



SYNTHESEBERICHT

ENERGIEEFFIZIENZ IM BEREICH HEIZUNG, LÜFTUNG, KLIMA UND FAHRZEUGHÜLLE IM ÖFFENTLICHEN VERKEHR



Bildquelle: ©SBB CFF FFS

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

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

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

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

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

Begleitgruppe

BAV: Tristan Chevroulet, Stephan Husen, Stefan Schnell

Geelhaarconsulting GmbH: Rémy Chrétien

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

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

CH-3003 Bern

Programmleiter

Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: 192

Bezugsquelle

Kostenlos zu beziehen über das Internet

<http://www.bav.admin.ch/energie250>

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

Bern, den 11.02.2021

Inhalt

Dank	5
Zusammenfassung.....	6
Résumé sommaire	8
Executive summary.....	10
1. Ausgangslage und Zielsetzung	12
1.1 Ausgangslage.....	12
1.2 Ursprung.....	12
1.3 Ziel der Arbeit	12
2. Exkurs: Behaglichkeit	13
2.1 Behaglichkeitstheorie.....	13
2.2 Anforderungen an die Behaglichkeit.....	17
2.3 Diskussion	20
3. Methodik.....	21
3.1 Behaglichkeitstheorie.....	21
3.2 Analogien zwischen Gebäuden und Fahrzeuge.....	21
3.3 Literaturrecherche.....	21
3.4 Befragungen	22
3.5 Normen und Richtlinien.....	23
3.6 Patentrecherche	23
3.7 Weiteres	23
4. Ergebnisse	25
4.1 Analogien zwischen Gebäuden und Fahrzeug.....	25
4.2 Inventar Forschungsberichte / Kategorisierung.....	27
4.3 Befragungen	28
4.4 Normen / Richtlinien.....	28
4.5 Patentrecherche	29
4.6 Einzelmassnahmen	29
4.7 Kombination von Massnahmen	41
4.8 Übersicht aller dokumentierten Massnahmen.....	42
4.9 Übersicht aller prinzipiell möglicher Massnahmenarten	45
4.10 Qualitative Bewertung der Massnahmen	47
5. Analyse/Diskussion.....	50
5.1 Erkenntnisse aus der wissenschaftlichen Literatur.....	50
5.2 Vergleich Literaturangaben mit Expertenbewertungen.....	50
5.3 Beurteilung der Massnahmen	51
5.4 Einfluss Corona auf Energiesparmassnahmen.....	52
6. Empfehlungen	53
6.1 Empfehlungen für das BAV.....	53
6.2 Empfehlungen für Forschung und Entwicklung.....	55
6.3 Empfehlungen für Transportunternehmen	60

6.4	Empfehlungen für Rollmaterialhersteller	61
6.5	Dissemination der Ergebnisse.....	61
7.	Fazit und Ausblick	63
8.	Literaturverzeichnis.....	64
9.	Anhang.....	65
9.1	Liste gewählter Suchbegriffe.....	65
9.2	Komplettes Verzeichnis der gefundenen Dokumente (alphabetisch nach Titel).....	66
9.3	Interviewprotokolle	78
9.4	Zusammenfassung der zentralen Berichte	82

Dank

Wir bedanken uns beim Bundesamt für Verkehr 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 Tristan Chevroulet, Stephan Husen und Stefan Schnell (alle BAV) sowie bei Rémy Chrétien (geelhaarconsulting) für die vielen konstruktiven Anregungen im Rahmen ihrer Mitarbeit in der Begleitgruppe des Projektes.

Danken möchten wir auch allen Mitarbeitenden verschiedener Transportunternehmen, von Herstellern und Forschungsanstalten, welche uns für Fragen zur Verfügung standen und welche uns mit Informationen und Dokumenten unterstützt haben. Das alles war für diese Arbeit sehr wertvoll.

Zusammenfassung

Im Rahmen der Energiestrategie 2050 des Bundes bekommt die Energieeffizienz im öffentlichen Verkehr zunehmende Bedeutung. Untersuchungen in den letzten Jahren zeigen, dass für die Klimatisierung (HLK: Heizung, Lüftung, Kühlung) der Fahrgasträume bei Fahrzeugen (Bahn, Bus, Tram) rund 20-40% der Energie aufgewendet werden (60-80% der Energie werden für die Traktion benötigt). Das vermutete Sparpotenzial durch Verbesserungen bei der Fahrzeughülle und an der HLK-Technik ist beträchtlich.

Eine der Kernaufgaben der Fahrzeughülle und der HLK-Technik ist die Sicherstellung des Komforts für den Fahrgast. Die Anforderungen an den Komfort werden durch die aus dem Gebäudebereich bekannte Behaglichkeitstheorie mitbestimmt. Diese wird – zusammen mit den Behaglichkeitsanforderungen für verschiedene Fahrzeugtypen – am Anfang des Berichtes in Form eines Exkurses dokumentiert. Neben den Gemeinsamkeiten betreffend Behaglichkeit bestehen beispielsweise auch betreffend Energieeffizienz-Massnahmen einige Analogien zwischen Gebäuden und Fahrzeugen, aber es existieren auch klare Unterschiede betreffend der Machbarkeit, insbesondere bei der Hülle.

In den letzten Jahren wurden vom BAV mehr als ein Dutzend Studien durchgeführt, um den Wissensstand betreffend Massnahmen an Hülle und HLK-Technik zu verbessern. Es werden auf internationaler Ebene noch viel mehr Studien zu diesen Themen erwartet – es fehlt aber eine entsprechende Übersicht. Aus diesem Grund beauftragte das BAV die Hochschule Luzern, einen «Synthesebericht» zu erstellen. Dieser Bericht soll die in den letzten Jahren weltweit durchgeführten Studien sammeln, sichten und bewerten. Die relevantesten Studien betreffend Hülle und HLK werden im Detail analysiert und zusammengefasst. Die Sammlung dieser Zusammenfassungen bildet ein wertvolles Kompendium und kann Basis für zukünftige Arbeiten sein. Der Vollständigkeit halber wurden auch die relevanten Normen und Richtlinien analysiert sowie Patentrecherchen durchgeführt und einschlägige Internetforen konsultiert (die beiden letztgenannten Recherchen blieben weitgehend ergebnislos).

Aus den rund 100 gefundenen Arbeiten liess sich eine Liste von Massnahmen erstellen, die theoretisch untersucht wurden, in Laborsituationen überprüft wurden oder in Realität umgesetzt und analysiert wurden. Dabei kristallisierten sich acht Massnahmen heraus, die mehrmals dokumentiert wurden und zu welchen somit erhärtete Erfahrungen vorliegen. Doch auch bei diesen Massnahmen zeigt sich eine hohe Divergenz bei den Angaben zum Einsparpotenzial und zum Aufwand. Neben der grossen Streuung sind auch viele Lücken vorhanden, die es verunmöglichen, klare Aussagen aus den recherchierten Studien abzuleiten.

Mittels Expertenbefragungen sollten die Kernaussagen aus den gefundenen Studien verifiziert bzw. präzisiert werden. Von 23 befragten Experten nahmen sieben zu den gestellten Fragen Stellung. Leider konnte dadurch die doch eher dürftige Informationsbasis nicht wesentlich verbessert werden. Die grossen Abweichungen zu Potenzial und Aufwand verschiedener Massnahmen bleibt bestehen und stellt ein Problem für die zukünftige Umsetzung weiterer Massnahmen dar.

Die acht am häufigsten genannten Massnahmen mit vermutet hohem Potenzial sind:

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

Allen diesen Massnahmen wird ein Einsparpotenzial von 5-30% zugesprochen, wobei die grossen Differenzen in der Einschätzung sicher auch davon herrühren, dass Fahrzeugtyp, Einsatzart und Aussenklima einen grossen Einfluss auf das realisierbare Potenzial ausüben.

Während in den gefundenen Studien meist Einzelmassnahmen analysiert wurden, wird in der vorliegenden Studie rein qualitativ und einzig auf den Erfahrungen der Autoren basierend analysiert, welche Massnahmenkombinationen sinnvoll sind. Bei den meisten Kombinationen lassen sich die Wirkungen der einzelnen Massnahmen addieren, z.T. verstärkt sich die Wirkung gar und in einigen Fällen findet eine Kompensation statt, sodass die Wirkung kombinierter Massnahmen abgeschwächt wird.

Weiter wurden grundsätzlich denkbare Massnahmen für Energieverbrauchsreduktionen aufgelistet und mit den in der Literatur gefundenen Massnahmen verglichen. Dabei zeigte sich, dass der grösste Teil der grundsätzlich denkbaren Massnahmen bereits mit einer oder mehreren Massnahmen in der Literatur

abgedeckt ist, wenn auch in sehr unterschiedlicher Ausprägung und Qualität. Die qualitative und erfahrungsbasierte Analyse der Wirkung der einzelnen Massnahmen zeigt, wo die grossen Hebel vorhanden sind und wo Massnahmen existieren, die z.B. im Heizfall eine positive, im Kühlfall aber eine negative Wirkung haben.

Basierend auf den Recherchen und Analysen werden diverse Empfehlungen zuhanden BAV, Transportunternehmen und Herstellern gemacht. Zudem wird ein Strauss von möglichen weiteren Arbeiten im Bereich Forschung + Entwicklung zusammengestellt und betreffend Umsetzbarkeit und Potenzial bewertet. Die Forschung + Entwicklung kann bei diesen Arbeiten mit Studien, Analysen und Bewertungen basierend auf Messungen und Simulationen unterstützen und so wertvolle Grundlagen liefern.

Dem BAV kommt bei der Umsetzung der Energiestrategie im öffentlichen Verkehr eine grosse Bedeutung als Förderer aber auch als Wissensdrehscheibe zu. Es wird empfohlen, die Grundlagen für fundierte Entscheide betreffend Energieeffizienzmassnahmen bei Hülle und HLK zu verbessern: Die heute gültigen Anforderungen an den Komfort sind zu überprüfen, die Vergleichbarkeit verschiedener Massnahmen soll verbessert werden, die Abhängigkeit der Energiesparpotenziale von Fahrzeugtyp, Einsatzart sowie Aussenklima soll aufgezeigt werden und mittels Messungen sowie Simulationen müssen die Einsparpotenziale verlässlicher quantifiziert werden.

Zusätzlich wird dem BAV empfohlen, die bereits laufenden Aktivitäten bei der Kommunikation aufrecht zu erhalten oder auszubauen. Neben Erfahrungsaustausch könnten vermehrt auch Hilfsmittel (Checklisten, Merkblätter etc.) vor allem für die kleineren Transportunternehmen erstellt werden oder aber auch ein «Think Tank» zur Generierung von weiteren Ideen installiert werden.

Die Umsetzung von Massnahmen soll vom BAV gefördert werden, indem Anreize geschaffen werden (finanziell, fachliche Unterstützung), die Qualität gesichert wird (z.B. mit einem Label) und die Wirkung der realisierten Massnahmen ermittelt und auch kommuniziert wird («Erfolge feiern»). Die Empfehlungen beziehen sich dabei konsequent auf alle möglichen Interventionszeitpunkte: Fahrzeugbestellung, Betrieb, Refit.

Diese Interventionszeitpunkte sind vor allem für die Transportunternehmen von hoher Relevanz und bei allen können diese einen hohen Einfluss ausüben: Bei der Fahrzeugbestellung durch die Formulierung und Einforderungen messbarer Anforderungen betreffend Energieverbrauch, im Betrieb durch ständige Analyse und Optimierung und im Refit durch die Umsetzung der erfolgversprechendsten Massnahmen (low hanging fruits). Wichtig dabei ist, dass die Mitarbeitenden der Transportunternehmen ihr Wissen stets auf aktuellem Stand halten oder dann fehlendes Wissen extern organisiert wird.

Ein weiterer wichtiger Akteur sind die Hersteller der Fahrzeuge und die Lieferanten der Komponenten. Für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiestrategie ist es wichtig, dass diese in den Wissens- und Erfahrungsaustausch einbezogen werden, damit gemeinsam an zukunftsfähigen, optimierten Lösungen gearbeitet werden kann. Die Relevanz ist gegeben und das vorhandene Potenzial ist gross. Durch die heute schon vielerorts vorhandene Nähe zwischen Amt, Transportunternehmen und Herstellern sowie Forschung + Entwicklung sind beste Voraussetzungen vorhanden, dass die Schweiz hier eine Pionierrolle wahrnehmen kann.

Résumé sommaire

L'efficacité énergétique dans les transports publics devient de plus en plus importante dans le contexte de la stratégie énergétique 2050 du gouvernement fédéral. Des études menées ces dernières années montrent qu'environ 20 à 40 % de l'énergie est utilisée pour la climatisation (CVC : chauffage, ventilation, climatisation) dans les compartiments passagers des véhicules (trains, bus, tramways) (60 à 80 % de l'énergie est utilisée pour la traction). L'on présume que les économies énergétique potentielles grâce à l'amélioration de l'enveloppe du véhicule et de la technologie CVC sont considérables.

L'une des fonctions essentielles de l'enveloppe du véhicule et de la climatisation est d'assurer le confort des passagers. Les exigences en matière de confort sont en partie déterminées par la théorie du confort connue du secteur du bâtiment. Ce sujet, ainsi que les normes de confort pour les différents types de véhicules, sont documentés au début du rapport sous forme de petite incursion. Outre les similitudes en matière de confort, il existe d'autres similitudes entre les bâtiments et les véhicules, par exemple en termes de mesures d'efficacité énergétique, mais il y a aussi de nettes différences.

Ces dernières années, plus d'une douzaine d'études ont été réalisées par l'OFT afin d'améliorer l'état des connaissances concernant les mesures relatives à l'enveloppe et à la technologie CVC dans les véhicules du transport public. De nombreuses autres études sur ces sujets ont été publiées au niveau international - mais il n'existe pas de vue d'ensemble correspondante. C'est pourquoi l'OFT a chargé la Haute école de Lucerne de produire un "rapport de synthèse". Ce rapport a pour but de rassembler, de lire et d'évaluer les études qui ont été réalisées dans le monde entier ces dernières années. Les études les plus pertinentes concernant l'enveloppe et le CVC sont analysées en détail et résumées. La collection de ces résumés constitue un recueil précieux et peut servir de base pour des travaux futurs. Afin de compléter la recherche, les normes et directives pertinentes ont également été analysées, des recherches de brevets ont été effectuées et les forums Internet pertinents ont été consultés (les deux dernières recherches n'ont pas été concluantes).

A partir de la centaine de documents trouvés, une liste de mesures, qui ont été étudiées théoriquement, testées en laboratoire ou mises en œuvre et analysées dans la réalité, a été établie. Huit mesures, qui ont été documentées à plusieurs reprises et pour lesquelles il existe donc une expérience corroborée, ont été identifiées. Toutefois, même avec ces mesures, il existe un degré élevé de divergence dans les informations sur le potentiel d'économies énergétiques et les dépenses. Outre la grande diversité, il existe également de nombreuses lacunes qui rendent impossible de tirer des conclusions claires des études réalisées.

Au moyen d'entretiens avec des experts, les principales conclusions des études trouvées devaient être vérifiées ou précisées. Sur les 23 experts interrogés, sept ont répondu aux questions posées. Malheureusement, cela n'a pas amélioré de manière significative la base d'informations plutôt maigre. Les écarts importants entre le potentiel et le coût des différentes mesures demeurent et posent un problème pour la mise en œuvre future de nouvelles mesures.

Les huit mesures les plus fréquemment mentionnées, dont le potentiel est probablement élevé, sont les suivantes

- Réglage de la température à l'intérieur des véhicules
- Ventilation contrôlée par le CO₂
- Mode «Veilleuse»
- Utilisation d'une pompe à chaleur
- Récupération de la chaleur de l'air évacué
- Commande prédictive de modèle (MPC)
- De meilleures fenêtres (coefficient de transfert de chaleur plus faible)
- Isolation

Toutes ces mesures sont considérées comme ayant un potentiel d'économie de 5 à 30 %, les grandes différences dans l'estimation étant certainement dues au fait que le type de véhicule, le type d'utilisation et le climat extérieur ont une grande influence sur le potentiel réalisable.

Alors que les études ont surtout analysé des mesures individuelles, la présente étude analyse en termes purement qualitatifs, sur la seule base de l'expérience des auteurs, quelles combinaisons de mesures semblent prometteuses. Dans la plupart des combinaisons, les effets des mesures individuelles peuvent être additionnés, dans certains cas l'effet est même accru, et dans certains cas il y a une compensation, de sorte que l'effet des mesures combinées est affaibli.

En outre, des mesures supplémentaires, envisageables pour réduire la consommation d'énergie, ont été énumérées et comparées aux mesures trouvées dans la littérature. Cela a montré que la majorité des mesures en principe concevables sont déjà couvertes par une ou plusieurs mesures dans la littérature, bien qu'à des degrés et avec une qualité très différents. L'analyse qualitative et fondée sur l'expérience de l'effet des différentes mesures montre où se situent les principaux leviers et où existent des mesures qui ont un effet positif dans le cas du chauffage, par exemple, mais un effet négatif dans le cas de la climatisation.

Sur la base des recherches et des analyses, diverses recommandations sont formulées à l'attention de l'OFT, des entreprises de transport et des fabricants véhicules du transport public. Et une variété de tâches possibles dans le domaine de la recherche et du développement est compilée et évaluée en termes de faisabilité et de potentiel. La recherche et le développement peuvent soutenir ce travail par des études, des analyses et des évaluations basées sur des mesures et des simulations et fournir ainsi une base précieuse.

L'OFT joue un rôle important dans la mise en œuvre de la stratégie énergétique dans les transports publics, à la fois comme promoteur et comme centre de connaissances. Il est recommandé d'améliorer la base de décisions concernant les mesures d'efficacité énergétique pour l'enveloppe et le CVC : Les exigences de confort actuellement en vigueur doivent être revues, la comparabilité des différentes mesures doit être améliorée, la dépendance des potentiels d'économie d'énergie par rapport au type de véhicule, au type d'utilisation ainsi qu'au climat extérieur doit être démontrée et les potentiels d'économies énergétiques doivent être quantifiés de manière plus fiable par des mesures et des simulations.

En outre, il est recommandé à l'OFT de maintenir ou d'étendre les activités de communication déjà en cours. Outre l'échange d'expériences, d'autres outils (listes de contrôle, fiches d'information, etc.) pourraient être produits, en particulier pour les petites compagnies de transport public, ou un "groupe de réflexion" pourrait être mis en place pour générer d'autres idées.

L'application des mesures doit être encouragée par l'OFT en créant des incitations (soutien financier, technique), en assurant la qualité (par exemple avec un label) et en déterminant et également en communiquant l'effet des mesures mises en œuvre. Les recommandations font systématiquement référence à tous les points d'intervention possibles : Commande, opération et rénovation des véhicules.

Ces points d'intervention sont très importants, en particulier pour les entreprises de transport public, et ils peuvent avoir une grande influence sur toutes ces entreprises : Dans la commande des véhicules en formulant et en exigeant des standards mesurables en matière de consommation d'énergie, dans l'opération par une analyse et une optimisation constante et dans la rénovation en mettant en œuvre les mesures les plus prometteuses (économiquement et au point de vue efficacité énergétique). Il est important que les employés des entreprises de transport public rafraîchissent leurs connaissances en permanence ou qu'ils engagent des experts externes afin de les aiguiller dans leurs décisions.

Les constructeurs de véhicules et les fournisseurs de composants constituent un autre acteur important. Pour une mise en œuvre réussie de la stratégie énergétique, il est important qu'ils soient inclus dans l'échange de connaissances et d'expériences, afin que nous puissions travailler ensemble sur des solutions durables et optimisées. Le sujet est pertinent et le potentiel existant est grand. La proximité qui existe déjà en de nombreux endroits entre les autorités, les entreprises de transport et les fabricants, ainsi que la recherche et le développement, signifie que les meilleures conditions sont réunies pour que la Suisse joue un rôle de pionnier dans ce domaine.

Executive summary

As part of the federal government's Energy Strategy 2050, energy efficiency in public transport is becoming increasingly important. Studies in recent years show that around 20-40% of the energy is used for air conditioning (HVAC: heating, ventilation, cooling) in the passenger compartments of vehicles (trains, buses, trams) (60-80% of the energy is required for traction). The presumed savings potential through improvements in the vehicle envelope and HVAC technology is considerable.

One of the core tasks of the vehicle envelope and HVAC technology is to ensure passenger comfort. The requirements for comfort are partly determined by the comfort theory known from the building sector. This is documented - together with the comfort requirements for different vehicle types - at the beginning of the report in the form of an excursus. Apart from the similarities regarding comfort, there are also some other similarities between buildings and vehicles (e.g. technology and energy efficiency measures), but there are also clear differences.

In recent years, more than a dozen studies have been carried out by the FOT to improve the standard of knowledge regarding measures for the envelope and HVAC technology. Many more studies on these topics have been conducted at the international level - but there is no corresponding overview. For this reason, the FOT commissioned the Lucerne University of Applied Sciences and Arts to prepare a "synthesis report". This report is to collect, view and evaluate the studies that have been carried out worldwide in recent years. The most relevant studies concerning the envelope and HVAC are analyzed in detail and summarized. The collection of these summaries forms a valuable compendium and can form a basis for future work. For the sake of completeness, the relevant standards and guidelines were also analyzed, patent searches were carried out and relevant Internet forums were scanned (the last two searches were largely inconclusive).

From the 100 or so papers found, a list of measures that had been theorized, tested in laboratory situations or implemented and analyzed in reality was compiled. Eight measures that have been documented several times and are thus based on established experience emerged. But even with these measures, there is a high degree of divergence in the information on savings potential and costs. In addition to the large spread in published results, there are also many discrepancies that make it impossible to derive clear statements from the researched studies.

By means of expert interviews, the core statements from the studies found, were to be verified or made more precise. Of the 23 experts interviewed, seven responded to the survey they were sent. Unfortunately, this did not significantly improve the rather sparse information base found in the scientific literature. The large discrepancies between the potential and cost of various measures remain and pose a problem for the future implementation of further measures.

The eight most frequently mentioned measures with presumably high potential are

- Indoor temperature adjustment
- CO₂-controlled ventilation
- Sleep mode
- Heat pump use
- Exhaust air heat recovery
- Model-predictive control
- Better windows (lower heat transfer coefficient)
- Insulation

All of these measures are considered to have a savings potential of 5-30%, whereby the large differences in the estimates are certainly also due to the fact that vehicle type, type of use and outdoor climate have a large influence on the realizable potential.

Whereas the collected studies mostly analyzed individual measures, the present study analyzes which combinations of measures make sense purely qualitatively and based solely on the experience of the authors. In most combinations, the effects of the individual measures can be added together, in some cases the effect is even strengthened, and in some cases the effects and counter each other and thus reduce the overall energy savings.

Furthermore, further conceivable measures for reducing energy consumption were listed and compared with the measures found in the literature. This showed that most of the measures that are conceivable in principle are already covered by one or more measures in the literature, albeit in very different forms and qualities. The qualitative and experience-based analysis of the effect of the individual measures

shows where the major levers exist and where measures exist that have a positive effect in the case of heating, for example, but a negative effect in the case of cooling.

Based on the research and analysis, various recommendations are made for the FOT, transport companies and manufacturers. And a range of possible further work in the area of research and development is compiled and evaluated in terms of feasibility and potential. Research and development can support this work with studies, analyses and evaluations based on measurements and simulations, and thus provide a valuable basis.

The FOT plays an important role in the implementation of the energy strategy in public transport, both as a promoter and as a knowledge hub. It is recommended to improve the basis for well-founded decisions regarding energy efficiency measures in the envelope and HVAC: The currently valid requirements for comfort should be reviewed, the comparability of different measures should be improved, the dependence of the energy saving potentials on vehicle type, usage as well as the local climate should be shown and the savings potentials must be quantified more reliably by means of measurements and simulations.

In addition, the FOT is recommended to maintain or expand the already ongoing communication activities. In addition to the exchange of experience, more tools (checklists, information sheets, etc.) could be created, especially for the smaller transport companies, or a "think tank" could be installed to generate further ideas.

The implementation of measures should be promoted by the FOT by creating incentives (financial, technical support), ensuring quality (e.g. with a label) and determining and also communicating the effect of the implemented measures ("sharing success stories"). The recommendations consistently refer to all possible intervention points: Vehicle acquisition, operation, retrofit.

These intervention points are of high relevance especially for the transport companies, who can have a high influence on all of them: In vehicle acquisition by formulating and demanding measurable requirements regarding energy consumption, in operation by constant analysis and optimization and in refit by implementing the most promising measures (low hanging fruits). It is important that the employees of the transport companies always keep their knowledge up to date or that missing knowledge is acquired externally.

Another important actor are the manufacturers of the vehicles and the suppliers of the components. For a successful implementation of the energy strategy, it is important that they are included in the exchange of knowledge and experience, so that we can work together on sustainable, optimized solutions. This topic is highly relevant and the existing potential is great. Due to the proximity that already exists in many places between the authorities, transport companies and manufacturers, as well as research and development, the best conditions are in place for Switzerland to play a pioneering role in this area.

1. Ausgangslage und Zielsetzung

1.1 Ausgangslage

Energieeffizienz ist eine der drei Säulen der Energiestrategie 2050 der Schweiz, aber auch zentrales Anliegen in der internationalen Energiepolitik. Die inländische Mobilität ist mit einem Anteil von 28.4% am Gesamtendenergieverbrauch [1] von grosser Bedeutung und somit für Energiesparmassnahmen besonders interessant und relevant. Mit dem Wechsel von der individuellen motorisierten Mobilität auf den öffentlichen Verkehr kann bereits viel Energie eingespart werden. Doch auch im öffentlichen Verkehr besteht grosses Potential durch einen energieeffizienten Betrieb den Energiebedarf weiter zu senken.

Massgebende Energiesparmassnahmen bei der Traktion, also dem Hauptverbraucher in Fahrzeugen des öffentlichen Verkehrs, sind bereits bestens bekannt [2] (Rekuperation von Bremsenergie, energieeffiziente Motoren etc.). Im Bereich der Komfortfunktionen, welche je nach Fahrzeug und Strecke zwischen 10% und 30% des Endenergiebedarfs ausmachen können [3], [4], ist der aktuelle Stand des Wissens und der Technik jedoch etwas intransparenter.

Mit diesem Bericht soll eine Übersicht über Energieeffizienzmassnahmen im Bereich Heizung, Lüftung und Klima (HLK), sowie der Fahrzeughülle in öffentlichen Verkehrsmitteln geschaffen werden.

1.2 Ursprung

Der Komfort in Fahrzeugen hat eine hohe Bedeutung für die Nutzung des öffentlichen Verkehrs. Somit haben auch Systeme, welche diesen Komfort überhaupt erst ermöglichen, eine hohe Bedeutung. Dazu gehört einerseits die Fahrzeughülle (Schutz vor Witterung und Aussenklima) und andererseits die Heizung, die Lüftung sowie die Klimatisierung (Kühlen, Be-/Entfeuchten). Das Thema Energieeffizienz hingegen hatte im öffentlichen Verkehr lange Zeit kaum eine Bedeutung. Als das Thema aufkam, wurde der Fokus lange Zeit vor allem auf die Traktion und die Antriebsenergie gelegt. So wurde vor rund 15 Jahren Prof. Peter Oelhafen von der Universität Basel auf das Thema aufmerksam und initiierte zusammen mit Partnern diverse Messprojekte zum Thema Energieverbrauch der HLK im öffentlichen Verkehr [14]. Die Analyse dieser Messungen zeigte schnell, wo die Hauptverbraucher liegen und es liessen sich – oft in Analogie zur HLK-Technik im Gebäude und in Analogie zur Gebäudehülle – Massnahmen ermitteln, wie die Energieeffizienz verbessert werden könnte. Das BAV förderte in den letzten Jahren viele dieser Projekte im Rahmen der Forschungsförderung zur Effizienzverbesserungen im öffentlichen Verkehr für die Umsetzung der Energiestrategie 2050.

1.3 Ziel der Arbeit

Das Hauptziel der vorliegenden Studie ist eine wissenschaftlich abgestützte Synthese der F+E-Projekte im Bereich HLK und Hülle im öffentlichen Verkehr (Bahn, Bus, Tram) im Zeitraum 2013 bis 2019.

Damit will man die folgenden Ziele erreichen:

- Sammlung der Anforderungsbereiche an die Behaglichkeit und Abgabe von Empfehlungen zur energieeffizienten Umsetzung
- Zusammenstellung eines Inventars von Forschungsarbeiten aus diesem Bereich
- Thematische Gruppierung der Erkenntnisse
- Identifizierung der wichtigsten Massnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz in öV.
- Energiesparpotential für Bahn, Bus und Tram vergleichen und näherungsweise quantifizieren
- Empfehlungen für TU und Rollmaterialhersteller bezüglich des Einsatzes von Massnahmen in unterschiedlichen Stadien des Fahrzeug-Lebenszyklus’.
- Empfehlungen für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Energieeffizienzsteigerung und mögliche Unterstützung durch das BAV.

Basis für die Studie bilden Literaturrecherchen und Experteninterviews, nicht aber eigene Untersuchungen und Analysen.

2. Exkurs: Behaglichkeit

2.1 Behaglichkeitstheorie

Bei der Umsetzung von Energieeffizienzmassnahmen in den Bereichen HLK und Fahrzeughülle ist es essenziell, dass der Zweck dieser Systeme / Bauteile, nämlich die thermische Behaglichkeit bzw. den thermischen Komfort der Fahrgäste zu gewährleisten, immer erfüllt bleibt. Wie diese Anforderungen in öffentlichen Verkehrsmitteln im Detail aussehen beschreibt dieses Kapitel.

2.1.1 Thermische Behaglichkeit

Der Behaglichkeitsbegriff ist sehr vielschichtig und man unterscheidet grundsätzlich vier Bereiche:

- Thermische Behaglichkeit (Temperaturen, Feuchte, Raumluftgeschwindigkeiten, ...)
- Akustische Behaglichkeit (Raumakustik, Schutz vor Aussenlärm, Luft- und Trittschallschutz, ...)
- Optische Behaglichkeit (Blendung, Beleuchtungsstärke, Farben, ...)
- Raumluftqualität (CO₂-Konzentration, Gerüche (VOC), ...)

In diesem Bericht wird auf die thermische Behaglichkeit fokussiert, da diese mehr oder weniger direkt mit der HLK-Technik verknüpft ist und von den physikalischen Eigenschaften der Fahrzeughülle abhängt. Dabei ist zu beachten, dass die Bewertung der thermischen Behaglichkeit keine strengen physikalischen Gesetzmässigkeiten kennt, sondern eine spezifische Situation je nach Individuum als mehr oder weniger behaglich beurteilt wird. Je nach Geschlecht, Alter, Aktivität, Kleidung, Stimmung, Gesundheitszustand etc. gelten für jeden einzelnen Menschen andere Anforderungen an ein maximal behagliches Klima. Zudem verändern sich die Toleranzschwellen betreffend Temperatur, Gerüche, Sauberkeit, Lärm usw. laufend, z.T. auch als Folge unserer Lebensgewohnheiten [5].

Die nachfolgende Theorie der thermischen Behaglichkeit wurde primär für den Aufenthalt in Gebäuden entwickelt. Sie ist aber allgemein anwendbar und kann auch auf Fahrzeuginnenräume übertragen werden. Aus den vielen Einflussfaktoren auf die thermische Behaglichkeit kann keine einheitliche Vorgabe für das Wohlbefinden aller Menschen gefunden werden. Die Behaglichkeit wird wie erwähnt individuell unterschiedlich empfunden. Man spricht daher von einem Behaglichkeitsfeld, in welchem eine Vielzahl von Menschen mit dem Raumklima zufrieden sind. Die wesentlichen Einflussgrössen für ein behagliches thermisches Klima in Räumen werden folgend kurz beschrieben.

Wärmehaushalt des Menschen

Die Wissenschaft hat verschiedene Modelle entwickelt, um den Wärmekomfort von Personen zu beschreiben. Die Parameter, die den Wärmekomfort einer Person beschreiben, basieren auf naturwissenschaftlichen wie statistischen Untersuchungen der thermoregulatorischen Systeme des menschlichen Körpers und sind in der Komfortgleichung von P. O. Fanger [6] zusammengefasst. Das menschliche Wärmeempfinden hängt im Wesentlichen vom thermischen Gleichgewicht der Wärmebilanz des Körpers als Ganzes ab. Dieses Gleichgewicht wird durch körperliche Tätigkeit und Bekleidung sowie durch die Parameter des Umgebungsklimas (Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte) beeinflusst.

Zur Aufrechterhaltung der Körperfunktionen braucht der Mensch eine konstante Körpertemperatur von ca. 37 °C. Die dazu notwendige Wärme wird im Körper kontinuierlich durch einen sog. metabolischen Prozess, der chemische Energie in Wärme verwandelt, nachgeliefert. Andererseits findet zwischen dem menschlichen Körper und seiner Umgebung ein dauernder Wärme- und Feuchteaustausch statt. Zwischen der Wärmeproduktion im Innern des Körpers und dem Wärmeaustausch an der Körperoberfläche mit der Umgebung stellt sich im «thermisch behaglichen Zustand» ein Gleichgewicht ein. Das heisst, dass im Gleichgewichtszustand des Körpers die Wärmestrombilanz ausgeglichen ist. Die Wärmeabgabe ist im Wesentlichen von der Wärmeleitung der Bekleidung, der Konvektion, der Verdunstung und der Strahlung abhängig. Die Anteile der Wärmeabgabe des Körpers ändern sich mit der Umgebungstemperatur. Ab 34°C findet die Wärmeabgabe vollständig als Verdunstung statt. Die Wärmeproduktion im Körper «met» ist das Mass für den energetischen Grundumsatz des Körpers als Funktion der physiologischen Aktivität. Die Aktivitäten mit der entsprechenden Wärmeabgabe einer erwachsenen Person ist in Tabelle 1 aufgeführt.

Aktivität	Grundumsatz (Metabolism) [met]	Wärme- produktion [W/m ²]
ruhig liegend	0.8	47
ruhig sitzend	1.0	58
Sitzende Arbeit (Büro, Wohnung, Schule, Labor...)	1.2	70
entspannt stehend	1.2	70
Leichte Arbeit, stehend (Laden/Einkaufen, Labor, leichte Werkbankarbeit...)	1.6	93
Mittlere Arbeit, stehend (Verkauf, Hausarbeit, Werkstatt, Garage...)	2.0	117
Schwerarbeit/Indoor-Sport (Schwerindustrie, Tanzen, Tennis, Gymnastik...)	3.0	175

Tabelle 1 Aktivität und Wärmeproduktion des Mensch [6]

Bekleidung

Die Bekleidung beeinflusst den Wärmehaushalt des Menschen. Sie stellt die Grenzschicht zwischen Körper und Raumklima dar und hat somit direkten Einfluss auf die thermische Behaglichkeit. Physikalisch wird die Bekleidung durch ihren Wärmedurchlasswiderstand zwischen Haut und Umgebung gekennzeichnet. Der thermische Widerstand wird als «clo»-Wert (clothing) angegeben. Der Isolationsgrad von 1 clo entspricht dem Isolationsgrad einer Bekleidung von einer stillsitzenden Person bei 21 °C, 0.1 m/s Luftgeschwindigkeit bei 50 % relativer Feuchte, was thermisch als komfortabel erachtet wird. Die clo-Werte verschiedener Kleidungen sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Bekleidung	Wärme- widerstand [clo]	Wärme widerstand [m ² K/W]
Nackt	0.0	0.0
Turnbekleidung (Unterwäsche, Shorts, Socken, Turnschuhe, Sandalen)	0.3...0.4	0.05...0.06
Leichte Sommerbekleidung (offenes, kurzes Hemd, lange leichte Hose)	0.5	0.078
Leichte Arbeitskleidung langarm Hemd, Arbeitshose)	0.6...0.7	0.095...0.11
Feste Arbeitskleider/Hausbekleidung Winter (langarm Hemd, Hose, leichte Jacke/Pullover)	1.0	0.16
Schwere Arbeitskleidung, Weste, Jacke	1.3	0.21
Kleidung für kaltes Wetter mit Mantel	1.6...2.0	0.25...0.3
Kleidung für kältestes Wetter	3.0...4.0	0.45...0.6

Tabelle 2 Wärmewiderstand der Bekleidung [6]

Anmerkung: Während in Gebäuden in einem Raum meist davon ausgegangen werden kann, dass Aktivität und Bekleidung der anwesenden Personen sehr ähnlich sind, sind in Fahrzeugen vor allem bei der Bekleidung grössere Abweichungen von einem Mittelwert zu erwarten. Dies erklärt mitunter die erhöhte Komplexität, wenn in Fahrzeugen ein für möglichst viele Personen behagliches Klima gewährleistet werden soll.

Temperaturen

Personen fühlen sich bei normalen Raumtemperaturen von 20 bis 22 °C bei einer Feuchte zwischen 35 % bis 65 % wohl. Thermische Behaglichkeit entsteht aus dem Zusammenspiel zwischen der Raumlufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur aller den Raum begrenzenden Flächen. Der Wärmeabfluss unseres Körpers erfolgt durch Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung. Unser Temperaturempfinden hat deshalb nicht nur mit der Raumlufttemperatur, sondern auch mit den inneren Oberflächentemperaturen des Raums zu tun. Die in einem Raum empfundene Temperatur (operative Temperatur) entspricht näherungsweise dem Mittel aus der Raumlufttemperatur und der mittleren Oberflächentemperatur der Raumumschließungsflächen. Fanger [6] zeigte, dass bezüglich des Raumklimas die relative Luftfeuchtigkeit nur einen geringen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit hat. Wird die Wirkung der Luftgeschwindigkeit vernachlässigt, lässt sich das Raumklima durch die beiden Werte der Lufttemperatur und der Strahlungstemperatur durch die operative Temperatur beschreiben. Abhängig von der Aktivität (spezifische Wärmeabgabe) und der Bekleidung (Wärmedämmwert) kann eine operative Raumtemperatur, bei der 95% der Personen das Raumklima bei einer relativen Luftfeuchte zwischen 30 % und 70 % und Luftgeschwindigkeit von weniger als 0.1 m/s als neutral empfinden wird, aus Abbildung 1 entnommen werden. Berechnungen und Grafiken mit anderen Anteilen an zufriedenen Personen sind ebenfalls vorhanden [7].

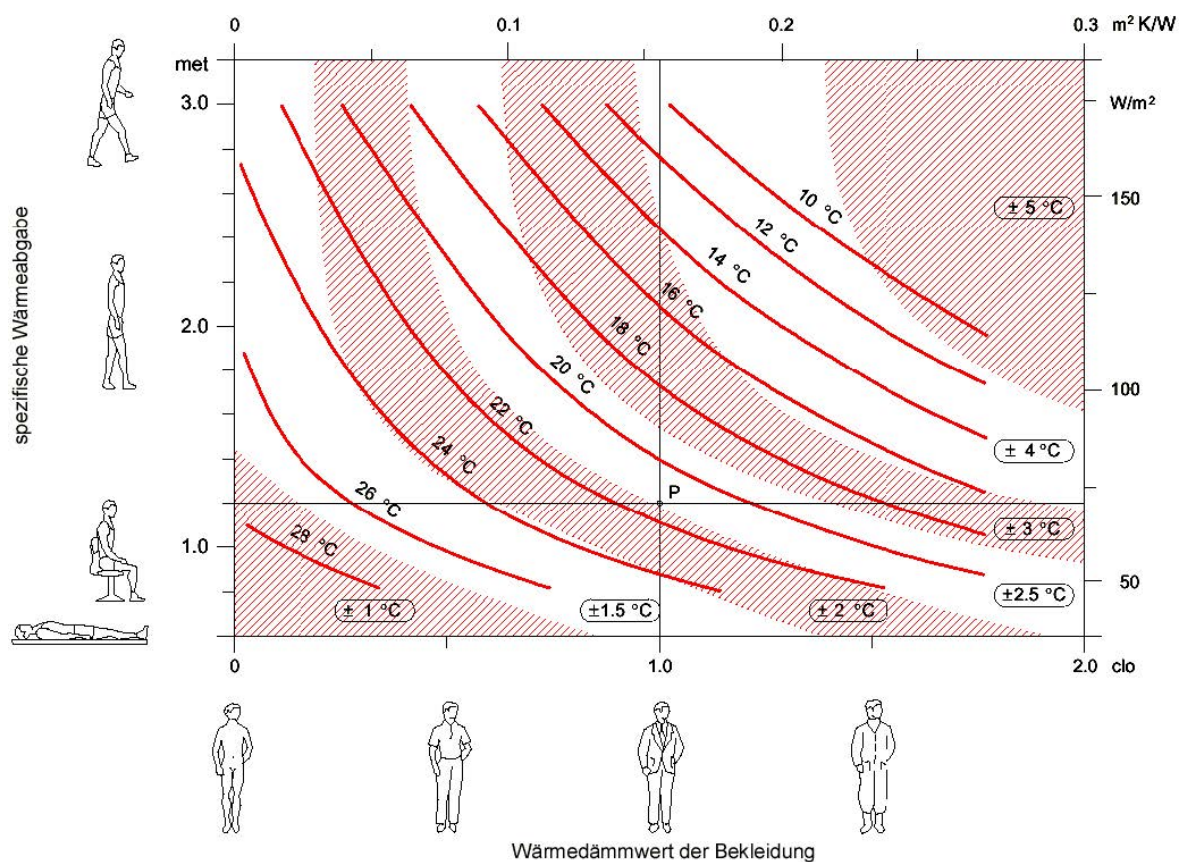


Abbildung 1 Optimale Raumtemperatur in Abhängigkeit von Aktivität und Bekleidung (Quelle: [8])

Anmerkung: Eine angenehme Raumtemperatur wird massgeblich auch von der mittleren Strahlungstemperatur der raumumgebenden Flächen beeinflusst. Im Gebäude mit gut bis sehr gut gedämmten Aussenwänden ist die Oberflächentemperatur der Wände meist sehr nahe bei der Raumlufttemperatur, einzig bei den Fenstern sind merklich tiefere Temperaturen feststellbar. In Fahrzeugen mit vergleichsweise schlecht gedämmten Aussenhüllen und grossen Fensterflächen weicht die Strahlungstemperatur der raumumschliessenden Flächen meist merklich von der Lufttemperatur im Fahrgastraum ab. Dies erklärt die – im Vergleich zu Gebäuden – oft weniger behagliche Situation in Fahrzeugen, bzw. die nötigen hohen Raumlufttemperaturen, um eine angenehme Raumtemperatur zu erzeugen.

Luftbewegung

Die Luftbewegung hat einen grossen und meist negativen Einfluss auf die Behaglichkeit. Darum sollen die Luftgeschwindigkeiten im Raum immer möglichst tief gehalten werden – ausser wenn bewusst «Durchzug» gemacht werden soll, z.B. bei überhöhten Raumtemperaturen. Kritisch sind Luftbewegungen aus einer bestimmten Richtung mit geringerer Temperatur als die Raumluft. Diese Luftbewegung wird Zugluft genannt und ist eine der häufigsten Ursachen von Unzufriedenheit, oft verursacht von Lüftungsanlagen oder durch offene Fenster und Türen. Da in geheizten und belüfteten Räumen weder vertikal noch horizontal eine homogene Raumtemperatur vorhanden ist, herrscht keine stabile Luftströmung in diesen Räumen. Abhängig vom Heizungs- und Kühlsystem oder Temperaturunterschieden bei den verschiedenen Oberflächen entstehen vertikale Temperaturunterschiede, welche das Wohlbefinden beeinflussen. Die Schwankungen der Luftströmungen können gemessen werden und mittels Berechnung kann der Turbulenzgrad der Luftströmung berechnet werden. Störende Luftbewegungen entstehen auch infolge freier Konvektion an Bauteilen mit grösseren Temperaturunterschieden wie z.B. an einer kalten Fensteroberfläche. Diese Luftbewegung wird Kaltluftabfall genannt. Interne Wärmelasten verstärken die Luftbewegung im Raum wodurch die Kaltluftströmung an den Aussenwänden und insbesondere am Fenster verstärkt werden. Die Strömung wird am Boden gegen das Rauminnere umgelenkt und kann nahe dem Fenster zu unangenehmem Luftzug im Fussbereich führen.

