



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESÖV 2050)

239 Energieeinsparung im Trambe- trieb bei verschiedenen Innenraum Temperatursollwerteinstellungen - Quantifizierung und Flottenerfahrun- gen

Schlussbericht

Geoffrey Klein, VBZ Verkehrsbetriebe Zürich

Luggwegstrasse 65 8048 Zürich, geoffrey.klein@vbz.ch, <https://www.stadt-zuerich.ch/vbz>

Fabio Inderbitzin, VBZ Verkehrsbetriebe Zürich

Luggwegstrasse 65 8048 Zürich, fabio.inderbitzin@vbz.ch, <https://www.stadt-zuerich.ch/vbz>

Maximilian Gödicke, VBZ Verkehrsbetriebe Zürich

Begleitgruppe

Prof. Dr. Ishan Pendharkar, Fachhochschule Nordwestschweiz
Patrick Meyer, Lucerne School of Engineering and Architecture
Dr. Stephan Husen, Eidgenössisches Departement UVEK, Bundesamt für Verkehr BAV

Impressum

Herausgeberin:
Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)
CH-3003 Bern

Programmleiter
Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: 239
Bezugsquelle
Kostenlos zu beziehen über das Internet
www.bav.admin.ch/energie2050

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

Zürich, den 03.01.2023

Inhalt

Inhalt.....	1
Executive Summary in Deutsch	2
Executive Summary en français.....	2
Executive Summary in Englisch	3
Zusammenfassung in Deutsch.....	4
Résumé en français	9
1. Ausgangslage.....	14
2. Ziel der Arbeit	14
3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand.....	15
4. Ergebnisse.....	24
5. Diskussion	31
6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	32
7. Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	33
8. Literaturverzeichnis	34
9. Anhang	35

Executive Summary in Deutsch

In diesem Projekt wurden drei Gruppen von VBZ Cobra-Trams mit drei unterschiedlichen Temperatursollwerteinstellungen konfiguriert (Heizsollwerteinstellung 20°C/18°C/16°C und dazugehörige Kühlstufen). Der Energieverbrauch für Heizung (direkte Messung) und Kühlung (indirekte Messung) wurde während einem Zeitraum von Februar 2021 bis März 2022 für diese drei Versuchsgruppen miteinander verglichen. Dies wurde gemacht um festzustellen, ob und wie stark sich die Temperatursollwerteinstellungen auf den Energieverbrauch und den Fahrgastkomfort im realen Betrieb auswirken.

Es wurde durch den Versuchsbetrieb nachgewiesen, dass durch eine Senkung des Heiztemperatursollwerts von 18°C auf 16°C (= 2°K Differenz) elektrische Energie von etwa 1.3 GWh pro Jahr für die gesamte Zürcher Cobra Tramflotte (88 Fahrzeuge) eingespart wird. Durch eine Senkung des Kühltemperatursollwerts um zwei fahrzeugspezifische Kühlstufen* könnte mit der gesamten Zürcher Cobra Tramflotte etwa 0.1 GWh pro Jahr eingespart werden. Eine Kundenbefragung, die mittels QR-Code Fensteraufklebern durchgeführt wurde, zeigte keine Hinweise die darauf hindeuten würden, dass die Fahrgäste die modifizierten Sollwerttemperaturen negativ aufgefasst hätten (Hinweis: eine direkte Befragung von Personen war aufgrund der Corona Massnahmen nicht erlaubt). Dies deutet darauf hin, dass diese Temperaturänderungen nicht nur Energie einsparen, sondern auch den Kundenkomfort nicht negativ beeinträchtigen.

Die oben genannten Ergebnisse sind aus mehreren Gründen wichtig. Erstens, die Änderung einer Temperatureinstellung ist eine der einfachsten und kostengünstigsten Methoden, um Energie zu sparen. Zweitens, es scheint zunächst offensichtlich, dass eine Änderung des Temperatursollwerts Energie einsparen kann, aber diese Studie belegt und quantifiziert dieses vermutete Energieeinsparungspotential anhand von realen Messungen und über einen längeren Zeitraum. Drittens, die Ergebnisse der (nicht repräsentativen-) Kundenbefragung geben keine Hinweise darüber, dass Fahrgäste eine kühlere Temperatur bis zu einem Wert von 16°C (niedrigster getesteter Wert) negativ bewerten würden. Und schliesslich sollte angesichts der drohenden Energiemangellage in Europa jede Methode zur Senkung des Energieverbrauchs mindestens erwogen werden.

Auf Grund dieser Ergebnisse und der sich abzeichnenden Energiemangellage empfehlen die Autoren, dass alle städtischen Verkehrsbetriebe der Schweiz die Temperatureinstellungen ihrer elektrisch angetriebenen Fahrzeuge in diesem Winter anpassen. Aus Klimaschutzgründen könnte das unter Umständen auch in anderen Jahren angezeigt sein. Die VBZ haben aus oben genannten Gründen im Winter 2022/2023 die neuen "aggressiv"-Temperatureinstellungen auf allen Cobra-Trams implementiert (16°C Sollwerttemperatur Heizen im Winter, 24°C Kühlstufe im Sommer).

*Das Cobra Tram erlaubt nur vorprogrammierte Kühlkurven mit wenig Freiheitsgraden, die keiner genauen Sollwerttemperatur folgen und einander relativ ähnlich sind.

Executive Summary en français

Dans ce projet, trois groupes de trams Cobra des VBZ ont été configurés avec trois réglages de température différents (20°C/18°C/16°C et niveaux de refroidissement correspondants). La consommation d'énergie pour le chauffage (mesure directe) et le refroidissement (mesure indirecte) a été comparée pour ces trois groupes d'essai pendant une période allant de février 2021 jusqu'en mars 2022. Ceci a été fait afin de déterminer si et dans quelle mesure les réglages de la température de consigne ont un impact sur la consommation d'énergie et le confort des passagers en situation réelle.

L'expérience menée sur la flotte de tramways Cobra a démontré qu'une réduction de la consigne de température de chauffage de 18°C à 16°C (= 2°K de différence) permettait d'économiser environ 1,3 GWh d'énergie électrique par an pour la flotte de tramways Zurich Cobra (88 véhicules). En diminuant la consigne de température de refroidissement de deux niveaux de refroidissement spécifiques du véhicule*, on pourrait économiser environ 0.1 GWh par an pour la flotte de tramways Cobra. Une enquête auprès des clients, réalisée à l'aide de QR codes collés sur les fenêtres, n'a pas mis en évidence de signes indiquant que les passagers auraient perçu négativement la modification de la température de consigne (remarque : une enquête directe auprès des personnes n'était pas autorisée en raison des mesures Corona). Cela suggère que ces modifications de température permettent non seulement d'économiser de l'énergie, mais qu'elles n'ont pas non plus d'impact négatif sur le confort des clients.

Les résultats mentionnés ci-dessus sont importants pour plusieurs raisons. Premièrement, la modification d'un réglage de température est l'une des méthodes les plus simples et la moins coûteuse pour économiser de l'énergie. Deuxièmement, il semble évident qu'une modification du point de consigne de la température permet d'économiser de l'énergie, mais cette étude prouve et quantifie ce potentiel d'éco-

nomie d'énergie à l'aide de mesures réelles et sur une assez longue période. Troisièmement, les résultats de l'enquête (non représentative) auprès des clients n'indiquent pas que les passagers évalueraient négativement une température plus fraîche jusqu'à une valeur de 16°C (valeur la plus basse testée). Enfin, compte tenu de la menace de pénurie d'énergie qui pèse sur l'Europe, toute méthode visant à réduire la consommation d'énergie devrait au moins être envisagée.

Sur la base de ces résultats et de la pénurie d'énergie qui s'annonce, les auteurs recommandent que toutes les entreprises de transports publics urbains de Suisse adaptent les réglages de température de leurs véhicules électriques cet hiver. Pour des raisons de protection du climat, cela pourrait également être conseillé dans des prochaines années. Pour les raisons susmentionnées, les VBZ ont mis en œuvre les nouveaux réglages de température "agressifs" sur tous les trams Cobra au cours de l'hiver 2022/2023 (16°C de température de consigne chauffage en hiver, 24°C de niveau de refroidissement en été).

*Le Cobra Tram ne permet que des courbes de refroidissement préprogrammées avec peu de degrés de liberté, qui ne suivent pas une température de consigne précise et qui sont relativement similaires entre elles.

Executive Summary in English

In this project, three groups of VBZ Cobra trams were configured with different HVAC (heating-ventilation-air conditioning) temperature setpoint values (for heating 20°C/18°C/16°C and for cooling three corresponding air-conditioning settings). The energy consumption for heating (directly measured) and cooling (indirectly measured) was compared during a period from Feb. 2021 to March 2022 for the three experimental groups. This was done to determine if and how much the different temperature setpoint values affect energy consumption and passenger comfort in real-world operations.

It was measured that by lowering the heating temperature setpoint from 18°C to 16°C (= 2°K difference), approximately 1.3 gigawatt hours can be saved per year for the Zurich Cobra tram fleet (88 vehicles), and that by increasing the temperature settings for air conditioning*, approximately 0.1 gigawatt hours per year could be saved for the fleet. A customer survey (using window stickers with QR code links - direct face-to-face questioning of passengers was not permitted due to Corona prevention measures) showed no evidence that customers had problems with lower temperature vehicles in winter and higher temperature vehicles in summer. This suggests that these temperature changes would not only save energy, but would also not lead to any impact on customer satisfaction.

These results are important for several reasons. First, changing a temperature setting is one of the simplest and least expensive methods to save energy. Second, it seems obvious, of course, that changing temperature settings would save energy, but this study calculated these presumed energy savings on a fleet of vehicles over a more than one year. Third, the results of the (non-representative) passenger survey give no indication that passengers were negatively affected by cooler temperature down to 16°C (lowest tested value). Finally, given the looming energy crisis in Europe, any method to reduce energy consumption should be considered.

Based on these results and the looming energy crisis, the authors recommend that all municipal transport operators in Switzerland modify the temperature settings on their electric vehicles this winter and that they maintain these changes in the future to reduce energy consumption. VBZ implemented the new "aggressive" temperature settings on all Cobra streetcars in winter 2022/2023 (16°C setpoint temperature heating in winter, 24°C cooling level in summer) for the reasons mentioned above.

*The Cobra Tram allows only pre-programmed cooling curves with few degrees of freedom, which do not follow an exact set point temperature and are relatively similar to each other.

Zusammenfassung in Deutsch

Ausgangslage

Es ist allgemein bekannt, dass die Heizung im Winter und die Klimaanlage im Sommer einen hohen Prozentsatz des Energieverbrauchs in öffentlichen Verkehrsmitteln ausmachen. Die Heizung und die Kühlung können zwischen einem Drittel und der Hälfte des gesamten Energieverbrauchs betragen [1] [4] [11] [17]. Daher wird oft vorgeschlagen, dass eine Reduzierung der Heizung oder der Klimaanlage zu Energieeinsparungen führen würde, und dies wird oft als "low hanging fruit" zur Verringerung des Energieverbrauchs und zur Senkung der CO₂-Emissionen empfohlen.

Dieses Einsparpotenzial wurde in verschiedenen Studien zu ÖPNV-Fahrzeugen quantifiziert, die ihre Ergebnisse sowohl aus theoretischen Berechnungen als auch aus der Installation von Messgeräten an einzelnen Testfahrzeug ableiten [5] [7] [17]. Dazu gehört auch eine zusammen mit den VBZ durchgeführte Masterarbeit, in der die Energieeinsparungen bei einer Heizungsreduktion berechnet (660 MWh pro °C und pro Jahr für die gesamte Cobra Tramflotte mit 88 Fahrzeugen [17]) und an einem Fahrzeug stichprobenweise gemessen wurde. Diese Arbeit hat die VBZ dazu bewogen in 2018, die Heiztemperatur ihrer Fahrzeuge von 20°C (ursprüngliche Einstellung) auf 18°C zu reduzieren. Gleichzeitig erhöhten die VBZ auch die Einstellungen der Kühltemperatur von 20°C auf 22°C.

Einige Punkte sind jedoch noch offen. Erstens konnten die Autoren keine Arbeit finden, die das Energieeinsparungspotenzial durch veränderte Temperatureinstellungen bei einer ÖPNV Tramflotte über einen längeren Zeitraum gemessen haben. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Durchführung dieser Messungen im Allgemeinen die Installation komplizierter Messgeräte erfordert, die nur schwer an einem Fahrzeug durchgeführt werden können, geschweige denn an einer Gruppe von Fahrzeugen, was für flottenweite Messungen erforderlich gewesen wäre. Zweitens ist nicht klar, ob diese Energieeinsparungen nur theoretischer Natur sind und in einem chaotischen Umfeld des öffentlichen Nahverkehrs nicht reproduzierbar sind, wo sich die Türen häufig öffnen und schliessen, Passagiere ein und aussteigen und die Fahrzeuge auf unterschiedlichen Routen unterwegs sind.

Glücklicherweise bestellten die VBZ eine neue Softwarefunktionalität für die Fahrzeugsteuerung, die eine automatische tägliche Energiemessung beinhaltet. Die Motivation für diese Softwaremodifikation war die Aufzeichnung der Traktionsenergie im Rahmen einer VBZ-Kampagne, mit der die VBZ-Fahrer zu einer energiebewussten Fahrweise angehalten werden sollen. Die Software zeichnet aber auch die Heizenergie und die HBU-Energie (Hilfsbetriebeumrichter-Energie) auf (die Kälteleistung kann anhand der HBU-Energie kalkuliert werden). Mit dieser neuen Software haben die VBZ die HLU-Energiemessungen automatisch und ohne zusätzliche Kosten täglich von jedem Fahrzeug erfasst.

Fragestellung

Mit diesem Hintergrund wurde diese Studie durchgeführt, um die folgende Hypothese zu prüfen: Durch die Reduzierung der eingestellten Temperaturen für Heizung und die Erhöhung der Temperatur für die Klimaanlage wird der Heiz- beziehungsweise Kühlenergieverbrauch gesenkt, ohne den Komfort der Fahrgäste spürbar zu beeinträchtigen.

Im Konkreten verfolgte die Studie die folgenden Ziele:

1. Quantifizierung der Energie, die die VBZ bereits durch die Absenkung der Fahrzeugheizungs-Solltemperatur von 20°C auf 18°C und die Anhebung der Kühlstufe von 20°C auf 22°C eingespart haben, um die berechneten Ergebnisse der Masterarbeit zu verifizieren.
2. Quantifizierung der zusätzlichen Energieeinsparungen, die die VBZ durch eine zusätzliche Absenkung der Heizungssollwerttemperatur von 18°C auf 16°C und eine Erhöhung der Kühlstufe von 22°C auf 24°C erzielen würden.
3. Ermittlung, wie sich die veränderten Temperaturen auf der Fahrgastbehaglichkeit auswirken.
4. Vergleich der tatsächlich gemessenen Fahrzeuginnenraumtemperatur der drei Gruppen untereinander.

Hinweis: Es ist wichtig, das Folgende über den eingestellten Kühltemperatursollwert und die Messung der Kühlleistung im Vergleich zum Heizungstemperatursollwert und der Heizleistung zu beachten:

1. Sollwerttemperatur: Es kann auf dem Fahrzeug sowohl für das Heizen als auch für das Kühlen eine separate Sollwerttemperatur eingestellt werden. Beim Heizen wird diese Sollwerttemperatur für praktisch jede relevante Aussentemperatur angestrebt. Beim Kühlen ist dies nicht so. Hier ist die Sollwerttemperatur eher als Kühlstufe zu verstehen, da sie sehr viel stärker von der Aussentemperatur abhängig sind und nicht zwingend auf den angezeigten Sollwert regelt. Die

Kühlstufen ähneln sich beim Cobra Fahrzeug ausserdem untereinander relativ stark, was in der Praxis weitaus weniger Spielraum für Modifikationen zulässt wie beim Heizen.

2. Messung der Heizenergie: Die Fahrzeugsteuerungssoftware misst die für die Heizung verbrauchte Energie, wobei die Energie jedes einzelnen Heizgerätes addiert wird. Bei der Klimaleistung wird lediglich die gesamte HBU-Energie aufgezeichnet. Diese HBU-Energie setzt sich zusammen aus allen Hilfsbetrieben, also inklusive *Klimatisierung*, aber auch inklusive Batterieladung, Beleuchtung, Motorkühlpumpen und Türen. Da die Leistung für die Letztgenannten in der Regel ganzjährig ungefähr konstant sind (die Kühlpumpensteuerung ist, zum Beispiel, nicht Temperatur abhängig), kann diese als konstanter Wert von der HBU-Energie abgezogen werden, um eine indirekte, aber nützliche Annäherung der Klimatisierungsenergie zu ermitteln.

Lösungsweg / Methode

Diese Studie wurde an 30 Fahrzeugen der 88 Fahrzeuge VBZ Cobra-Flotte durchgeführt. Diese Fahrzeuge wurden in drei Gruppen mit unterschiedlichen Temperatursollwerteinstellung unterteilt (siehe Tabelle 1).

Gruppe	Anzahl Fahrzeuge	Temperatursollwert Heizung	Kühlstufe Kühlung
Temperatursollwerteinstellung- Ursprünglich	10	20°C	20°C
Temperatursollwerteinstellung- Aktuell	10	18°C	22°C
Temperatursollwerteinstellung- Aggressiv	10	16°C	24°C

Tabelle 1: Messfahrzeuge und Temperatursollwerteinstellungen

Die Fahrzeugsteuerungssoftware zeichnet automatisch die für die verbrauchte Energie für Heizung (direkt) und Kühlung (indirekt) jeden Tag als Energiedatensatz auf. Diese Energiedatensätze werden in der Diagnosedatenbank gespeichert und zur Analyse hochgeladen.

Fahrgastbehaglichkeitsbefragung

Die Fahrgäste wurden während zweier Zeitblöcke (Winter 01.01.2022 – 28.02.2022 und Sommer 01.07.2022 – 31.08.2022) gebeten ihr Feedback abzugeben, indem sie einen QR-Code (siehe Abbildung 1) scannten, um ein Internet-Umfragetool aufzurufen.



Abbildung 1: QR Befragungskleber

Hinweis zur QR-Code-Umfrage: Die QR-Code-Befragung ist eine Ausweichmethode, um das Feedback der Fahrgäste ermitteln. Ursprünglich waren persönliche Befragungen geplant, aber sämtliche persönlichen Kundeninteraktionen waren wegen den Corona Massnahmen bei den VBZ nicht erlaubt (Schutz für Personal und Fahrgäste).

Wichtige Zeiträume des Projekts:

- 30.01.21 – 31.08.22: 30 ausgewählte Cobra Trams fahren mit den im Projekt beschriebenen Temperatureinstellungen.
- 01.02.21 – 31.03.22: Dieser Zeitraum wurde für die Auswertung des Energieverbrauchs benutzt. Innerhalb von diesem Zeitraum galt das "alle-Türen-auf" Corona-Massnahmenkonzept.
- 01.01.22 – 28.02.22: Dieser Zeitraum wurde für die Kontrolle/Messung der tatsächlichen Temperatur und für die Fahrgastumfrage mit QR-Code im Winter benutzt.
- 01.07.22 – 31.08.22: Dieser Zeitraum wurde für die Kontrolle/Messung der tatsächlichen Temperatur und für die Fahrgastumfrage mit QR-Code im Sommer benutzt.

Wichtigste Resultate

In der Studie wurde der Energieverbrauch für Heizung und Kühlung (indirekt) während des Untersuchungszeitraums quantifiziert. Anhand dieser Messungen werden die Energieeinsparungen für die gesamte Flotte geschätzt und hochgerechnet.

