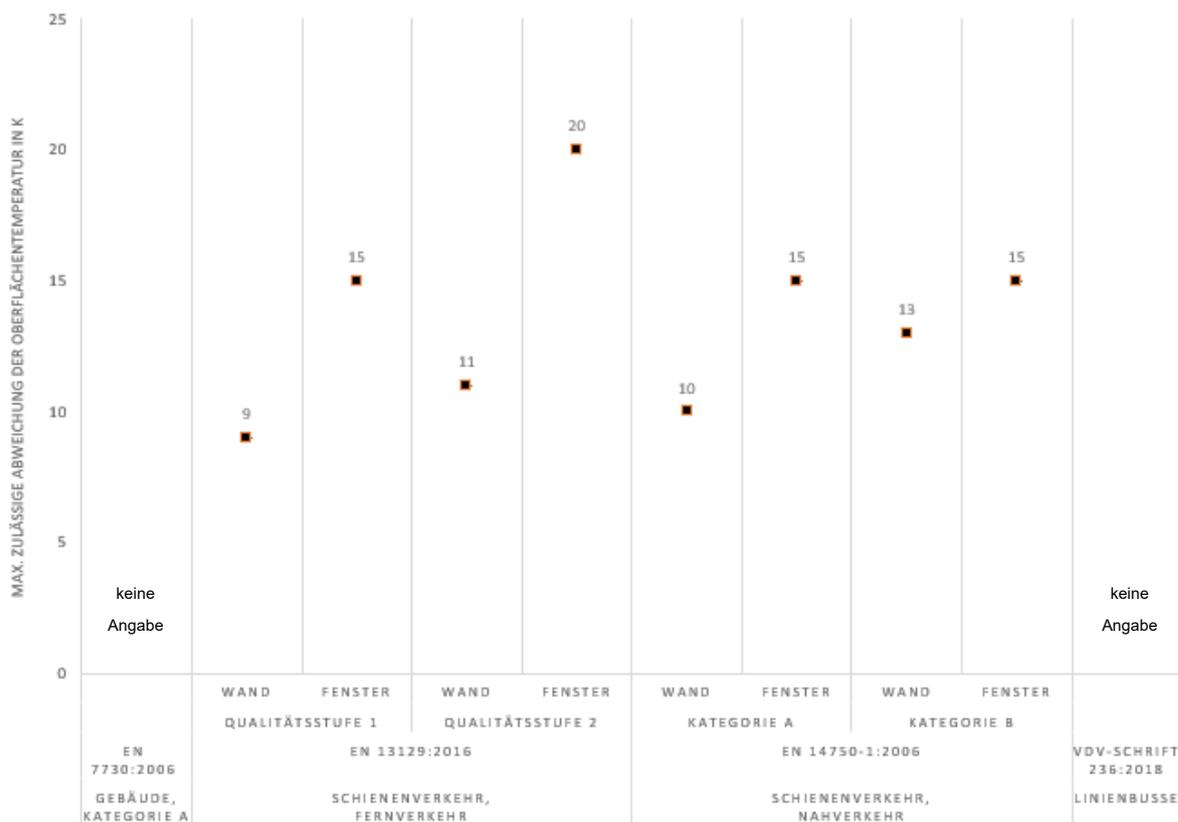


Abbildung 16: Anforderungen der EN 13129 und der EN 14750 an die maximal zulässige Abweichung der Oberflächentemperatur in Abhängigkeit zur mittleren Raumtemperatur (T_{im}) in K. Die EN 7730 stellt keine direkten Anforderungen an die Oberflächentemperaturen, sondern an die Asymmetrie der Strahlungstemperatur. Die VDV 236 definiert keine konkreten Werte.

Vergleicht man die Anforderungen der EN 13129 mit der EN 14750-1 wird deutlich, dass die Anforderungen an die Qualitätsstufe 1 im Fernverkehr sowie die Kategorie A im Nahverkehr sehr ähnlich sind. Betrachtet man die Qualitätsstufe 2 im Fernverkehr und die Kategorie B im Nahverkehr weichen die Anforderungen etwas ab: An die Fenster werden im Fernverkehr geringere, an die Wände dafür höhere Anforderungen gestellt (Abbildung 16).

Würde man von einem konkreten Sommerfall mit einer Innenraumtemperatur von 26 °C ausgehen, wären für die Oberflächentemperaturen im Fernverkehr (EN 13129, Qualitätsstufe 1) für die Wände 35 °C und für die Fenster 41 °C zulässig. Betrachtet man einen Winterfall mit einer Innenraumtemperatur von 20 °C, wären für die Wände Oberflächentemperaturen von 11 °C und für die Fenster von 5 °C zulässig. Betrachtet man die absoluten Werte, insbesondere im Winterfall, erscheinen diese sehr gering. Dies kann dazu führen, dass die Oberflächen möglicherweise als «kalt» empfunden werden. Das ist u.a. damit zu begründen, dass bei Fahrzeugen höhere Anforderungen an das Gewicht gestellt werden und nur ein eingeschränkter Platzbedarf für die Dämmung der Fahrzeughülle zur Verfügung steht. In kalten Wintermonaten kann es somit dazu kommen, dass möglicherweise unangenehme Zugserscheinungen auftreten können (insbesondere im Bereich der Fenster).

Neben den obigen Anforderungen gibt es ebenso Vorgaben für Böden, welche eine Mindesttemperatur von 3 °C fordern (Gefahr von Eisglätte).

Generell kann gesagt werden, dass hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit immer ein möglichst hoher Dämmstandard der Fahrzeughülle angestrebt werden sollte. Dadurch können asymmetrische Strahlungen durch Temperaturdifferenzen zwischen den Oberflächen- und der Lufttemperatur reduziert werden und unangenehme Zugserscheinungen vermieden werden. Ebenso ist eine gut gedämmte Hülle essenziell für die Energieeffizienz von Fahrzeugen und Gebäuden.

Kommt es aufgrund von kalten Oberflächen zu Unbehaglichkeiten im Innenraum kann dies durch andere Parameter des Raumklimas ausgeglichen werden, bspw. durch eine höhere Lufttemperatur. Dies kann sich jedoch negativ auf die Energieeffizienz auswirken.

5.2.4.3 Luftbewegung

Der konvektive Wärmeaustausch zwischen einer Person und der Umgebung wird ebenso stark von der Luftgeschwindigkeit im Raum beeinflusst. Eine höhere Luftbewegung kann im Sommer bspw. einen kühlenden Effekt hervorrufen, im Winter sollte dies hingegen vermieden werden. Die verschiedenen Normen aus dem Gebäude- und Fahrzeugbereich stellen diesbezüglich verschiedene Anforderungen. In Abbildung 17 sind die maximal zulässigen Luftgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der mittleren Raumlufttemperaturen von **+ 20 °C** (Winter / «Heizen») und **+ 26 °C** (Sommer / «Kühlen») gegenübergestellt. Die Angaben zur EN 7730 beziehen sich auf einen Büroraum der Kategorie A.

Legende

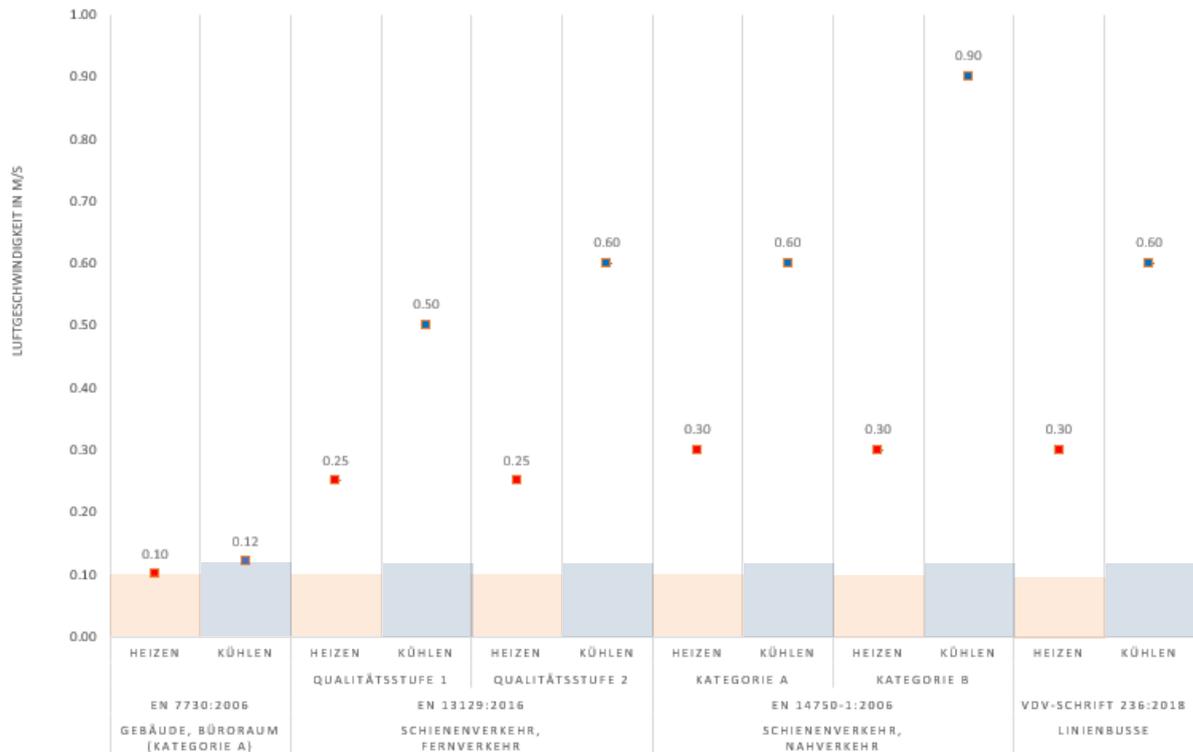
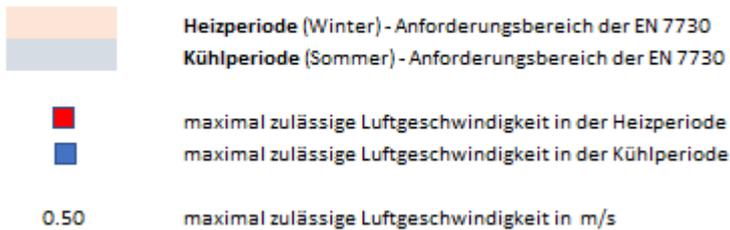


Abbildung 17: Vergleich der Anforderungen an die maximal zulässigen Luftgeschwindigkeiten. Deutlich erkennbar ist, dass gemäss EN 7730 geringere Luftgeschwindigkeiten zulässig sind als in den Verkehrsmitteln des öffentlichen Verkehrs – insbesondere in den Sommermonaten (Kühlperiode).

Deutlich erkennbar ist, dass bei den Verkehrsmitteln im Vergleich zur EN 7730 deutlich höhere Luftgeschwindigkeiten zulässig sind. In der Heizperiode liegen die zulässigen Maximalwerte bis zu dreimal so hoch. In der Kühlperiode können diese sogar vier- bis siebenmal höher liegen.

Die hohen zulässigen Luftgeschwindigkeiten können möglicherweise damit erklärt werden, dass die typische Luftkühlung/Luftheizung in Fahrzeugen i.d.R. grosse Luftmengen fördert, um die gewünschten Raumlufttemperaturen in heissen Sommertagen oder kalten Wintertagen im Fahrzeug bereitzustellen.

Zudem können höhere Luftgeschwindigkeiten dazu genutzt werden, dass eine erhöhte Lufttemperatur als weniger warm empfunden wird (Sommerfall). Im Heizbetrieb kann dies hingegen dazu führen, dass das Wärmempfinden der Passagiere zusätzlich gemindert wird.

5.2.4.4 Relative Luftfeuchte

Abbildung 18 gibt einen Überblick über die Anforderungen an die maximale relative Luftfeuchte in Abhängigkeit der mittleren Raumlufttemperatur. Die Werte werden dabei ebenso für eine mittlere Raumlufttemperatur von + 20 °C im Winter (Heizen) und + 26 °C im Sommer (Kühlen) abgebildet.

Legende

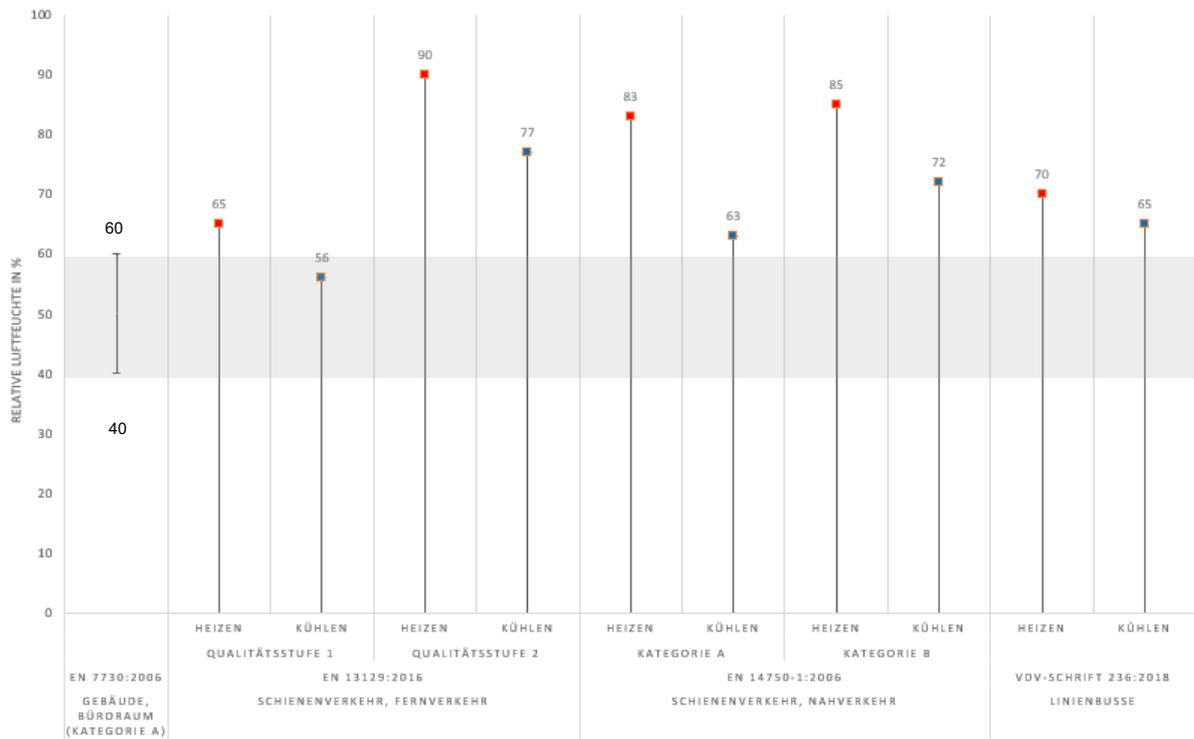
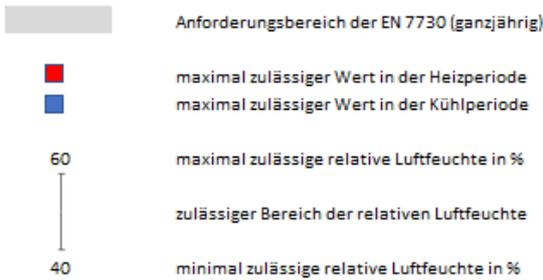


Abbildung 18: Vergleich der Anforderungen an die relative Luftfeuchtigkeit. Während es im Gebäudebereich eine obere und eine untere Grenze der relativen Luftfeuchte gibt, geben die Normen des öV nur einen maximalen Wert an. Eine untere Grenze der relativen Luftfeuchte gibt es nicht. Dafür wird zwischen Heiz- und Kühlperiode unterschieden.

Gemäss EN 7730 hat die Luftfeuchte auf die Wärmebilanz des menschlichen Körpers tendenziell einen geringen Einfluss, wenn sich dieser in einem gemässigten Klima ($< 26\text{ °C}$) befindet und eine mässige körperliche Aktivität ausgeführt wird ($< 2\text{ met}$). Die in Abbildung 18 angegebene Spanne von 40 % bis 60 % wurde gemäss den Annahmen in Tabelle A.5 der Norm definiert. Jedoch kann ebenso eine relative Luftfeuchte von $\pm 10\%$ weiterhin als angenehm empfunden werden, d.h. 30 % - 70 % sind somit ebenso typische Werte. In der EN 7730 sind keine Maximal- oder Mindestwerte für die Luftfeuchte zu finden, es ist jedoch beschrieben, dass eine 10 % höhere Luftfeuchte als genauso warm empfunden werden kann wie eine um 0.3 °C höhere operative Temperatur.

Erkennbar ist, dass die in den Normen des öffentlichen Verkehrs angegebenen Anforderungsbereiche einen hohen Spielraum lassen (von 0 % – 90 %, Abbildung 18). Zudem fällt auf, dass die Normen des öffentlichen Verkehrs nur Vorgaben an eine maximal zulässige relative Luftfeuchte in Abhängigkeit der Raumlufttemperatur (Heizen / Kühlen) definieren. Eine Mindestanforderung gibt es nicht, hier liegt der grösste Unterschied zum Gebäudebereich.

Betrachtet man die Anforderungen der SIA 180 gibt diese einen oberen Grenzwert der relativen Luftfeuchte in Abhängigkeit der Aussenluft- und Raumlufttemperatur vor. Diese sollte den Wert von 80 % zu keiner Zeit überschreiten, um Feuchteschäden zu vermeiden (SIA 180:2014, Absatz 6.1.2.4). Ebenso sollten bei beheizten oder mechanisch belüfteten Räumen eine relative Luftfeuchtigkeit von 30 % nur während maximal 10 % der jährlichen Nutzungszeit unterschritten werden. Die maximal zulässigen Werte im Heizbetrieb der Verkehrsmittel überschreiten zudem den Grenzwert der relativen Luftfeuchte im Gebäudebereich von 80 % (gemäss SIA 180).

5.2.4.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Insgesamt kann gesagt werden, dass im Gebäudebereich tendenziell höhere Anforderungen an die thermische Behaglichkeit gestellt werden als in den unterschiedlichen Verkehrsmitteln. Dies ist mit Blick auf die Einsatzarten der Fahrzeuge und die Energieeffizienz jedoch durchaus sinnvoll. Bei einer längeren Aufenthaltsdauer der Passagiere werden höhere Anforderungen als bei kurzen Strecken gestellt. In den Fahrzeugen des Fernverkehrs werden hinsichtlich der zulässigen Raumlufttemperatur im Winter sogar ähnliche Anforderungen wie bei Gebäuden gestellt. Im Sommer sind die Vorgaben der Normen jedoch geringer (Abbildung 15).

Mit Blick auf die thermische Hülle sollten sowohl bei Gebäuden als auch in Fahrzeugen der Grundsatz gelten, einen möglichst hohen Dämmstandard der thermischen Hülle anzustreben. Dies wirkt sich nicht nur auf den thermischen Komfort (Zugerscheinungen durch kalte Oberflächen), sondern auch auf die Energieeffizienz positiv aus.

Auch die Anforderungen an die maximal zulässigen Luftgeschwindigkeiten sind weniger streng als im Gebäudebereich, insbesondere in der Kühlperiode. Dies kann u.a. damit begründet werden, da die Luftkühlung in Fahrzeugen typischerweise mit hohen Luftmengen einhergeht. Höhere Luftgeschwindigkeiten können jedoch auch einen kühlenden Effekt bei hohen Lufttemperaturen im Sommer haben. Diese Eigenschaft kann durchaus genutzt werden, jedoch sollte dabei darauf geachtet werden, dass zu hohe Luftgeschwindigkeiten auch schnell als unbehaglich empfunden werden können (Zugluft). In den Wintermonaten hingegen sollte auf hohe Luftgeschwindigkeiten verzichtet werden, da das Wärmeempfinden der Fahrgäste negativ beeinflusst werden kann und dies möglicherweise mit höheren Lufttemperaturen ausgeglichen werden muss.

Hinsichtlich der relativen Luftfeuchte lassen die Normen bei den Verkehrsmitteln einen grossen Spielraum bei den Anforderungen. Zudem werden keine Mindestanforderungen gestellt, d.h. eine relative Luftfeuchte von 0 % ist gemäss Vorgaben zulässig. Aus dem Gebäudebereich ist bekannt, dass eine relative Luftfeuchte von 30 % nur an wenigen Tagen des Jahres unterschritten werden sollte (gemäss SIA 180). Eine relative Luftfeuchte unter 30 % könnte somit bei langen Fahrzeiten von Personen als unangenehm empfunden werden. Wie häufig ein solcher Fall in der Praxis auftritt ($< 30\%$) und wie sich dies auf den Komfort des Fahrgasts auswirkt, sollte überprüft werden.

5.3 Erkenntnisse aus den Interviewgesprächen: Umsetzung der technischen Anforderungen bei Transportunternehmen und Herstellern

Mit Hilfe von Interviews mit verschiedenen Partnern von Transportunternehmen, Herstellern sowie Forschungs- und Prüfeinrichtungen wurde untersucht, wie die technischen Anforderungen in den verschiedenen Verkehrsmitteln umgesetzt werden. Dazu sollten Antworten u.a. auf die nachfolgenden Fragen gefunden werden:

- Wo und wie werden die technischen Anforderungen umgesetzt (bei der Beschaffung, dem Betrieb, beim Unterhalt)?
- Wie wird der Aspekt der thermischen Behaglichkeit berücksichtigt, vor allem bei der Beschaffung und beim Betrieb?

Insgesamt wurden 13 Interviewgespräche geführt. Die nachfolgende Grafik gibt eine Übersicht, aus welchen Unternehmensbereichen die Befragten stammen (Abbildung 19, links) und mit welchen Verkehrsmitteln sie sich hauptsächlich beschäftigen (Abbildung 19, rechts).

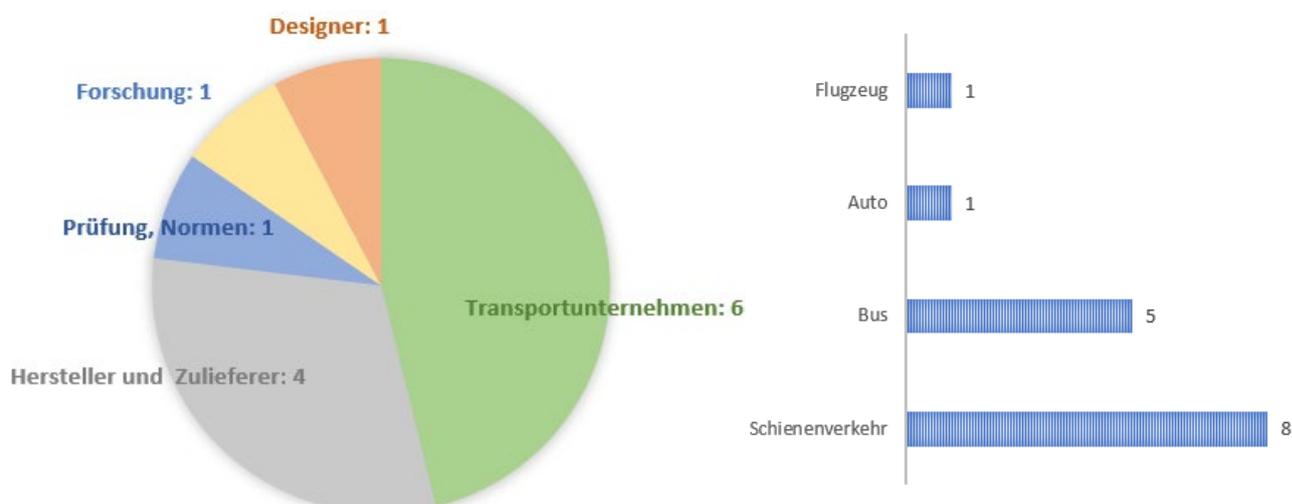


Abbildung 19: Übersicht Unternehmensbereich (links) und Verkehrsmittel (rechts, Mehrfachnennungen möglich) der Interviewpartner

Der Interviewleitfaden inkl. Rückmeldungen (Zusammenfassung) befindet sich in Anhang 11.1. Nachfolgend sind die wichtigsten Erkenntnisse aus den Gesprächen mit Blick auf die oben beschriebenen Fragestellungen zusammengefasst.

Beschaffung

Die Transportunternehmen definieren ihre Anforderungen in einem Pflichtenheft, an welchem sich die Hersteller orientieren. Meisten werden die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit gemäss Normvorgaben definiert. Es gibt aber auch Unternehmungen, welche andere, zusätzliche bzw. erhöhte Anforderungen an die thermische Hülle oder die HLK-Anlagen stellen. Die Hersteller prüfen diese zunächst auf ihre Machbarkeit, wenn möglich werden diese Anforderungen dann entsprechend umgesetzt.