Anmerkung: Zugluft kann in Fahrzeugen ein ausgeprägtes Problem sein, vor allem durch das Öffnen der Türen verursacht. Aber auch die vergleichsweise kühlen Oberflächen der Hülle, insbesondere der Fenster können zu Zugluft führen – auch wenn die Lüftungsanlagen meist so konzipiert sind, dass sie durch die Führung der Zuluft dem Kaltluftabfall an den Fenstern entgegenwirken.

Luftfeuchtigkeit

Im Bereich 20°C hat die Luftfeuchtigkeit einen geringen Einfluss auf das Wohlbefinden, da in diesem Bereich der Körper wenig Wärme als Verdunstung abgibt. Bei hohen Raumtemperaturen steigt die Wärmeabgabe als Verdunstung womit die Raumfeuchte einen zunehmend dominierenden Einfluss auf die Behaglichkeit ausübt.

Anmerkung: Die Raumluftfeuchte in Fahrgasträumen weist eine höhere Dynamik auf als in Gebäuden. Dies einerseits aufgrund des teilweise starken Feuchteintrages durch die zusteigenden Personen (nasse, feuchte Kleider, Regenschirme etc.) aber auch durch die höhere Dynamik des Umgebungsklimas (Tunneldurchfahrten, Durchfahren von verschiedenen Klimaregionen in kurzer Zeit)

Behaglichkeitsbewertung

Zur Festlegung eines thermischen Behaglichkeitszustandes dienen die vier Grössen «Lufttemperatur», «mittlere Wandoberflächentemperatur», «Luftgeschwindigkeit» und «Luftfeuchte». Mit den weiteren Einflussgrössen von Aktivitätsgrad, Bekleidung und der Strahlungstemperatur der umliegenden Wände kann die Behaglichkeit nach ISO 7730 [7] berechnet werden. Die Ergebnisse beruhen auf einer statistisch an über 1'000 Personen ermittelten Formel mit einem Ergebnis auf der thermischen Empfindungsskala PMV (predicted mean vote; erwartete durchschnittliche Empfindung). Die Empfindung ist in sieben Punkte von kalt (-3) bis warm (+3) eingeteilt. Das PPD (predicted percentage of dissatisfied; erwartete durchschnittliche Unzufriedenheitsrate) wird aus dem PMV berechnet. Der Zusammenhang des empfundenen Raumklimas ist in Abbildung 2 als vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener (PPD) als Funktion des vorausgesagten mittleren Votums (PMV) dargestellt.

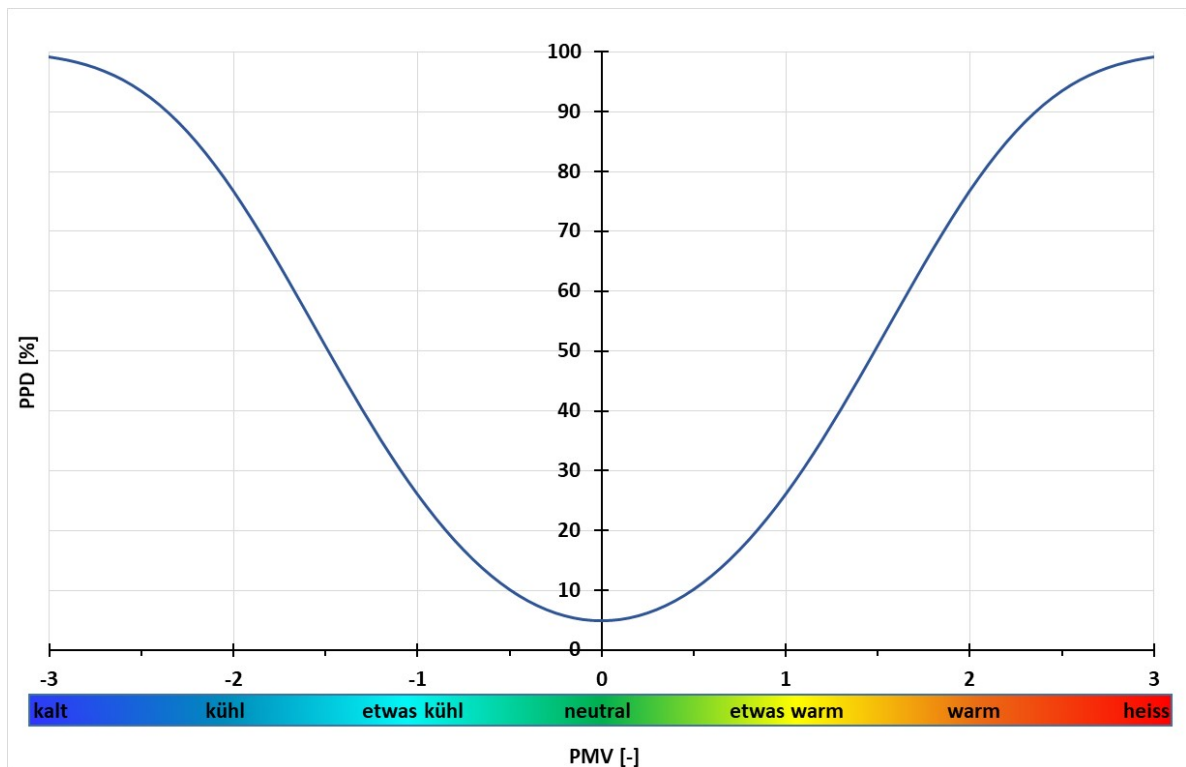


Abbildung 2 Zusammenhang PPD und PMV

2.2 Anforderungen an die Behaglichkeit

Normen und Regelwerke unterscheiden generell zwischen Schienen- und Strassenverkehr. Daher werden die Anforderungsbereiche für Bahn und Tram auch in diesem Kapitel getrennt von den Anforderungsbereichen für Busse behandelt.

2.2.1 Schienenverkehr

Beim Schienenverkehr unterscheiden die Normen generell zwischen drei Typen von Aufenthaltsbereichen:

- Fahrgastraum im Fernverkehr
- Fahrgastraum im Nahverkehr
- Führerraum

Die Verweildauer in diesen drei Aufenthaltsbereichen unterscheidet sich signifikant. Folglich definieren die Normen- und Regelwerke unterschiedliche Behaglichkeitsanforderungen.

Fernverkehr

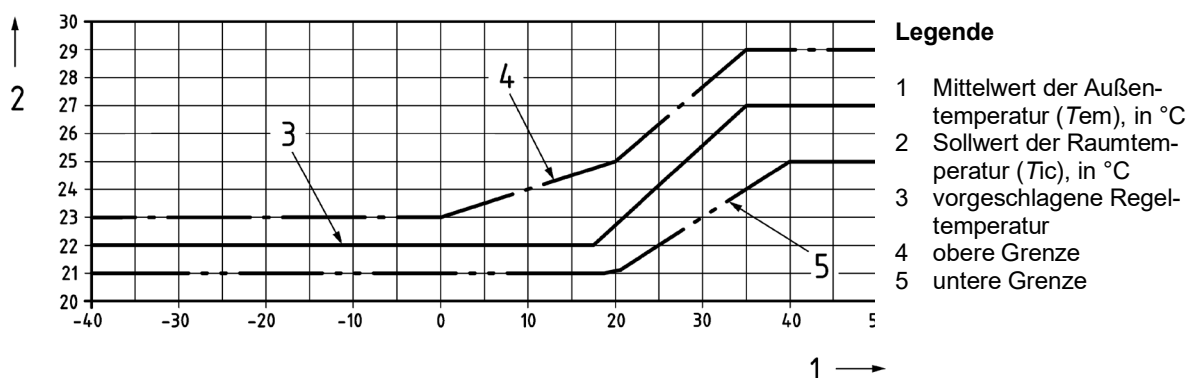


Abbildung 3: Vorgeschlagene Regelkurve und Grenzen für die Raumtemperatur im Fernverkehr

Die europäische Norm EN 13129 (Version 2016, Kapitel 9.2, S 18) gibt Regeltemperaturen im Fahr-
 gastraum von Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs vor.

Dabei ist zu erwähnen, dass die Temperaturen an unbeheizten Oberflächen bis zu 16 K (z.B. Fenster-
 rahmen) von der vorgegebenen Lufttemperatur im Fahrzeuginneren abweichen dürfen. Für die Decke
 gibt es keine Vorgabe dieser Art. Die Norm gibt auch vor, wie diese Werte (Tem, Tic, etc.) bei Tests in
 Luftkanälen zu messen sind.

Im Stillstand zu messen sind hingegen die Wärmedurchgangskoeffizienten (k-Werte) der Fahrzeuge.
 Abhängig von der geographischen Zone und davon ob die Fahrzeuge einstöckig oder zweistöckig sind,
 dürfen die k-Werte der Aussenhülle maximal 1.2 bis 2.5 W/m²K erreichen. Für den g-Wert der Fenster
 gilt der Maximalwert von 0.6.

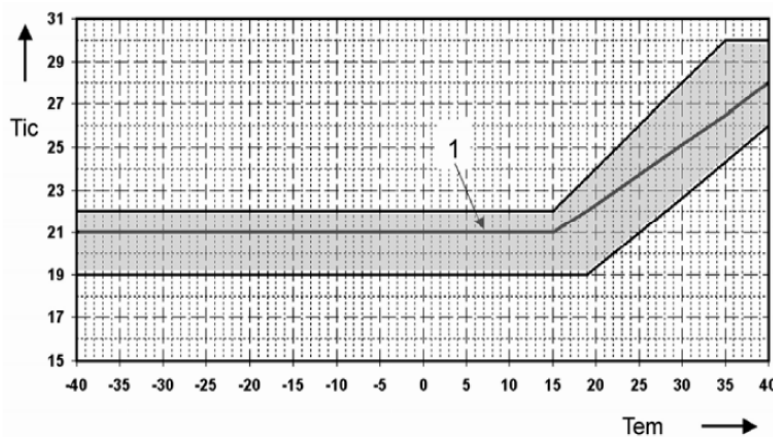
Nahverkehr

Die europäische Norm EN 14750-1 unterscheidet für den Nahverkehr zwischen zwei Fahrzeugkatego-
 rien:

	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

Tabelle 3: Kriterien für die Aufteilung von Schienenfahrzeugen im Nahverkehr in die Kategorien A und B (gemäss
 EN14750-1)

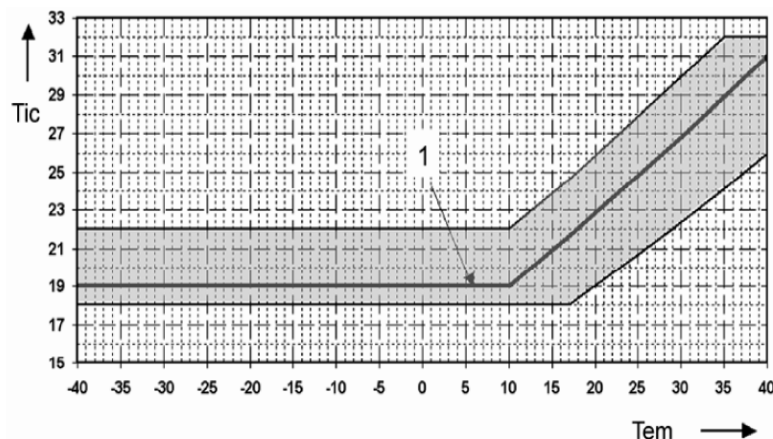
Die Norm gibt für diese zwei Fahrzeugkategorien unterschiedliche Komfortbereiche für die Raumluft-
 temperatur an. Die Abweichung der Temperatur der inneren Oberflächen von diesem Komfortbereich
 darf für Fahrzeuge der Kategorie A maximal 10 K und für Fahrzeuge der Kategorie B maximal 13 K
 betragen.



Legende

- Tem Mittelwert der Aus-
sentemperatur, in °C
- Tic Sollwert der Raum-
lufttemperatur, in °C
- 1 Empfohlener Wert für
die Raumlufttempera-
tur

Abbildung 4: Regelkurve für den Sollwert der Raumlufttemperatur in Fahrzeugen der Kategorie A



Legende

- Tem Mittelwert der Aus-
sentemperatur, in °C
- Tic Sollwert der Raum-
lufttemperatur, in °C
- 1 Empfohlener Wert für
die Raumlufttempera-
tur

Abbildung 5: Regelkurve für den Sollwert der Raumlufttemperatur in Fahrzeugen der Kategorie B

Wichtig zu vermerken ist auch, dass gemäss dieser Norm die minimale Frischluftmenge für Fahrzeuge der Kategorie A 15 m³/h/Person und für Fahrzeuge der Kategorie B 12 m³/h/Person betragen muss.

Die deutsche VDV-Schrift 181 kann als Interpretationswerk der EN 14750 verstanden werden und spezifiziert die in der EN 14750 vorgegebenen Normen für verschiedene Regionen Deutschlands. Zudem relativiert die VDV-Schrift die durch die EN vorgegebenen Anforderungen und diskutiert in welchen Belangen weniger leistungsstarke Anlagen den Komfortanforderungen auch genügen würden. Zum Beispiel gibt die VDV-Schrift an, dass leistungsschwächere Kühlanlagen als die EN sie angibt in vielen Zonen Deutschlands ausreichen und Tic = Tem im Sommer noch immer eine akzeptable Komfortanforderung darstellt, da die Luft im Fahrzeuginnenraum in aller Regel entfeuchtet ist, was schon entscheidend zur thermischen Behaglichkeit beiträgt. (VDV-Schrift 181, Absatz 3.2.3)

Auch im Bereich Wärmedurchgangskoeffizienten (k-Wert) unterscheiden sich die beiden Normen leicht. Während die EN 14750-1 abhängig von der Fahrzeugkategorie und geographischen Zone maximale Wärmedurchgangskoeffizienten von 2.0-3.5 W/m²K vorgibt, verlangt die VDV 181 lediglich, dass die k-Werte der Aussenwände berechnet werden. Bei den g-Werten für Fenster verlangt die EN 14750-1 einen Maximalwert von 0.7 und die VDV-Schrift deutet darauf hin, dass eine Reduktion des Wertes bei einer Sanierung in Betracht gezogen werden soll.

Führerräume

Die europäische Norm EN 14813-1 unterscheidet für die Führerstände ebenfalls zwischen zwei Kategorien von Räumen:

	Kategorie A	Kategorie B
Netto Raumvolumen	≥ 9 m ³	< 9 m ³
Durchschnittliche kontinuierliche Arbeitszeit	> 60 min	≤ 60 min

Tabelle 4: Kriterien für die Aufteilung von Führerständen von Schienenfahrzeugen in die Kategorien A und B (gemäss EN14813-1)

Bei den niedrigsten Aussenlufttemperaturen im Winter müssen in den Führerständen Temperaturen von mindestens 18°C erreicht werden können. Bei den höchsten Aussenlufttemperaturen im Sommer dürfen die Temperaturen in Führerständen der Kategorie A je nach Klimazone maximal 27°C, 26°C oder 22°C und in Führerständen der Kategorie B je nach Klimazone maximal 30°C, 28°C oder 24°C erreichen.

Die Norm gibt für Führerstände nur dann spezifische Solltemperaturen vor, wenn aussentemperaturgeführte Temperaturregeleinrichtungen installiert sind. In diesem Fall muss der Sollwert der Raumlufttemperatur folgender Gleichung folgen:

$$\begin{aligned} \text{Tic} &= 20^\circ\text{C} + \Delta\text{Tic} + 0.4 (\text{Tem} - 20^\circ\text{C}) && \text{für } \text{Tem} \geq 20^\circ\text{C}; \\ \text{Tic} &= 20^\circ\text{C} + \Delta\text{Tic} && \text{für } \text{Tem} < 20^\circ\text{C}; \end{aligned}$$

Tem: Mittlere Aussenlufttemperatur, in °C

Tic: Sollwert der Raumlufttemperatur, in °C

ΔTic: Vom Fahrer gewählter Offset des Sollwertes der Raumlufttemperatur, in K [+ 4 K; - 2 K].

Falls keine aussentemperaturgeführte Temperaturregeleinrichtung installiert ist, wird dem Fahrer die Möglichkeit gegeben den Sollwert der Raumlufttemperatur zwischen 18 °C und 26 °C frei einzustellen.

Zu erwähnen ist ausserdem, dass die minimale Frischluftmenge in Führerständen bei 30 m³/h/Person liegt. Zudem gibt die EN 14813-1 klimazonenabhängige maximale Wärmedurchgangskoeffizienten für die Führerstände vor. Diese liegen je nach Kategorie und Klimazone bei 3.5-1.6 W/m²K.

Der Gesamttransmissionsfaktor (g-Wert) der Fenster wird durch die Norm auf 0.7 beschränkt.

2.2.2 Strassenverkehr

Die VDV-Schrift 236 gibt ein Behaglichkeitsfeld für Busse vor. Anbieter haben nach Vorgaben der Schrift die Aufgabe zwei Kennlinien zu definieren:

1. Eine Komfort-Kennlinie (Heizen im Bereich der oberen Kennfeldgrenze, Kühlen im Bereich der unteren Kennfeldgrenze) für Verkehre mit längeren Reiseweiten.

2. Eine Economy-Kennlinie (Heizen im Bereich der unteren Kennfeldgrenze, Kühlen im Bereich der oberen Kennfeldgrenze) für Verkehre mit geringeren Reiseweiten/kürzerer Aufenthaltsdauer.

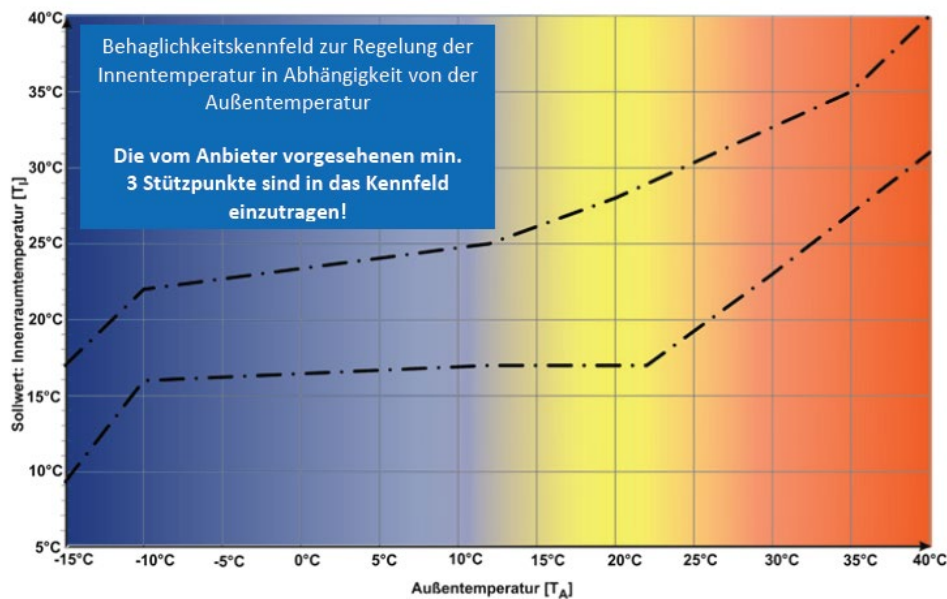


Abbildung 6 Behaglichkeitskennfeld nach VDV- Schrift 236

Die Schrift schreibt zudem vor, dass die Betriebsfähigkeit bis zu einer Aussentemperatur von 45°C gewährleistet sein muss.

2.3 Diskussion

Die Zusammenstellung der Behaglichkeitstheorie zeigt, dass primär aus dem Gebäudebereich gute Grundlagen zur Beschreibung der Anforderungen für ein behagliches Innenraumklima vorhanden sind. Einige dieser Anforderungen aus Tabelle 7 können aus dem Gebäudebereich auf den Fahrzeugbereich übertragen werden, dabei ist aber zu beachten, dass die Situation im Fahrzeug typischerweise viel heterogener ist. Das zeigt sich auch in den spezifischen Behaglichkeitsanforderungen für Fahrzeuge: Diese sind unspezifischer und z.T. auch unvollständiger als im Gebäudebereich, versuchen aber den unterschiedlichen Einsatzarten der Fahrzeuge und weiteren spezifischen Eigenschaften aus dem Fahrzeugbereich Rechnung zu tragen.

Wichtig ist festzuhalten, dass an der Behaglichkeit bzw. an der Erfüllung der Behaglichkeitsanforderungen keine Abstriche gemacht werden dürfen. Allerdings gibt es Energieeffizienz-Massnahmen, welche die Behaglichkeit gleichzeitig verbessern (z.B. Senkung der Innentemperatur im Winter, Erhöhung der Innentemperatur im Winter, bessere Verglasungen welche zu höheren Oberflächentemperaturen führen etc.).

Wie im Gebäude gilt auch im Fahrzeug der Grundsatz, dass die Einhaltung der Anforderungen an die Behaglichkeit primär durch die Fahrzeughülle zu gewährleisten ist. Erst wo die Fahrzeughülle nicht mehr in der Lage ist, diese Anforderungen zu erfüllen oder wo dies nur noch mit verhältnismässigem Aufwand möglich wäre, soll die Technik das Manko kompensieren. Massnahmen an der Hülle sind langfristig meist effizienter und effektiver als Massnahmen bei der Technik (bei neuen Fahrzeugen). Bei bestehenden Fahrzeugen dürfte sich Aufwand vs. Ertrag tendenziell zu Gunsten der Technik verschieben.

3. Methodik

Es ist bekannt, dass in der Schweiz und auch auf internationaler Ebene diverse Arbeiten und Studien durchgeführt wurden zur Steigerung der Energieeffizienz der HLK und der Hülle im öffentlichen Verkehr. Es fehlt aber eine Übersicht und eine systematische Analyse. Deshalb sollen im Rahmen dieses Projektes die wesentlichen Studien gefunden, kategorisiert, analysiert und bewertet werden. Aus dieser Übersicht soll weiterer Forschungsbedarf ermittelt und umschrieben werden.

Zur Erarbeitung dieser Übersicht werden Literaturrecherchen durchgeführt, es werden Experten befragt, es werden einschlägige Normen konsultiert und es wird eine Patentrecherche durchgeführt. Die verschiedenen angewendeten Methoden werden nachfolgend kurz beschrieben. Als Einstieg wurde bereits die Theorie der thermischen Behaglichkeit beschrieben (siehe Kapitel 2). Anschliessend an die Recherchen und Befragungen werden die am häufigsten genannten bzw. die potentesten Massnahmen etwas detaillierter erläutert, analysiert und beurteilt (Kapitel 4). Abschliessend werden Empfehlungen formuliert (Kapitel 5 und 6) und ein Ausblick gemacht (Kapitel 7).

3.1 Behaglichkeitstheorie

Für den behaglichen Aufenthalt von Personen in Gebäuden existiert eine umfassende Theorie, welche in Fachpublikationen aber auch in Normen und Richtlinien umfassend definiert und dokumentiert ist. Für die vorliegende Studie wurde die Theorie aus dem Gebäudebereich auf den öffentlichen Verkehr transferiert und in einem einleitenden Exkurs entsprechend kommentiert. Dabei wird auf die thermische Behaglichkeit fokussiert, da diese im Zentrum der HLK-Technik und der Hülle liegt. Siehe Exkurs Kapitel 2.

3.2 Analogien zwischen Gebäuden und Fahrzeuge

Es ist bekannt, dass zwischen Gebäuden und Fahrzeugen grosse Analogien bestehen, dass es aber auch wesentliche Unterschiede gibt. Sollen erprobte Massnahmen aus dem Gebäudebereich auf Fahrzeuge übertragen werden, müssen Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen Gebäuden und Fahrzeugen im Detail bekannt sein. Im Rahmen dieser Arbeit werden die wichtigsten Punkte auf Basis der Einschätzung der Autoren tabellarisch aufgelistet.

3.3 Literaturrecherche

3.3.1 Suchmaschinen / Forschungsplattformen / Verweise

Als Ausgangspunkt zur Recherche wurde eine Liste mit relevanten Suchbegriffen (Anhang 9.1) erstellt. Diese wurden verwendet, um systematisch die folgenden online-Repositorien für wissenschaftliche Arbeiten zu durchsuchen:

- SwissBib Online Katalog aller Bibliotheken von Schweizer Universitäten und Forschungsinstituten (national)
- Elsevier Verlag für wissenschaftliche Literatur (international)
- Researchgate Online-Netzwerk für Wissenschaftler (international)
- Google Scholar Suchmaschine für wissenschaftliche Literatur (international)

Neben diesen Repositorien wurden die Webseiten unterschiedlicher Transportunternehmen (SBB, Zentralbahn, BLS etc.) und Rollmaterialhersteller (Stadler, Alstom, Bombardier etc.) nach Forschungsartikeln und wissenschaftlichen Berichten durchsucht.

Auf Basis dieser ersten Sammlung wissenschaftlicher Literatur wurden die dort vermerkten Referenzen auf weitere relevante Arbeiten erfasst und recherchiert. Wo möglich wurden diese Arbeiten beschafft, zur Literaturliste hinzugefügt und deren Referenzen wiederum recherchiert. Dieser Prozess wurde iteriert, bis keine neuen relevanten wissenschaftlichen Arbeiten mehr zur Literaturliste hinzugefügt werden konnten.

3.3.2 Bewertung und Klassifizierung

Die Relevanz der wissenschaftlichen Artikel und Berichte im Zusammenhang dem Thema dieses Syntheseberichts wurde in einem ersten Schritt anhand der einleitenden Zusammenfassung, Grafiken und Tabellen bewertet. Durch diese Beschränkung auf die zentralen Elemente konnten die relevantesten Artikel effizient aus der Literaturliste herauskristallisiert werden. Die Relevanz wurde dabei numerisch auf einer Skala von 1 bis 5 bewertet. Da die Berichte und Artikel sich in ihrer Form teilweise stark von-

einander unterschieden, ist es schwierig konsistente Kriterien für die Beurteilung der Relevanz zu definieren. Die Beurteilung basiert daher auf der Einschätzung der Autoren. Grob kann die Skala folgendermassen interpretiert werden.

Bewertung	Übliche inhaltliche Komponenten
5	Quantifizierung des Einsparpotentials oder Kosten von mindestens einer Energieeffizienzmassnahme im Bereich HLK oder Hülle von Tram, Bus oder Bahn.
4	Detaillierte qualitative Beschreibung von mindestens einer in der Recherche erstmalig auftauchenden Energieeffizienzmassnahme im Bereich HLK oder Hülle von Tram, Bus oder Bahn.
3	Qualitative Beschreibung von mindestens einer Energieeffizienzmassnahme im Bereich HLK oder Hülle von Tram, Bus oder Bahn, die zuvor bereits durch eine andere Publikation erfasst wurde.
2	Grober Bezug zu Energieeffizienzmassnahmen in öffentlichen Verkehrsmitteln
1	Grober Bezug zu Verkehrsmitteln und Energieeffizienz

Tabelle 5 Bewertung Skala der wissenschaftlichen Artikel

Alle Studien wurden zudem (unabhängig von der Bewertung der Relevanz) wie folgt kategorisiert:

- Herkunft der Studie: International – National – BAV Projekt
- Verkehrsmittel: Bahn – Bus – Tram
- Thema: HLK – Hülle – Behaglichkeit

Zusätzlich wurde in der Literaturliste auch stichwortartig vermerkt, welches Thema im Artikel oder Bericht zentral ist (Bsp. Abwärmenutzung, Behaglichkeit, Fenster etc.)

3.3.3 Sichtung der relevantesten Studien

Im zweiten Schritt wurden die Artikel und Berichte mit einer Relevanzeinschätzung von 4 oder 5 gänzlich gelesen und zusammengefasst. Sie bilden die zentrale Grundlage für die weitere Analyse der bekannten Energieeffizienzmassnahmen im Bereich HLK und Hülle von öffentlichen Verkehrsmitteln. In der Zusammenfassung wurde dabei ein zentrales Augenmerk auf beschriebene Energieeffizienzmassnahmen und deren quantifiziertes Einsparpotential gelegt. Dieses Einsparpotential kann sowohl in kWh als auch monetär (z.B. in CHF) ausgedrückt werden. Auch wurde in der Zusammenfassung z.B. detailliert festgehalten, an welchem Bauteil eine Energiesparmassnahme Anwendung findet oder wie die Funktionsweise dieses Bauteils verändert wird.

3.4 Befragungen

Zur Komplettierung der Massnahmen und zu deren Bewertung wurden verschiedene Experten von Transportunternehmen (TU), Ämtern, der Transportmittelindustrie sowie einigen weiteren Institutionen zweimal befragt:

Erste Befragung

Den Experten wurde eine erste Version der Literaturliste aus der Recherche zugesandt. Sie wurden nach weiteren Publikationen befragt, welche zusätzliche Informationen für Energieeffizienzmassnahmen im öffentlichen Verkehr liefern könnten.

Zweite Befragung

Den Experten wurden die bis dahin zusammengetragenen Energieeffizienzmassnahmen vorgestellt. Zu diesen wurden sie um eine Einschätzung der Investitionskosten und energetischen Ersparnisse gebeten. Den Experten wurden dazu im multiple-choice Stil Bandbreiten angegeben und auch die Option gegeben, keine Einschätzung abzugeben.

Konkret wurden Experten von folgenden Institutionen befragt:

	Institution	Details zu Experten
TU	SBB	3 Programmleiter – Energiesparen & Energieeffizienz 1 Leiter Prüfstelle
	RhB	1 Senior Ingenieur – Fahrzeugrefit
	Südbahn	2 Ingenieure – Flottenmanagement
	BLS	1 Ingenieur – Flotten- und Systemtechnik
	VBL	1 Leiter - Rollmaterial
	RTA Wien	1 Geschäftsleiter – Technische/Wissenschaftliche Arbeiten
Amt	BAV	1 Programmleiter Energiestrategie öV 1 Bereichsleiter Störfall
Industrie	Carrosserie HESS AG	1 Entwicklungsingenieur – Elektrotraktion
	Faiveley Transport Leipzig	1 Leiter CoC HVAC / Head of Center of Competence HVAC
	Stadler Rail	1 Leiter Elektro-Engineering Regionalverkehr
	Bombardier	1 Product Development Manager
	Siemens Wien	1 Ingenieur – nachhaltige Produktentwicklung
	Liebherr (Wien)	1 Abteilungsleiter – Systemtechnik
Weitere	Geelhaarconsulting	1 Senior Berater – Nachhaltigkeit
	Uni Basel	1 Professor – Physik 1 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
	Melanie Hirt Architektur	1 Architekt – Bauphysik
	FH-St. Pölten	1 Professor – Rail Technology and Mobility

Tabelle 6: Übersicht der angefragten Institutionen und Experten

3.5 Normen und Richtlinien

Als weitere Informationsquelle für diesen Synthesebericht dienen Normen und Richtlinien. Insbesondere stehen Normen und Richtlinien im Fokus, welche Behaglichkeitsparameter und Anforderungen an HLK-Anlagen und Hüllen im öffentlichen Verkehr behandeln. Die zentralen Normenwerke, welche aus der Literaturrecherche und dem Austausch mit Experten hervorgegangen, sind:

- **EN** Europäische Normen und deren schweizerische bzw. deutsche Anpassungen (SN bzw. DIN)
- **VDV** Normen des Verbands deutscher Verkehrsunternehmen

3.6 Patentrecherche

Mittels Patentrecherche können neue und innovative Energieeffizienzmassnahmen identifiziert werden. Mit Unterstützung des Innovations Transfer Zentralschweiz (ITZ) wurde von einem Patent-Experten des Instituts für geistiges Eigentum (IGE) eine Tele-Patentrecherche durchgeführt. In dieser Recherche wurden unter anderem Patente zu neuen Dämmmaterialien, Verglasungen, CO₂-Sensoren, Türluftschleibern etc. gesucht.

Für weiterführende Recherchen könnte ausserdem die Plattform des Europäischen Patentamts genutzt werden: <https://worldwide.espacenet.com/>. Diese Recherchen waren im Rahmen der vorliegenden aus zeitlichen Gründen nicht möglich.

3.7 Weiteres

Zur Sicherstellung, dass in der vorliegenden Studie keine relevanten Informationen übersehen werden, wurde noch mittels weiteren Recherchen nach Informationen zum Thema Energieeffizienz und HLK / Hülle im öffentlichen Verkehr gesucht:

- Interne Workshops: Im Austausch mit Experten der Hochschule Luzern aus dem Gebäudeenergiebereich wurden die zusammengetragenen Energieeffizienzmassnahmen diskutiert.
- Suche in Expertenforen: Verschiedene Eisenbahnforen aus dem deutschsprachigen Raum (Bahnforum.ch, Eisenbahnforum.de, Schienenweg.at) wurde nach neuen Energieeffizienzmassnahmen in den Bereichen HLK und Hülle gesucht.

Sowohl aus den internen Workshops als auch aus der Suche in Expertenforen gingen keine wesentlichen Lücken hervor. Gleichzeitig wurden in den internen Workshops Ideen für weiterführende Studien und Entwicklungen diskutiert, welche in Kapitel 6.1 dokumentiert sind.

4. Ergebnisse

4.1 Analogien zwischen Gebäuden und Fahrzeug

Der Fahrgastraum in einem Fahrzeug wird mittels technischer Einrichtungen geheizt oder gekühlt, so dass die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit möglichst erfüllt sind. Dabei übernimmt die Technik die Aufgabe, welche die Hülle nicht oder nur ungenügend zu leisten vermag. Diesbezüglich unterscheidet sich ein Fahrzeug nicht von einem Gebäude. So liegt es nahe, Gemeinsamkeiten aber auch Unterschiede zwischen Gebäuden und Fahrzeugen zu analysieren und davon ausgehend auch zu prüfen, inwiefern sich Energieeffizienz-Massnahmen aus dem Gebäudebereich in den Fahrzeugbereich transferieren lassen. Tabelle 7 beinhaltet die entsprechende Gegenüberstellung.

	Gebäude	Fahrzeug
Nutzung (typische Werte)		
Verweildauer pro Person und Tag	8 - 24 h	5 - 120 min
Raumsollwert Winter	21 °C	18 - 22 °C
Bekleidung im Winter	leichte Bekleidung	Unterschiedlich, je nach Aufenthaltsdauer, meist aber Winterbekleidung
Bekleidung im Sommer	leichte Bekleidung	leichte Bekleidung
Tätigkeit	Unterschiedlich, meist aber Sitzen	Sitzen
Abstand der Personen von der Hülle	Aussenfenster 1 m Aussenwand 0.5 m	≈ 0 m
Vorgaben (Energievorschriften)		
energetische Anforderungen an HLK und Hülle	Ja, Baugesetz	teilweise Empfehlung in Normen
Energieausweis (standardisiert)	GEAK (freiwillig)	nicht vorhanden
Verbrauchabhängige Energiekostenverrechnung	teilweise	selten, aber zunehmend
Energiebedarf HLK	teilweise in Vollzugshilfen	Keine Vorgaben
Energiemonitoring	Nicht vorgeschrieben, zunehmend umgesetzt	Selten
Hülle		
Dämmstärken	10-30 cm	2-5 cm
U-Wert opake Bauteile im Neubau [W/m ² K]	0.15 - 0.20	1.2 - 4.0
U-Wert Fenster [W/m ² K]	Normalfall: 1.0 Bereich: 0.5 - 1.2	Normalfall: 2.0 Bereich: 1.8 - 2.7
Verglasung	3-fach	1-fach oder 2-fach
Sonnenschutz	Standard	Nicht vorhanden
Fensteranteil an Hülle	30-70%	20-40%
Wärmebrücken	Optimiert	Wenig optimiert
HLK-Technik		
Elektrodirektheizung	verboten	Standard
Wärmepumpe	Standard, zunehmend	nicht verwendet
Öl-/Gas-/Holz-Heizung	Standard, abnehmend	nicht verwendet
Flächenheizung (wassergeführt)	Standard, zunehmend	nein

	Gebäude	Fahrzeug
Radiatoren wassergeführt	Standard, abnehmend	nein
Luftheizung mit Lüftung im Umluftbetrieb	Selten	Teilweise
Luftkühlung mit Lüftung im Umluftbetrieb	Standard bei geringem Kühlbedarf	Standard
Mechanische Lüftungsanlage	Weit verbreitet	Standard
Wärmerückgewinnung Lüftungsanlage	Weit verbreitet	nein
Fensterlüftung	Immer möglich	Selten möglich
Fixe Beschattungen	Häufig	Nein
Aussenliegender Sonnenschutz	Standard	Nein
Innenliegender Sonnenschutz	Selten	Nein
Innenliegender Blendschutz	Teilweise vorhanden	Weit verbreitet
Betrieb/Steuerung		
Nachtabsenkung (Schlummerbetrieb)	nein (grosse Zeitkonstante => geringe Einsparung)	teilweise vorhanden
CO ₂ -Steuerung der Lüftung	Teilweise vorhanden	Teilweise vorhanden
Spezielle Rahmenbedingungen		
Thermische Trägheit	hoch	tief
Platzangebot HLK-Technik	vorhanden	kritisch
Platzangebot Dämmung	vorhanden	sehr klein (Fahrzeugbreite ist fix)
Kondensation in der Aussenwand	unkritisch	teilweise kritisch
Thermische Masse (Zeitkonstante h)	sehr hoch (20 - 80 h)	sehr klein (1 - 2 h)
Gewicht	nicht relevant	sehr relevant
Belegungsschwankungen im Betrieb	abhängig von der Nutzung	im Allgemeinen hoch
Standort	stationär	dynamisch
Türöffnungen	wenige Öffnungen pro Tag	Fahrzeugabhängig mehrfach pro Stunde
Energiekosten	10 bis 25 Rp.	10 bis 15 Rp.

Tabelle 7 Vergleich Gebäude und Fahrzeuge

Wesentliche Gemeinsamkeiten bezüglich Energie, Raumklima und Behaglichkeit zwischen Fahrzeugen und Gebäuden sind:

- Anforderungen an die Behaglichkeit
- 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

Fahrzeuge unterscheiden sich von Gebäuden vor allem durch:

- weniger gut gedämmte Hülle
- ungünstigeres Verhältnis Oberfläche zu 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 aus Platz- Sicherheit und Gewichtsgründen (Öl, Holz)
- in der Regel kein aktiver Sonnenschutz
- geringerer Reifegrad der HLK-Technik
- geringerer Regulierungsgrad zur Energieeffizienz durch den Gesetzgeber

Auch wenn betreffend HLK-Technik und Hülle zwischen Gebäuden und Fahrzeugen auf den ersten Blick mehr Unterschiede als Gemeinsamkeiten bestehen, gibt es viele Analogien. Insbesondere im Bereich der Optimierungsmassnahmen betreffend Energieverbrauch können viele bewährte Konzepte und Lösungen aus dem Gebäudebereich auf die Fahrzeuge übertragen werden. Die Umsetzung einzelner Massnahmen ist aufgrund der Randbedingungen beim Fahrzeug oft aber komplexer als im Gebäude.

Weiterführende Informationen zum Thema Thermische Behaglichkeit in Schienenfahrzeugen findet sich auch in der Untersuchung von Gabriel Haller siehe Anhang 9.4.2 und Literaturverzeichnis [9].

4.2 Inventar Forschungsberichte / Kategorisierung

4.2.1 Studien/Berichte

Zu Beginn der Rechercharbeiten wurden 13 Berichte zu Projekten aus der Reihe «Energiesstrategie 2050 im öffentlichen Verkehr», die vom BAV gefördert wurden, zusammengetragen. Die Berichte sind im Anhang 9.2.3 aufgeführt. Jedes dieser Projekte behandelt in irgendeiner Form die öffentlichen Verkehrsmittel Bahn, Bus oder Tram und mögliche Energieeffizienzmassnahmen an der HLK-Anlage oder Fahrzeughülle. Die nachfolgende Tabelle 8 zeigt auf, wie viele Berichte die jeweiligen Kategorien behandeln:

Anzahl Berichte	Bahn	Bus	Tram
HLK	6	4	0
Fahrzeughülle	8	5	1

Tabelle 8: Kategorienzuteilung der behandelten Berichte aus BAV-Projekten.

Die Summe aller Berichte in der Tabelle überschreitet 13, da viele der Berichte verschiedene öffentliche Transportmittel und/oder Energieeffizienzmassnahmen sowohl an der Hülle als auch im Bereich HLK ansprechen und somit in mehreren Kategorien der Tabelle aufgeführt sind.

Im weiteren Verlauf der Recherche wurden 89 schweizerische und internationale Studien gefunden, wovon 18 nach der in 3.3.2 beschriebenen Bewertung für besonders relevant befunden wurden. Sämtliche Studien sind im Anhang 9.2.1 aufgeführt, wobei die Berichte, welche aus den relevantesten 18 Studien entstanden sind von 001-018 durchnummeriert sind. Diese 18 Studien dienen, neben den Berichten der vom BAV unterstützten Projekte, als zweite zentrale Informationsquelle für die Synthese des aktuellen Forschungs- und Entwicklungsstandes im Bereich der Energieeffizienzmassnahmen im öffentlichen Verkehr. Die nachfolgende Tabelle 9 zeigt auf, welche Elemente (HLK oder Fahrzeughülle) und welche Verkehrsmittel (Bahn, Bus oder Tram) in diesen 18 Studien im Fokus stehen.

Anzahl Berichte	Bahn	Bus	Tram
HLK	11	2	6
Fahrzeughülle	2	0	1

Tabelle 9: Kategorienzuteilung der behandelten Berichte aus BAV-Projekten.

Auch hier überschreitet die Summe aller Zellen der Tabelle 18 Berichte, da einige Berichte mehr als einen Fokus haben und daher in mehreren Kategorien aufgeführt sind.

Die nachfolgende Abbildung 7 zeigt auf, wie viele Studien und Normen pro Kategorie insgesamt betrachtet wurden. Die oben erwähnten, relevantesten Studien sind daneben aufgeführt.