Abbildung 2 zeigt die durchschnittliche Heizleistung innerhalb eines Tages (y-Achse) abhängig von der durchschnittlichen Tagesaussentemperatur (x-Achse). Eine visuelle Inspektion des Diagramms zeigt, dass unter 16°C Aussentemperatur ist die durchschnittliche Heizleistung umso geringer ausfällt, je kälter die Temperatursollwert auf dem Fahrzeug eingestellt ist. Abbildung 3 zeigt die durchschnittlichen Kühlleistung innerhalb eines Tages (y-Achse) im Vergleich zur durchschnittlichen Tagesaussentemperatur (x-Achse). Eine visuelle Inspektion des Diagramms zeigt, dass erst wenn die Tagesdurchschnittstemperatur über 24°C steigt, ein Unterschied der Kühlleistung zwischen den Temperatursollwerteinstellungsgruppen (= "Kühlstufen") zu erkennen ist.

Tabelle 2 zeigt die Jahresenergieeinsparungen, die durch die Senkung der Heizungstemperatursollwert für ein Fahrzeug sowie für die ganze Cobra-Flotte (88 Fz.) erzielt werden können, basierend auf den in dieser Studie durchgeführten Messungen über ein Jahr. Als Plausibilitätscheck ist ausserdem das Ergebnis aus der früheren VBZ Masterarbeit eingetragen, wo der Wert theoretisch berechnet und mit einer Stichprobe überprüft wurde. Tabelle 3 zeigt die Einsparungen, die durch eine Erhöhung der Klimatisierungstemperatursollwert (= "Kühlstufe") erzielt werden können, ebenfalls basierend auf den in dieser Studie durchgeführten Messungen über ein Jahr. Der Grund dafür, dass mit der Reduktion der Heizung mehr Energie eingespart wird als mit der Erhöhung der Klimaanlage, liegt vermutlich in der oben erwähnten Tatsache, dass die Einstellung der Klimaanlage im Gegensatz zur Heizungseinstellung eine "Stufe" und nicht direkt eine Temperatur ist. Der Unterschied zwischen diesen Kühlstufen ist verhältnismässig gering und hat dementsprechend tendenziell auch weniger Einfluss auf die Innenraumtemperatur.

	Senkung der Temperatursollwerteinstellungen Heizung		
	2°C 20°C → 18°C	2°C 18°C → 16°C	4°C 20°C → 16°C
Jahresenergieeinsparungen: 1 Tram	11.4 MWh	14.4 MWh	25.8 MWh
Jahresenergieeinsparungen: Cobra-Flotte (88 Fz.)	1.0 GWh	1.3 GWh	2.3 GWh
Frühere Berechnungen aus der VBZ Masterarbeit [17] ("Plausibilitätscheck")	1.32 GWh	1.32 GWh	2.64 GWh

Tabelle 2: Energieersparungen – Heizung

	Erhöhung der Temperatursollwerteinstellungen Kühlung		
	2°C 20°C → 22°C	2°C 22°C → 24°C	4°C 20°C → 24°C
Jahresenergieeinsparungen: 1 Tram	0.6 MWh	1.0 MWh	1.6 MWh
Jahresenergieeinsparungen: 88 Tram Cobra-Flotte	70 MWh	117 MWh	187 MWh

Tabelle 3: Energieersparungen - Klimatisierung

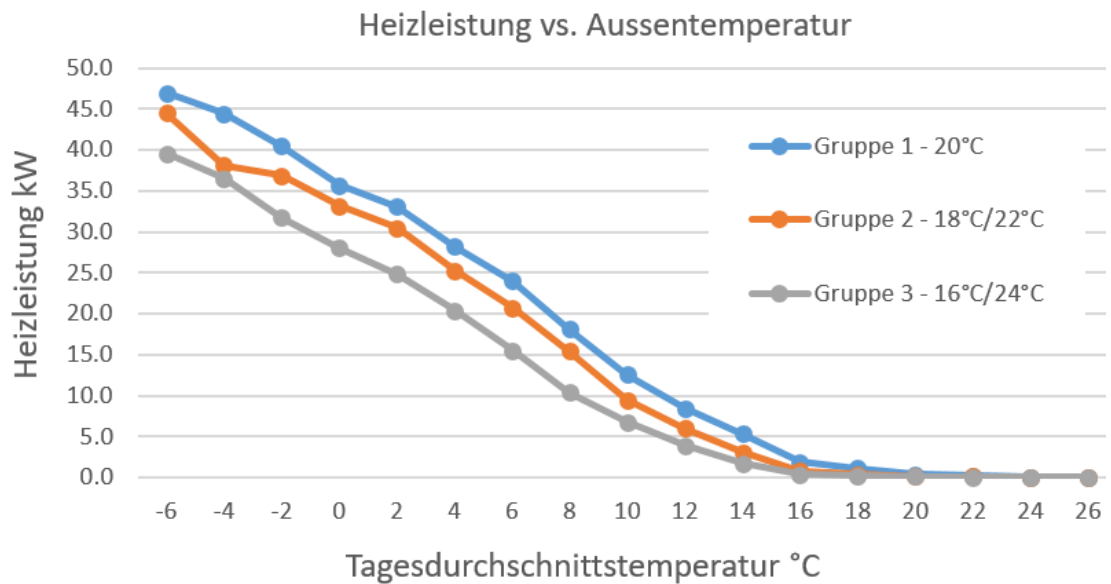


Abbildung 2: Direkt gemessener Heizenergieverbrauch

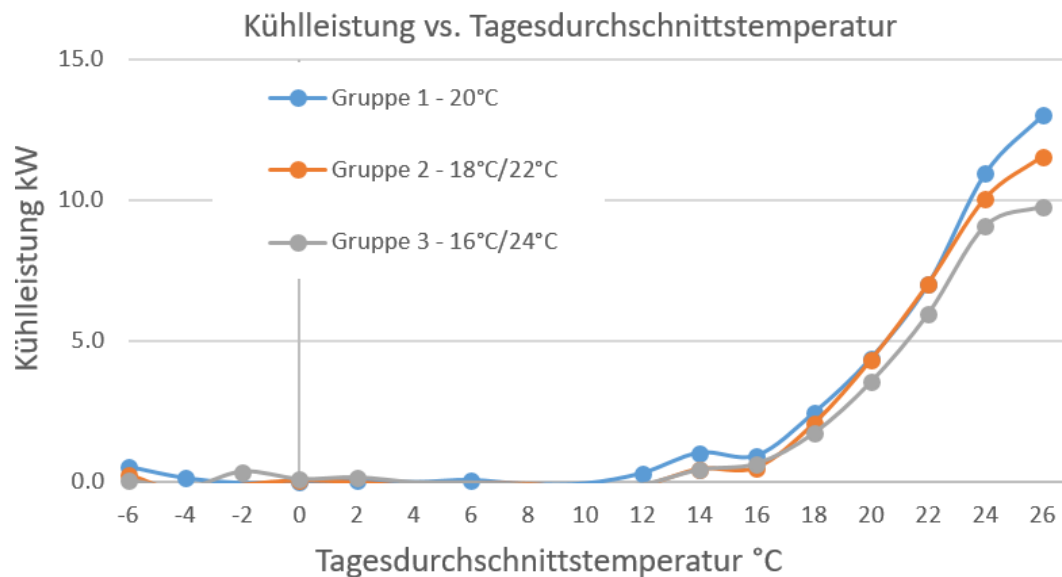


Abbildung 3: Indirekt gemessener Energieverbrauch Klimaanlage

Die Ergebnisse der Fahrgastbehaglichkeitsbefragungen sind in Tabelle 4 (Winter 2022) und Tabelle 5 (Sommer 2022) zu sehen. Die durchgeführte QR-Codebefragung ist nicht repräsentativ. Aus diesem Grund wird auf eine detaillierte Analyse verzichtet. Die wichtigste Schlussfolgerung ist, dass aus diesen Daten nichts darauf hindeutet, dass die Fahrgäste ein Problem mit den angepassten Energieeinstellungen gehabt hätten.

Winter 2022 1.1.2022 - 28.2.2022			
Anzahl Teilnehmer	Gruppe 1 - 20°C	Gruppe 2 - 18°C	Gruppe 3 - 16°C
	193	138	127
Wie empfinden Sie heute die Temperatur in diesem Tram auf dieser Fahrt?			
Zu warm	27.98%	21.70%	11.81%
Angenehm	59.59%	63.00%	65.35%
Zu kalt	12.44%	15.20%	22.83%

Tabelle 4: Kundenfeedback Winter

Sommer 2022 1.7.2022 - 31.8.2022			
Anzahl Teilnehmer	Gruppe 1 - 20°C	Gruppe 2 - 22°C	Gruppe 3 - 24°C
	230	160	178
Wie empfinden Sie heute die Temperatur in diesem Tram auf dieser Fahrt?			
Zu warm	27.83%	29.38%	35.39%
Angenehm	56.09%	58.13%	58.43%
Zu kalt	16.09%	12.50%	6.18%

Tabelle 5: Kundenfeedback Sommer

Die VBZ haben infolge des Projekt und in Erwartung der angespannten Stromlage im Winter 2022/2023 die neuen "aggressiv"-Temperatureinstellungen auf allen Cobra-Trams implementiert (16°C Sollwerttemperatur Heizen im Winter, 24°C Kühlstufe im Sommer). Diese Entscheidung wurde auch durch die Ergebnisse der Studie unterstützt, die eine Berechnung lieferte, wie viel Energie die VBZ durch diese Änderungen einsparen werden.

Résumé en français

Situation initiale

Il est de notoriété publique que le chauffage en hiver et la climatisation en été représentent un pourcentage élevé de la consommation d'énergie dans les transports publics. Le chauffage et la climatisation peuvent représenter entre un tiers et la moitié de la consommation totale d'énergie ([1], [4], [11], [17]). C'est pourquoi il est souvent suggéré que la réduction du chauffage ou de la climatisation permettrait de réaliser des économies d'énergie, et cela est souvent recommandé comme "low hanging fruit" pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂.

Ce potentiel d'économies a été quantifié dans différentes études sur les véhicules de transport public ([5], [7], [17]), qui tirent leurs résultats à la fois de calculs théoriques et de l'installation d'appareils de mesure sur des véhicules d'essai individuels. Parmi ces études figure un travail de master réalisé en collaboration avec les VBZ, dans lequel les économies d'énergie liées à une réduction du chauffage ont été calculées (660 MWh par °C et par année pour l'ensemble de la flotte de tramways Cobra, soit 88 véhicules [17]) et mesurées par échantillonnage sur un véhicule. Ce travail a incité les VBZ à réduire la température de chauffage de leurs véhicules de 20°C (réglage initial) à 18°C en 2018. Dans le même temps, les VBZ ont également augmenté les réglages de la température de climatisation de 20°C à 22°C.

Certains points restent toutefois en suspens. Tout d'abord, les auteurs n'ont pas trouvé de travaux quantifiant le potentiel d'économie d'énergie lié à la modification des réglages de température d'une flotte de véhicules de transport public sur une longue période. L'une des raisons pourrait être que la réalisation de ces mesures nécessite généralement l'installation d'un équipement de mesure compliqué, difficile à mettre en place sur un véhicule, et encore plus sur un groupe de véhicules, ce qui aurait été nécessaire pour des mesures à l'échelle de la flotte. Deuxièmement, il n'est pas clair si ces économies d'énergie ne sont que théoriques et ne sont par conséquent pas reproductibles dans un environnement chaotique de transport public, où les portes s'ouvrent et se ferment fréquemment, où les passagers montent et descendent et où les véhicules suivent des itinéraires différents.

Heureusement, les VBZ ont commandé une nouvelle fonctionnalité logicielle pour la commande des véhicules, qui comprend une mesure quotidienne automatique de l'énergie. Cette modification du logiciel a été initialement prévue pour l'enregistrement des données sur l'énergie de traction dans le cadre d'une campagne des VBZ visant à inciter les conducteurs des VBZ à adopter un mode de conduite économe en énergie. Cependant le logiciel enregistre également l'énergie de chauffage et l'énergie du convertisseur auxiliaire (la puissance frigorifique peut être calculée sur la base de l'énergie du convertisseur auxiliaire). Grâce à cette nouvelle fonctionnalité, les VBZ ont pu enregistrer automatiquement et quotidiennement les dépenses d'énergie CVC (chauffage-ventilation-conditionnement d'air) de chaque véhicule, sans frais supplémentaires.

Problématique

C'est dans ce contexte que cette étude a été menée et ce afin de vérifier l'hypothèse suivante : La réduction des températures de chauffage et l'augmentation de la température de climatisation permettent de réduire la consommation d'énergie de chauffage et de climatisation sans affecter sensiblement le confort des passagers.

Concrètement, l'étude visait les objectifs suivants :

1. quantifier l'énergie que les VBZ ont déjà économisée en abaissant la température de consigne du chauffage des véhicules de 20°C à 18°C et en augmentant la valeur de consigne de refroidissement de 20°C à 22°C, afin de vérifier les résultats calculés du travail de master.
2. quantifier les économies d'énergie supplémentaires que les VBZ réaliseraient en abaissant encore la température de consigne du chauffage de 18°C à 16°C et en augmentant la valeur de consigne de refroidissement de 22°C à 24°C.
3. déterminer l'impact de ces changements de température sur le confort des passagers.
4. comparaison de la température intérieure du véhicule réellement mesurée par les trois groupes entre eux.

Remarque : il est important de noter ce qui suit concernant la consigne de température de refroidissement et la mesure de la puissance de refroidissement par rapport à la consigne de température de chauffage et à la puissance de chauffage :

1. Réglage de Température : il est possible de régler une température de consigne séparée sur le véhicule, tant pour le chauffage que pour le refroidissement. Pour le chauffage, cette température de consigne est visée pour pratiquement toutes les températures extérieures pertinentes. Ce n'est pas le cas pour le refroidissement. Ici, la température de consigne doit plutôt être considérée comme un niveau de refroidissement, car elle dépend beaucoup plus de la température extérieure et ne se règle pas obligatoirement sur la valeur de consigne affichée. Sur le véhicule Cobra, les niveaux de refroidissement se ressemblent assez fortement entre eux, ce qui laisse en pratique beaucoup moins de marge de manœuvre pour des modifications que pour le chauffage.
2. Mesure de l'énergie de chauffage : le logiciel de commande du véhicule mesure l'énergie consommée pour le chauffage, en additionnant l'énergie de chaque appareil de chauffage. Pour la performance climatique, seule l'énergie totale HBU est enregistrée. Cette énergie HBU se compose de tous les services auxiliaires, donc y compris la climatisation, mais aussi la charge de la batterie, l'éclairage, les pompes de refroidissement du moteur et les portes. Comme la puissance de ces dernières est généralement à peu près constante tout au long de l'année (la commande des pompes de refroidissement, par exemple, ne dépend pas de la température), elle peut être déduite de l'énergie HBU en tant que valeur constante afin d'obtenir une approximation indirecte, mais utile, de l'énergie de climatisation.

Méthode de résolution

Cette étude a été réalisée sur 30 véhicules de la flotte de 88 VBZ Cobra. Ces véhicules ont été divisés en trois groupes avec des réglages de consigne de température différents (voir tableau 6).

Groupe	Nombre de véhicules	Consigne de température Chauffage	Consigne de température Climatisation
Précédemment (initialement)	10	20°C	20°C
Actuel	10	18°C	22°C
Agressif	10	16°C	24°C

Table 6: Véhicules et réglages

Le logiciel de gestion du véhicule enregistre chaque jour automatiquement l'énergie consommée pour le chauffage (direct) et pour la climatisation (indirect) sous forme d'un ensemble de données énergétiques. Ces données énergétiques sont stockées dans la base de données de diagnostic et téléchargées pour analyse.

Enquête sur le confort des passagers

Pendant deux blocs de temps (hiver 01.01.2022 - 28.02.2022 et été 01.07.2022 - 31.08.2022), les passagers ont été invités à donner leur avis en scannant un code QR (voir illustration 4) pour accéder à un outil d'enquête sur Internet.



Illustration 4: QR autocollant d'enquête

Remarque concernant l'enquête par code QR: l'enquête par code QR est une méthode de substitution pour obtenir le feedback des voyageurs. A l'origine, des enquêtes personnelles étaient prévues, mais toutes les interactions personnelles avec les clients étaient interdites en raison des mesures Corona chez VBZ, par protection du personnel et des passagers.

Périodes importantes du projet :

- 30.01.21 - 31.08.22 : 30 tramways Cobra sélectionnés roulent avec les réglages de température décrits dans le projet.
- 01.02.21 - 31.03.22 : cette période a été utilisée pour l'évaluation de la consommation d'énergie. Durant cette période, le concept de mesures Corona "toutes portes ouvertes" a été appliqué.
- 01.01.22 - 28.02.22 : Cette période a été utilisée pour le contrôle/la mesure de la température réelle et pour l'enquête auprès des passagers avec le code QR en hiver.
- 01.07.22 - 31.08.22 : Cette période a été utilisée pour le contrôle/la mesure de la température réelle et pour l'enquête auprès des passagers avec le code QR en été.

Principaux résultats

L'étude a quantifié la consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement (indirect) pendant la période d'étude. Sur la base de ces mesures, les économies d'énergie sont estimées pour l'ensemble de la flotte.

L'illustration 2 montre la puissance moyenne de chauffage en fonction de la température moyenne journalière. Une inspection visuelle du graphique montre qu'en dessous de 16°C, la puissance de chauffage moyenne est d'autant plus faible que la consigne de température est faible. L'illustration 3 montre la puissance de refroidissement moyenne en fonction de la température quotidienne moyenne. Une inspection visuelle du graphique montre que ce n'est que lorsque la température moyenne journalière dépasse 24°C que l'on observe une différence de puissance de refroidissement entre les groupes de réglage du point de consigne de température.

Le tableau 2 montre les économies d'énergie annuelles qui pourraient être réalisées en réduisant la consigne de température de chauffage pour un véhicule et pour la flotte de 88 tramways Cobra et le résultat du travail de master de VBZ. Le tableau 3 montre les économies qui pourraient être réalisées en augmentant la valeur de consigne de la température de climatisation. La raison pour laquelle la réduction du chauffage permet d'économiser plus d'énergie que la réduction de la climatisation est probablement due au fait, mentionné ci-dessus, que le réglage de la climatisation est un "niveau" et non une consigne de température, contrairement au réglage du chauffage. La différence entre ces niveaux de refroidissement est minime.