Bei den Fahrzeugherstellern liegt ein Fokus auf der Bereitstellung einer guten thermische Hülle. Die U-Werte werden i.d.R. gemäss den Vorgaben der Normen für die einzelnen Fahrzeugtypen oder die Anforderungen gemäss Kundenwunsch realisiert. Die verwendeten Dämmmaterialien unterscheiden sich dabei in Bezug auf ihre Effizienz / Wärmedämmeigenschaften kaum, variiert wird in der Dämmstärke. Dabei gilt es immer auch die Platzverhältnisse und die Auswirkungen auf das Gewicht des Fahrzeugs zu berücksichtigen. Im Gegensatz zum Schienenverkehr wird der Dämmung der Fahrzeughülle bei Bussen gemäss Interviewpartnern kaum Beachtung geschenkt.

Bei den HLK-Anlagen wird bei den Herstellern vor allem auf die Kriterien Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit fokussiert (Schiienenverkehr und Bus). Auch hier gilt es die Angaben gemäss Norm bzw. Pflichtenheft einzuhalten. Die Luftfeuchte ist häufig keine Regelgrösse in den Anlagen, diesem Kriterium wird entsprechend wenig Beachtung geschenkt. Da i.d.R. die Aussenluft über die Klimaanlage in das Fahrzeug geführt wird, kann es laut Interviewpartner vorkommen, dass die Luft in den Fahrzeugen im Winter sehr «trocken» sein kann. Im Sommer wird die Luft durch die Klimatisierung beim Unterschreiten des Taupunktes ohne Regulierung entfeuchtet. Neben den Anforderungen an die thermische Behaglichkeit sind zudem noch weitere Kriterien für den Fahrgastkomfort relevant, welche einzuhalten sind

und bei der Beschaffung berücksichtigt werden. Dazu gehören bspw. die Luftqualität, Hygiene, Geräusche/Lärm etc.

Ob die Fahrzeuge die Anforderungen erfüllen, wird bei Schienenfahrzeugen entweder in Klimakammern getestet oder / und durch Messungen im Betrieb überprüft. Bei Bussen wird oft nur eine Messung im Betrieb durchgeführt.

Konzepte / Strategien

Zur Bereitstellung der thermischen Behaglichkeit kommen dabei verschiedene Konzepte / Strategien in den verschiedenen Fahrzeugtypen zur Anwendung. Einige davon werden häufig angewendet, andere eher selten. Tabelle 16 gibt eine Übersicht.

Tabelle 16: Erkenntnisse aus den Interviews zu Konzepten und Strategien im öV

 Schienenfahrzeug (Bahn, Tram)
  Bus (Elektro- und Trolleybusse)

 häufig umgesetzte Massnahme
  selten umgesetzte Massnahme
  nicht umgesetzt

Massnahmen			
Thermische Hülle	U-Werte der Bauteile gemäss Norm		
	Höhere Anforderungen an die U-Werte der Bauteile als in der Norm empfohlen		
	Hohe Luftdichtigkeit der thermischen Hülle		
	Abschottung der Einstiegstüren, Abteiltüren, Wagen-Übergangstüren (Zugluft vermeiden)		
	Sonnenschutzmassnahmen (u.a. Sonnenschutzfolien oder Storen) zur Vermeidung von Überhitzungen im Sommer		
HLK-Massnahmen	Klimaanlage zum Heizen und Kühlen		
	Wärmerückgewinnung		
	Statische Regelung der Klimaanlage		
	CO ₂ -Regelung der Klimaanlage		
	Bedarfsgerechte Regelung der Klimaanlage		
	Konvektionsheizkörper		
	Fussboden-, Decken- und Seitenheizungen		
	Wärmepumpen		
	Schlummermodus HLK-Anlage ausserhalb der Betriebszeit (in der Nacht)		
	Vorkonditionierung der Fahrzeuge		
Weitere	Warme Luftvorhänge (Türluftschleier) im Ein-/Ausstiegstüren		
	Einsatz von Ambiente-Beleuchtung (Lichtfarbe in Abhängigkeit der Aussentemperatur, Tages- und Jahreszeit)		
	Luftionisierungsgeräte (bessere Luftqualität, Vermeidung von Gerüchen)		
	Innenraumdesign der Fahrzeuge (Farbkonzepte, Materialwahl, Möbel, Platzverhältnisse etc.)		

Welche dieser Massnahmen zum Einsatz kommen hängt dabei stark vom Fahrzeugtyp, der Aufenthaltsdauer der Fahrgäste (Anforderungen der Normen) sowie den Wünschen der Transportunternehmen ab.

Betrieb

Die Klimaanlage wird gemäss den Vorgaben der Normen eingestellt (Design-Punkt). Diese sind für die unterschiedlichen Fahrzeugtypen klar definiert. Die Befragten waren sich einig: Werden die Vorgaben der Normen eingehalten, werden die Kundenbedürfnisse mit Blick auf die thermische Behaglichkeit gut erfüllt. Die Anzahl unzufriedener Personen beläuft sich dann nur auf weniger als 5 %, was einem normalen Bereich darstellt.

Generell kann es zu Reklamationen an extrem heissen oder kalten Tage kommen, wenn die Klimaanlagen Störungen aufweisen, defekt sind oder bei älteren Fahrzeugflotten, welche nicht über eine Klimatisierung verfügen. Kommt es ansonsten zu Beschwerden seitens der Fahrgäste, so wird das Problem geprüft, wenn möglich behoben oder gemeinsam mit den Herstellern nach Lösungen gesucht.

Zudem werden hin und wieder Messungen im Betrieb der Fahrzeuge durchgeführt, um zu überprüfen, ob die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit eingehalten werden. Werden Störungen oder Unstimmigkeiten festgestellt, werden diese behoben (Nachoptimierung). Neben Messungen spielt aber auch das subjektive Empfinden bei der Bewertung der Systeme eine Rolle.

Unterhalt

Die HLK-Anlagen werden i.d.R. regelmässig gewartet und instandgesetzt. Dies erfolgt je nach Massnahme (bspw. Filtertausch, Befüllen der Klimaanlage) meist halbjährlich bis jährlich. Dadurch sollen Ausfälle der Anlagen – insbesondere an extremen Sommer-/Wintertagen - weitestgehend vermieden werden und eine gute Luftqualität (Hygiene) sichergestellt werden. Entweder erstellen die Hersteller Wartungspläne für ihre Anlagen, welche der Betreiber entsprechend umsetzt oder es wird eine entsprechende Position für Wartung / Instandhaltung durch den Hersteller bereits in der Ausschreibung definiert. Eine regelmässige Wartung ist essenziell für einen optimalen Betrieb und spart langfristig gesehen auch Kosten.

Innovation und Energieeffizienz

Betrachtet man die Konzepte und Strategien, welche häufig in Schienenfahrzeugen umgesetzt werden, sind diese aus energetischer Sicht nicht sehr effizient (u.a. Konvektionsheizkörper, Lüftungsanlagen ohne WRG...). Der Einsatz von Wärmepumpen oder Wärmerückgewinnungsanlagen wird derzeit nur in seltenen Fällen umgesetzt. Dies hängt dabei stark mit der Nachfrage am Markt zusammen. Da diese Energieeffizienzmassnahmen nicht Standard sind, sondern Einzellösungen, sind diese meist mit hohen Kosten verbunden. Motivierte kleine und mittelständische Unternehmen können diese zusätzlichen Kosten meist nicht tragen und müssen sich für die konventionellen Techniken entscheiden. Dies erschwert die Innovation in der Branche. Würde die Nachfrage nach energieeffizienten Produkten gesteigert und diese Systeme zum Standard werden, könnten diese Mehrkosten deutlich gesenkt werden und mit den Energieeinsparungen die Wirtschaftlichkeit erhöhen.

Das liegt u.a. daran, dass die Normen mit Blick auf die Energieeffizienz bei den Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs bisher nur wenige Anforderungen stellen. Gebäude sind diesbezüglich weit voraus, bspw. wenn es um den Einsatz erneuerbarer Energien geht (Wärmepumpen, Nutzung von Solarenergie etc.). Entsprechende Konzepte / Strategien gilt es auf ihre Anwendbarkeit zu prüfen und zu übertragen.

Bei Bussen wird die Entwicklung hin zu einer höheren Energieeffizienz bereits durch die Zunahme von Elektrofahrzeugen getrieben. Ein effizienter Betrieb der Fahrzeuge steht hier im engen Zusammenhang mit der Reichweite. Kann ein Fahrzeug im Normalfall ca. 300 km Strecke zurücklegen, kann sich die Reichweite an sehr kalten bzw. warmen Tage aufgrund der höheren Klimatisierungsleistung der Anlagen auf ca. 200 km reduzieren. Dies ist für Hersteller und Betreiber eine hohe Herausforderung. Der Einsatz von Wärmepumpensystemen bei Elektrobussen ist bereits Standard, weitere Forschungs- und Entwicklungsprojekte beschäftigen sich mit dem Thema Energieeffizienz. Die thermische Behaglichkeit hat hier nur eine geringe Priorität (Ziel: Einhaltung der Anforderungen gemäss Normen).

In Flugzeugen ist die Energieeffizienz ein wichtiger Faktor. Die Auswirkungen der triebwerksbasierten Abzapfsysteme zur Klimatisierung des Flugzeuges sowie die elektrische Belastung beeinflusst den Treibstoffverbrauch und sind somit wichtige Faktoren für die angegebene Reichweite des Flugzeugs. Massnahmen und Konzepte aus dieser Branche mit Blick auf die Energieeffizienz könnten demnach neue Ansätze liefern und auch für den öffentlichen Verkehr interessant sein und sollten geprüft werden.

6. Analyse / Diskussion

6.1 Stellenwert der thermischen Behaglichkeit in Normen & Richtlinien

Die Normen von Schienenfahrzeugen des Fern- und Nahverkehrs bilden europaweit einheitliche Kriterien für die thermische Behaglichkeit ab. Dabei gibt es eigene Anforderungen für Fahrgasträume sowie für die Führerstände. Die Vorgaben der Normen sind zudem in Abhängigkeit von der Aufenthaltsdauer der Fahrgäste sowie den verschiedenen Klimazonen definiert. In den Interviews mit Transportunternehmen und Herstellern wurde deutlich, dass die Anforderungen der Normen im Schienenverkehr klar formuliert sind, sich gut den verschiedenen Gegebenheiten anpassen und die Kundenbedürfnisse mit Blick auf die thermische Behaglichkeit gut abdecken. Die Normen bieten somit eine gute Planungsgrundlage für Hersteller und Betreiber, um qualitativ hochwertige Fahrzeuge und einen hohen Kundenkomfort zu garantieren.

Bei der VDV-Schrift 236 (Verkehrsmittel Bus) hingegen steht vor allem die Sollwerttemperatur im Fokus, wobei auch hier zwischen Kurz- und Langstrecke unterschieden wird. Andere Faktoren, wie bspw. Oberflächentemperaturen oder die Türöffnungen in den Fahrzeugen, werden nicht explizit geregelt, obwohl diese ebenso einen Einfluss auf den thermischen Komfort und die Energieeffizienz haben. Zudem werden keine Anforderungen an Typprüfungen gestellt. Es entsteht der Eindruck, dass das Thema der thermischen Behaglichkeit im Schienenverkehr derzeit einen höheren Stellenwert als bei Linienbussen einnimmt.

Optimierungspotential / Verbesserungsvorschläge

In den Interviewgesprächen wurde zudem erfragt, was an den bestehenden Vorgaben verbessert bzw. optimiert werden könnte. Dabei wurden u.a. folgende Punkte genannt:

- Die Normen definieren klare Anforderungen an die einzelnen Parameter (Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchte sowie Oberflächentemperaturen / Wärmedurchgang der therm. Hülle). Ein übergeordnete Gesamtbewertung (operative Raumtemperatur) gibt es nicht. Werden bspw. höhere Oberflächentemperaturen durch sehr gute U-Werte der thermischen Hülle bereitgestellt, bleiben die Anforderungen an die Lufttemperatur bestehen.
- Der Meereshöhe wird bei der Auslegung der HLK-Anlagen zu wenig Beachtung geschenkt. Durch den reduzierten Luftdruck ändert sich auch die Luftdichte und damit einhergehend die Leistungsfähigkeit der HLK-Systeme (Lüfter und Wärmetauscher).
- Die Normen beschreiben meist nur den Endzustand, es ist allerdings nicht immer klar, wie dieser regelungstechnisch erreicht werden kann.
- Die Normen und Richtlinien sollten so gestaltet sein, dass diese nicht nur durch den Zulieferer, sondern auch im Feld gemessen bzw. deren Einhaltung geprüft werden kann. Die Möglichkeit das HLK-System mit einer «künstlichen Sonne» zu prüfen, wie in der EN 14813-2 gefordert, ist beim Betrieb oft auch aus Kostengründen nicht möglich.
- Es muss geprüft werden, wie zwischen bestehenden Fahrzeugen und Neuanschaffungen unterschieden werden kann. Aus Sicht der Ökologie und der Nachhaltigkeit ist es besser bestehendes Material aufzuarbeiten als Neues zu beschaffen. Bestehendes Material hat aber alten Richtlinien genügt und oftmals können bei Neuerungen / Refits aus Platzgründen, etc. nicht alle Normen (inkl. Brandschutznorm) umgesetzt werden.
- Die Dämmung der Fahrzeughülle soll dazu dienen, dass möglichst wenig geheizt und gekühlt werden muss. Hier entsteht zum Teil ein Widerspruch: Bei einer sehr gut gedämmten Hülle und einer vollen Belegung der Fahrzeuge kann es im Winter passieren, dass durch die hohen internen Wärmelasten gekühlt werden muss. Dies sollte nochmals betrachtet werden.
- Die Anforderungen der VDV-Schrift mit Blick auf die Sollwert-Temperatur sind sehr hoch für E-Fahrzeuge. Dieselbetriebe Fahrzeuge haben mehr Abwärme, wodurch die geforderten Temperaturen im Winter i.d.R. gut bereitgestellt werden können. Bei Elektrofahrzeugen gibt es diese Abwärme nicht mehr und es gilt ein gutes Verhältnis zwischen Komfort und Reichweite zu finden. Dies stellt Hersteller und Betreiber oft vor Herausforderungen.
- In der VDV 236 ist nicht genau angegeben, wo die vorgegebene Sollwerttemperatur im Fahrzeug zu messen / bereitzustellen ist (Decke, Fussboden etc.), es wird lediglich ein max. Temperaturunterschied angegeben. Dies führt u.a. dazu, dass Betreiber eine eigene Sollwerttemperatur definieren, welche ebenso im Fussbereich eine angenehme Temperatur bereitstellt (diese lehnt sich i.d.R. aber stark an den Vorgaben der VDV 236 an).
- Der Kontaktbereich des Körpers mit der Umgebung beträgt beim Sitzen ca. 25 % der Körperfläche. In den Normen wird dies nicht berücksichtigt, beeinflusst aber die Behaglichkeit. Hier

fehlen entsprechende Informationen, welche in zukünftigen Forschungsarbeiten bearbeitet werden sollten.

Neben dem Thema der thermischen Behaglichkeit sollte zudem dem Thema der «Energieeffizienz» eine höhere Aufmerksamkeit zukommen, insbesondere mit Blick auf die HLK-Systeme. Derzeit werden nur wenige energieeinsparende Massnahmen vorgesehen, hier besteht Verbesserungspotential. Massnahmen wie eine CO₂-gesteuerte Frischluftzufuhr oder eine Abluftwärmerückgewinnung könnten mögliche Ansätze darstellen.

Ziel einer Anpassungen der Vorgaben sollte dabei immer sein, dass der öffentliche Verkehr künftig noch zuverlässiger, komfortabler, energieeffizienter und somit attraktiver wird.

6.2 Stellenwert der thermischen Behaglichkeit bei Transportunternehmen & Herstellern

Welchen Stellenwert die thermische Behaglichkeit einnimmt ist stark von der jeweiligen Unternehmung abhängig. Die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit werden von den meisten Unternehmen gemäss Norm eingehalten. Es gibt aber auch einige Transportunternehmen, die einen besonders hohen Wert auf die thermische Behaglichkeit legen, da diese für die Kundenzufriedenheit essenziell ist – Dies betrifft meist den Fernverkehr oder vor allem für den Tourismus genutzte Bahnen.

Der Fokus der Hersteller liegt i.d.R. darauf, ihre Produkte gemäss Pflichtenheft und den Wünschen der Betreiber umzusetzen.

Laut Aussagen der Interviewpartner sind in den meisten Fällen die Kosten entscheidend. Der Fokus hat sich hier in den letzten 5 Jahren bereits verändert. Während früher die Investitionskosten im Vordergrund standen, werden heutzutage vor allem die Lebenszykluskosten als Entscheidungsgrundlage genommen. Da sich die Energieeffizienz ebenso in den laufenden Kosten widerspiegelt, hat auch dieses Thema an Aufmerksamkeit gewonnen.

Bei Elektrobussen steht die thermische Behaglichkeit eher im Hintergrund. Hier ist vor allem die Energieeffizienz besonders entscheidend, da bei einer ineffizienten Anlage die Reichweite der Fahrzeuge abnimmt.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über den Stellenwert der thermischen Behaglichkeit, der Energieeffizienz und der Kosten bei den verschiedenen Fahrzeugtypen.

Tabelle 17: Stellenwert der thermischen Behaglichkeit, Energieeffizienz und Kosten unterschieden in Fahrzeugtyp und Nutzung

	Stellenwert		
	Gering	Mittel	Hoch
Thermische Behaglichkeit	städtischer Nahverkehr (Kurzstrecke), Busse (inkl. Elektro- und Trolleybusse)	regionaler Nahverkehr (mittlere Aufenthaltsdauer)	Fernverkehr, lange Aufenthaltsdauern, Bahnen mit Fokus Tourismus
Energieeffizienz		übrige Verkehrsmittel, Energieeffizienz vor allem mit Blick auf die Betriebskosten	Elektrobusse
Kosten		Investitionskosten, alle Verkehrsmittel	Lebenszykluskosten (LCC), alle Verkehrsmittel

Wie bereits erwähnt, sind die Kosten (LCC) der Ausgangspunkt für Entscheidungen. Die Bedürfnisse an den thermischen Komfort werden bereits durch die Vorgaben der Normen weitestgehend abgedeckt und sichergestellt. Das Thema der Energieeffizienz stockt jedoch in der Branche und Innovationen in diesem Bereich werden gebremst (Abschnitt 5.3 «Innovation und Energieeffizienz»). Daraus ergibt sich eigentlich die zentrale Frage: Wie kann im öffentlichen Verkehr das Thema der Energieeffizienz künftig an Bedeutung gewinnen und die Nachfrage nach entsprechenden Produkten am Markt gesteigert werden? Denn wenn energieeffiziente System und Massnahmen zum Standard werden, sind diese künftig auch bezahlbar und werden flächendeckend eingesetzt.

6.3 Übertragbarkeit von Massnahmen aus dem Gebäudebereich auf den öV

Die thermische Behaglichkeit ist sowohl im Gebäudebereich als auch bei den öffentlichen Verkehrsmitteln ein wichtiger Aspekt für das Wohlbefinden des Nutzenden. Im Allgemeinen werden Innenräume mittels technischer Einrichtung geheizt und/oder gekühlt, um die Vorgaben mit Blick auf die Innenraumtemperaturen bereitzustellen. Dabei übernimmt die Technik die Aufgabe, welche die thermische Hülle nicht oder nur ungenügend zu leisten vermag. Diesbezüglich besteht also eine Gemeinsamkeit zwischen Gebäuden und Fahrzeugen.

In Abschnitt 4.3.5 wurden bereits einige Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen Gebäuden und Fahrzeugen erläutert. In diesem Abschnitt wurden die nachfolgenden Fragestellungen untersucht:

- Welche Massnahmen aus dem Gebäudebereich werden zur Bereitstellung der thermischen Behaglichkeit im öV bereits umgesetzt?
- Welche Aspekte sollten künftig noch übertragen werden?

6.3.1 Fahrzeughülle

Die thermische Hülle ist sowohl in Fahrzeugen als auch im Gebäudebereich essenziell, um eine hohe thermische Behaglichkeit (angenehme Oberflächentemperaturen, Zugluft vermeiden) und Energieeffizienz bereitzustellen. Entsprechende Massnahmen werden in beiden Anwendungsbereichen bereits umgesetzt, auch wenn die Anforderungen an die Fahrzeughülle i.d.R. deutlich geringer sind als die in Gebäuden.

Tabelle 18 gibt eine Übersicht, welche Massnahmen aus dem Gebäudebereich bekannt sind und ob diese in Fahrzeugen bereits Anwendung finden bzw. ob diese übertragbar sind.

Tabelle 18: Massnahmen aus dem Gebäudebereich - Fahrzeughülle

Massnahmen Gebäudebereich	Anwendung in Fahrzeugen	Übertragbarkeit	Bemerkung / Schwierigkeiten
Dämmung opaker Bauteile (geringer U-Wert, Dämmstärken 10 – 30 cm)	Vorhanden, aber höhere U-Werte (Dämmstärken 2–5 cm)	Ja, bis zu einem gewissen Mass	Begrenzte Platzverhältnisse, zusätzliche Masse
Geringer U-Wert bei transparenten Bauteilen (Standard Neubau: Dreifachverglasung)	Vorhanden, aber höhere U-Werte (Standard: Ein- bis Zweifachverglasung)	Ja, bis zu einem gewissen Mass	Zusätzliche Masse
Reduzieren von Wärmebrücken (optimiert)	Teilweise, bisher wenig optimiert	zu prüfen	Wagenkasten ist tragendes Bauteil und nicht stationär Andere Materialien (kein Beton)
Hohe Luftdichtigkeit der Hülle	Teilweise, bisher wenig optimiert	Ja, bis zu einem gewissen Mass	

Massnahmen Gebäudebereich	Anwendung in Fahrzeugen	Übertragbarkeit	Bemerkung / Schwierigkeiten
Sonnenschutz, u.a. Einsatz von Storen oder Markisen (Standard: aussenliegender Sonnenschutz)	Nicht vorhanden	Teilweise, innenliegender Sonnenschutz oder zwischen den Fensterscheiben Aussenliegende Sonnenschutzelemente nicht möglich	Begrenzte Platzverhältnisse, innenliegende Sonnenschutzelemente können schnell beschädigt werden, manuelle Bedienung durch den Fahrgast (mögliches Konfliktpotential aufgrund individueller Wünsche der Fahrgäste)
Elektrochrome Gläser	Nicht vorhanden	zu prüfen	Erhöhte Anforderungen an schnelle Temperaturwechsel, Druck, Wind, Lebensdauer, etc. Im touristischen Angebot evtl. schwierig (Einschränkung der Aussicht)
Begrünungsmassnahmen am Gebäude oder in der Umgebung	Nicht vorhanden	Nicht möglich	
Thermische Speichermasse nutzen	Nicht vorhanden	Nicht möglich, aus Gewichts- und Platzgründen	

Die aufgeführten Massnahmen der thermischen Hülle tragen insbesondere dazu bei, angenehme Oberflächentemperaturen bereitzustellen, Zugserscheinungen zu vermeiden, aber auch der Überhitzung von Innenräumen im Sommer entgegenzuwirken. Gleichzeitig steigern sie die Energieeffizienz. Entsprechend sollte die Anwendung dieser Massnahmen in den öffentlichen Verkehr so weit wie möglich übertragen werden und bei Bedarf adaptiert werden. Generell gilt jedoch, dass die Umsetzung von Massnahmen an der thermischen Hülle bei neuen Fahrzeugen wesentlich einfacher ist als beim Refit. In bestehenden Fahrzeugen ist die Umsetzung meist kostenintensiv und mit einem hohen baulichen Aufwand verbunden. Dies führt zu langen Amortisationszeiten, weshalb i.d.R. auf Massnahmen im HLK-Bereich zurückgegriffen wird. Im Bericht «Potentialanalyse für Verbesserung der Wärmedämmung bei der Fahrzeugaussenhülle» [26] wurden die Möglichkeiten eines Refits am S-Bahn-Gliederzug der BLS aufgezeigt.

6.3.2 HLK-Massnahmen

Wo die Hülle nicht ausreicht, um die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit zu erfüllen, kommen HLK-Massnahmen zum Einsatz. Tabelle 19 gibt eine Übersicht, welche (technischen) Massnahmen und Systeme bei Gebäuden zur Anwendung kommen und ob diese in Fahrzeugen bereits Anwendung finden bzw. ob diese übertragbar sind.