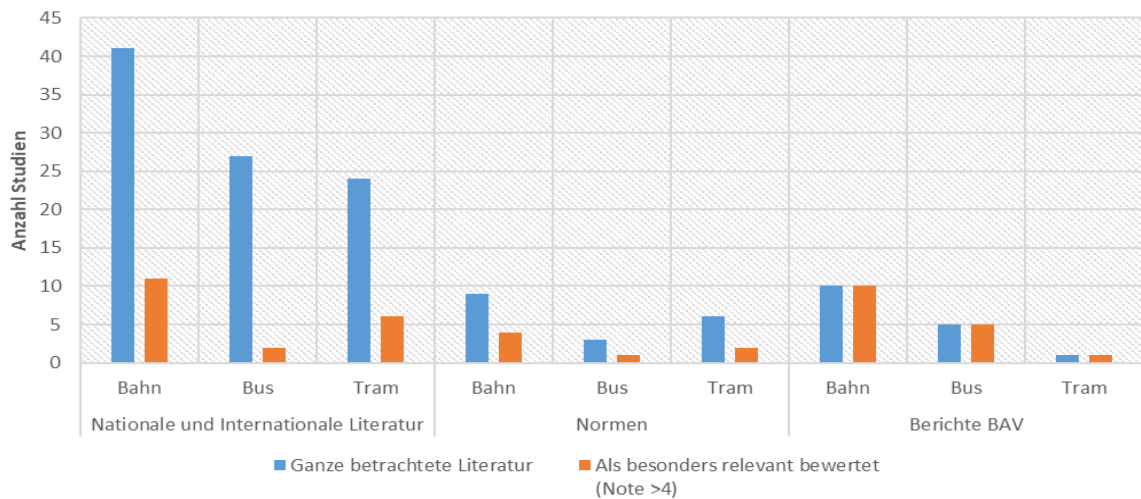


Abbildung 7: Übersicht aller betrachteten Studien, inkl. Aussonderung der besonders relevanten Studien.

4.3 Befragungen

Im Anschluss an die Literaturrecherche wurde die Expertengruppe ein erstes Mal kontaktiert und gebeten die Literaturliste mit weiteren Studien und Berichten zu ergänzen. Von den 24 angefragten Experten haben elf auf die Anfrage geantwortet. Von acht Experten sind Ergänzungen zur Literaturliste eingegangen. Alle relevanten Berichte wurden mit in die Literaturliste aufgenommen und sind nun Teil der 89 Berichte gemäss Abschnitt 4.2.1.

Betreffend Einsparpotential durch Energieeffizienzmassnahmen wurden die gleichen 24 Experten ein zweites Mal angefragt. Dabei sind sechs Rückmeldungen eingegangen.

4.4 Normen / Richtlinien

Im Fokus der Recherche im Bereich der Normen und Richtlinien standen neben den baulichen Vorgaben für HLK-Anlagen und Fahrzeughüllen auch die Behaglichkeitsanforderungen im öffentlichen Verkehr. Zu diesen Themen wurden insgesamt neun zentrale Normen und Richtlinien gefunden und in Tabelle 10 zusammengefasst.

Norm	Inhalt
EN 13129-1:	Bahnanwendungen – Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs Teil 1: Behaglichkeitsparameter
EN 13129-2:	Bahnanwendungen – Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs Teil 2: Typprüfung
EN 13816:	Transport – Logistik und Dienstleistungen - Öffentlicher Personenverkehr – Definition, Festlegung von Leistungszielen und Messung der Servicequalität
EN 14750-1:	Bahnanwendungen – Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs – Teil 1: Behaglichkeitsparameter
EN 14750-2:	Bahnanwendungen – Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs – Teil 2: Typprüfungen
EN 14813-1:	Bahnanwendungen - Luftbehandlung in Führerräumen - Teil 1: Behaglichkeitsparameter
EN 14813-2:	Bahnanwendungen - Luftbehandlung in Führerräumen - Teil 2: Typprüfungen
EN 50591:	Bahnanwendungen - Fahrzeuge - Spezifikation und Überprüfung des Energieverbrauchs
VDV 181:	Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs Fahrgasträume
VDV 236:	Klimatisierung von Linienbussen der Zulassungsklassen I (Stadtbus) und II (Überlandbus), für konventionell mit Diesel oder Gas angetriebene Busse als auch für Hybrid-, Brennstoffzellen- und Elektrobusse

Tabelle 10 Übersicht Normen

4.5 Patentrecherche

In der Recherche wurden fast 40 Patente aus den Bereichen neue Dämmmaterialien, Verglasungen, CO₂-Sensoren und Türluftschieber gefunden. In keinem davon wurde jedoch eine massgebende neue Energieeffizienzmassnahme beschrieben.

4.6 Einzelmassnahmen

Alle identifizierten Energieeffizienzmassnahmen wurden in Clustern zusammengefasst. Diese Cluster sind in Tabelle 28 im Detail aufgeführt. Wie die als relevant eingestuft Studien (Note ≥ 4) auf diese Cluster verteilt sind zeigt die Abbildung 8.



Abbildung 8: Aufteilung der relevantesten Studien auf Massnahmencluster und Transportmittel.

4.6.1 Massnahmen mit grösstem Potenzial

In den nachfolgenden Abschnitten werden Energieeffizienzmassnahmen präsentiert, die aus unterschiedlichen Gründen besonders interessant sind. Diese Massnahmen wurden auf Basis ihrer Präsenz in der wissenschaftlichen Literatur, ihres Energiesparpotentials und auf Basis der eingegangenen Expertenmeinungen selektiert. Diese Einstufung enthält zwar eine subjektive Komponente, wird aber bei Betrachtung der quantifizierten Resultate aus der wissenschaftlichen Literatur Abbildung 9 bis Abbildung 11 nachvollziehbar.

Da konkrete Zahlen in der wissenschaftlichen Literatur schwer zu finden sind und die meisten Daten nur aus wenigen Quellen stammen, sind die angegebenen Werte mit Vorsicht zu geniessen. Die wenigen Quellen welche Kostenwerte angeben, beziehen sich ausschliesslich auf den Bahnverkehr (weil die Investitionskosten auch in CHF/Wagen angegeben sind).

Um die Daten in ein konsistentes Format zu bringen, wurden diese mit folgenden Faktoren umgerechnet:

- HLK-Energiebedarf \cong 20% Gesamtenergiebedarf elektrisch (approximierter Mittelwert basierend auf [2]–[4], [10])
- 1\$ \cong 1.15 CHF (Wechselkurs im Jahr 2007, da die einzige Studie[4], welche Kosten in \$ angibt aus dem Jahr 2007 stammt)
- 1£ \cong 2.4 CHF (Wechselkurs im Jahr 2007, da die einzige Studie[11], welche Kosten in £ angibt ebenfalls aus dem Jahr 2007 stammt)

Die Umfragen bei den Experten wurden unter anderem durchgeführt, um die Werte aus der wissenschaftlichen Literatur mit Expertenmeinungen abzugleichen. Die von Experten angegebenen Werte werden im Beschrieb der Massnahmen mit dem grössten Potenzial in den nachfolgenden Abschnitten ebenfalls präsentiert.

4.6.2 Energiesparpotentiale in der wiss. Literatur – graphisch dargestellt

Die publizierten Energiesparpotentiale verschiedener Massnahmen sind in den untersuchten Studien unterschiedlich abgestützt (von Schätzung bis Messung im Betrieb). Die Abbildungen zeigen auf, wie sich die in den folgenden Abschnitten angegebenen Spannweiten von Energiesparpotentialen zusammensetzen. Einige der Studien geben selbst einen Bereich von Werten an, diese sind in der Abbildung mit einer gestrichelten Linie gekennzeichnet. Die Farben der verschiedenen Formen geben an, bei welchem Transportmittel die entsprechende Studie das Energiesparpotential einer Massnahme untersucht hat.

Die Abbildung 9 zeigt Energiesparmassnahmen auf, welche in der wissenschaftlichen Literatur eher verbreitet sind und für welche das Energiesparpotential als überdurchschnittlich hoch eingeschätzt wird. Die Erkenntnisse zu diesen Massnahmen werden in nachfolgenden Kapiteln näher erläutert. Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen die eher unterdurchschnittlichen Energiesparpotentiale auf, welche in der wissenschaftlichen Literatur gefunden wurden. Die drei Abbildungen enthalten jedoch nur 19 der insgesamt 41 in der wissenschaftlichen Literatur erwähnten Energiesparmassnahmen. Zu 22 Massnahmen sind keine quantifizierten Energiesparpotentiale auffindbar – diese werden darum hier nicht dargestellt.

Legende zu Abbildung 9 bis Abbildung 11:

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

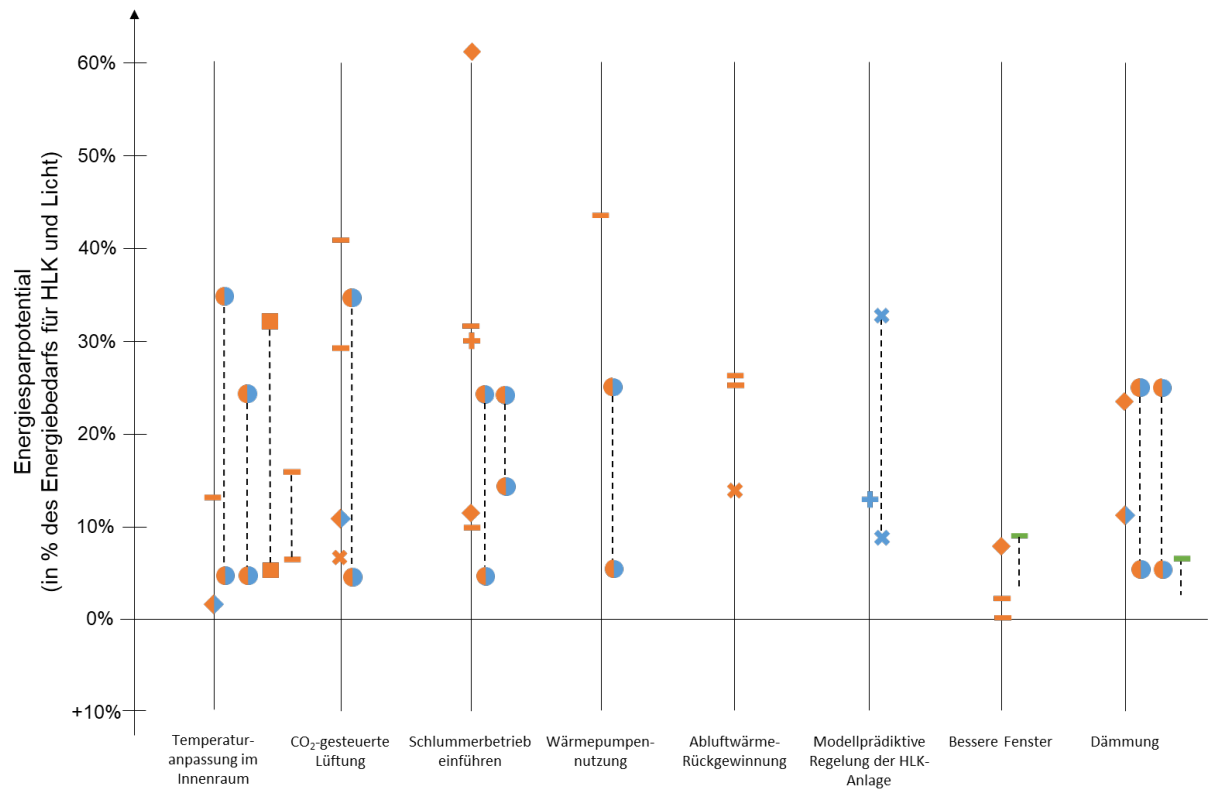


Abbildung 9: Übersicht Energiesparmassnahmen mit überdurchschnittlichen Einsparpotentialen.

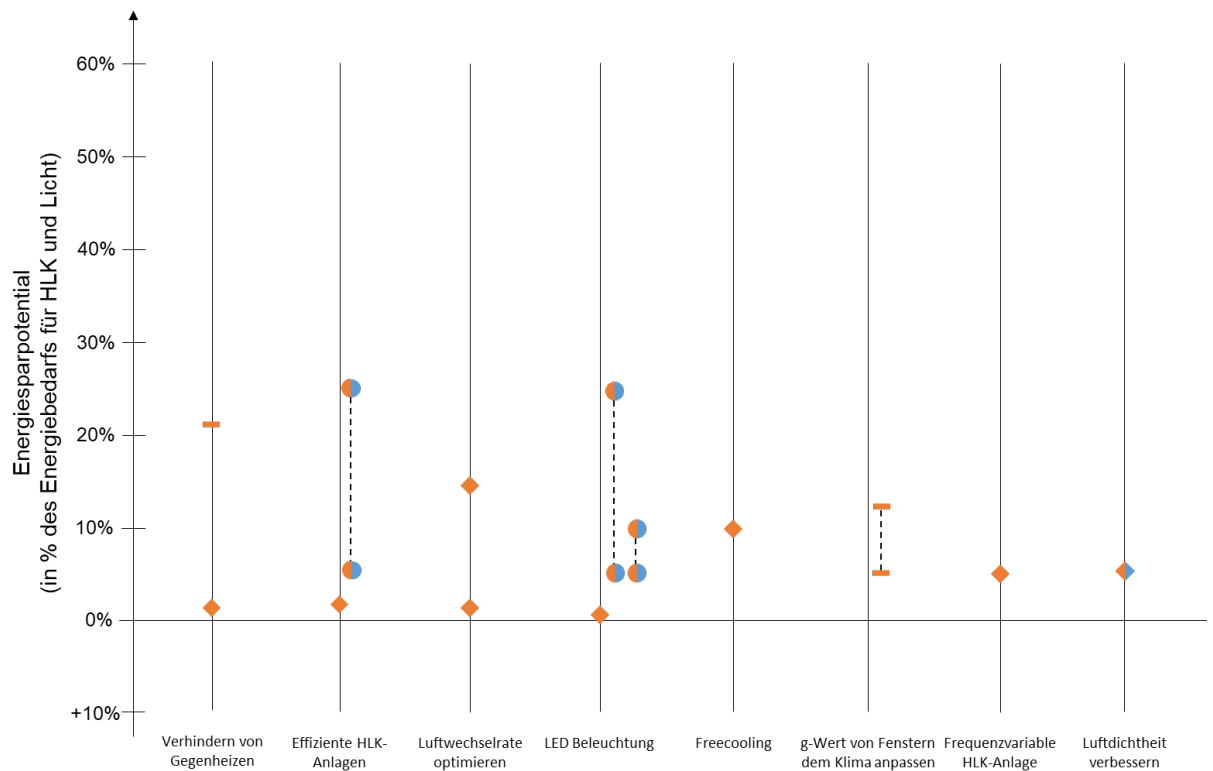


Abbildung 10: Übersicht Energiesparmassnahmen mit unterdurchschnittlichen Einsparpotentialen (Teil I)

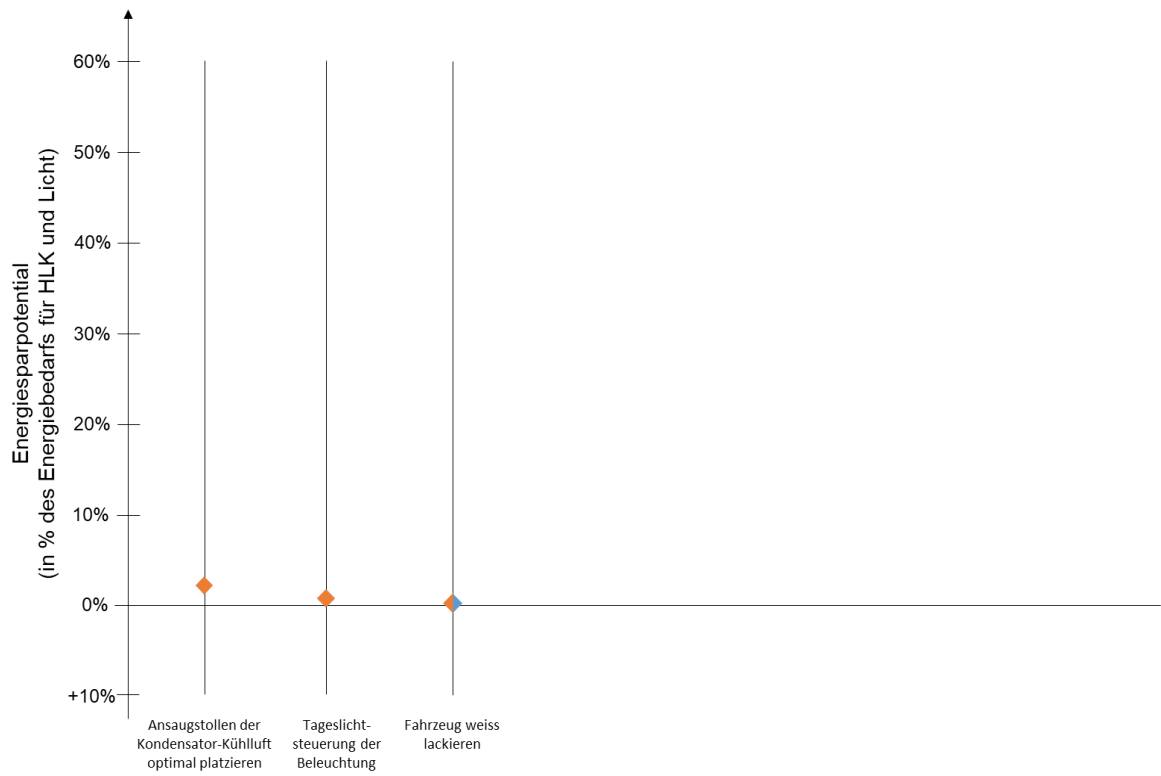


Abbildung 11: Übersicht Energiesparmassnahmen mit unterdurchschnittlichen Einsparpotentialen (Teil II)

4.6.3 Temperaturanpassung im Innenraum

Massnahme	Anpassung der Temperatur im Fahrgastraum (die Anpassungen sind je nach Studie unterschiedlich ausgeprägt). <i>Indem das Toleranzband für Innenraumtemperaturen erweitert wird, muss weniger Energie für die Heizung und Kühlung aufgewendet werden.</i>		
Einsatzbereich	Bus, Bahn & Tram	Einsparpotential (% des Energiebedarfs für HLK und Beleuchtung)	2.3 % - 35 % [2]–[4], [12]–[14]
Phase	Betrieb	Investition (CHF pro Wagen)	< 2'950 CHF [13]

Tabelle 11: Kurzbeschreibung der Massnahme "Temperaturanpassung im Innenraum" basierend auf der Literatur.

Die antwortenden Experten haben sich zum Energiesparpotential und zu den Investitionskosten für die Massnahme folgendermassen geäussert:

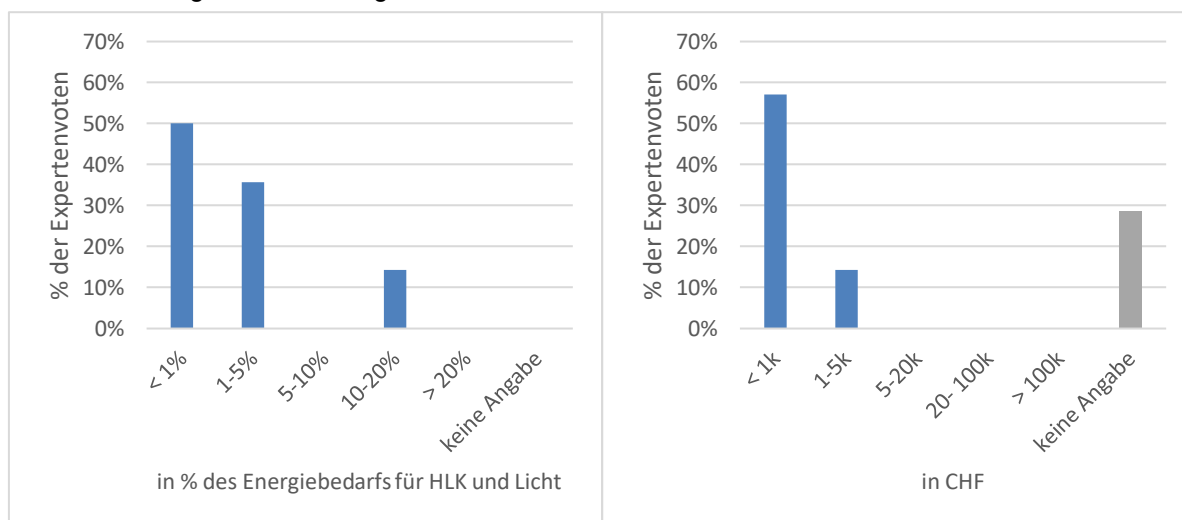


Abbildung 12: Energiesparpotential- und Investitionskosten-Schätzung der Experten für die Massnahmen "Temperaturanpassung im Innenraum"

Expertenmeinungen und die wissenschaftliche Literatur decken sich in Bezug auf die Temperaturanpassung im Fahrgastraum ziemlich gut. Die wissenschaftliche Literatur zeigt tendenziell eine noch etwas breitere Streuung. Die Einschätzungen von über 20% des Energiebedarfs für HLK basieren jedoch zumeist auf Studien welche Schätzwerte in % des Gesamtenergiebedarfs abgeben (z.B. «bis 7% des Gesamtenergiebedarfs» \cong «bis 35% des Energiebedarfs für HLK»).

Die Massnahme ist laut der wissenschaftlichen Literatur oft mit sehr wenig Aufwand umzusetzen und bringt eine vergleichsweise hohe Energieeinsparung. In Schweizer S-Bahnen in Zürich der SBB wurde die Massnahme beispielsweise schon im DPZ erfolgreich (Energieeinsparung bei gleichbleibender oder besserer thermischer Behaglichkeitsbewertung) getestet [15].

Vorteile (zusätzlich zur Energieeinsparung)	Nachteile	Mögliche Vorurteile
Temperaturen entsprechen besser den Kundenbedürfnissen (wie SBB-Versuch zeigte)	Negativere Auswirkung von Zugluft bei offenen Türen im Winter	Kundenreklamationen wegen ungenügendem Komfort
Einfache Umsetzung, bzw. einfach rückgängig machbar falls nötig	zu kühles Temperaturempfinden bei längeren Fahrten im Winter (bzw. zu warm im Sommer)	

Tabelle 12: Vorteile, Nachteile und mögliche Vorurteile gegenüber der Massnahme "Temperaturanpassung im Innenraum"

4.6.4 CO₂-gesteuerte Lüftung

Massnahme	Frischluftzufuhr wird abhängig von der CO ₂ -Konzentration der Luft im Fahrzeug geregelt <i>Diese Art der Lüftungsteuerung soll verhindern, dass zu Zeiten tiefer Belegung der Fahrzeuge unnötig Wärme (oder Kälte) an die Aussenluft abgegeben wird. Bei tiefer Belegung steigt die CO₂-Konzentration der Raumluft weniger schnell an und es muss weniger gelüftet werden.</i>		
Einsatzbereich	Bahn, Bus & Tram	Einsparpotential (% des Energiebedarfs für HLK und Beleuchtung)	8.8 % (Windkanal) - 42% (Simulation) [2], [4], [12], [14], [16]
Phase	Design & Refit	Investition (CHF pro Wagen)	4'800 - 16'800 CHF [4], [15] Payback-Zeit: 11 Jahre

Tabelle 13: Kurzbeschreibung der Massnahme "CO₂-gesteuerte Lüftung" basierend auf der wissenschaftlichen Literatur.

Die angefragten Experten äussern sich zum Energiesparpotential und zu den Investitionskosten für die Massnahme folgendermassen:

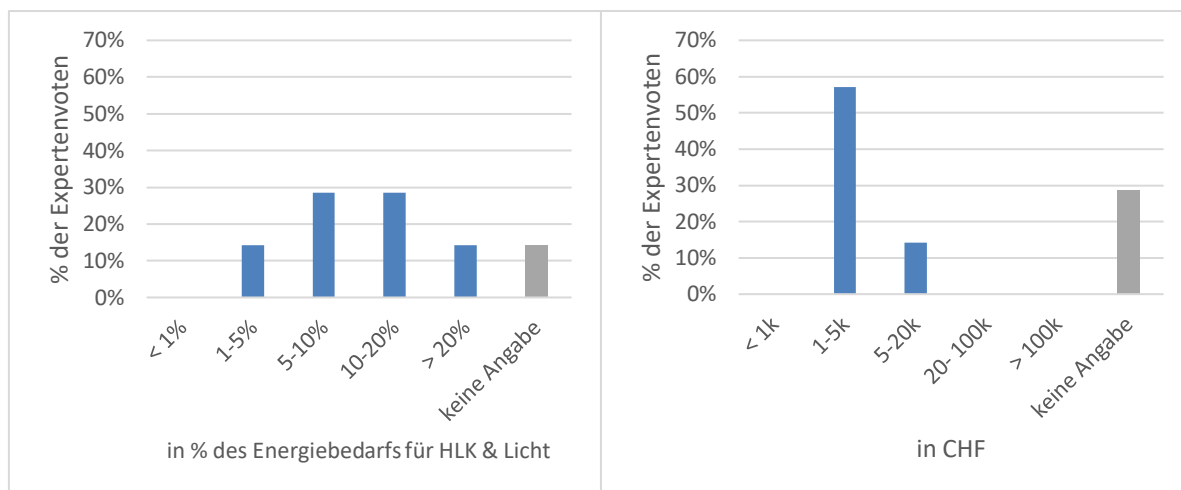


Abbildung 13: Energiesparpotential- und Investitionskosten-Schätzung der Experten für die Massnahme "CO₂-gesteuerte Lüftung"

Die Einschätzung des Energiesparpotentials der CO₂-gesteuerten Lüftung variiert äusserst stark. Viele der untersuchten Studien zeigen auf, dass die Einschätzung tendenziell höher ausfällt, wenn diese auf Simulationen statt Messungen basiert. Zudem beeinflussen Faktoren, wie die Belegung der Fahrzeuge und das lokale Klima die Effektivität dieser Energiesparmassnahme.

Auffällig ist, dass die meisten Einschätzungen eine fünfprozentige Reduktion des Energiebedarfs für HLK und Beleuchtung übersteigen. Zudem werden die Kosten meist auf 1'000-5'000 CHF pro Wagen geschätzt. Mit einer Payback-Zeit von ca. 11 Jahren ist die Massnahme vor allem für neue Fahrzeuge und Fahrzeuge, die nach dem Refit noch eine Lebensdauer von ca. 15 Jahren oder mehr haben, geeignet.

Vorteile (zusätzlich zur Energieeinsparung)	Nachteile	Mögliche Vorurteile
Längere Standzeit der Filter	Zusätzliche Komponenten (CO ₂ Fühler)	Kundenreklamationen
Zeitweise tiefere Luftwechsel, weniger Lüftungsgeräusche		Erhöhter Technisierungsgrad

Tabelle 14: Vorteile, Nachteile und mögliche Vorurteile gegenüber der Massnahme "CO₂-gesteuerte Lüftung"

4.6.5 Schlumberbetrieb

Massnahme	Ausschalten/Reduktion von Heizung, Kühlung und Lüftung ausserhalb des Fahrbetriebes <i>Im Schlumberbetrieb werden die Funktionen der HLK-Anlagen von Fahrzeugen, welche sich nicht im Fahrbetrieb befinden, soweit reduziert, dass zwar keine Frost- bzw. Hitzeschäden am Fahrzeug entstehen, aber unnötige Lüftung, Heizung und Kühlung vermieden wird.</i>		
Einsatzbereich	Bahn, Bus & Tram	Einsparpotential (% des Energiebedarfs für HLK und Beleuchtung)	5 % - 62 % [2], [3], [11], [13], [16] - [18]
Phase	Design, Betrieb & Refit	Investition (CHF pro Wagen)	1'750 CHF [16]

Tabelle 15: Kurzbeschreibung der Massnahme "Schlumberbetrieb" basierend auf der wissenschaftlichen Literatur.

Die Rückmeldung der angefragten Experten zeigt folgendes Bild betreffend Energiesparpotential und Investitionskosten für die Massnahme:

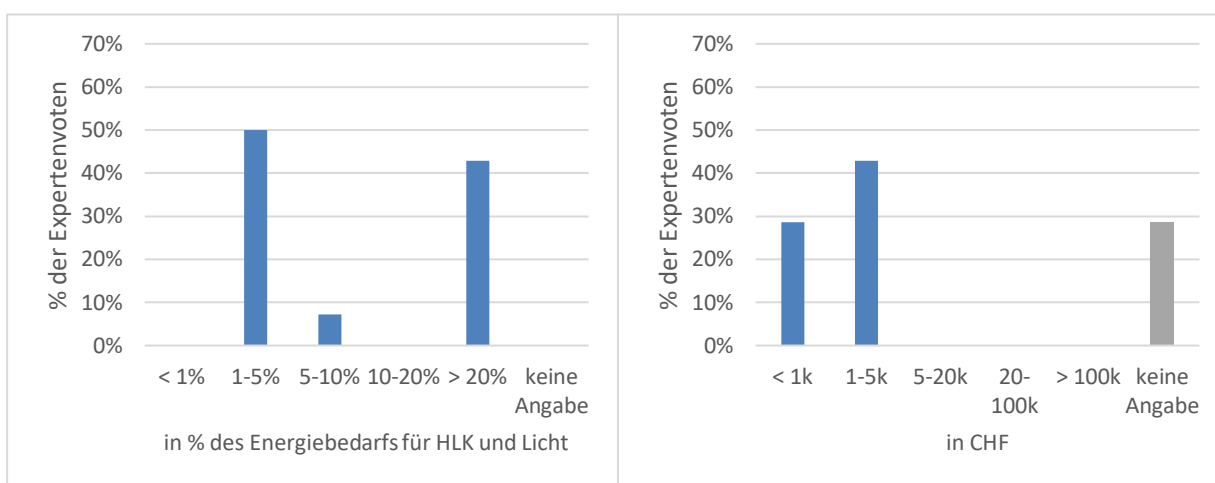


Abbildung 14: Energiesparpotential- und Investitionskosten-Schätzung der Experten für die Massnahmen "Schlumberbetrieb einführen"

Die Einschätzung des Einsparpotentials durch die Experten differiert hier stark vom Einsparpotential, das in der wissenschaftlichen Literatur ermittelt wurde. Die Hälfte der Experten schätzt das Einsparpotential auf unter 5% des Energiebedarfs für HLK und Beleuchtung, während die wissenschaftliche Literatur aufzeigt, dass das Potential mindestens 5% beträgt.

Gleichzeitig gilt es anzumerken, dass die Streuung der in der wissenschaftlichen Literatur angegebenen Werte sehr breit ist. Diese Spannweite ist vermutlich auf die Modalitäten des geplanten Schlumberbetriebs zurückzuführen (Betriebsstunden vs. «Schlumber»-Stunden, minimale/tolerierte Temperatur im Innenraum etc.).

Die für die Umsetzung nötigen Investitionskosten werden von den Experten als tief eingeschätzt. In einer Studie der SBB [16], welche das Energiesparpotential der Massnahme auf 63% einschätzt, werden diese sehr tiefen Investitionskosten bestätigt.

Vorteile (zusätzlich zur Energieeinsparung)	Nachteile	Mögliche Vorurteile
geringere Lärmemission abgestellter Fahrzeuge (Sommer)	Vorlaufzeit zum Aufheizen bzw. zum Kühlen	Unzufriedenen Kunden falls Fahrzeug beim Start nicht auf «Komforttemperatur»
Massnahme primär betrieblich	Fahrzeugmanagement erforderlich	
Geringe Anpassungen nötig, tiefe Investitionskosten	Kalte bzw. überhitzte Fahrzeuge bei ungeplanten Einsätzen	

Tabelle 16: Vorteile, Nachteile und mögliche Vorurteile gegenüber der Massnahme "Schlumberbetrieb"

4.6.6 Wärmepumpennutzung

Massnahme	Nutzung einer Wärmepumpe zur Heizung und Kühlung des Fahrzeuges <i>Im Refit bedeutet dies in den allermeisten Fällen ein Wechsel von einer elektrischen Widerstandsheizung auf eine Wärmepumpe.</i>		
Erforscht in	Bahn, Bus & Tram	Einsparpotential (% des Energiebedarfs für HLK und Beleuchtung)	5 % - 45 % [3], [14]
Phase	Design & Refit	Investition (CHF pro Wagen)	nicht bekannt

Tabelle 17: Kurzbeschreibung der Massnahme "Wärmepumpennutzung" basierend auf der wissenschaftlichen Literatur.

Die antwortenden Experten haben sich zum Energiesparpotential und zu den Investitionskosten für die Massnahme folgendermassen geäussert:

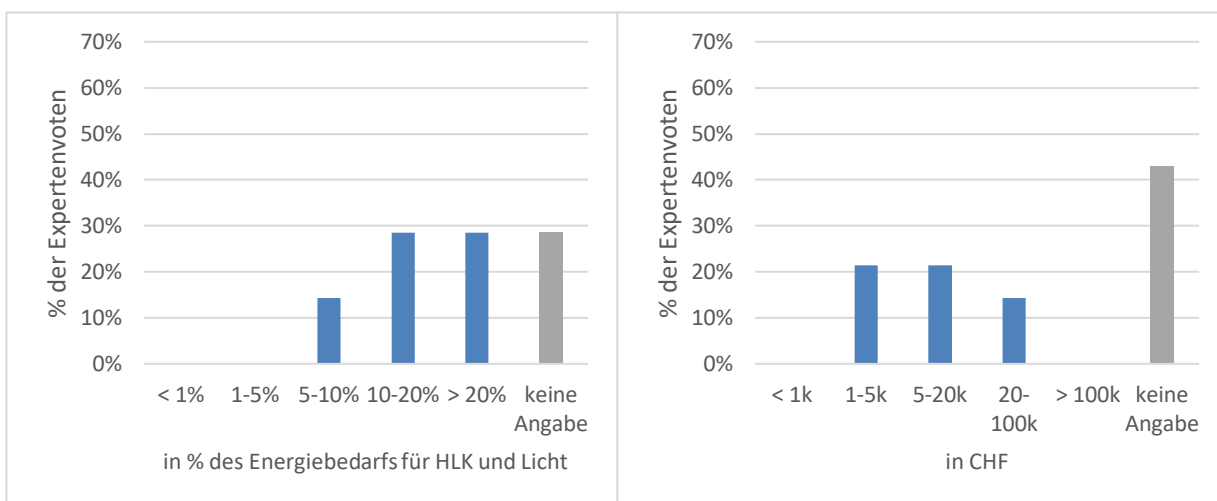


Abbildung 15: Energiesparpotential- und Investitionskosten-Schätzung der Experten für die Massnahmen "Wärmepumpennutzung"

Das Energiesparpotential beim Einsatz von Wärmepumpen für die Kälte- und Wärmeversorgung von Bahn und Tram wird in der wissenschaftlichen Literatur zwar oft diskutiert, jedoch selten quantifiziert. Die zwei Publikationen, welche ein quantitatives Resultat präsentieren, geben mit 5%-25% [3] und 45% [14] zudem sehr unterschiedliche Werte an. Investitionsabschätzungen wurden in der Literatur keine gefunden.

Die Experten zeigen sich in der Kostenschätzung ebenfalls unsicher. Sie schätzen die Effektivität der Wärmepumpen jedoch ebenfalls in der Bandbreite der in der wissenschaftlichen Literatur gefundenen Werte ein.

Vorteile (zusätzlich zur Energieeinsparung)	Nachteile	Mögliche Vorurteile
Gleiches System für Heizen und Kühlen	Wartungsaufwand	Zweites Heizsystem zur Spitzenlastdeckung erforderlich
Hohe Effizienz bei tiefen Systemtemperaturen	Geringere Lebensdauer der WP als Elektrodirektheizung	Störungsanfälligkeit
	Hohes Gewicht, Platzbedarf	Komplexe Regulierung
	Wasserführendes System zur Wärme-/Kälteverteilung nötig	Bei Refit nicht geeignet
	Nur Aussenluft als Quelle verfügbar, Einsatz evt. eingeschränkt in den Bergen	Langzeiterfahrungen fehlen

Tabelle 18: Vorteile, Nachteile und mögliche Vorurteile gegenüber der Massnahme "Wärmepumpennutzung"

4.6.7 Abluft-Wärmerückgewinnung

Massnahme	Nutzung statt Abführen der Wärme in der Abluft <i>Unter dieser Massnahme werden alle Systeme zusammengefasst, welche die Wärme der Abluft nutzen, um die Zuluft zu erwärmen.</i>		
Einsatzbereich	Bahn & Bus	Einsparpotential (% des Energiebedarfs für HLK und Beleuchtung)	14 % - 28 % [12], [14], [16]
Phase	Design & Refit	Investition (CHF pro Wagen)	nicht bekannt

Tabelle 19: Kurzbeschreibung der Massnahme "Abluft-Wärmerückgewinnung" basierend auf der wissenschaftlichen Literatur.

Die Antworten der Experten zum Energiesparpotential und zu den Investitionskosten für die Massnahme zeigen folgendes Bild:

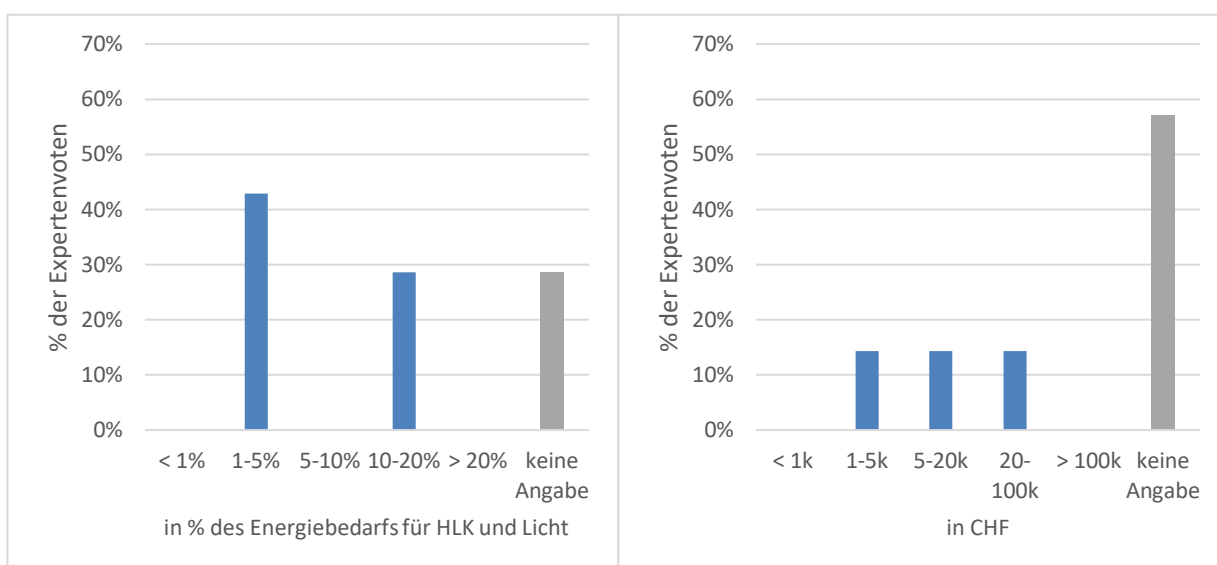


Abbildung 16: Energiesparpotential- und Investitionskosten-Schätzung der Experten für die Massnahmen "Abluft-Wärmerückgewinnung"

In der wissenschaftlichen Literatur wird das Energiesparpotential der Abluft-Wärmerückgewinnung relativ hoch eingeschätzt. Es muss jedoch betont werden, dass die Resultate der wissenschaftlichen Literatur sich aus Versuchen im Windkanal und Simulationen zusammensetzen und nicht auf Messungen aus Feldversuchen basieren. Angaben zu Investitionskosten wurden in der wissenschaftlichen Literatur keine gefunden.

Bei den Antworten der Experten kristallisierten sich zwei Gruppen heraus. Eine Gruppe schätzt das Einsparpotential auf 1-5%, während die andere Gruppe der Massnahme ein deutlich höheres Potential (10-20%) zuordnet. Bei der Einschätzung der Investitionskosten zeigt sich eine grosse Unsicherheit.

Vorteile (zusätzlich zur Energieeinsparung)	Nachteile	Mögliche Vorurteile
	bei Refit weniger geeignet (fehlender Platz für WRG und zusätzliche Kanäle)	Einsparungen zu gering
	Gewicht	
	Unterhaltskosten	
	Neues Konzept zur Luftführung erforderlich	

Tabelle 20: Vorteile, Nachteile und mögliche Vorurteile gegenüber der Massnahme "Abluft-Wärmerückgewinnung"

4.6.8 Modellprädiktive Regelung

Massnahme	Vorausschauende, auf Algorithmen basierte Regelung der Komfortfunktionen <i>Die angewandten Optimierungsalgorithmen unterscheiden sich leicht voneinander, aber grundsätzlich versuchen alle Algorithmen den Energiebedarf im Betrieb aufgrund einer modellierten Vorhersage der äusseren Einflüsse (Sonneneinstrahlung, Anzahl Fahrgäste, Aussenlufttemperatur, Fahrgeschwindigkeit) zu minimieren.</i>		
Einsatzbereich	Tram	Einsparpotential (% des Energiebedarfs für HLK und Beleuchtung)	13 % - 32 % [19], [20]
Phase	Design, Betrieb & Refit	Investition (CHF pro Wagen)	nicht bekannt

Tabelle 21: Kurzbeschreibung der Massnahme "Modellprädiktive Regelung" basierend auf der wissenschaftlichen Literatur.

Die Experten, welche auf unsere Umfrage geantwortet haben, haben sich zum Energiesparpotential und zu den Investitionskosten für die Massnahme folgendermassen geäussert:

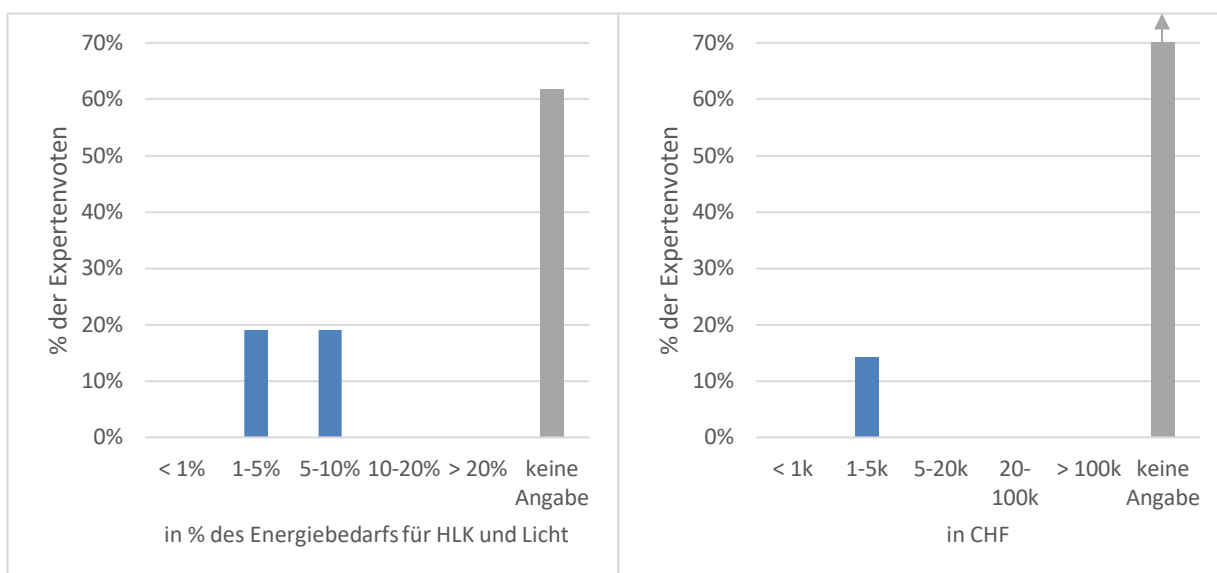


Abbildung 17: Energiesparpotential- und Investitionskosten-Schätzung der Experten für die Massnahmen "Modellprädiktive Regelung"

Modellprädiktive Regelung wurde in der wissenschaftlichen Literatur als sehr wirksame Massnahme mit einem signifikanten Energiesparpotential identifiziert. Am EcoTram in Wien wurde ein Energiesparpotential im Betrieb von 13% des Energiebedarfs für Komfortfunktionen festgestellt. In einem Windkanalversuch ergaben sich gar 32%.