	Abaissement des réglages de la consigne de température		
	Chauffage		
	2°C 20°C → 18°C	2°C 18°C → 16°C	4°C 20°C → 16°C
Économies d'énergie annuelles: 1 Tram	11.4 MWh	14.4 MWh	25.8 MWh
Économies d'énergie annuelles: 88 Tram Cobra-Flotte	1.0 GWh	1.3 GWh	2.3 GWh
Résultat du travail de master [17]	1.32 GWh	1.32 GWh	2.64 GWh

Tableau 7: Économies d'énergie - chauffage

	Erhöhung der Temperatursollwerteinstellungen Kühlung		
	2°C 20°C → 22°C	2°C 22°C → 24°C	4°C 20°C → 24°C
Économies d'énergie annuelles: 1 Tram	0.6 MWh	1.0 MWh	1.6 MWh
Économies d'énergie annuelles: 88 Tram Cobra-Flotte	70 MWh	117 MWh	187 MWh

Tableau 8: Économies d'énergie - Climatisation

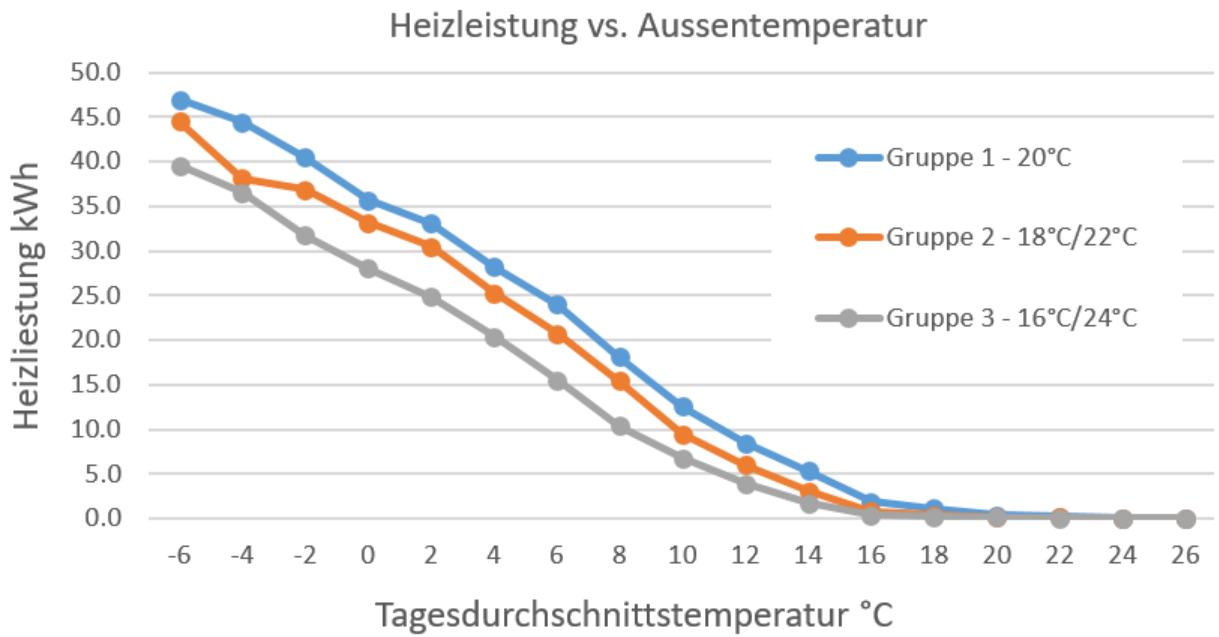


Illustration 5: Consommation d'énergie de chauffage

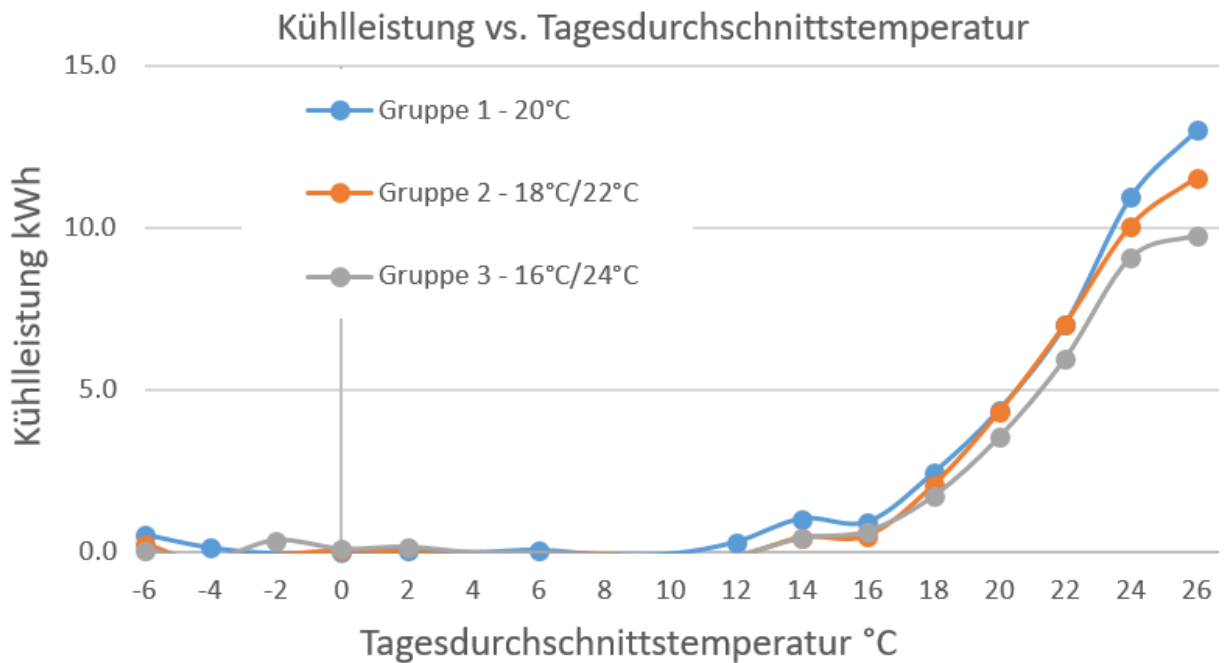


Illustration 6: Consommation d'énergie de la climatisation

Les résultats des enquêtes sur le confort des passagers sont présentés dans le tableau 4 (hiver 2022) et le tableau 5 (été 2022). Une enquête par code QR n'est pas représentative. Pour cette raison, il a été renoncé de procéder à une analyse détaillée. La principale conclusion est que rien dans ces données n'indique que les passagers ont un problème avec des véhicules plus froids en hiver ou plus chauds en été.

Winter 2022 1.1.2022 - 28.2.2022			
Anzahl Teilnehmer	Gruppe 1 - 20°C	Gruppe 2 - 18°C	Gruppe 3 - 16°C
	193	138	127
Wie empfinden Sie heute die Temperatur in diesem Tram auf dieser Fahrt?			
Zu warm	27.98%	21.70%	11.81%
Angenehm	59.59%	63.00%	65.35%
Zu kalt	12.44%	15.20%	22.83%

Tableau 9: Témoignages de clients hiver

Sommer 2022 1.7.2022 - 31.8.2022			
Anzahl Teilnehmer	Gruppe 1 - 20°C	Gruppe 2 - 22°C	Gruppe 3 - 24°C
	230	160	178
Wie empfinden Sie heute die Temperatur in diesem Tram auf dieser Fahrt?			
Zu warm	27.83%	29.38%	35.39%
Angenehm	56.09%	58.13%	58.43%
Zu kalt	16.09%	12.50%	6.18%

Tableau 10: Témoignage de clients Sommer

Suite au projet et en prévision de la situation électrique tendue de l'hiver 2022/2023, les VBZ ont mis en œuvre les nouveaux réglages de température "agressifs" sur tous les trams Cobra (16°C de température de consigne chauffage en hiver, 24°C de niveau de refroidissement en été). Cette décision a également été soutenue par les résultats de l'étude, qui a fourni un calcul de la quantité d'énergie que les VBZ économiseront grâce à ces changements.

1. Ausgangslage

HLK hat erwiesenermassen einen wesentlichen Anteil am Energieverbrauch des Schweizer ÖVs und bietet daher ein entsprechendes Potenzial für Energieeinsparungen. Zum Beispiel schrieb Mikołaj Bartłomiejczyk, dass der Energieverbrauch der Hilfsbetriebe (inkl. HLK) fast die Hälfte des gesamten Energieverbrauchs ausmacht [1]. (Dies bezieht sich natürlich auf kalte und heisse Tage, wenn die HLK auf der höchsten Stufe läuft).

Das hier beschriebene Projekt soll auf mehreren Fahrzeugen gleichzeitig quantifizieren, ob und in wie weit Energieeinsparungen durch die Reduzierung der Temperatursollwerteinstellungen in der komplexen Umgebung des *realen* Trambetriebs, in der viele Faktoren mitspielen (z.B. häufig öffnende Tramtüren, Körperwärme, unregelmässige Verteilung der Fahrgäste, eher kurze Pendlerzeiten, unterschiedliche Passagierauslastung, usw.), tatsächlich möglich sind. Zudem wird der Fahrgastkomfort untersucht.

Es wird auch erwartet, dass einige Fahrgäste weniger Heiz- und Klimaanlageleistung bevorzugen würden. Im Winter zum Beispiel sind die Fahrgäste fast immer wettergerecht angezogen. Sie sind nicht sehr lange in den Fahrzeugen unterwegs und haben wenig Zeit (und in der Hauptverkehrszeit auch wenig Platz), ihre Winterkleider auszuziehen.

Die Änderung der Temperatursollwerteinstellungen ist eine *"low hanging fruit"* (eine einfache Methode), um Energie zu sparen. Es ist oftmals mit wenig bis gar keinem Aufwand realisierbar und erfordert in der Regel keine teuren Änderungen an den Fahrzeugen, weder Software noch Hardware.

Laut Bollinger [7] könnte der Energieverbrauch von Regionalzügen durch eine verbesserte Klimaanlagesteuerung um 11% gesenkt werden. Auch eine Masterarbeit, die bei den VBZ durchgeführt wurde, stützt diese Aussage und kommt zu dem Schluss: "bei der Absenkung der Innenraumtemperatur um 1°C pro Jahr ergibt sich für die gesamte Cobra-Tram Flotte ein Einsparpotential von 660 MWh pro Jahr [17]."

Ursprünglich wurde die Temperatur in den VBZ Cobra-Trams ganzjährig auf 20°C geregelt. Später und als Konsequenz der oben erwähnten Masterarbeit entschieden die VBZ die Temperatur saisonal zu verändern. Im Herbst wurde dazu der Sollwert auf 18°C reduziert (weniger heizen) und im Frühling auf 22°C erhöht (weniger kühlen). Dieses Vorgehen sollte Energie sparen, hatte jedoch auch Nachteile. Wenn im Sommer beispielsweise die Temperatur auf 22°C erhöht wurde um weniger zu kühlen, gab es teilweise immer noch kalte Sommermorgen, bei denen diese 22°C Einstellung zu einer erhöhten Heizleistung führte.

Um diesen nachteiligen Effekt zu beseitigen, wurde das Cobra Tram der VBZ im vergangenen Jahr mit einem Softwareupdate (SW) ausgestattet, welches es ermöglicht, zwei separate Temperatursollwerte – einen fürs Heizen und einen für die Kühlung – einzustellen. Die neue SW sollte den oben beschriebenen Umstand beheben. Im gleichen SW Release wurde auch eine neue Funktion implementiert, mit der mehrere Energieverbrauchsparameter automatisch aufgezeichnet wird (inklusive demjenigen für HLK).

Das neue SW Release ermöglicht es nun, ausgewählte Cobra Trams mit verschiedenen Temperatursollwerten zu betreiben, um abhängig von den eingestellten Regelungstemperaturen etwaige Unterschiede im Energieverbrauch zu quantifizieren. Von dieser neuen Funktion kann das hier beschriebene Projekt profitieren.

2. Ziel der Arbeit

Die VBZ erwarteten für das Projekt folgende drei Ergebnisse, die es zu bestätigen oder zu widerlegen galt:

1. Die Tramgruppen mit der tieferen Heiztemperatursollwerte respektive der höheren Kühlstufe werden messbare HLK-Energieeinsparungen gegenüber den anderen Messgruppen. Die Unterschiede werden deutlich feststellbar sein. Diese Messungen werden auch einen Vergleich der Ergebnisse der Masters Thesis ermöglichen.
2. Die Einsparung wird gross genug ausfallen, um ein Ausrollen der Einstellung der "energetisch sparsamsten" Werte (TH16°C/TK24°C) auf die gesamte Tramflotte zu rechtfertigen.
3. Der Fahrgastkomfort wird wegen der dem Wetter angepassten Kleidung und den kurzen Reisezeiten nicht wesentlich beeinträchtigt. Dieses Resultat erhalten die VBZ durch stichprobenartige Kundenbefragungen mittels QR-Code.

3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

Übersicht:

Die Studie wurde vom 1. Februar 2021 bis 31. August 2022 mit 30 der insgesamt 88 Niederflurfahrzeugen der Cobra Tram Flotte (siehe Abbildung 7) von den VBZ durchgeführt. Die Cobra-Trams sind 36 Meter lang und bieten 220 Fahrgästen Platz (90 Sitzplätze, 130 Stehplätze). Die Fahrzeuge wurden zwischen 2006 und 2010 ausgeliefert und sind seither bei den VBZ und bei den VBG im Einsatz.

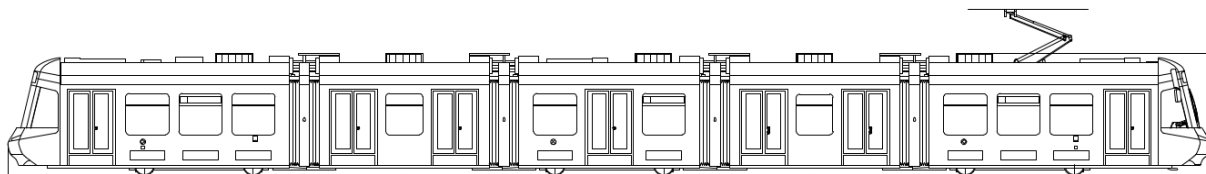


Abbildung 7: VBZ Cobra Tram

Die 30 Testfahrzeuge wurden in drei Gruppen eingeteilt (siehe Tabelle 11). Der Heizsollwert und Kühltemperatursollwert (= Kühlstufe) wurde bei den drei Gruppen wie folgt eingestellt:

Gruppe	1 - Originaleinstellung des Fahrzeuglieferanten	2 - Aktuelle VBZ-Einstellung	3 - Aggressiv Energieeinsparungseinstellung
Solltemperatureinstellung Heizung	20°C	18°C	16°C
Kühlstufe	20°C	22°C	24°C
Anzahl Fahrzeuge	10	10	10
Fahrzeuge (Cobra Tram Nummer)	3003, 3004, 3005, 3026 3038, 3067, 3069, 3082, 3083, 3085	3002, 3006, 3018, 3032, 3035, 3039, 3043, 3062, 3064, 3086	3017, 3021, 3030, 3031, 3033, 3040, 3054, 3056, 3057, 3077

Tabelle 11: Versuchsgruppen

Jeden Tag speichert jedes Tram automatisch die für die Heizung und die für die Klimaanlage (indirekt) verbrauchte Energie, die regelmässig zur Analyse ausgelesen wird.

Die Fahrgäste wurden gebeten, Feedback zur Behaglichkeit im Fahrzeug zu geben, indem sie im Winter (1.1.2022 – 28.2.2022) und im Sommer (1.7.2022 – 31.8.2022) einen QR-Code scannten (siehe Abbildung 11), um ein Internet-Umfragetool aufzurufen. Während der QR-Code-Feedback-Perioden wurden in den Fahrzeugen Datenlogger zur Aufzeichnung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit installiert.

Cobra Tram Heizung und Kühlung

Die Heizungselemente des Cobra-Trams ist auf verschiedene Wärmeerzeuger über die Cobra-Trams verteilt. Diese bestehen aus Zuluft-, Einstiegs-, Untersitzheizgeräten sowie aus Flächenheizungen. Die gesamte installierte Heizleistung beträgt ca. 102 kW (wobei jedoch nie alle Heizgeräte gleichzeitig betrieben werden). Als Vergleichswert: Die installierte Traktionsleistung der Cobra Fahrmotoren beträgt 125 kW. Es werden Widerstandsheizungen eingesetzt, die mit 600 VDC (Spannungsebene der Fahrleitung) betrieben werden [17]. Das Tram hat keine Heiz-Wärmepumpe. Die Klimaanlage besteht aus auf dem Dach montierten Klimageräten der Firma Faiveley Transportation. Auf jedem Wagenkasten des Cobra Trams (insgesamt fünf Wagenkasten pro Tram) ist je ein Fahrgastraum-Klimagerät installiert. Die gesamte installierte Kälteleistung im Fahrgastraum beträgt 55 kW. Der Fahrerstand wird mit einer separaten, kleineren Klimaanlage gekühlt (Kälteleistung 4.4 kW). Die Einstellungen der Fahrerstand-Klimaanlage wurden während dieser Studie nicht verändert. Nachfolgend in Tabelle 12 die Daten einer (einzelnen) Fahrgastraum-Klimaanlage.

Geräteigenschaften Fahrgastraum Klimageräte	
Leistungsdaten	
Kälteleistung	Ca. 11.0 kW
Heizleistung	Ca. 16.0 kW
Luftmengen	
Zuluftmenge Sommer	Max 1600 m³/h (davon ca. 705 m³/h Aussenluft)
Zuluftmenge Winter	Max. 1000 m³/h (mit verstellbarem Aussenluftanteil)

Tabelle 12: Geräteigenschaften Fahrgastraum Klimageräte

Cobra Tram Temperatursollwerteinstellungen:

Für die Temperaturregelung können je einen Sollwert für Heizung und Kühlung ("Kühlstufe") am Fahrzeug DMI eingestellt werden [siehe Abbildung 8]. Diese Einstellungen werden in einem geschützten Bereich des DMI vorgenommen, der mit einem Wartungsschlüssel zugänglich ist. Für dieses Projekt wurden die folgenden zwei Einstellungen verwendet: Temperatursollwert Wagen Heizung und Temperatursollwert Wagen Kühlen.

28.04.2020 17 : 59 : 41		Einstellungen		VBZ Cobra 0	
Heizung/Lüftung Fahrgastraum		[ein/aus]	aus	aus	
Temp.-Sollwert Wagen Heizen		[°C]	18	>	22 <
Temp.-Sollwert Wagen Kühlen		[°C]	22	24	
Temp.-Sollwert Führerstand		[°C]	20	20	
Rad-Durchmesser		[mm]	0	500	
Spurkranzschmierung Distanz		[m]	0	100	
Spurkranzschmierung Impuls		[sec]	0	1	
Einschaltzeit Heizung Stunde		[h]	0	0	
Einschaltzeit Heizung Minute		[min]	0	0	
Jahr einstellen (gültig: 2010...2099)		[Jahr]	0	2000	

über-
nehmen

Wert ändern

Auswahl
Eingabe

++ + ein - aus --

Abbildung 8: VBZ Cobra Tram DMI - Einstellungsbereich

Temperatursollwert Heizung TH: Der TH wird zur Regelung der Fahrzeugheizung verwendet. Wenn der Fahrzeuginnenraum wärmer ist als die Aussentemperatur, wird die Heizung ausgeschaltet. In den meisten Heiz-Betriebsfällen wird fix auf den eingestellten Wert Sollwert geregelt/geheizt.

Ausnahme: Unterhalb von -10°C Aussentemperatur wird der Sollwert TH linear zur Aussentemperatur reduziert, jedoch immer auf mindestens 9°C Innentemperatur gehalten (siehe Abbildung 9). Während des Testzeitraums gab es keinen Tag (gemessen bei der Wetterstation Mythenquai), an dem die Temperatur unter -10°C sank (siehe [1]).