Tabelle 19: HLK-Massnahmen aus dem Gebäudebereich

Massnahme	Anwendung in Fahrzeugen	Übertragbarkeit	Bemerkung / Schwierigkeiten
Wärmepumpen (Standard bei Neubauten und Sanierungen, zunehmend)	Schienerverkehr eher selten, Bus zunehmend (durch die Zunahme von batteriebetriebenen Fahrzeugen)	Ja	Der Einsatz von Wärmepumpen sollte künftig auch bei Schienenfahrzeugen überprüft und - wenn möglich – standardisiert werden. Hierbei ist die Betrachtung der Jahresstunden wichtig (Angaben Aussen-temperatur und Stunden). Ebenso sollte der Abtauzyklus in der Energieeffizienz berücksichtigt werden. Mit Blick auf die Kosten sollte eine Gegenüberstellung der zusätzlichen Investitionen mit den LCC Kosten erfolgen. Dabei sind auch Kosten für zusätzliche Heizungen, wenn die WP ausfällt, sind zu berücksichtigen.
Öl-/Gas-/Holz-Heizung (Standard im Bestand, abnehmend)	Nicht vorhanden	Nicht möglich	Begrenzte Platzverhältnisse, zusätzliches Gewicht, auf den Einsatz von Öl- und Gas sollte mit Blick auf die Nachhaltigkeit ohnehin verzichtet werden
Mechanische Lüftungsanlage	Standard in Fahrzeugen		
Wärmerückgewinnung Lüftung (WRG)	Nicht vorhanden	Ja, aber allfällige Gewichtszunahme zu prüfen	Gewicht, neue Konzepte zur Luftleitungsführung sind gefragt. Des Weiteren sind die Jahresstunden und das effektive Luftvolumen in Kombination mit dem Temperaturdelta zu betrachten.
Stufenweise Regelung der Klimaanlage	Teilweise	Ja	Nicht nur für die thermische Behaglichkeit, sondern auch für die Energieeffizienz von Vorteil
Fensterlüftung	Nicht vorhanden oder nur selten (alte Flotten)	Nicht empfehlenswert	Lärm, Wettereinflüsse, etc.
Natürliche Lüftung über Lüftungsöffnungen an der Fassade	Nicht vorhanden	Nicht empfehlenswert	Gefahr von Zugluft über Lüftungsöffnungen im Betrieb
Geocooling über Erdsonden	Nicht vorhanden	Nicht möglich (dynamischer Standort)	

Massnahme	Anwendung in Fahrzeugen	Übertragbarkeit	Bemerkung / Schwierigkeiten
Flächenheizungen	Selten	Ja	<p>Verbesserung des thermischen Komforts, aber nur in Kombination mit einer gut gedämmten Hülle. Mit wassergeführten Systemen (WP) nochmals anspruchsvoller in der Umsetzung.</p> <p>Schwierigkeiten, u.a. Installations- und Wartungsaufwand, Zugänglichkeit, Reparierbarkeit, Brandschutz. Einige technische Lösungen sind bereits vorhanden und umgesetzt.</p> <p>Die Kosten dieser Systeme sind zu prüfen.</p>
Deckenkühlung	Kühlung über die gesamte Deckenfläche nicht vorhanden	Möglich, aber zunächst zu prüfen (Betrachtung der Kühlleistung)	<p>Verbesserung des thermischen Komforts, auch energetisch sinnvoll (höhere Systemtemperaturen, weniger Luft muss umgewälzt werden). Wassergeführte Systeme sind anspruchsvoller in der Umsetzung.</p> <p>Schwierigkeiten, u.a. Installations- und Wartungsaufwand, Zugänglichkeit, Reparierbarkeit, Brandschutz</p>
Interne Lasten reduzieren durch effiziente LED-Leuchten und IT-Ausrüstungen	Teilweise, LED-Beleuchtung bei neuen Fahrzeugen Standard	Ja	Auf Repeater kann bei guter mobiler Abdeckung mit entsprechenden Gläsern verzichtet werden.

Ein angenehmes Innenraumklima kann im Allgemeinen durch verschiedene HLK-Systeme bereitgestellt werden, sowohl durch eine Elektrodirektheizung (Standard in Fahrzeugen) als auch durch eine Wärmepumpe. Das ist in Gebäuden als auch in Fahrzeugen identisch. Der grosse Unterschied liegt hierbei in der **Energieeffizienz der Systeme**. Während es im Gebäudebereich diesbezüglich konkrete Vorgaben gibt, werden im Fahrzeugbereich kaum Anforderungen definiert. Dies wurde auch von Interviewpartnern bestätigt. Entsprechend kommen Energieeffizienzmassnahmen in der Branche auch nur selten zur Anwendung.

Inwieweit Energieeffizienzmassnahmen aus dem Gebäudebereich, wie bspw. der Einsatz von Wärmepumpen oder Wärmerückgewinnung, auch in Fahrzeugen (vermehrt) anwendbar sind, ist jedoch zunächst zu überprüfen. Denn zum Teil werden deutlich höhere Anforderungen durch den Platzbedarf, das zulässige Gewicht, hohe Belegungsschwankungen, dynamischer Standort, regelmässige Türöffnungen etc. gestellt. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

Weitere Informationen zum Thema Energieeffizienz im öffentlichen Verkehr sind im «Synthesebericht» der Hochschule Luzern [1] zu finden.

6.4 Übertragbarkeit von Massnahmen zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln

Neben Massnahmen aus dem Gebäudebereich, gibt es auch Ansätze aus anderen Verkehrsmitteln, die für die Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs ebenso von Interesse sein könnten.

In **Abschnitt 5.1.2** wurde Massnahmen aus dem Automobilbereich und in **Abschnitt 5.1.3** aus der Flugzeugbranche zusammengetragen, die zur Verbesserung der thermischen Behaglichkeit beitragen können. Nachfolgend wird die Übertragbarkeit dieser Massnahmen diskutiert.

Weitere Informationen zu Analogien und Unterschieden zwischen den verschiedenen Verkehrsmitteln befinden sich in Abschnitt 4.6.

6.4.1 Thermische Hülle

Tabelle 20 gibt einen Überblick, welche Massnahmen im Bereich der thermischen Hülle aus der Automobil- und Flugzeugindustrie übertragen werden könnten.

Tabelle 20: Massnahmen bei anderen Verkehrsmitteln – Thermische Hülle

Massnahmen	Verkehrsmittel	Anwendung im öV	Übertragbarkeit	Bemerkung / Schwierigkeiten
Hocheffiziente Dämmstoffe, sehr tiefer Wärmeleitwert (λ -Wert)	Flugzeug	Dämmung vorhanden, Materialien mit höheren λ -Werten	Ja	Höhere Kosten als typische Dämmmaterialien
Reflektierende Scheiben	Auto	Nicht vorhanden	Ja, aber zu prüfen	Einfluss auf die Umgebung prüfen – gibt es teilweise störende Reflexionen für die Umgebung (bspw. Blendung von Personen in Bahnsteignähe), Gesamtenergiebilanz berücksichtigen (Reduzierung von Wärmelasten im Sommer, aber geringer Wärmegewinne im Winter)

6.4.2 HLK-Massnahmen

Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht, welche (technischen) Massnahmen und Systeme in der Automobil- und Flugzeugindustrie zur Bereitstellung der thermischen Behaglichkeit angewendet werden und ob sich diese auf die Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs übertragen lassen.

Tabelle 21: HLK-Massnahmen bei anderen Verkehrsmitteln

Massnahmen Auto / Flugzeug	Verkehrsmittel	Anwendung im öV	Übertragbarkeit	Bemerkung / Schwierigkeiten
Zonenweise Klimatisierung	Auto	Teilweise, im Fernverkehr werden verschiedene Zonen (Einstiegsbereich, Fahrgastwagen...) anders konditioniert	Möglich, aber zu prüfen, ob thermisch und energetisch sinnvoll	Im Vergleich zum Auto, hat es im öV ein höheres Innenraumvolumen (Fahrgastraum) sowie meist eine grössere Personenanzahl; es ist zu prüfen, ob und wo eine zonenweise Konditionierung vorteilhaft ist
Körpernahe Heiz- und Kühlsysteme	Auto	Nicht vorhanden	Ja, aber zu prüfen	Höherer Installations- und Reparaturaufwand, thermisches Verhalten im gesamten Fahrgastraum prüfen, Brandschutz, etc.
Wärmekapazitäten reduzieren (Innenraum)	Auto	Wird i.d.R. nicht berücksichtigt	Ja	
Personalisierte Ventilation	Flugzeug	Nicht vorhanden	Ja, aber zu prüfen	höherer Installationsaufwand, Wartungsaufwand, etc.
Wärmerückgewinnung (WRG) Lüftung	Auto	Nicht vorhanden	Ja, aber zu prüfen	Effizienz einer Wärmerückgewinnung ist zu prüfen
Bauteilintegrierte Infrarotstrahlungselemente	Flugzeug	Nicht vorhanden	Möglich, aber zu prüfen	Temperaturschichtungen/-unterschiede Decke bis Fussboden als Herausforderung, Installations- und Reparaturaufwand, Brandschutz, etc.
Solarzellen betriebene Lüftung (Vorkonditionierung)	Auto	Eine Vorkonditionierung der Schienenfahrzeuge findet bereits statt (nicht solar)	Ja	Die Nutzung von erneuerbaren Energiequellen für die Vorkonditionierung von Fahrzeugen ist aus energetischer Sicht sinnvoll und sollte ebenso im öV angewendet werden

Neben Massnahmen an der thermischen Hülle sowie HLK-Systemen, gibt es ebenso weitere Massnahmen, welche sich auf den (thermischen) Komfort der Fahrgäste auswirken können. Dazu gehören u.a. die **Farbgebung des Lichts** oder auch das **Material der Sitze / Oberflächen**. So kann z.B. ein helles/weisses Licht das Wärmeempfinden im Sommer beeinflussen und die Innenraumtemperatur werden als kühler empfunden. Ebenso können Materialien, das thermische Empfinden beeinflussen: Ledersitze können im Winter als kühl empfunden werden, während Polster einen wärmenden Effekt hervorrufen.

7. Projektideen, um die Auswirkungen von Energiesparmassnahmen im Bereich HLK auf die thermische Behaglichkeit zu untersuchen

Dieser Abschnitt fokussiert auf der Evaluierung neuer Projektideen.

Um die Auswirkungen von Energiesparmassnahmen auf die thermische Behaglichkeit abzuschätzen, müssen zunächst die Parameter, welche einen massgeblichen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit haben, evaluiert werden (**Sensitivitätsstudie**). Eine Übersicht aller physikalischen, physiologischen und intermediären Bedingungen sowie äusseren und inneren Einflüssen ist in Abschnitt 4.2 zu finden. Als primäre und dominierende Faktoren für die thermische Behaglichkeit können dabei insbesondere die nachfolgenden genannt werden:

- Kleidung
- Tätigkeitsgrad
- Lufttemperatur
- Temperatur der Umschliessungsflächen (Oberflächentemperatur)
- Relative Luftfeuchte
- Luftbewegung

Die Kleidung und der Tätigkeitsgrad sind dabei subjektive Faktoren und können nur von den jeweiligen Personen selbst beeinflusst werden. Die übrigen Parameter (**Luft- und Oberflächentemperatur, relative Luftfeuchte, Luftbewegung**) sind hingegen beeinflussbare Faktoren und können durch entsprechende Massnahmen an der Fahrzeughülle oder technische Konzepte und Systeme reguliert werden.

In Abschnitt 5.1 wurden einige **Massnahmen** zu den verschiedenen Fahrzeugtypen (Bahn, Bus, Tram) sowie aus der Automobil- und Flugzeugindustrie zusammengetragen. Diese wurden hinsichtlich ihres Einflusses auf die thermische Behaglichkeit (Lufttemperatur, Oberflächentemperatur, Luftfeuchte, Luftbewegung) und die Energieeffizienz bewertet. Dabei fällt auf, dass sich die meisten der genannten Massnahmen sowohl positiv auf die Energieeffizienz als auch die thermische Behaglichkeit auswirken. Insbesondere durch eine gute thermische Hülle (geringe U-Werte, hohe Luftdichtigkeit, wärmebrückenoptimiert) können ungewünschte Wärmeverluste (Winter) oder Wärmeeintritte (Sommer) reduziert und ein angenehmes Raumklima bereitgestellt werden. Auch bei den aufgeführten HLK-Massnahmen gibt es nur wenige Diskrepanzen zwischen Komfort und Energieeffizienz.

Um die Auswirkungen von Energiesparmassnahmen auf die thermische Behaglichkeit abschätzen bzw. quantifizieren zu können, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Dazu gehören u.a. die nachfolgenden:

- Komfortmessungen im Betrieb der Fahrzeuge
- Umfragen: Passagiere über ihr subjektives Empfinden befragen
- Messung der Wirkung von Massnahmen im Klima-Wind-Kanal
- Mockup eines Fahrzeuges für 1:1 Untersuchungen
- Berechnung / Simulation der Wirkung von Massnahmen (Simulationsmodelle)

Bei jeder neuer Projektidee gilt es die richtige Methodik zur Erreichung der Ziele zu definieren. Soll aus Effizienzgründen bspw. die Innenraumtemperatur in den Fahrzeugen abgesenkt oder erhöht werden (Winter / Sommer), kann sich dies negativ auf das Wohlbefinden der Fahrgäste auswirken. In diesem Fall können Umfragen ein gutes Hilfsmittel darstellen, um das thermische Empfinden der Personen zu evaluieren. Gleichzeitig sollten Komfortmessungen im Betrieb der Fahrzeuge stattfinden, um die Rückmeldungen in Bezug zu den raumklimatischen Bedingungen bewerten zu können.

Im Klima-Wind-Kanal können verschiedene Klimabedingungen nachgestellt werden. Dadurch kann getestet werden, ob das Fahrzeug die Anforderungen zu jederzeit garantieren kann. Dies kann von Vorteil sein, wenn Lösungen für verschiedene Regionen und klimatische Bedingungen entwickelt werden sollen. Bspw. könnte so untersucht werden, ob durch den Einbau einer Wärmepumpe auch bei extremeren Aussentemperaturen ein angenehmes Raumklima garantiert werden kann. Parallel sollte die Effizienz eines solchen Systems mittels Berechnungen und Simulationen überprüft werden. Eine Kombination von verschiedenen Methodiken kann somit ebenfalls zielführend sein und ist für jede Projektidee individuell zu bestimmen.

7.1 Einordnung von gängigen Energiesparmassnahmen im Bereich HLK hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die thermische Behaglichkeit

Eine Übersicht über die gängigen Energiesparmassnahmen findet sich im Abschlussbericht zum Projekt «Synthesebericht Energieeffizienz im Bereich HLK und Hülle im Schweizer öV» [1]. Die wichtigsten Resultate der Studie sind ebenso in Abschnitt 4.1 zusammengefasst.

Am 23. Januar 2023 fand an der Hochschule Luzern in Horw ein Workshop mit Fachexpertinnen und Fachexperten aus Forschung und Praxis statt. Zur Vorbereitung wurde allen Teilnehmenden eine Umfrage zugestellt, wo verschiedene Projektideen und Massnahmen hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit im öV sowie ihres Einflusses auf die thermische Behaglichkeit und Energieeffizienz bewertet werden sollten. Die Ergebnisse der Umfrage befinden sich im Anhang 11.2.

Abbildung 20 gibt eine Übersicht über die gängigen Energie- und Komfortmassnahmen. In der Grafik sind die Ergebnisse der Umfrage (Workshop) zusammengefasst, dargestellt ist der Mittelwert aller erhaltenen Rückmeldungen. Ergänzt wurde die Grafik mit Massnahmen aus dem Synthesebericht [1]. Alle aufgeführten Massnahmen wurden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Energieeffizienz sowie auf die thermische Behaglichkeit bewertet. Die im Rahmen des Workshops diskutierten Projektideen / Massnahmen sind mit Nummern gekennzeichnet. Sie wurden zusätzlich hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit im öV bewertet und sind farblich gekennzeichnet. Massnahmen aus dem Synthesebericht [1] sind mit Buchstaben beschriftet und nicht eingefärbt.

Deutlich zu erkennen ist, dass Massnahmen, welche die Energieeffizienz positiv beeinflussen, nur selten im Konflikt mit der thermischen Behaglichkeit stehen. Massnahmen der thermischen Hülle können einen deutlichen Mehrwert für Energie und Komfort leisten (A. Dämmung der Fahrzeughülle, B. Fenster mit geringen U-Werten). Zusätzliche Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Hülle (Nr. 1) sind hinsichtlich ihres Einflusses auf Energie und Komfort stark abhängig von der Basis des Vergleichs (Ausgangslage, Refit, Neuwagen) sowie den geplanten Massnahmen, wie bspw. dem Einsatz von Sonnenschutzfolien, hocheffizienter Dämmmaterialien oder der Reduzierung von Wärmebrücken. Allgemein kann aber gesagt werden, dass die hier aufgeführten Massnahmen an der Fahrzeughülle immer zu einer Verbesserung der Energieeffizienz und der thermischen Behaglichkeit führen. Hindernisse bei der Umsetzung können u.a. eingeschränkte Möglichkeiten (bspw. beim Refit) oder hohe Kosten sein.

Viele Effizienzmassnahmen im HLK-Bereich, wie bspw. der Einsatz von Wärmepumpen (Nr. 7) oder einer Abluftwärmerückgewinnung (I.), haben keinen direkten Einfluss auf die thermische Behaglichkeit. Beim Einsatz solcher Systeme sollte aber sichergestellt werden, dass die Komfortanforderungen über das ganze Jahr eingehalten werden können.

Andere Massnahmen im HLK-Bereich werden so eingeschätzt, dass sie sich positiv auf Energie und Komfort auswirken können. Hier kann beispielsweise die individualisierte Klimatisierung (Nr. 6), wie die personifizierte Klimatisierung oder körpernahe Heiz- / Kühlsysteme. Herausforderungen bei der Umsetzung und im Betrieb, wie der zusätzliche Installations- und Wartungsaufwand oder Brandschutzmassnahmen, sollten jedoch zunächst weiter untersucht werden.

Der Massnahme F «Temperaturanpassung im Innenraum» wird ein hohes Energieeinsparpotential zugesagt, diese Massnahme nimmt aber auch einen direkten Einfluss auf den thermischen Komfort, die Bewertung hängt hier jedoch stark von der Referenzsituation ab: Wird die Lufttemperatur auf ein zu geringes Niveau gesenkt (Winter) oder zu wenig abgekühlt im Sommer, so kann es schnell zu Beschwerden seitens der Fahrgäste kommen. Es ist wichtig ein gutes Gleichgewicht zwischen dem thermischen Komfort und der Energieeffizienz zu finden. Verschiedene Studien haben sich bereits mit dem Thema der Temperaturanpassung im Innenraum beschäftigt, wie bspw. eine Studie der HSLU zur «Temperatursenkung im S-Bahnverkehr der SBB» [27] oder die Studie der VBZ «Energieeinsparung im Trambetrieb bei verschiedenen Innenraum Temperatursollwerteinstellungen» [28]. Beide Studien haben eine mögliche Temperaturabsenkung im Winter betrachtet und Umfragen bei den Fahrgästen durchgeführt. In beiden Fällen kam es bei abgesenkter Temperatur zu keiner direkten Beeinträchtigung der befragten Personen.

Mit Blick auf die Umsetzbarkeit im öV, wurden vor allem die Optimierung der Temperatur- und Lüftungsregelung (Nr. 2) sowie der Einsatz von Farben, Materialien und Licht, welches das Wärmeempfinden von Personen beeinflussen können, mit einem geringen Aufwand bewertet. Bei den Massnahmen Verbesserung der thermischen Hülle (Nr. 1, besonders hoch beim Refit), Einsatz von Flächenheizungen / -kühlung (Nr. 3), eine zonenweise Klimatisierung (Nr. 5) sowie eine individualisierte Klimatisierung (Nr. 6) wird der Aufwand als hoch eingestuft. Die übrigen Projektideen bzw. Massnahmen wurden diesbezüglich als «mittel» eingestuft.

Legende

- Massnahme
- Einflussbereich

Umsetzbarkeit

- kein Aufwand
- gering
- mittel
- hoch
- sehr hoch

Projektideen/Massnahmen aus dem Workshop (Anmerkungen der Teilnehmenden zur Bewertung)

1. Verbesserung der thermischen Hülle
(stark abhängig von der Referenz und den Massnahmen, Umsetzbarkeit: beim Refit sehr hoher Aufwand, bei Neuwagen hoher Aufwand)
2. Optimierung der Temperatur- und Lüftungsregelung
3. Flächenheizung / -kühlung
(positiver Einfluss auf die Energieeffizienz in Kombination mit einer Wärmepumpe)
4. Infrarotheizungen
(die Wahl eines geeigneten Infrarotstrahlers ist entscheidend, Symmetrie und Asymmetrie des IR-Strahlers berücksichtigen)
5. Zonenweise Klimatisierung
(abhängig von der definierten Zone, die Umsetzbarkeit kann sich als komplex erweisen)
6. Individualisierte Klimatisierung
(personalisierte Klimatisierung komplex in der Umsetzung, körpernahe Heizsysteme weniger komplex)
7. Wärmepumpe
8. Türluftschleier
9. Farben, Materialien, Licht etc.
10. Einfluss der Luftfeuchtigkeit, Massnahmen zur Regulierung

Massnahmen aus dem Synthesebericht [1]

- A. Dämmung Fahrzeughülle (allgemein)
- B. Fenster mit geringen U-Werten
- C. g-Wert der Fenster dem Klima anpassen
- D. Luftdichtheit verbessern
- E. Fahrzeug weiss lackieren
- F. Temperaturanpassung im Innenraum
- G. CO₂-gesteuerte Lüftung
- H. Schlumberbetrieb einführen
- I. Abluftwärmerückgewinnung
- J. Modellprädiktive Regelung der HLK-Anlage
- K. Verhindern von Gegenheizen
- L. Effiziente HLK-Anlagen
- M. Frequenzvariable HLK-Anlage
- N. LED-Beleuchtung
- O. Tageslichtsteuerung der Beleuchtung

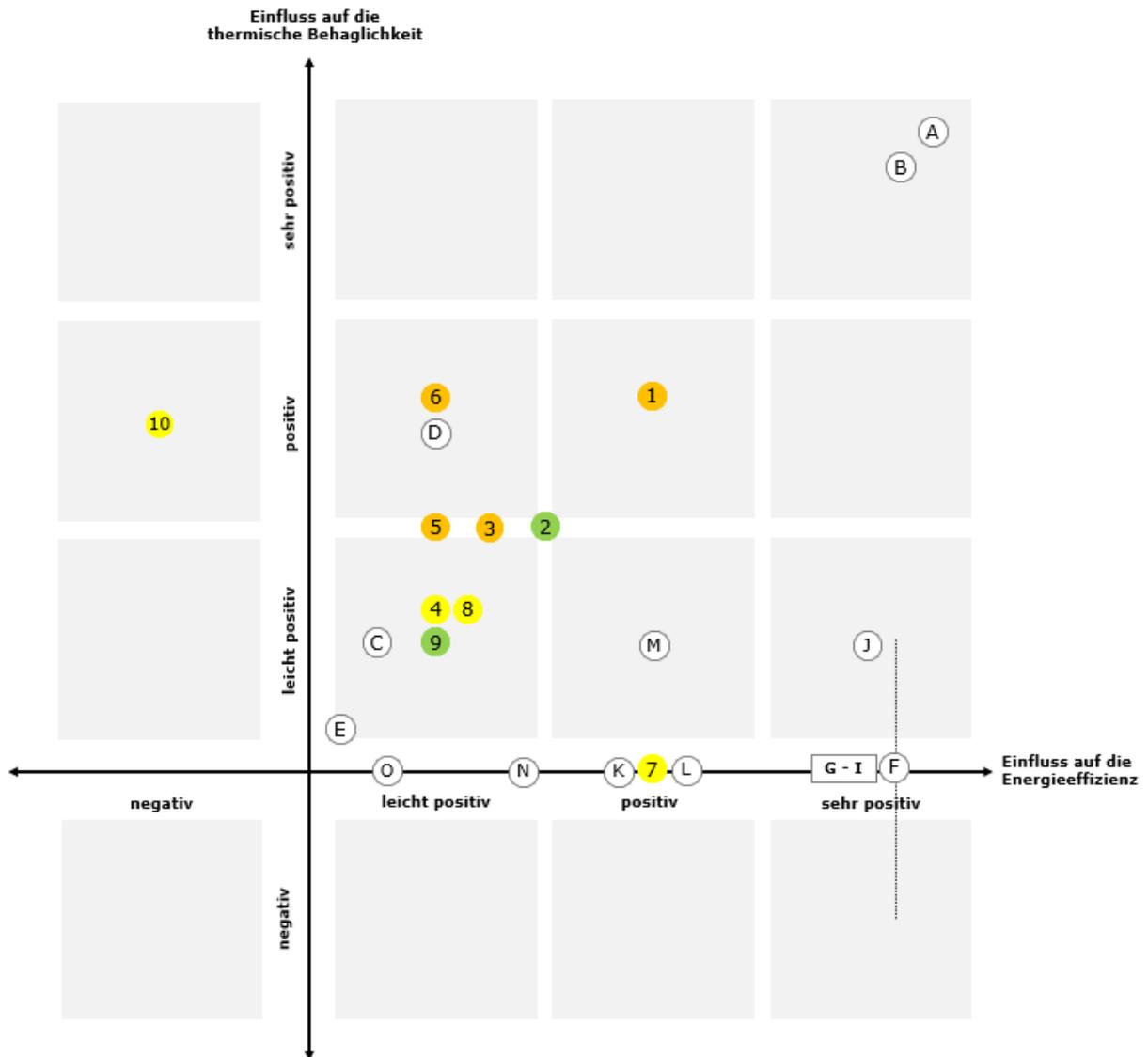


Abbildung 20: Übersicht über gängige Energie- und Komfortmassnahmen im öV, die Resultate basieren auf den Umfrageergebnissen des Workshops (gekennzeichnet mit Nummern 1 - 10). Die Massnahmen wurden hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit im öV sowie ihres Einflusses auf die Energieeffizienz und die thermische Behaglichkeit bewertet. Ergänzt wurde die Darstellung mit Ergebnissen aus dem Synthesebericht (gekennzeichnet mit Buchstaben A - O) [1], hierbei fand keine zusätzliche Bewertung der Umsetzbarkeit statt.