Nur sehr wenige der Experten haben eine Einschätzung für das Energiesparpotential abgegeben. Die wenigen Voten fielen mit 1-10% deutlich tiefer aus als die Angaben in der wissenschaftlichen Literatur. Anhaltspunkte für die Investitionskosten gibt es sowohl in der wissenschaftlichen Literatur als auch in Expertenkreisen kaum.

Vorteile (zusätzlich zur Energieeinsparung)	Nachteile	Mögliche Vorurteile
geringere Sollwertabweichungen der Raumluft	komplexe Software	Versagen der Regelung
	Daten von Wetter, Fahrstrecke und Passagieraufkommen erforderlich	Kundenreklamationen falls Komforteinbussen
		Einsparungen im Fahrbetrieb nicht nachgewiesen

Tabelle 22: Vorteile, Nachteile und mögliche Vorurteile gegenüber der Massnahme "Modellprädiktive Regelung"

4.6.9 Bessere Fenster (tieferer Wärmedurchgangskoeffizient)

Massnahme	Fenster mit verbesserten Wärmedämmeigenschaften <i>Konkret ist hiermit der Wechsel von Einfach- auf Zweifachverglasung bzw. von Zweifach- auf Dreifachverglasung gemeint. Der U-Wert und damit die Wärmeverluste der Fenster werden dadurch reduziert.</i>		
Einsatzbereich	Bahn & Bus	Einsparpotential <i>(% des Energiebedarfs für HLK und Beleuchtung)</i>	0.6 % - 8.6 % [12], [14], [18], [22]
Phase	Design, Refit	Investition <i>(CHF pro Wagen)</i>	nicht bekannt

Tabelle 23: Kurzbeschreibung der Massnahme "bessere Fenster" basierend auf der wissenschaftlichen Literatur.

Die Experten äusserten sich zum Energiesparpotential und zu den Investitionskosten für die Massnahme wie folgt:

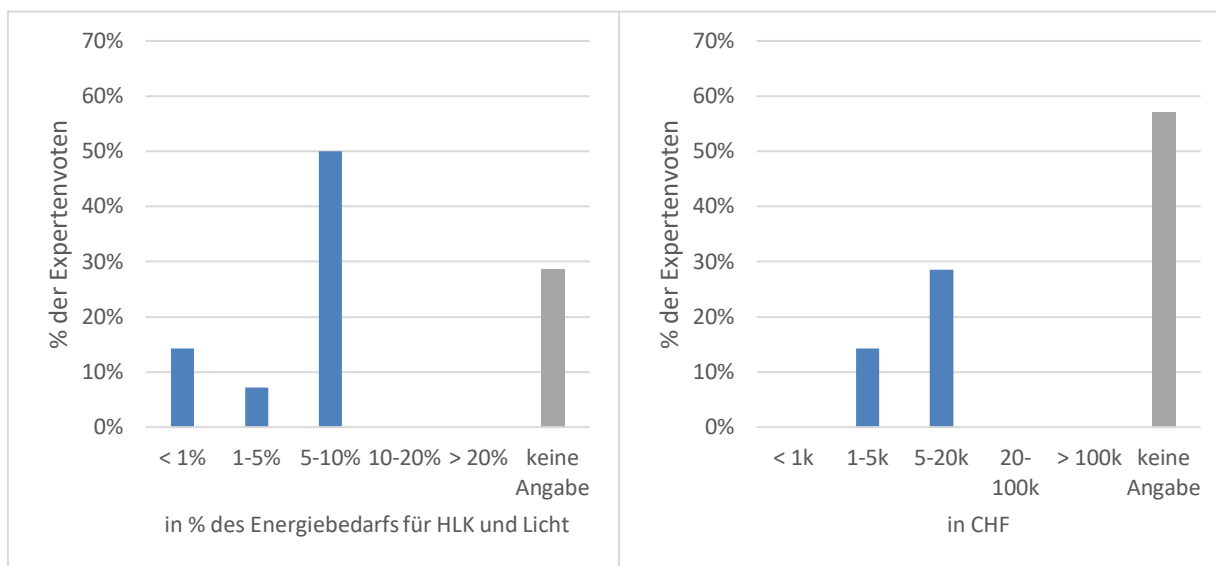


Abbildung 18: Energiesparpotential- und Investitionskosten-Schätzung der Experten für die Massnahmen "Bessere Fenster"

Mit einer Energieersparnis-Schätzung von <1%-10% decken sich die Meinungen der Experten mit der wissenschaftlichen Literatur. Viele der genannten Studien nutzten Simulationen zur Berechnung des Einsparpotentials. Die Studie mit der Einschätzung des höchsten Einsparpotentials, berechnet die Energieeinsparung anhand einer vereinfachten Formel (am Beispiel des SOB Flirt).

Obwohl einige Studien die Investitionskosten einer Gesamtsanierung der Aussenhülle angeben, fehlen in der Literatur separate Werte für die Investitionskosten bei einem Fensterersatz. Rückmeldungen kamen nur von wenigen Experten, diese schätzen die Kosten auf ca. 1'000-20'000 CHF pro Wagen.

Vorteile (zusätzlich zur Energieeinsparung)	Nachteile	Mögliche Vorurteile
Komfortverbesserung	Gewicht der Verglasung	Einsparungen zu gering
	Beschichtete Gläser verschlechtern den Mobile-Empfang (Spezialgläser mit perforierter Beschichtung nötig)	

Tabelle 24: Vorteile, Nachteile und mögliche Vorurteile gegenüber der Massnahme "bessere Fenster"

4.6.10 Dämmung

Massnahme	Verbesserte Wärmedämmeigenschaften der opaken Hülle <i>Unter dieser Massnahme sind alle Arten von Dämmungen zusammengefasst; Dämmmaterialien und Dicken der Dämmschichten sind nicht spezifiziert.</i>		
Einsatzbereich	Bahn, Bus & Tram	Einsparpotential (% des Energiebedarfs für HLK und Beleuchtung)	5 % - 25 % [2] - [4], [21], [22]
Phase	Design, Refit	Investition (CHF pro Wagen)	24'000 - 85'000 CHF [4], [23]

Tabelle 25: Kurzbeschreibung der Massnahme "Dämmung" basierend auf der wissenschaftlichen Literatur.

Die Experten, welche auf unsere Umfrage geantwortet haben, haben sich zum Energiesparpotential und zu den Investitionskosten für die Massnahme folgendermassen geäussert:

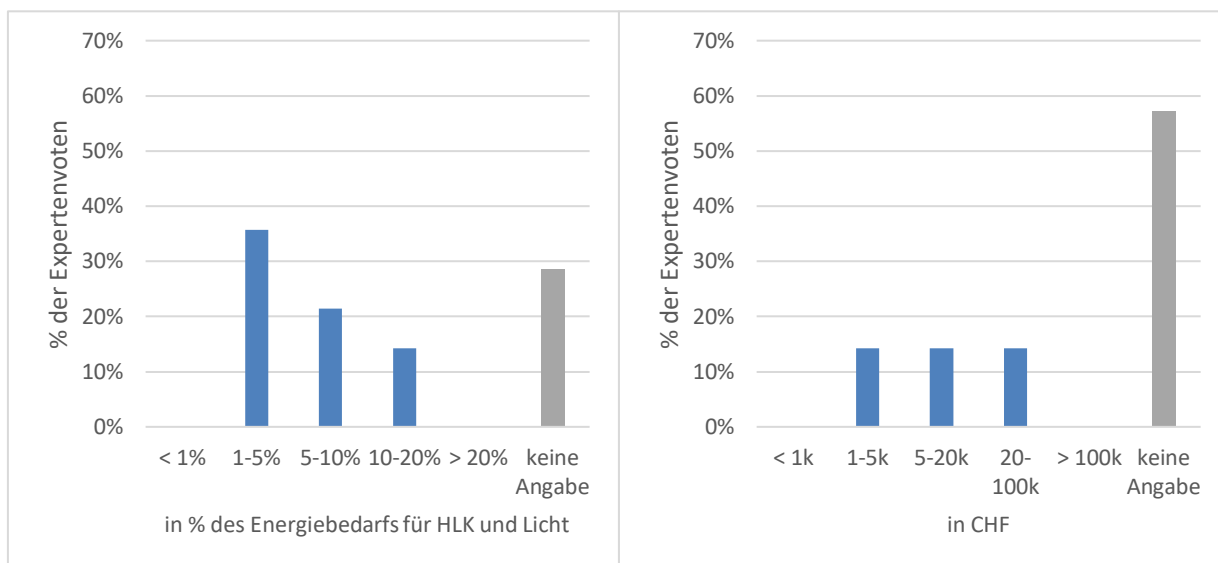


Abbildung 19: Energiesparpotential- und Investitionskosten-Schätzung der Experten für die Massnahmen "Dämmung"

Die Dämmung der opaken Fahrzeughülle im öffentlichen Verkehr gehört zu den am besten erforschten Energieeffizienzmassnahmen. Zu den umfangreichsten Studien gehört die Erforschung der Effekte einer verbesserten Wärmedämmung am Beispiel eines S-Bahn-Gliederzuges durch die BLS aus dem Jahr 2018 [22]. Diese Studie berechnet anhand von Temperaturmessungen der Aussenluft und im Fahrgeastraum eines unsanierten Fahrzeuges eine erwartete Energieeinsparung von ca. 20% der HLK-Energie nach Verbesserung der Dämmung der Hülle. Messungen der Heizenergie an einem zufällig ausgewählten Wintertag ergeben eine Einsparung von ca. 11%.

Die Experten würden das Energiesparpotential von Dämmungen noch etwas tiefer einschätzen. Das kann unter anderem daran liegen, dass keine der gefundenen wissenschaftlichen Studien die zusätzliche Traktionsenergie mitberechnet, welche sich aus dem Zusatzgewicht der aufwändigeren Wandkonstruktionen und dem Gewicht der Dämmmaterialien ergibt.

Die Investitionskosten betreffend scheinen sich die Experten uneinig oder unsicher zu sein. Aufgrund der wissenschaftlichen Literatur sind dies Kosten einer Fahrzeugdämmung jedoch deutlich höher einzuschätzen als für viele andere Massnahmen. Peckham [4] beschreibt in seiner Studie zu Energieeffizienzmassnahmen in der Fahrzeugflotte von GB-Rail, dass sich eine Dämmung vorwiegend für neue Fahrzeuge lohnt und die Investitionskosten bei einem Refit kaum zurückgewonnen werden können.

Vorteile (zusätzlich zur Energieeinsparung)	Nachteile	Mögliche Vorurteile
Energieeinsparungen	Kosten	Einsparungen zu gering
Komfortverbesserung	Gewicht	Aufwand zu gross

Vorteile (zusätzlich zur Energieeinsparung)	Nachteile	Mögliche Vorurteile
Evt. Vermeidung von Feuchtschäden (Kondensat an kalten Oberflächen)	Höhere Wandstärken, Platzbedarf	Zu viele Wärmebrücken
	Hohe Anforderung an das Brandverhalten der Dämmmaterialien	Nur sinnvoll bei gleichzeitiger Reduktion der Wärmebrücken

Tabelle 26: Vorteile, Nachteile und mögliche Vorurteile gegenüber der Massnahme "Dämmung"

4.7 Kombination von Massnahmen

Bei der Kombination verschiedener Massnahmen können verschiedene Effekte resultieren. Die Wirkung kann sich im besten Fall verstärken (also grösser werden als die Wirkung von zwei Einzelmassnahmen zusammen), im schlechtesten Fall könnte sich die Wirkung aber auch neutralisieren, so dass besser auf die Massnahme verzichtet wird. Dazwischen sind alle Schattierungen denkbar.

In der nachfolgenden Tabelle 27 wird aufgrund einer *qualitativen* Einschätzung der Autoren eine Bewertung der möglichen Kombinationen der Massnahmen betreffend der Gesamtwirkung vorgenommen. In der Tabelle werden folgende Bewertungen vorgenommen:

Die Kombination von Massnahmen...

- ... verstärkt den Energieeffizienz-Effekt der einzelnen Massnahmen («1+1 > 2») +++
- ... führt zu einer linearen Addition der Einzeleffekte («1+1 = 2») ++
- ... führt in der Summe zu einer Verbesserung der Einzeleffekte («1+1 > 1») +
- ... neutralisiert die einzelnen Energieeffizienzeffekte («1+1 = 1») =
- ... ist kontraproduktiv, es kommt zu einer reduzierten Wirkung («1+1 < 1») -

	Temperaturreduktion	CO2-Steuerung	Schlummerbetrieb	WP	WRG	MPC	Dämmung Fenster	Dämmung Hülle
Temperaturreduktion								
CO2-Steuerung	++							
Schlummerbetrieb	+	+						
WP	+++	+++	=/+					
WRG	++	++	+	+++				
MPC	++	+	=	+++	++			
Dämmung Fenster	+	++	++	+++	++	+		
Dämmung Hülle	+	++	++	+++	++	+	++	

Tabelle 27: Kombination von verschiedenen Massnahmen und deren Wirkung betreffend Effizienzverbesserung

Erläuterungen zur Tabelle:

- Die Kombination einer Wärmepumpe mit einer Temperaturreduktion im Fahrgastraum führt zu einem überproportionalen Effekt: Aufgrund der Temperaturreduktion reduzieren sich die über die Heizung zu kompensierenden Transmissionsverluste. Die Temperaturreduktion führt aber auch zu tieferen Systemtemperaturen der WP, womit sich der COP (Wirkungsgrad) der Wärmepumpe zusätzlich verbessert. Diese Kombination wird deshalb mit «+++» bewertet.
- Die durch die Verbesserung der Fenster erzielbare Energieeinsparung und die durch die wärmetechnische Verbesserung der übrigen Fahrzeughülle erzielbaren Energieeinsparungen lassen sich bei einer Kombination der beiden Massnahmen addieren, da die einzelnen Massnahmen sich nicht merklich gegenseitig beeinflussen. Aus diesem Grund wird diese Kombination mit «++» bewertet.
- Bei der Kombination von zwei Massnahmen können aber auch gewisse Kompensationseffekte entstehen. Beispiel: Der Effekt einer Temperaturreduktion im Fahrgastraum auf die Energieeffizienz wird etwas geringer, wenn vorgängig schon die Hülle wärmetechnisch optimiert wurde. Dieser Effekt führt zur Bewertung «+».
- Etwas kritischer dürfte betreffend Wirkung die Kombination einer Wärmepumpe mit dem Schlummerbetrieb sein. Für den Aufheizvorgang nach dem Schlummerbetrieb und um

den Fahrgastraum auf Betriebstemperatur zu bringen sind kurzzeitig u.U. höhere Leistungen und somit höhere Vorlauftemperaturen nötig, was den Wirkungsgrad (COP) der Wärmepumpe negativ beeinflusst. Das führt zur Bewertung «=/+».

Die oben aufgeführten Punkte stellen eine erste Einschätzung dar. Die Effekte können je nach Art der Umsetzung der Massnahme, je nach Fahrzeugtyp und je nach Einsatz des Fahrzeuges unterschiedlich sein. Im Einzelfall müssten detaillierte Berechnungen (Simulationen) aufzeigen, welche quantitative Gesamtwirkung die Kombination verschiedener Massnahmen hat.

4.8 Übersicht aller dokumentierten Massnahmen

Die bisher präsentierten Massnahmen zählen aufgrund ihres Energiesparpotentials und ihrer Verbreitung zu den interessantesten. In der wissenschaftlichen Literatur wurden jedoch noch einige weitere Massnahmen identifiziert. Diese gesamte Liste der gefundenen Energieeffizienzmassnahmen ist nachfolgend aufgeführt und wurde zur besseren Übersicht in Cluster unterteilt.

Cluster	Massnahme	Beschreibung
Effizienteres HLK-Anlagendesign	Andere Kältemittel	In der betrachteten Studie wurde das Kältemittel 134a durch 407c ersetzt, um einen wirtschaftlichen Betrieb der Wärmepumpe zu ermöglichen. Der Austausch anderer Kältemittel
	Wärmepumpennutzung	Hiermit ist insbesondere der Ersatz anderer Heizungsanlagen (z.B. elektrische Widerstandsheizungen) gemeint.
	Abluftwärme-Rückgewinnung	Unter dieser Massnahme werden alle Systeme zusammengefasst, welche die Wärme der Abluft nutzen, um die Zuluft aufzuheizen.
	Ansaugstollen der Kondensator-Kühlluft optimal platzieren	Die Kühlluft sollte möglichst kühl sein, daher sind Ansaugstollen in der Nähe des Fahrzeugmotors oder den Bremsen z.B. nicht ideal.
	Effizientere HLK-Anlagen	Die betrachtete Studie spricht hier in erster Linie von einem Ersatz von bestehenden HLK-Anlagen durch Anlagen mit einem höheren Wirkungsgrad (EER: Energy efficiency ratio)
	Zwei-Stufen-Luftauswerfer-Kühlung	Ein Kühlungssystem, bei welchem sich die Druckdifferenzen welche Luftauswerfer verursachen zu Nutzen gemacht werden. Die betrachtete Studie präsentiert dieses Kühlsystem als nachhaltigere alternative zu kälteerzeugenden Verdichtungssystemen mit einer höheren Leistungszahl.
	Verhindern von Gegenheizen	Bei mehrstufigen Kühlsystemen kommt es vor, dass die geringste Kühlstufe bereits zu stark ist. Um die Soll-Innentemperatur zu halten, wird die Luft vor dem Einblasen in den Fahrgastraum daher zum Teil wieder aufgeheizt.
Wärmeaustausch über Fenster verringern	Sonnenschutzfolien aufkleben	Diese Schutzfolien dienen in erster Linie zur Reflexion des Sonnenlichts. Damit heizt sich der Innenraum des Fahrzeugs im Sommer weniger stark auf.
	g-Wert von Fenstern dem Klima anpassen	In südlichem Klima, wo Kühlung eine wichtige Rolle spielt, sollte der g-Wert eher tief gehalten werden. Im Bergklima, wo solare Wärmegevinne zu einer Heizung des Fahrzeugs beitragen können, soll der g-Wert eher hochgehalten werden.
	bessere Fenster	Konkret ist hiermit eine Verbesserung von Einfach- bzw. Zweifachverglasung auf Zweifach- bzw. Dreifachverglasung gemeint. Anders ausgedrückt, wird der U-Wert der Fenster mit dieser Massnahme reduziert.
	Smarte Fenster	Unter diesem Begriff verstehen die Autoren dieses betrachteten Artikels Fenster, welche ihre Lichtdurchlässigkeit automatisch der Intensität des Sonnenlichts anpassen.
	Optimierung der Fenstergrösse	Die optimale Grösse wird im betrachteten Artikel leider nicht beschrieben.
	low-e Fenster	Low-E Fenster bezeichnen Fenster mit niedriger Wärmeabstrahlung (low-emissivity). Sie bestehen in der Regel aus einem Isolierglas, auf welchem eine dünne Metallschicht aufgebracht ist welche Wärmestrahlung reflektiert.

Cluster	Massnahme	Beschreibung
Wärmeaustausch über opake Hülle reduzieren (1/2)	Fahrzeug weiss lackieren	Durch die hohe Reflexion der weissen Farbe wird das Aufheizen im Sommer reduziert.
	Dämmung	Diese Massnahme spricht alle Arten der Dämmung an. Jedes Element der Fahrzeughülle kann bei besserer Dämmung zur Senkung des Energiebedarfs beitragen.
Wärmeaustausch über opake Hülle reduzieren (2/2)	Aktive Isolierung	Die betrachtete Studie beschreibt ein System, in welchem Abluftwärme genutzt wird, um die Fahrzeughülle zu erwärmen.
	Luftdichtheit verbessern	Die Fahrzeughülle sollte so luftdicht wie möglich sein. Ungewollter Luftaustausch zwischen dem Fahrzeuginneren und dem Aussenraum erhöht den thermischen Energieverlust.
	Boilerdämmung	In der betrachteten Studie wurde dazu die Boilerkammer in einem Trolleybus zusätzlich abgeschirmt und isoliert. Es sind aber auch andere Dämmmethoden denkbar.
Luftaustausch reduzieren	Drehzahl der Ventilatoren reduzieren	Im Heizbetrieb liessen sich die Lüftungsventilatoren des Trolleybusses in der betrachteten Studie nicht unter 40% der maximalen Leistung drosseln. Solche Ventilatoren lassen sich z.B. mithilfe von Schaltern weiter drosseln, um den Energiebedarf zu reduzieren.
	CO2-gesteuerte Lüftung	Die zugeführte Luftmenge wird hierbei über die CO2-Konzentration im Fahrzeuginneren geregelt.
	Luftwechselrate optimieren	Mit optimierter Luftwechselrate ist unter anderem gemeint, dass das Verhältnis von Frischluft zu Umluft frei gewählt werden kann. Dieses Verhältnis ist besonders dann relevant, wenn die Aussenlufttemperatur von der Innentemperatur deutlich abweicht.
Heizung reduzieren	Temperaturanpassung im Innenraum	Indem das Toleranzband für Innenraumtemperaturen erweitert wird, kann weniger Energie für die Heizung und Kühlung aufgewendet werden.
	Schlumberbetrieb einführen	Im Schlumberbetrieb werden die Funktionen der HLK-Anlagen von Fahrzeugen, welche sich nicht im Fahrbetrieb befinden, soweit reduziert, dass zwar keine Schäden am Fahrzeug entstehen, aber unnötige Lüftung, Heizung und Kühlung vermieden wird.
	Regulierung der Heizung unter Berücksichtigung der internen Lasten	Im NINA Nahverkehrszug der BLS wurden dazu Innentempersensoren für den optimalen Betrieb der Klimaregelung verwendet. Aber auch andere Methoden zur Berücksichtigung der internen Lasten sind denkbar.
Präzisere Steuerung der HLK-Anlage	Modellprädiktive Regelung der HLK-Anlage	Die genauen Optimierungsalgorithmen unterscheiden sich leicht, aber grundsätzlich optimiert eine modellprädiktive Regelung der HLK-Anlage den Betrieb immer mit Blick auf einen etwas breiteren Zeithorizont.
	Kompressor mit variabler Leistungs-/Drehzahlregelung	Die Drehzahl eines solchen Kompressors kann präzise reguliert werden. Die Leistung im Kühl- und Wärmepumpenbetrieb kann somit ohne einen Bypass fein reguliert werden.
	Frequenzvariable HLK-Anlage	Anstatt einer mehrstufigen Steuerung über Schaltkontakte, wird das HLK-Anlage mit Halbleitern stufenlos gesteuert.
Alternative Türenmodelle & -bedienung	Unnötige Türöffnungen verhindern	Wenn Türöffnungen auf ein Minimum reduziert werden, wird der Austausch von thermischer Energie zwischen Fahrzeuginnenraum und Aussenluft ebenfalls reduziert.
	Türvorhänge installieren	Schwere Vorhänge direkt hinter den Türen, welche die Luftzirkulation beschränken. Deren Effekt wurde in der Studie P-098 nicht überprüft.
	Schnellere Türöffnung und -schliessung	Durch schnellere Türantriebe soll die Türöffnungsdauer reduziert werden.
	Drehtüren	Statt der bekannten aufklappenden Türen spricht die betrachtete Studie davon, diese durch Drehtüren zu ersetzen.

Cluster	Massnahme	Beschreibung
	Türluftschleier	Parallel zur Fahrzeugtür wird Luft eingeblasen damit der Luftaustausch zwischen Fahrzeuginnenraum und Aussenraum reduziert wird.
Passive Klimaregelung	Lüftungsregulierung bei Türöffnung	Die Idee hinter dieser Massnahme ist die Druckdifferenz zwischen Innen- und Aussenluft zu minimieren, damit der Luftaustausch über die Türen reduziert wird.
	Freecooling	Es gibt verschiedene Freecooling-Methoden. Der betrachtete Artikel spricht spezifisch die Kühlung der Kondensatoren der HLK-Anlage anhand von Aussenluft an.
Design durch Simulation	Thermisches Simulationsmodell	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.
	Behaglichkeitssimulation	Es gibt verschiedene Methoden die thermische Behaglichkeit für den Fahrgast bereits in der Konzeption zu überprüfen. Die betrachtete Studie tut dies anhand eines CFD-Modells für verschiedene Zonen des Fahrgastraums.
Energieeffizienz durch andere Elemente	Fahrzeit verringern/Schneller fahren	Eine der betrachteten Studien beschreibt, dass die thermische Energie in erster Linie von der Betriebszeit abhängig ist. Wenn also Fahrzeuge weniger lang unterwegs sind, weil sie schneller fahren, kann auch die aufgewendete thermische Energie reduziert werden.
	Aussenluftvolumenstrom nach Bedarf regeln	Um die Effizienz von Antriebsmotoren während der Fahrt zu gewährleisten müssen diese adäquat belüftet werden. Lokführer tendieren dazu den Ventilationsbedarf der Motoren zu hoch einzuschätzen, was sie oft dazu drängt die höchste Ventilationsstufe einzustellen. Statt einer manuellen Einstellung wird mit der bedarfsgerechten Motorenventilation vorgeschlagen diese zu automatisieren.
	Tageslichtsteuerung der Beleuchtung	Dies spielt besonders dann eine Rolle, wenn Tunnels auf der Fahrstrecke vorhanden sind und das Licht nicht während der ganzen Fahrt brennen soll.
	LED-Beleuchtung	Dies gilt natürlich nur als Massnahme, wenn ineffizientere Beleuchtung (z.B. fluoreszierende Lampen) dadurch abgelöst werden. In einer der betrachteten Studien wurden z.B. alle fluoreszierenden Lampen durch effizientere Modelle ersetzt, was auch schon zu einer Reduktion des Energiebedarfs führte. Diese Studie wurde jedoch in 2007 publiziert, als LEDs noch teurer waren. Heutzutage wäre der Ersatz mit einer anderen Beleuchtung als LED fast nicht mehr denkbar.
	Bremsabwärmernutzung	Die dissipierte Reibungsenergie beim Bremsvorgang eines Fahrzeugs kann zu Erwärmung des Fahrzeuginnenraums verwendet werden. Der betrachtete Artikel geht nicht genauer darauf ein, beschreibt aber, dass allgemein Abwärme aus dem Traktionsapparat für den Innenraum verwendet werden kann.

Tabelle 28: Gesamte Liste der in der wissenschaftlichen Literatur erwähnten Energieeffizienzmassnahmen.

Das Energiesparpotential der einzelnen Massnahmen ist im Detail in der Tabelle im Anhang 9.3.1 aufgeführt. Die Tabelle zeigt einerseits auf, wie die Expertenvoten über die verschiedenen Bandbreiten (<1%, 1-5%, 5-10%, 10-20%, >20%) verteilt sind. Andererseits ist in der Tabelle angegeben in welchen Bereichen sich das in der wissenschaftlichen Literatur angegebene Energiesparpotential der einzelnen Massnahmen bewegt.

Aufgrund dieser Bewertungen gehören die CO₂-gesteuerte Lüftung, der Wärmepumpeneinsatz und das Einführen eines Schlummerbetriebes zu den effektivsten Energiesparmassnahmen.

Die kumulativen oder gegenläufigen Effekte der Energiesparmassnahmen können anhand dieser Tabelle nicht beziffert werden. Auch aus der wissenschaftlichen Literatur lassen sich diese Effekte nicht ableiten. Einzelne Studien geben zwar Energiesparpotentiale für Kombinationen von verschiedenen

Massnahmen an (z.B. [14]), jedoch wurde keine Studie gefunden, in welcher die kumulativen und gegenläufigen Effekte spezifisch untersucht wurden. Folglich ist es dieser Basis nicht möglich, eine Einschätzung für das maximale Energiesparpotential in den Bereichen HLK und Fahrzeughülle für die untersuchten öffentlichen Verkehrsmittel (Bahn, Bus, Tram) abzugeben.

4.9 Übersicht aller prinzipiell möglicher Massnahmenarten

Unabhängig von den in der Literatur gefundenen Massnahmen können grundsätzlich die nachfolgend aufgeführten Massnahmen beschrieben werden, welche einen Effekt auf den Energieverbrauch der HLK haben. Die recherchierten und oben aufgeführten Massnahmen sind zum Teil in diesem «theoretischen» Massnahmen enthalten, zum Teil gibt es aber auch «theoretische Massnahmen» die bisher in der Literatur noch nicht dokumentiert wurden und somit einer genaueren Analyse bedürfen. In der nachfolgenden Tabelle 29 werden die «theoretisch möglichen Massnahmen» dokumentiert und deren Effekt wird beschrieben.

Bereich	Massnahme	Effekt
Komfortanforderungen	Reduktion Raumtemperatur im Sommer	Eine höhere zulässige Raumtemperatur reduziert den Kühlbedarf
	Reduktion Raumtemperatur im Winter	Eine tiefere zulässige Raumtemperatur reduziert den Heizbedarf
	Veränderung Raumluftfeuchte	Eine veränderte Vorgabe betreffend Raumluftfeuchte verändert den Be- oder Entfeuchtungsbedarf
	Reduktion Beleuchtungsstärke	Eine Reduktion der Beleuchtungsstärke reduziert den Energiebedarf fürs Kunstlicht
Hülle (opak)	Verbesserung Wandaufbau / Dämmung	Eine bessere Dämmung der Fahrzeughülle reduziert die Transmissionsverluste und somit auch den Heizenergiebedarf im Winter. Im Sommer hat eine bessere Dämmung tagsüber einen Vorteil (weniger Wärmeeintrag durch Transmission) und nachts einen Nachteil (weniger starke Auskühlung des Fahrzeugs über die Nacht)
	Reduktion Wärmebrücken	Eine Reduktion der konstruktiven/materialbedingten oder der geometrischen/formbedingten Wärmebrücken reduziert die Energieverluste durch Transmission
	Höhere Luftdichtigkeit	Eine Reduktion der konstruktiven/materialbedingten oder der geometrischen/formbedingten Wärmebrücken reduziert die Energieverluste durch Transmission
Hülle (Fenster)	Reduktion Fensterfläche	Je geringer die Fensterflächen, desto geringer die solaren Gewinne im Winter resp. die solaren Lasten im Sommer. Dies führt zu einem höheren Heizenergiebedarf und zu einem tieferen Kühlenergiebedarf. Falls die Fenster die thermischen Schwachstellen in der Hülle sind, reduziert eine kleinere Fensterfläche die Transmissionsverluste.
	Tieferer U-Wert	Ein reduzierter U-Wert reduziert die Energieverluste durch Transmission und somit den Heizwärmebedarf. Im Sommer hat ein tiefer U-Wert tagsüber einen Vorteil (weniger Wärmeeintrag durch Transmission) und nachts einen Nachteil (weniger starke Auskühlung des Fahrzeugs über die Nacht)
	Tieferer g-Wert	Ein reduzierter g-Wert (Gesamtenergiedurchlassgrad) reduziert den Kühlenergiebedarf im Sommer, erhöht aber den Heizenergiebedarf im Winter
	Tieferer t-Wert	Ein reduzierter t-Wert (Lichttransmissionsgrad) reduziert den Tageslichteintrag und erhöht somit den Kunstlichtbedarf
	Besserer Sonnenschutz / Höherer Beschattungsfaktor	Ein verbesserter Sonnenschutz oder Beschattungsfaktor reduziert die solaren Lasten im Sommer und damit den Kühlenergiebedarf. Im Winter kann die Reduktion der solaren Lasten zu einer Erhöhung des Heizenergiebedarfs führen
Hülle (Türen)	Höhere Luftdichtigkeit	Eine verbesserte Luftdichtigkeit bei den Türen reduziert die Lüftungsverluste / Infiltration und somit die Energieverluste

Bereich	Massnahme	Effekt
	Verbesserung Dämmung	Eine verbesserte Dämmung der Türen reduziert die Energieverluste durch Transmission
	Reduktion Wärmebrücken	Eine Reduktion der konstruktiven/materialbedingten oder der geometrischen/formbedingten Wärmebrücken reduziert die Energieverluste durch Transmission
	Reduktion Gewicht	Eine Gewichtsreduktion bei den Türen reduziert den Energieaufwand fürs Öffnen und Schliessen der Türe
HLKE (Heizung)	Reduktion Betriebszeiten	Eine Reduktion der Betriebszeit ist (grösstenteils) proportional zur Reduktion des Heizenergiebedarfs
	Optimierung Systemtemperatur	Eine Reduktion der Systemtemperatur erhöht bei einer Wärmepumpe den Wirkungsgrad (Heizfall).
	Erhöhung Wirkungsgrad / COP	Eine Verbesserung des Wirkungsgrads der Heizung bzw. des COP bei der Wärmepumpe reduziert die Verluste und somit den Heizwärmebedarf
HLKE (Lüftung)	Reduktion Betriebszeiten	Eine Reduktion der Betriebszeit ist (grösstenteils) proportional zur Reduktion des Energiebedarfs für die Lüftungsanlage
	Reduktion Volumenstrom	Eine Reduktion des Volumenstroms reduziert den Druckverlust überproportional und somit auch den Energiebedarf der Lüftungsanlage. Zudem muss bei reduziertem Volumenstrom weniger Luft aufbereitet (geheizt, gekühlt, be-/entfeuchtet) werden
	Reduktion Druckverlust	Eine Reduktion des Druckverlusts reduziert den Energiebedarf der Lüftungsanlage überproportional. Der Druckverlust kann reduziert werden durch tiefere Luftmengen, grössere Kanalquerschnitte, weniger Krümmungen in den Lüftungskanälen oder weniger Druckverluste über Filter, Auslassgitter etc.
	Erhöhung Wärmerückgewinnung	Eine Wärmerückgewinnung bzw. eine verbesserte Wärmerückgewinnung erhöhen den Anteil aus der Abluft zurückgewonnener Wärme (Kälte), welche wiederum der Zuluft zugeführt werden kann.
HLKE (Kühlung)	Reduktion Betriebszeiten	Eine Reduktion der Betriebszeit ist (grösstenteils) proportional zur Reduktion des Kühlenergiebedarfs
	Optimierung Systemtemperatur	Eine Erhöhung der Systemtemperatur erhöht bei einer Wärmepumpe den Wirkungsgrad (Kühlfall).
	Erhöhung Wirkungsgrad / COP	Eine Verbesserung des Wirkungsgrads der Kühlung bzw. des COP bei der Wärmepumpe reduziert die Verluste und somit den Kühlenergiebedarf
HLKE (Beleuchtung)	Reduktion Betriebszeiten	Eine Reduktion der Betriebszeiten der Beleuchtung reduziert den Beleuchtungsenergiebedarf
	Reduktion Beleuchtungsstärke	Eine Reduktion der geforderten Beleuchtungsstärke (evt. auch nur lokal) reduziert den Beleuchtungsenergiebedarf
	Erhöhung Effizienz lm/W	Eine verbesserte Effizienz der eingesetzten Leuchten reduziert den Beleuchtungsenergiebedarf
Energie	Einbau Thermischer Wärmespeicher	Ein Thermischer Speicher kann z.B. Abwärme (aus Antrieb, aus überschüssiger Produktion etc.) speichern und zeitverschoben wieder abgeben
	Einbau Stromspeicher (Akku)	Ein Stromspeicher kann überschüssigen Strom (aus Rückgewinnung oder aus Produktion am Fahrzeug) speichern und zeitverschoben wieder abgeben
	Einbau Energiegewinnung (z.B. PV)	Direkt am Fahrzeug könnte z.B. über Photovoltaik Energie erzeugt werden

Tabelle 29: Systematische Auflistung von theoretisch möglichen Massnahmen und deren Effekten auf die Energieeffizienz

Bei der systematischen Suche nach (weiterem) Effizienzpotenzial kann man sich an dieser Liste orientieren und systematisch weitere Massnahmen definieren und prüfen. Ebenfalls dient diese Liste dazu,

bei Refitvorhaben oder beim Design eines neuen Fahrzeugs mögliche Energiesparmassnahmen systematisch zu identifizieren, umzusetzen oder zu verwerfen

4.10 Qualitative Bewertung der Massnahmen

Wie schon die vorhergehenden Erläuterungen zeigen, ist es aufgrund der sehr unterschiedlichen Randbedingungen anspruchsvoll bis unmöglich, ohne detaillierte Berechnungen die mögliche Wirkung von Massnahmen zu bewerten. Etwas einfacher dürfte die Identifikation von einzelnen Massnahmen sein, deren Wirkung offensichtlich gering sein dürfte bzw. die kaum umsetzbar sind. Diese Massnahmen werden hier aufgelistet und kurz kommentiert:

Massnahme (aus diversen Studien)	Beschreibung	Bemerkung der Autoren
Schwere Türvorhänge installieren	Schwere Vorhänge direkt hinter den Türen reduzieren die Luftzirkulation	Vorhänge dürften das Ein- und Aussteigen stark beeinträchtigen und sind zudem unhygienisch. Ein Türluftschleier dürfte die deutlich bessere Lösung sein.
Unnötige Türöffnungen verhindern	Minimale Türöffnungszeiten reduzieren die Energieverluste durch die offenen Türen.	Heutige Steuerungen für den Türbetrieb sind im Allgemeinen bereits auf minimale Öffnungszeiten optimiert.
Schnellere Türöffnung und -schliessung	Durch schnellere Türantriebe kann die Türöffnungsdauer reduziert werden.	Das Öffnen und Schliessen der Türen dauert heute bereits nur ca. 1-2 Sekunden. Bei einer durchschnittlichen Öffnungsdauer von ca. 15 Sekunden ist das Sparpotential gering.
Drehtüren	Statt der bekannten aufklappenden Türen könnten Drehtüren verwendet werden.	Ein schnelles Ein- und Aussteigen von grösseren Personenmengen ist nicht möglich. Platzbedarf zu gross. Nicht geeignet für Kinderwagen, Fahrräder, Rollstühle, gehbehinderte Personen.
Fahrzeit verringern / schneller fahren	Wenn Fahrzeuge weniger lang unterwegs sind, weil sie schneller fahren, kann auch die aufgewendete Energie für die Raumkonditionierung reduziert werden.	Der Mehraufwand an Traktionsenergie aufgrund des höheren Luftwiderstands bei höheren Geschwindigkeiten dürfte die Einsparungen mehr als zunichtemachen.

Tabelle 30: Massnahme mit zu geringer Einsparung die nicht weiterverfolgt werden sollte

Für die Bewertung der übrigen Massnahmen sind detaillierte Berechnungen nötig, welche auch den unterschiedlichen Randbedingungen betreffend Aussenklima, Fahrzeugtyp, Einsatzweise etc. Rechnung tragen.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass bei neuen Fahrzeugen «bauliche» Massnahmen (Dämmung der Hülle, betreffend Gesamtenergie optimierte Verglasungen etc.) im Vordergrund stehen dürften, da sie im Normalfall während der ganzen Lebensdauer des Fahrzeugs wirksam sind.

Im Retrofit sind viele dieser im Neubau zu favorisierenden Massnahmen nicht oder nur mit grossem Aufwand umsetzbar. Hier stehen demzufolge Massnahmen im Vordergrund bei Komponenten, die sowieso ausgetauscht werden (z.B. Verglasungen, HLKE-Komponenten).

Im Betrieb sind kaum baulichen Anpassungen möglich, darum stehen hier Anpassungen an den Komfortanforderungen oder bei der Steuerung im Vordergrund (z.B. Schlumberbetrieb, Senken der Soll-Raumlufttemperatur im Winter etc.). Hier stehen vor allem Massnahmen im Vordergrund, welche den Heizwärmebedarf reduzieren.

Abschliessend werden in der nachfolgenden Tabelle 31 die in der Literatur gefundenen Massnahmen (aus Tabelle 28) mit den theoretisch denkbaren Massnahmen (Tabelle 29) kombiniert und die Wirkung der einzelnen Massnahmen wird in einer sehr groben Näherung qualitativ bewertet. Damit lässt sich erkennen, welche Einzelmassnahme mehrere Effekte bewirkt – und zwar in positiver Richtung (positiver Wert in der Tabelle) als auch in negativer Richtung (negativer Wert in der Tabelle). So hat z.B. ein besserer g-Wert bei der Verglasung einen positiven Effekt auf den Kühlenergiebedarf (externe solare Lasten werden reduziert, es muss weniger gekühlt werden), aber gleichzeitig einen negativen Effekt auf

den Heizenergiebedarf (weniger solare Gewinne erhöhen den Heizwärmebedarf zur Aufrechterhaltung der geforderten Raumlufttemperatur).

In der nachfolgenden Tabelle 31 lässt sich aber auch erkennen, welche theoretisch denkbaren Massnahmen nicht in der Literatur dokumentiert sind. So wird zum Beispiel die Stromgewinnung am Fahrzeug (mittels Photovoltaik) oder die (temporäre) Reduktion der Beleuchtungsstärke in der recherchierten Literatur nicht diskutiert.

Aufgrund dieser Tabelle werden die grössten Wirkungen durch einen Schlummerbetrieb, durch die Reduktion der Luftvolumenströme und durch Anpassungen an der Fahrzeughülle (Dämmung der Hülle, optimierte Fenster/Verglasungen) vermutet, sowie bei hocheffizienten Heiz- und Kühlaggregate.

Einen negativen Effekt dürften nur sehr wenige Massnahmen haben, insbesondere im Bereich der Türöffnungen, wenn die Massnahme einen relativ grossen apparativen Aufwand bedingt mit entsprechendem Zusatzgewicht, was die eingesparte Klimatisierungsenergie durch Mehraufwand bei der Traktion kompensieren dürfte.