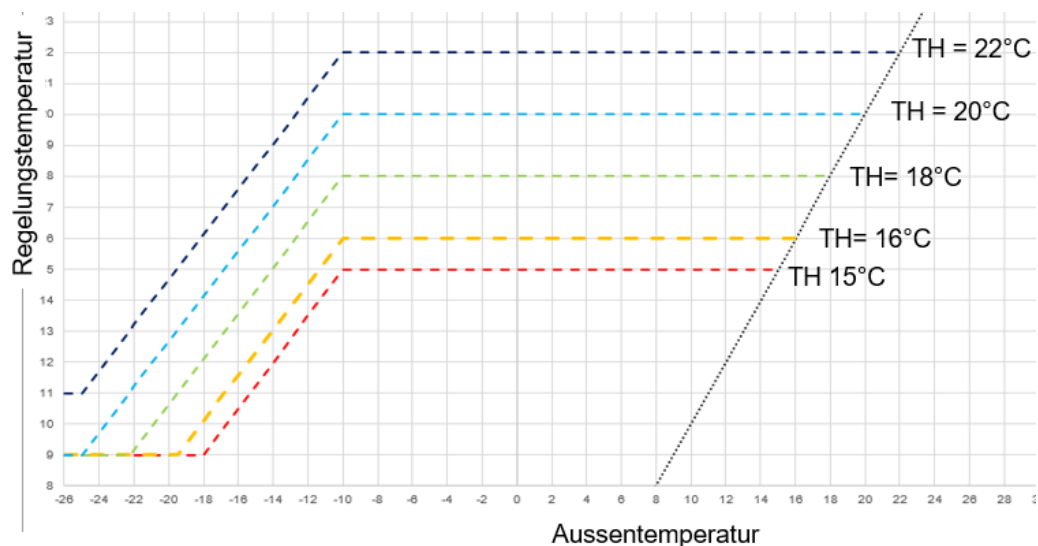


Abbildung 9: Heizungsregelung

Temperatursollwertkühlung TK: Die Kühlungsregelung ist anders implementiert als die Heizungsregelung. Der für die Kühlung eingestellte "Temperaturwert" TK entspricht einer bestimmten "Kühlstufe / Regelungskurve" (siehe Abbildung 10). Dies im Unterschied zum Heizen, wo auf einen mehr oder weniger fix geregelten Sollwert geregelt wird. In dieser Studie wird deshalb darauf hingewiesen, dass der Temperatursollwert für das Kühlen eher als eine Kühlstufe verstanden werden muss, die in den Trameinstellungen mit einem numerischen Temperaturwert als Platzhalter angegeben wird. Die "Kühl-

kurven" unterscheiden sich untereinander ausserdem weniger stark als die "Heizkurven" (siehe Abbildung 9). Oberhalb einer Aussentemperatur von 31°C verhalten sich alle Kühlkurven untereinander gleich und regeln auf einen Temperatursollwert von 28°C.

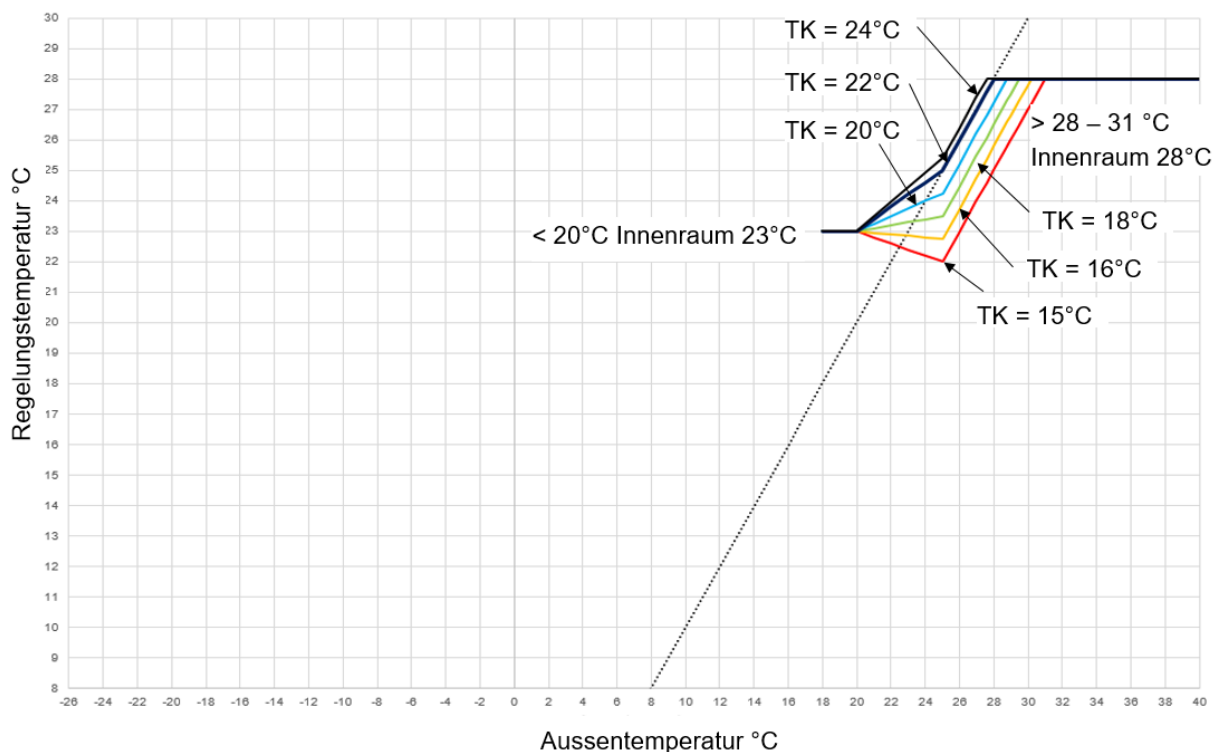


Abbildung 10: Kühlregelung (Kühlstufen)

Hinweis: Es ist verwirrend, dass die verschiedenen Cobra Tram Kühlkurven nach Temperaturwerten (z.B. 20°C) benannt wurden. Dies macht es schwierig, die Energieeinsparungen durch die verschiedenen Klimaanlageinstellungen zu beschreiben. Die Autoren haben sich entschieden, in diesem Dokument die Kühltemperatur-Einstellungen (z.B. 20°C) zu verwenden, wie sie im DMI des Fahrzeugs benannt sind.

Energiemessfunktionalität des Cobra Trams

Die Fahrzeugsteuerung des Cobra Trams wurde vom Fahrzeuglieferanten Bombardier Transportation entwickelt (jetzt Alstom). Die Energiemessfunktion wurde im letzten Software Release der Fahrzeugsteuerung als Änderung implementiert (Cobra Tram Fahrzeug Software Version 2.2.7.6 und 2.2.7.8). Durch das Release werden die Energiewerte und dazugehörigen Daten (siehe Tabelle 13) aufgezeichnet. Dieses neue Cobra Fahrzeugsteuerungssoftware Release wurde vor einigen Jahren im Rahmen des VBZ Eco-drive Programms entwickelt.

Der Energieverbrauch wird von der Fahrzeugsteuerungssoftware berechnet, wobei sowohl intern bemessene Werte wie die Netzspannung als auch die Widerstandswerte (für die einzelnen Heizelemente) verwendet werden. Die Energiemessfunktion der Fahrzeugsoftwares soll ca. einen Energiedatensatz pro Tag speichern, der den kumulierten/aggregierten Tagesenergiebedarf enthält, aufgeschlüsselt auf die einzelnen Elemente. Sobald das Tram gestartet und eine Linie/Kurs eingestellt wird, wird die Energie aufgezeichnet (die Linie/Kurs definiert den Einsatz des Fahrzeugs für einen Tag). Wenn das Tram ausgeschaltet wird oder eine andere Linie/Kurs eingegeben wird, speichert das Fahrzeug die aggregierten Energiedaten und fängt einen neuen Datensatz an. In einigen Fällen (z.B. wenn Fahrzeuge aufgrund eines Unfalls umgeleitet werden) sind die Einsätze (und damit die aggregierten Energiedatensätze) kürzer als ein Tag. Dieses Aggregieren der Energiemessungen auf eine ganze Linie/Kurs (zirka ein Datensatz pro Tag) wurde von den Entwicklern gewählt, weil die Fahrzeugdiagnosedatenbank, in die die Messungen gespeichert werden, die nicht sehr viel Speicherplatz bietet.

Hinweis: Diese neue Software wurde in erster Linie für die Messung des Traktionsenergieverbrauchs entwickelt, um den Tramfahrern*Innen dabei zu unterstützen, energieeffizienter zu fahren. Die Autoren dieser Studie stellten fest, dass diese neue Software auch die HLK-Energie jeden Tag automatisch aufzeichnet, und beschlossen diese Studie durchzuführen.

Wert	Pro Einsatz
Heiz-Energie: Energie, die direkt für die Heizung des Fahrgastraums verwendet wird.	Ja
HBU-Energie: Energie für die Hilfsbetriebe inkl. <u>Klimatisierung</u> , Batterieladen, Beleuchtung, Lüftung, Kühlpumpe etc.	Ja
Traktions-Energie: Energie, die direkt für Traktion verwendet wird.	Ja
Bremsenergie – Rekuperiert: Energie, die durch elektrisches Bremsen rekuperiert und in die Oberleitung zurückgeführt wird.	Ja
Bremsenergie – Bremswiderstand: Energie, die durch elektrisches Bremsen im Bremswiderstand geheizt wird.	Ja
Fahrzeit: Zeitdauer für den Energiedatensatz.	Ja
Laufleistung (Weg): Zurückgelegte Strecke für den Energiedatensatz.	Ja
Linie und Kurs	Ja
Fahrzeugnummer	Ja

Tabelle 13: ECO Drive Software Energiedatensatz

Sowohl die Heizenergie als auch die HBU-Energie werden für diese Studie verwendet. Wie oben beschrieben, umfasst die Heizenergie nur die Energie, die für die Beheizung des Trams verwendet wird. Die HBU-Energie beinhaltet sowohl die Energie für Klimatisierung, als auch die Energie anderer Geräte. Es wird angenommen, dass die HLK-Energie von der restlichen HBU-Energie separiert werden kann, da die restliche HBU-Energie, im Gegensatz zur Kühlenergie, mehr oder weniger über das ganze Jahr konstant bleibt. Der Energieverbrauch der betreffenden Geräte sing mehrheitlich temperaturunabhängig.

Die Diagnosedatenbanken inkl. Energiedatensätze werden regelmässig (etwa viermal pro Jahr) von jedem Fahrzeug durch das Wartungspersonal ausgelesen und in eine zentrale Wartungsdatenbank gespeichert. Die für dieses Projekt erforderlichen Energiemesswerte werden aus dieser Datenbank exportiert.

QR-Code Umfrage zur Fahrgastbehaglichkeit:

Während der Studie wurden die Fahrgäste gebeten, einen QR-Code an einem Fensterkleber zu scannen (siehe Abbildung 11), um ein Internet-Umfragetool (<https://www.umfrageonline.ch/>) aufzurufen. Auf der Internet Tool wurden drei identische Fragebögen eingerichtet, einer für jede der Temperaturgruppen. Das Umfragetool speichert die Daten und ermöglicht eine spätere Analyse. Die Fensteraufkleber (siehe Abbildung 11) waren identisch, abgesehen von den QR-Codes und einem kleinen codierten Text unten rechts, der angab, zu welcher Gruppe der QR-Code gehörte. Die Fahrgäste wurden in der Umfrage nicht darüber informiert, dass es einen Versuch gab, oder dass es verschiedene Temperaturgruppen gegeben hatte. Dies wurde so gemacht, um die Meinungsbildung der Fahrgäste möglichst nicht zu beeinflussen. Ausserdem wurden die Fahrgäste gebeten, dass sie die Temperatur heute und in diesem Tram beurteilen. Dies um zu verhindern, dass eine generelle Meinung zur Tramflotte abgegeben wird.



Abbildung 11: QR-Code Befragungskleber

Fahrgäste, die den QR-Code scannen, wurden gebeten, die folgende Fragen zu beantworten (siehe Abbildung 12).

VBZ Umfrage Temperaturempfinden im Tram

0 %

Grüezi lieber Fahrgast

Die Umfrage ist anonym und dauert ca.1 Minute. Die Daten werden VBZ-intern verwendet und nicht an Dritte weitergeben.

Wie empfinden Sie heute die Temperatur in diesem Tram auf dieser Fahrt? * ⓘ

☐ Zu warm

☐ Angenehm

☐ Zu kalt

Wie lange ist heute Ihre ungefähre Aufenthaltsdauer in diesem Tram? * ⓘ

☐ 1 bis 5 Minuten

☐ 6 bis 10 Minuten

☐ 11 bis 15 Minuten

☐ 16 bis 30 Minuten

☐ Über 30 Minuten

Sie sind... * ⓘ

☐ Weiblich

☐ Männlich

☐ Divers

☐ Keine Angabe

Wie alt sind Sie? * ⓘ

☐ Unter 16 Jahre

☐ 16 bis 24 Jahre

☐ 25 bis 34 Jahre

☐ 35 bis 44 Jahre

☐ 45 bis 54 Jahre

☐ 55 bis 64 Jahre

☐ Alter als 65 Jahre

☐ Keine Angabe

Umfrage beenden

Abbildung 12: Fahrgastbehaglichkeitsumfrage

Hinweis: Die QR-Code-Befragungsmethode wurde wegen der angespannten Covid-Situation gewählt (siehe Kapitel Diskussion).

Temperatur- und Feuchtigkeitsmessungen:

Während den Fahrgastumfragen wurden Temperatur und Luftfeuchtigkeit mit Mini-Datenloggern aufgezeichnet (Testo 174H, Abbildung 13). In je einem Fahrzeug pro Temperaturgruppe wurden je zwei Temperaturlogger hinter Infotafeln (auf ca. 1m Höhe) platziert. Die Auflösung wurde auf 15 min eingestellt.



Abbildung 13: testo 174 H Set - Mini-Datenlogger für Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Hinweis: Es ist den Autoren bekannt, dass die Messung der Temperatur in einem ÖV-Nahverkehrsfahrzeug äusserst kompliziert ist (siehe Kapitel Diskussion). Aus Gründen der limitierten Ressourcen konnten keine weiterführenden Temperaturmessungen vorgenommen werden.

Methodik:

Schritt 0: Vorprojekt (Nov. 2020 – Jan. 2021)

Im Rahmen eines Vorprojekts wurden an einer kleinen Gruppe von Fahrzeugen Modifikationen an Temperatureinstellungen vorgenommen. Die Temperatureinstellungen wurden ca. einen Monat später kontrolliert. Es wurde festgestellt, dass in einigen Trams die Sollwerttemperatur wieder auf die ursprüngliche Einstellung zurückgesetzt wurde. Aus diesem Grund wurde beschlossen, die Temperatureinstellungen etwa einmal im Monat in allen Trams zu überprüfen um sowohl die Temperatureinstellungen in Fahrzeugen zu korrigieren, in denen die Temperatur zurückgesetzt wurde, als auch die Datensätze während eines Zeitraums zu ignorieren, in dem die Forscher nicht sicher sein konnten, dass die Temperatureinstellungen korrekt waren.

Hinweis: Die Tatsache, dass die Fahrzeugtemperatureinstellungen manchmal zurückgesetzt wurden, ist höchstwahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Wartungsteams bei ihrer Arbeit aufmerksam waren und entdeckten, dass ein Fahrzeug eine ungewöhnliche Einstellung hatte. Um dies zu verhindern, wurde auf alle Fahrzeuge ein kleiner Aufkleber (siehe Abbildung 14) angebracht, der die Wartungsteams daran erinnert, die Fahrzeugtemperaturen nicht zurückzusetzen. Dadurch verbesserte sich die Situation, und es gab weniger Fälle, in denen die Einstellungen geändert wurden.

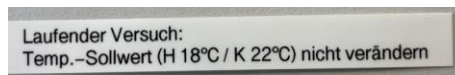


Abbildung 14: Kleber 'Laufender Versuch: Temp.-Sollwert nicht verändern'

Schritt 1: Fahrzeuggruppen und Temperatureinstellungen definieren (Jan. 2021)

Gemäss Projektplan wurden in einem ersten Schritt ein Teil der Tramflotte (=Versuchsfahrzeuge) in verschiedene Gruppen mit unterschiedlichen Temperatursollwerteinstellungen unterteilt. Die Testflotte umfasst 30 Cobra Trams, die in drei Gruppen unterteilt wurden (siehe Tabelle 11).

Schritt 2: Einstellungen aus Schritt 1 implementieren (30. Jan. 2021)

Die Temperatursollwerte sind in allen 30 Messfahrzeuge am HMI gemäss Vorgaben eingestellt. Dies geschah nachts in den VBZ Tramdepots.

Schritt 4: Periodische Kontrolle der Temperatursollwerteinstellungen (Feb. 2021 – Aug. 2022)

Wie oben beschrieben, wurden die Temperatureinstellungen etwa jeden Monat kontrolliert.

Schritt 5: QR-Code Kundenbefragungen (1. Jan. 2022 – 28. Feb. 2022 und 1. Jul. 2022 – 31. Aug. 2022) und Temperaturmessungen

Die Kundenbefragungen wurde zweimal durchgeführt, einmal im Winter (Januar und Februar 2022) und einmal im Sommer (Juli und August 2022). In jedem Versuchstram wurden je 2 QR-Code Umfragekleber mit dem Text 'Wie beurteilen Sie heute die Temperatur in diesem Tram?' an zwei Fenstern (siehe Abbildung 11) angebracht, vorne und hinten. Die Kleber der verschiedenen Versuchsgruppen waren bis auf den QR-Code identisch, womit die Fahrgäste nicht erkennen konnten, dass es verschiedene Gruppen gab.

Während der QR-Code Befragungen wurde die Temperatur in je einem Tram pro Versuchsgruppe mittels Datenlogger aufgezeichnet (siehe Abbildung 13).

Hinweis: Einige Fahrzeuge hatten während der Umfrage eine Werbe-Vollbemalung (ca. 5% der Versuchsreihe). Um den Werbeeffect nicht negativ zu beeinträchtigen wurde beschlossen, dort keine QR-Code Umfragekleber anzubringen.

Datenbereitstellung

Die Fahrzeugdiagnostikdaten (die auch die täglichen Energiemessungen enthalten) werden in regelmässigen Abständen durch das VBZ Wartungspersonal manuell aus den Fahrzeugen ausgelesen und in einer zentralen Fahrzeugdatenbank gespeichert. Die Autoren dieser Studie haben diesen Prozess unterstützt, um sicherzustellen, dass alle Energiedaten für die Analyse zur Verfügung stehen. Diese Dateien, die aus dem Fahrzeug kopiert werden, werden in eine XML-ähnliche Struktur umgewandelt und in einer Datenbank für dieses Projekt gespeichert. Der Tagesdurchschnittstemperaturwert wurde zu jedem Energiedatensatz hinzugefügt (die Quelle hierfür war die Wetterstation Mythenquai der Stadt Zürich, siehe [1]). Die durchschnittliche Heiz- und Kühlleistung pro Linie/Kurs wurde berechnet, indem die Gesamtheizenergie pro Messung (kWh) durch die Zeit (h), in der das Fahrzeug eingeschaltet war, dividiert wurde, um sie in eine Leistung (kW) umzurechnen. Dadurch wurde für jede Messung eine durchschnittliche Tagesheiz-/kühlleistung berechnet und der entsprechenden Tagesdurchschnittstemperatur zugeordnet. Die Daten wurden dann in Temperaturgruppen gruppiert, eine Gruppe pro zwei Grad Celsius.