7.2 Übersicht Projektideen

Durch Recherchen und Interviewgespräche konnte bereits eine Vielzahl von Projektideen zusammengetragen werden (Abschnitt 5.1, Anhang 11.1 / Frage 11). Im Rahmen des Workshops mit Fachexperten aus Forschung und Praxis wurden die bestehenden Ideen diskutiert und neue Ideen evaluiert.

Als zusätzliche Ideen wurde u.a. der Einsatz von olfaktorische Komponenten (Beeinflussung des Wärme- bzw. Kälteempfinden von Personen durch Düfte), der Einsatz von elektrischen Sonnenrollos, welche bei Bedarf geschlossen werden oder im Winter bei Sonne bewusst geöffnet werden (Wärmegewinne zulassen, Aufheizen verhindern), sowie die Nutzung des durch die Klimaanlage abgeschiedenen Kondenswassers zur Kühlung der Aussenhülle im Sommer genannt (Anhang 11.2 / Frage 13).

Im zweiten Teil des Workshops wurden drei Gruppen gebildet und ausgewählte Projektideen weiter konkretisiert (Tabelle 22). Ziel ist die gemeinsame Eingabe dieser Projektideen im Rahmen des Programms ESöV 2050 oder bei anderen Förderstellen, wie bspw. Innosuisse.

Tabelle 22: Übersicht der ausgewählten Projektideen für weitere Forschungsarbeiten

Projektidee / Massnahme	Kurzbeschreibung
1. Türluftschleier	Türluftschleier können einen positiven Einfluss auf die Energieeffizienz und den thermischen Komfort in Fahrzeugen nehmen. Für die Anwendung im Bus wurde der Effekt von Türluftschleibern bereits getestet und in 7 Fahrzeugen der PostAuto AG umgesetzt. Die Adaptierbarkeit auf andere Verkehrsmittel (bspw. in Zügen) soll überprüft und das System weiterentwickelt werden.
2. Individualisierte Klimatisierung	Eine individualisierte Klimatisierung kann durch verschiedene Massnahmen erfolgen, bspw. personalisierte Luftauslässe an den Sitzen, körpernahe Heiz- und Kühlsysteme. Durch die Anwendung solcher Massnahmen könnte der thermische Komfort im öV gesteigert werden. Doch sind diese Systeme auch umsetzbar (Kosten - Nutzen - Verhältnis, Installations- und Wartungsaufwand etc.) und wie würden sich solche Massnahmen auf die Energieeffizienz auswirken?
3. Optimierung der thermischen Fahrzeughülle	Die grössten Schwachstellen der thermischen Fahrzeughülle (thermisch und energetisch) sollen identifiziert werden und eine Betrachtung über das gesamte Jahr (Sommer - Winter) erfolgen. Bestehende Themen, wie die Luftdichtigkeit der Hülle, Wärmebrücken, sommerlicher Wärmeschutz oder die Optimierung der Fahrzeugtüren sollen aufgezeigt werden, aber mit neuen Lösungsansätzen ergänzt werden. Optional könnten auch technische Lösungen, wie bspw. der Einsatz von PV an der Fahrzeughülle, betrachtet werden.

<p>4. Einsatz von elektrochromen Gläser im öV</p>	<p>Durch Elektrochrome Gläser können Wärmelasten im Sommer reduziert werden (sommerlicher Wärmeschutz, verdunkeln der Gläser), gleichzeitig werden Wärmegewinne im Winter nicht eingeschränkt. Im Gebäudebereich finden elektrochrome Gläser bereits Anwendung. Der Einsatz im öV könnte mit Blick auf die thermische Behaglichkeit sowie Energieeffizienz Vorteile bieten, bringt aber auch Herausforderungen mit sich (Erschütterungen, Kosten-Nutzen, etc.).</p> <p>Eine Weiterentwicklung von elektrochromen Gläsern auf die Anforderungen und Bedürfnisse im öV soll im Rahmen dieses Projekts betrachtet werden.</p>
<p>5. Qualitativer Behaglichkeitsleitfaden öV/CH</p>	<p>Mit dem Behaglichkeitsleitfaden soll ein Kompendium zum Thema thermische Behaglichkeit geschaffen werden. Hierbei soll auf bestehenden Erkenntnissen, Projekten und Studien aufgebaut werden und eine einheitliche Grundlage bereitgestellt werden, die auch die Themen Energie und Kosten mit einbezieht.</p> <p>Eine Differenzierung zwischen Fahrzeugtypen, Verweildauern, Einsatzgebieten, der Kundschaft (Pendler, Freizeit, Touristen...) und deren Anforderungen wird durchgeführt. Des Weiteren wird eine Gap-Analyse bisheriger Erkenntnisse erstellt: Was weiss man schon, was fehlt? Am Ende der Studie soll eine Bewertungsmatrix zur Verfügung stehen, die Handlungsfelder (HLK, Licht, Material, etc.) vs. Wirkung (Energie, Kosten) gegenüberstellt und mögliche Synergien aufzeigt.</p>

Fazit

Am Workshop konnten diverse Akteure der Branche zusammengebracht werden, wobei eine hohe Motivation zur Teilnahme sowie ein starkes Interesse an der Weiterentwicklung von Projektideen erkennbar war. Einige der diskutierten Projektideen bestehen dabei bereits seit längerem, dazu gehört bspw. der Einsatz von Wärmepumpen im öV, Abluftwärmerückgewinnung oder Massnahmen der Fahrzeughülle (u.a. hocheffiziente Dämmungen, elektrochrome Gläser...). Eine Anwendung dieser Massnahmen im öV ist jedoch im Moment eher selten. Neben bekannten Massnahmen wurden aber auch neue Themenfelder eruiert, wie bspw. Massnahmen zur individualisierte Klimatisierung. Deren Anwendbarkeit im öV ist zunächst zu prüfen und entsprechend weiterzuentwickeln. Ebenso gilt es Kosten und Nutzen ins Verhältnis zu setzen, Potentiale / Chancen sowie Herausforderungen / Risiken und weitere Aspekte zu betrachten.

Das Potential zur Steigerung von Energieeffizienz und Komfort in den verschiedenen Fahrzeugen ist gegeben. Dabei bestehen oft Synergien zwischen Energie und thermischer Behaglichkeit, nur bei wenigen der betrachteten Massnahmen konnten Diskrepanzen festgestellt werden (bspw. bei Temperaturanpassungen im Innenraum). Hierbei gilt es die Balance zu finden. Des Weiteren ist die Umsetzbarkeit einiger der betrachteten Massnahmen zunächst zu prüfen.

8. Empfehlungen

Um den öffentlichen Verkehr künftig noch komfortabler und energieeffizienter zu gestalten, bedarf es das Zusammenwirken von diversen Akteuren. Nachfolgend werden Empfehlungen gegeben, wie das Bundesamt für Verkehr, Transportunternehmen und Hersteller, Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen, einen positiv Beitrag leisten können.

8.1 Empfehlungen für das BAV

Durch das Förderprogramm «Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)» hat das Bundesamt für Verkehr einen wichtigen Grundstein zur Weiterentwicklung der Branche gelegt. Diverse Projekte im Bereich Energieeffizienz sowie thermische Behaglichkeit wurden bereits gefördert, die Resultate stehen öffentlich zur Verfügung. Gefördert werden sowohl Projekte zur Umsetzung von Massnahmen aber auch zur Gestaltung der Rahmenbedingungen für die Branche.

Grundlagen schaffen

Im Rahmen der Studie ist aufgefallen, dass eine Vielzahl von Massnahmen zur Steigerung des Komforts sowie der Energieeffizienz bereits bekannt sind und immer wieder thematisiert werden. Den Akteuren der Branche sollten Grundlagen und Hilfsmittel (Checklisten, einfache Tools etc.) zur Verfügung gestellt werden, um als Besteller, Hersteller oder Zulieferer die richtigen Entscheidungen treffen zu können. Beispielsweise haben sich verschiedene Interviewpartner/innen einen Leitfaden zur thermischen Behaglichkeit gewünscht, wo die wichtigsten Aspekte und Massnahmen übersichtlich abgebildet sind. Bei den Massnahmen sollte neben dem thermischen Komfort auch der Einfluss auf die Energieeffizienz, die Umsetzbarkeit sowie die Kosten berücksichtigt werden.

Weitere Themenfelder, welche mehrfach erwähnt wurden, waren u.a. Grundlagen zu den Energieflüssen in Fahrzeugen (Wo geht wie viel Energie verloren, wo sind die grössten Schwachstellen / Hebel) oder die Fragestellung, wie ein thermisch optimiertes Fahrzeug der Schweiz aussehen würde. Der Bedarf an entsprechenden Grundlagen / Hilfsmitteln ist erkennbar.

Netzwerk und Erfahrungsaustausch

Der Erfahrungsaustausch zwischen Akteuren sowie der Aufbau eines Netzwerks in der Branche ist essenziell, um die Entwicklung voranzutreiben. Ein- bis zweimal pro Jahr sollten entsprechende Treffen organisiert und mit Vorträgen sowie Workshops gestaltet werden. Gemeinsam sollten Projektideen diskutiert und Erfahrungen mit neuen Systemen und Lösungen ausgetauscht werden. Zusätzlich könnte der Aufbau einer Wissensplattform hilfreich sein. Diese sollte einen einfachen Zugang zu Dokumenten und Grundlagen gewährleisten, zu neuen Entwicklungen in der Branche informieren sowie einen Erfahrungsaustausch zwischen den Akteuren der Branche zulassen.

Das Interesse seitens der Branche an einem regelmässigen Austausch und Netzwerkveranstaltungen ist gegeben. Dies hat auch die hohe Teilnehmerzahl am Workshop im Rahmen dieses Projektes gezeigt, andererseits wurde ein entsprechender Wunsch auch direkt geäussert.

Gesetzliche Regulatorien

Bestehende Normen und Richtlinien im Bereich der thermischen Behaglichkeit sind für die einzelnen Fahrzeugtypen vorhanden. Werden diese befolgt, kommt es i.d.R. kaum zu Beschwerden seitens Fahrgäste (Anteil unzufriedener < 5 %), dies wurden in diversen Interviewgesprächen mehrfach bestätigt. Mit Blick auf die Energieeffizienz gibt es derzeit jedoch nur wenige Vorgaben. Durch das Festhalten von Empfehlungen oder (verbindliche) Vorgaben zur Umsetzung von Energieeffizienzmassnahmen könnte deren Anwendung künftig gefördert werden. Empfehlungen / Vorschriften können erstellt werden für die Ausschreibung / Neubeschaffung von Fahrzeugen, einen energieeffizienten Betrieb der Fahrzeuge sowie Refit-Massnahmen. Werden energieeffiziente Systeme künftig häufiger angewendet und standardisiert, werden sich auch die Beschaffungskosten für solche Systeme anpassen (im Moment sind Systeme, wie bspw. Wärmepumpen, noch Sonderlösungen und dadurch teuer).

Entsprechende Empfehlungen / Vorgaben sollten in Zusammenarbeit mit Transportunternehmen und Herstellern entwickelt und dokumentiert werden.

Kommunikation

Die Verbreitung und Kommunikation neuer Projektergebnisse und Entwicklungen ist ein wichtiger Faktor und sollte eine zentrale Rolle einnehmen. Diesbezüglich können Veranstaltungen, regelmässige Netzwerktreffen, online Plattformen etc. genutzt werden. Wichtig ist, dass Resultate zielgruppengerecht aufbereitet werden und die wichtigsten Informationen übersichtlich dargestellt werden.

8.2 Empfehlungen für Transportunternehmen und Hersteller

Transportunternehmen

Grundsätzlich kann zu drei Zeitpunkten ein wesentlicher Einfluss auf den späteren Komfort und die Energieeffizienz von Fahrzeugen genommen werden. Dies betrifft die Bestellung neuer Fahrzeuge, den Betrieb des Fahrzeugs sowie Refit-Massnahmen.

Dabei sollten primär Massnahmen umgesetzt werden, welche hinsichtlich Umsetzbarkeit, Optimierungspotential (thermisch, energetisch, qualitativ) sowie Lebenszykluskosten (Investitions- und Betriebskosten). Basis der Entscheidung sollte eine Gesamtstrategie hinsichtlich Energie und Komfort sein und den gesamten Lebenszyklus betreffen (Erstellung, Betrieb, Refit, Rückbau / Wiederverwendung / Entsorgung). Entsprechendes Wissen gilt es intern aufzubauen, Personal zu schulen und Weiterbildungen zu fördern. Alternativ können auch externe Fachexperten bei Planungsentscheidungen frühzeitig hinzugezogen werden.

Betrieb der Fahrzeuge

Neue Fahrzeuge: Energiemonitoring durchführen, Kundenkomfort abholen (Reklamationen bearbeiten, Umfragen und Komfortmessungen durchführen), Betriebsoptimierungsmassnahmen vornehmen (primär Anpassung von Einstellungen an den Komponenten und an der Steuerung)

Refit von Fahrzeugen: Massnahmen zur Steigerung von Komfort und Energieeffizienz vornehmen, einfach realisierbare Massnahmen mit hohem Potential sind zu bevorzugen (Umsetzbarkeit, Kosten, Nutzen etc. sind zu prüfen, typische Massnahmen sind bspw. CO₂-Regelung der Lüftung, Optimierung der Fenster).

Umsetzung von Massnahmen vorantreiben

Ebenso sollte die Umsetzung und Weiterentwicklung von Energieeffizienz und Komfortmassnahmen gefördert werden. Viele Massnahmen sind bekannt und werden seit längerem diskutiert, bspw. der Einsatz von Wärmepumpen im öV. Zur Anwendung kommen dies jedoch kaum oder gar nicht. Bestehende Herausforderungen zur Realisierung von Energieeffizienz- und Komfortmassnahmen gilt es zu beheben, entsprechende Lösungen für die Fahrzeuge des öV zu entwickeln und deren Funktionsfähigkeit aufzuzeigen. Denn um die Akzeptanz für neue Massnahmen und Systeme zu fördern, müssen sich diese zunächst bewähren, um allfällige Zweifel zu eliminieren.

Nachfrage gestaltet das Angebot

Die Nachfrage nach Komponenten und Systemen mit einer hohen Energieeffizienz sollte gesteigert werden. Dadurch könnten Systeme, wie der Einsatz von Wärmepumpen im öV, künftig zu Standardlösungen werden. Im Moment sind solche Anfragen eher Sonderfälle, wodurch motivierte Unternehmen mit hohen Kosten rechnen müssen. Eine steigende Nachfrage nach energieeffizienten Systemen seitens Branche könnte das Angebot entsprechend verändern und diese wirtschaftlich machen.

Hersteller und Zulieferer

Hersteller nehmen eine wichtige Rolle bei der Entwicklung und Gestaltung der Branche ein. Um die Ziele der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050) zu erreichen, müssen die beteiligten Akteure ihre Produkte nicht nur hinsichtlich Funktionalität, Kosten, Platzbedarf, Gewicht und Zuverlässigkeit, sondern auch betreffend Energieeffizienz weiterentwickeln.

8.3 Empfehlungen für Forschung und Entwicklung

Grundlagen bereitstellen

In Forschung und Entwicklung können mittels Messungen, Simulationen und Berechnungen, Analysen und Bewertungen wichtige Grundlagen und Daten für Weiterentwicklungen in der Branche geliefert werden. Dabei ist eine enge Zusammenarbeit mit Transportunternehmen, Herstellern sowie weiteren Praxispartnern unabdingbar.

Diese Studie sowie auch der «Synthesebericht - Energieeffizienz im Bereich HLK und Fahrzeughülle im öV» [1] liefern eine Übersicht über Massnahmen und Konzepte, um den öffentlichen Verkehr komfortabler und energieeffizienter zu gestalten. Neben bestehenden Konzepten bei Bus, Bahn und Tram konnten ebenso weitere Ansätze aus der Automobil- und Flugzeugindustrie zusammengetragen werden. Eine erste Einschätzung zur Übertragbarkeit dieser Massnahmen befindet in Abschnitt 6.4. Auch wurde die Übertragbarkeit von Massnahmen aus dem Gebäudebereich diskutiert (Abschnitt 6.3).

Ausgehend von diesen beiden Studien wurde eine Vielzahl von Projektideen zusammengetragen, woran weitere Forschungsarbeiten ansetzen können.

9. Fazit und Ausblick

Diese Studie stellt ein Kompendium zur Thematik der thermischen Behaglichkeit im öffentlichen Verkehr dar. In einem ersten Schritt wurde eine Übersicht über bestehende Massnahmen, Konzepte und Strategien in den Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs (Bus, Bahn, Tram) geschaffen. Die Recherchen wurden ebenso auf andere Verkehrsmittel (Automobil und Flugzeug) ausgeweitet und deren Übertragbarkeit diskutiert. Eine Übersicht über bestehende Normen und Richtlinien wurde geschaffen sowie deren Anforderungen auf die verschiedenen Fahrzeugtypen verglichen.

Die Interviewgespräche wurden dazu genutzt herauszufinden, wie die verschiedenen Akteure der Branche (Transportunternehmen, Fahrzeughersteller, Zulieferer, Test- und Forschungseinrichtungen sowie Designer) mit den bestehenden Regulatorien im Bereich der thermischen Behaglichkeit umgehen. Ebenso konnte eine Übersicht geschaffen werden, welche Massnahmen, Konzepte und Strategien aktuell in den verschiedenen Fahrzeugen des öV umgesetzt werden. Bestehende Forschungslücken wurden eruiert und weitere Projektideen zusammengetragen.

Basierend auf den zuvor beschriebenen Recherchetätigkeiten sowie den Interviewgesprächen konnte eine hohe Anzahl an Projektideen zusammengetragen werden. Einige dieser Projektideen, welche im direkten Zusammenhang mit den Themen Komfort und Energieeffizienz stehen, wurden ausgewählt und im Rahmen eines Workshops mit Fachexperten aus Praxis und Forschung diskutiert. Die Resultate wurden grafisch aufbereitet und die gängigsten Komfort- und Energiemassnahmen bewertet und gegenübergestellt. So ist schnell zu erkennen, welche Massnahmen einfach umzusetzen sind, einen hohen Einfluss auf die Energieeffizienz haben oder den thermischen Komfort deutlich steigern können. Dies gibt interessierten Personen die Möglichkeit eine Auswahl an Massnahmen unter eigenen Kriterien zu treffen. Auffallend war, dass viele der bewerteten Massnahmen sowohl auf die thermische Behaglichkeit als auch die Energieeffizienz einen positiven Einfluss haben können (bspw. Massnahmen der thermischen Hülle oder eine individualisierte Klimatisierung).

Im Rahmen des Workshops wurden 5 Projektideen evaluiert, welche in einem nächsten Schritt für die Eingabe beim Programm ESöV 2050 vorbereitet werden. Dazu gehörten:

- Einsatz von Türluftschleiern
- Individualisierte Klimatisierung
- Optimierung der thermischen Fahrzeughülle
- Einsatz von elektrochromen Gläsern im öV
- Qualitativer Behaglichkeitsleitfaden öV/CH

Weitere Projektideen zu Massnahmen, Konzepten und Strategien hinsichtlich Energieeffizienz und thermische Behaglichkeit sind in dieser Studie aufgeführt und sollten ebenso weiter untersucht werden (bspw. der Einsatz von Wärmepumpen im öV). Die meisten Projektideen / Massnahmen sind dabei bereits seit längerem bekannt. Eine Weiterentwicklung sollte vorangetrieben werden, da viele diese Ideen einen positiven Beitrag zur Erreichung der Ziele der Energiestrategie im öffentlichen Verkehr 2050 (ESöV 2050) leisten können und als Teil einer Gesamtstrategie fungieren können.

Um die Entwicklung in der Branche voranzutreiben und den öffentlichen Verkehr zukünftig noch komfortabler und energieeffizienter zu gestalten, ist es wichtig, dass die Zusammenarbeit zwischen allen Beteiligten weiter intensiviert, das vorhandene Wissen geschärft und neues Wissen generiert wird. Regelmässige Veranstaltungen können dabei helfen Akteure zu vernetzen, Erfahrungen auszutauschen und neue Projektideen / Massnahmen im Rahmen von Präsentationen vorzustellen.

10. Literaturverzeichnis

- [1] F. Sidler, U.-P. Menti, M. Niffeler, S. Büttner, „Synthesebericht - Energieeffizienz im Bereich HLK und Fahrzeughülle im öV,“ 2021.
- [2] G. Haller, „Thermische Behaglichkeit in Schienenfahrzeugen,“ rta Rail Tec Arsenal, Wien, 2006.
- [3] W. M. W. Kai Schild, Wärmeschutz - Grundlagen - Berechnung - Bewertung, 2011.
- [4] Europäische Norm, *EN ISO 7730: Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD- Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit.*, 2005.
- [5] SIA, „Norm 180 "Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden",“ Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2014.
- [6] SIA, „Merkblatt 2024 "Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik",“ Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2015.
- [7] P. O. Fanger, Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering, 1982.
- [8] C. Z. a. T. Frank, Bauphysik, 5. vdf Hochschulverlag AG, 2018.
- [9] B. Flieger, „Innenraummodellierung einer Fahrzeugkabine in der Programmiersprache Modelica,“ Technische Hochschule Aachen, 2013.
- [10] S. F. Y.-M. P. A. D. J. Steven Brown, „Comparitive analysis of an automotive air conditioning systems operating with CO2 and R134a,“ International Journal of Refrigeration, USA, 2001.
- [11] C. B. Holger Großmann, Pkw-Klimatisierung - Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung, 2020.
- [12] Wenning, „Temperaturgeführte Transporte im Luftverkehr,“ Delvag Luftversicherungs AG, Köln, 2022.
- [13] D. Scholz, „Flugzeugsysteme - 2. Klimaanlage,“ MSME - Flugzeugsysteme, HAW Hamburg.
- [14] B. M. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), „Aerogele und Aerogelverbundwerkstoffe,“ [Online]. Available: https://www.dlr.de/wf/desktopdefault.aspx/tabid-9788/16788_read-40746/. [Zugriff am 18 07 2022].
- [15] S. D. G. S. S. B. Janine Stampfli, „Bereit für den Klimawandel? Handlungsempfehlungen für Bauherrschaften und Planende,“ 2021.
- [16] Q. Zhou, *Thermal comfort in vehicles*, 2013.
- [17] C. Schmidt, D. Wölki und C. A. van Treeck, Definition einer „Äquivalenten Kontakttemperatur“ als Bezugsgröße zur Bewertung der ergonomischen Qualität von kontaktbasierten Klimatisierungssystemen in Fahrzeugen, 2018.
- [18] J. A. Udo Wehner, „Neue Ansätze zur Klimatisierung von Elektrofahrzeugen,“ 2011.
- [19] Q. Z. Juli Fan, „A Review about Thermal Comfort in Aircraft,“ 2019.
- [20] D. Schmeling, „Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR),“ [Online]. Available: https://www.dlr.de/as/desktopdefault.aspx/tabid-4702/7791_read-66988/. [Zugriff am 18 07 2022].
- [21] V. T. Bartels, „Thermal comfort of aeroplane seats: influence of different seat materials and the use of laboratory test methods,“ 2003.
- [22] K. Portal, „Reduzierter Triebwerkseinsatz - Reduzierte Emissionen,“ [Online]. Available: <https://www.klimaschutz-portal.aero/verbrauch-senken/am-flughafen/reduzierter-triebwerkseinsatz/>. [Zugriff am 18 07 2022].
- [23] E. Norm, *EN 13129*, 2006.
- [24] E. Norm, *EN 14750-1*, 2006.
- [25] V. d. Verkehrsunternehmen, *VDI-Schrift 236*, 2018.
- [26] C. Isenschmid, „Potentialanalyse für Verbesserung der Wärmedämmung bei der Fahrzeugaussenhülle,“ 2018.
- [27] R. K. J. S. Nadège Vetterli, „Temperatursenkung im S-Bahnverkehr der SBB,“ Hochschule Luzern Technik & Architektur, Institut für Gebäudetechnik und Energie, 2018.