Bereich	Massnahme	Wirkung	Hülle									Allg.	HLKE															
			Opak		Fenster			Türen					Gesamtgewicht	Heizung		Lüftung		Kühlung		Beleuchtung								
			Dämmung	Wärmebrücken	Luftdichtigkeit der Hülle erhöhen	Fensterfläche reduzieren	U-Wert	g-Wert	t-Wert	Beschattungsfaktor	Sonnenschutz	Luftdichtigkeit		Lüftungsvorlufe	Wärmebrücken	Dämmung	Betriebszeiten reduzieren	Systemtemperatur senken	Wirkungsgrad / COP	Betriebszeiten	Volumenstrom	Druckverlust	Wärmerückgewinnungsgrad	Betriebszeiten reduzieren	Systemtemperatur erhöhen	Wirkungsgrad	Betriebszeiten reduzieren	Lichtausbeute lm/W
Effizienteres HLK-Anlagendesign	Andere Kältemittel																											
	Wärmepumpennutzung																											
	Abluftwärme-Rückgewinnung																											
	Ansaugstellen der Kondensator-Kühlluft optimal platzieren																											
	Effizientere HLK-Anlagen																											
Wärmeaustausch über Fenster verringern	Zwei-Stufen-Luftauswerfer-Kühlung																											
	Verhindern von Gegenheizen																											
	Sonnenschutzfolien aufkleben																											
	g-Wert von Fenstern dem Klima anpassen																											
	bessere Fenster																											
Wärmeaustausch über opake Hülle reduzieren	Smarte Fenster																											
	Optimierung der Fenstergrösse																											
	low-e Fenster																											
	Fahrzeug weiss lackieren																											
	Dämmung																											
Luftaustausch reduzieren	Aktive Isolierung																											
	Luftdichtheit verbessern																											
	Boilerdämmung																											
Heizung reduzieren	Drehzahl der Ventilatoren reduzieren																											
	CO2-gesteuerte Lüftung																											
	Luftwechselrate optimieren																											
Präzisere Steuerung der HLK-Anlage	Temperaturanpassung im Innenraum																											
	Schlumberbetrieb einführen																											
	Regulierung der Heizung unter Berücksichtigung der internen Lasten																											
Alternative Türenmodelle & -bedienung	Modellprädiktive Regelung der HLK-Anlage																											
	Kompressor mit variabler Leistungs-/Drehzahlregelung																											
	Frequenzvariable HLK-Anlage																											
	Unnötige Türöffnungen verhindern																											
Passive Klimaregelung	Türvorhänge installieren																											
	Schnellere Türöffnung und -schliessung																											
	Drehtüren																											
	Türluftschleier																											
Energieeffizienz durch andere Elemente	Freecooling																											
	Lüftungsregulierung bei Türöffnung																											
	Freecooling																											
	Fahrzeit verringern/Schneller fahren																											
	Aussenluftvolumenstrom nach Bedarf regeln																											
Energieeffizienz durch andere Elemente	Tageslichtsteuerung der Beleuchtung																											
	LED Beleuchtung																											
	Bremsabwärmenutzung																											

Legende		
kein Einfluss		
geringer Einfluss	-1	1
mittlerer Einfluss	-2	2
grosser Einfluss	-3	3

Tabelle 31 Einfluss der Massnahmen

5. Analyse/Diskussion

5.1 Erkenntnisse aus der wissenschaftlichen Literatur

Die Recherche hat gegen 100 Studien mit Informationen zum Thema Energieeffizienz bei HLK und Hülle identifiziert. Einige dieser Studien – vor allem auch die vom BAV initiierten Studien – haben eine hohe Relevanz zum hier untersuchten Thema. Abgesehen davon ist aber in all den Studien keine klare Systematik oder auch keine klare Häufung spezieller Themen auszumachen. Die meisten Studien behandeln ein partielles Thema aus der Gesamtheit der möglichen Massnahmen. Nicht überraschend adressieren die meisten Studien Energieeffizienzmassnahmen bei Eisenbahnfahrzeugen, gefolgt von Bus und Tram. Weiter ist festzustellen, dass ein grosser Teil der in der Literatur dokumentierten Massnahmen vom Prinzip her allgemein bekannt ist, nicht zuletzt auch weil viele dieser Massnahmen im Gebäudereich bereits zur Anwendung kommen.

Angaben zum Einsparpotenzial der einzelnen Massnahmen fehlen oft, fast nie sind Angaben zu den nötigen Investitionskosten dokumentiert. Die Gründe dafür liegen auf der Hand: Die erzielbaren Einsparungen wie auch die mit der Massnahme verbundenen Kosten hängen von vielen Faktoren ab (Retrofit vs. Neubau, Fahrzeugtyp, Einsatzart des Fahrzeuges, Umgebungsbedingungen etc.), so dass keine pauschalen Aussagen möglich sind. Oft sind es aber schlicht auch die fehlenden quantitativen Daten, welche konkrete Aussagen zu Kosten und/oder Einsparpotenzialen verunmöglichen.

Einzelne Analysen zeigen, dass die durch Berechnungen/Simulationen ermittelten Potenziale zum Teil merklich von im «Labor» (Klimakammer, Windkanal) erzielten Einsparungen unterscheiden und noch mehr von den Einsparungen im realen Betrieb abweichen. Die rechnerisch ermittelten Potenziale sind im Normalfall am grössten, die in der Realität erzielten Einsparungen am kleinsten. Dieses als «Performance Gap» bezeichnete Phänomen beobachtet man aber nicht nur bei Fahrzeugen, sondern auch bei Gebäuden und in vielen weiteren technischen sowie nicht-technischen Bereichen. Diese Abnahme der Energiesparpotenziale von der Berechnung zur Umsetzung zeigt sich beispielsweise bei der Studienreihe rund um das Wiener Eco-Tram [19], [20]. Teilweise ist dieser Performance Gap schlichtweg zu akzeptieren, teilweise kann er aber mit entsprechenden Verbesserungen bei den Berechnungen (realitätsnähere Randbedingungen) oder bei der Umsetzung (planungsnähere Umsetzung) reduziert werden.

Die wenigen Angaben zu den Installationskosten in der Literatur unterstützen die naheliegende Annahme, dass betriebliche Massnahmen deutlich günstiger umzusetzen sind als bauliche Massnahmen. Die Beispiele «Temperaturanpassung im Innenraum» (Aufwand: < 3'000 CHF pro Wagen) und «Dämmung der opaken Hülle» (Aufwand: 24'000-85'000 CHF pro Wagen) zeigen diesen Unterschied beim Aufwand bei einem sehr ähnlichen Energiesparpotential exemplarisch auf.

Während die grossen Differenzen bei den erwarteten Potenzialen und Kosten kaum eine Priorisierung einzelner Massnahmen aufgrund des Kosten-Nutzenverhältnisses zulassen, gibt es einige Massnahmen, die mit gutem Gewissen ausgeschlossen werden können, weil sie offensichtlich a) nicht oder nur mit sehr grossem Aufwand umsetzbar sind oder weil sie b) kein signifikantes Sparpotenzial erwarten lassen (auf Basis heutiger Technologie).

Um verlässliche Aussagen zum Potenzial einzelner Massnahmen machen zu können, wäre eine bessere Datengrundlage (Berechnungen/Simulationen und/oder Messungen) nötig, welche in Form einer Sensitivitätsanalyse auch die verschiedenen Einflussfaktoren (Fahrzeugtyp, Einsatzart, Umgebungsbedingungen etc.) berücksichtigt. Die z.B. im Vergleich zum Gebäude erst dünne Datenbasis hat aber auch schlichtweg damit zu tun, dass im Bereich von Fahrzeugen im öffentlichen Verkehr erst relativ wenige Energieeffizienzmassnahmen umgesetzt und mit einem Energiemonitoring (Feststellung der Wirkung aufgrund einer Energieverbrauchsanalyse vor und nach Umsetzung der Massnahme) begleitet wurden.

5.2 Vergleich Literaturangaben mit Expertenbewertungen

Die Wissenslücken bei den Potenzialen, bei der Umsetzbarkeit von Massnahmen und ganz vereinzelt auch bei den Kosten konnten durch die Befragung von Experten nur wenig reduziert werden. Jedoch liegen nur von sieben Experten (fünf aus fünf Transportunternehmen und zwei aus Industrieunternehmen) entsprechende Schätzungen zu Energiesparpotential und Investitionskosten der identifizierten Massnahmen vor – entsprechend wenig repräsentativ sind diese Angaben. Der relativ tiefe Rücklauf von 30% (7 von 23 angefragten Experten antworteten) kann ein Indiz dafür sein, dass das Thema «Energieeffizienz» noch wenig etabliert ist bzw. auf wenig Interesse stösst, dass erprobte Lösungen noch in vielen Bereichen fehlen und/oder dass belastbare Informationen zum erzielbaren Einsparpotenzial kaum verfügbar sind.

Mit Ausnahme der Massnahme «bessere Fenster» (also Fenster mit besserem Dämmverhalten) mit einem dokumentierten Einsparpotenzial von maximal 10% haben alle im Absatz 4.6.1 näher beschriebenen Massnahmen ein in der Literatur dokumentiertes Energiesparpotential von ca. 5%-40% (bezogen auf den Jahresenergiebedarf für Heizung, Lüftung und Kühlung). Die Experten ordnen den selben Massnahmen in den meisten Fällen Einsparpotenziale zwischen 1% und 20% zu. Auch hier lassen sich die grossen Bandbreiten dadurch erklären, dass nicht zwischen verschiedenen Fahrzeugtypen und unterschiedlichen Einsatzarten unterschieden werden konnte. Der Vergleich zwischen Literaturwerten und Experteneinschätzungen zeigt eine klare Tendenz, dass von den Experten die Potenziale merklich tiefer eingeschätzt werden, als es in der Literatur dokumentiert ist. Dies mag mit Unkenntnis zu tun haben, aber auch mit Erfahrungen aus der Praxis und/oder zu optimistischen Annahmen bei der Berechnung.

5.3 Beurteilung der Massnahmen

Die meisten gefundenen Massnahmen fokussieren auf die Bahn, Bus und Tram werden eher marginal betrachtet, auch wenn sich viele Massnahmen für die Bahn mindestens sinngemäss auch auf die anderen Fahrzeugtypen übertragen lassen. Rund ein Viertel der gefundenen Massnahmen drehen sich um die Fahrzeughülle (inkl. Fenster, welche prominent vertreten sind). Massnahmen zum Gesamtsystem HLK, Massnahmen zur Heizung und Massnahmen zur Lüftung machen anzahlmässig jeweils etwa 15-20% am Total aller Massnahmen aus.

Wie bereits erwähnt, sind nur wenig Angaben zu den prognostizierten Einsparpotenzialen verfügbar und dort wo Angaben vorliegen, streuen diese stark. Unabhängig davon ist zu beachten, dass bei der Kombination verschiedener Massnahmen die einzelnen Potenziale nicht linear zu einem Gesamtpotenzial addiert werden können. Bei der Kombination ist die Summe der Einzeleinsparungen oft kleiner als das Total aller Massnahmen zusammen. Es gibt aber auch Einzelmassnahmen, die sich in der Kombination verstärken, insbesondere wenn z.B. eine Wärmepumpe eingesetzt wird und weitere Massnahmen dazu dienen, die Systemtemperaturen zu reduzieren. Tiefere Systemtemperaturen führen bei einer Wärmepumpe zu einer höheren Leistungszahl, sprich Effizienz.

Die Studie zeigt, dass es noch keine breit umgesetzte, umfassend analysierte und dokumentierte Effizienzmassnahme gibt, für welche erhärtete Grundlagen zu Einsparpotenzial sowie Umsetzungsaufwand/Kosten vorliegen. Ein Grund dafür sind einerseits die spezifischen Situationen (Fahrzeug, Art der Umsetzung, Einsatzweise des Fahrzeugs etc.), welche zu unterschiedlichem Aufwand und Ergebnissen führen können. Ein anderer Grund ist, dass viele Massnahmen noch nicht im Detail analysiert sind (auch unter Berücksichtigung unterschiedlicher Rahmenbedingungen). Hier dürfte es sich lohnen, im Rahmen einer Gesamtstrategie prioritär die erfolgversprechendsten Massnahmen detaillierter zu analysieren.

Bei den bereits öfters umgesetzten Massnahmen stehen zwei Massnahmen im Vordergrund, die ein vergleichsweise grosses Einsparpotenzial erwarten lassen und die einen vergleichsweise geringen Eingriff ins Fahrzeug bedingen (und somit bei bestehenden Fahrzeugen gleichermassen angewendet werden können wie bei neuen Fahrzeugen):

- Schlummerbetrieb
- Temperaturanpassung im Fahrgastinnenraum

Beide Massnahmen wurden vereinzelt und bisher ohne grosse Probleme umgesetzt. Die nötigen Investitionen sind vergleichsweise gering. Das Einsparpotenzial hängt stark vom Einsatzprofil der Fahrzeuge ab (Verhältnis Betriebs- zu Nicht-Betriebsstunden).

Fünf weitere Massnahmen versprechen zwar grosses Einsparpotenzial, sind aber deutlich anspruchsvoller in der Umsetzung:

- Einsatz von Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen
- CO₂-gesteuerte Lüftung
- Abluftwärme-Rückgewinnung
- Modellprädiktive Regelung
- Dämmung der opaken Hülle

Diese Massnahmen haben grössere konzeptionelle Anpassungen zur Folge (Platzbedarf, Einbau von Sensoren, neue Leitsysteme, Verstromung, Leitungsführung, Wärme-/Kälteverteilung, Wärme-/Kälteabgabe). Ob sich die Umsetzung dieser Massnahmen wirklich lohnt, muss daher im Einzelfall beurteilt werden. Tests an einzelnen Bahnwagen, Bussen oder Trams welche für die Flotte typische Strecken fahren (bzgl. Klima, Fahrzeit, Türöffnungen, etc.) können in diesem Fall Klarheit für die Transportunternehmen schaffen.

Falls das Verhältnis zwischen Kosten und Energieeinsparung zu wenig zufriedenstellend ist, um diese Massnahmen bei einem Retrofit umzusetzen, sollte zumindest beim Einkauf von neuen Fahrzeugen Wert auf die Umsetzung dieser Massnahmen gelegt werden.

Die Dämmung der Fahrzeughülle ist im Retrofit sehr teuer und meist auch kaum umsetzbar, im Neubau sieht das aber anders aus. Zudem hat die Dämmung der Fahrzeughülle (Wände, Boden, Dach) einen entscheidenden Einfluss auf die Dimensionierung der Heizungs- und Kühlungskomponenten. Damit kann das Gewicht des Fahrzeugs reduziert werden, was einen positiven Nebeneffekt über die ganze Lebensdauer des Fahrzeugs bewirkt.

Da sich die meisten Studien auf einzelne Massnahmen fokussieren und die Wirkungen von Einzelmassnahmen nicht linear miteinander addiert werden können, fehlen theoretische Angaben oder Erfahrungswerte, wie stark der Energiebedarf von Fahrzeugen für Heizung, Lüftung und Kühlung bestenfalls gesenkt werden könnte (bestmögliches Fahrzeug, «Baseline»).

5.4 Einfluss Corona auf Energiesparmassnahmen

Einige Energieeffizienzmassnahmen mit vergleichsweise hohem Einsparpotenzial basieren auf einer Reduktion des Aussenluftwechsels auf das hygienisch notwendige Mass (z.B. bei der CO₂-gesteuerten Lüftungsanlage). Im Zusammenhang mit der während der Ausarbeitung der hier vorliegenden Studie ausgebrochenen Corona-Pandemie hat sich schnell gezeigt, dass ein hoher bzw. maximaler Aussenluftwechsel in Räumen und Fahrzeugen ein wirksames Mittel gegen hohe Ansteckungsrisiken mit dem Corona-Virus ist. Dies steht im Konflikt mit der aus Energieeffizienzgründen wünschenswerten Reduktion der Aussenlufttrate und ist bei der Umsetzung von Energiemassnahmen zwingend zu berücksichtigen.

6. Empfehlungen

Die Empfehlungen aus diesem Bericht und aufgrund der bisherigen Erfahrungen lassen sich in drei Bereiche unterteilen: Empfehlungen für das Bundesamt für Verkehr, Empfehlungen für weitere Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte sowie Empfehlungen für die Transportunternehmen und Hersteller.

Die vorliegende Studie zeigt, dass im Bereich der Energieeffizienzmassnahme bei HLK und Hülle im öffentlichen Verkehr in den letzten Jahren zwar Fortschritte gemacht wurden, dass die Wissensbasis und vor allem die Erfahrung mit konkreten Umsetzungen nach wie vor relativ dünn ist, wenn man z.B. mit dem Wissensstand im Gebäudebereich vergleicht.

Erschwerend dabei ist, dass die vorhandenen Grundlagen für verlässliche Entscheide was sinnvolle Massnahmen betrifft, eher dürftig sind. Hier ist es wichtig, vorerst eine gute Informationsbasis zu schaffen, die im Verlauf der Zeit laufend ausgebaut werden kann.

6.1 Empfehlungen für das BAV

Das BAV ist mit dem Programm «Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)» national der «Gralshüter» für das Thema Energieeffizienz im öffentlichen Verkehr. Im Rahmen dieses Programms konnten bereits diverse Studien realisiert und einige Massnahmen umgesetzt werden. Das Bundesamt hat verschiedene Möglichkeiten, seine Führungsrolle in diesem Thema wahrzunehmen:

- Erarbeiten und zur Verfügung stellen von fundierten Grundlagen für die Hersteller und Transportunternehmen, Unterstützung von Forschungsprojekten
- Kommunikation von Wissen, Initiieren des Erfahrungsaustauschs unter den verschiedenen Akteuren, zur Verfügung stellen von Hilfsmitteln (einfache Berechnungstools, Checklisten, etc.)
- Förderung der Umsetzung von Massnahmen z.B. mittels Anreizen (Fördergelder, Label), Unterstützung von Entwicklungsprojekten; Begleitung der Umsetzung von Massnahmen
- Empfehlungen, Vorgaben zuhanden der Hersteller und Betreiber
- Weitere

Gesamtstrategie Energieeffizienz im öffentlichen Verkehr

Diese Aktivitäten sollen auf einer Gesamtstrategie basieren, wo Ziele, Termine, Massnahmen und einzusetzende Mittel zu definieren sind und wo entsprechende Priorisierungen vorgenommen werden.

Grundlagen weiter verbessern / Knowhow ausbauen

Die in dieser Studie mehrfach erwähnten, fehlenden Grundlagen betreffend Massnahmen, Umsetzungsaufwand und Einsparpotenzial werden kaum von den Transportunternehmen oder Herstellern eigenständig ermittelt werden können. Aus diesem Grund kommt hier dem BAV – eventuell in Zusammenarbeit mit Verbänden – eine grosse Bedeutung zu. Konkret geht es um:

- Definition von anzuwendenden Randbedingungen (z.B. Klima, Personenzahlen) und Betriebszyklen (z.B. Fahrzeiten, Stillstandzeiten) für Berechnungen/Simulationen und Messungen, zwecks Vergleichbarkeit von Ergebnissen unterschiedlicher Projekte verschiedener Akteure.
- Evt. Überprüfung der Komfortanforderungen an Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs, je nach Einsatzbereich, Fahrzeugtyp, Jahreszeit etc.; allenfalls Empfehlung von angepassten Komfortanforderungen
- Berechnung/Simulation der Wirkung von Massnahmen, in Abhängigkeit unterschiedlicher Einflussfaktoren (Fahrzeugtyp, Einsatzbereich, Aussenklima, Komfortanforderungen etc.), Berechnung der Wirkung bei Kombination verschiedener Massnahmen, Ermittlung von Benchmarks
- Messung der Wirkung von Massnahmen bei klar definierbaren Randbedingungen z.B. in einer Klimakammer oder an einem Mockup unter Laborbedingungen
- Erarbeitung von Konzepten und technischen Lösungsansätzen für die Durchführung eines pragmatischen Energiemonitorings (vor allem bei bestehenden Fahrzeugen) inkl. einer einheitlichen und somit vergleichbaren Datenauswertung/-analyse bei Messungen von verschiedenen Akteuren an verschiedenen Fahrzeugen

- Evt. Energieanalysen bei bestehenden Fahrzeugen mit oder ohne umgesetzten Massnahmen, Vergleichsanalysen, Ermitteln der wesentlichen Einflussfaktoren, Sekundäranalyse von bereits vorliegenden Messdaten (aus früheren Studien, aus laufenden Messungen verschiedener Transportunternehmen)

Kommunikation

Die Kommunikation von Wissen und Erfahrungen soll bei den Aktivitäten des BAV eine zentrale Rolle einnehmen. Dazu gehören:

- Think Tank mit verschiedenen Akteuren (Herstellern, Transportunternehmen, Verbänden, etc.) zur Generierung neuer und neuartiger Lösungsideen
- Initiierung des Wissens- und Erfahrungsaustauschs zwischen allen Akteuren zu geplanten und durchgeführten Energiesparmassnahmen
- Aufbereitung von vorhandenem Wissen in eine für die verschiedenen Akteuren passende Form (z.B. einfache Berechnungstools, Empfehlungen, Checklisten, Merkblätter, Zusammenfassungen), allenfalls spezifisch für Beschaffung, Betrieb und Refit
- Hilfsmittel für die betriebliche Praxis in Form von Leitfäden, Empfehlungen oder Checklisten als Grundlage für die Fahrzeugbeschaffung und -modernisierung, basierend auf den aktuellen Erkenntnissen aus den verschiedenen Projekten
- Betreiben einer Wissensplattform (für Ämter, Transportunternehmen Hersteller, Forschungsorganisationen), einfacher Zugang zum dokumentierten Wissen, evt. in Kombination mit einer Erstberatung
- Kommunikation von Arbeitsergebnissen und insbesondere von erzielten Erfolgen

Einige dieser Aktivitäten werden heute bereits umgesetzt.

Förderung der Umsetzung von Massnahmen

Da die Umsetzung von Massnahmen teilweise nicht wirtschaftlich ist (vor allem wenn diese z.B. erstmals umgesetzt werden, was erfahrungsgemäss zu einem erhöhten Aufwand führt) und/oder das nötige Wissen bei den verschiedenen Akteuren fehlt, soll diese Umsetzung vom BAV gefördert und begleitet werden. Mögliche Massnahmen sind

- Anreize schaffen, Ausstellen eines Innovationsschecks (analog Modell Innosuisse), finanzielle Förderung von Massnahmen, Unterstützung mit Knowhow
- Unterstützung von Entwicklungsprojekten sowie von Pilot- und Demonstrationsprojekten, inkl. Kommunikationsmassnahmen; Auswertung der dabei gemachten Erfahrungen
- Qualität sichern, z.B. durch die Einführung eines Energielabels auf klar definierten Kriterien, die einen fairen Vergleich zwischen verschiedenen Fahrzeugen zulassen
- Messung der Wirkung von Massnahmen; Ermittlung der Kosten für die Umsetzung der Massnahmen und der Einsparungen dank der Massnahmen (jeweils an realen Fahrzeugen im realen Einsatzbetrieb)

Einige dieser Aktivitäten werden heute bereits umgesetzt.

Empfehlungen / Vorschriften

Neben der Förderung von Massnahmen kann durch das Festhalten von Empfehlungen oder durch (verbindliche) Vorgaben der Umsetzung von Energieeffizienzmassnahmen zusätzlich Unterstützung geleistet werden. Empfehlungen/Vorschriften können erstellt werden für:

- die Ausschreibung/Neubeschaffung von Fahrzeugen
- den energieeffizienten Fahrzeugbetrieb
- den Refit von bestehenden Fahrzeugen

Die Empfehlungen sollen gemeinsam mit den Transportunternehmen und Herstellern entwickelt und dokumentiert werden.

Weitere mögliche Massnahmen sollen im Austausch zwischen allen beteiligten Akteuren entwickelt werden.

6.2 Empfehlungen für Forschung und Entwicklung

Im Bereich Forschung und Entwicklung werden vier Hauptaufgaben identifiziert:

- Messen
- Simulieren
- Analysieren
- Bewerten

Diese Hauptaufgaben sind in enger Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie bzw. Transportunternehmen anzugehen.

Messen

- Im Wissen, dass Messungen immer auch mit vielen Unsicherheiten verbunden sind, liefern sie dennoch meist unentbehrliche Grundlagen für Weiterentwicklungen und für die weitere Umsetzung von Massnahmen.

Simulieren

- Simulationen ermöglichen in einer künstlichen, aber präzise definierten Situation vor allem aussagekräftige Variantenvergleiche und Sensitivitätsanalysen, da – im Gegensatz zu Messungen – ein unbeeinflusster Vergleich von zwei Situationen (*ceteris paribus*) möglich ist. Damit lassen sich – mindestens auf rechnerischer Basis, grosse Streuungen der Ergebnisse (betreffend Einsparpotenzial) vermeiden respektive begründen.

Analysieren

- Mittels verschiedener Auswertungen der Messungen und Simulationen können qualitative und quantitative Wirkungen von Massnahmen, der zu erwartende Komfort oder bestimmte physikalische Phänomene analysiert und dokumentiert werden.

Bewerten

- Basierend auf der Analyse lassen sich verschiedene Massnahmen betreffend Effizienz (und allenfalls Kosten) bewerten. Davon ausgehend lässt sich eine situationspezifische Priorisierung inkl. entsprechender Entscheidungshilfen (z.B. Entscheidungsbaum) ableiten.

Während es sich bei Messen/Simulieren/Analysieren/Bewerten um methodische Aspekte handelt, sind ausgehend von den Erkenntnissen aus dieser Studie und aus verschiedenen Brainstormings weitere Ideen für Massnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz bei HLK und Hülle im öV entstanden. Diese werden nachfolgend kurz aufgeführt, in wenigen Sätzen beschrieben und von den Autoren mit folgenden Kriterien bewertet:

Umsetzbarkeit:	Energieeinsparpotenzial:
++ sehr einfach	++ sehr hoch
+ einfach	+ hoch
= neutral	= gering
- anspruchsvoll	0 keines vorhanden
-- sehr anspruchsvoll	.. nicht bewertbar
.. nicht bewertbar	

Bei der Umsetzbarkeit wird die Bewertung für Neufahrzeuge und Refit aufgeführt.

Idee	Kurzbeschreibung	Einschätzung der Autoren	
		Umsetzbarkeit	Energieeinsparpotenzial
Massnahmen Hülle			
Optimierung der Konstruktion der Fahrzeughülle inkl. Minimierung der Wärmebrücken	Es sind konstruktive Lösungen zu entwickeln, welche der thermischen Trennung der Wandkonstruktionen besser Rechnung tragen und eine bessere Dämmung zulassen (gedämmte Flächen, Dämmstärken, Dämmmaterialien). Ein Hauptaugenmerk muss auf der Reduktion der Wärmebrücken liegen.	+ (neu) - (Refit)	++
Verbesserte Luftdichtigkeit der Fahrzeughülle	Es ist zu prüfen, mit welchen Massnahmen insbesondere im Refit die Luftdichtigkeit der Hülle nachhaltig verbessert werden kann. Verbesserungen in diesem Bereich sind nicht nur energie- sondern auch komfortrelevant.	++ (neu) + (Refit)	+
Optimale Fenstergrösse	Die Fenstergrösse beeinflusst die solaren Gewinne im Winter, die solaren Lasten im Sommer, den Tageslichteintrag und den visuellen Komfort für den Fahrgast. Die Fenstergrösse ist unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte wie z.B. der Fahrzeugart und des Fahrzeugeinsatzes zu optimieren. Wichtig dabei ist eine gesamtheitliche Betrachtung.	+ (neu) -- (Refit)	+
Einsatz von elektrochromen Gläsern	Mit elektrochromen Gläsern kann der Wärmeeintrag ins Fahrzeug durch Veränderung des g-Wertes (Gesamtenergiedurchlassgrad) der Gläser der jeweiligen Situation angepasst werden (je nach aktuellem Heiz- oder Kühlbedarf).	++ (neu) + (Refit)	+
Massnahmen HLK-Technik			
Abluft-WRG	Die Abluft-Wärmerückgewinnung (Abluft-WRG) entzieht der Abluft Wärme und nutzt diese zur Vorwärmung der Zuluft. Damit kann Energie zurückgewonnen werden, allerdings bedingt es die örtliche Zusammenführung von Abluft- und Zuluftkanal. Diese Massnahme wird oft bereits umgesetzt, es bleibt aber zu klären, in welchen Situationen sie welches Potenzial hat (z.B. auch im Zusammenhang mit anderen Massnahmen).	++ (neu) = (Refit)	++
Freecooling	Beim Freecooling wird, wenn immer möglich, mittels (kühler) Aussenluft gekühlt. Dies entlastet die Kälteanlage. Noch nicht im Detail bekannt ist, von welchen Faktoren dieses Potenzial abhängt und wie dieses maximal ausgenutzt werden kann. Zudem ist unklar, wie sich das Potenzial verändert, wenn weitere Energieeffizienzmassnahmen am Fahrzeug umgesetzt werden. Je nachdem sind entsprechende Konzepte und technische Lösungen zu entwickeln/zu optimieren.	++ (neu) + (Refit)	+

Idee	Kurzbeschreibung	Einschätzung der Autoren	
		Umsetzbarkeit	Energieeinsparpotenzial
Modellprädiktive Regelung (MPC)	Im (hoch)dynamischen Betrieb von Fahrzeugen im öV (ständig wechselnde Randbedingungen bei Aussenklima, Personenzahlen etc., mit sich wiederholenden Mustern) kann eine vorausschauende Regelung (MPC) dafür sorgen, dass die Anlagen präventiv und somit optimaler auf den jeweils aktuellen Bedarf ausgerichtet werden. Das damit verbundene Energiesparpotenzial und die relevanten Einflussgrössen bei Fahrzeugen sind noch weitgehend unbekannt. Modellrechnungen an verschiedenen Fahrzeugen mit unterschiedlichen Einsatzspektren könnten hier in einem ersten Schritt mehr Klarheit schaffen. Im Gebäudebereich – mit weniger Dynamik bei den Randbedingungen – sind die Sparpotenziale moderat.	++ (neu) + (Refit)	+
Personalized Ventilation and Climatisation	Die spezifische und individuelle Konditionierung (Heizung, Kühlung, Belüftung, ...) jedes einzelnen Sitzplatzes verspricht einerseits eine Energiereduktion, andererseits aber auch einen erhöhten Komfort. Eine gesamtheitliche Beurteilung im Sinne einer Machbarkeitsstudie soll zeigen, mit welchem Aufwand solche Systeme realisierbar sind und wie gross die zu erwartenden Einsparpotenziale sind. Zusätzlich könnte der Einfluss auf die Lufthygiene (Minimierung des Ansteckungsrisikos mit über Luft übertragbaren Krankheiten) analysiert werden. (Solche Systeme sind im Automobilbau bereits umgesetzt).	+ (neu) - (Refit)	++
Abwärmennutzung aus den Antriebsmotoren	Die Abwärme der Antriebsmotoren wird zur Heizung der Fahrzeuge genutzt (z.B. Vorwärmung der Zuluft). Bei den neuen Triebfahrzeugen dürfte dies einfacher umsetzbar sein, da eine grössere örtliche Nähe zwischen Motor und Fahrgastraum besteht. Mit zunehmend effizienteren Motoren reduziert sich aber auch das Potenzial. Das Potenzial ist unbekannt und könnte mit einer Machbarkeits-/ Potenzialstudie geklärt werden.	++ (neu) - (Refit)	+
Einsatz von WP	Wärmepumpen sind sehr effiziente Systeme für die Wärmeerzeugung. Je tiefere Systemtemperaturen möglich sind (Vorlauftemperatur), desto höher ist die Effizienz der Wärmepumpe. Die Umsetzung im Refit ist anspruchsvoll, das Einsparpotenzial gross. Im Rahmen eines Pilotprojektes (Refit) soll der nachträgliche Einbau einer WP mit entsprechender Anpassung des ganzen Systems exemplarisch umgesetzt werden. Die dabei gewonnenen Erfahrungen dienen der Weiterentwicklung und Optimierung dieses Ansatzes.	+ (neu) - (Refit)	++
Systematische Entwicklung von neuen HLK-Konzepten	Heutige Lösungen im Bereich der Hülle und der HLK sind meist historisch gewachsen und haben sich über die Zeit weiterentwickelt, ohne dass sie im Grundsatz hinterfragt wurden. Ausgehend von einer grundlegenden Analyse der heutigen Komfortanforderungen und der physikalischen Rahmenbedingungen im Fahrzeug sollen grundsätzlich neue HLK-Konzepte entworfen, geprüft und allenfalls entwickelt werden.	++ (neu) -- (Refit)	++
Komplettersatz Elektroheizung	Elektro-Direktheizungen sind aus Sicht Energieeffizienz sehr negativ zu bewerten, weisen allerdings aus Sicht Einfachheit, Flexibilität, Preis und Wartungsaufwand grosse Vorteile auf. Aus Sicht Energie ist ein Ersatz von Elektroheizungen jedoch wünschenswert. Alternativen sind zu prüfen.	+ (neu) -- (Refit)	++

Idee	Kurzbeschreibung	Einschätzung der Autoren	
		Umsetzbarkeit	Energieeinsparpotenzial
Flächenheizungen	Grossflächige Wärmeabgabesysteme führen zu einem hohen Komfort für die Fahrgäste (gleichmässige Oberflächentemperaturen) und zu tiefen Systemtemperaturen im Falle eines wassergeführten Wärmeverteilsystems, was beim Einsatz von Wärmepumpen zur Wärmeerzeugung von grossem Vorteil ist (hohe Leistungszahl). Aus Sicht Komfort wird optimalerweise über den Boden geheizt (warme Füsse). Solche Systeme werden heute in Fahrzeugen kaum eingesetzt. Die Machbarkeit und möglichen Lösungen sind zu prüfen bzw. zu entwickeln.	+ (neu) - (Refit)	+
Deckenkühlung	Aus Sicht des Fahrgastkomforts ist eine grossflächige Kühlung via Decke zu bevorzugen (die Kühlung des Kopfes wird als angenehm empfunden). Gleichzeitig führen grossflächige Kälteabgabesysteme zu relativ hohen Systemtemperaturen, was wiederum eine hohe Effizienz der Kältemaschine und einen hohen Freecooling-Anteil ermöglicht. Die Machbarkeit und möglichen Lösungen sind zu prüfen bzw. zu entwickeln.	+ (neu) - (Refit)	+
Modulare HLK-Systeme	Der Einsatz modular aufgebauter HLK-Systeme verspricht noch keine direkte Energieeinsparung, die Modularität ermöglicht aber über die Lebensdauer eines Fahrzeugs den partiellen Ersatz einzelner Komponenten, wodurch effizienzsteigernde Massnahmen einfacher realisiert werden können.	++ (neu) -- (Refit)	=
Allgemeine Energieeffizienz-Massnahmen			
Vorgaben für neue Fahrzeuge	Der grösste Hebel für eine hohe Energieeffizienz liegt bei der Fahrzeugbeschaffung (Ausschreibung). Den Transportunternehmen sollen übersichtliche Grundlagen (Checklisten) für die Beschaffung von energieeffizienten Fahrzeugen zur Verfügung gestellt werden, welche auf den Erkenntnissen aus Studien und realisierten Projekten beruhen.	++ (neu) ** (Refit)	++
Betrieboptimierung	Werden durch das Monitoring Mängel in den Einstellungen oder bei der Betriebsweise von Systemen oder Komponenten entdeckt, können durch Anpassungen bei den Einstellungen oder bei der Steuerung oft grosse Einsparpotenziale realisiert werden. Eine optimale Betriebsweise von Anlagen kann auch deren Lebensdauer oder Zuverlässigkeit erhöhen.	** (neu) ++ (Refit)	++
Optimierte Standardkonzepte HLK	Im Sinne von Best Practice sollen Standardkonzepte für die Klimatisierung (HLK) von Fahrzeugen (unterschieden nach Bahn, Bus und Tram) entwickelt werden, die einen hohen Komfort, tiefe Kosten und bestmögliche Energieeffizienz gewährleisten. Diese Standardkonzepte können von den Herstellern übernommen und weiterentwickelt werden.	++ (neu) ++ (Refit)	+
Optimale Raumtemperatur	Eine Senkung der Soll-Raumtemperatur im Winter bzw. eine Erhöhung der Soll-Raumtemperatur im Sommer hätte eine grosse Auswirkung auf den Heiz- bzw. Kühlenergiebedarf. Befragungen der SBB zeigten, dass die Fahrgäste eine tiefere Raumtemperatur im Winter mehrheitlich als angenehmer empfinden würden. Auch im Sommer hört man oft Reklamationen von zu stark gekühlten Zügen. Mittels Feldtests sollen die aus Sicht des Fahrgastkomforts optimalen Raumtemperaturen ermittelt werden.	++ (neu) ++ (Refit)	++

Idee	Kurzbeschreibung	Einschätzung der Autoren	
		Umsetzbarkeit	Energieeinsparpotenzial
Graue Energie der Massnahmen (+ evt. Zusatzgewicht der Massnahmen und somit Zunahme des Traktionsenergiebedarfs)	<p>Viele Massnahmen führen zu einer markanten Verbesserung des Betriebsenergiebedarfs. Die Umsetzung der Massnahme verursacht jedoch oft einen Aufwand an Grauer Energie bzw. Grauen Treibhausgasemissionen. Es ist zu prüfen, wie für einzelne Massnahmen die Einsparungen bei der Betriebsenergie im Verhältnis zur Grauen Energie stehen (gesamtheitliche Beurteilung, inkl. Betrachtung über den Lebenszyklus). Die Graue Energie wird zukünftig immer mehr eine wichtige Rolle spielen.</p> <p>Zusätzlich soll in einer gesamtheitlichen Betrachtung auch das zusätzlich durch die Massnahme eingebrachte Fahrzeuggewicht und dessen Auswirkung auf den Traktionsenergieverbrauch berücksichtigt werden. Für eine Gesamtoptimierung ist also die Betriebsenergieeinsparung, das (zusätzliche) Gewicht und die (zusätzliche) Graue Energie zu berücksichtigen.</p>	++ (neu) - (Refit)	+
Allgemeine Massnahmen (mit indirektem Bezug zu Energieeffizienz-Massnahmen)			
Wirkung der Kombination verschiedener Massnahmen / bestmögliches Fahrzeug	In einer Sensitivitätsanalyse soll auf Basis von Berechnungen und Simulationen das Potenzial einzelner Massnahmen, aber insbesondere das Potenzial von Massnahmenkombinationen ermittelt werden. So lässt sich eine quantifizierte Kaskade erstellen, welche Massnahmen mit welcher Priorität aus energetischer Sicht umgesetzt werden sollen. Parallel lässt sich ermitteln, welcher minimale Energiebedarf ein Fahrzeug aufweist, bei dem alle bekannten Massnahmen realisiert werden (Benchmark, theoretisches Optimum), für Neubau und Refit.
Energiemonitoring im Rahmen von Massnahmenumsetzung und Pilotprojekten	Der Wissensgewinn aus einem Monitoring ist meist enorm. Die Umsetzung von Massnahmen (grossflächig oder von Piloten) soll durch ein Monitoring (Energie, allenfalls Komfort) begleitet werden, um die realisierten Einsparungen zu quantifizieren und um Erfahrungen für weitere Optimierungen oder weitere Entwicklungen zu sammeln. (Das Monitoring selber spart aber noch keine Energie, jedoch die daraus abgeleiteten Massnahmen, sei das bei Weiterentwicklungen oder bei Betriebsoptimierungen)	.. (neu) ++ (Refit)	0
Energiemonitoring im Betrieb	Ein Energiemonitoring ist zentrale Grundlage für Betriebsoptimierungen. Bestehende Fahrzeuge sind ständig oder temporär mit einem Energiemonitoring auszurüsten, bei neuen Fahrzeugen ist das als fixer Bestandteil vorzusehen. Dazu sind Konzepte und Lösungen zu entwickeln, die mit vertretbarem Aufwand verlässlich die richtigen Informationen bereitstellen. (Das Monitoring selber spart aber noch keine Energie, jedoch die daraus abgeleiteten Massnahmen).	.. (neu) + (Refit)	0
Lowcostmonitoring	Bei der Entwicklung eines Lowcostmonitorings wird bewusst versucht, mittels günstiger, handelsüblicher Komponenten, die von den Mitarbeitenden der Transportunternehmen selbständig verbaut werden können, sowie mit standardisierter Software für Datenerfassung und Datenauswertung die Kosten des Monitorings sehr tief zu halten.	.. (neu) ++ (Refit)	0
Energiegewinnung am Fahrzeug	Potenzial der Energiegewinnung am Fahrzeug, insbesondere durch PV auf Dach, in den Fahrzeugwänden oder in den Gläsern. Vor allem bei der Integration von PV in die Fenster sind zukünftig noch grössere Entwicklungen zu erwarten.	++ (neu) - (Refit)	++

Idee	Kurzbeschreibung	Einschätzung der Autoren	
		Umsetzbarkeit	Energieeinsparpotenzial
Mockup	Viele Massnahmen können rechnerisch oder in realen Fahrzeugen geprüft und weiterentwickelt werden. Trotzdem ergeben sich viele Situationen, wo ein 1:1-Versuch wünschbar, aber in einem realen Fahrzeug nicht möglich ist. Für diese Fälle könnte ein Mockup eines Fahrzeuges für 1:1 Untersuchungen unter Laborbedingungen sehr nützlich sein zur Prüfung von Machbarkeit und Wirkung. (Das Mockup selber bewirkt noch keine Energieeinsparung).	+ (neu) + (Refit)	0
Berechnungstool	Entwicklung eines einfach anwendbaren Berechnungstools, mit dem für eine bestehende Situation mittels Eingabe weniger Informationen abgeschätzt werden kann, welche Energieeinsparungen mit bestimmten Massnahmen erzielt werden können. Basis für diese einfachen Abschätzungen bilden detaillierte Simulationen verschiedener denkbarer Varianten. (Das Tool selber führt noch nicht zu einer Energieeinsparung, erst die daraus abgeleiteten und umgesetzten Massnahmen).	++ (neu) ++ (Refit)	..
Ergänzende Untersuchungen			
Einfluss Klimawandel	Der Klimawandel führt zu veränderten Aussenlufttemperaturen und allenfalls zu anderen solaren Lasten. Dies führt auch zu einer Verschiebung von den Heizlasten zu den Kühllasten was wiederum dazu führen kann, dass für heute optimierte Lösungen betreffend Hülle und HLK in 20, 40 oder 60 Jahre nicht mehr optimal sind. Aufgrund der Lebensdauer von Fahrzeugen von 40 und mehr Jahren, ist dem Klimawandel bei der Konzipierung von neuen Fahrzeugen heute Rechnung zu tragen. Mittels Simulationen können Konzepte entwickelt werden, die eine möglichst hohe Resilienz gegenüber den zu erwartenden Veränderungen aufweisen.
Zielkonflikt Covid vs. Energieeffizienz	Die Ansprüche an eine hygienisch einwandfreie Lüftung (aktuell durch Covid bedingt) und eine energieeffiziente Lüftung widersprechen sich in vielen Belangen. Dieser Zielkonflikt ist zu analysieren und es sind Lösungen zu entwickeln, die beiden Ansprüchen möglichst gerecht werden.

Tabelle 32: Nicht abschliessende Liste möglicher Massnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz im öffentlichen Verkehr bei HLK und Hülle (Basis: Brainstorming der Autoren).

Diese Liste von möglichen Massnahmen soll zu einem späteren Zeitpunkt kritisch überprüft und allenfalls mit weiteren Massnahmen ergänzt werden. Die Liste kann Basis für eine Gesamtstrategie sein, wie die Energieeffizienz im Bereich Hülle und HLK von Fahrzeugen im öffentlichen Verkehr weiter optimiert werden kann.

6.3 Empfehlungen für Transportunternehmen

Transportunternehmen können grundsätzlich zu drei Zeitpunkten wesentlichen Einfluss auf die Energieeffizienz ihrer Fahrzeuge (Hülle, HLK) nehmen:

- Bestellung neuer Fahrzeuge
- Betrieb der Fahrzeuge
- Refit der Fahrzeuge

Aufgrund beschränkter personeller und finanzieller Ressourcen beschränkt sind, sollen primär die Massnahmen umgesetzt werden, welche betreffend Machbarkeit, Optimierungspotenzial, Investitions- und Betriebskosten, Komfort sowie Sicherheit die besten Bewertungen erhalten. Basis für ein koordiniertes Vorgehen kann eine Gesamtstrategie über die Lebensdauer der Fahrzeuge sein, in welcher die Opti-

mierung der Gesamtenergieeffizienz im Vordergrund steht. Die Gesamtstrategie kann auch sicherstellen, dass die jeweils nötigen Informationen rechtzeitig vorliegen (z.B. durch Machbarkeitsstudien) und das entsprechende Wissen intern aufgebaut oder von extern dazu geholt werden kann.