Beispielhafte Darstellung der Daten:

Date	Vehicle	Einstellungen	kWh_Heiz	kWh_HBU	duration	Heizung kW	HBU kW	T °C	T°C - Gruppe
10.01.2022	3005	Gruppe 1 - 20°C	561.8	139.9	54897	36.8	9.2	2.1	2
11.01.2022	3005	Gruppe 1 - 20°C	188.7	62.0	22756	29.9	9.8	2.3	2
12.01.2022	3005	Gruppe 1 - 20°C	704.8	165.8	67465	37.6	8.8	0.4	0
13.01.2022	3005	Gruppe 1 - 20°C	801.8	182.9	75035	38.5	8.8	-0.5	0
14.01.2022	3005	Gruppe 1 - 20°C	656.7	165.5	68521	34.5	8.7	0.7	0
15.01.2022	3005	Gruppe 1 - 20°C	739.3	172.4	70857	37.6	8.8	-0.1	0
16.01.2022	3005	Gruppe 1 - 20°C	125.7	35.2	14292	31.7	8.9	0.9	0
17.01.2022	3005	Gruppe 1 - 20°C	586.4	189.5	72338	29.2	9.4	4.3	4
18.01.2022	3005	Gruppe 1 - 20°C	590.6	165.5	68330	31.1	8.7	2.8	2
19.01.2022	3005	Gruppe 1 - 20°C	355.2	106.9	41524	30.8	9.3	3.1	4

Abbildung 15: Energiedatensätze (Beispiele)

Hinweis: Fahrten mit kurzer Länge (kleiner als 60 Minuten) wurden aus die Studie entfernt. Es wird vermutet, dass diese bei diesen kurzen Fahrten unverhältnismässig viel Energie für das Aufheizen / Abkühlen des Fahrzeugs verwendet wird, so dass die Datensätze dieser Fahrzeuge den Energieverbrauch für diese Tagesdurchschnittstemperatur nicht akkurat wiedergeben. Bei "normalen" Fahrten stützt das Fahrzeug nämlich zum grössten Teil der Zeit die Innentemperatur lediglich, die sich bereits auf Sollwerttemperatur befindet. Bei sehr kurzen Fahrt unter einer Stunde ist dies jedoch genau umgekehrt, was die Messungen verfälschen würde.

HBU und Klimaanlageenergie:

Hinweis zur Klimaanlageenergie: Wie bereits in dem Dokument erwähnt, handelt es sich bei der Kühlenergie um eine indirekte Messung. Es wurde nämlich die HBU Energie gemessen. Diese beinhaltet einen temperaturunabhängigen Teil (Tagesdurchschnittstemperatur unter ca. 12°C) und einen temperaturabhängigen Teil (Tagesdurchschnittstemperatur über ca. 12°C) (Abbildung 16). Der temperaturunabhängige Teil wurde auf 8.9 kW berechnet (Mittelwert des HBU Energieverbrauchs unter 12°C). Die Kühlenergie wurde als die Differenz zum konstanten HBU-Energieverbrauch angenommen. Beispiel: Bei einer gemessenen HBU-Durchschnittstagesleistung von 15 kW wird die durchschnittliches Tages-Kühlenergie auf 6.1 kW berechnet (als Differenz zwischen 15 kW und 8.9 kW).

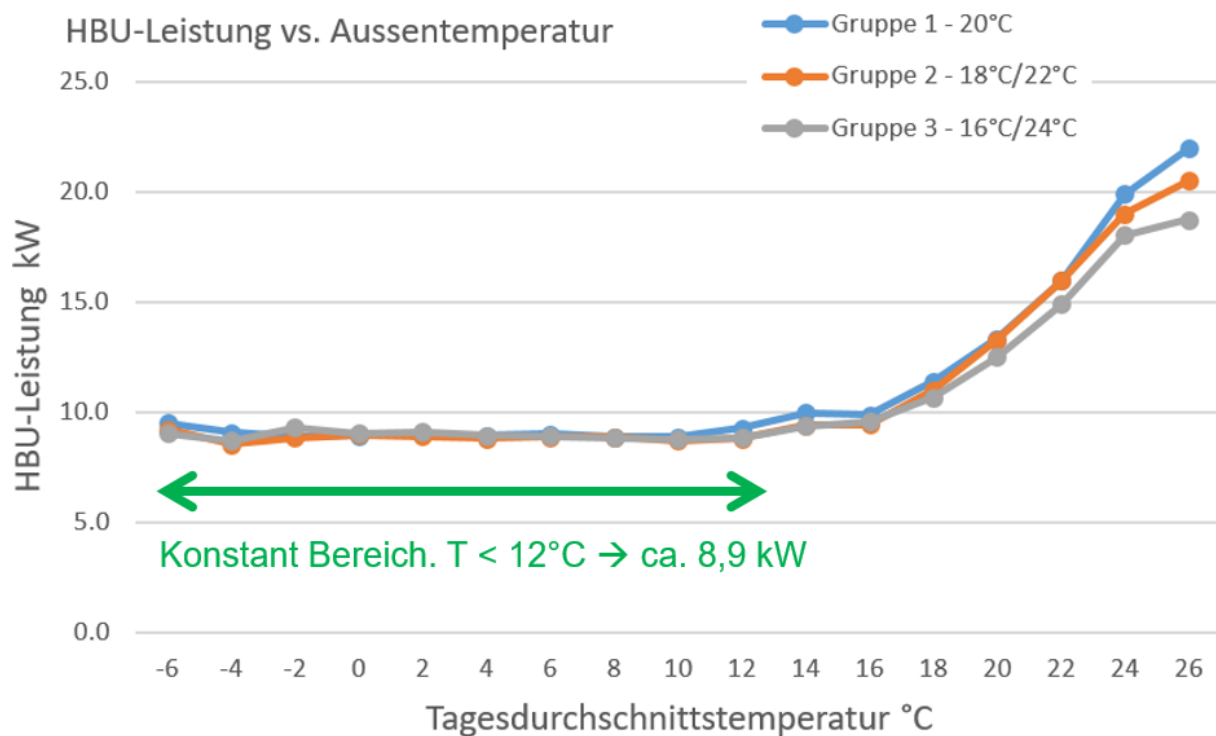


Abbildung 16: HBU-Leistung

Wichtige Zeiträume des Projekts:

- 30.01.21 – 31.08.22: 30 ausgewählte Cobra Trams fahren mit den im Projekt beschriebenen Temperatureinstellungen.
- 01.02.21 – 31.03.22: Dieser Zeitraum wurde für die Auswertung des Energieverbrauchs benutzt. Innerhalb von diesem Zeitraum galt das "alle-Türen-auf" Corona-Massnahmenkonzept.
- 01.01.22 – 28.02.22: Dieser Zeitraum wurde für die Kontrolle/Messung der tatsächlichen Temperatur und für die Fahrgastumfrage mit QR-Code im Winter benutzt.
- 01.07.22 – 31.08.22: Dieser Zeitraum wurde für die Kontrolle/Messung der tatsächlichen Temperatur und für die Fahrgastumfrage mit QR-Code im Sommer benutzt.

Aktueller Wissensstand

Es gibt viele Experimente und Forschungsaktivitäten im Zusammenhang mit HLK in öffentlichen Verkehrsmitteln, aber es wurde kein Versuch gefunden, bei dem die Auswirkungen verschiedener Temperatureinstellungen über einen längeren Zeitraum in einer Tramflotte untersucht wurden.

Der Grossteil der Forschung fokussiert sich mehr auf technologische Innovationen (z.B. Wärmepumpen [8][15], CO₂-Sensoren [15][18], bessere Isolierung [20], etc.), als auf konkrete Optimierungen des Energieverbrauchs mit dem vorhandenen Equipment. Gerade diese energetischen Optimierungen der vorhandenen Ausstattung wäre jedoch für Tram und Vollbahnen essentiell, da hier die Wiederbeschaffungszyklen oftmals 40 Jahre und mehr übersteigen. Dies im Gegensatz zu Bussen, wo Neuanschaffungen nach ca. spätestens 16 Jahren üblich sind.

Die VBZ zielen darauf ab, energetische Verbesserungen ohne Eingriffe in die vorhandene Hardware zu erreichen, also durch eine energetisch optimierte Regelungstemperatur.

Einen ähnlichen Weg haben bereits die SBB und die RBS eingeschlagen. Die SBB hatte im Januar 2018 zusammen mit dem Institut für Gebäudetechnik und Energie der Hochschule Luzern einen Versuch zur Temperaturregelung durchgeführt. Ziel war es aufzuzeigen, ob im Winter eine Senkung der Solltemperatur in den Zügen des Regionalverkehrs Zürich von 22 auf 20 Grad den Fahrkomfort beeinflusst. Die Absenkung der Sollwerttemperatur beeinträchtigte den Fahrkomfort laut Kundenbefragungen (Doppelblindstudie) nicht. Laut SBB würde die Massnahme viel Energie einsparen, abhängig davon, auf wie vielen Fahrzeugen die Änderung ausgerollt würde [6]. Die Fahrzeugsteuerungssoftware in der S-Bahn war jedoch nicht in der Lage, die eingesparte Energie aufzuzeichnen. So konzentrierte sich das Projekt in erster Linie auf die Messung des Kundenkomforts. Die SBB haben eventuell in einer späteren Projektstufe vor, sich mit der eingesparten Energie zu befassen.

Die RBS haben, ähnlich wie die SBB, im Rahmen eines Energiesparprogramms die Fahrzeuginnenraumtemperatur gesenkt, um den Energieverbrauch zu minimieren. Sie haben jedoch weder die eingesparte Energie gemessen, noch Kundenberatungen durchgeführt.

Die von der SBB und der RBS durchgeführten Projekte können aufgrund der Besonderheiten des ÖPNV nicht eins zu eins auf den Trambetrieb übertragen werden.

Nichtsdestotrotz gibt bereits Untersuchungen mit Fokus aufs Tram. Aber diese Arbeiten haben entweder nur Energiemessungen auf einem einzelnen Tram vorgenommen, oder die Untersuchungen liefen nur über eine kurze Zeit, oder basieren auf theoretischen Berechnungen:

- Beusen et al [5] hat Messungen auf einem Tram in Belgien durchgeführt, allerdings nur während sechs Wochen im Herbst. Eine auf ihren Messungen aufbauende Simulation errechnete eine Energieeinsparung durch optimierte Heizung und Ventilation von 0.37 MWh/km (Durchschnitt pro Jahr).
- Amri et al [1] erstellte ein Modell zur Optimierung der Tram HLK-Steuerung und errechnete, dass Energieeinsparungen zwischen 25% und 55% gegenüber konventionellen HLK-Steuerungen möglich sind.

Ein möglicher Grund für fehlende Flotten-Energiedaten ist womöglich, dass die meisten Trams nicht über die Funktion zur Aufzeichnung von Energiedaten in der Fahrzeugsteuerungssoftware verfügen. Schweizerische Ausnahmen sind die TPG Tango-Trams in Genf und die BVB Flexity Trams in Basel. Diese sind ebenfalls mit einem automatischen Energieerfassungssystem ausgestattet und könnten (oder machen es vielleicht bereits) ohne Softwareanpassungen ähnliche Messungen vornehmen.

Entsprechende Untersuchungen an mehreren Trams, um herauszufinden, wie gross der energiesparende Einfluss einer Änderung des Temperatursollwerts von 2 bis 4°C im *realen* Schweizer Trambetrieb tatsächlich ist, wurden (soweit die Autoren wissen) bisher noch nicht durchgeführt. Das hier vorgestellte Projekt soll diese Wissenslücke schliessen und als Erfahrungsgrundlage für andere Schweizer ÖPNV-Betriebe dienen.

Das hier vorgestellte Projekt der VBZ soll deshalb quantifizieren, wie viel Energie im realen Trambetrieb des Schweizer Nahverkehrs-ÖV tatsächlich mittels einer Änderung der Sollwerttemperatur eingespart werden kann. Dies ist wichtig, da Betriebe des Schweizer Nahverkehrs-ÖV häufig bereits vorgängig den realen Nutzen einer Massnahme wissen wollen, bevor sie Geld für Energiesparmassnahmen sprechen (z.B. für Softwaremassnahmen, Kundenbefragungen, etc.).

Neben den oben genannten Projekten sind viele Bahnen in der Schweiz mit Energiesparaktivitäten an ihren Fahrzeugen beschäftigt. Einige dieser Aktivitäten sind hier aufgelistet: Die BLS hat 36 NINA Züge modernisiert, um energieeffizienter zu werden. Neu sind die NINAs z.B. mit CO₂-Sensoren ausgestattet und haben einen Schlumberbetrieb (Heizung in unbesetzten Züge wird auf 10°C gesenkt [12]). Als Teil des Programms wurde auch die Software der Heizungssteuerung korrigiert. Für kurze Zeit wurde auch die Fahrzeuginnenraumtemperatur um 2 Grad gesenkt, um Energie zu sparen. Nachdem sich Fahrgäste beschwert haben, wurde die Temperatur wieder auf den ursprünglichen Wert zurückgesetzt.

Bei der RhB zeichnen die neuen Fahrzeuge die gesamte verbrauchte Energie auf. Die RhB waren beim Projektstart gerade dabei Projekte zu starten, um diese Energiedaten zu untersuchen. Beim Projektstart gab es auf Anfrage VBZ aber noch keine konkreten Projekte, um die HLK-Energie zu reduzieren.

Im Rahmen eines ESöV 2050 Projekts (084) installierte TPF in 30 Bussen einen Driving-Style-Manager, um eine energieeffiziente Fahrweise zu fördern. Diese Geräte können auch die Temperatur aufzeichnen. Momentan wird die Temperatur überwacht, um die Auswirkungen der Türöffnungszeit zu überwachen. Es werden aber keine Energiemessungen basierend auf den Temperatureinstellungen vorgenommen.

4. Ergebnisse

In der Studie wurde der Energieverbrauch für Heizung und Kühlung (indirekt) während des Untersuchungszeitraums quantifiziert. Mit diesen Daten ist es möglich, geschätzte Energieeinsparungen für die gesamte Cobra-Flotte für ein Jahr hochzurechnen.

Ergebnisse Energiemessungen

Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen den durchschnittlichen Energieverbrauch für die Heizung und Kühlung im Vergleich zur tagesdurchschnittlichen Temperatur [2] für die drei Messgruppen. Die Tagesdurchschnittliche Temperaturwerte stammen von einer Wetterstation vom Hafen Enge (von der Seepolizei Zürich betrieben). Diese Wetterstation wurde ausgewählt, da sie von der Stadt Zürich betrieben wird und das Herunterladen von historischen Tagesdurchschnittstemperaturen ermöglicht. Da innerhalb der Stadt Zürich zum selben Zeitpunkt verschiedene Temperaturen auftreten können (bis zu einige °C Unterschied), und da sich die Fahrzeuge immer an unterschiedlichen Standorten befinden, bildet dieser Messwert eine grobe Annäherung.

Eine visuelle Inspektion dieser Diagramme zeigt das Folgende:

Heizleistung

1. Für alle Gruppen steigt die durchschnittliche Heizleistung ungefähr linear mit abnehmender Tagesdurchschnittstemperatur.
2. Für unter 16°C gilt: je niedriger der Heiz-Temperatursollwert eingestellt ist, desto weniger Energie wird verbraucht.

Kühlleistung

1. Für alle Gruppen steigt die durchschnittliche Kühlleistung mit zunehmender Tagesdurchschnittstemperatur.
2. Je weniger aggressiv der Temperatursollwert (respektive die Kühlstufe) eingestellt ist, desto weniger Energie wurde verbraucht. Der Effekt ist allerdings erst ab ca. 14°C Tagesdurchschnittstemperatur messbar. Vorher wird in der Regel nicht gekühlt.

Die Energieeinsparung wurde für jede Temperaturstufe berechnet, sowohl für Gruppe 1 (20°C), Gruppe 2 (22°C/18°C) und Gruppe 3 (24°C/16°C). Ausserdem werden die Energieeinsparungen für die reduzierten Einstellungen von Gruppe 2 (22°C/18°C) und Gruppe 3 (24°C/16°C) gegenüber dem ursprünglichen Status Quo von Gruppe 1 (20°C) berechnet. Tabelle 14 und Tabelle 15 zeigen, wie viel Energie die VBZ jährlich durch die Änderung der Temperatursollwerteinstellungen eingespart haben und wie viel eingespart werden könnte. Daraus ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

1. Durch die bereits erfolgte Reduktion der Heizsollwerttemperatur von 20°C auf 18°C haben die VBZ 1.0 GWh eingespart.
2. Durch eine weitere Reduktion der Heizungssollwerttemperatur von 18°C auf 16°C werden weitere 1.3 GWh einspart → insgesamt also 2.3 GWh pro Jahr von 20°C auf 16°C.
3. Durch die bereits erfolgte Erhöhung der Kühlsollwerttemperatur (= Reduzierung der Kühlstufe) von 20°C auf 22°C haben die VBZ 70 MWh VBZ eingespart.
4. Durch eine weitere Erhöhung der Sollwerttemperatur (= Reduzierung der Kühlstufe) von 22°C auf 24°C können weitere 116 MWh einspart werden → insgesamt 187 MWh pro Jahr von 20°C auf 24°C.
5. Es wurde erwartet, dass die Linie der Gruppe 2 genau zwischen Gruppe 1 und Gruppe 3 liegt. Dies war in diesem Fall jedoch nicht der Fall. Die Autoren haben keine Erklärung dafür, warum die Linie der Gruppe 2 näher an Gruppe 1 liegt als an Gruppe 3.

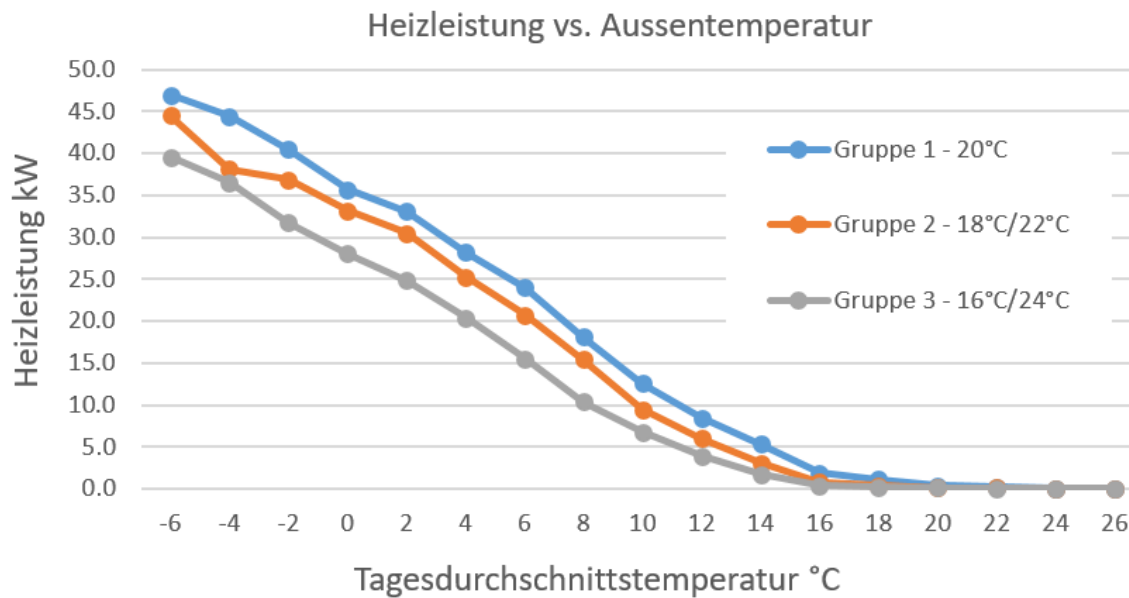


Abbildung 17: Heizleistung

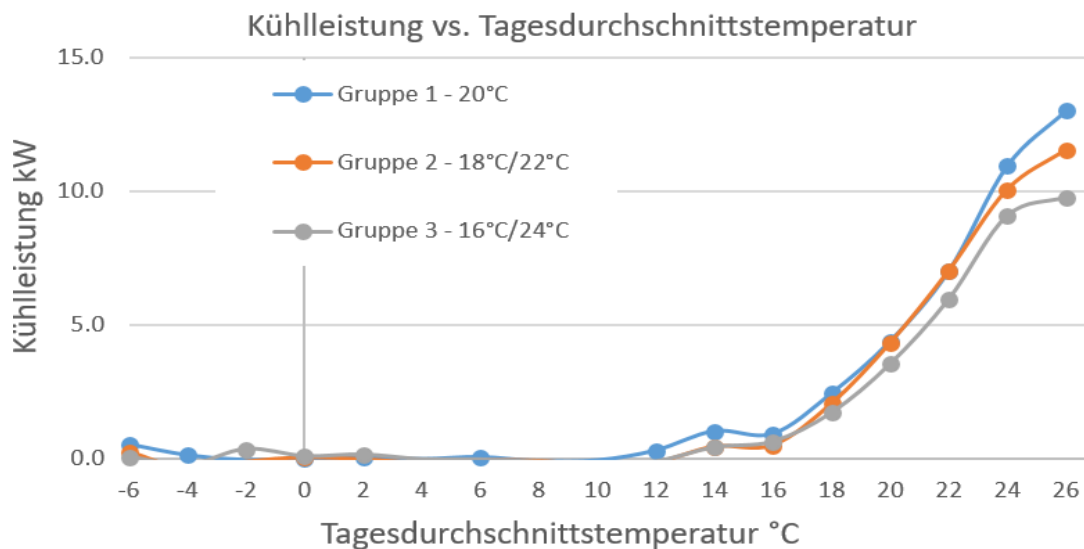


Abbildung 18: Kühlleistung

	Senkung der Temperatursollwerteinstellungen Heizung		
	2°C 20°C → 18°C	2°C 18°C → 16°C	4°C 20°C → 16°C
Jahresenergieeinsparungen: 1 Tram	11.4 MWh	14.4 MWh	25.8 MWh
Jahresenergieeinsparungen: 88 Tram Cobra-Flotte	1.0 GWh	1.3 GWh	2.3 GWh
Ergebnis aus der VBZ Masterarbeit [17]	1.32 GWh	1.32 GWh	2.64 GWh