- [28] F. I. M. G. Geoffrey Klein, „Energieeinsparung im Trambetrieb bei verschiedenen Innenraum - Quantifizierung und Flottenerfahrungen,“ VBZ Verkehrsbetriebe Zürich, 2023.
- [29] N. L. S. F. M. E. Martin Konz, „Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge,“ 2011.
- [30] B. Bolliger, „Energieeffizienz: Die SBB testet Temperaturabsenkung in Zürcher S-Bahn,“ [Online]. Available: <https://news.sbb.ch/artikel/72883/energieeffizienz-die-sbb-testet-temperaturabsenkung-in-zuercher-s-bahn>. [Zugriff am 18 12 2020].
- [31] C. R. S. H. F. S. H. Douglas, „An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks,“ 2015.
- [32] R. P. P. B. J. P. P. A. González-Gil, „A systems approach to reduce urban rail energy consumption,“ 2014.
- [33] C. Peckham, „Improving efficiency of traction energy use,“ 2007.
- [34] U.-P. M. F. S. E. T. G. Z. N. Vetterli, „Energy efficiency of railway vehicles,“ 2015.
- [35] X. Tackoen, „Quick Wins - Reducing energy consumption in public transport,“ 2013.
- [36] F. Sidler, „Simulation Energiebilanz Heizung Lüftung Klima: ICN (SBB),“ 2019.
- [37] P. O. e. al., „Energieeffizienz von HLK im öffentlichen Verkehr,“ 2015.
- [38] L. E. G. B. P. G. C. G. A. F. R. D. L. Vollaro, „Bus for Urban Public Transport: Energy Performance Optimization,“ 2014.
- [39] J. A. M. K. R. Hofstadter, „Energy Optimal Control of Thermal Comfort in Trams,“ 2018.
- [40] A. Tonin und P. Oelhafen, „Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im öffentlichen Verkehr,“ 2018.
- [41] W. S. G. Richter, „EcoTram – Evaluierung von Energiesparmaßnahmen bei Straßenbahnen unter realen Betriebsbedingungen,“ 2014.
- [42] Europäische Norm, *EN 14813-1*, 2011.

11. Anhang

11.1 Interviewleitfaden und Rückmeldungen

Forschungsfrage: Wie werden die Vorgaben an den thermischen Komfort in Ihrem Unternehmen verstanden, behandelt und in den verschiedenen Fahrzeugtypen umgesetzt?

Einstiegsfrage

Mit welchem/m Fahrzeugtyp(en) beschäftigen Sie sich?

- X Bus (Inkl. Elektrobusse und Trolleybusse)
- X Bahn
- X Tram
- X Auto
- X Flugzeug
- o Schiff
- o Seilbahn
- o Sonstige: _____

Schlüsselfragen

1. Inwiefern ist in dem Unternehmen, in dem Sie arbeiten, bzw. bei Ihren Tätigkeiten das Thema «Thermische Behaglichkeit» von Bedeutung?

Mögliche Rückfragen:

Welchen Stellenwert hat das Thema der thermischen Behaglichkeit in Ihrer täglichen Aktivität? Was wird bei Ihnen unter thermischer Behaglichkeit verstanden, wo liegt ihr Fokus (Lufttemperatur, Luftfeuchte etc.)?

Antworten zu Frage 1:

Das Thema der thermischen Behaglichkeit ist sowohl für Transportunternehmen als auch für Hersteller von Bedeutung, da dies im direkten Zusammenhang mit der Kundenzufriedenheit und somit auch mit der Akzeptanz der Produkte steht. Dabei wird sich i.d.R. an den Anforderungen der Normen für die verschiedenen Fahrzeugtypen orientiert. Z.T. gehen die Transportunternehmen auch über die Anforderungen der Normen hinaus (bspw. höhere Oberflächentemperaturen / bessere Dämmeigenschaften der thermischen Hülle).

Dabei gilt es aber auch zu beachten, dass der thermischer Komfort nur ein Teilbereich des Zusammenspiels verschiedenster Faktoren der Empfindungen der Nutzenden ist, wie z.B. Lufthygiene, Lärm, Sauberkeit, gestalterische Aspekte, Materialeinsatz, Gestaltung und Helligkeit etc. Dies gilt es ebenso zu berücksichtigen.

Schienenverkehr

Dabei liegt der Fokus insbesondere auf der Bereitstellung der Sollwerte der Lufttemperatur. Die Luftfeuchte ist weniger eine Regelgrösse / wird nur vereinzelt (subjektiv) berücksichtigt. Da die Aussenluft über die Klimaanlage zugeführt wird, kann es sein, dass die Luftfeuchte insbesondere im Winter in den Fahrzeugen recht niedrig ist. Im Sommer wird die Luft durch die Klimatisierung etwas entfeuchtet. Luftgeschwindigkeit (keine Zugluft) und Oberflächentemperaturen (vermeiden von kalten Oberflächen, insbesondere im Fernverkehr) sind ebenso von zentraler Bedeutung.

Bus

Auch bei diesem Transportmittel liegt der Fokus insbesondere auf der Bereitstellung der Sollwerttemperatur. Luftgeschwindigkeiten werden auch berücksichtigt. Der Luftfeuchte wird Beachtung geschenkt, wenn es zur Kondensatbildung im Fahrzeug (bspw. an Scheiben und kalten Komponenten) kommt – Da die meisten Busse mittlerweile mit Klimaanlage ausgestattet sind, tritt dieses Problem nur noch selten auf. Oberflächentemperaturen stehen i.d.R. nicht im Fokus.

Flugzeug

Der thermische Komfort ist besonders wichtig. Die Flugbesatzung – insbesondere der Pilot – darf keinem Hitze- oder Kältestress ausgesetzt sein, da dies die Sicherheit im Flugbetrieb beeinflussen kann. Für die Passagiere ist es wichtig einen angenehmen und komfortablen Flug zu garantieren. Es ist somit wichtig, dass die Temperaturumgebung für die menschliche Tätigkeit geeignet und sicher ist. Dies ist auch für den Verkauf der Flugzeuge essenziell.

Forschung

In der befragten Forschungseinrichtung liegt der Schwerpunkt auf der energieeffizienten Gewährleistung der thermischen Behaglichkeit. Diesbezüglich wird insbesondere die lokale, personalisierte Klimatisierung betrachtet und die thermische Behaglichkeit bewertet. Die befragte Institution beschäftigt sich vor allem mit der personalisierten Klimatisierung im Individualverkehr.

2. Welche Konzepte / Strategien werden angewendet, um die thermische Behaglichkeit in den Fahrzeugen sicherzustellen? (Beispiele: Dämmung der Fahrzeughülle, bessere Fenster, HLK-Massnahmen, zonenweise Konditionierung, personalisierte Klimatisierung etc.)

Mögliche Rückfragen:

Wie werden diese umgesetzt?

Können Sie hier Beispiele nennen?

Antworten zu Frage 2:

Konzepte / Strategien umfassen sowohl die thermische Hülle als auch die HLK-Massnahmen. Nachfolgend sind die Rückmeldungen zusammengefasst. Dabei ist es wichtig, nicht nur auf einzelne Massnahmen zu fokussieren, sondern ein Gesamtkonzept anzustreben, so dass ein gewisses Optimum in Bezug auf den erzielbaren Komfort, den Energiebezug und die fahrzeugtechnischen Randbedingungen und -grenzen sowie Wirtschaftlichkeit im Sinne der eingesetzten Kosten bei Beschaffung und im LifeCycle erreicht werden kann.

Schienenverkehr

Thermische Hülle der Fahrzeuge:

- Typischerweise wird sich an den Anforderungen der Normen orientiert, d.h. an den Vorgaben hinsichtlich der U-Werte der Fahrzeughülle und den max. Abweichungen der Temperatur der inneren Oberflächen (ΔT) von dem Mittelwert der Raumtemperatur.
- Teilweise werden von den einzelnen Betreibern aber auch erhöhte Anforderungen an die thermische Hülle und die Dämmmaterialien gestellt (bspw. besserer U-Wert der Fenster / opaken Bauteile). Dabei ist aber immer die Balance zu finden zwischen Energie, Platzbedarf & zusätzlichem Gewicht.
- Eine durchgängige Isolierung und luftdichte Bauweise wird angestrebt (prüfen via «Blower Door Test»).
- Gute Abschottung der Einstiegstüren, Abteiltüren, Wagen-Übergangstüren, um unangenehme Zuglufterscheinungen zu vermeiden.
- Zur Vermeidung von Überhitzungen im Sommer werden Dachfenster von Zügen z.T. mit Sonnenschutzfolien ausgestattet oder bei grossen Fensterflächen Sonnenstoren eingesetzt.
- Bei älteren Fahrzeugen ist eine Nachrüstung / Refit meist mit sehr hohem Aufwand & Kosten verbunden. Hier werden alternativ eher Massnahmen im HLK-Bereich umgesetzt.

HLK-Anlagen:

- Üblicherweise: Aufdachanlagen (ca. 80 %), da meist kein anderer Platz für die Klimaanlage zur Verfügung steht (im Unterflurbereich). Bei Doppelstockzügen u.a. mit Schrankgeräten (insbesondere in der Schweiz).
- Auslegung der Anlagen erfolgt anhand der Design-Punkte der entsprechenden Norm.
- Entweder wird die gesamte Leistung für Heizen & Kühlen über das Klimagerät (Luft) zugeführt. Alternativ kann die Leistung aber auch aufgeteilt werden: Gerade beim Heizen kann dies sinnvoll sein. Dabei wird dann bspw. 1/3 der Luft über die Decke und 2/3 der Luft über die

Seitenwand- & Fussbodenheizer (Fenster & Fussbereich) eingeblasen. Bei der Kühlung macht es am meisten Sinn die gesamte Luftmenge im Deckenbereich zuzuführen (kalte Luft sinkt nach unten).

- Die Zuluft-Kanalsysteme müssen gleichmässig verteilt werden, um partiell zu hohe Luftgeschwindigkeiten zu vermeiden.
- Die Fortluft wird i.d.R. im Fussbodenbereich (kanalgeführt) oder ohne Kanal an den Wagenenden abgeführt. Bei Strassenbahnen & Nahverkehrsfahrzeugen tritt die Luft meist einfach über statische Ablüfter nach aussen, da man einen Überdruck im Fahrzeug hat. Bei Hochgeschwindigkeitsfahrzeugen werden Fortluftgerät eingesetzt, damit man die Luft auch bei hohem Aussendruck aus dem Fahrzeug bringt.
- Welches HLK-Konzept gewählt wird, ist primär vom Fahrzeugbetreiber abhängig.
- Regelmässige Wartung der HLK-Systeme, um Ausfälle zu vermeiden.
- Leistungsfähigkeit der HLK-Systeme sowie Ausführung der Klimaanlage (Luftverteilung, Regulierung, Klimageräte, Sensoren, Grund- und Zusatzheizsysteme usw.) gilt es zu beachten.
- Der Einsatz einer Wärmerückgewinnung (WRG) im öV ist im Moment nicht Standard. Hier gingen die Meinungen auseinander: Einige Interviewteilnehmer sehen eine WRG in unseren Regionen (d.h. Schweiz, Österreich, Deutschland...) als weniger effizient an. In anderen Klimazonen mit höheren Temperaturdifferenzen könnte diese Massnahme einen höheren Energiegewinn leisten (bspw. Skandinavien oder Saudi-Arabien). Andere sehen eine WRG als durchaus sinnvoll an, auch in unseren Klimazonen. Ebenso könnte die WRG bei batteriebetriebenen Fahrzeuge an Bedeutung gewinnen (Effizienzsteigerung), um die Reichweite zu optimieren.
- Einbau einer CO₂-Regelung bei der Klimaanlage, um die Frischluftmenge in Abhängigkeit vom Besetzungsgrad zu steuern (einfach umsetzbar und amortisiert sich schnell).
- Betriebsoptimierte Regelung: dynamisch geregelte Heiz- und Kühlsysteme können sich positiv auf die Energieeffizienz auswirken, finden derzeit jedoch noch keine breite Anwendung. Statische Regelungen sind immer noch die Regel.
- Bereitstellung der Fahrzeuge am Morgen: Aus energetischen Gründen werden die Wagen in der Nacht nicht beheizt (HLK in den Schlummermodus, Achtung: Frostschutz sicherstellen!). Die Aufheizphase beginnt ca. 1 h vor der Bereitstellungszeit, sodass der thermische Komfort im Betrieb garantiert ist.
- Massnahmen wie Fussboden- & Seitenheizungen können mit Blick auf die thermische Behaglichkeit durchaus sinnvoll sein, allerdings sind diese Systeme beim Einbau z.T. anspruchsvoll (bspw. bei einer Bodenbefestigung der Bestuhlung). Ebenso sind die Systeme meist schlecht zugänglich, was die Wartung und Instandhaltung erschwert. Auch brandschutztechnisch sind Flächenheizungen z.T. anspruchsvoll. Entsprechend werden diese Systeme im öV bisher nur vereinzelt eingesetzt.
- Warme Luftvorhänge (Türluftschleier) bei den Ein-/Ausstiegstüren, um die Zugluft zu reduzieren.
- Einbau von Wärmepumpen wird derzeit nur vereinzelt umgesetzt. Das Problem bei Wärmepumpensystemen ist dabei meist, dass man sehr schnell eine hohe Leistung zur Verfügung hat, wenn man dann aber oft in Teillast fährt, bedarf das wieder viel zusätzliche Energie.
- Körpernahe und personalisierte Klimatisierung, wie es in der Automobil oder Flugzeugindustrie häufig angewendet wird, könnten mit Blick auf die thermische Behaglichkeit interessant sein, aber solche Systeme bringen auch neue Herausforderungen mit sich:
 - höher Installationsaufwand, zusätzliches Gewicht
 - regelungstechnisch anspruchsvoller
 - höherer Wartungs- und Instandhaltungsaufwand
 - Personalisierte Klimatisierung: Bei einer Wagenklimatisierung kommt die Luft gleichmässig in den Raum mit einer geringeren Geschwindigkeit. Bei einem kleinen personalisierten Auslass hat man oft viel höhere Luftgeschwindigkeiten & eine höhere Lärmbelastung. Ebenso ist die Reinigung (Hygiene) und Wartung der Anlagen aufwendiger. In Fahrgastwagen werden diese Systeme deshalb aktuell nicht angewendet, in Führerständen hingegen ist eine personalisierte Klimatisierung durchaus sinnvoll und wird bereits umgesetzt.
 - Sitzheizungen maximal im Fernverkehr und bei Premiumzügen denkbar: Was passiert, wenn der Fahrgast aussteigt? Wie steht es um die Brandgefahr? Ist diese Massnahme energetisch sinnvoll? Wenn der Fahrgastraum gut temperiert ist, dann werden körpernahe Heiz- und Kühlsysteme als überflüssig eingeschätzt.

Dieses Thema müsste zunächst umfangreich betrachtet werden.

Weitere Massnahmen:

- Abteilung von Fahrgastabteilen durch Türen, um beim Fahrgastwechsel die Zugluft zu reduzieren.
- Einsatz von Ambiente-Beleuchtung: Lichtfarben in Abhängigkeit von der Aussentemperatur, der Tageslicht-Farbtemperatur, der Tageszeit und Jahreszeit geregelt (kalt-weiss bis warm-weiss).
- Durch den Einbau von Luftionisationsgeräten kann die Luftqualität gesteigert und in Speisewagen Gerüche neutralisiert werden.

Bei der Wahl der Massnahmen muss grundsätzlich unterschieden werden zwischen Fahrzeugen für den Fernverkehr, in denen sich die Fahrgäste für eine längere Zeit aufhalten und sicher der Bekleidungsgrad ändert (bspw. Jacke ausziehen), und Fahrzeugen für den Nahverkehr, in denen sich die Fahrgäste nur für kurze Zeit aufhalten und der Bekleidungsgrad meist gleich bleibt. Dementsprechend sind auch die Anforderungen in den Normen für die unterschiedlichen Fahrzeugtypen definiert und entsprechend werden auch die Massnahmen gewählt.

Gebäude und andere Verkehrsmittel (bspw. die Automobilindustrie) sind hinsichtlich Konzepten / Strategien weit voraus, Massnahmen aus diesen Branchen gilt es auf ihre Anwendbarkeit im öV zu prüfen und wenn möglich, zu übertragen.

Bus

Bei den Bussen im städtischen Nahverkehr geht die Entwicklung immer mehr hin zum Einsatz von Elektrofahrzeugen. Dieselbusse werden nach und nach weniger eingesetzt. Von den Befragten wurden insbesondere die nachfolgenden Konzepte / Strategien genannt:

- An der thermischen Hülle wird mit Blick auf Isolierung kaum etwas gemacht. Hier geht es eher um den Schallschutz. Die dafür eingesetzten Materialien isolieren dann ohnehin auch ein wenig, auch wenn das nur ein Nebeneffekt ist.
- Laut Transportunternehmen wird wegen der Beschaffungskosten versucht, Standardfahrzeuge ab Stange zu kaufen. Dies ergibt auch Vorteile bei der späteren Ersatzteil-Verfügbarkeit. Auch wenn bekannt ist, dass die Fahrzeughülle meist schlecht isoliert ist. Isolation der Hülle gilt es dann bei den Ausschreibungen zu beachten / bewerten.
- Fenster sind entweder Einfachverglasungen oder bei Kundenwunsch Doppelverglasungen. Doppelverglasungen sind meist kostentechnisch nicht viel teurer und werden bevorzugt. Bei Elektrobussen spielt jedoch das Gewicht eine entscheidende Rolle, weshalb hier dann oft wieder Einfachverglasungen zum Einsatz kommen.
- Heizen und Kühlen erfolgt über warme / kalte Luft (Luftheizung), die über die Decke eingeblasen wird.
- Aufdachanlagen: alle E-Busse des befragten Herstellers werden eigentlich ausschliesslich über Wärmepumpen geheizt und gekühlt, was erfahrungsmässig problemlos funktioniert.
- Zudem setzt dieser Hersteller mittlerweile keine zusätzlichen Konvektionsheizkörper mehr im Fussbereich des Fahrgastraumes ein. Einzig im Fahrerbereich kommen diese noch zum Einsatz. Zudem wird hier auch noch eine zusätzliche Frontklimaanlage eingebaut.
- Umluftbetrieb der Klimaanlage, wenig Frischluft, um weniger heizen / kühlen zu müssen – dadurch hat es zwar eine höhere CO₂-Konzentration in der Luft, Beschwerden gab es aber noch keine. Da die Türen in regelmässigen Abständen zum ein- & aussteigen der Passagiere geöffnet werden, kommt ohnehin eine hohe Frischluftmenge in das Fahrzeug.
- Oder bedarfsgerechte Steuerung der Klimaanlage, d.h. in Abhängigkeit der Aussentemperatur, Betriebsort, Türöffnungen etc.
- Mit der Einführung und Inbetriebnahmen von Elektrobussen wird vermehrt auf eine Vorkonditionierung der Fahrzeuge gesetzt.

Bei batteriebetriebenen Fahrzeugen stellt insbesondere die Reichweite eine hohe Herausforderung dar. Muss im Sommer / Winter bei Extremtemperaturen geheizt / gekühlt werden, kann sich dies negativ auf die Reichweite auswirken (bspw. von 300 km auf nur noch 200 km). Diesbezüglich muss die Balance zwischen thermischer Behaglichkeit und Energie gefunden werden.

Innenraumdesign der Fahrzeuge

Das Design der Innenräume hat einen grossen Einfluss auf die Akzeptanz der Fahrzeuge seitens Fahrgast. Dabei kommen verschiedene Farb-, Material- oder Lichtkonzepte zum Einsatz. Dabei ist es wichtig, dass das Fahrzeug sich der entsprechenden Region anpasst: bspw. in Zürich wird eine Tram eher mit kalten Farben und im «grosstädtischem» Design gestaltet, während in Bern eher warme Farben, die an Sandstein erinnern, angewendet werden. Ebenso sind aber auch die Platzverhältnisse entscheidend. In Bergregionen bedarf es genügend Platz für Wintersportausrüstung oder beim Flughafentransfer für Grossgepäck.

Der Einsatz bestimmter Materialien, Farben und Lichtkonzepte kann aber ebenso das thermische Wohlbefinden unterstützen. Durch die optimale Gestaltung des Layouts kann neben den optischen Komponenten auch das physische z.B. das Wärme- und Kälteempfinden stark beeinflusst werden.

Flugzeug

Folgende Konzepte / Strategien wurden im Gespräch genannt:

- Wärmeschutz wird durch eine Kombination aus Flugzeugisolierung und Fensterdesign erreicht
- Bereitstellung geeigneter Heiz- und Kühlsysteme (pneumatisch und elektrisch)
- Schulungsflugzeuge: Ausstattung der Besatzung mit geeigneter Kleidung ausgestattet, welche vor allem für Situationen nach dem Schleudersitzabwurf, z. B. bei einer Notwasserlandung im Meer, geeignet ist.
- Anspruchsvoll ist es ein guter Komfort am Boden zu gewährleisten, insbesondere bei Aussen-temperaturen von ca. 50 °C.

Forschung

Folgende Aspekte wurden im Gespräch genannt:

- Der Fokus liegt bei der personalisierten Klimatisierung, insbesondere bei PKW's.
- Die Regelung erfolgt komfortbasiert
- Des Weiteren werden auch die Umgebungsflächen berücksichtigt und teilweise sogar temperiert
- Beim autonomen Fahren ist der Sitzplatz nicht zwingend einer Person zuzuordnen. Die Person kann sich im Fahrzeug bewegen, was bei der personalisierten Klimatisierung berücksichtigt werden muss

3. Welche Vorgaben (Normen, Richtlinien etc.) zum Thema «Thermische Behaglichkeit» sind für Ihren Tätigkeitsbereich relevant? Auf welchen Vorgaben basieren Ihre Lösungen?

Mögliche Rückfragen:

Welche Anforderungen stellen diese im Bereich der Fahrzeughülle?

Welche Anforderungen stellen diese im Bereich HLK?

Wie schätzen Sie die Qualität dieser Vorgaben ein?

Sind Ihnen weitere Vorgaben im Bereich thermische Behaglichkeit bekannt (bspw. international...)?

Antworten zu Frage 3:

Schienerverkehr

Zu den relevantesten Normen mit Blick auf die «thermische Behaglichkeit» gehören insbesondere:

- EN 13129 : 2016 (Fernverkehr)
- EN 14750 : 2006 (Nahverkehr)
- VDV-Schrift 181 – 183
- EN 14813 : 2011 (Führerstand)

Diese wurden bereits in Abschnitt 5.2 behandelt. Des Weiteren wurden noch das Merkblatt UIC 553 (Lüftung-, Heizung- und Klimatisierung von Reisewagen, als Pendant zur EN 13129, weltweit gültig), die VDI 632 hinsichtlich Hygienevorschriften, welche bei den Klimaanlagen anzuwenden sind sowie

die EN 50591 genannt, welche den Energieverbrauch von Klimaanlage regelt. Zudem ist derzeit gerade eine weitere Norm in Bearbeitung, die ISO 19659 «Bahnanwendungen - Heizung, Lüftung und Klimatisierung von Schienenfahrzeugen». Teil 1 & 2 sind bereits veröffentlicht, Teil 3 steht als Entwurf bereit.

Eines der befragten Transportunternehmen hat zudem zusätzliche eine eigene Richtlinie erstellt, welche Anforderungen an die thermische Hülle (U-Wert und Dämmmaterialien) der Fahrzeuge stellt. Die Bahngesellschaft transportiert Personen in verschiedenen Höhenlagen (m.ü.M.), sodass die Fahrzeuge z.T. extremen Wettersituationen ausgesetzt sein können. Zudem ist der Fensteranteil der Hülle besonders hoch. Da die thermische Behaglichkeit für dieses Unternehmen von hoher Bedeutung ist (80 % der Fahrgäste sind Touristen), haben sie eine eigene Richtlinie mit erhöhten Anforderungen an die Fahrzeughülle gestellt. Zudem werden bei der Auslegung der Klimatisierung ebenso die Extremwerte (Temperaturen Sommer / Winter) erweitert, welche die Normen für bestimmte Klimazonen vorgeben.

Bus

Bei dem Verkehrsmittel Bus wird i.d.R. die VDV-Schrift 236 angewandt. Die Norm ist eine gute Grundlage, jedoch mit grossem Spielraum. Bspw. ist das Thema Türöffnungen darin nicht berücksichtigt, obwohl dies für die Energieeffizienz und Behaglichkeit (Zugluft) durchaus wichtig ist.

Weitere Normen / Richtlinien sind die EN 14750 oder die EN 7730, diese kommen aber nur in seltenen Fällen zur Anwendung und sind den Befragten durch die Mitarbeit an Forschungsprojekten bekannt.