Bestellung neuer Fahrzeuge (Ausschreibung, Pflichtenheft)

- Sicherstellung einer ausreichenden Kompetenz (intern oder extern, «Bestellerkompetenz»)
- Spezifizieren von klaren, messbaren Vorgaben betreffend Energieeffizienz (Hülle, HLK)
- Kontrolle der Einhaltung der Vorgaben

Betrieb der Fahrzeuge

- Durchführen und Auswerten eines temporären oder kontinuierlichen Energiemonitorings auf einzelnen oder auf allen Fahrzeugen
- Durchführen von Betriebsoptimierungsmassnahmen (primär Anpassung von Einstellungen an den Komponenten und an der Steuerung)
- Bewährte Massnahmen sind die Einführung eines Schlummerbetriebs und die Senkung der Solltemperaturen im Winter bzw. die Erhöhung der Solltemperaturen im Sommer
- Der Fokus soll auf einfach realisierbaren Massnahmen mit grossem Potenzial liegen («low hanging fruits») Refit
- Erarbeitung eines Gesamtkonzeptes mit gesamtheitlicher Optimierung von Hülle und HLK
- Umsetzung von im Refit bewährten Massnahmen mit hohem Potenzial (beispielsweise: CO₂-Regelung der Lüftung, Optimierung der Fenster)

Es wird eine intensive Zusammenarbeit der Transportunternehmen mit dem BAV, mit der Industrie, mit anderen Transportunternehmen und mit Forschungsorganisationen empfohlen, um einen regelmässigen Erfahrungsaustausch sicherzustellen und eine ständige Aktualisierung des Wissens zu erzielen. Dabei kommt dem Verband VöV als Vertreter der Transportunternehmen ebenfalls eine zentrale Rolle, vor allem auch bei der Kommunikation und beim Wissensaufbau sowie Erfahrungsaustausch, zu.

6.4 Empfehlungen für Rollmaterialhersteller

Es ist wünschenswert, dass sich die Rollmaterialhersteller als wichtiger Akteur bei der Erreichung der Ziele der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050) aktiv an der Weiterentwicklung beteiligen und ihre Produkte nicht nur betreffend Funktionalität, Kosten, Platzbedarf, Gewicht und Zuverlässigkeit, sondern auch betreffend Energieeffizienz weiterentwickeln. Wichtig ist auch die Teilnahme der Hersteller beim Erfahrungsaustausch zwischen allen Beteiligten (BAV, Transportunternehmen, Forschungsorganisationen, weitere).

6.5 Dissemination der Ergebnisse

Für die Dissemination der Ergebnisse dieser Studie stehen folgende Möglichkeiten offen:

Methode	Konkrete Massnahme	Kurzbeschreibung
Publikationen	Kurzfassung	Die wesentlichen Erkenntnisse des Syntheseberichts werden auf einem Flyer oder A4-Blatt zusammengestellt, verbunden mit entsprechenden Verlinkungen. Der Flyer kann u.U. zielgruppenspezifisch zusammengestellt werden.
	Populärfassung	Der Synthesebericht wird journalistisch zielgruppenspezifisch aufbereitet und die wesentlichen Inhalte werden verständlich, schnell erfassbar und auf das Auslösen von Aktionen ausgerichtet dargestellt.
	Beitrag Fachzeitschrift	Die wesentlichen Ergebnisse werden in einer Fachzeitschrift publiziert (z.B. Schweizer Eisenbahn-Revue oder weitere Fachzeitschriften in D, A, ...).
	Beitrag Zeitung (z.B. NZZ, NZZaS)	Die Thematik wird für eine breite, interessierte Öffentlichkeit aufbereitet und in auflagestarken Zeitungen veröffentlicht. Diese Massnahme soll auch der Imageförderung des öffentlichen Verkehrs dienen.
	Wissenschaftliche Publikation	Die Ergebnisse werden in einer wissenschaftlichen Publikation an themenspezifischen Konferenzen dokumentiert und besprochen (z.B. EnInnov an der TU Graz).
	Soziale Medien	Verlinkung obiger Beiträge (Paper, Zeitungsartikel, Fachartikel, Flyer, etc. auf Sozialen Medien (z.B. Website BAV, LinkedIn, Website HSLU, etc.).

Methode	Konkrete Massnahme	Kurzbeschreibung
Referate / Workshops	VöV	Referat oder Workshop am Energieforum des VöV.
	Webinar	Durchführung eines Webinars zu den wesentlichen Ergebnissen des Syntheseberichts. Zielpublikum: Primär für Energie und Energieeffizienz zuständige Personen bei (kleineren) Bahngesellschaften, aber auch Hersteller und weiter interessierte Personen.
	Jahrestreffen	Thema wird anlässlich des (traditionellen) Jahrestreffens traktandiert. Zielpublikum: BAV, Transportunternehmen, Hersteller, Forschungsorganisationen.
	Besuch von Akteuren	Besuch einzelner Akteure (Transportunternehmen, Hersteller), Vorstellung der Resultate, Diskussion der Erkenntnisse.
Instrumente	Checklisten oder Merkblätter	Ausarbeitung und Verteilung von Checklisten zum Vorgehen bzw. zu Massnahmen bei der Bestellung von neuen Fahrzeugen, bei der Planung von Refits oder bei der Optimierung des Betriebs von Fahrzeugen.
Beratung	Strategieberatung	Auf Basis des Syntheseberichts können insbesondere Transportunternehmen bei der Erarbeitung einer Energiestrategie unterstützt werden.
	Umsetzungsberatung	Auf Basis des Syntheseberichts können insbesondere Transportunternehmen bei der Erarbeitung einer Umsetzungsstrategie von Energieeffizienzmassnahmen unterstützt werden.

Tabelle 33: Mögliche Disseminationsmassnahmen zur Verbreitung der Erkenntnisse aus dem Syntheseberichts bei den verschiedenen Akteuren im Bereich Energieeffizienzmassnahmen (Hülle, HLK) im öffentlichen Verkehr

7. Fazit und Ausblick

Der vorliegende Synthesebericht zeigt, dass eine breite wissenschaftliche Basis zum Thema Energieeffizienz im Bereich HLK und Fahrzeughülle im öffentlichen Verkehr vorhanden ist. Die tabellarische Übersicht und die Zusammenfassungen der besonders relevanten Studien sind ein wertvolles Nachschlagewerk, das als Basis für weitere Aktivitäten genutzt werden kann.

Eine genauere Analyse der recherchierten Studien zeigt allerdings auch, dass diese das Thema der Energieeffizienz im öffentlichen Verkehr im Bereich HLK und Hülle oft nur am Rande streifen und vor allem nur spezifische Fragestellungen dazu behandeln. Es fehlt dem Thema eine Gesamtsicht und auch eine gewisse Systematik. Das führt auch dazu, dass in vielen Bereichen keine klaren Grundlagen vorhanden sind und z.B. Angaben zum Einsparpotenzial massiv divergieren. Diese diffuse Informationsgrundlage wird durch die vorliegenden BAV-Studien punktuell verbessert: Basierend auf einer ausführlichen Analyse der Ist-Situation wurden gezielt einzelne Fragestellungen herausgegriffen und behandelt.

Aus den Studien kristallisieren sich rund 8-10 Massnahmen heraus, welche mehrmals und von verschiedenen Autoren beschrieben werden und die teilweise auch schon umgesetzt wurden. Die Rückmeldungen der Experten zu diesen Massnahmen zeigen aber, dass selbst hier grossflächige Erfahrungen meist noch fehlen und die Einschätzung zum Potenzial und zum Aufwand für die Umsetzung der Massnahmen sehr unterschiedlich ist – je nach befragtem Experten.

In der auf den fast 100 erfassten Studien basierenden detaillierteren Liste der Massnahmen sind einige Massnahmen zu finden, die detaillierter analysiert und bewertet werden sollten. Es finden sich aber auch einige Massnahmen, deren Umsetzbarkeit und/oder Effizienzpotenzial schon auf den ersten Blick doch eher fraglich sind.

Zentral scheint uns zu sein, dass die bekannten und z.T. bereits umgesetzten Massnahmen vermehrt realisiert werden, sei dies bei neuen Fahrzeugen oder bei Refits von Fahrzeugen. Dabei spielen die Transportunternehmen die entscheidende Rolle. Sie bestellen und betreiben die Fahrzeuge und können die Industrie motivieren, Lösungen zur Umsetzung zu entwickeln. Das BAV und Forschungsorganisationen können dabei unterstützen. Alle Akteure sollen gemeinsam Wissen aufbauen und Erfahrungen austauschen, um bestmögliche Fortschritte zu erzielen.

Die Transportunternehmen können durch das BAV und den VöV bei der Umsetzung von Massnahmen unterstützt werden durch Forschungsprojekte, durch Pilot- und Demonstrationsprojekte, durch Erfahrungsaustausch zwischen den Beteiligten oder durch Empfehlungen betreffend Vorgaben für die Ausschreibung von Fahrzeugen. Aus den dokumentierten Erfahrungen lassen sich neue Erkenntnisse ableiten, die wiederum in die Beschaffung, den Betrieb und in den Retrofit von Fahrzeugen einfließen können.

Entscheidend wird sein, dass die Zusammenarbeit zwischen allen Beteiligten weiter intensiviert, das vorhandene Wissen geschärft und neues Wissen generiert wird. Dabei kann in vielen Bereichen das im Gebäudebereich vorhandene Wissen genutzt und in den Fahrzeugbau transferiert werden, da viele der heute beim Fahrzeugbau gemachten Überlegungen zu Energieoptimierungen im Gebäudebereich schon vor 20-30 Jahren gemacht wurden.

Die Relevanz des Themas ist gegeben, Verbesserungspotenzial ist vorhanden und die Schweiz ist – nicht zuletzt dank der überschaubaren Situation und der Nähe der Akteure – prädestiniert, hier eine Pionierrolle zu spielen. Ob die Erreichung der Ziele der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr nur über gemeinsame Aktivitäten und Förderung von Massnahmen möglich ist oder ob es auch verbindliche Vorgaben seitens Bund geben muss, wird sich zeigen und ist letztendlich auch eine politische Frage.

8. Literaturverzeichnis

- [1] A. Kemmler and T. Spielmann, "Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2018 nach Verwendungszwecken," Bundesamt für Energie, Oct. 2019.
- [2] H. Douglas, C. Roberts, S. Hillmansen, and F. Schmid, "An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks," *Energy Conversion and Management*, vol. 106, pp. 1149–1165, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.10.053.
- [3] A. González-Gil, R. Palacin, P. Batty, and J. P. Powell, "A systems approach to reduce urban rail energy consumption," *Energy Conversion and Management*, vol. 80, pp. 509–524, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.01.060.
- [4] C. Peckham, "Improving efficiency of traction energy use," Rail Safety and Standards Board, United Kingdom, 2007.
- [5] C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik*, 5. vdf Hochschulverlag AG, 2018.
- [6] P. O. Fanger, *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. R.E. Krieger Publishing Company, 1982.
- [7] "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." Nov. 2005.
- [8] A. Dentel and U. Dietrich, "Thermische Behaglichkeit – Komfort in Gebäuden," hafen City Universität, Hamburg. Accessed: Oct. 20, 2020. [Online]. Available: https://rom-umwelt-stiftung.de/wp-content/uploads/2006/02/Dokumentation_Thermische_Behaglichkeit.pdf.
- [9] G. Haller, "Thermische Behaglichkeit in Schienenfahrzeugen," *RTA*, Sep. 2006.
- [10] O. Bouvard *et al.*, "Solar heat gains through train windows: a non-negligible contribution to the energy balance," *Energy Efficiency*, vol. 11, no. 6, pp. 1397–1410, Aug. 2018, doi: 10.1007/s12053-018-9643-7.
- [11] R. A. Sfeir, S. Chow, and Ganji, Ahmad R, "Energy efficiency assessment of Bay Area Rapid Transit (BART) train cars," BASE Energy, Inc., San Francisco, Mar. 2007.
- [12] N. Vetterli, U.-P. Menti, F. Sidler, E. Thaler, and G. Zweifel, "Energy efficiency of railway vehicles," presented at the CISBAT, Lausanne, Switzerland, Jan. 2015.
- [13] X. Tackoen, "Quick Wins - Reducing energy consumption in public transport," Interreg IVB, Belgium, Oct. 2013.
- [14] F. Sidler, "Simulation Energiebilanz Heizung Lüftung Klima: ICN (SBB)," Bundesamt für Verkehr, 056, Jan. 2019.
- [15] B. Bolliger, "Energieeffizienz: Die SBB testet Temperaturabsenkung in Zürcher S-Bahn," *SBB News*. <https://news.sbb.ch/artikel/72883/energieeffizienz-die-sbb-testet-temperaturabsenkung-in-zuercher-s-bahn> (accessed Dec. 18, 2020).
- [16] G. Haller and M. Kreitmayer, "Energie-Verbrauchsanalyse und -Einsparpotenziale bei Klimaanlagen," *Elektrische Bahnen*, no. Sonderdruck aus Heft 10/2007, 2007.
- [17] M. Tuchschnid and J. Dréwniok, "Potentialeinschätzung Schlummerbetrieb B2173," SBB CFF FFS, Jun. 2017.
- [18] P. Oelhafen *et al.*, "Energieeffizienz von HLK im öffentlichen Verkehr," Bundesamt für Verkehr; swisselectric research, Oct. 2015.
- [19] A. Tonin and P. Oelhafen, "Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im öffentlichen Verkehr," p. 81, Mar. 2018.
- [20] G. Richter and W. Struckl, "EcoTram – Evaluierung von Energiesparmaßnahmen bei Straßenbahnen unter realen Betriebsbedingungen," *ZEV rail - Tagung Moderne Scheinenzfahrzeuge*, vol. Graz 2014, no. 138, pp. 56–62, Sep. 2014.
- [21] R. Hofstadter, J. Amaya, and M. Kozek, "Energy Optimal Control of Thermal Comfort in Trams," *Applied Thermal Engineering*, vol. 143, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.084.
- [22] R. D. L. Vollaro, L. Evangelisti, G. Battista, P. Gori, C. Guattari, and A. Fanchiotti, "Bus for Urban Public Transport: Energy Performance Optimization," in *Energy Procedia*, Jan. 2014, vol. 45, pp. 731–738, doi: 10.1016/j.egypro.2014.01.078.
- [23] C. Isenschmid, "Potentialanalyse für Verbesserung der Wärmedämmung bei der Fahrzeug- Aussenhülle," Bundesamt für Verkehr, 010, Nov. 2018.

9. Anhang

9.1 Liste gewählter Suchbegriffe

A	I	R
Aktivitätsgrad	Investitionskosten	Raumklima
Amortisationszeit	K	Raum- /Lufttemperatur
Anforderung	Kälte	rel. Luftfeuchte
Aufenthaltsdauer	Kaltluftabfall	Rentabilität
B	Kenngrossen	S
Bahn	Komfort	Schienenverkehr
Bekleidung	Komfort-Werte	sommerlicher Wärmeschutz
Beleuchtung	Konvektion	Strahlungstemperatur
Betrieb	Kühlbedarf	Strassenverkehr
Betriebsenergie	L	Strömungsgeschwindigkeit
Bus	Lärmschutz	T
C	Lebensdauer	Tageslicht
CO ₂ -Gehalt	Lebenszyklusbetrachtung	Temperatur
D	Luftbewegung	thermische Behaglichkeit
Dämmung	Luftdichtheit	Tram
E	Luftqualität	transparente Bauteile
Energiebedarf /-verbrauch	M	U
Energieeffizienz	Massnahme	Überhitzung
Einsparpotential	Materialien	U-Werte
F	Mensch	W
Fahrzeughülle	N	Wärmebrücken
Fahrzeugsür	Nahverkehr	Wärmestrom
Fenster	Nutzer	Wärmeverluste
Fernverkehr	O	Wirtschaftlichkeit
H	Oberflächentemperatur	Z
Heizbedarf	opake Bauteile	Zugerscheinungen
HLK	P	
Hülle	PMV (Predicted Mean Vote)	
	PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)	

9.2 Komplettes Verzeichnis der gefundenen Dokumente (alphabetisch nach Titel)

9.2.1 Wissenschaftliche Literatur

Nr.	Titel	Autoren	Publikationsjahr	Themenbereich			Fahrzeugkategorie			Studienkategorie			Relevanz
				HLK	Hülle	Behaglichkeit	Bahn	Bus	Tram	Int.	National	BAV	
	A general approach for mixed-integer predictive control of HVAC systems using MILP	Dullinger, Christian; Struckl, Walter; Kozek, Martin;	2018	X			X	X	X	X			1
004	A modular thermal simulation tool for computing energy consumption of HVAC units in rail vehicles	Dullinger, Christian; Struckl, Walter; Kozek, Martin;	2015	X					X	X			4
008	A Numerical Model for Simulating Thermal Comfort Prediction in Public Transportation Buses	Riachi, Youssef; Clodic, Denis;	2014			X		X		X			4
007	A systems approach to reduce urban rail energy consumption	González-Gil, A.; Palacin, R.; Batty, P.; Powell, J. P.;	2014	X	X		X		X	X			4
009	An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks	Douglas, Heather; Roberts, Clive; Hillmansen, Stuart; Schmid, Felix;	2015	X			X			X			4
	An investigation of thermal comfort inside a bus during heating period within a climatic chamber	Pala, Uzeyir; Oz, H. Ridvan;	2015	X		X		X		X			3
010	Application of Two Stage Ejector Cooling System in a Bus	Jaruwongwittaya, Tawatchai; Chen, Guangming;	2012	X				X		X			4
	Applications of power electronics in railway systems	Boora, Arash A.; Zare, Firuz; Ghosh, Arindam; Ledwich, Gerard;	2007	X			X			X			1
	Automotive Thermal Comfort Control – A Blackbox Approach	Kranz, J.; Niekerk, T.I.; Holdack-Janssen, H.F.G.; Gruhler, G.;	2012			X		X		X			2

Nr.	Titel	Autoren	Publikationsjahr	Themenbereich			Fahrzeugkategorie			Studienkategorie			Relevanz
				HLK	Hülle	Behaglichkeit	Bahn	Bus	Tram	Int.	National	BAV	
	Betrachtungen zum Jahresenergieverbrauch von Klimaanlage in Schienenfahrzeugen – Möglichkeiten zur Reduzierung	Ebinger, Ingwer; Boeck, Lutz	2011	X			X		X	X			3
	Bibliothek Wärmedämmmaterialien	Tuschmid, Matthias; Wüst, Peter	2016		X		X				X		1
011	Bus for Urban Public Transport: Energy Performance Optimization	Vollaro, Roberto De Lieto; Evangelisti, Luca; Battista, Gabriele; Gori, Paola; Guattari, Claudia; Fanchiotti, Aldo;	2014	X				X		X			4
	Challenge A: A more and more energy efficient railway	Sandor, Judit; Wiebe, Enno; Bergendorff, Mads; Consulting, Macroplan; Recagno, Valerio; Nolte, Roland;	2011	X			X			X			1
	Climate friendly mobile air conditioning for buses	Meunier, Corinne;	2014	X				X		X			3
	Combined comfort model of thermal comfort and air quality on buses in Hong Kong	Shek, Ka Wing; Chan, Wai Tin;	2008	X		X		X		X			3
	Comparison of Energy Consumption of Different Types of Passenger Public Transport in Russian Operational Conditions	Shtang, Alexander A.; Yaroslavtsev, Mikhail V.; Dedov, Sergei I.; Xiaogang, Wu;	2019	X				X		X			1
	Cooling performance evaluation of overhead mixing and floor displacement ventilation systems inside a bus by using 65-nodes thermal comfort model (in Persian)	Zolfaghari, Alireza; Hassanzadeh, Hassan; Raesi, Mohammad; Taheri, Mor-teza;	2017	X				X		X			1
	Design of Model-Based Optimizing Control Scheme for an Air-Conditioning System	Kumar, Mahendra; Kar, I. N.;	2010	X		X	X			X			3

Nr.	Titel	Autoren	Publikationsjahr	Themenbereich			Fahrzeugkategorie			Studienkategorie			Relevanz
				HLK	Hülle	Behaglichkeit	Bahn	Bus	Tram	Int.	National	BAV	
	Determination of the ejector dimensions of a bus air-conditioning system using analytical and numerical methods	Ünal, Şaban;	2015	X				X		X			2
	Determination of thermal and acoustic comfort inside a vehicle's cabin	Ene, Alexandra; Catalina, Tiberiu; Vartires, Andreea;	2018	X				X		X			2
	DSZ - Energiesparpaket II - Wirkungsnachweis der Energieeffizienzmassnahmen	Harder, Delia; Tuchs Schmid, Matthias	2016	X			X				X		3
002	EcoTram	Kozek, Martin	2011	X					X	X			4
002	EcoTram – Evaluierung von Energiesparmaßnahmen bei Straßenbahnen unter realen Betriebsbedingungen	Richter, Gregor; Struckl, Walter;	2014	X					X	X			4
018	Einschätzung der Energiesparwirkung "Schlumberbetrieb" für B2173	Tuchs Schmid, Matthias; Dréwniok, Johannes	2017	X			X				X		5
	Energieeffizienz im Verkehr	Helms, Hinrich; Lambrecht, Udo; Hanusch, Jan;	2010	X			X	X		X			1
015	Energiesparen in Reisezugwagen	Brunner, Conrad U.; Farnner, Markus; Gartner, Renato; Huber, Heiri; Nipkow, Jürg	2000	X			X				X		4
	Energiesparender Schlumberbetrieb nach Fahrplan	Tuchs Schmid, Matthias; Kramer, Ueli	2017	X			X				X		3
	Energiesparpaket III für DTZ	Estermann, Johannes	2019	X			X				X		2
005	Energie-Verbrauchsanalyse und -Einsparpotenziale bei Klimaanlage	Haller, Gabriel; Kreitmayer, Manfred;	2007	X		X	X			X			4
015	Energieverbrauch im Schienenverkehr	Brunner, Conrad U.	2001	X			X				X		2

Nr.	Titel	Autoren	Publikationsjahr	Themenbereich			Fahrzeugkategorie			Studienkategorie			Relevanz
				HLK	Hülle	Behaglichkeit	Bahn	Bus	Tram	Int.	National	BAV	
P-010	Energieverbrauch und Einsparpotential des S-Bahn-Gliederzugs RABe 525 "Nina" der BLS AG	Isenschmid, Christoph; Menth, Stefan; Oelhafen, Peter	2013	X			X				X		4
	Energy consumption in rail traffic; Energieverbrauch im Schienenverkehr (Technical Report) ETDEWEB	Brunner, Conrad U.	2001	X			X				X		2
006	Energy efficiency assessment of Bay Area Rapid Transit (BART) train cars	Sfeir, Ricardo A; Chow, Sandra; Ganji, Ahmad R;	2007	X			X			X			4
003	Energy efficiency of railway vehicles	VETTERLI, Nadège; Menti, Urs-Peter; SIDLER, Franz; THALER, Evelyne; ZWEIFEL, Gerhard;	2015	X			X				X		5
	Energy efficient design and simulation of a demand controlled heating and ventilation unit in a metro vehicle	Amri, Hanns; Hofstädter, Raphael N.; Kozek, Martin;	2011	X			X		X	X			3
002	Energy Optimal Control of Thermal Comfort in Trams	Hofstadter, Raphael; Amaya, Jorge; Kozek, Martin;	2018	X		X			X	X			5
	Energy savings in light rail through the optimization of heating and ventilation	Beusen, Bart; Degraeuwe, Bart; Debeuf, Patrick;	2013	X					X	X			3
	Enhancing the environmental performance of rail transport – challenges, good examples, further tasks	Struckl, Walter; Stribersky, Anton; Gunselmann, Walter;	2006		X		X		X	X			2
	Evaluating bus transit performance of Chinese cities: Developing an overall bus comfort model	Zhang, Kai; Zhou, Kan; Zhang, Fangzhou;	2014			X		X		X			2
	Experimental and numerical investigation of micro-environmental conditions in public transportation buses	Zhu, Shengwei; Demokritou, Philip; Spengler, John;	2010	X		X		X		X			1

Nr.	Titel	Autoren	Publikationsjahr	Themenbereich			Fahrzeugkategorie			Studienkategorie			Relevanz
				HLK	Hülle	Behaglichkeit	Bahn	Bus	Tram	Int.	National	BAV	
	Experimental investigation of thermal comfort in a passenger car under driving conditions	Zhou, Xiaojie; Lai, Dayi; Chen, Qingyan;	2018			X		X		X			1
	Extension of a Thermal Simulation Model for a Tram and Simulation With On-Site Measurement Data	Hofstädter, Raphael; Kozek, Martin;	2019	X					X		X		1
	Factors which Influence the Thermal Comfort Inside of Vehicles	Simion, Mihaela; Socaciu, Lavinia; Unguresan, Paula;	2016			X	X	X	X	X			3
	Grobabschätzung: Einfluss der Kondensationsfeuchtigkeit auf die Wärmedämmung in Schienenfahrzeugen	Tuchschmid, Matthias	2016		X		X				X		3
	Health Monitoring and Aging Assessment of HVAC Refrigerant Compressors in Railway Systems	Staino, Andrea; Abou-Eid, Rami; Rojas, Argenis; Fitzgerald, Breiffni; Basu, Biswajit;	2019	X					X	X			1
	Heat capacity and heat transfer coefficient estimation for a dynamic thermal model of rail vehicles	Hofstädter, Raphael; Zero, Thomas; Dullinger, Christian; Richter, Gregor; Kozek, Martin;	2016		X				X	X			1
	High Speed Rail and Sustainability	Jehanno, Aurélie; Palmer, Derek; James, Ceri;	2011	X			X			X			1
	Holistic energy simulation and optimization tool for urban rail vehicles	Dullinger, Christian; Struckl, Walter; Kozek, Martin;	2018	X					X	X			2
	Identification of representative operating conditions of HVAC systems in passenger rail vehicles based on sampling virtual train trips	Luger, Christian; Kallinovskiy, Johann; Rieberer, René;	2016	X			X				X		2
012	Improving efficiency of traction energy use	Peckham, Christian;	2007	X	X		X		X	X			4

Nr.	Titel	Autoren	Publikationsjahr	Themenbereich			Fahrzeugkategorie			Studienkategorie			Relevanz
				HLK	Hülle	Behaglichkeit	Bahn	Bus	Tram	Int.	National	BAV	
	In-train air quality assessment of the railway transit system in Beijing: A note	Li, Tian-Tian; Bai, Yu-Hua; Liu, Zhao-Rong; Li, Jin-Long;	2007	X		X	X			X			1
	Maximizing the potential for metros to reduce energy consumption and deliver low-carbon transportation in cities	Anderson, Richard; Maxwell, Rory; Harris, Nigel G.	2009	X					X	X			1
	Measurement and Evaluation of Heating Performance of Heat Pump Systems Using Wasted Heat from Electric Devices for an Electric Bus	Cho, Chung-Won; Lee, Ho-Seong; Won, Jong-Phil; Lee, Moo-Yeon;	2012	X				X		X			1
	Measurement of Natural Ventilation Rate in Seoul Metropolitan Subway Cabin	Kwona, Soon-bark; Parka, Duckshin; Choa, Young-min;	2010	X			X		X	X			3
	Measurements of comfort in vehicles	Gameiro da Silva, Manuel;	2002			X		X		X			3
	NSBs energy project; reducing train energy consumption.	Vetle Moen, Jan; Hægstad, Andreas;	2009	X			X			X			1
	Numerical analysis and measures for the evaluation of comfort inside buses used for public transport	De Lieto Vollaro, Roberto; Grignaffini, S.; Vallati, Andrea;	2008			X		X		X			2
	Numerical and Experimental Study on Ventilation Panel Models in a Subway Passenger Compartment	Tao, Yu; Yang, Mingzhi; Qian, Bosen; Wu, Fan; Wang, Tiantian;	2019	X			X		X	X			1
	Numerical simulation and analysis of transport air conditioning system integrated with passenger compartment	Li, Wenhua; Sun, Jian;	2013	X			X			X			2
	Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB: Massnahmen auf Reisezugwagen	Menth, Stefan	2007	X			X				X		2
	Optimal energy management of urban rail systems: Key performance indicators	González-Gil, A.; Palacin, R.; Batty, P.;	2015	X	X		X			X			2

Nr.	Titel	Autoren	Publikationsjahr	Themenbereich			Fahrzeugkategorie			Studienkategorie			Relevanz
				HLK	Hülle	Behaglichkeit	Bahn	Bus	Tram	Int.	National	BAV	
	Optimierung der Energieeffizienz von Linienbussen hinsichtlich Heizungs- und Klimasystemen	Könnecke, Benjamin;	2012	X	X			X			X		3
013	Quick Wins - Reducing energy consumption in public transport	Tackoen, Xavier;	2013	X			X			X			4
016	Refit Rollmaterial, LION - Modernisierung	Hofer, Ralf;	2017	X		X	X				X		4
	Refrigerant Alternatives for High Speed Train A/C Systems: Energy Savings and Environmental Emissions Evaluation under Variable Ambient Conditions	Mastrullo, R.; Mauro, A. W.; Vellucci, C.;	2016	X			X			X			1
	Reuse of condensed water to improve the performance of an air-cycle refrigeration system for transport applications	Wang, Xiaoxin; Yuan, Xiugan;	2007	X			X			X			3
	Simplified Thermal Comfort Evaluation on Public Buses for Performance Optimization	Brandão, Guilherme; Amaral, Wilian; Almeida, Caio; Castanon, Jose;	2017			X		X		X			2
	Simulation on energy use for mechanical ventilation and air-conditioning (MVAC) systems in train compartments	Chow, W. K.; Yu, Philip C. H.;	2000	X			X			X			2
	Simulationsprogramm für den Energieverbrauch von Reisezügen	Brunner, Conrad U. ; Pelli, Tiziano	1998	X	X		X				X		2
001	Solar heat gains through train windows: a non-negligible contribution to the energy balance	Bouvard, Olivia; Burnier, L.; Oelhafen, P.; Tonin, A.; Wüst, P.; Sidler, F.; Zweifel, G.; Schüler, A.;	2018		X		X				X		5
	Studie zur Temperatursenkung im S-Bahnverkehr der SBB - Auswertungen der Befragungen	Vetterli, Nadège; Kùlpmann, Rüdiger; Schwarz, Jürg	2018			X	X				X		3
	Sustainability and carbon reduction on electrified railways	McFadden, G.;	2010	X			X			X			3

Nr.	Titel	Autoren	Publikationsjahr	Themenbereich			Fahrzeugkategorie			Studienkategorie			Relevanz
				HLK	Hülle	Behaglichkeit	Bahn	Bus	Tram	Int.	National	BAV	
	Technologies for increased energy efficiency in railway systems	Gunselmann, W.;	2005	X			X			X			1
	The Potential Contribution of Light-Weighting to Reduce Transport Energy Consumption	Helms, Hinrich; Lambrecht, Udo;	2006		X		X			X			1
	Thermal comfort analysis of a high-speed train cabin considering the solar radiation effects	Yang, Lin; Li, Xiangdong; Tu, Jiyuan;	2019			X	X			X			2
014	Thermische Behaglichkeit in Schienenfahrzeugen RTA	Haller, Gabriel	2006	X		X	X		X	X			4
	Thermodynamic analysis of the two-phase ejector air-conditioning system for buses	Ünal, Şaban; Yılmaz, Tuncay;	2015	X				X		X			3
	Towards an Energy Efficient and Climate Compatible Future Swiss Transportation System	Raubal, M.; Jonietz, D.; Ciari, F.; Boulouchos, K.; Küng, L.; Georges, G.; Hirschberg, S.; Schenler, W.; Cox, B.; Kannan, R.; Rudel, R.; Cellina, F.; Kovacs, N.; Hoppe, M.; Michl, T.	2017			X	X	X			X		1
	Transcritical organic Rankine vapor compression refrigeration system for intercity bus air-conditioning using engine exhaust heat	Yılmaz, Alper;	2015	X				X		X			1
	Underground railway environment in the UK Part 1: Review of thermal comfort	Ampofo, F; Maidment, G; Missenden, J;	2004	X		X	X			X			1
	Urban air quality comparison for bus, tram, subway and pedestrian commutes in Barcelona	Moreno, Teresa; Reche, Cristina; Rivas, Ioar; Cruz Minguillón, Maria; Martins, Vânia; Vargas, Concepción; Buonanno, Giorgio; Parga, Jesus; Pandolfi, Marco; Brines, Mariola;	2015			X		X	X	X			1

Nr.	Titel	Autoren	Publikationsjahr	Themenbereich			Fahrzeugkategorie			Studienkategorie			Relevanz
				HLK	Hülle	Behaglichkeit	Bahn	Bus	Tram	Int.	National	BAV	
		Ealo, Marina; Sofia Fonseca, Ana; Amato, Fulvio; Sosa, Garay; Capdevila, Marta; de Miguel, Eladio; Querol, Xavier; Gibbons, Wes;											
	Using Air Walls for the Reduction of Open-Door Heat Losses in Buses	Liebers, Mike; Tretsiak, Dzmitry; Klement, Sebastian; Bäker, Bernard; Wiemann, Peter;	2017	X				X		X			3
	Ventilation of enclosed train compartments in Hong Kong	Chow, W. K.;	2002	X		X	X			X			2
	Zeitschrift Railvolution V10	Richter, Gregor	2010	X					X	X			3
	Zeitschrift Railvolution V12	Deroux, Mickael; Haller, Gabriel	2012	X					X	X			3
	Zeitschrift Railvolution V14	Richter, Gregor	2014	X					X	X			3
	Zeitschrift Railvolution V8	Haller, Gabriel; Kreitmayer, Manfred	2008	X					X	X			3

9.2.2 Normenwerke

Nr.	Titel	Autoren	Publikationsjahr	Themenbereich			Fahrzeugkategorie			Studienkategorie			Relevanz 1-5
				HLK	Hülle	Behaglichkeit	Bahn	Bus	Tram	Int.	National	BAV	
EN 13129	EN 13129: Bahnanwendungen - Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs - Teil 1: Behaglichkeitsparameter	<i>Norm</i>	2016			X	X			X			4
EN 13816	EN 13816: Öffentlicher Personenverkehr; Definition, Festlegung von Leistungszielen und Messung der Servicequalität	<i>Norm</i>	2002			X	X	X	X	X			2
EN 14750-1	EN 14750-1: Bahnanwendungen - Schienenfahrzeuge des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs - Teil 1: Behaglichkeitsparameter	<i>Norm</i>	2006	X		X	X		X	X			4
EN 14750-2	EN 14750-2: Bahnanwendungen - Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs - Teil 2: Typprüfungen	<i>Norm</i>	2006	X	X		X		X	X			3
EN 14813-1	EN 14813-1+A1: Bahnanwendungen - Luftbehandlung in Führerräumen - Teil 1: Behaglichkeitsparameter	<i>Norm</i>	2006, 2010	X		X	X		X	X			4
EN 14813-2	EN 14813-2+A1: Bahnanwendungen - Luftbehandlung in Führerräumen - Teil 2: Typprüfungen	<i>Norm</i>	2006, 2010	X	X		X		X	X			3
EN 50591	EN 50591	<i>Norm</i>	2019	X			X			X			3
ISO 19659-3	ISO 19659-3	<i>Norm</i>	20XX	X			X			X			4
VDV 181	VDV Schrift 181: Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs-Fahrgasträumen	<i>Norm</i>	2012	X		X	X	X	X	X			3
VDV 236	VDV Schrift 236: Klimatisierung von Linienbussen der Zulassungsklasse I (Stadtbus) und II (Überlandbus), für konventionell angetriebene Diesel- und Gasbusse als auch für Hybrid-, Brennstoffzellen- und Elektrobusse	<i>Norm</i>	2018	X				X		X			4

9.2.3 Berichte aus ESöV-Projekten

Nr.	Titel	Autoren	Publikationsjahr	Themenbereich			Fahrzeugkategorie			Studienkategorie			Relevanz 1-5
				HLK	Hülle	Behaglichkeit	Bahn	Bus	Tram	Int.	National	BAV	
P-001/1	P-001: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im öffentlichen Verkehr - Teil 1	Oelhafen, Peter; Tonin, Andreas; Meyer, Ernst	2015	X	X		X	X				X	5
P-001/2	P-001: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im öffentlichen Verkehr - Teil 2	Menti, Urs-Peter; Sidler, Franz; Maderspacher, Johannes; Jurt, Dominic; Vetterli, Nadège; Thaler, Eveline; Zweifel, Gerhard; Stockhaus, René	2015	X	X		X	X				X	5
P-002	P-002: Mesures différenciées de l'énergie des équipements des véhicules de transports publics urbains	<i>unbekannt</i>	2016	X	X			X				X	5
P-010	P-010: Potentialanalyse für Verbesserung der Wärmedämmung bei der Fahrzeug-Aussenhülle	Isenschmid, Christoph	2018		X				X			X	5
P-026	P-026: Bedarfsabhängige Aussenluftvolumenstromregulierung ICN	Dréwniok, Johannes; Geiger, Stephan	2017	X			X					X	5
P-034	P-034: Zugfenster mit kleinem U-Wert und hoher Mikrowellentransmission	Burnier, Luc; Schüler, Andreas	2016		X		X					X	5
P-055	P-055: Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im öffentlichen Verkehr (HLK-Synthese)	Oelhafen, Peter	2017	X	X		X	X				X	5
P-056	P-056: Simulation Energiebilanz Heizung-Lüftung-Klima ICN	Sidler, Franz	2017	X	X		X					X	5
P-058	P-058: Wärmedämmmaterialien in Schienenfahrzeugen - Istzustand und Ausblick	Tuchs Schmid, Matthias; Wüst, Peter	2016		X		X					X	5
P-073	P-073: Energieeinsparung durch Optimierung der Ventilationssteuerung 1 Prototyplok der Serie Ge 4/4II 611-633	Nold, Michael	2018	X			X					X	5

Nr.	Titel	Autoren	Publika- tionsjahr	Themenbereich			Fahrzeugkategorie			Studienkategorie			Relevanz
				HLK	Hülle	Behaglichkeit	Bahn	Bus	Tram	Int.	National	BAV	
P-098	P-098: Messung Energieverlust durch Türöffnungen am Trolleybus	Sidler, Franz	2018		X			X				X	5
P-122	P-122: Berechnung der Kondensation in Zugwänden	Achermann, Marc	2019		X		X					X	5
P-135	P-135: Erfahrungen aus der Beurteilung von lasergravierten Wärmeschutzfenstern als Ersatz für Repeater auf Eisenbahnfahrzeugen	Förster, Markus	2019		X		X					X	5

9.3 Interviewprotokolle

9.3.1 Energieeffizienz-Einschätzung

Cluster	Massnahmen	Energiesparpotential (in % des Energiebedarfs für HLK und Beleuchtung)						Investitionskosten (in CHF pro Wagen)					
		< 1%	1-5%	5-10%	10-20%	>20%	keine Angabe	< 1k CHF	1k - 5k CHF	5k - 20k CHF	20k - 100k CHF	> 100k CHF	keine Angabe
Effizienteres HLK-Anlagendesign	Andere Kältemittel	1	1	1			4		1		1		5
	Wärmepumpennutzung			1	2	2	2		1.5	1.5	1		3
	Abluftwärme-Rückgewinnung		3		2		2		1	1	1		4
	Ansaugstollen der Kondensator-Kühlluft optimal platzieren	2	2				3			1	1		5
	Effizientere HLK-Anlagen		1	1			5		2				5
	Zwei-Stufen-Luftauswerfer-Kühlung		1				6						7
	Verhindern von Gegenheizen		3	1.5	1.5		1	1	1	1	1		3
	Sonnenschutzfolien aufkleben		2	0.5	0.5		4		1	1			5
Wärmeaustausch über Fenster verringern	g-Wert von Fenstern dem Klima anpassen		2.5	0.5			4		1				6
	bessere Fenster	1	0.5	3.5			2		1	2			4

Cluster	Massnahmen	Energiesparpotential (in % des Energiebedarfs für HLK und Beleuchtung)					Investitionskosten (in CHF pro Wagen)						
		< 1%	1-5%	5-10%	10-20%	>20%	keine Angabe	< 1k CHF	1k - 5k CHF	5k - 20k CHF	20k - 100k CHF	> 100k CHF	keine Angabe
	Smarte Fenster		2	0.5	0.5		4			1			6
	Optimierung der Fenstergrösse		2.5	0.5			4		1				6
	low-e Fenster		3	1			3			2			5
Wärmeaustausch über opake Hülle reduzieren	Fahrzeug weiss lackieren		3				4	1					6
	Dämmung		2.5	1.5	1		2		1	1	1		4
	Aktive Isolierung		0.5	1.5			5						7
	Luftdichtheit verbessern	1	0.5	1.5			4	1	1				5
	Boilerdämmung		1				6		1				6
Luftaustausch reduzieren	Drehzahl der Ventilatoren reduzieren	1	2				4	2					5
	CO2-gesteuerte Lüftung		1	2	2	1	1		4	1			2
	Luftwechselrate optimieren			2	2	1	2	1	3	1			2

Cluster	Massnahmen	Energiesparpotential (in % des Energiebedarfs für HLK und Beleuchtung)					Investitionskosten (in CHF pro Wagen)						
		< 1%	1-5%	5-10%	10-20%	>20%	keine Angabe	< 1k CHF	1k - 5k CHF	5k - 20k CHF	20k - 100k CHF	> 100k CHF	keine Angabe
Heizung reduzieren	Temperaturanpassung im Innenraum		3.5	2.5		1		4	1				2
			.	.	.								
	Schlummerbetrieb einführen		3.5	0.5		3		2	3				2
	Regulierung der Heizung unter Berücksichtigung der internen Lasten		3				4	2				5	
					.	.							
Präzisere Steuerung der HLK-Anlage	Modellprädiktive Regelung der HLK-Anlage		1.33	1.33			4.33	1				6	
					.	.							
	Kompressor mit variabler Leistungs-/Drehzahlregelung		3.5	0.5			3	1	1			5	
	Frequenzvariable HLK-Anlage		2.5	1.5			3		2			5	
			.	.					.				
Alternative Türenmodelle & -bedienung	Unnötige Türöffnungen verhindern	1	1.33	0.33			4.33	1				6	
			2.33	0.33			4.33	1				6	
	Schnellere Türöffnung und -schliessung	2.5					4.5		1			6	
Drehtüren	0.33	1.33				5.33					7		
Türluftschleier	1.33	2.33				3.33	1	1			5		

Cluster	Massnahmen	Energiesparpotential (in % des Energiebedarfs für HLK und Beleuchtung)						Investitionskosten (in CHF pro Wagen)					
		< 1%	1-5%	5-10%	10-20%	>20%	keine Angabe	< 1k CHF	1k - 5k CHF	5k - 20k CHF	20k - 100k CHF	> 100k CHF	keine Angabe
Passive Klimaregelung	Lüftungsregulierung bei Türöffnung	1.33	1.33				4.33	2					5
	Freecooling		3				4	1	2				4
Design durch Simulation	Thermisches Simulationsmodell		1.5	1.5			4		1	1			5
	Behaglichkeitssimulation	1	1.5	0.5			4			1			6
Energieeffizienz durch andere Elemente	Fahrzeit verringern/schneller fahren	0.5	0.5				6						7
	Aussenluftvolumenstrom nach Bedarf regeln		1	1			5		1	1			5
	Tageslichtsteuerung der Beleuchtung	2	1				4	1	1				5
	LED Beleuchtung	3	1				3		3	1			3
	Bremsabwärmenutzung	1		0.33	0.33	0.33	5		1				6

1.33

Anzahl Experten-Voten – Experten haben teilweise Votes für über mehrere der angegebenen Bandbreiten abgegeben; ihre Votes wurden daher aufgeteilt

•

Angaben aus der Literatur in dieser Bandbreite

Energiemessdaten aus Teil 1 sowie die Messresultate eines Aufheizversuchs verwendet. Für die Kalibrierung der Luftdichte wurde zudem ein Tracergasexperiment (SF6) durchgeführt.