Tabelle 14: Energieersparungen – Heizung

	Erhöhung der Temperatursollwerteinstellungen Kühlung		
	2°C 20°C → 22°C	2°C 22°C → 24°C	4°C 20°C → 24°C
Jahresenergieeinsparungen: 1 Tram	0.6 MWh	1.0 MWh	1.6 MWh
Jahresenergieeinsparungen: 88 Tram Cobra-Flotte	70 MWh	117 MWh	187 MWh
Ergebnis aus der VBZ Masterarbeit [17]	Klimatisierungsenergie nicht betrachtet		

Tabelle 15: Energieersparungen - Klimatisierung

Die Jahresenergieeinsparungen wurden berechnet, indem die folgende Werte miteinander multipliziert werden:

- Energieeinsparungen pro Fahrzeug (**Tabelle 19** für Heizleistung und **Tabelle 20** für Kühlleistung)
- Tage pro Jahr, an denen die Durchschnittstemperatur $< 16^{\circ}\text{C}$ liegt (**273 Tage**) für Heizleistung oder
Tage pro Jahr, an denen die Durchschnittstemperatur $> 18^{\circ}\text{C}$ liegt (**92 Tage**) für Kühlleistung
- Anzahl Fahrzeuge (**88 Cobra Trams**)
- Durchschnittlichen Betriebsstunden pro Tag (**18 Std**)
- Prozentsatz der Cobra Fahrzeuge, die täglich in Betrieb sind (**80%**)

Für Abbildung 17 und Abbildung 18:

- Die Diagramme sind mit Standardabweichungen versehen (siehe Anhang Abbildung 27 und Abbildung 28)
- Daten für die Erstellung dieser Abbildungen sind im Anhang in Tabelle 19 und Tabelle 20 zu finden. Die Tabellen beinhalten auch die durchschnittliche Heiz- und Kühlenergie für jede Ausstemperaturstufe.

Die Heiz- und Kühlleistung pro Monat wurde ebenfalls grafisch dargestellt (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20). Diese Visualisierung bestätigt wenig überraschend, dass in den Wintermonaten am meisten geheizt und in den Sommermonaten am meisten gekühlt wird.

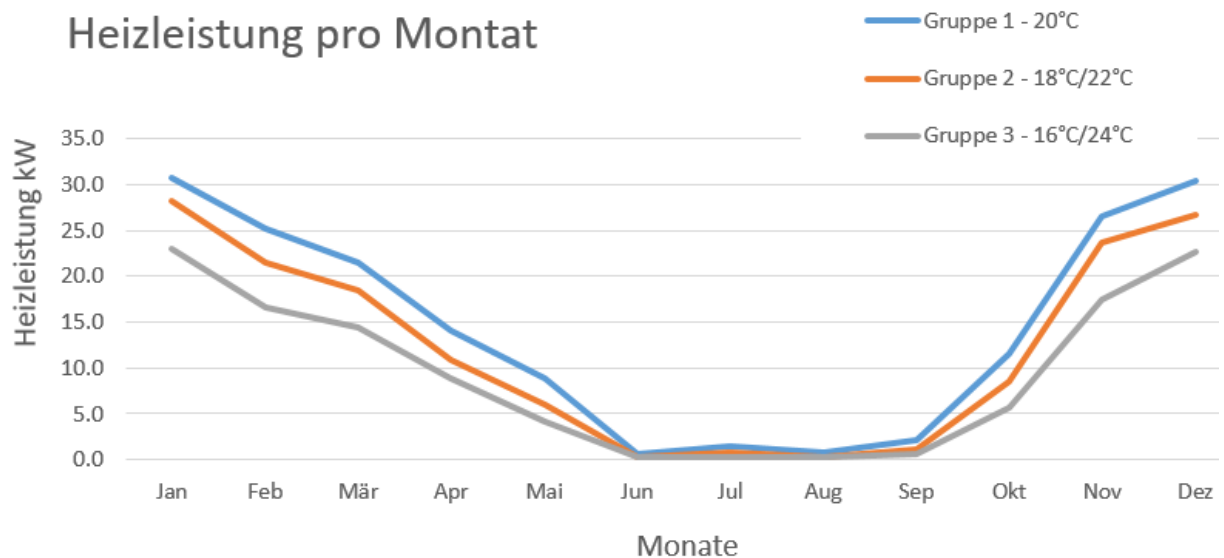


Abbildung 19: Heizenergieverbrauch pro Monat

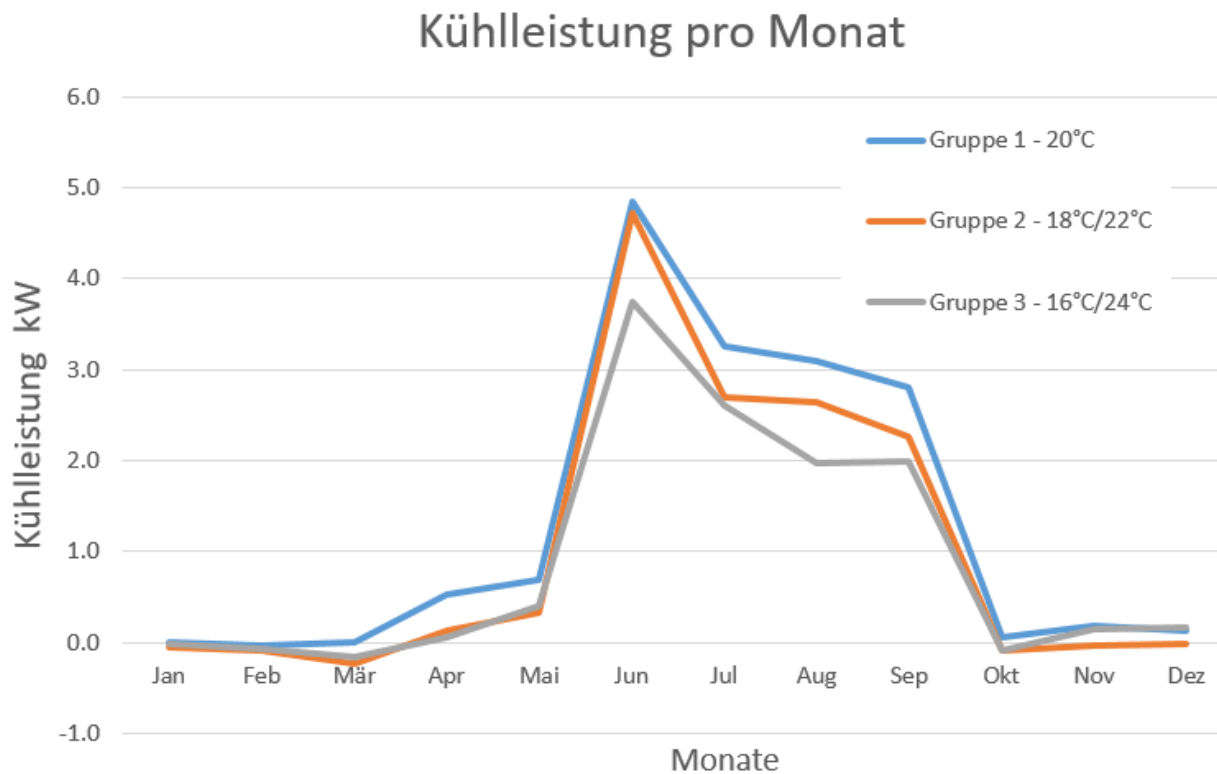


Abbildung 20: HBU Energieverbrauch pro Monat

Die durchschnittliche Traktionsleistung (52.3 kW) wurde aus allen Messungen berechnet. Die Heiz- und Kühlleistung wurde zusätzlich als Prozent der durchschnittlichen Traktionsleistung grafisch dargestellt (siehe Abbildung 21 und Abbildung 22). Diese Visualisierung zeigt nicht nur, dass an den kältesten Tagen die Heizleistung zwischen 75% und 90% der Traktionsleistung beträgt, sondern auch, dass die Einsparung durch das Absenken des Sollwerts umgerechnet ca. 15% der durchschnittlichen Traktionsleistung beträgt. Es ist auch sichtbar, dass für die Klimatisierung viel weniger Leistung verbraucht wird als für die Heizung. Die Autoren vermuten dafür mehrere Gründe. Zum einen handelt es sich bei der Klimaanlage technisch gesehen um eine Wärmepumpe, die wesentlich effizienter arbeitet als eine elektrische Widerstandsheizung wie sie beim Cobra verbaut ist. Zum anderen wird beim Kühlen in der Regel eine kleinere Differenz zur Aussentemperatur angestrebt als beim Heizen, wo beispielsweise eine Differenz von 20°K zwischen Innen- und Aussentemperatur durchaus im Bereich des Möglichen liegt.

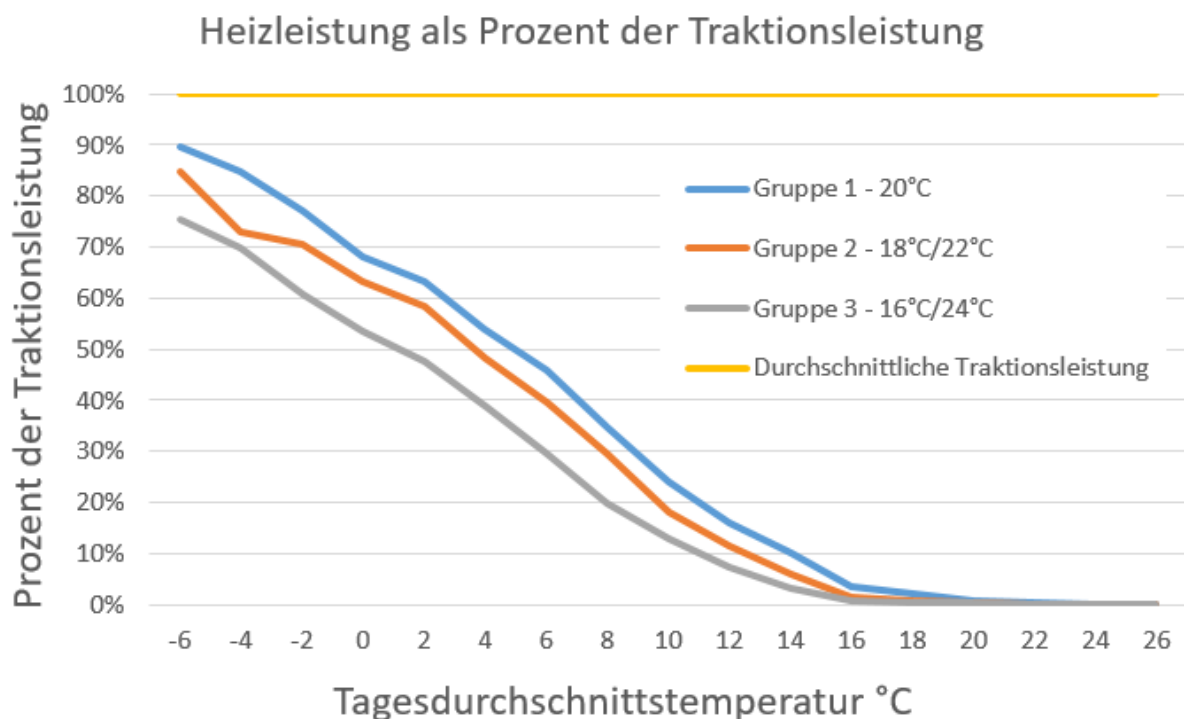


Abbildung 21: Heizleistung als Prozent der Traktionsleistung

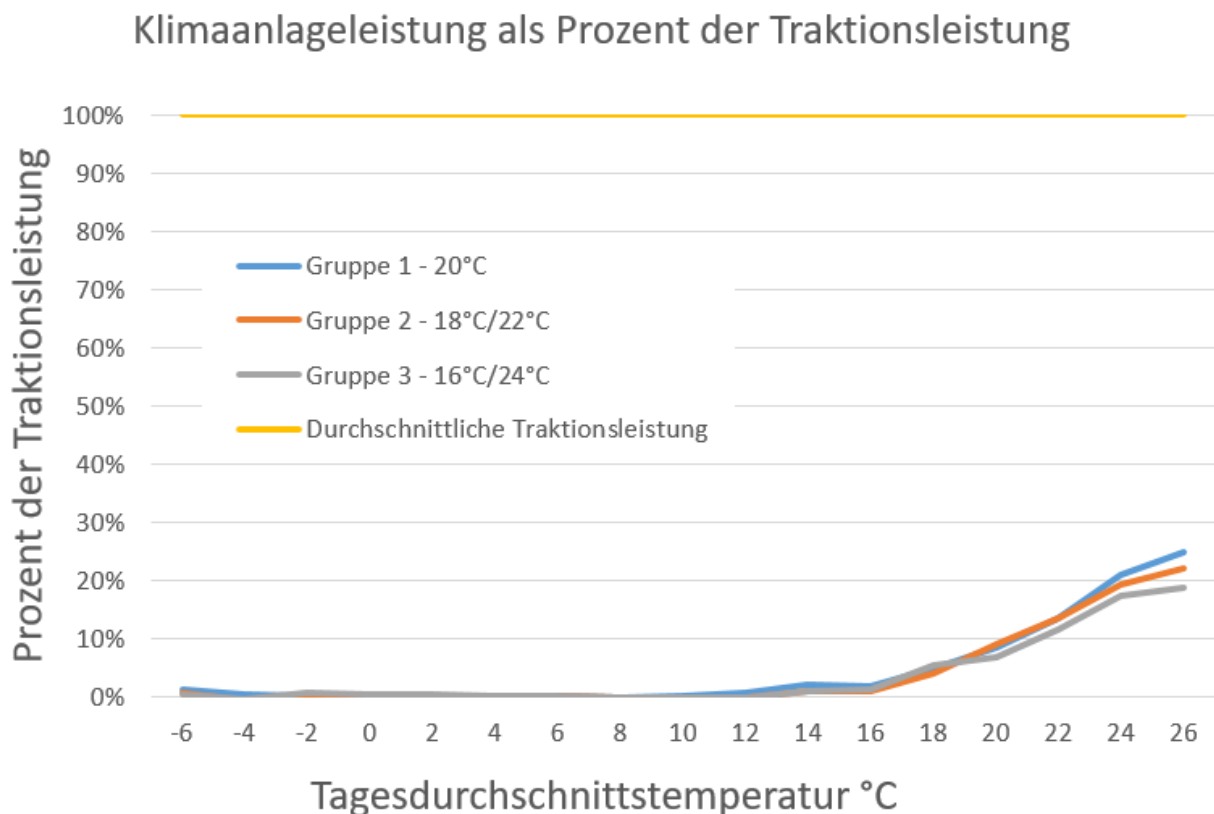


Abbildung 22: Klimaanlageleistung als Prozent der Traktionsleistung

Ergebnisse QR-Code Befragungen

Die Fahrgastbehaglichkeitsrückmeldungen sind in Tabelle 16 (Winter: 1.1.2022 - 28.02.2022) und Tabelle 17 (Winter: 1.7.2022 - 31.8.2022) zu sehen. (Die vollständigen Umfrageergebnisse sind in Tabelle 21 und Tabelle 22 im Anhang zu sehen.)

Wie bereits erwähnt, war die QR-Code Umfrage nicht repräsentativ. Daher können diese Ergebnisse bestenfalls einen grundlegenden Hinweis auf die Kundenpräferenzen geben. Die Stichprobe ist gemessen an der Anzahl aller Fahrgäste zu klein um statisch repräsentative Aussagen zu treffen. Aus diesem Grund wurde keine detaillierte Analyse der Kundenbefragungsdaten durchgeführt. Dennoch wurden die folgenden groben Schlussfolgerungen aus den Antworten abgeleitet:

- Es gibt keine Hinweise dafür, dass die Kunden Probleme mit den neuen Temperatursollwerteneinstellungen haben, weder im Sommer (weniger Klimatisierung) noch im Winter (weniger Heizung).
- Die meisten Umfrageteilnehmer sind weniger als 15 Minuten in den Fahrzeugen unterwegs.
- In allen Gruppen haben weniger Frauen als Männer die Umfrage ausgefüllt.
- Fahrgäste aller Altersgruppen, auch die über 65-Jährigen, haben die Umfrage ausgefüllt.
- In Anbetracht der Tatsache, dass die QR-Codes in vielen Fahrzeugen insgesamt 4 Monate lang angebracht waren, gab es wenige Antworten (weniger als 8 pro Tag).

Winter 2022 1.1.2022 - 28.2.2022			
	Gruppe 1 - 20°C	Gruppe 2 - 18°C	Gruppe 3 - 16°C
Anzahl Teilnehmer	193	138	127
Wie empfinden Sie heute die Temperatur in diesem Tram auf dieser Fahrt?			
Zu warm	27.98%	21.70%	11.81%
Angenehm	59.59%	63.00%	65.35%
Zu kalt	12.44%	15.20%	22.83%

Tabelle 16: Kundenfeedback Winter

Sommer 2022 1.7.2022 - 31.8.2022			
Anzahl Teilnehmer	Gruppe 1 - 20°C	Gruppe 2 - 18°C	Gruppe 3 - 16°C
	230	160	178
Wie empfinden Sie heute die Temperatur in diesem Tram auf dieser Fahrt?			
Zu warm	27.83%	29.38%	35.39%
Angenehm	56.09%	58.13%	58.43%
Zu kalt	16.09%	12.50%	6.18%

Tabelle 17: Kundenfeedback Sommer

Fahrzeugtemperaturmessungen

Während die QR-Code Befragungen durchgeführt wurden, wurde die Temperatur mit Datenloggern im Sommer und im Winter aufgezeichnet. Mit den Temperaturmessungen sollte festgestellt werden, ob Fahrzeuge mit unterschiedlichen Einstellungen auch unterschiedliche Temperaturen regulieren.