Flugzeug

Die Anforderungen an den thermischen Komfort sind in den entsprechenden Normen detailliert beschrieben. Dabei wird zwischen den Passagierzonen sowie dem Cockpit unterschieden. Die Systeme für das Cockpit haben eine doppelte Sicherheit.

Die Auslegung des thermischen Komforts wird dabei durch eine Reihe von Faktoren bestimmt: menschliche Faktoren, weltweite Umweltbedingungen einschliesslich der Höhe, kinetische Erwärmung des Flugzeugs im Flug (insbesondere bei militärischen Hochgeschwindigkeitsflugzeugen mehr als bei zivilen Unterschallflugzeugen), Sonneneinstrahlung, Wärmebelastung durch Systeme (z. B. Triebwerke, ECS und Avionik), etc.

Folgende Vorgaben, Richtlinien und Literaturreferenzen wurden im Gespräch genannt:

- ISA - International Standard Atmosphere
- Luftfahrtmedizinische Literatur, wie Ernsting's Aviation und Space Medicine
- Flugzeugkonstruktionsspezifikation
- Aircraft Environmental Handbook
- Allgemeine Anforderungen für die Anwendung von Dampfkreislauf-Kältesystemen für Flugzeuge ARP731C
- Verschiedene andere SAE-Normen für Umweltkontrollsysteme

Forschung

Folgende Vorgaben werden für die Forschungsarbeiten herangezogen: DIN EN 14505 (Äquivalenttemperatur), DIN 1946-3 (Klimatisierung), DIN 4108 (Gebäude), DIN EN 15251 (Eingangsparameter), DIN EN ISO 10551 (Nutzerbefragung). Die genannten Normen beziehen sich hauptsächlich auf den Individualverkehr.

Die EN 7730 wird ebenso herangezogen.

4. Wie werden diese technischen Anforderungen (Vorgaben) umgesetzt - bei der Beschaffung (u.a. von Fahrzeugen, Material oder Komponenten), dem Betrieb, beim Unterhalt?

Mögliche Rückfragen:

Wie wird der Aspekt der thermischen Behaglichkeit berücksichtigt, vor allem bei der Beschaffung und beim Betrieb?

Können Sie hier Beispiele nennen?

Antworten zu Frage 4:

Schienenverkehr

Bei der Beschaffung, dem Betrieb und dem Unterhalt können bei den verschiedenen Akteure ganz unterschiedliche Bestrebungen festgestellt werden. Mittels Pflichtenheft wird der Auftrag seitens Transportunternehmen an die Hersteller übermittelt. Im Allgemeinen steht die Einhaltung der technischen Anforderungen der Normen im Fokus. Es kann aber auch vorkommen, dass z.T. höhere Anforderungen an Fahrzeughüllen oder besondere Wünsche an die HLK-Technik (bspw. Entfeuchtung durch die Klimatisierung) gestellt werden. Der Hersteller schaut dann, ob die zusätzlichen Anforderungen bereitgestellt werden können. Die Hersteller haben i.d.R. standardisierte Konzepte, Abweichungen bedeuten somit meistens einen zusätzlichen Aufwand und Mehrkosten. Der Einsatz einer Wärmepumpe oder der Einbau einer Wärmerückgewinnung gehören dabei bereits zu den Sonderwünschen und sind entsprechend kostenintensiv. Dies führt dazu, dass die Innovation in der Branche gestoppt wird – insbesondere bei kleineren und mittelständischen Unternehmen, welche zwar motiviert sind neue Technologien zu verwenden, aber die zusätzlichen hohen Mehrkosten nicht tragen können.

Ob die Fahrzeuge die Anforderungen erfüllen wird anschliessend in Klimakammern oder / und mittels Messungen im Betrieb überprüft.

Einig waren sich die Befragten, dass die Vorgaben in den Normen bzgl. der verschiedenen Kriterien (Lufttemperatur, Oberflächentemperaturen etc.) klar definiert sind. Werden die Anforderungen bei der Beschaffung und im Betrieb eingehalten, gibt es i.d.R. nur sehr wenige Beschwerden seitens der Fahrgäste (normaler Bereich an unzufriedenen Personen, $\leq 5\%$). Die meisten Reklamationen betreffen meist Anlagenstörungen, d.h. wenn die Klimaanlage an heissen Sommer- oder kühlen Wintertagen ausfällt oder in älteren Fahrzeugen, wo z.T. gar keine Klimaanlage eingebaut ist. Eine Pflicht zur Nachrüstung bei fehlenden Klimaanlagen gibt es zwar nicht, aber da der öffentliche Nahverkehr von den Besteller-Kantonen subventioniert wird, entsteht diesbezüglich ein gewisser Druck. Kommt es vermehrt zu Kundenreklamationen im Fahrbetrieb, so werden im Normalfall Störungsmeldungen erstellt und bei Bedarf die Systemparameter korrigiert (Soll-Temperaturen, Wartungszyklen, Ersatz von störungsanfälligen Komponenten, etc.). Einige Transportunternehmen führen ebenso Messungen während des Betriebs durch, um die Einstellungen der Klimaanlage und die Einhaltung der Anforderungen der Normen zu überprüfen (dynamisches Abnahmeverfahren im Sommer, Zwischensaison und Winter).

Unterhalt und Wartung der Klimaanlagen erfolgt i.d.R. in regelmässigen Abständen. Je nach Komponenten und Fahrzeugtyp findet dies i.d.R. halbjährlich oder jährlich statt. So können ungewünschte Ausfälle vermieden und eine langfristige Nutzung der Anlage sichergestellt werden. Bei einer defekten Anlage erfolgt die Instandsetzung sofort.

Bus

Bei dem Verkehrsmittel Bus laufen Beschaffung, Betrieb und Unterhalt ähnlich ab (Pflichtenheft seitens Betreiber, Hersteller setzt diese entsprechend um). Bei Bussen kann ein Fahrzeug bei der Beschaffung zum Teil 1:1 besichtigt und eine Probefahrt durchgeführt werden. So kann eine erste subjektive Bewertung der thermischen Behaglichkeit erfolgen (hier fallen meist Zuglufferscheinungen auf). Im Betrieb werden vereinzelt Stichproben mit der Messung von Temperatur und Feuchte durchgeführt. Kommt es im Betrieb zu negativen Rückmeldungen, dann wird die Situation gemeinsam mit dem Hersteller analysiert und optimiert. Unterhalt und Wartung der Anlagen erfolgt i.d.R. regelmässig, entweder seitens Betreiber gemäss den Vorgaben des Herstellers (Wartungsplan) oder durch den Hersteller selbst (dies wird bereits in der Ausschreibung berücksichtigt und seitens Hersteller die entsprechenden Kosten (LCC) definiert).

Flugzeug

Die Anforderungen werden von der Spezifikation auf Flugzeugebene abgeleitet, die auf den Kunden-/Marktanforderungen basiert. Diese fließen in die Spezifikationen auf Systemebene ein, die dann für die Beschaffung der entsprechenden Systeme/Komponenten bei den jeweiligen Luft- und Raumfahrtzulieferern als Teil der Zulieferverträge verwendet werden. In den Spezifikationen werden alle technischen, betrieblichen, Wartungs-/Zuverlässigkeits- und Zertifizierungsanforderungen festgelegt, einschließlich der Anforderungen an die Umweltqualifikation der Ausrüstung (z. B. gemäß RTCA DO 160 Environmental Qualification).

Bereits in den Verkaufsgesprächen werden die Anforderungen besprochen. So wird z.B. mit dem Kunde abgesprochen, dass der Wartebereich der Flugzeuge am Schatten erfolgt. Das gleiche gilt für Trainingsflugzeuge, wo Instruktionen am Boden wo möglich am Schatten durchgeführt wird. Dazu werden extra Beschattungssegel installiert. In der Luft ist der Komfort einfacher sicherzustellen, insbesondere sind die Umgebungstemperaturen deutlich tiefer.

5. Wo sehen Sie Optimierungsmöglichkeiten / Verbesserungspotentiale bei den von Ihnen verwendeten Vorgaben?

Mögliche Rückfragen:

*Was sollte bei einer Anpassung der Vorgaben berücksichtigt werden?
Welche Vorteile entstehen dadurch?*

Antworten zu Frage 5:

Schienerverkehr

In den Gesprächen wurden insbesondere die nachfolgenden Punkte genannt:

- Der Meereshöhe wird bei der Auslegung der HLK-Anlagen zu wenig Beachtung geschenkt. Durch den reduzierten Luftdruck ändert sich auch die Luftdichte und damit einhergehend die Leistungsfähigkeit der HLK-Systeme (Lüfter und Wärmetauscher).
- Die Normen definieren klare Anforderungen an die verschiedenen Parameter (Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, etc.). Ein übergeordnete Gesamtbewertung (operative Raumtemperatur) gibt es nicht. Werden bspw. höhere Oberflächentemperaturen durch sehr gute U-Werte der thermischen Hülle bereitgestellt, bleiben die Anforderungen an die Lufttemperatur bestehen.
- Die Normen beschreiben meist nur den Endzustand, es ist allerdings nicht immer klar, wie dieser regelungstechnisch erreicht werden kann.
- Eine kurz und prägnant formulierte Dokumentation zum Thema Behaglichkeit wäre auf alle Fälle wünschenswert, wichtig wären auch Vorgaben zur Prüfung. Eine RTE zu diesem Thema wäre prüfenswert.
- Das Thema Energieeffizienz sollte z.T. mehr berücksichtigt werden. Dadurch könnte auch die Innovation gefördert werden. Da die Branche recht klein ist, sind energieeffiziente Lösungen (bspw. Wärmepumpen) eher Sonderwünsche und entsprechend teuer. Solange solche Systeme in der Branche nicht zum Standard werden, liegt die Innovation nur beim Willen einzelner.
- Die neuen Normen, bzw. Richtlinien sollten so gestaltet sein, dass diese nicht nur durch den Zulieferer, sondern auch im Feld gemessen, bzw. deren Einhaltung geprüft werden kann. Die Möglichkeit das HLK-System mit einer «künstlichen Sonne» zu prüfen, wie in der EN 14813-2 gefordert, ist beim Betrieb oft auch aus Kostengründen nicht möglich.
- Es muss geprüft werden, wie zwischen bestehenden Fahrzeugen und Neuanschaffungen unterschieden werden kann. Aus Sicht der Ökologie und der Nachhaltigkeit ist es besser bestehendes Material aufzuarbeiten als Neues zu beschaffen. Bestehendes Material hat aber alten Richtlinien genügt und oftmals können bei Neuerungen / Refits aus Platzgründen, etc. nicht alle Normen (inkl. Brandschutznorm) umgesetzt werden.
- Dämmung der Fahrzeughülle: Es kann vorkommen, dass bei einer vollen Belegung und einer gut gedämmten Hülle selbst in den Wintermonaten in den Fahrzeugen gekühlt werden

muss. Dies ist systemtechnisch manchmal kompliziert und ist auch energetisch widersprüchlich. Hier könnte überprüft werden, ob es einen Grenzwert geben sollte.

Bus

- Es sollte ein einfaches Messsystem und Messverfahren für Testfahrten mit einer einfachen Auswertungsmöglichkeit geben, welches die Werte bezüglich Behaglichkeit bewertet. Wenn Betriebe solche Systeme z. Bsp. für Fahrzeugausschreibungen mieten könnten, könnte ein Interesse bestehen. Ein ähnliches Vorgehen ist für Fahrzeugabnahmen denkbar. Ziel: Mit wenig Aufwand eine ausreichende Bestätigung erhalten.
- Die thermische Behaglichkeit ist kein spezifisches Kriterium und wird nur teilweise und eher subjektiv beurteilt.
- Die Anforderungen der VDV-Schrift mit Blick auf die Sollwert-Temperatur sind sehr hoch für E-Fahrzeuge. Dieselbetriebe Fahrzeuge haben natürlich viel mehr Abwärme, die anfällt, dann sollten die mind. 17 °C im Winter bereitgestellt werden können. Bei Elektrofahrzeugen gibt es diese Abwärme nicht mehr und es gilt ein gutes Verhältnis zwischen Komfort und Reichweite zu finden. Dies stellt Hersteller und Betreiber oft vor Herausforderungen. Laut Interviewpartner wurde bei einigen Fahrzeugen bspw. bei – 5 °C Aussentemperatur anstelle von den laut VDV-Schrift 236 vorgegeben 17 °C nur noch auf 12 – 14 °C geheizt. Bisher gab es seitens Kundschaft keine Beschwerden. (kurze Aufenthaltszeit = Bekleidungsgrad bleibt meist gleich, bspw. bleibt die Jacke im Winter an).
- In der VDV 236 ist nicht genau angegeben, wo die Sollwerttemperatur im Fahrzeug zu messen ist (Decke, Fussboden etc.), es wird lediglich ein max. Temperaturunterschied angegeben. Dies führt u.a. dazu, dass Betreiber eine eigene Sollwerttemperatur definieren, welche ebenso im Fussbereich eine angenehme Temperatur bereitstellt (diese lehnt sich i.d.R. aber stark an den Vorgaben der VDV 236 an).

Flugzeug

Die Spezifikationen für die Systeme wurden im Laufe der Jahrzehnte standardisiert und optimiert, aber es gibt immer Raum für Verbesserungen. Folgende Punkte wurden genannt:

- Das Niveau der technischen Details, insbesondere im Hinblick auf eine gute Schnittstellen- definition, kann immer verbessert werden.
- Die Verbesserung der Effizienz und das Streben nach nachhaltigeren Produkten ist ein weiterer wichtiger Aspekt für die Zukunft.
- Zapfluft (Bleedair) zur Heizung aus den Triebwerken sollte reduziert werden, da diese die Effizienz der Motoren reduziert.
- Die Klimatisierung soll stärker von den Antrieben abgekoppelt werden. Dies kann durch mehr Elektrifizierung erreicht werden. Dies leistet auch einen Beitrag zu effizienteren Antrieben und somit zur CO₂-Reduktion.
- Kühlung der Flugzeuge am Boden. Für den Flugbetrieb ist es nicht effizient eine grosse Kühlanlage für den Betrieb am Boden zu installieren. Damit wird das Gewicht und die Effizienz im Flugbetrieb reduziert. Da sind andere Ansätze wie Segel zur Beschattung oder externe Powerunits oder Kühlsysteme effizienter.

Forschung

Der Kontaktbereich in Fahrzeugen beträgt ca. 25 % der Körperfläche. Dieser Aspekt wird in den bestehenden Normen nicht berücksichtigt.

6. Inwieweit spielen die Themen «Energieeffizienz» und «Kosten» eine Rolle, wenn es um die Bereitstellung der thermischen Behaglichkeit geht? Welches der drei Themen wird priorisiert?

Mögliche Rückfragen:

Ist der Zusammenhang zwischen Energieverbrauch und Erfüllung des gewünschten oder geforderten Komforts bekannt?

Welche Energiesparmassnahmen haben einen relevanten Einfluss auf die therm. Behaglichkeit?

Wie können die Auswirkungen von Energiesparmassnahmen auf die therm. Behaglichkeit abgeschätzt werden?

Welche Möglichkeiten gibt es Ihrer Meinung nach, um die thermische Behaglichkeit zu erhöhen und gleichzeitig Energie zu sparen?

Wo sehen sie mögliche Forschungslücken/-potentiale in diesem Bereich?

Antworten zu Frage 6:

Schienenverkehr

Welche der drei Themenfelder priorisiert wird, ist stark vom jeweiligen Unternehmen abhängig. In den meisten Fällen sind die Kosten entscheidend. Der Fokus hat sich hier aber in den letzten 5 Jahren geändert. Während früher die Investitionskosten im Vordergrund standen, werden jetzt vor allem die Lebenszykluskosten als Entscheidungsgrundlage genommen. Da sich die Energieeffizienz ebenso in den laufenden Kosten widerspiegelt, hat auch dieses Thema an Aufmerksamkeit gewonnen. Die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit werden von vielen Unternehmen gemäss Norm eingehalten. Es gibt aber auch einige Bahnunternehmen, die einen besonders hohen Wert auf die thermische Behaglichkeit legen, da diese für die Kundenzufriedenheit essenziell ist. Dies betrifft vor allem Fahrzeuge mit längerer Aufenthaltsdauer (Fernverkehr), dies wird aber auch in den Normen widerspiegelt.

Bus

Auch bei den Bussen sind die Kosten über den Lebenszyklus entscheidend. Bei Elektrobussen ist ebenso die Energieeffizienz besonders wichtig, da bei einer ineffizienten Anlage die Reichweite der Fahrzeuge abnimmt. Die thermische Behaglichkeit ist auf Grund der kurzen Aufenthaltsdauer der Fahrgäste weniger relevant.

Flugzeug

Es ist immer ein Kompromiss zwischen Energieeffizienz und Kosten. Wobei künftig das Thema Nachhaltigkeit stärker gewichtet und berücksichtigt wird. Der thermische Komfort ist essenziell für die Kundenzufriedenheit sowie die Sicherheit und erhält somit auch einen hohen Stellenwert.

7. Kommen Reklamationen betreffs ungenügenden Komfort zu Ihnen?

Wenn Ja:

Welche Bereiche betrifft dies?

Wie gehen Sie damit um?

Wie häufig ist dies der Fall?

Wenn Nein:

Gibt es ein System, das allfällige Rückmeldungen der Fahrgäste an das Unternehmen weiterleitet?

Antworten auf Frage 7:

Schienenverkehr und Bus

Reklamation gibt es immer mal wieder, diese gehen i.d.R. direkt an die Betreiber. Je nachdem treten diese dann mit ihren Anliegen an die Hersteller heran (bspw. bei wiederkehrenden, technischen Problemen).

Reklamationen betreffen meist Störungen oder defekte Klimaanlage sowie ältere Fahrzeugflotten ohne Klimatisierung. Diese häufen sich dann vor allem an extremen Wassertagen (bspw. an sehr heissen Sommertagen). Ebenso kann es zu Beschwerden kommen, wenn die Fahrzeuge (inkl. Anlagen) beim Abstellen ausgeschaltet werden und dies mit einer kurzen Bereitstellungszeit kombiniert wird. Dadurch kann es zu Fahrtbeginn zu einem zu warmen / kalten Fahrgastraum kommen,

bevor sich die Sollwerttemperaturen eingestellt haben. Des Weiteren kann es vorkommen, dass sich Kunden/innen vereinzelt über unangenehme Zuglufterscheinungen in den Bereichen des Übergangs zwischen Fahrzeugen oder bei den Trenntüren beschweren.

Einig waren sich die Befragten aber, dass wenn die HLK-Anlagen einwandfrei funktionieren und gemäss den Anforderungen der Normen eingestellt sind, i.d.R. eine angemessene thermische Behaglichkeit bereitgestellt werden kann und es nur sehr wenige unzufriedene Personen (< 5 %) gibt.

Beanstandungen können i.d.R. schriftlich oder über bestimmte QS-Systeme der Betreiber eingereicht werden. Eine speziell dazu eingestellte Person kümmert sich dann um die Meldungen und leitet die Beanstandung an die entsprechenden Fachdienste weiter. Bei Reklamationen wird normalerweise nicht auf Einzelfälle eingegangen (thermischer Komfort ist sehr subjektiv). Häufen sich die Beschwerden, werden diese durch die zuständigen Personen geprüft und bei Bedarf entsprechende Massnahmen eingeleitet. Defekte Anlagen werden dann entsprechend repariert oder wenn nötig ersetzt. Ist das System funktionsfähig und sind keine Störungen vorhanden, dann wird die Situation genauer analysiert und in Zusammenarbeit mit den Herstellern/(Unter-)Lieferanten Lösungen erarbeitet.

Flugzeug

In extrem heissen oder kalten Umgebungen, wo die Systeme mit hohen Temperaturen und hoher Sonneneinstrahlung oder eisigen Temperaturen zu kämpfen haben, kann es hin und wieder zu Beschwerden kommen. Generell führen die Erfahrungen/Feedbacks aus dem Betrieb meist zu Systemverbesserungen, bspw. durch Verbesserungen der Leistung von Komponenten oder der Isolierung.

In einigen Fällen wurde auch der thermische Ausgleich zwischen dem vorderen und hinteren Teil des Flugzeugs bemängelt. Bei Schulflugzeugen ist die zusätzliche thermische Belastung durch die Kleidung der Flugzeugbesatzung ebenso oft ein Diskussionsthema, insbesondere beim Einsatz in Wüstengebieten wie dem Nahen Osten.

8. Arbeiten Sie in Normgremien oder bei Regulatorien mit?

Wenn Ja:

In welchen Gremien oder Regulatorien?

In welchem Bereich (z.B. in der Erarbeitung, in der Vernehmlassung...)?

Antworten zu Frage 8:

Ein Teil der Befragten arbeitet in Normgremien oder Regulatorien mit. Dazu gehören u.a. DIN, EN, ISO, VöV-Arbeitsgruppe, Cenelec TC 256, WG8, Eurospecification der Bahnen...

9. Welche Auswirkungen hat(te) die Corona-Pandemie auf komfort- oder energierelevante Themen im Fahrzeug?

Rückfragen:

Gab es spezielle Rückmeldungen von Kunden?

Hatte dies einen Einfluss auf den Energieverbrauch?

Wird die Frage der Luftqualität (insbesondere Kontrolle der Luftströme und Filterung) stärker berücksichtigt?

Antworten zu Frage 9:

Schieneverkehr und Bus

In Zeiten der Corona-Pandemie kam es zu verschiedenen Anpassungsmassnahmen, wobei die Energieeffizienz und der thermische Komfort nicht mehr im Hauptfokus standen. Obwohl verschiedene Studien nachgewiesen haben, dass Klimaanlage i.d.R. eigentlich keinen Beitrag zur Ausbreitung von Viren leisten, haben fast alle Befragten angegeben, dass der Aussenluftanteil erhöht bzw. die Anlagen ganz auf einen Frischluftbetrieb (keine Umluft) umgestellt wurden. Ebenso wurden z.T. spezielle Filter (höhere Filterleistung, Reduktion von Viren) in den Anlagen eingesetzt. Eine weitere Massnahme waren die regelmässigen und automatischen Türöffnung in den Fahrzeugen. All diese Massnahmen führen zu einem erhöhten Energieverbrauch der Anlage. Jedoch muss auch

festgehalten werden, dass aufgrund der Pandemie weniger Fahrgäste (weniger interne Lasten & Gewicht) befördert wurden. Ob die Corona-Pandemie somit zu einer Verschlechterung in der Gesamtenergiebilanz geführt hat, ist schwer abschätzbar. Die regelmässigen und automatischen Türöffnungen hatten ebenso Auswirkungen auf die Zugluft und bei längerer Türöffnung auch auf die Lufttemperatur in den Fahrzeugen. Insbesondere in den kalten Jahreszeiten wurde dies z.T. als unangenehm empfunden, aber auf Grund der aktuellen Situation von den meisten Fahrgästen akzeptiert. Andere Fahrgäste waren wiederum froh um die regelmässigen Türöffnungen an den Haltestellen. Andere Interviewpartner haben angegeben, dass in dieser Zeit die Kundenreklamationen deutlich zunahmten: «zu kalt», «zu warm», «es zieht» bis Ansteckungsrisiken und Lufthygiene. Die meisten Befragten waren sich aber einig, dass nach der Pandemie wieder auf den üblichen Betrieb umgestellt wird.

Die Pandemie führte aber auch zu neuen Entwicklungen am Markt. Derzeit werden Verfahren zur «Reinigung» der Umluft untersucht, wie sie auch in Spitälern / OP-Räumen zum Einsatz kommen. Eine Bahngesellschaft verwendet schon seit längerer Zeit eine Zuluft-Ionisation, vor allem in den Speisewagen, um Gerüche zu reduzieren bzw. zu vermeiden. Dieses System wirkt sich positiv auf die Luftqualität und Hygiene aus und war auch mit Blick auf die Corona-Pandemie vorteilhaft.

Flugzeug

Die Corona-Pandemie hat zu Kundenanfragen nach der Einführung von "Hygiene"-Systemen in Flugzeugen geführt. Solche Anforderungen können durch die Einführung von HEPA-Filtern in den Klimaanlageanlagen oder, was noch umstritten ist, durch die Verwendung von Kabinen-Ionisationsgeräten erfüllt werden. HEPA-Filter sind bereits aus dem Militärbereich erprobt. Auch ist deren Wirkung wissenschaftlich nachgewiesen und der Einbau dieser Filter relativ einfach. Bei der Ionisation ist deren Wirkung noch weiter zu klären.