Mit den kalibrierten Simulationsmodellen der Züge wurden anschliessend die Effekte verschiedener Massnahmen getestet. Diese Massnahmen umfassen sowohl Änderungen an der Fahrzeughülle, als auch Modifizierungen des HLK-Systems. Der Effekt dieser Massnahmen auf den Energiebedarf der Fahrzeuge ergab sich direkt aus den Simulationsmodellen, der Aufwand diese Massnahmen umzusetzen musste jedoch in einem zusätzlichen Workshop ausgearbeitet werden.

wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:

Teil 1:

Die Einführung des Schlummerbetriebs und der Einbezug von internen Lasten bei der Temperaturregelung erlauben im BLS NINA eine Abnahme der Heizenergie um -29.8%.

Teil 2:

Aus der Simulation und den Workshops ergaben sich die:

- Optimierung der Fenstergrösse (nur bei Neubeschaffung)
- Nachtabsenkung der Innenraumtemperatur
- Bedarfsgerechte Regelung der Luftmenge in Abhängigkeit der CO2-Konzentration im Fahrgastraum
- Temperaturregelung und somit Absenkung des Raumtemperatur-Sollwerts

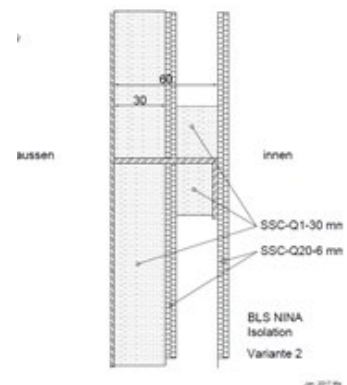
als beste Massnahmen. Die letzten drei dieser Massnahmen kombiniert ergaben im EW II (RhB) zum Beispiel eine Senkung des thermischen Energiebedarfs um 36%.

Einsparpotenzial:

Kommentar:

<i>Nummer:</i> P-002		<i>Kategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Mesures différenciées de l'énergie des équipements des véhicules de transports publics urbains			
<i>Autor(en):</i> unbekannt		<i>Institution:</i> tl – transports publics de la région lausannoise	<i>Publikationsjahr:</i> 2016
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input checked="" type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i>		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input type="checkbox"/> Bahn <input checked="" type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i> Trolleybus	
<i>Bauteil:</i> Alle – Traktion, HLK & Hülle		<i>Funktion/Ziel:</i> Energiebilanzierung	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Dieser Artikel beschreibt das Verfahren der Datenerhebung, welche im Bericht zu P-001-Teil 1 ebenfalls publiziert wurde. Das öffentliche Transportunternehmen der Region Lausanne hat in Zusammenarbeit mit der Universität Basel über eine Zeiddauer von über einem Jahr Daten an einem ihrer Trolleybusse gesammelt. Zu den gemessenen Datensätzen gehören nicht nur thermisch relevante Grössen (Temperaturen, Sonneneinstrahlung, Türöffnungen, Energiebedarf der Kompressoren) sondern auch Datensätze rund um die Traktionsenergie (Motoren, Bremswiderstand etc.). Aus diesen Daten wurde ermittelt, dass der Energiebedarf des HLK-Systems für die Trolleybusse der tl in gewissen Monaten (z.B. Januar) bis zu 50% des gesamten Energiebedarfs ausmachen kann. Im Jahresdurchschnitt werden jedoch nur ca. 32% der Energie für die HLK-Systeme eingesetzt. 44% werden zur Fortbewegung verwendet, 9% gehen durch Reibung verloren und 15% werden dank Rückgewinnungsmechanismen wieder ins Stromnetz eingespielen.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Aus den Messdaten werden schliesslich mehrere potentielle Verbesserungen des Systems abgeleitet. Dazu gehören z.B. <ul style="list-style-type: none"> - Eine verbesserte Dämmung - Der Einsatz von Wärmetauschern - Feinere Einstellungen der Lüftung - Der Einsatz von Wärmepumpen - (Den Einsatz von Batterien zur Bremsenergieerückgewinnung) - Der Einsatz einer Bolierdämmung - Die Reduktion von der Lüftungsgeschwindigkeit am Dach des Busses. 			<i>Einsparpotenzial:</i> <i>Nicht angegeben</i>
<i>Kommentar:</i>			

<i>Nummer:</i> P-010		<i>Kategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Potentialanalyse für Verbesserung der Wärmedämmung bei der Fahrzeug-Aussenhülle			
<i>Autor(en):</i> Christoph Isenschmid		<i>Institution:</i> BLS AG, Bahnproduktion ECOTRANS (Peter Wüst)	<i>Publikationsjahr:</i> 2018
<i>Themenbereich:</i> <input type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input checked="" type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input checked="" type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i>		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i> S-Bahn-Gliederzug BLS RABe 525 NINA	
<i>Bauteil:</i> Fahrzeug-Aussenhülle		<i>Funktion/Ziel:</i> Verbesserung der Wärmedämmung	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> <p>Am Niederflur-Nahverkehrsbus der BLS wurden in diesem Bericht verschiedenste Dämmungen getestet und miteinander verglichen. Der klare Fokus liegt dabei auf der Isolation der opaken Flächen im Zug und insbesondere den Aussenwänden. Viele der getesteten Varianten legten dabei Wert auf die thermische Isolation der Seitenwandrippen, welche dem Gehäuse die strukturelle Stabilität verleihen. Der, im Bericht beschriebene Ist-Zustand belässt diese Seitenwandrippen unisoliert, was sie zu direkten Wärmebrücken macht. Daher wurde in jeder weiteren Variante grossen Wert auf die thermische Entkopplung der Wärmebrücken gelegt und somit auch auf die Isolation der Seitenwandrippen. Die getesteten Dämmvarianten unterscheiden sich in erster Linie in der Anordnung der Dämmmaterialien. Hingegen verwenden alle Varianten eine Kombination derselben Dämmmaterialien: SSC Q1 (Isolationsmaterial aus Polyethylen) und SSC Q20 (mit Aluminiumfolie überzogenes SSC Q1). Die Variante 2 (Q1 30 mm, Q20 6mm, Luft 24 mm, Deckschicht Q20 6mm) wird schlussendlich aufgrund des geringen Montageaufwands, der verhältnismässigen Kosten des Rohmaterials und des zufriedenstellenden U-Werts von $0.57 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ als Bestvariante gewählt.</p> <p>Zusätzlich zur Isolation der Seitenwand entschied sich die BLS auch das Dach im Fahrgastraum der NINA-Züge zu isolieren. Der Boden, sowie die Führerstände der Endwagen wurden wegen erschwertem Zugang oder zu aufwändiger Demontage im alten Zustand belassen. Auf diese Weise wurde der gesamte dreiteilige Zug isoliert. Der kumulierte Arbeitsaufwand für diese Operation betrug 1090h.</p>			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> <p>Es wurde experimentell aufgezeigt, dass der mittlere U-Wert eines RABe 525 NINA Zuges der BLS von $2.42 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ auf $1.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ reduziert werden kann. Extrapoliert entspricht dies für den dreiteiligen Zug einer jährlichen Energieeinsparung von rund 20 MWh. Bei einem durchschnittlichen Bahnstrompreis von 0.12 CHF/kWh entspricht das einer finanziellen Einsparung von 2'400 CHF/a.</p> <p>Wenn davon ausgegangen wird, dass durch eine generell höhere Effizienz nur noch 480h pro vierteiligen Zug für die komplette Dämmung investiert werden müssten (statt der 1090h für den dreiteiligen Prototypen), würde sich die Amortisationszeit auf ca. 24 Jahre belaufen.</p>		<i>Einsparpotenzial:</i> <p>20 $\text{MWh}_{\text{el}}/\text{a}$ pro NINA-Zug \cong 2'400 CHF/a</p> <p>26.6 $\text{MWh}_{\text{el}}/\text{a}$ pro vierteiligen Lötchberger-Zug \cong 3'200 CHF/a</p>	
<i>Kommentar:</i>			

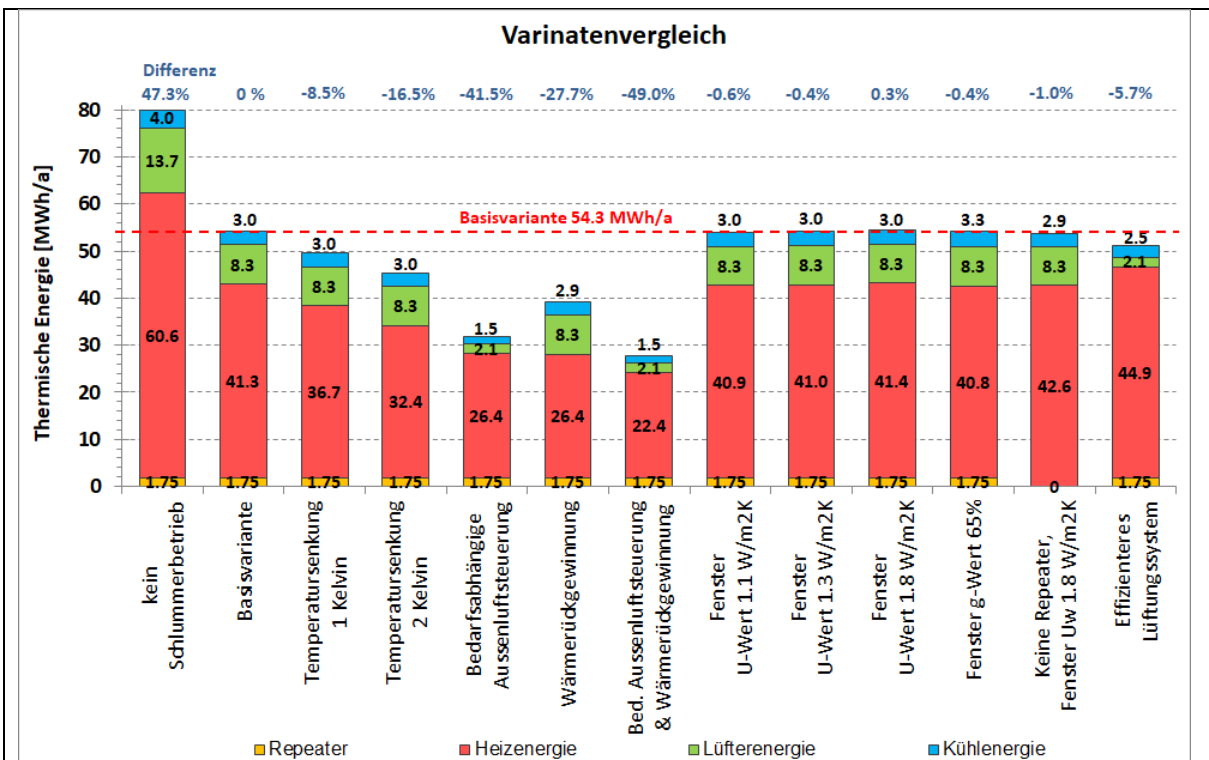


<i>Nummer:</i> P-026		<i>Kategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Bedarfsabhängige Aussenluftvolumenstromregulierung ICN			
<i>Autor(en):</i> Johannes Dréwniok, Stephan Geiger		<i>Institution:</i> SBB Schweizerische Bundesbahnen AG	<i>Publikationsjahr:</i> 2017
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input checked="" type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i>		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> Lüftung/Aussenluftklappe		<i>Funktion/Ziel:</i> Reduktion des Aussenluftvolumenstroms	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Die SBB hat in dieser Studie bei ihren Inter-City Neigezügen (ICN) eine neue, CO ₂ -gesteuerte Aussenluftvolumenstromregelung untersucht. Die Wagen eines ICN sind in der Regel mit 2 HLK-Anlagen ausgestattet: eine in jeder Wagenhälfte. Diese Anlagen wurden bisher über die Aussenlufttemperatur gesteuert und waren so geregelt, dass die ausgetauschte Luftmenge für einen vollbesetzten Wagen ausreichen würde. Der durchschnittliche Auslastungsgrad der ICN-Züge liegt aber gerade einmal bei 30-35%. Um diese Überdimensionierung zu korrigieren, hat die SBB eine Lüftungsteuerung getestet, welche sich an den CO ₂ -Konzentrationen in den Wagen als grobes Mass für die Belegung richtet. Dazu wurden in den Wagen CO ₂ -Sensoren montiert.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Diese bedarfsgerechte Lüftung hat dazu geführt, dass in einem Realversuch bis zu 400 kWh pro Woche und Wagen an thermischer Energie eingespart wurden. Auf die gesamte Flotte der SBB ICN-Züge übertragen entspricht dies einer Einsparung von 3.5 GWh pro Jahr. Für die gesamte Umrüstung wurden 2 Mio CHF investiert (1.1 Mio. CHF für Engineering und 0.9 Mio. CHF für die Installation der Hardware. Die durchschnittlichen Energieminderkosten dadurch betragen 340'000 CHF, was einem Break-Even point von 11 Jahren entspricht.		<i>Einsparpotenzial:</i> 3.5 GWh/Jahr	
<i>Kommentar:</i> In der Französischen Zusammenfassung wird angegeben, dass die ICN Flotte aus 44 Zügen mit je 7 Wagen besteht → 308 Wagen			

<i>Nummer:</i> P-034		<i>Kategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Zugfenster mit kleinem U-Wert und hoher Mikrowellentransmission			
<i>Autor(en):</i> Luc Burnier, Andreas Schüler		<i>Institution:</i> LESO-PB, ENAC, EPFL	<i>Publikationsjahr:</i> 2016
<i>Themenbereich:</i> <input type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input checked="" type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input checked="" type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i>		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> Zugfenster		<i>Funktion/Ziel:</i> Mikrowellen-Transmission	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Die Autoren stellen in diesem Bericht ein neues Verfahren zur Laserbehandlung von low-e Zugfenstern vor. low-e steht für «low emissivity» und bezeichnet Fenster, welche spezialbeschichtet sind um Infrarotstrahlen abzufangen und somit deren U-Wert zu senken. Da Metalle jedoch Teil dieser Beschichtung sind fangen die Fenster gleichzeitig elektromagnetische Wellen im Mikrowellen-Bereich ab. Diese Wellen werden von der Mobilfunkindustrie zur Übertragung von Signalen verwendet. Die heutige Standardlösung um dieses Problem der Abschottung von Mikrowellen zu umgehen sind Repeater, welche das Mobilfunksignal von aussen in den Wagen replizieren und umgekehrt. Diese Lösung ist jedoch mit einem zusätzlichem Energie- und Platzbedarf im Zug verbunden. Die Autoren haben untersucht, ob sich der faradaysche Käfig um Zugwagen öffnen lässt, wenn die metallische Schicht in den Fenstern unterbrochen wird. Dazu wurden anhand von Lasern Teile der low-e Beschichtung der Fenster in dünnen Banden entfernt. Dieses Gitter von Laserschnitten sollte zu einer deutlich geringeren elektrischen Leitfähigkeit in den Fenstern führen und die Fenster somit für Mikrowellen durchlässiger machen. In einer Reihe von Versuchen haben die Forscher herausgefunden, dass die Mikrowellentransmission durch die Fenster mit dieser Behandlung deutlich zunimmt, die thermische Leitfähigkeit der Fenster sich aber nicht signifikant verschlechtert. Die Fenster wurden dabei auch in einem existierenden Zug eingebaut, wobei gezeigt werden konnte, dass die laserbehandelten low-e Fenster ungefähr die gleiche Mikrowellentransmission zulassen wie unbehandelte Fenster (ohne low-e Beschichtung).			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Ein Ersatz von normalen Zugfenstern durch laserbehandelte low-e Fenster, führt zu einer Senkung des U-Werts ohne die Mikrowellentransmission zu beeinflussen.		<i>Einsparpotenzial:</i> <i>nicht quantifiziert</i>	
<i>Kommentar:</i>			

<i>Nummer:</i> P-055		<i>Kategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im öffentlichen Verkehr (HLK-Synthese)			
<i>Autor(en):</i> Prof. Peter Oelhafen		<i>Institution:</i> Departement Physik der Universität Basel	<i>Publikationsjahr:</i> laufend
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input checked="" type="checkbox"/> Heizungssysteme <input checked="" type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input checked="" type="checkbox"/> Klimaanlage <input checked="" type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input checked="" type="checkbox"/> transparente Bauteile <input checked="" type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i> Fahrzeughülle wird bei der Ausarbeitung von Energiekonzepten mitbetrachtet.		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input checked="" type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i> Bahnwagen, Züge und Swisstrollys Bestands- und Neufahrzeuge	
<i>Bauteil:</i> versch. Bauteile / ganzheitliche Energiekonzepte		<i>Funktion/Ziel:</i> Ausarbeitung von energetischen Massnahmen und Konzepten zur Verbesserung der Energieeffizienz von Bestands- und Neufahrzeugen.	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Nach Verbrauchern aufgeschlüsselte Langzeitmessungen von Energieverbrauchsdaten der Traktion, Rekuperation, Heizung, Lüftung, Kühlung und Nebenverbraucher, sowie eine detaillierte Erfassung von Aussen- und Innenklimadaten bilden die Basis für die Ausarbeitung energetischer Massnahmen (bisherige Messobjekte: Bahnwagen (3), Züge, (3), Swisstrolley (1)). Dabei wird das Einsparpotenzial sowie die Wirtschaftlichkeit verschiedener Massnahmen erarbeitet. Bei der Konzeptentwicklung werden u.a. auch Massnahmen zur Verbesserung der thermischen Isolation der Fahrzeughülle zur Senkung des Heizenergieverbrauchs (als Hauptposten von Heizung, Lüftung und Kühlung) betrachtet.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Der Bericht berechnet das Einsparpotential von vier verschiedenen Energie-sparmassnahmen am Beispiel des SOB-Flirt: <ul style="list-style-type: none"> - Erweiterter Schlumberbetrieb (bei Aussentemperaturen $5^{\circ}\text{C} < T < 25^{\circ}\text{C}$ wird das Fahrzeug bei nicht-Gebrauch komplett ausgeschalten) - CO₂-geregelter Frischluftzufuhr - Fenster mit besserem Dämmwert - Kühlung unter 15°C komplett ausschalten 		<i>Einsparpotenzial:</i> Angaben in Prozent der HLK-Energie Schlumberbetrieb: 12.6% (52.2% wenn Nebenverbraucher mit einbezogen) CO ₂ -geregelter Frischluftzufuhr: 15.2% Fenster mit besserem Dämmwert: 8.6% Kühlung unter 15°C komplett ausschalten: 2%	
<i>Kommentar:</i>			

<i>Nummer:</i> P-056		<i>Kategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Simulation Energiebilanz Heizung Lüftung Klima: ICN (SBB)			
<i>Autor(en):</i> Franz Sidler		<i>Institution:</i> Hochschule Luzern Technik & Architektur	<i>Publikationsjahr:</i> 2019
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input checked="" type="checkbox"/> Heizungssysteme <input checked="" type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input checked="" type="checkbox"/> Klimaanlage <input checked="" type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i>		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i> Fernverkehrszug ICN (Intercity Neigezug der SBB)	
<i>Bauteil:</i>		<i>Funktion/Ziel:</i> Optimierungsmassnahmen betreffend Fahrzeughülle, HLK-Systeme, Steuerung und Regelung zur Effizienzsteigerung simulieren und Einsparpotenziale abschätzen und vergleichen.	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Der Energiebedarf für Heizung, Lüftung und Klima (HLK) bei Schienenfahrzeugen macht ca. 20-40 % des Gesamtenergieverbrauchs aus, wie im Projekt „Energieeffizienz von HLK im öffentlichen Verkehr“ aufgezeigt wurde. Bei diesen Betrachtungen wurde jedoch kein Fahrzeug aus dem Fernverkehr untersucht. Diese Lücke wurde nun durch den ICN der SBB geschlossen. Ein detailliertes thermisches Simulationsmodell des ICN wurde erarbeitet, um den Jahresenergiebedarf zu ermitteln und ein Energieflussdiagramm zu erstellen (IST-Zustand). Auf dieser Grundlage wurde anschliessend das Einsparpotenzial verschiedener Massnahmen bilanziert.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen und Einsparpotenzial:</i> Die Abbildung zeigt das Einsparpotenzial der verschiedenen Massnahmen im Variantenvergleich. Der Schlumberbetrieb wurde im ICN bereits umgesetzt und wird deshalb nicht als Reduktion, sondern als Mehrverbrauch zum Basismodell dargestellt.			



Am bestehenden ICN werden folgende Massnahmen zur Umsetzung empfohlen:

- Als Einzelmassnahme wird mit der **bedarfsgerechten Aussenluftsteuerung** die grösste Einsparung von **41.5 % (22.6 MWh/a)** erreicht. Diese Massnahme kann mit wenig finanziellen Mitteln in kurzer Zeit umgesetzt werden.
- Beim nächsten Ersatz der Fenster sollten laserperforierte funkdurchlässige Gläser verwendet und die vorhandenen Repeater abgeschaltet werden. Dies spart zwar – falls keine entsprechenden Verglasungen mit tieferen U-Werten erhältlich sind – nur wenig Energie, reduziert aber den Instandhaltungsaufwand der Repeater.
- Das ineffiziente Gegenheizen bei der Kühlung sollte als kurzfristige Massnahme durch Anpassung der Regelung verbessert werden, sodass die Betriebszeit von gleichzeitigem Heizen und Kühlen reduziert wird.

Bei einer nächsten grösseren Revision, einem Refit oder bei neuer Beschaffung werden zusätzlich zu den oben beschriebenen Massnahmen folgende Verbesserungen empfohlen:

- Die Kühlanlage ist für alle Betriebszustände ohne das ineffiziente Gegenheizen (Schätzung Energiebedarf: **11.5 MWh/a**) zu dimensionieren.
- Eine Reduktion des Raumsollwertes von 2 K ist aus Komfortgründen kritisch zu hinterfragen. Der um ein bis zwei Kelvin tiefere Sollwert könnte bei Neufahrzeugen mit besserer Dämmung und damit höheren Oberflächentemperaturen ohne grosse Komforteinbusse möglich sein.
- Bei einer Neuanschaffung ist der Einsatz einer Wärmepumpe zu prüfen. Dabei ist darauf zu achten, dass die abgabeseitigen Systemtemperaturen tief gehalten werden können, um eine Jahresarbeitszahl von ca. 2.5 zu erreichen. (Schätzung Einsparpotenzial: Reduktion Strombedarf Heizen um **60%** (24,8 MWh/a) und der gesamte Energiebedarf um **45%**)

Kommentar:

<i>Nummer:</i> P-058		<i>Kategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Bibliothek Wärmedämmmaterialien (Titel Bericht) Wärmedämmmaterialien in Schienenfahrzeugen - Istzustand und Ausblick (Titel Projektbeschreibung)			
<i>Autor(en):</i> Matthias Tuchschnid, Peter Wüst		<i>Institution:</i> SBB, ecotrans	
		<i>Publikationsjahr:</i> 2016	
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input checked="" type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input checked="" type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i>		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> Zugaussenwände (Fussboden, Decke, Wand), Heizungsapparate, Luftkanäle, Rohre		<i>Funktion/Ziel:</i> Erstellung einer digitalen Bibliothek zu Wärmedämmmaterialien im Bereich Schienenfahrzeuge sowie 10 Materialmusterkoffern.	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> In diesem Projekt wird das bestehende Wissen im Bereich Wärmedämmmaterialien in Eisenbahnfahrzeugen zusammengetragen und in Form einer digitalen Bibliothek (Excel) für relevante Stakeholder zugänglich gemacht. Zusätzlich wurden 5 verschiedene Dämmmaterialien unter realitätsnahen Bedingungen getestet, um den Einfluss von Konvektion und Feuchtigkeit auf die effektive Wärmedämmung in Zugseitenwänden abschätzen zu können. Die Arbeiten wurden durch einen Qualitätszirkel mit Vertretern von Rhb, BLS, SOB und SBB und dem BAV begleitet, was die Praxisrelevanz und Qualität der Resultate gewährleistete. Die Bibliothek ist unter https://www.voev.ch/waermedaemmmaterialien erhältlich, der ausleihbare Musterkoffer enthält die Wärmedämmmaterialien in der Grösse DIN A5 und ist ebenfalls beim VöV erhältlich.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> <ul style="list-style-type: none"> Die Bibliothek gibt lediglich einen Überblick darüber, welche Wärmedämmmaterialien es gibt. Es kann aber keine Aussage getroffen werden, bei welchem Fahrzeug und an welcher Stelle welches Material zu verwenden ist. Vielmehr gilt es sorgfältig die verschiedenen Anforderungen zu definieren und dann das bestgeeignetste Material auszuwählen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über den möglichen Einsatz von Wärmedämmmaterialien bei Schienenfahrzeugen und deren allgemeingültige Anforderungen. Die Bibliothek umfasst 22 Materialien (Tabelle 2), welche in der Regel bei Schweizer Schienenfahrzeugen zum Einsatz kommen und beschreibt u.a. physikalische Eigenschaften, Energieeffizienz, akustische Eigenschaften, Brandsicherheit, Umwelt und Sicherheit sowie die Verarbeitung dieser Materialien. Ebenso wurde ein Musterkoffer zu diesen Dämmmaterialien (Mustergrösse DIN A5, inkl. Datenblatt) zusammengestellt. Dieser ist beim VöV einsehbar. Erkenntnisse im Bereich Energieeffizienz: Durch die Isolation mit Vakuum ist die typische Wärmeleitfähigkeit um rund Faktor 10 tiefer, als bei eingeschlossener Luft oder Luftpolstern. Zusätzlich weisen die in 		<i>Einsparpotenzial:</i> Isolation mit Vakuum um rund Faktor 10 tiefer; Aluminiumfolie reflektiert 95% der Wärme im Infrarotbereich	

<p>Aluminiumfolie eingepackten Paneele durch ihre hohe Infrarotreflektion eine sehr gute Energieeffizienz auf - Eine Aluminiumfolie reflektiert bis zu 95% der Wärme im Infrarotbereich zurück ins Fahrzeug.</p> <ul style="list-style-type: none"> Zusätzlich zu den Herstellerangaben der Wärmedämmwerte unter trockenen Bedingungen hat das Fraunhofer Institut in Stuttgart die Wärmedämmung von 5 exemplarischen Wärmedämmmaterialien auch unter Einfluss der Kondensationsfeuchtigkeit gemessen. Die Ergebnisse sind in einem separaten Bericht beschrieben. 	
<p><i>Kommentar:</i> Die Studie zum Einfluss der Kondensationsfeuchte ist auf Anfrage bei energiesparen@sbb.ch erhältlich.</p>	

Tabelle 1: Übersicht des Wärmedämmmaterialeinsatzes in Schienenfahrzeugen

Bereich	besondere Anforderungen an Wärmedämmung	Bisher vorwiegend eingesetzte Materialien
1 Fussboden	Feuchte, Entwässerung, Akustik	Moniflex, Korkschröt, SSC-Q1
2 Wand	Wärmedämmung, Befestigung, Vibrationen, Dilatation bei Temp. Differenzen, Kondensation ¹	Glaswolle, Basotect G, Moniflex, Fiberform T63, Plastazote MP15,
3 Decke	Wärmedämmung, Befestigung, Vibrationen, Dilatation bei Temp. Differenzen, Kondensation, Schwerkraft	Glaswolle, Basotect G, Moniflex, Fiberform T63, Plastazote MP15
4 Heizungsapparate, Luftkanäle	Wärmedämmung, Brandeigenschaften, Emissionen, Temperaturfestigkeit	Höchste Anforderungen für Dämmung in luftführenden Geräten und Kanäle
5 Rohrleitungen	Wärmedämmung, Kondensation, Frostschutz	Aeroflex, Armaflex, Armaflex Rail

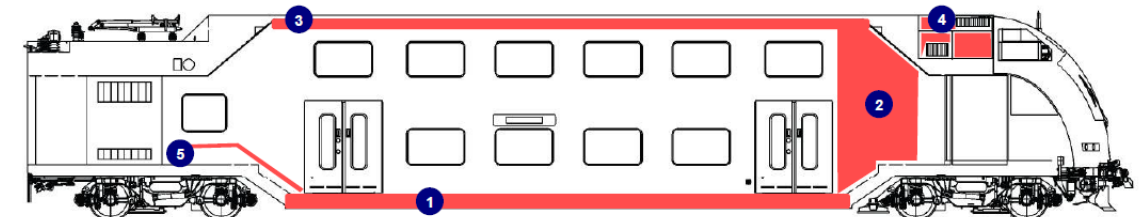


Tabelle 2: Übersicht der Wärmedämmmaterialien in der Bibliothek

Skizze der Struktur	Gruppe	Materialien
	Geschlossenzellige Schäume	Armaflex Rail Aeroflex Aeroflex green Plastazote MP15 FR Plastazote LD15 FM SSC Q1 Divinycell
	Fasern	Glaswolle Fiberform 63 T Fiberform 62 T 2SL Resobson TXT F800 FR HO ALG01 Sorberpoly 3D
	Offenzellige Schäume	Basotect G Basotect G hydrophob Basotect G+ Willmid HT340 Im Musterkoffer ist zusätzlich ein Muster von Basotect G mit Aluminiumbeschichtung enthalten.
	Weitere Dämmmaterialien	Moniflex SSC Q20 Blähkork-Granulat Blähkork-Platten Vacupor Vakuum Dämmpaneelen

<i>Nummer:</i> P-073		<i>Kategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Energieeinsparung durch Optimierung der Ventilationssteuerung 1 Prototyplok der Serie Ge 4/4II 611-633			
<i>Autor(en):</i> Michael Nold		<i>Institution:</i> Rhätische Bahn AG	<i>Publikationsjahr:</i> 2018
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i> Ventilation der Fahrmotoren, Stromrichter und des Transformators		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i> 1 Prototyplok der Serie Ge 4/4II 611-633	
<i>Bauteil:</i> Fahrmotor		<i>Funktion/Ziel:</i> Entwicklung eines effizienten und kostengünstig realisierbaren Motormodells zur sensorfreien Ermittlung der Motortemperatur, um eine bedarfsgerechte Ventilation zu garantieren und somit den Energieverbrauch sowie die Betriebskosten zu senken.	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Bei den Fahrzeugen der Lokomotivserie Ge 4/4 II der Rhätischen Bahn wird die Ventilation der Fahrmotoren, Stromrichter und des Transformators derzeit manuell durch den Lokführer geregelt. Dabei stehen dem Lokführer keinerlei quantitative Anhaltspunkte während der Fahrt zur Verfügung und er orientiert sich bei der Wahl der Ventilationsstufe an: seiner persönlichen Intuition, an dem Zuggewicht, an der Strecke, an seiner gefühlten Führerraumtemperatur, an seiner Schätzung der Aussen-temperatur und an der Selbsteinschätzung seiner Fahrweise. Um dennoch sicherzustellen, dass die Fahrmotoren nicht überhitzen, werden diese im Allgemeinen deutlich zu stark ventiliert. Um den Energieverbrauch zu optimieren, soll ein physikalisches Motormodell entwickelt werden, welches eine bedarfsgerechte Motorventilation ohne Motorsensoren sicherstellt. Im Vergleich zu sensorbasierten Varianten ist es dadurch möglich, die Betriebsstabilität und die Fahrzeugverfügbarkeit zu erhöhen, da keine Fahrzeugausfälle durch eine fehlerhafte Sensorik auftreten.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Durch die beschriebene Optimierung der Ventilationssteuerung (geringe Ventilationsstufe, dafür höheres ΔT zw. Kühlluft und Motortemp.) ist es möglich auf Altfahrzeugen spürbare Mengen an Energie zu sparen und gleichzeitig die Lebenserwartung der Fahrmotoren (durch eine Reduktion der Kondensatbildung) zu erhöhen. Im Projekt wurde aufgezeigt, dass es möglich ist ohne Motortempersensoren relativ genau die Motortemperatur zu berechnen, wodurch eine bedarfsgerechte Ventilation einfach und kostengünstig umsetzbar ist. Die Umbaukosten (ohne Entwicklungskosten) betragen pro Lok rund 10'000 CHF und sind somit nach 5 Jahren refinanziert. Nach 25 Jahren werden pro Lok ca. 480'000 kWh Energie gespart, das entspricht ca. 53'000 CHF. D.h. für die gesamte Flotte sind es über 11 Mio. kWh und über 1.2 Mio. CHF. Dies würde die Umbau- und Entwicklungskosten um ein Vielfaches übersteigen.		<i>Einsparpotenzial:</i> Bei Altfahrzeugen: ca. 19'300 kWh pro Jahr und Lok, was ~ 2100 CHF entspricht. Gesamte Flotte mit 23 Lokomotiven: ca. 444'400 kWh/a und fast 48'900 CHF/a	

Zusätzlich ergeben sich noch mögliche weitere Ersparnisse beim Einsatz mit dem Albulagliederzug, wenn dieser mit einer Ge 4/4 II abgestellt wird und somit auch auf dem Abstellgleis bedarfsgerecht ventiliert werden kann. Ob diese relevant sind hängt jedoch davon ab, wie viele AGZ Züge zukünftig mit der Ge 4/4 II betrieben werden.	Zusatzersparnis auf dem Abstellgleis durch AGZ: ca. 65 kWh/d pro Lok bzw. > 20'000 kWh/a (~ 2'200 CHF/a).
<i>Kommentar:</i>	

<i>Nummer:</i> P-098		<i>Kategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Messung Energieverlust durch Türöffnungen bei Linien-Bussen			
<i>Autor(en):</i> Franz Sidler, Stefan Ineichen, Gerhard Zweifel		<i>Institution:</i> Hochschule Luzern – Technik & Architektur, Institut für Ge- bäudetechnik und Energie	<i>Publikationsjahr:</i> 2019
<i>Themenbereich:</i> <input type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input checked="" type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i> Energieverlust durch Türöffnungen		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input type="checkbox"/> Bahn <input checked="" type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i> Swisstrolley plus von der Firma Carrosserie Hess	
<i>Bauteil:</i> Bustür		<i>Funktion/Ziel:</i> Ermittlung der Energieverluste durch das Öffnen der Türen am Trolley-Bus.	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> <p>Durch Messungen unter möglichst realitätsnahen Randbedingungen wird der Energieverlust infolge Türöffnungen zum Ein- und Ausstieg der Passagiere am Trolleybus ermittelt. Visualisierungen der Luftströmungen im Türbereich werden erstellt und den Herstellern und Betreibern von Fahrzeugen wird aufgezeigt, wie gross der Anteil der Wärmeverluste infolge der Türöffnungen im Vergleich zu den Gesamtverlusten ist.</p> <p>Als Fahrzeug wurde der Swisstrolley plus von der Firma Carrosserie Hess zur Verfügung gestellt. Dieser Bus ist 18.7 m lang, hat vier Türen und kann maximal 163 Passagiere befördern. Geheizt und gekühlt wird das Fahrzeug mit einem Klimagerät. Bei sehr tiefen Aussentemperaturen werden zusätzlich elektrische Infrarotstrahler an der Decke zugeschaltet.</p> <p>Die Messungen am Bus wurden in einer Klimakammer der SBB in Olten durchgeführt. Der Leistungs-Mehrbedarf infolge Türöffnungen wurde bei unterschiedlichen Aussentemperaturen ermittelt.</p>			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> <p>Die Berechnung des erforderlichen Energiebedarfs infolge Türöffnung in einem Jahr für den Standort Luzern ergab, dass die Verluste durch Türöffnungen im Winter einen erheblichen Anteil der Heizenergie ausmachen.</p> <p>Es zeigte sich, dass die Verlustleistung durch Türöffnungen bei steigender Temperaturdifferenz nicht linear zunimmt: bspw. $\Delta T \sim 10K$ (Lufttemperatur Innen und Aussen vom Bus) führt zu einem Leistungs-Mehrbedarf durch Türöffnungen von ca. 1.5 kW; bei $\Delta T \sim 21K$ stieg die Verlustleistung auf ca. 11 KW an. Bezogen auf die gesamte Heizleistung werden dabei 33 % zur Deckung der Verluste durch Türöffnungen benötigt.</p> <p>Die Berechnung am Standort Luzern, basierend auf den Klimadaten nach SIA 2028, ergab für den SwissTrolley plus Verluste durch Türöffnungen von 16.3 MWh/a.</p>		<i>Einsparpotenzial:</i> <p>In der Studie wurden keine Massnahmen - um den Verlust infolge Türöffnungen zu reduzieren - untersucht. Dies sollte in einem weiterführenden Projekt betrachtet werden.</p>	

Die Resultate können nicht direkt auf andere Fahrzeuge wie Nahverkehrszüge oder Trams angewandt werden. Diese Fahrzeuge haben andere Tür-öffnungsflächen, unterschiedliche Fahrpläne sowie dementsprechend andere Türöffnungszeiten und sollten in einem anderen Projekt untersucht werden.

Des Weiteren sollten Optimierungen gesucht werden, um die Verluste durch Türöffnungen in Linienbussen zu reduzieren. Eine nicht vollständige Auswahl und ohne Überprüfung von deren Umsetzung und Nutzen ist nachfolgend aufgeführt:

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

Diese und weitere mögliche Massnahmen gilt es im Rahmen eines weiterführenden Projekts näher zu betrachten.

Kommentar:

<i>Nummer:</i> P-122		<i>Kategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Berechnung der Kondensation in Zugwänden			
<i>Autor(en):</i> Marc Achermann		<i>Institution:</i> Hochschule Luzern, Technik & Architektur	<i>Publikationsjahr:</i> -
<i>Themenbereich:</i> <input type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input checked="" type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input checked="" type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i>		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> Aussenwand		<i>Funktion/Ziel:</i> Entwicklung und Implementierung eines physikalischen Modells zur Berechnung des Feuchte- und Wärmetransports in Zugwänden.	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Mit Hilfe numerischer Simulationen wurde der zeitliche Verlauf des Wärme- und Feuchte-transportes in Zugwänden mit Einbezug von Kondensationsprozessen berechnet. Als Grundlage dienten Messdaten der relevanten physikalischen Grössen (Temperatur, Feuchtigkeit, Sonneneinstrahlung, usw.) eines Flirt-Zugs der Südostbahn von einem ganzen Jahr. Die Berechnungen wurden 1-dimensional (senkrecht zur Wand) mit zwei charakteristischen homogenen Wandaufbauten durchgeführt. In einem Wandaufbau findet ein ungehinderter Feuchte-austausch zwischen Innenraum und Wärmedämmung statt, im anderen ist dieser Austausch reduziert. Die Ergebnisse beruhen auf Klimadaten für das Mittelland.			
<i>Bisherige Erkenntnisse zum Thema «Feuchte- und Wärmetransport»:</i> <ul style="list-style-type: none"> • Auf der kalten Seite der Wanddämmung (z.B. Melaminharzschäum) kann der Wassergehalt je nach Temperaturgefälle und Innenraumfeuchte ansteigen. Der Wassergehalt ist jedoch immer deutlich unter dem Grenzwert, bei dem Wasserabfluss zu erwarten ist. • Es gibt keine langanhaltende Ansammlung von Wasser in der Dämmung. • Der Feuchtegehalt in der Dämmung kann tief gehalten werden, wenn der Feuchtestrom reduziert ist. Dies kann erreicht werden z.B. mit kaschierten Dämmungen, oder mit feuchtedichten Innenraumverkleidungen (wenig Unterbrüche). • Der Feuchtegehalt in der Dämmung kann in der kalten Jahreszeit durch das Einstellen des Zugs in eine warme Halle reduziert werden. • Der Schlummerbetrieb mit gesenkter Innentemperatur erhöht die Feuchtigkeit in der Dämmung nicht. • Wenn der Feuchtestrom stark unterdrückt ist, ist der Feuchtegehalt in der Dämmung durch die Anfangsfeuchte beim Einbau der Dämmung festgesetzt. Wenn sich die Umgebungstemperaturen ändern, findet eine Verschiebung des Wassergehalts innerhalb der Dämmung statt. In diesem Fall ist es empfehlenswert, die Dämmung bei geringer relativen Feuchte einzubauen, um die Wärmeleitfähigkeit zu reduzieren. • Der Wärmestrom durch die Zugwand wird in den meisten untersuchten Situationen primär durch die Dicke der Dämmung und eventuelle Luftkammern bestimmt. Der Wassergehalt in der Dämmung führt nur in wenigen Situationen zu einem signifikant höheren Wärmestrom. 			<i>Einsparpotenzial:</i> -

<ul style="list-style-type: none">• Tiefe Wärmeströme (Energieaspekt) und angenehme Wandtemperaturen im Innenraum (Behaglichkeitsaspekt) können erreicht werden mit dicken Dämmungen. Wenn die Dämmungsdicke limitiert ist, reduzieren einfache, passive Massnahmen den Feuchtestrom, beispielsweise eine Kaschierung der Dämmung.	
<i>Kommentar:</i>	

<i>Nummer:</i> P-135		<i>Kategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Erfahrungen aus der Beurteilung von lasergravierten Wärmeschutzfenstern als Ersatz für Repeater auf Eisenbahnfahrzeugen			
<i>Autor(en):</i> Markus Förster		<i>Institution:</i> SBB Personenverkehr	<i>Publikationsjahr:</i> -
<i>Themenbereich:</i> <input type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input checked="" type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input checked="" type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i> lasergravierte Wärmeschutzverglasung		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i> Regional- und Fernverkehr	
<i>Bauteil:</i> Fenster		<i>Funktion/Ziel:</i> Zusammenfassung der Erfahrungen mit lasergravierenden Wärmeschutzgläsern als Ersatz für Mobilfunkverstärker im Regional- und Fernverkehr.	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Im Rahmen der Studie werden anhand von «good practice»-Beispielen die Erfahrungen mit lasergravierten Wärmeschutzverglasungen zusammengefasst. Hierzu gilt es Beurteilungskenngrößen für performance-orientierte Vergleichsmessungen verschiedener Repeater-Technologien mit und ohne lasergravierter Verglasung zu erarbeiten. Ebenso sollen die HF-Eigenschaften, die Auswirkungen auf die Fahrzeugklimatisierung sowie den Energieverbrauch, die Kundenakzeptanz und die Lebenszykluskosten untersucht werden.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> In der Studie werden fünf Varianten mit Kombinationen aus Fenstertypen, Repeatern, Isolationsgasen miteinander verglichen: Variante 1: Repeater-Anpassungen und Fensterersatz mit «Luftfüllung» – ohne Tausch Notausstieg Fenster <i>Ug-Wert 1,6 (W/m²K), g-Wert = 0,35</i> Variante 2: Fensterersatz HF-Scheiben mit «Edelgasfüllung» - 100% Fensterersatz <i>Ug-Wert 1,4 (W/m²K), g-Wert = 0,41</i> Variante 3: Fensterersatz HF-Scheiben mit «Edelgasfüllung» - ohne Tausch Notausstieg Fenster <i>Ug-Wert 1,4 (W/m²K), g-Wert = 0,41</i> Variante 4: Repeater-Anpassung und Fensterersatz mit «Edelgasfüllung» - 100% Fensterersatz <i>Ug-Wert 1,2 (W/m²K), g-Wert = 0,35</i> Variante 5: Repeater-Anpassung und Fensterersatz mit «Edelgasfüllung» – ohne Tausch Notausstieg Fenster <i>Ug-Wert 1,2 (W/m²K), g-Wert = 0,35</i>		<i>Einsparpotenzial:</i> Da in dieser Studie der Lebenszyklus-Energiebedarf berechnet wird. Kann nicht zurückverfolgt werden, welcher Anteil im Fahrzeug selbst anfällt.	