Aus Abbildung 23 und Abbildung 24 (Winter) wird ersichtlich, dass die Fahrzeuge den verschiedene Gruppen entsprechend unterschiedliche Innentemperatur aufweisen. Hinweis: die Temperaturdaten werden immer aufgezeichnet, nicht nur, wenn die Fahrzeuge eingeschaltet sind. Die Temperaturausreisser nach unten treten höchstwahrscheinlich auf, wenn die Trams ausgeschaltet und draussen geparkt sind. Die Temperaturmessungen im Sommer (siehe Abbildung 25 und Abbildung 26) sind viel schwieriger zu lesen. Es ist nicht ersichtlich, dass die unterschiedlichen Klimaanlageinstellungen zu einer sichtbar unterschiedlichen Innentemperatur führen. Dies ist auch dadurch erklärbar, dass die Unterschiede zwischen den eingestellten Kühlstufen viel kleiner ist als die Unterschiede bei den eingestellten Heizeinstellungen, wie bereits weiter oben beschrieben.

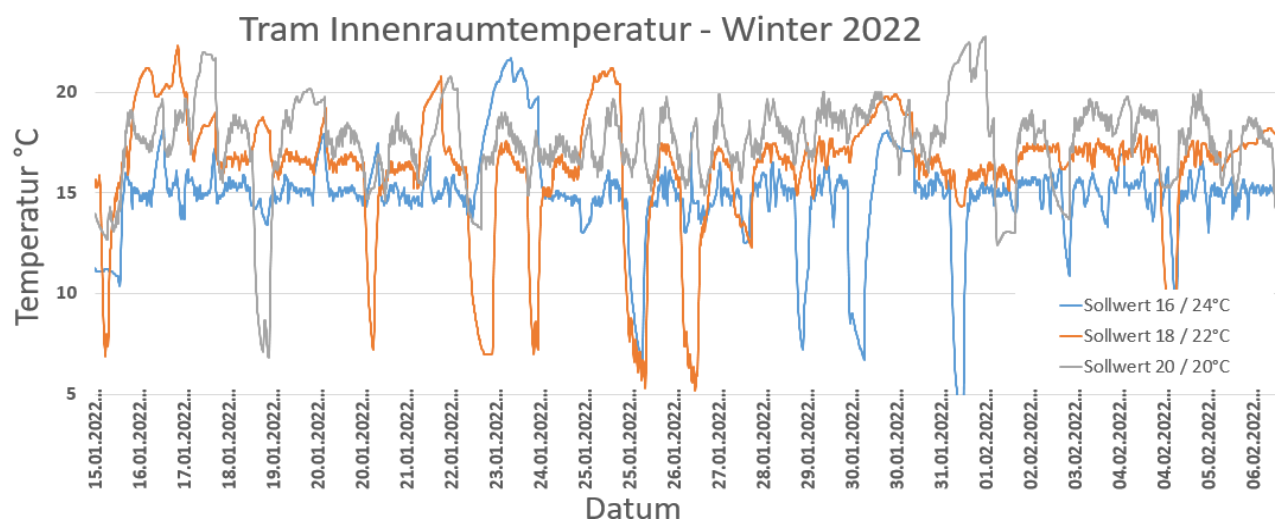


Abbildung 23: Temperatur Messungen Winter 2022

Ausgewählte Temperaturmesswerte 28.01.22

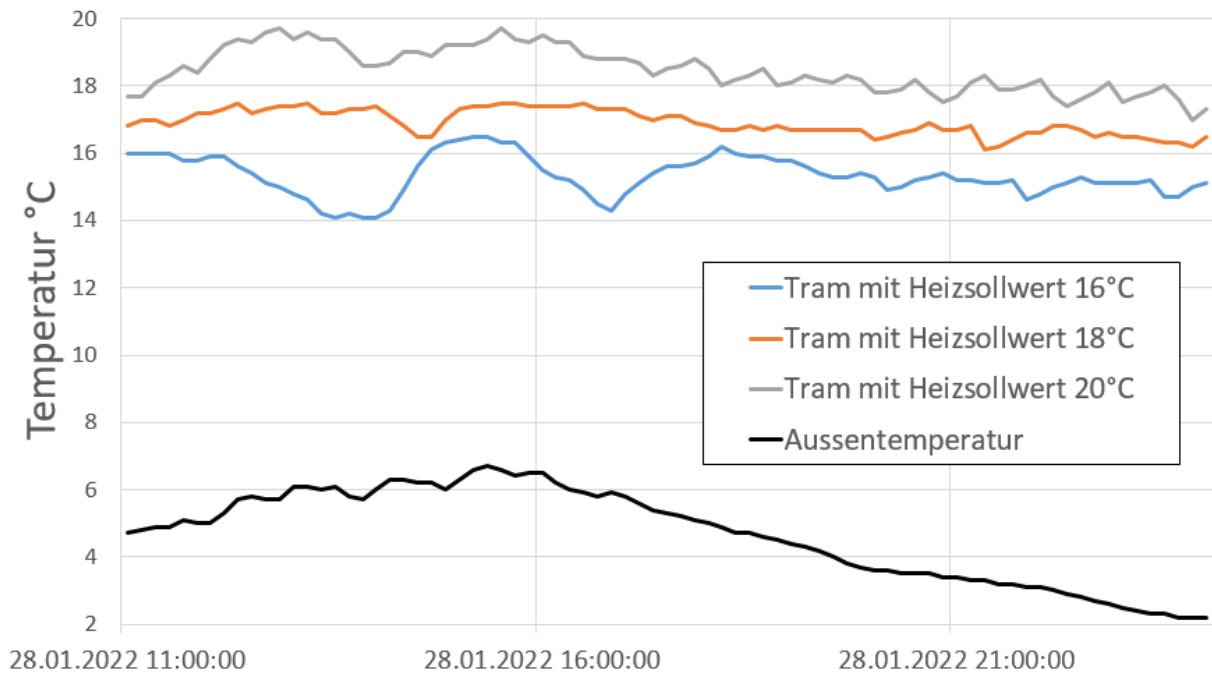


Abbildung 24: Temperatur Messungen Winter 2022 – 28.01.2022

Tram Innenraumtemperatur - Sommer 2022

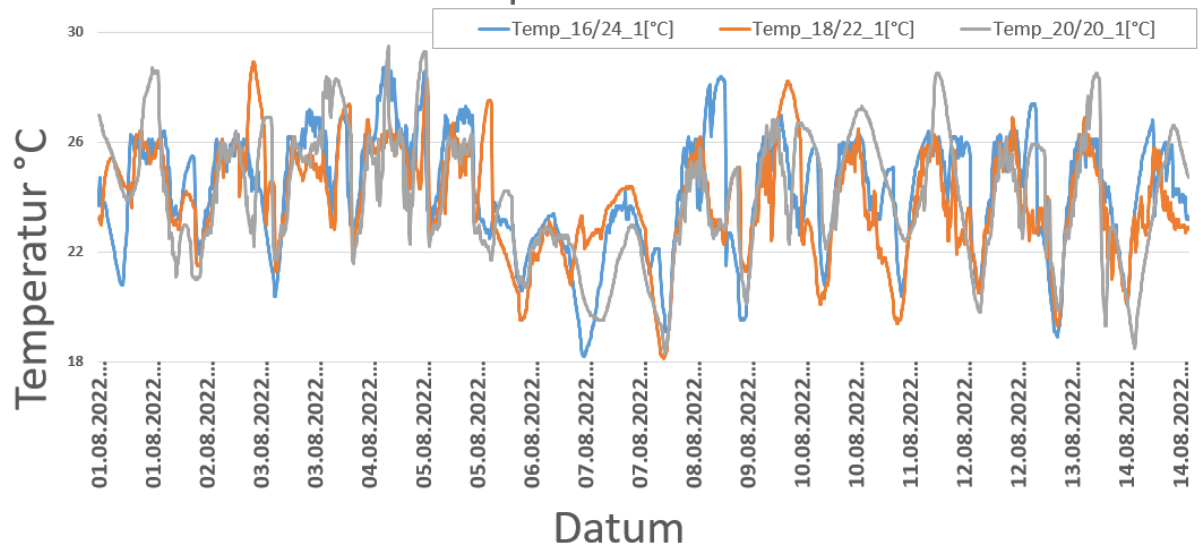


Abbildung 25: Temperatur Messungen Sommer 2022

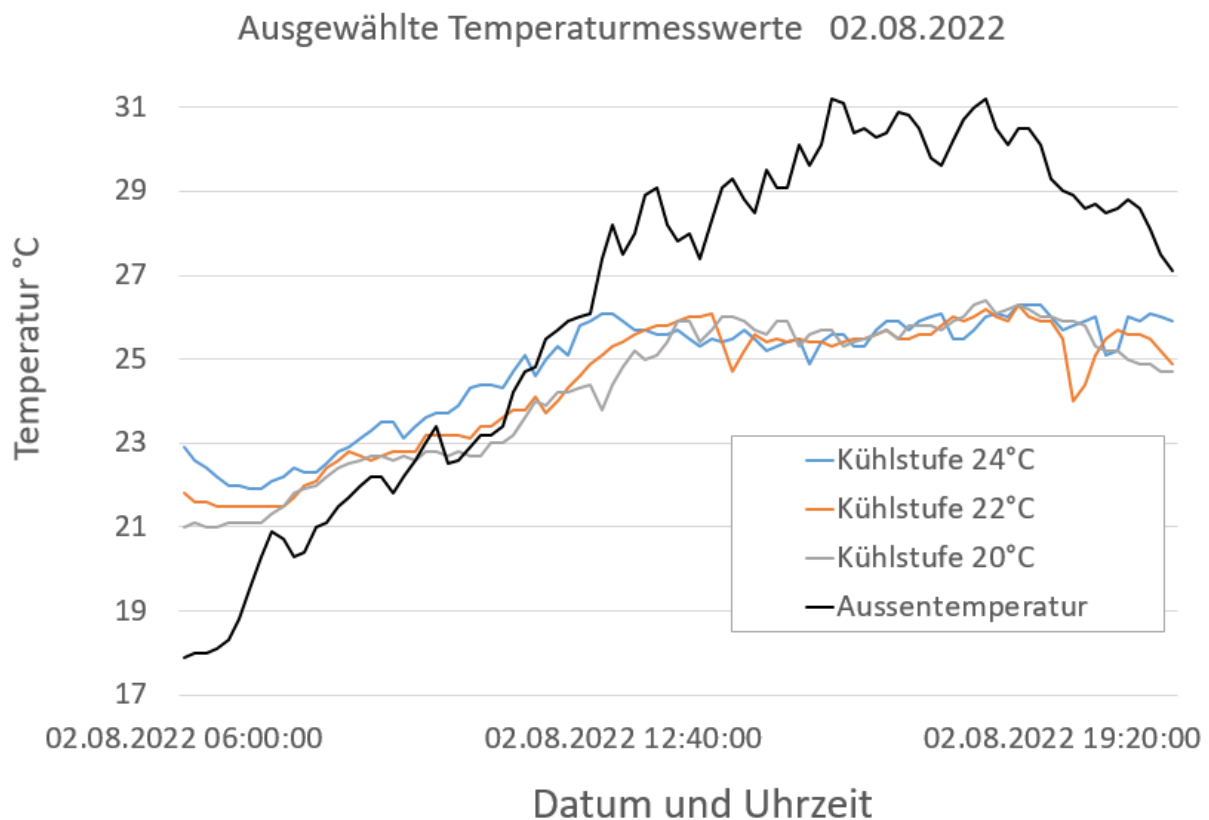


Abbildung 26: Temperatur Messungen Sommer 2022 – 02.08.2022

5. Diskussion

In dieser Studie wurden drei Ziele definiert:

1. Quantifizierung der Energie, die die VBZ bereits durch die Absenkung der Fahrzeugheizungs-Solltemperatur von 20°C auf 18°C und die Modifizierung der Kühlstufe von 20°C auf 22°C eingespart haben, um die Ergebnisse der Masterarbeit [17] zu verifizieren.
2. Quantifizierung der zusätzlichen Energieeinsparungen, die die VBZ durch eine zusätzliche Absenkung der Heiztemperatur von 18°C auf 16°C und eine Modifizierung der Kühlstufe von 22°C auf 24°C erzielen würden.
3. Ermitteln, wie die Fahrgäste die unterschiedlichen Temperatureinstellungen empfinden.

Energieeinsparungen Heizung:

Die Daten zeigen, dass eine Reduktion des Temperatursollwerts zu einer Reduktion des Energieverbrauchs über den Tages-Durchschnittstemperaturbereich von mindestens -6°C bis ca. 18°C führt (es waren keine Tage im Tagesdurchschnitt kälter als -6°C). Die theoretischen Arbeiten, die in der Vergangenheit durchgeführt wurden, einschliesslich der Masterarbeit [17], die über die VBZ-Cobra-Trams angefertigt wurde, werden bestätigt. Diese Flottenmessungen haben auch gezeigt, dass es sich bei den Energieeinsparungen durch Temperatursenkungen nicht nur um theoretische Ersparnisse handelt, sondern um eine reale flottenweite Reduktion, die über einen langen Zeitraum gemessen wurde. Es wurde ursprünglich befürchtet, dass es in der komplexen Welt des Trambetriebs, in der sich Türen immer wieder öffnen und schliessen und Fahrgäste ein- und aussteigen, es vielleicht nicht möglich ist, die Auswirkungen der Änderung des Temperatursollwerts zu messen. Diese Daten zeigen, dass dies nicht der Fall ist, und ein realer Effekt durchaus gemessen werden kann. Die im Rahmen dieses Projekts gesammelten Daten können zur Schätzung der jährlichen Energieeinsparungen herangezogen werden und bieten eine Rechtfertigung für die Durchführung der gleichen Änderungen an weiteren Fahrzeugen.

Energieeinsparungen Klimatisierung:

Die gemessenen Energieeinsparungen durch die Änderung der Kühlstufen waren viel geringer. Dies konnte erwartet werden, da die Änderung der Kühlstufe sehr wenig Einfluss auf die Temperatur im

Fahrgastraum hatte. Demzufolge ist auch erklärbar, dass die Fahrgäste im Sommer keinen grossen Unterschied zwischen den drei Gruppen bemerkt hatten. Die geringen Unterschiede zwischen den drei Gruppen in der tatsächlichen Temperatur ist höchstwahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die vorgeprogrammierten Kühlstufen (siehe Abbildung 10) zueinander sehr ähnlich sind und sie sich nur auf den Aussentemperaturbereich zwischen 20°C und 31°C auswirken (ab 31°C Aussentemperatur verhalten sich alle Kühlstufen gleich). Die VBZ können diesen Umstand nicht ohne eine zusätzliche Modifikation an der Klimaanlage verbessern. Trotzdem kann durch die Änderung der Kühlstufe laut den Messungen eine kleine Menge an Energie eingespart werden.

Hinweis zu Energieeinsparungen: Die für diese Studie gesammelten Daten wurden während des Zeitraums erhoben, in dem die Corona-Massnahme «Alle Türen auf» implementiert war. Das heisst, dass bei den VBZ (und auch anderen Betreibern) bei jeder Haltestelle alle Türen geöffnet wurden, egal, ob dies vom einem Fahrgast gewünscht wird oder nicht.

Eine Ausnahme bilden die Temperaturdaten und die Rückmeldungen der Kunden, die im Zeitraum vom 1.7.2022 und 31.08.2022 eingegangen sind. Es wird vermutet, dass die Energieeinsparungen nach Beendigung der Massnahme tatsächlich grösser sind.

Kundenbefragungen:

Ursprünglich war geplant, eine ähnliche Methode anzuwenden, wie sie die SBB bei der Messung der Passagierbehaglichkeit bei einer Temperatursenkung um 2°C in der S-Bahn-Flotte verwendet hat (siehe [12]). Fahrgästen wurde ein Tablet präsentiert, auf dem sie die Temperatur im Fahrzeug als "zu warm, angenehm oder zu kalt" bewerten konnten. Bei dieser Methode wurden Daten von fast allen Fahrgästen erhoben, nicht nur von einer kleinen Teilmenge, die bereit und in der Lage war, einen Fensterkleber zu lesen und einen QR-Code zu scannen. Die VBZ haben wie viele andere Institutionen während der Corona-Pandemie die persönliche Befragung von Kunden nicht erlaubt und die Autoren, wie viele andere Forscher auf der ganzen Welt, war mit der Herausforderung konfrontiert, während der Pandemie qualitative Forschung zu betreiben (siehe [14] und [19]). Die VBZ haben sich für die QR-Code-Befragung entschieden, die zwar eine Corona-konforme Datenerhebung ermöglicht, aber Einschränkungen mit sich bringt. Einige Beispiele für die Einschränkungen sind, dass die Daten nicht repräsentativ sind und dass es eher wenig Antworten gab - insgesamt etwa 1000 während rund vier Monaten, also weniger als 10 pro Tag. In diesem Fall kann man nur feststellen, dass es keine Hinweise dafür gibt, dass sich die Fahrgäste in den kälteren und den wärmeren Fahrzeugen anders fühlten gegenüber dem Status Quo, d. h., es gibt keinen Grund, diese Temperaturänderungen nicht vorzunehmen. Zu bedenken ist auch, dass es aufgrund der geringen Anzahl nicht repräsentativer Antworten nicht möglich war, nützliche Erkenntnisse darüber zu gewinnen, wie sich Faktoren wie Alter oder Geschlecht auf die Antworten auswirken. Es ist zum Beispiel gut belegt, dass Frauen im Allgemeinen höhere Innentemperaturen bevorzugen als Männer (siehe [9]).

Innenraumtemperaturmessungen:

Die Messung von Innentemperaturen ist äusserst schwierig. Es gibt nicht nur vertikale Temperaturgradienten, sondern höchstwahrscheinlich auch Temperaturunterschiede in Längsrichtung, die auf die Nähe von Fenstern, Wänden, Balgen sowie Heiz- und Kühlelementen zurückzuführen sind. Die im Winter durchgeführten Messungen reichten jedoch aus um zu zeigen, dass unterschiedliche Heizungseinstellungen zu unterschiedlichen Innenraumtemperaturen führten. Dies war bei den Messungen im Sommer nicht direkt zu erkennen. Wie bereits erwähnt, sind die Klimatisierungsstufen im Sommer einander sehr ähnlich, was eine mögliche Erklärung ist.

6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Schlussfolgerungen

1. Eine der einfachsten Methoden, um Energie im Bereich Heizen-Lüften-Kühlen zu sparen, ist die Reduzierung der Heizungs- und Kühlleistung.
2. Die Energieeinsparungen durch geänderte Temperatursollwerteinstellungen sind messbar und im Winter erheblich. Die Einsparung entspricht bei einer Reduktion der Heizeinstellung von 2°K (18°C → 16°C) rund 1.3 GWh pro Jahr (für 88 Cobra Tramfahrzeuge). Bei einer Annahme, dass ein Einfamilienhaus mit 4 Personen pro Jahr 4 MWh Energie verbraucht, entspräche das 325 Haushalten.
3. Es gibt keine Anzeichen dafür, dass sich die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Änderungen negativ auf die Fahrgastbehaglichkeit auswirken.

4. Die VBZ haben infolge des Projekt und in Erwartung der angespannten Stromlage im Winter 2022/2023 die neuen "aggressiv"-Temperatureinstellungen auf allen Cobra-Trams implementiert (16°C Sollwerttemperatur Heizen im Winter, 24°C Kühlstufe im Sommer). Diese Entscheidung wurde auch durch die Ergebnisse der Studie unterstützt, die eine Berechnung lieferte, wie viel Energie die VBZ durch diese Änderungen einsparen werden.
5. Die VBZ sind auch dabei ähnliche Temperatursenkungen bei weiteren Fahrzeugen der Flotte vorzunehmen (z.B. VBZ Flexity Trams).
6. Die Ergebnisse können von anderen Betreiber benutzt werden, um abzuschätzen, welche Energieeinsparungen durch ihre Temperaturabsenkung in diesem Winter erzielt wird.
7. Bei der Fahrgastbefragung gab es keine Indikation dafür, dass die Fahrgäste mit den auf 16°C geheizten Fahrzeugen unzufrieden waren. Dies könnte hindeuten, dass die Fahrgäste auch mit noch niedrigeren Temperaturen zufrieden sein könnten, was natürlich zu weiteren Energieeinsparungen führen würde. In einer weiteren Studie könnte die Zufriedenheit der Fahrgäste bei noch niedrigeren Temperaturen gemessen werden. Aktuell ist nicht bekannt, wo die Schwelle liegt, ab welcher die Fahrgäste mit der Temperatur im Trambetrieb unzufrieden werden.