10. Möchten Sie uns abschliessend noch etwas mitteilen?
(optional)

11. Zusätzliche Frage: Wo besteht Forschungspotential?

Schienenverkehr

In den Gesprächen wurden insbesondere die nachfolgenden Themen genannt:

- Gesamtheitliche Betrachtung der thermischen Behaglichkeit (Zusammenspiel der Kriterien)
- Die Gestaltung der Wagenkästen und die Verwendung von Wärmedämmmaterialien sowie allenfalls neuartigen Materialien bei heute sehr schwachen Wärmeleitkoeffizienten und k-Werten bedürfen einer Weiterentwicklung, so z.B. bei den Türen.
- Auch bei Verglasungen sowie Sonnenschutzeinrichtungen gibt es bedarf, um die Sonneneinstrahlung im Sommer vor Eintritt ins Fahrzeug zu kompensieren.
- Verschiedene Möglichkeiten der Luftführung
- Eine Erhöhung des thermischen Komforts könnte ebenfalls durch Anwendung optimierter Klimaanlageanlagenregulierungen und Sensoren zur Erfassung der inneren und äusseren Störgrössen und Wirkfaktoren, wie Pyranometer, Luftfeuchtigkeit etc. erreicht werden. Auch die Optimierung im Sinne eines prädiktiven Lastmanagements könnte hierbei unterstützend wirken.
- Massnahmen der individuellen Klimatisierung im Fernverkehr prüfen (baulicher Aufwand, Gewicht der Komponenten, Energieeffizienz, Aufwand für Wartung und Instandhaltung, etc.). Bei Kurzstrecken wahrscheinlich weniger relevant aufgrund der kurzen Aufenthaltsdauer, meist stehende Fahrgäste und Bekleidung wird meist nicht ab- bzw. angelegt.
- Potential reversibler Wärmepumpen: Kann man damit den Fahrgastraum ausreichend heizen & kühlen? Aktuelle werden die Fahrzeuge in der Nacht mit Strom beheizt, könnte man dies auch über Wärmepumpen abdecken?
- Einsatz von Wärmetauschern: Hierzu gab es unterschiedliche Meinungen. Einige der Befragten hielten es für sinnvoll, andere waren der Meinung, dass das in unseren Breitengraden kaum Potential hat. Diese könnte nochmals überprüft werden.

- Ersatz des Kältemittels R430a. Dieses wird wahrscheinlich ab 2030 verboten. Was kann alternativ eingesetzt werden? Da sich in diesem Zusammenhang wahrscheinlich die Kältekreise verändern müssen, könnte das Thema der reversiblen Kältekreise doch wieder interessant sein mit Blick auf eine effizient gestaltete Wärmerzeugung.
- Instationäre Vorgänge, die sich mit Behaglichkeit beschäftigen, wie bspw. das Aufheizen und Abkühlen, wurden bisher nicht betrachtet.
- Die Klimatisierung im öV ist bisher sehr statisch. In Gebäuden hingegen können Lüftungen auch pulsierend eingestellt werden. Dies wird i.d.R. als angenehm empfunden ist auch energietechnisch sinnvoll. Die Anwendbarkeit im öV müsste noch untersucht werden.
- Gibt es andere Leistungsregelungen für HLK-Anlagen? Im Moment nur on-off-Regelung, was viel Strom benötigt.
- Ein Regelwerk auf Stufe «Behaglichkeit» wäre hilfreich. Was heisst das genau? Ein gesamtheitliches Konzept sowie Massnahmen mit kleinem / grossem Effekt sollten aufgezeigt werden.
- Welche Bedeutung hat die Luftfeuchtigkeit mit Blick auf die thermische Behaglichkeit. Wo ist der Idealwert & wie steuere / regele ich das in den Zügen. Ist man da abhängig von den Umgebungsbedingungen und führt die Klimatisierung zu sehr trockener Luft (bspw. in Flugzeugen oft so)? Eine bahnspezifische Betrachtung der Luftfeuchte wäre spannend.
- Kann man die Dachflächen für die Stromproduktion nutzen?
- Körpernahe Heiz-/Kühlsysteme und personalisierte Klimatisierung – Herausforderungen und zusätzlicher Aufwand der Systeme vs. Energieeffizienz und Komfort
- Das Thema Lufthygiene wurde bislang stark unterschätzt und war während der Corona-Pandemie ein grosses Thema. Systeme zur Verbesserung der Lufthygiene zur Erreichung von Keimzahlreduktionen, Geruchsneutralisationen und Agglomeration von Feinstabpartikeln könnte hier der Schlüssel zur Verbesserung der Verhältnisse sein.

Bus

- Es ist bisher kaum bekannt, welche Funktion im Bus, welchen Anteil der Gesamtenergie verbraucht. Dies wäre ein wichtiger Punkt, um die richtigen Hebel zu finden und die Energieeffizienz in den Fahrzeugen weiter zu steigern.
- Der Nutzen von Vorgaben oder Vorschriften ist gering, wenn diese nicht in einer Typenprüfung oder einem vereinfachten Prüfverfahren überprüft wird.
- In der E-Mobilität wird die Energieeffizienz und somit auch die Effizienz der Komforteinrichtungen wichtiger.
- Bei der E-Mobilität kann durch den Einbau der Batterien im Boden eine höhere Bodentemperatur realisiert werden.
- Infrartheizungen in Bussen: Ein solches System wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts schonmal angeschaut und hat generell gut funktioniert. Die Sollwertkurve konnte durch die Infrarot-Paneels um ca. 2 °C abgesenkt werden. Problem hier war die Temperaturschichtung im Fahrgastraum. Angebracht waren die Paneele an der Decke, gemessen wurde im Hüftbereich. An dem Kopf war es dann tendenziell wärmer, an den Füßen zu kalt. Das Thema könnte weiter betrachtet werden und bspw. die Anordnung von Infrarotpaneelen im Fuss- oder Seitenwandbereich untersucht werden, um die Temperaturschichtung im Fahrgastraum zu verbessern. Dabei muss auch der Einfluss von Türöffnungen mitberücksichtigt werden, welche die Temperaturschichtung noch zusätzlich verstärken können (Türluftschleier könnten hier einen Betrag leisten). – Ein anderer Interviewpartner hingegen, hat das Potential von Infrartheizungen eher als gering bewertet (in einem Fahrzeug getestet und sogar wieder ausgebaut).
- Verbesserung in der Gestaltung der Karosserie. Besser gedämmte Fahrzeuge, was jedoch nicht zu viel mehr zusätzlichem Gewicht führt.

Weitere

- Was ist der messbare Effekt, wenn man z.B. andere Materialien z.B. für die Wände einsetzen würde. Was ist die Auswirkung von neuen Materialien auf das Raumklima, wenn alle anderen Werte (Temperatur, Luft...) gleichbleiben würde.
- Beispiel aus Deutschland: Ideen-Zug DB ([LINK](#)). Ganz neue Ansätze denken und Konzepte ausprobieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass man dem Mensch auch eine gewisse Zeit gibt, um sich an Neues zu gewöhnen.

Flugzeug

Die derzeitigen Systemtechnologien zur Steuerung der Temperaturumgebung im Flugzeug sind nicht neu. Die Verwendung von Triebwerkszapfluft, Stauluft und Klimaanlage, die Kältemittel wie R134A verwenden, werden seit Jahrzehnten eingesetzt und erfüllen die Anforderungen an den thermischen Komfort. Bei der Abkühlung der Triebwerkszapfluft auf Temperaturen, die für das Cockpit und die Kabine geeignet sind, wird jedoch viel Wärme und damit potenziell nutzbare Energie an die Atmosphäre abgegeben. Darüber hinaus verursachen Stauluftwärmetauscher einen Luftwiderstand. Diese Systeme tragen auch zum Gewicht des Flugzeugs bei. Daher liegt der Schwerpunkt bei den Verbesserungen auf der Steigerung der Effizienz in Bezug auf den Energieverbrauch, der Gewichtsreduzierung dieser Systeme und der Bereitstellung umweltverträglicherer Lösungen.

Forschung

Die Entwicklung sollte davon weggehen, den kompletten Raum zu klimatisieren und sich eher in Richtung der lokalen, individuellen, personalisierten Klimatisierung entwickeln. Die thermische Klimatisierung hat noch viel Potenzial insbesondere unter den aktuellen Entwicklungen hin zu mehr Energieeffizienz.

Ein weitere Aspekt wäre die Entwicklung hin zu neue Konzepte / Lösungen hin zu vernetzten, nutzerorientierten und lernenden Systemen oder auch die Veränderung der Innenraumgestaltung (autonomes Fahren) und dem Bedienkomfort.

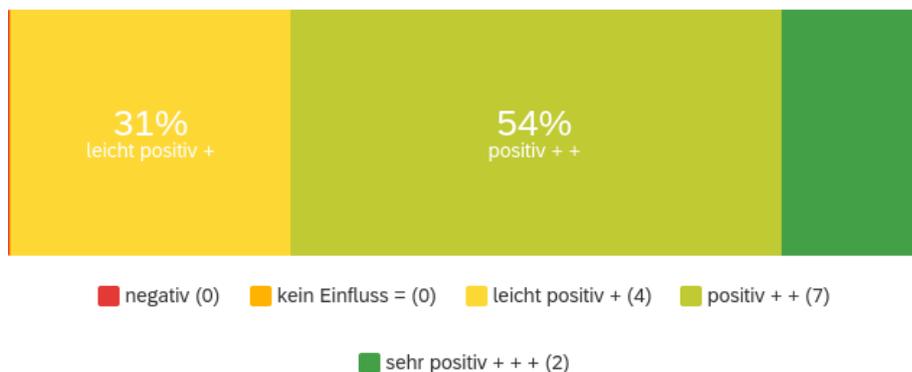
11.2 Umfrageergebnisse: Bewertung von Projektideen

1. Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Hülle von Fahrzeugen, wie bspw. Einsatz von neuartigen Wärmedämmmaterialien, Reduzierung von Wärmebrücken, Verbesserung der Luftdichtigkeit, Massnahmen des sommerlichen Wärmeschutzes, etc.

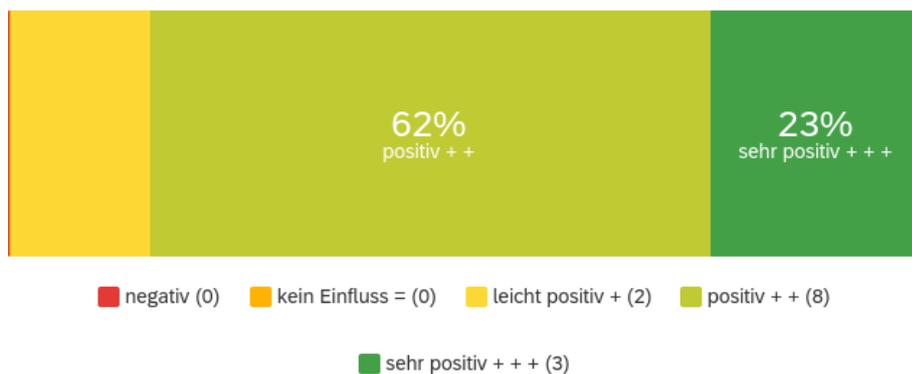
Q2_1 - Aufwand zur Umsetzung



Q3_1 - Einfluss auf die thermische Behaglichkeit



Q3_2 - Einfluss auf die Energieeffizienz

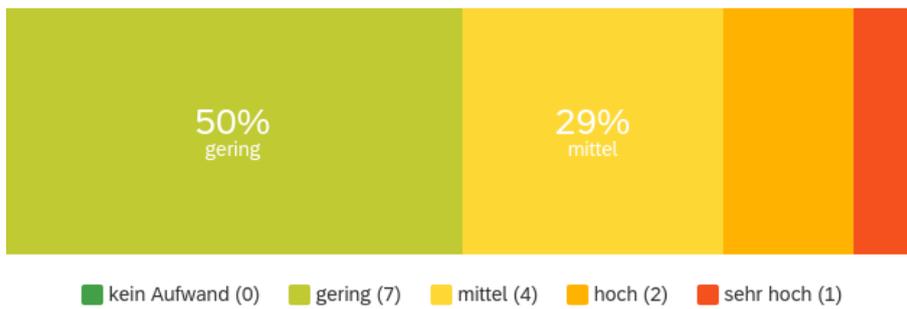


Bemerkungen:

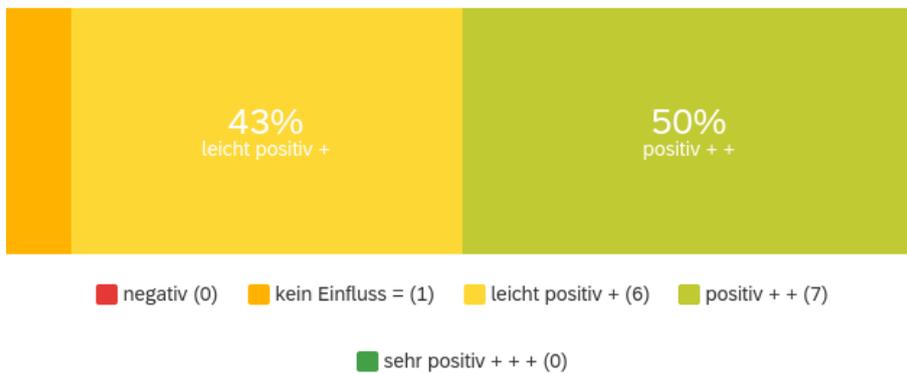
- Unterscheidung zwischen Refit und Neufahrzeugen (Aufwand bei Refit meist sehr hoch, bei Neufahrzeugen weniger hoch)
- Der Aufwand zur Umsetzung kann je nach Massnahme sehr unterschiedlich sein.

2. Klimatisierung der Fahrgasträume: Optimierung der Temperatur- und Lüftungsregelung

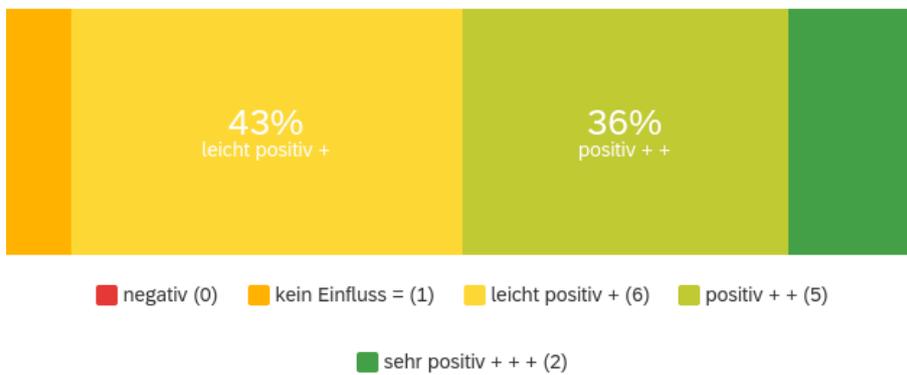
Q4_1 - Aufwand zur Umsetzung



Q5_1 - Einfluss auf die thermische Behaglichkeit



Q5_2 - Einfluss auf die Energieeffizienz

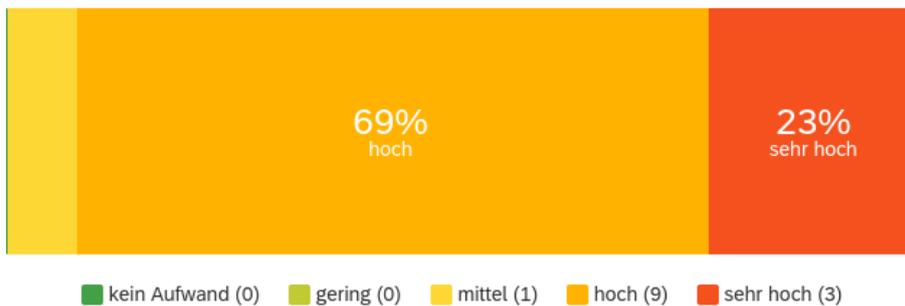


Bemerkungen

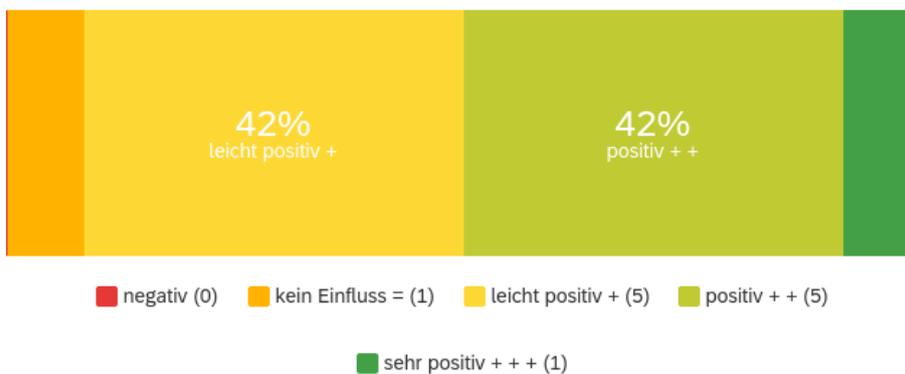
Optimierung im Sommer und Winterfall betrachten - Was heisst Optimierung je nach Jahreszeit?

3. Einsatz von **Flächenheizung / -kühlung** in Fahrzeugen

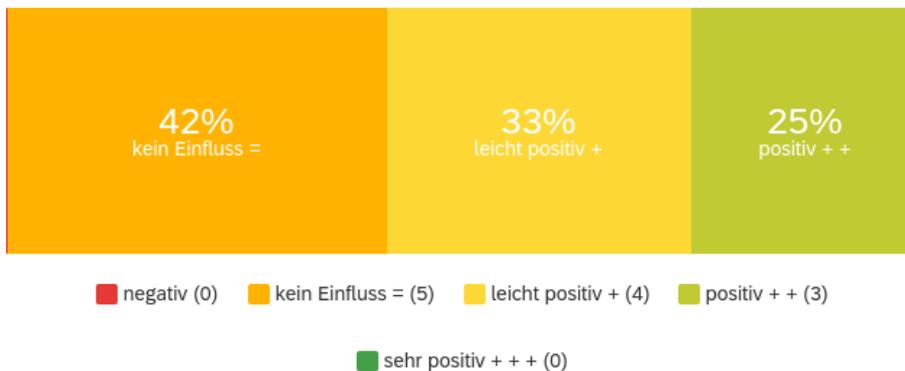
Q6_1 - Aufwand zur Umsetzung



Q7_1 - Einfluss auf die thermische Behaglichkeit



Q7_2 - Einfluss auf die Energieeffizienz



Bemerkungen:

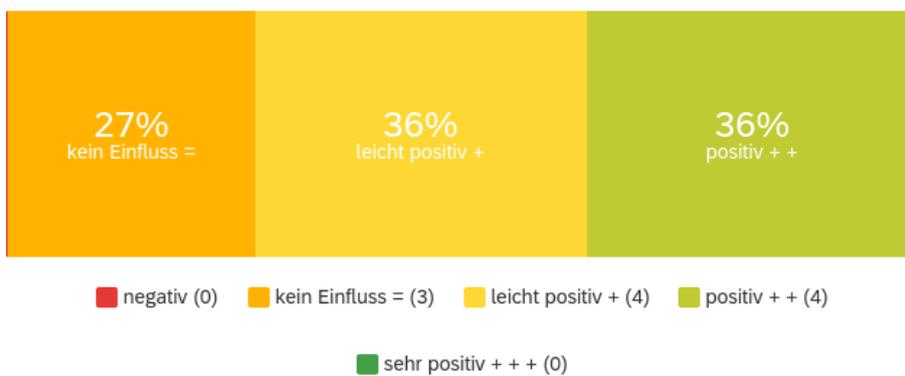
- Sofern die beheizten Flächen gut gedämmt sind, wird der Einfluss auf die Energieeffizienz neutral oder positiv sein. Vor allem beim Einsatz einer WP wird der COP durch tiefere Temperaturen positiv beeinflusst.
- Einfluss auf Energieeffizienz nur in Kombination mit einer WP

4. Einsatz von Infrarotheizungen

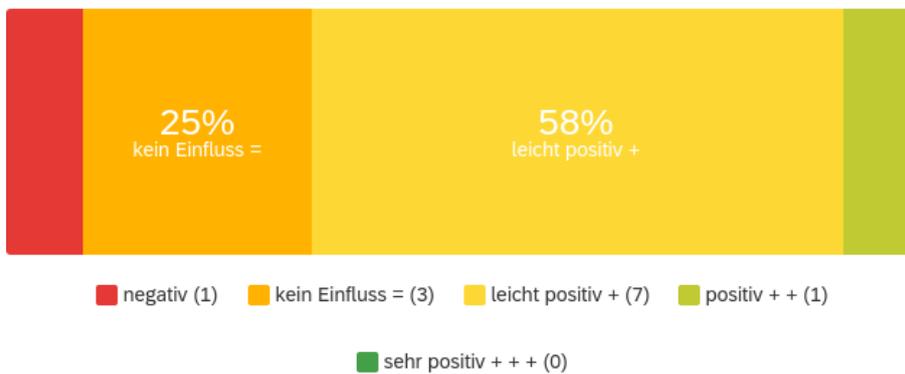
Q8_1 - Aufwand zur Umsetzung



Q9_1 - Einfluss auf die thermische Behaglichkeit



Q9_2 - Einfluss auf die Energieeffizienz

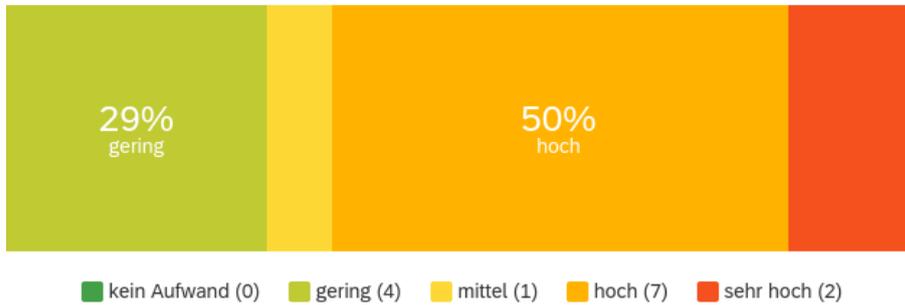


Bemerkungen:

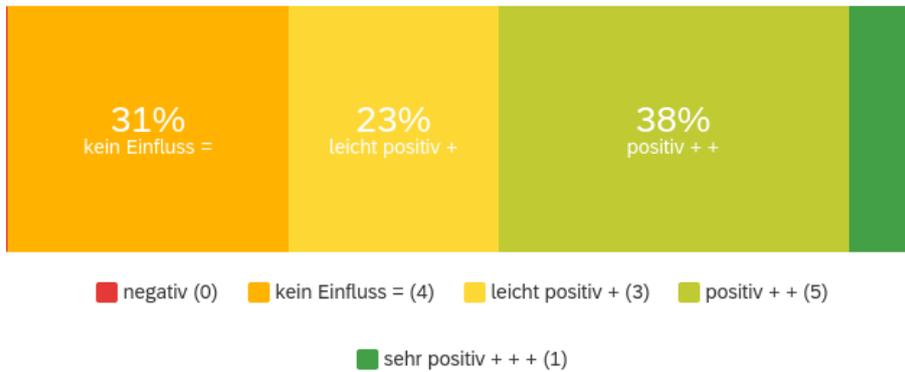
- Die Montage am Innendach hat eher einen negativen Einfluss auf die Behaglichkeit.
- Der Einfluss auf thermische Behaglichkeit hängt auch von der Symmetrie / Asymmetrie der IR-Strahlung beim Fahrgast ab.
- Auswahl des geeigneten Infrarotstrahlers ist entscheidend

5. Zonenweise Klimatisierung in den Fahrzeugen

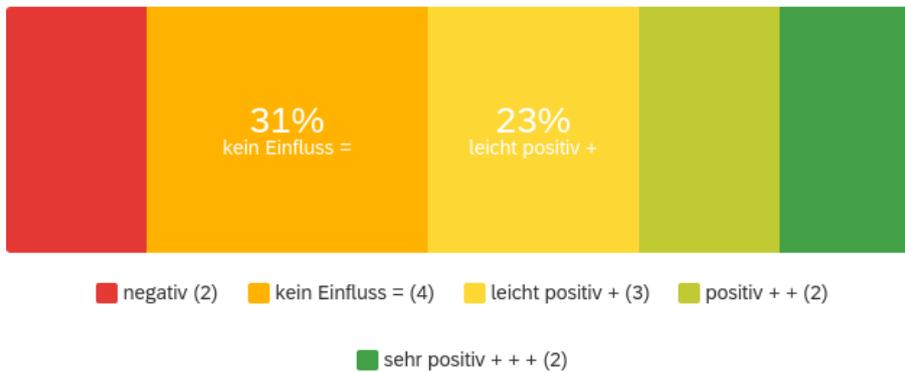
Q10_1 - Aufwand zur Umsetzung



Q11_1 - Einfluss auf die thermische Behaglichkeit



Q11_2 - Einfluss auf die Energieeffizienz

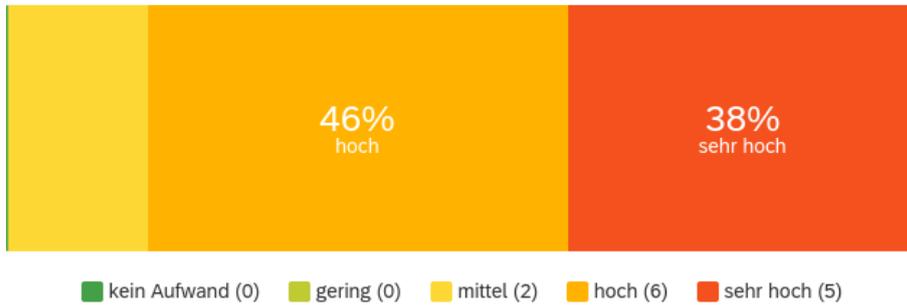


Bemerkungen:

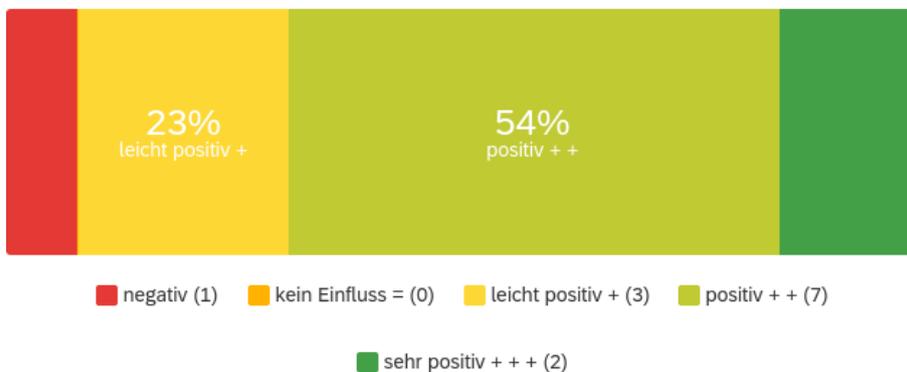
- Definition: Was wird als «Zone» verstanden?
- Trennung von Fahrer und Fahrgästen OK. Dieses Thema muss gleichzeitig mit der Temperaturmessung und dem Steuerungssystem behandelt werden. Kann sich als sehr komplex erweisen.
- Hängt sehr davon ab, was damit gemeint ist, z.B. Einstiegsbereich, Plattform nicht aktiv zu klimatisieren ist sicher einfach umzusetzen und wird sich kaum negativ auf die thermische Behaglichkeit auswirken.
- Wenn damit gemeint ist, dass gewisse Wagen oder Wagenteile bei tiefer Besetzung nicht beheizt / gekühlt werden, dann ist es energetisch positiv. Dies kann jedoch betrieblich gelöst werden und hat keinen oder nur einen geringen Aufwand. Wenn jedoch innerhalb eines Wagens unterschiedliche Temperaturen bereitgestellt werden sollen, so ist es aufwändig und hat einen negativen Einfluss auf die Energie, da oft zur Regelung zusätzliche Systeme verbaut werden müssen.