<p>Die Lebenszyklusanalyse der Studie nimmt Variante 1 als Grundvariante an und vergleicht die anderen Varianten damit. Der LC-Energiebedarf der Variante 1 beträgt 324GWh.</p> <p>Variante 2: LC-Kosten -15.6 MCHF, LC-Energiebedarf +10GWh Variante 3: LC-Kosten -15.6 MCHF, LC-Energiebedarf +10GWh Variante 4: LC-Kosten 0 MCHF, LC-Energiebedarf -7GWh Variante 5: LC-Kosten 0 MCHF, LC-Energiebedarf -7GWh</p> <p>Der Einsatz von HF-Fenstern ist also über den Lebenszyklus hinweg günstiger, weil die Unterhaltskosten für die Repeater wegfallen. Der Fensterersatz ist aber Kostenintensiv.</p>	
<p><i>Kommentar:</i> Mit der Repeater-Anpassung ist hier ein Update auf einen MIMO 2x2 Repeater gemeint.</p> <p>Mit HF-Scheiben sind konkret lasergravierte Wärmeschutzfenster gemeint.</p>	

9.4.2 Übrige wissenschaftliche Literatur

<i>Nummer:</i> 001		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input checked="" type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Solar heat gains through train windows: a non-negligible contribution to the energy balance			
<i>Autor(en):</i> O. Bouvard, L. Burnier, P. Oel- hafen, A. Tonin, P. Wüst, F. Sidler, G. Zweifel, A. Schüler		<i>Institution:</i> EPFL, Uni Basel, Ecotrans GmbH, HSLU	<i>Publikationsjahr:</i> 2018
<i>Themenbereich:</i> <input type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input checked="" type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input checked="" type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i>		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> Fenster		<i>Funktion/Ziel:</i> Energiebilanzierung	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> <p>Der Artikel befasst sich mit dem Effekt der solaren Gewinne in Schweizer Zügen. Um die Relevanz von thermischen Betrachtungen zu begründen, werden dabei zuerst Energiemessdaten von Schweizer S-Bahnen diskutiert. Diese zeigen auf, dass die HLK-Anlagen einen Energiebedarf von 31.8% darstellen.</p> <p>Im Hauptteil des Artikels werden thermische Simulationen eines Glacier-Express Zuges unter verschiedenen Bedingungen präsentiert. Dabei wird vor allem studiert, welchen Effekt eine Veränderung des g-Werts in solchen Zügen in verschiedenen klimatischen Bedingungen erzeugt.</p>			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> <p>Im Artikel wird belegt, dass (gemäss den Simulationsresultaten) die g-Werte von Zügen, die sich vorwiegend in Schweizer Gebirgen bewegen eher hoch gehalten werden sollten um solare Gewinne zuzulassen. Bei «südlichem Klima» (Rom, Italien) sind tiefere g-Werte vorteilhafter. Das Einsparpotential liegt dabei bei ungefähr 5-13% der im Zug verwendeten Heiz- und Kühlenergie.</p> <p>Gleichzeitig beteuert der Artikel auch, dass durch eine Reduktion des U-Werts der Fenster (18-26%) und durch Wärmerückgewinnungsanlagen in Zügen (25-32%) grössere Effekte erzielt werden können als durch eine Veränderung des g-Werts.</p>		<i>Einsparpotenzial:</i> 5-13% der im Zug verwendeten Heiz- und Kühlenergie	
<i>Kommentar:</i>			

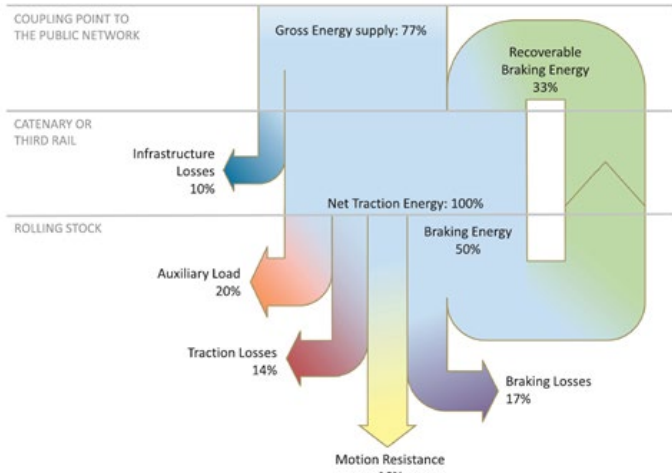
<i>Nummer:</i> 002		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input checked="" type="checkbox"/> internationale Studie: Österreich	
<i>Titel:</i> Energy optimal control of thermal comfort in trams			
<i>Autor(en):</i> Raphael N. Hofstadter, Jorge Amaya, Martin Kozek		<i>Institution:</i> TU Wien Universidad de Chile	<i>Publikationsjahr:</i> 2018
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input checked="" type="checkbox"/> Heizungssysteme <input checked="" type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input checked="" type="checkbox"/> Klimaanlage <input type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i>		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input checked="" type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> HLK-Anlage		<i>Funktion/Ziel:</i> Effiziente Steuerung	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Mit zwei, auf Model Predictive Control (MPC) basierenden Steuerungsmodellen, wird in dieser Studie versucht den Energiebedarf des HLK-Systems zu reduzieren. Das erste Modell zielt mit einer gleichzeitigen Steuerung von Heizung, Kühlung, Entfeuchtung und Lüftung, darauf ab, bei möglichst kleiner Leistung und möglichst kleiner Veränderung der Enthalpie, den Behaglichkeitsansprüchen der Fahrgäste gerecht zu werden. Das zweite Modell versucht zudem Entfeuchtung und elektrische Heizung zu umgehen, indem stattdessen alternierend gekühlt und gelüftet respektive gelüftet und geheizt wird. Beide Modelle wurden an einem Wiener Tram in einem Windkanal getestet. Dazu wurden Szenarien definiert in welchen die Sonneneinstrahlungen, die Temperaturverhältnisse und die Belegung variiert wurde. Die Versuche zeigten, dass es auch mit diesen effizienteren Steuerungsmodellen möglich ist den thermischen Behaglichkeitsanforderungen grösstenteils gerecht zu werden.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Model Predictive Control kann angewandt werden um den Energiebedarf für HLK-Anlagen in Trams zu senken. Da HLK-Anlagen in Trams ungefähr 30% des Energiebedarfs während der Fahrt ausmachen, kann sich diese Art der Steuerung durchaus lohnen.		<i>Einsparpotenzial:</i> Bis zu 32% des jährlichen Energiebedarfs der HLK-Anlage	
<i>Kommentar:</i> In einer weiteren Publikation zur selben Studie («EcoTram – Evaluierung von Energiesparmassnahmen bei Strassenbahnen unter realen Betriebsbedingungen», Richter G., Stuckl W. M.) wird spezifiziert, dass dieses Einsparpotential den Versuchen im Windkanal entspricht. Der Feldversuch auf den Wiener Schienen ergab, für die Praxis ein Einsparpotential von 13%. Den Unterschied begründet die Publikation in der, sich verändernden Belegung und den Türöffnungen.			

<i>Nummer:</i> 003		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input checked="" type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Energy efficiency of railway vehicles			
<i>Autor(en):</i> N. Vetterli, U.P. Menti, F. Sidler, E. Thaler, G. Zweifel		<i>Institution:</i> HSLU T&A	<i>Publikationsjahr:</i> 2015
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input checked="" type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i>		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> Alles – Hülle & HLK-Anlagen		<i>Funktion/Ziel:</i> Einsparpotentiale ermitteln	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Dieser Artikel untersucht anhand eines experimentell validierten IDA ICE Simulationsmodells das thermische Einsparpotential des EW II Wagens der Rhätischen Bahn. Die Verifizierung des Modells basiert auf einem Aufheiz-Versuch und einem Tracergas-Experiment. Im Aufheiz-Versuch wurde die Innenluft eines Wagens auf 40°C aufgeheizt und anschliessend die Auskühlung gemessen und analysiert um die aktive thermische Masse und den durchschnittlichen Wärmeübergangskoeffizienten zu ermitteln. Im Tracergas-Experiment wurde die Aussenluft rate ermittelt (also die Menge an Aussenluft, welche dem Wagen pro Zeiteinheit über die Lüftungsanlage zugeführt wird). In IDA ICE wurden anschliessend verschiedene Energiesparmassnahmen geprüft. Die zwei vielversprechendsten Massnahmen waren dabei eine Lüftung mit Wärmerückgewinnung und eine CO ₂ -Lenkung der Lüftung.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Eine CO ₂ -Lenkung der Lüftungsanlage kann zur thermischen Energieeinsparung in Zügen genauso viel beitragen wie der Einbau einer Wärmerückgewinnungseinheit.		<i>Einsparpotenzial:</i> Bis zu 29% des Energiebedarfs der HLK-Anlage (~6% des gesamten Energiebedarfs der Bahn)	
<i>Kommentar:</i>			

<i>Nummer:</i> 004		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input checked="" type="checkbox"/> internationale Studie: Österreich	
<i>Titel:</i> A modular thermal simulation tool for computing energy consumption of HVAC units in rail vehicles			
<i>Autor(en):</i> C. Dullinger, W. Stuckl, M. Kozek		<i>Institution:</i> Institute of Mechanics and Mechatronics, Siemens AG Österreich	<i>Publikationsjahr:</i> 2015
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i>		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input checked="" type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> HLK-Analge (Simulation)		<i>Funktion/Ziel:</i> Optimale Komponenten und Energiesparpotential ermitteln	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> In dieser Studie wurde ein thermisches Modell eines Schienenfahrzeugs erstellt, welches zur Berechnung des entsprechenden Energiebedarfs verwendet werden kann. Um anderen Personen die Möglichkeit zu geben dieses Modell auch auf andere Schienenfahrzeugmodelle anzuwenden, haben sich die Autoren entschieden zur Bedienung der Simulation ein GUI zu erstellen. Zur Parametrisierung des Modells sind in erster Linie thermische Eigenschaften des Fahrzeugs nötig, welche z.B. aus Windtunnel-Experimenten gewonnen werden können. Zudem müssen Angaben zur HLK-Anlage und Wetter-Daten für die simulierte Region zur Verfügung gestellt werden.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Das von den Autoren erstellte thermische Simulationstool für Schienenfahrzeuge erlaubt es verschiedene HLK-Anlagen-Konfigurationen in kürzester Zeit zu testen. Das Tool berechnet dabei den Energiebedarf von verschiedenen Komponenten der Anlage und gibt diese für einige «typische Tage» (nach stochastischem Clustering) wieder.		<i>Einsparpotenzial:</i> <i>Je nach Schienenfahrzeug und Anlagen-Komposition</i>	
<i>Kommentar:</i>			

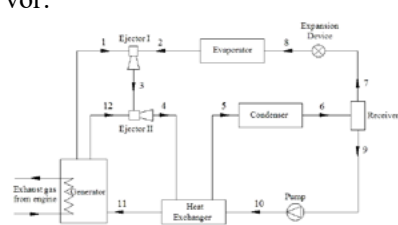
<i>Nummer:</i> 005		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input checked="" type="checkbox"/> internationale Studie: Österreich	
<i>Titel:</i> Energie-Verbrauchsanalyse und Einsparpotenziale bei Klimaanlage			
<i>Autor(en):</i> G. Haller und M. Kreitmayer		<i>Institution:</i> Rail Tech Arsenal, Wien	<i>Publikationsjahr:</i> 2007
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input checked="" type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> Lüftungsanlage		<i>Funktion/Ziel:</i> Frischluftmengenregelung	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Um die Effektivität von Energiesparmassnahmen zu prüfen richten sich die Autoren dieses Artikels vorwiegend nach der thermischen Behaglichkeit und den dazu bestehenden Normen im Bereich des Bahnverkehrs. Die Autoren definieren die thermische Behaglichkeit als einen Zustand in welchen «eine Person die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Luftbewegung und die Wärmestrahlung als optimal empfindet». Um diesem Zustand gerecht zu werden orientieren sich viele an den EN-Normen 13129-1, 14750-1 und 14813-1. Diese geben für verschiedenen Aussentemperaturintervalle Mindest-Frischlufmengen vor. Zudem geben die Normen Gesamt-Wärmedurchgangskoeffizienten vor, welche in den unterschiedlichen europäischen Klimazonen eingehalten werden sollen (Schweiz gehört zur Zone II). Auf der Basis von Standard-Test im Windkanal und typischen Kennlinien (z.B. für die Belegung), welche ebenfalls auf diesen EN-Normen basieren, wird im Artikel die typische Leistungskennlinie für einen Reisezugwagen berechnet. Davon ausgehend, werden die Effekte einer belegungsabhängigen Frischluftmenge und einer Abluftwärmerückgewinnung ermittelt.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Der Artikel ermittelt, dass mit einer belegungsabhängigen Frischluftmenge und einer Abluftwärmerückgewinnung der Jahresbedarf an elektrischer Energie eines Reisezugwagens deutlich reduziert werden kann.		<i>Einsparpotenzial:</i> Belegungsabhängige Frischluftmenge: 8.8% Abluftwärmerückgewinnung: 13.8% Beide kombiniert: 16.9%	
<i>Kommentar:</i> Die EN-Normen auf welche sich dieser Artikel bezieht, stammen aus den Jahren 2002-2006. Seither wurden einige der Normen aktualisiert.			

<i>Nummer:</i> 006		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input checked="" type="checkbox"/> internationale Studie: USA	
<i>Titel:</i> Energy Efficiency Assessment of Bay Area Rapid Transit (BART) Train Cars			
<i>Autor(en):</i> R. A. Sfeir, S. Chow, A. R. Ganji		<i>Institution:</i> BASE Energy, Inc.	<i>Publikationsjahr:</i> 2007
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i>		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> HLK-Anlage		<i>Funktion/Ziel:</i> Einsparpotentiale ermitteln	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Das Beratungsunternehmen BASE Energy, Inc. untersucht für die Bahn des urbanen Gebiets rund um San Francisco (BART) verschiedene Optionen zur Steigerung der Energieeffizienz. Das Rollmaterial der BART besteht (im Jahr 2007) aus 4 verschiedenen Kategorien von Bahnwagen (A, B, C1 & C2). Die Wagenkategorie C1 liegt den anderen 4 Kategorien zu Grunde. Die Wagen dieser Kategorie wurden zwischen den Jahren 1987 und 1989 erbaut. Die Wagenkategorie C2 unterscheidet sich von der Kategorie C1 lediglich darin, dass die Neonleuchten darin durch effizientere LED Leuchtstäbe ersetzt wurden. Die Wagenkategorien A und B wurden zwar vor den Wagen der Kategorie C1 erbaut, wurden aber zwischen 1998 und 2002 saniert und auf den Stand der C2-Wagen gebracht. Zudem wurden die DC-Motoren der Wagen durch Induktionsmotoren ersetzt und statt der bisherigen zwei HLK-Anlagen wurden sechs kleinere und effizientere HLK-Anlagen eingebaut.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> In Bezug auf die HLK-Anlage werden in diesem Bericht die folgenden drei Effizienzmassnahmen untersucht: - Direktkühlung durch Aussenluft (statt über Klimaanlage) - Ersatz der HLK-Anlage durch Anlagen mit höherem Wirkungsgrad - Zuluftbegrenzung (belegungsabhängig)			<i>Einsparpotenzial:</i> ~2.2% des jährlichen elektrischen Energiebedarfs
<i>Kommentar:</i> Zu den Effizienzmassnahmen im Bereich HLK werden auch Effizienzmassnahmen im Bereich Beleuchtung und Antriebsenergie untersucht. Das Energiespotential im Bereich HLK beträgt dabei nur ungefähr 5% des Potentials im Bereich Antriebsenergie. Die Baujahre sind im Artikel nicht angegeben, sondern stammen aus dem Wikipedia-Artikel zum Rollmaterial der BART. Das Rollmaterial der BART wurde seit 2007 um zwei weitere Wagenkategorie aufgestockt. Diese zwei Wagenkategorien sollen das bisherige Rollmaterial über die nächsten Jahre fortlaufend ersetzen.			
<i>Nummer:</i> 007		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input checked="" type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> A systems approach to reduce urban rail energy consumption			

<p><i>Autor(en):</i> González-Gil A., Palacin R., Batty, P., Powell J. P.</p>	<p><i>Institution:</i> NewRail – Centre for Railway Research, Newcastle University, UK</p>	<p><i>Publikationsjahr:</i> 2014</p>
<p><i>Themenbereich:</i></p> <p><input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile</p> <p><i>Sonstige:</i></p>	<p><i>Fahrzeugkategorie:</i></p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input checked="" type="checkbox"/> Tram</p> <p><i>Sonstige:</i></p>	
<p><i>Bauteil:</i> Review Paper</p>	<p><i>Funktion/Ziel:</i> Review Paper</p>	
<p><i>Kurzzusammenfassung:</i></p> <p>Der Energiebedarf von Schienenfahrzeugen hängt nicht nur von den einzelnen Komponenten, sondern auch sehr stark vom Zusammenspiel dieser Komponenten ab. Dieses Paper fokussiert sich weniger auf die einzelnen Subsysteme eines Schienenfahrzeuges, sondern auf die Abhängigkeiten von Energiesparmassnahmen im Fahrzeug.</p>		
<p><i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i></p> <p>Eine der zentralen Grafiken der Publikation ist die Aufteilung des Energiebedarfs eines Schienenfahrzeuges:</p>  <p>Fig. 3. Typical traction energy flow in urban rail systems.</p>		<p><i>Einsparpotenzial:</i></p> <p>Schätzungen des Energiesparpotentials:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Wärmepumpe - LEDs - Dämmung - HLK- und Lichtsteuerung im Betrieb - HLK- und Lichtsteuerung im Ruhemodus <p>Je 1-5% des Gesamtenergiebedarfs des Fahrzeugs.</p>
<p><i>Kommentar:</i></p>		

<i>Nummer:</i> 008		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input checked="" type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> A Numerical Model for Simulating Thermal Comfort Prediction in Public Transportation Buses			
<i>Autor(en):</i> Riachi, Youssef;		<i>Institution:</i> Department of Energy and Processes, Mines-Paristech, France	<i>Publikationsjahr:</i> 2014
<i>Themenbereich:</i> <input type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i> Behaglichkeit		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input type="checkbox"/> Bahn <input checked="" type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> Simulation		<i>Funktion/Ziel:</i> Desingprozess unterstützen	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Ein numerisches Simulationsmodell, das den thermischen Komfort in Bussen modelliert, wird in dieser Publikation präsentiert. Das Modell basiert auf einer CFD-Stömungssimulation im Fahrzeug-Inneren. Mehrere Dummies werden in das Modell gesetzt und die auf ihre Körper einwirkende Luftströmung, Lufttemperatur und Strahlungstemperatur simuliert. Daraus wird, aufbauend auf der Behaglichkeitstheorie von Fanger et al. die gefühlte Temperatur der Dummies ermittelt. Es werden drei verschiedenen Szenarien für die Lüftung berechnet und mit einander verglichen. Typ A: 2400 m ³ /h, Zuluft an 4 Stellen auf Kopfhöhe der Fahrgäste, Abluft über die Decke Typ B: 1400 m ³ /h, Zuluft an 5 Stellen in der Mitte des Fahrgastraumes, Abluft über die Decke Typ C: 1500 m ³ /h, Zuluft entlang der Fensterscheiben über die ganze Fahrzeuglänge, Abluft über die Decke			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Basierend auf den Luft- und Strahlungstemperaturen kann abgeleitet werden, dass die Simulation sich auf dem Sommerfall bezieht und das Fahrzeug von einer Seite beschienen ist. Die Lüftung vom Typ A scheint dabei die grösste Abkühlung zu bringen. Bei allen System liegt jedoch die gefühlte Temperatur mehrerer Fahrgäste ausserhalb der Behaglichkeitsgrenzen: Typ A: für 6/10 Fahrgäste behaglich Typ B: für 4/10 Fahrgäste behaglich Typ C: für 5/10 Fahrgäste behaglich			<i>Einsparpotenzial:</i> -
<i>Kommentar:</i>			

<i>Nummer:</i> 009		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input checked="" type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks			
<i>Autor(en):</i> Douglas H., Roberts C., Hillmansen, S., Schmid F.		<i>Institution:</i> School of Electronic, Electrical and Systems Engineering, University of Birmingham, UK	
<i>Publikationsjahr:</i> 2015			
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i> Traktion		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input checked="" type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> Vor allem Traktion		<i>Funktion/Ziel:</i> Review Paper	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Diese Publikation zeigt eine weite Badbreite an Energiesparmassnahmen auf, welche für Schienenfahrzeuge zur Verfügung stehen. Dabei beschränken sich die Autoren nicht auf die Komfortfunktionen, sondern beschreiben auch Massnahmen in den Bereichen Traktion und elektrisches Netz.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Eine der relevantesten Informationen ist, dass der Energiebedarf für Komfortfunktionen im Bereich 10-30% liegt. Dabei ist der Bedarf in im typischen Kurzstrecken-Zugverkehr tendenziell geringer (10-20%) und in unterirdischen Metronetzen höher (30%).		<i>Einsparpotenzial:</i> Dämmung: 1-5% Temperaturanpassung im Fahrgastraum: 1-7% CO2 gesteuerte Lüftung: 1-7% Effizientere HLK-Anlage: 1-5% Lichtsteuerung: 1-2% LEDs: 1-2% Schlummerbetrieb: 3-5% Jeweils in % des absoluten Energiebedarfs der Fahrzeugs.	
<i>Kommentar:</i> Diese Publikation ähnelt Publikation Nr. 007 sehr. Die Aufteilung Energie-Flowdiagramm ist in dieser Publikation sogar noch etwas detaillierter aufgeführt.			

<i>Nummer:</i> 010		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input checked="" type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Application of Two Stage Ejector Cooling System in a Bus			
<i>Autor(en):</i> Jaruwongwittaya T., Chen G.		<i>Institution:</i> Institute of Refrigeration and Cryogenics, National Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, China	<i>Publikationsjahr:</i> 2012
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i>		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input checked="" type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> Zwei-Stufen-Luftauswerfer-Kühlung		<i>Funktion/Ziel:</i> Thermodynamische Berechnung (COP)	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> <p>In diesem Paper wird ein 2-stufiges Auswerfer-Kühlsystem vorgestellt. Dies wird als Alternative zu Kompressionskälteanlagen in Bussen vorgeschlagen. Ein 2-stufiges Auswerfer-Kühlsystem funktioniert mit grösseren Temperaturgefällen (ca. 200K) als diese in Kompressionskälteanlagen üblich sind.</p> <p>Der Fokus liegt in dieser Publikation auf dem Vergleich verschiedener Kombinationen von Temperaturniveaus und dem daraus resultierenden COP der Anlage.</p>			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Die Publikation stellt die Funktionsweise eines 2-stufigen Auswerfer-Kühlsystems vor:			<i>Einsparpotenzial:</i>
 <p>Die Schlussfolgerung der Autoren ist, dass 2-stufige Auswerfer-Kühlsysteme für Busse eine geeignete Alternative zu Kompressionskälteanlagen.</p>			
<i>Kommentar:</i> Die Publikation ist in gewissen Teilen sprachlich schwer verständlich und weist wenige quantifizierte Resultate auf. Diese Publikation wurde also in erster Linie wegen der «Neuheit» der Massnahme als relevant angesehen.			

<i>Nummer:</i> 011		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input checked="" type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Bus for Urban Public Transport: Energy Performance Optimization			
<i>Autor(en):</i> De Lieto Vollaro R., Evangelisti L., Battista G., Gori P., Guattari C., Fanchiotti A.		<i>Institution:</i> Department of Engineering, Università degli Studi Roma Tre, Italy	<i>Publikationsjahr:</i> 2014
<i>Themenbereich:</i> <input type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input checked="" type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i>		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input type="checkbox"/> Bahn <input checked="" type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> Fenster, Dämmung		<i>Funktion/Ziel:</i> Evaluierung der Energieeffizienz anhand einer Simulation	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Der Fokus dieser Publikation liegt auf der Optimierung der thermischen Hülle eines Busses. Mithilfe der der Simulationssoftware TRNSYS warden vier verschiedene Hüllkonfigurationen (mit unterschiedlichen U-Werten) und vier verschiedene Verglasungsoptionen (unterschiedliche U- und g-Werte) untereinander verglichen. <i>Verglasung:</i> Typ – U-Wert [W/m ² K] – g-Wert <i>Option 1:</i> Einfache Verglasung – 5.68 – 0.855 <i>Option 2:</i> Zweifache Verglasung – 2.83 – 0.755 <i>Option 3:</i> Floatglas – 5.16 – 0.682 <i>Option 4:</i> Zweifache Verglasung – 0.98 – 0.440 <i>Opake Hülle:</i> Dämmmaterialdicke[mm] – U-Wert [W/m ² K] <i>Option 1(Standard-Wand):</i> 0 – 2.739 <i>Option 2:</i> 10 – 1.476 <i>Option 3:</i> 20 – 0.899 <i>Option 4:</i> 30 – 0.646			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Die Wand mit dem höchsten Wärmeübertragungskoeffizienten (Option 1) schneidet in der Publikation am besten ab. Die Wand mit dem grössten U-Wert (Option 4) schneidet mit einem fast 7% höheren thermischen Energiebedarf deutlich schlechter ab. Wichtig anzumerken ist, dass dieser Energiebedarf für den Sommerfall (vermutlich in Rom) berechnet wird. Es ist also davon auszugehen, dass die solaren Gewinne den konduktiven Wärmetransport also deutlich überschreiten. Die Resultate zur optimalen Verglasung lassen auf ähnliches schliessen: Die Verglasung mit dem tiefsten g-Wert (Option 4) resultiert in einem 6% tieferen thermischen Energiebedarf als Option 1 mit dem höchsten Energiedurchlassgrad.		<i>Einsparpotenzial:</i> Effekt Verglasung: Bis zu 9% des thermischen Energiebedarfs Effekt opake Hülle: Bis zu 7% des thermischen Energiebedarfs	
<i>Kommentar:</i> Die angegeben Temperaturprofile scheinen Fehler aufzuweisen. Die Resultate aus dieser Publikation sind also mit etwas Vorsicht zu lesen.			

<i>Nummer:</i> 012		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input checked="" type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Improving efficiency of traction energy use			
<i>Autor(en):</i> Peckham C.		<i>Institution:</i> Rail Safety and Standards Board, UK	<i>Publikationsjahr:</i> 2007
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input checked="" type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i> Traktion		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input checked="" type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> Vor allem Traktion		<i>Funktion/Ziel:</i> Identifizierung von Einsparpotentialen	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Diese Studie gibt sehr viele quantifizierte Informationen zum Potential verschiedenster Energiesparmassnahmen im Schienenverkehr ab. Diese Evaluierungen von Kosten- und Emissionseinsparungen beziehen sich alle auf das GB-Rail Netzwerk und basieren auf den folgenden Grundlagen: <ul style="list-style-type: none"> • Zusammentragungen aus anderen Arbeiten, die im Bereich der Energieeffizienz von Schienenfahrzeugen durchgeführt wurden; • Nutzung der Erfahrung des Projektteams, um andere Methoden zur energetischen Verbesserung vorzuschlagen; • Berechnungen, um (sofern ausreichende Daten vorhanden sind) die Größenordnung des Nutzens und der Kosten der Implementierung von Energieeffizienzmassnahmen abzuschätzen; • Beiträge von Interessensgruppen durch individuelle Treffen und branchenübergreifende Workshops. 			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> In der Studie werden Einsparpotentiale für mehrere Massnahmen präsentiert: - Heizung/Kühlung reduzieren (d.h. Kombination aller unten genannten Massnahmen): 115 GWh elektrisch/Jahr 18.5 MI Diesel/Jahr = 189 GWh Diesel/Jahr Sparpotential von 13.2 M£/Jahr = 2425 CHF/Wagen*Jahr - Luftdichtheit verbessern: 24 GWh elektrisch/Jahr 3.8 MI Diesel/Jahr = 39 GWh Diesel/Jahr Sparpotential von 2.7 M£/Jahr = 496 CHF/Wagen*Jahr Investitionskosten von 3k£ pro Wagen = 7.2kCHF pro Wagen - Dämmung verbessern: 41 GWh elektrisch/Jahr 6.6 MI Diesel/Jahr = 68 GWh Diesel/Jahr Sparpotential von 4.7 M£/Jahr = 863 CHF/Wagen*Jahr Investitionskosten von 10-20k£ pro Wagen = 24-48kCHF pro Wagen - Solare Gewinne (der opaken Hülle) reduzieren:		<i>Einsparpotenzial:</i> Umgerechnet auf die Energie für HLK und Beleuchtung («Auxiliary») ergibt dies: Luftdichtheit: 6.8% Dämmung: 11.8% Solare Gewinne (opake Hülle): 0.3% Temperaturanpassung im Innenraum:	

<p>1 GWh elektrisch 0.2 MI Diesel = 2 GWh Diesel Sparpotential von 0.1 M£ = 18 CHF/Wagen*Jahr Investitionskosten von 2k£ pro Wagen = 4.8kCHF pro Wagen</p> <p>- Temperaturanpassung im Innenraum: 8 GWh elektrisch/Jahr 1.3 MI Diesel/Jahr = 13 GWh Diesel/Jahr Sparpotential von 0.9 M£/Jahr = 165 CHF/Wagen*Jahr</p> <p>- CO₂-gesteuerte Lüftung: 41 GWh elektrisch/Jahr 6.5 MI Diesel/Jahr = 67 GWh Diesel/Jahr Sparpotential von 4.7 M£/Jahr = 864 CHF/Wagen*Jahr Investitionskosten von 5-7k£ pro Wagen = 12-16.8kCHF pro Wagen</p>	<p>2.3%</p> <p>CO₂-gesteuerte Lüftung: 11.7%</p>
<p><i>Kommentar:</i> Die Einsparpotentiale und Kosten werden anhand der Angaben auf der letzten Seite der Studie umgerechnet:</p> <p>Energiebedarf elektrisch Total – 2900 GWh für Auxiliaries – 692 GWh ~24%</p> <p>Energiebedarf Diesel Total – 7400 GWh für Auxiliaries – 235 GWh ~ 3.2% (97.68 l Diesel -> 1 MWh)</p> <p>In Kapitel 6 des Berichts wird erläutert, dass die 2900 GWh für den Betrieb der elektrischen Fahrzeuge Netzverluste nicht mit einberechnet. Zählt man diese mit, so liegt der Energiebedarf für elektrische Fahrzeuge bei 7500 GWh... also vergleichbar mit der Dieselfahrzeugflotte. Der Unterschied zwischen der «Auxiliary Energy» von elektrischen und Dieselfahrzeugen ist vermutlich einerseits auf diesen Unterschied in der Gewinnung der Endenergie zurückzuführen und rührt andererseits vermutlich daher, dass die Verbrennungsabwärme bei Dieselfahrzeugen direkt genutzt werden kann und die thermische Energie nicht separat erzeugt werden muss.</p> <p>13062 Fahrgastwägen in der gesamten Flotte.</p> <p>Zur Umrechnung der Investitionskosten wurde der Wechselkurs für das Jahr 2007 verwendet: 1£ =2.4CHF</p>	

<i>Nummer:</i> 013		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input checked="" type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Quick Wins - Reducing energy consumption in public transport			
<i>Autor(en):</i> Tackoen X.		<i>Institution:</i> TICKET TO KYOTO	<i>Publikationsjahr:</i> 2013
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i> Traktion		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> Vor allem Traktion		<i>Funktion/Ziel:</i> Identifizierung von Einsparpotentialen	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Im Ticket to Kyoto Projekt haben sich fünf europäische Transportunternehmen zusammengetan um sogenannte "Quick Wins", also CO2-Reduktionsmassnahmen welche einfach und ohne grosse Investitionskosten umsetzbar sind, in Teilen ihrer Fahrzeugflotte zu implementieren und Ihre Erkenntnisse auszutauschen. Diese 5 Unternehmen sind: <ul style="list-style-type: none"> - moBiel, Bielefeld, Germany; - RATP, Paris, France; - RET, Rotterdam, Netherlands; - STIB (Project Lead), Brussels, Belgium; - TfGM, Manchester, United Kingdom. 			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Eine der, in der Publikation vorgestellten, Massnahmen ist die Anpassung des Temperatur-Setpoints in Schienenfahrzeugen. Sowohl RATP als auch STIB haben diese Massnahme in ihren Regionalzügen getestet. RATP gibt an, dass durch diese Massnahme ca. 2400€ (2950CHF mit Wechselkurs von 1.226€/1CHF in 2013) an Energiekosten pro Jahr eingespart werden können und dass damit die Investitionskosten bereits in weniger als einem Jahr wieder zurückgewonnen werden.		<i>Einsparpotenzial:</i> Abhängig vom Fahrzeug 6-32% des Heizenergiebedarfs (für eine Absenkung des Setpoints von 18°C auf 15°C)	
<i>Kommentar:</i>			

<i>Nummer:</i> 014		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Thermische Behaglichkeit in Schienenfahrzeugen			
<i>Autor(en):</i> Haller G.		<i>Institution:</i> RTA Rail-Tec	<i>Publikationsjahr:</i> 2006
<i>Themenbereich:</i> <input type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i> Behaglichkeit		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input checked="" type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> HLK-Anlage		<i>Funktion/Ziel:</i> Behaglichkeitsbewertung	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Diese Publikation stellt die wichtigsten Informationen aus Normen rund um die thermische Behaglichkeit zusammen.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Der Autor schreibt abschliessend in seinem Artikel folgendes: «In Zukunft sollte auch dem Thema Energieeffizienz bei der Konzeption der Klimaanlage mehr Augenmerk geschenkt werden. Obwohl in den Normen einige energiesparende Massnahmen, z.B. Einschränkung der Frischluftmenge, vorgesehen sind, besteht in vielen Bereichen noch Verbesserungspotential. Zu den vielversprechendsten Ansätzen zählen unter anderem die Regelung der Frischluftmenge in Abhängigkeit von der CO ₂ -Konzentration oder die Abluftwärmerückgewinnung.»			<i>Einsparpotenzial:</i>
<i>Kommentar:</i> Der Autor gibt also keine direkten Angaben über die Effektivität einzelner Massnahmen sieht die erwähnten Massnahmen als etabliert genug an, um diese in Normen aufzunehmen.			

<i>Nummer:</i> 015		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input checked="" type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Energiesparen in Reisezugwagen			
<i>Autor(en):</i> Brunner C. U., Farner M., Gartner R., Huber H., Nipkow J.		<i>Institution:</i> Bundesamt für Energie	<i>Publikationsjahr:</i> 2000
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input checked="" type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i> Traktion		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> HLK-Anlage, Fenster, Beleuchtung		<i>Funktion/Ziel:</i> Identifizierung von Einsparpotentialen	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Diese Publikation gehört zu einer Reihe von Publikationen von Brunner et al. und wurde im Rahmen des ENPER Projekts erstellt. Das ENPER Projekt setzte sich in den späten 1990er Jahren bereits mit der Reduktion der thermischen Energie im Bahnbetrieb auseinander. Diese Studie präsentiert die Ergebnisse der Umsetzung der sogenannten «ENPER-Massnahmen» in einem Reisezugwagen Bpm 20-73 der SBB.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Zum ENPER-Massnahmenpaket gehören neben einigen Beleuchtungsoptimierungen die folgenden Massnahmen: <ul style="list-style-type: none"> • Wärmedämmung der Aussenhaut und der Lüftungskanäle. • Neues Glas (U-Wert effektiv 1,60 W/m² K, g-Wert effektiv 57 %) • Neue Energieversorgung (BUR), modular aus verfügbaren Komponenten aufgebaut. Eigenverbrauch (gemäss SBB) statt Ist 3,9 kW neu effektiv 1,1 kW (Leerlauf), höherer Wirkungsgrad im Betrieb. • Lüftung mit variablen Aussen- und Fortluftvolumenströmen mit Klappensteuerung, nicht Drehzahl-geregeltem Fortluftventilatormotor und CO₂-Sensor. • Kältemaschinen mit 2 Kompressoren ein/aus mit reduzierter Leistung • Raumlufttemperatur: Herabsetzung des Sollwertes im Heizbetrieb (22° C auf 21° C) resp. Erhöhung im Kühlbetrieb (+/- 1K minimal), sowie weitere regeltechnische Massnahmen in der Steuerung der Klimaanlage. • Leichtere Sitze (Sedile Julius 18 kg/Sitz). 		<i>Einsparpotenzial:</i> Mit diesen Massnahmen schaffte es das ENPER-Team für ca. 52k CHF pro Wagen den Energieverbrauch für Komfortfunktionen um ca. 55% auf 67MWh/a	
<i>Kommentar:</i> Diese Studienresultate sind ca. 20 Jahre alt und daher nur schwer auf heute zu übertragen. Aber das ENPER-Projekt bietet sicherlich einen guten Benchmark für den Vergleich mit neueren Massnahmen.			

<i>Nummer:</i> 016		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input checked="" type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Refit Rollmaterial – LION Modernisierung			
<i>Autor(en):</i> Hofer R.		<i>Institution:</i> SBB	<i>Publikationsjahr:</i> 2017
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i>		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> HLK-Anlage		<i>Funktion/Ziel:</i> Modernisierung Fahrzeugflotte	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Dieses Projekt hatte die Modernisierung der Zürcher S-Bahn Flotte zum Ziel. Dazu wurden verschiedene Energieeffizienzmassnahmen getestet und teilweise umgesetzt. Die Präsentation stellt dabei vor allem den Einsatz einer bivalenten Wärmepumpe in den Vordergrund.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Zu den umgesetzten Massnahmen gehören: <ul style="list-style-type: none"> - Stufenlose Kälteleistungsregulierung - Schlumberbetrieb - Belegungsabhängige Aussenluftvolumenstromregulierung - Wärmepumpenbetrieb Wobei, wie gesagt, vorwiegend die Resultate des Wärmepumpenbetriebs analysiert werden.		<i>Einsparpotenzial:</i> Auf die gesamte Flotte bezogen kann mit dem Einsatz einer bivalenten Wärmepumpe 2,5 GWh/Jahr eingespart werden. Die Einsparung eines einzelnen Wagens wird dabei nicht angegeben.	
<i>Kommentar:</i> Das einzige gefundene Dokument zu dieser Studie ist eine PowerPoint Präsentation. Viele Teile der Studie sind also sehr knapp beschrieben und daher ohne weiter Kommentare kaum nachvollziehbar.			

<i>Nummer:</i> 017		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input checked="" type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Machbarkeitsstudie Energieeffizienz FLIRT			
<i>Autor(en):</i> Dréwniok, Johannes; Kramer, Ueli; Tuchschnid, Matthias; Meyer, Markus; Lerjen, Markus		<i>Institution:</i> SBB, emkamatik GmbH, BAV	<i>Publikationsjahr:</i> 2017
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i>		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> HLK-Anlage		<i>Funktion/Ziel:</i> Energieeffizienz	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Dieser Bericht hängt eng mit einigen Berichten des BAVs zu den FLIRT Zügen zusammen. In diesem Bericht werden die wichtigsten Massnahmen nochmals zusammengefasst, welche emkamatik und Stadler Rail zur Umsetzung empfohlen wurden. Der grösste Bestandteil dieser Empfehlungen bezieht sich auf den Traktionsapparat der Züge, vereinzelte Massnahmen beziehen sich jedoch auch auf die Steuerung von HLK-Elementen.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Zu den empfohlenen Massnahmen gehören: <ul style="list-style-type: none"> - Eine schnellere Aktivierung des Schlumberbetriebes. Der Schlumberbetrieb setzte bis zu diesem Zeitpunkt bei der SBB 30 Minuten nach dem Abrüsten des Zuges ein (Führerstand nicht besetzt, Türen geschlossen, Licht im Fahrgastraum aus). Dieser soll nun also umgehend nach dem Abrüsten einsetzen. - Anpassungen an der HLK-Steuerung. Im Überfuhrbetrieb soll die HLK-Anlage neu wie im Schlumberbetrieb, statt wie im Fahrgastbetrieb betrieben werden. Der Überhitzungsschutz soll ausserdem von der Aussentemperatur abhängig gemacht werden. 		<i>Einsparpotenzial:</i> Frühere Aktivierung des Schlumberbetriebes: 7.7MWh/Fzg.*a i.e. 1% des Gesamtenergiebedarfs. Anpassung HLK-Steuerung: <i>keine Quantifizierung möglich</i>	
<i>Kommentar:</i> Die Autoren erwähnen, dass die Einsparpotentiale sehr stark von der Fahrzeugfamilie abhängen und daher nicht unbedingt auf einander übertragbar sind.			

<i>Nummer:</i> 018		<i>Kategorie:</i> <input type="checkbox"/> BAV (intern) <input checked="" type="checkbox"/> nationale Studie <input type="checkbox"/> internationale Studie: <i>Land angeben</i>	
<i>Titel:</i> Einschätzung der Energiesparwirkung "Schlummerbetrieb" für B2173			
<i>Autor(en):</i> Tuchs Schmid, Matthias; Dréwniok, Johannes		<i>Institution:</i> SBB	<i>Publikationsjahr:</i> 2017
<i>Themenbereich:</i> <input checked="" type="checkbox"/> HLK: <input type="checkbox"/> Heizungssysteme <input type="checkbox"/> Lüftungsanlagen <input type="checkbox"/> Klimaanlage <input type="checkbox"/> Fahrzeughülle: <input type="checkbox"/> transparente Bauteile <input type="checkbox"/> opake Bauteile <i>Sonstige:</i>		<i>Fahrzeugkategorie:</i> <input checked="" type="checkbox"/> Bahn <input type="checkbox"/> Bus <input type="checkbox"/> Tram <i>Sonstige:</i>	
<i>Bauteil:</i> HLK-Anlage		<i>Funktion/Ziel:</i> Schlummerbetrieb, Energieeffizienz	
<i>Kurzzusammenfassung:</i> Dieser Bericht schätzt das Energiesparpotential für die Einführung des Schlummerbetriebs einer Zugflotte der SBB ab. Im Bericht wird sehr prominent betont, dass die Verfügbarkeit von Zugvorheizanlagen für den Einsatz des Schlummerbetriebs eine zentrale Rolle spielt. In einer Zugvorheizanlage sind die Wagen auf den Abstellgleisen an eine Stromversorgung angeschlossen, die die Heizung des Wagens versorgt, sodass diese auf Betriebstemperatur gehalten werden. Neuere Zugvorheizanlagen erlauben es dem Nutzer bereits, eine Zeit für die Bereitstellung des Wagens anzugeben. In diesem Fall wird der Wagen nur minimal geheizt um den Frostschutz zu gewährleisten, bis die Bereitstellungszeit unmittelbar ansteht. Die Studie geht davon aus, dass ca. 50% der Wagen auf den Abstellgleisen an einer Zugvorheizanlage ohne Energieoptimierung angehängt sind. Die restlichen 50% hängen entweder an einer Anlage mit Energieoptimierung oder stehen auf Abstellgleisen ohne Zugvorheizanlage.			
<i>wichtigste Erkenntnisse/Massnahmen:</i> Das Potential des Schlummerbetriebs ist laut diesem Bericht sehr gross.		<i>Einsparpotenzial:</i> 19.1 MWh pro Wagen pro Jahr = 62% der Heizenergie Investitionskosten von 140'000 CHF für 80 Fahrzeuge → 1750 CHF/Wagen	
<i>Kommentar:</i> Ab dem Jahr 2021 will die SBB den Schlummerbetrieb für alle Fahrzeuge vom Typ B2173 eingeführt haben.			