Empfehlungen

1. In Anbetracht der erwarteten Energieknappheit diesen Winter wird allen ÖPNV-Anbietern empfohlen, die Heizung in ihren Fahrzeugen diesen Winter auf 16°C zu reduzieren und zu erwägen, diese Änderungen dauerhaft vorzunehmen.
2. Es wird empfohlen, dass alle Fahrzeughersteller von Anfang an mehr Möglichkeiten zur Energiemessung in ihrer Fahrzeugsteuerungssoftware anbieten. Dies ist für den Betreiber äusserst nützlich und sollte standardmässig implementiert werden können.
3. Es wird empfohlen, dass alle Fahrzeughersteller ihren Kunden mehr Möglichkeiten zur Temperatureinstellung in neu gebauten Fahrzeugen anbieten. Die Betreiber sollten die Freiheit haben, die Temperaturen selbst einzustellen.
4. Bei der Entwicklung von Szenarien zur Vorbereitung auf eine mögliche Stromknappheit ist es wichtig, zuerst die Temperatur der Fahrzeuge zu senken, bevor die Versorgung/Dienstleistung eingeschränkt wird.

7. Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

BLS	Bern-Lötschberg-Simplon-Bahn
Fz.	Fahrzeug(e)
HBU	Hilfsbetriebsumrichter
HVAC	Heating, Ventilation, Air-conditioning
HLK	Heizung Lüftung Klima
HMI	Human Machine Interface
Linie	Fixe Verkehrsverbindung mit definierten Haltestellen, die von öffentliche Verkehrsmittel (Tram/Bus) bedient wird
Kurs	Ein fest definierter Dienst für eine bestimmte Linie (definierte Start-, Haltestellen-, Endzeiten, etc...)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
RBS	Regionalverkehr Bern-Solothurn RBS
RhB	Rhätische Bahn
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SW	Software
TK	Temperatur-Kühlen
TH	Temperatur-Heizen
TPG	Transports Publics Genevois
VBZ	Verkehrsbetriebe Zürich
VBG	Verkehrsbetriebe Glattal

Tabelle 18: Abkürzungen und Definitionen

8. Literaturverzeichnis

- [1] 2022 Weather History at Zurich Airport, <https://weatherspark.com/h/y/148118/2022/Historical-Weather-during-2022-at-Zurich-Airport-Switzerland#Figures-Temperature>, 21.10.2022
- [2] Aktuelle Wetterdaten, <https://www.tecson-data.ch/zurich/seepozh/mythenquai.html>, 2022
- [3] Amri, H, R. N. Hofstädter and M. Kozek, "Energy efficient design and simulation of a demand controlled heating and ventilation unit in a metro vehicle," 2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems, Vienna, Austria, 2011, pp. 7-12, doi: 10.1109/FISTS.2011.5973605.
- [4] Bartłomiejczyk, M (2020). The reduction of auxiliaries power demand: The challenge for electromobility in public transportation. *Journal of Cleaner Production*. 252, 1-13, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619346463>.
- [5] Beusen, B., Degraeuwe, B., & Debeuf, P. (2013). Energy savings in light rail through the optimization of heating and ventilation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 23, pp. 50-54.
- [6] Bollinger, Beat <https://news.sbb.ch/artikel/84462/20-statt-22-grad-in-der-s-bahn-zuerich-kunden-aeusseren-sich-positiv?printpdf=1>, Zugriff 29.03.2021, SBB News.
- [7] Bolliger, Beat. "Energieeffizienz: Die SBB Testet Temperaturabsenkung in Zürcher S-Bahn." SBB News, 15 Mar. 2018, news.sbb.ch/artikel/72883/energieeffizienz-die-sbb-testet-temperaturabsenkung-in-zuercher-s-bahn.
- [8] Brunner, C. U.; M. Farner; R. Gartner; H. Huber; J. Nipkow (2000): Energiesparen bei Reisezugwagen. Enper-Bericht 5 des Schweizer Bundesamtes für Energie, 2000.
- [9] Chang TY, Kajackaite A (2019) Battle for the thermostat: Gender and the effect of temperature on cognitive performance. *PLoS ONE* 14(5): e0216362. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216362>
- [10] Göhlich, Dietmar & Ly, Tu-Anh & Künth, Alexander & Jefferies, Dominic. (2015). Economic Assessment of Different Air-conditioning and Heating Systems for Electric City Buses Based on Comprehensive Energetic Simulations. *World Electric Vehicle Journal*. 7. 398-406. 10.3390/wevj7030398.
- [11] Günselmann, W., "Technologies for increased energy efficiency in railway systems," 2005 *European Conference on Power Electronics and Applications*, Dresden, Germany, 2005, pp. 10 pp.-P.10, doi: 10.1109/EPE.2005.219712.
- [12] Isenschmid, Christoph; Menth, Stefan; Oelhafen, Peter: Energieverbrauch und Einsparpotential des S-Bahn-Glieder-zugs RABe 525 „Nina“ der BLS AG. *Schweizer Eisenbahn-Revue* 8-9/2013.
- [13] Isenschmid, Christoph. Energiesparmassnahmen Beim Triebzug BLS RABe 525 NINA. 15 Mar. 2018, www.tiki-toki.com/timeline/entry/1062045/Energiesparmassnahmen-beim-Triebzug-BLS-RABe-525-NINA/.
- [14] Jowett, Adam: Carrying out qualitative research under lockdown – Practical and ethical considerations, <https://blogs.lse.ac.uk/impactofsocialsciences/2020/04/20/carrying-out-qualitative-research-under-lockdown-practical-and-ethical-considerations/>, 20.04.2022.
- [15] Lenzuni, P, M. del Gaudio, D. Freda: Indoor Air Quality Aboard Italian High-Speed Trains. 7th International Ergonomics Conference ERGONOMICS 2018 – Emphasis on Wellbeing June 13-16, 2018 Zadar, Croatia, pp 199-206.
- [16] Rabih Al Haddad, Hussein Basma, Charbel Mansour. Analysis of heat pump performance in battery electric buses. 32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Jun 2019, Wroclaw, Poland. fhal-02169864f
- [17] Strebel, Sven (2017) Untersuchung Heizenergiebedarf eines Cobra-Trams im Winterbetrieb, Hochschule für Technik Rapperswil.
- [18] UIC International Union of Railways. Technologies And Potential Developments For Energy Efficiency And CO₂ Reductions In Rail Systems. Pp 98 – 101.
- [19] Wanat M, Borek AJ, Pilbeam C, Anthierens S and Tonkin-Crine S (2022) Conducting rapid qualitative interview research during the COVID-19 pandemic—Reflections on methodological choices. *Front. Sociol.* 7:953872. doi: 10.3389/fsoc.2022.953872
- [20] ZHAO, Shou-bin & GE, Guang-xu & YUAN, Hui & SHI, Wei-bing. (2016). Research Progress on Thermal Insulation Performance of Car Body of High-speed Train. *DESTech Transactions on Computer Science and Engineering*. 10.12783/dtcse/cmsam2016/3581.

9. Anhang

Leistungsdiagramme mit Standardabweichungen

Hinweis: Die Standardabweichungswerten sind mit der Excel-Funktion STABW.N berechnet.

Heizleistung (mit Standardabweichung)

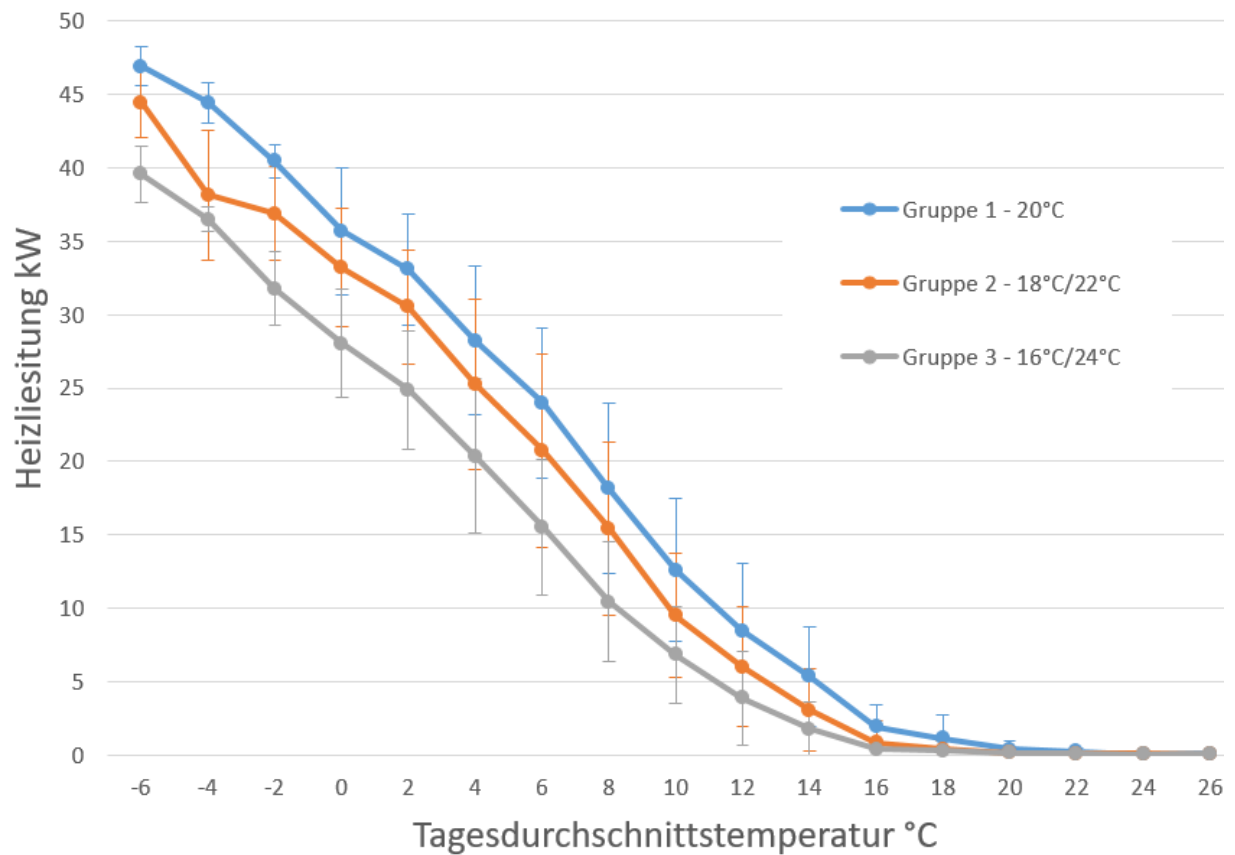


Abbildung 27: Heizleistung mit Standardabweichungen

Kühlleistung (mit Standardabweichung)

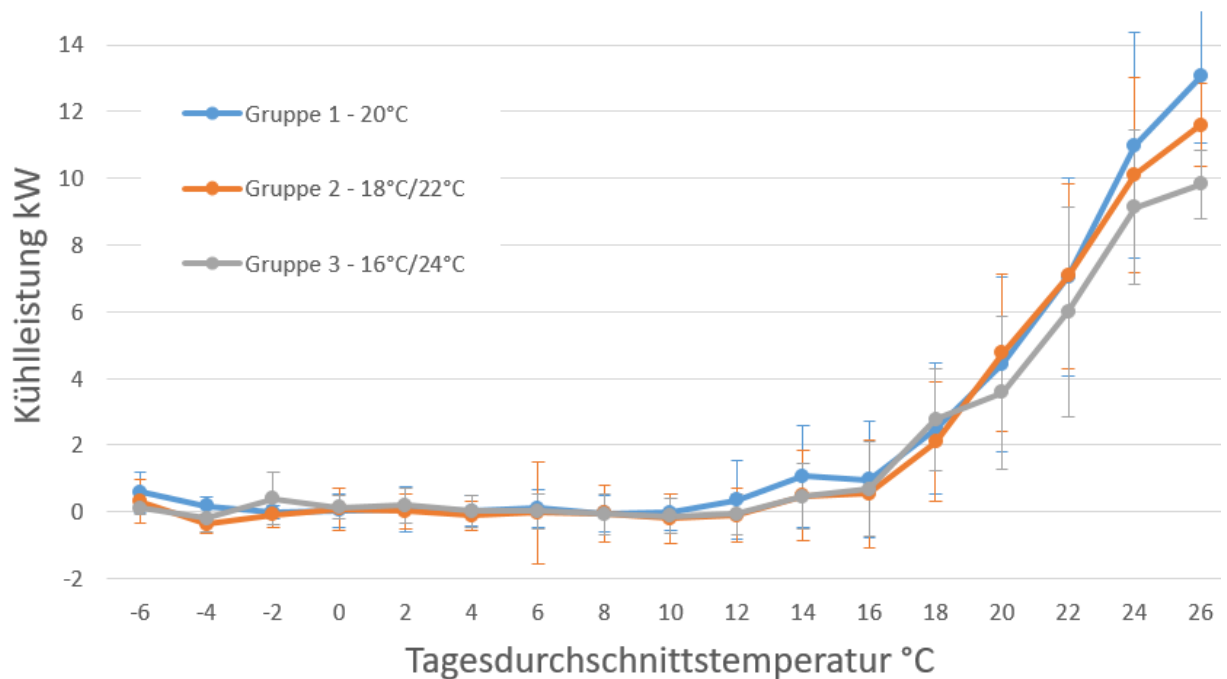


Abbildung 28: Kühlleistung mit Standardabweichungen

Datentabellen

Durchschnittliche Aussentemperatur °C	Heizleistung (kW)			Einsparung (kW)	
	Gruppe 1 - 20°C	Gruppe 2 - 18°C	Gruppe 3 - 16°C	Gruppe 20°C - 18°C	Gruppe 18°C - 16°C
-6	46.9	44.5	39.6	2.5	4.9
-4	44.4	38.2	36.5	6.3	1.7
-2	40.5	36.9	31.8	3.6	5.1
0	35.7	33.2	28.0	2.5	5.1
2	33.1	30.5	24.9	2.6	5.6
4	28.2	25.3	20.4	3.0	4.9
6	24.0	20.8	15.5	3.2	5.2
8	18.1	15.4	10.4	2.7	5.0
10	12.6	9.5	6.8	3.1	2.7
12	8.4	6.0	3.9	2.4	2.1
14	5.3	3.1	1.7	2.3	1.3
16	1.9	0.8	0.4	1.1	0.5
18	1.1	0.4	0.3		
20	0.4	0.1	0.1		
22	0.2	0.1	0.1		
24	0.1	0.1	0.1		
26	0.1	0.0	0.1		
Durchschnittliche Einsparung T < 16°C				2.9	3.7

Tabelle 19: Heizenergieverbrauch und Energieeinsparungen

Durchschnittliche Aussentemperatur °C	Kühlleistung (kW)			Einsparung (kW)	
	Gruppe 1 - 20°C	Gruppe 2 - 22°C	Gruppe 3 - 24°C	Gruppe 20°C - 22°C	Gruppe 22°C - 24°C
-6	0.5	0.3	0.1		
-4	0.1	-0.4	-0.2		
-2	0.0	-0.1	0.4		
0	0.0	0.0	0.1		
2	0.0	0.0	0.2		
4	0.0	-0.1	0.0		
6	0.1	-0.1	0.0		
8	-0.1	-0.1	-0.1		
10	-0.1	-0.2	-0.2		
12	0.3	-0.1	-0.1		
14	1.0	0.5	0.4		
16	0.9	0.5	0.6		
18	2.4	2.1	1.7	0.4	0.3
20	4.4	4.3	3.5	0.1	0.8
22	7.0	7.0	6.0	0.0	1.1
24	11.0	10.1	9.1	0.9	1.0
26	13.0	11.6	9.8	1.5	1.8
Durchschnittliche Einsparung T > 18°C				0.6	1.0

Tabelle 20: Klimaanlageenergieverbrauch und Energieeinsparungen

Winter 2022 1.1.2022 - 28.2.2022			
Anzahl Teilnehmer	Gruppe 1 - 20°C	Gruppe 2 - 18°C	Gruppe 3 - 16°C
	193	138	127
Wie empfinden Sie heute die Temperatur in diesem Tram auf dieser Fahrt?			
Zu warm	27.98%	21.70%	11.81%
Angenehm	59.59%	63.00%	65.35%
Zu kalt	12.44%	15.20%	22.83%
Wie lange ist heute Ihre ungefähre Aufenthaltsdauer in diesem Tram?			
1 bis 5 Minuten	21.24%	23.91%	28.35%
6 bis 10 Minuten	33.16%	30.43%	30.71%
11 bis 15 Minuten	30.05%	27.54%	22.83%
16 bis 30 Minuten	12.44%	13.04%	13.39%
Über 30 Minuten	3.11%	5.07%	4.72%
Sie sind...			
Weiblich	34.72%	33.33%	42.52%
Männlich	51.81%	57.25%	50.39%
Divers	8.81%	6.52%	4.72%
Keine Angabe	4.66%	2.90%	2.36%
Wie alt sind Sie?			
Unter 16 Jahre	12.44%	7.25%	7.87%
16 bis 24 Jahre	22.28%	18.12%	20.47%
25 bis 34 Jahre	22.80%	24.64%	20.47%
35 bis 44 Jahre	14.51%	20.29%	18.11%
45 bis 54 Jahre	10.36%	11.59%	13.39%
55 bis 64 Jahre	7.77%	8.70%	8.66%
Älter als 65 Jahre	6.22%	6.52%	9.45%
Keine Angabe	3.63%	2.90%	1.57%

Tabelle 21: Kundenfeedback Winter

Sommer 2022 1.7.2022 - 31.8.2022			
Anzahl Teilnehmer	Gruppe 1 - 20°C	Gruppe 2 - 22°C	Gruppe 3 - 24°C
	230	160	178
Wie empfinden Sie heute die Temperatur in diesem Tram auf dieser Fahrt?			
Zu warm	27.83%	29.38%	35.39%
Angenehm	56.09%	58.13%	58.43%
Zu kalt	16.09%	12.50%	6.18%
Wie lange ist heute Ihre ungefähre Aufenthaltsdauer in diesem Tram?			
1 bis 5 Minuten	20.00%	17.50%	19.66%
6 bis 10 Minuten	35.22%	28.13%	33.71%
11 bis 15 Minuten	23.91%	25.00%	26.40%
16 bis 30 Minuten	16.96%	23.13%	17.42%
Über 30 Minuten	3.91%	6.25%	2.81%
Sie sind...			
Weiblich	40.87%	45.00%	35.96%
Männlich	53.48%	46.88%	57.87%
Divers	2.61%	5.00%	3.37%
Keine Angabe	3.04%	3.13%	2.81%
Wie alt sind Sie?			
Unter 16 Jahre	7.39%	10.00%	9.55%
16 bis 24 Jahre	15.65%	16.88%	14.04%
25 bis 34 Jahre	26.52%	21.88%	24.16%
35 bis 44 Jahre	19.57%	19.38%	24.26%
45 bis 54 Jahre	16.09%	14.38%	8.43%
55 bis 64 Jahre	8.70%	7.50%	8.99%
Älter als 65 Jahre	5.22%	7.50%	8.43%
Keine Angabe	0.87%	2.50%	2.25%

Tabelle 22: Kundenfeedback Sommer