6. Möglichkeiten der **individualisierten Klimatisierung**, wie bspw. personalisierte Klimatisierung oder körpernahe Heiz- und Kühlsysteme

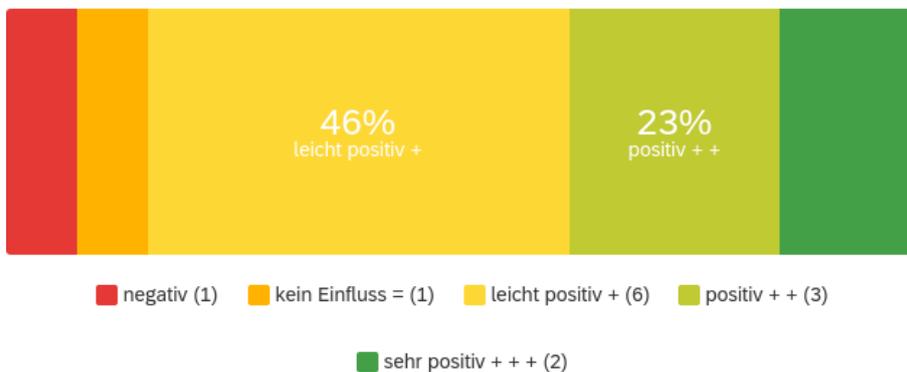
Q12_1 - Aufwand zur Umsetzung



Q13_1 - Einfluss auf die thermische Behaglichkeit



Q13_2 - Einfluss auf die Energieeffizienz

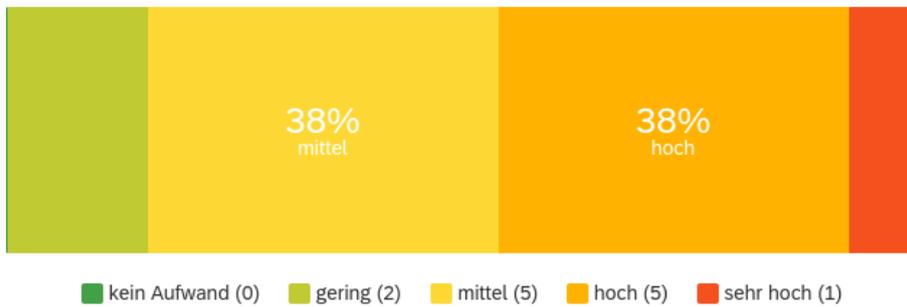


Bemerkungen:

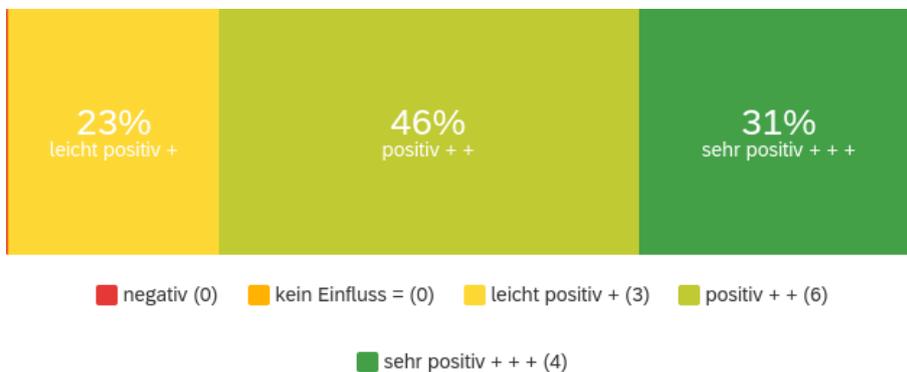
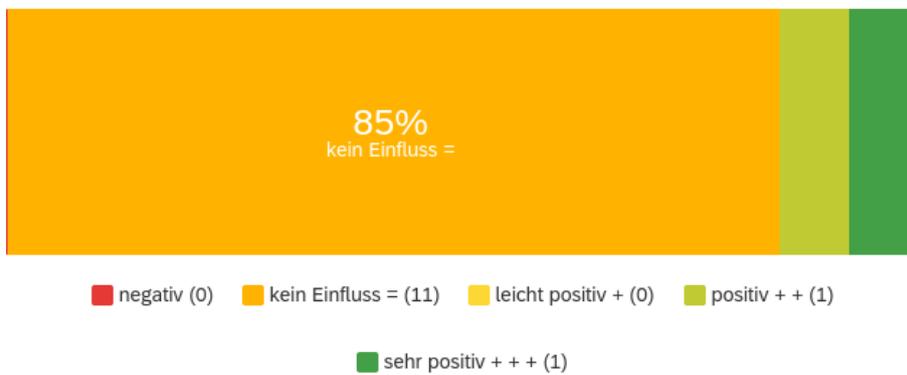
- Aktuelle laufendes Forschungsprojekt: Effekt soll hier quantifiziert werden.
- Einfluss auf Energieeffizienz hängt vermutlich vom Nutzerverhalten ab. Potenzial vermutlich im Sommer gross, wenn Wärmeabgabe durch individuell steuerbare Konvektion ermöglicht wird im Gegensatz zu generell stagnierender Luft wie es aktuell der Fall ist.
- Personalisierte Klimatisierung scheint komplexer als zonenweise Klimatisierung. Körpernahe Heizsysteme interessant (und nicht unbedingt komplex).
- Durch gegenseitige Beeinflussung und der zusätzlichen Steuerelemente ist der Energieverbrauch negativ.

7. Einsatz von Wärmepumpen im öV

Q14_1 - Aufwand zur Umsetzung



Q15_1 - Einfluss auf die thermische Behaglichkeit

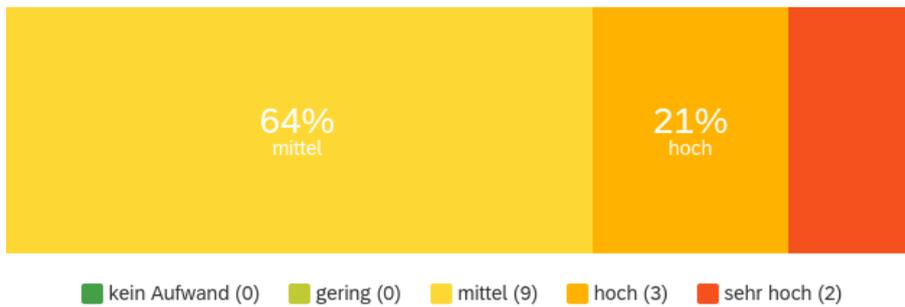


Bemerkungen:

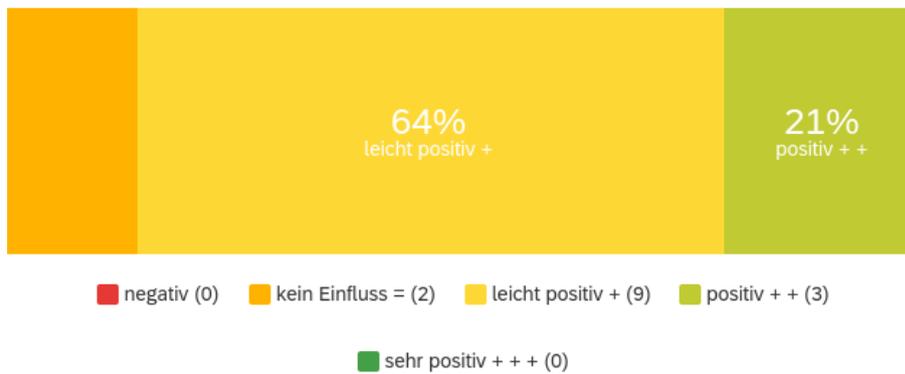
- Wärmepumpen sind noch kostenintensiv im Fahrzeugbereich.
- Das Potenzial und die Einschränkungen dieses Systems sollten untersucht werden, mit pragmatischen Alternativen ausserhalb des Wirkungsbereichs der Wärmepumpen (sehr kalte Temp.).
- Auf den Jahresenergieverbrauch wird es nur einen leichten positiven Effekt auf den Energieverbrauch haben. Stark abhängig von den Umgebungsbedingungen.

8. Einsatz von Türluftschleiern

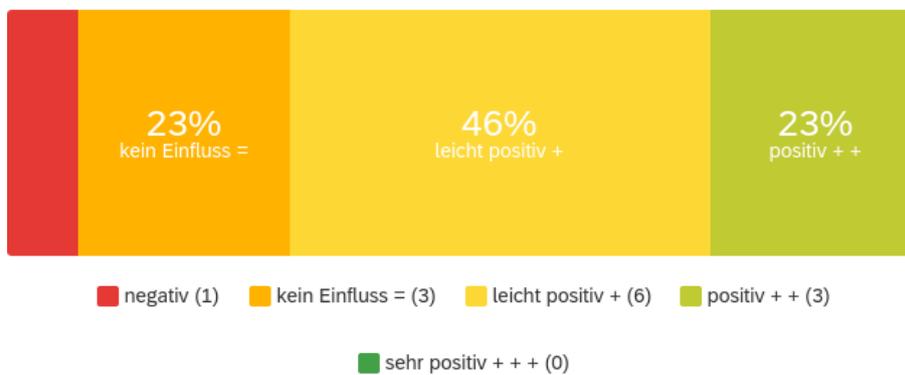
Q16_1 - Aufwand zur Umsetzung



Q17_1 - Einfluss auf die thermische Behaglichkeit



Q17_2 - Einfluss auf die Energieeffizienz

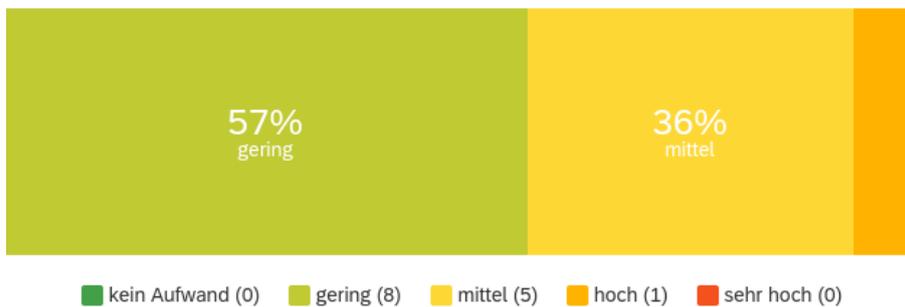


Bemerkungen:

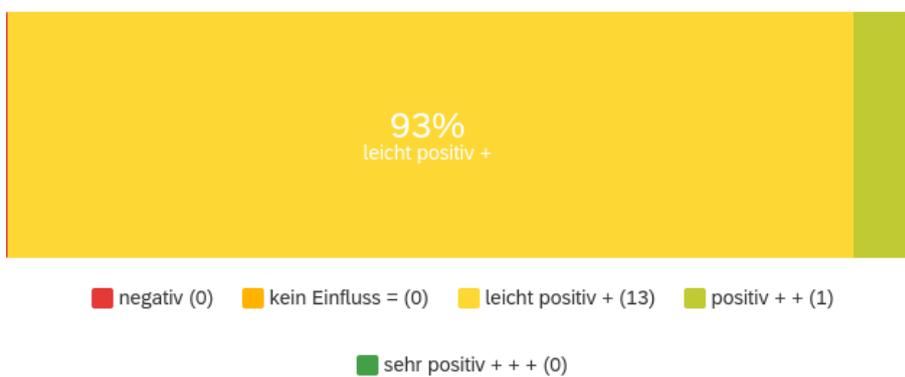
- Lärm beachten
- Siehe Bericht ESÖV2050 P-159 "Leistungsmessung an Bussen mit Türluftschleiern" Franz Sidler - Frank Gubser

9. Analyse, welchen **Einfluss Farben, Materialien, Licht, etc.** auf das thermische Empfinden der Fahrgäste haben

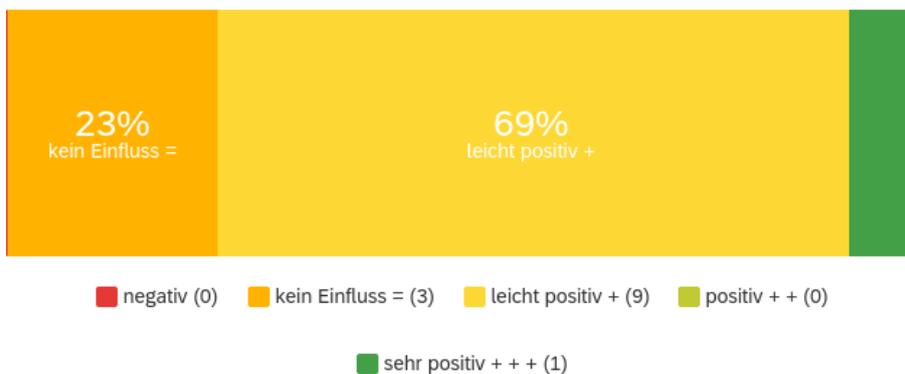
Q20_1 - Aufwand zur Umsetzung entsprechender Massnahmen (bspw. dynamische Beleuchtung)



Q21_1 - Einfluss auf die thermische Behaglichkeit



Q21_2 - Einfluss auf die Energieeffizienz

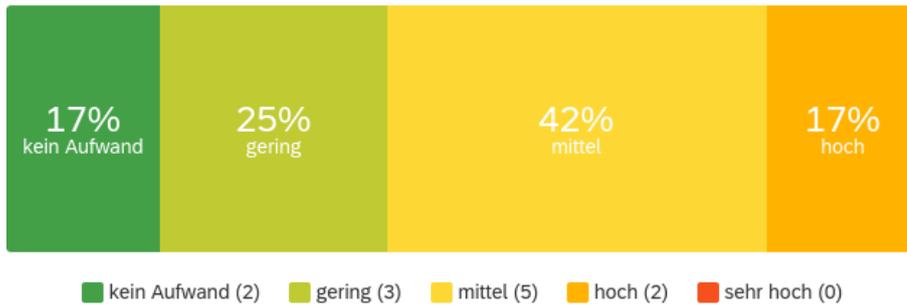


Bemerkungen:

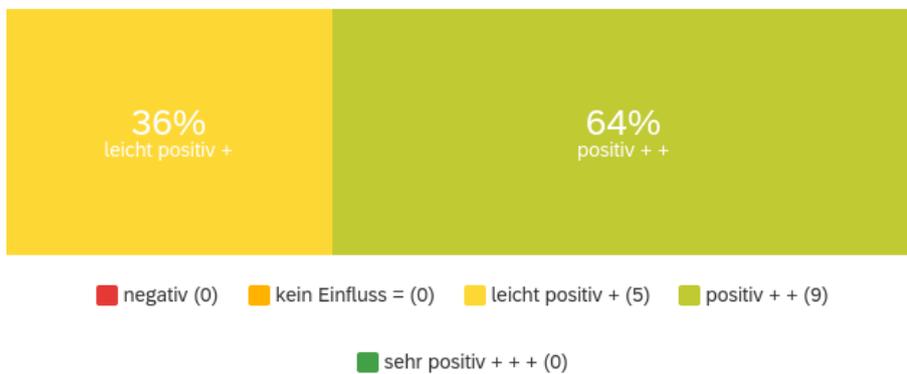
- Erfahrungen wurden bereits gemacht, leicht positiv
- Einfluss auf Energieeffizienz vermutlich gering, da Licht kaum einen grossen Anteil des Energieverbrauches ausmacht (LED)

10. Analyse, welche **Bedeutung die Luftfeuchtigkeit** auf die thermische Behaglichkeit hat

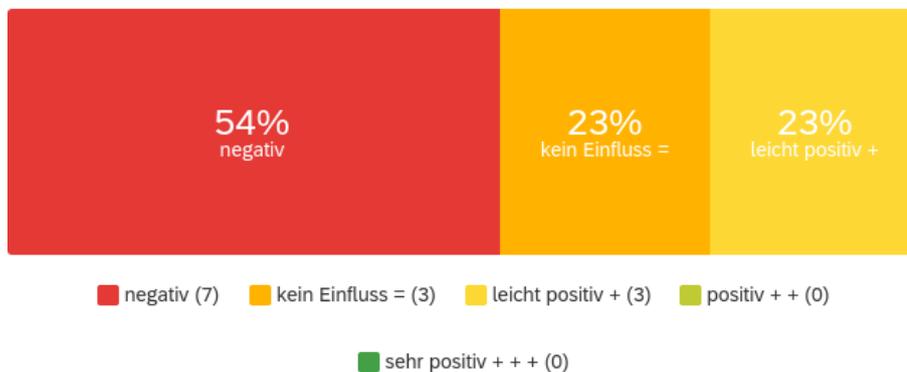
Q22_1 - Aufwand zur Umsetzung entsprechender Massnahmen zur Regulierung der Luftfeu...



Q23_1 - Einfluss auf die thermische Behaglichkeit



Q23_2 - Einfluss auf die Energieeffizienz

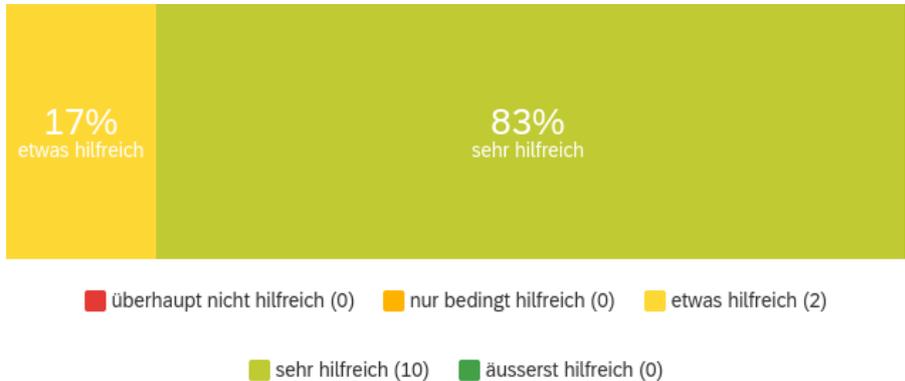


Bemerkungen:

- Vor allem im Sommer wird eine hohe Luftfeuchtigkeit als unangenehm empfunden.
- Wichtiger Punkt, wurde mit Klimaanlage / WP System eigentlich behoben.
- Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit ist eigentlich bekannt.
- Die Luftfeuchtigkeit ist eher ein Problem des Komforts als der Energieeffizienz.

11. Erarbeitung eines **Leitfadens zur thermischen Behaglichkeit** für die Akteure der Branche (u.a. Zusammenspiel zwischen den Parametern der thermischen Behaglichkeit, Massnahmen mit hohem / geringem Einfluss aufzeigen, etc.)

Würden Sie einen solchen Leitfaden als hilfreich empfinden?

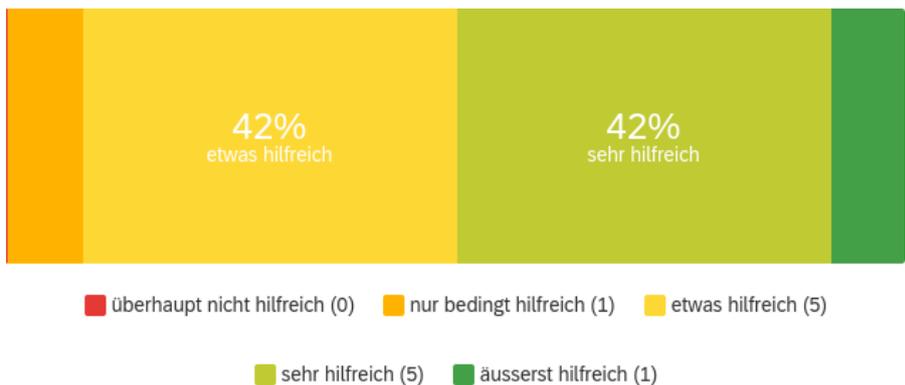


Bemerkungen:

- Das Thema könnte gut angesiedelt sein beim VöV. Auch koordiniert durch BAV und BFE.
- Der Leitfaden muss breit bekannt gemacht werden und der Einbezug der Fahrzeughersteller ist wichtig, damit ein Leitfaden nützlich ist. Es braucht auch einfach umsetzbare Massnahmen. Einfache Prüfverfahren sind ebenfalls relevant.
- Zielgruppe des Leitfadens ist zu definieren (Fahrzeugbesteller, Hersteller, Betreiber, etc.)

12. **Entwicklung eines Tools**, welches die Auswirkungen verschiedener HLK-Massnahmen auf die thermische Behaglichkeit in den Fahrzeugen aufzeigt

Würden Sie ein solches Tool als hilfreich empfinden?



13. Haben Sie **weitere Projektideen**, welche einen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit und die Energieeffizienz haben.

- **Olfaktorische Komponenten**, Düfte könne auch Wärme / Kühle vermitteln, z.B. Zimt im Winter oder Minze im Sommer
- **Abluftwärmerückgewinnung**
- Einsatz von **elektrischen Sonnenrollos**, welche bei Bedarf geschlossen werden oder im Winter bei Sonne bewusst geöffnet werden, um die Strahlungswärme für das wohlbefunden und aufheizen, benutzt werden kann. Wirtschaftlichkeit (Einsparung der Energie) soll über eine Jahressimulation errechnet werden.
- Nutzung des durch die Klimaanlage abgeschiedenen **Kondenswassers zur Kühlung der Aussenhülle** im Sommer (wird m.W. von Stadler bereits teilweise umgesetzt)
- Wie würde ein **thermisch ideales Fahrzeug für die Schweiz** aussehen und was sind seine Eigenschaften?
- Welche Fahrzeugteile verursachen derzeit die meisten unkontrollierten Kältebrücken?
- Wann ist Vorkonditionierung von Fahrzeugen sinnvoll? Wann ist der Einsatz von fossilen Zusatzheizungen sinnvoll?
- Themenkreis Lufthygiene (Keimbelastung, VOC-, CO₂-Konzentration, ...) wird zunehmend an Bedeutung gewinnen, wie die Pandemie-Phase gezeigt hat.
- Sensibilisierung pre-conditioning (müssen die Fahrzeuge wirklich ständig laufen?)
- Getrennter Arbeitsplatz Busfahrer (ähnlich wie Tram)
- Prognosebasierte Steuerung HLK