



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)

290 Quantifizierung der Energieeinsparungseffekte einer Sonnenschutzfolie auf Trams

Schlussbericht

Fabio Inderbitzin, VBZ Verkehrsbetriebe Zürich

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

Geoffrey Klein, VBZ Verkehrsbetriebe Zürich

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

Begleitgruppe

Prof. Dr. Ishan Pendharkar, Fachhochschule Nordwestschweiz

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

Stany Rochat, BAV

Projektnummer: 290

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.

Bern, den 5.11.2025

Inhalt

Executive Summary in Deutsch	3
Executive Summary en français.....	4
Executive Summary in English.....	5
1. Ausgangslage	6
2. Ziel der Arbeit	7
3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand	7
4. Ergebnisse	12
5. Diskussion	17
6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	18
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	19
Literaturverzeichnis	20
Anhang	20

Liste der Tabellen

Tabelle 1: Geräteeigenschaften Fahrgastraum-Klimageräte	9
Tabelle 2: EcoDrive Software Energiedatensatz.....	10
Tabelle 3: Standardabweichungen Kühlleistung nach Aussentemperatur.	13
Tabelle 4: Standardabweichungen Kühlleistung nach Tagesdurchschnittlicher Einstrahlung.....	14
Tabelle 5: Standardabweichungen Heizleistung nach tagesdurchschnittlicher Aussentemperatur.	15
Tabelle 6: Standardabweichungen Heizleistung nach Tagesdurchschnittlicher Einstrahlung.....	16
Tabelle 7: Betriebsdaten für die Verkehrsbetriebe Zürich.....	16

Liste der Abbildungen

Abbildung 1: VBZ Cobra-Tram	7
Abbildung 2: VBZ Cobra 3020 – Das InnoTram.....	8
Abbildung 3: Energiedatensätze (Beispiele)	11
Abbildung 4: Korrelation Tagesdurchschnittstemperatur und -Durchschnittseinstrahlung (1 Jahr).....	12
Abbildung 5: Kühlleistung InnoTram (Sonnenschutzfolien) vs. Restflotte in Abhängigkeit der Aussentemperatur.....	13
Abbildung 6: Kühlleistung InnoTram (Sonnenschutzfolien) vs. Restflotte in Abhängigkeit der durchschnittlichen Globalstrahlung am Standort Mythenquai.....	14
Abbildung 7: Durchschnittliche Heizleistung InnoTram (Sonnenschutzfolien) vs. Restflotte in Abhängigkeit der Aussentemperatur.....	15
Abbildung 8: Durchschnittliche Heizleistung InnoTram (Sonnenschutzfolien) vs. Restflotte in Abhängigkeit der durchschnittlichen Globalstrahlung am Standort Mythenquai.....	16

Executive Summary in Deutsch

Im Rahmen des Forschungs- und Innovationsprogrammes Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr des Bundesamtes für Verkehr (ESöV 2050) untersuchten die VBZ, ob spektral-selektive Sonnenschutzfolien auf Cobra-Trams den Energiebedarf der Klimatisierung senken, ohne im Winter mehr Energie für die Heizung zu benötigen. Die gemessene Kühlleistung des Fahrzeugs mit Sonnenschutzfolien lag um rund 1.1 kW unter jener der Referenzflotte. Im Winter war der Unterschied bei der Heizleistung deutlich kleiner, die mittlere Differenz der Heizleistung betrug lediglich 0.2 kW. Auf Jahresbasis resultiert daraus eine Einsparung von ca. 3.6 MWh pro Tram (ca. -25 %), was bei 300 CHF/MWh rund 1'080 CHF entspricht. Die Richtung der Effekte ist über Temperatur- und Strahlungsgruppen konsistent, wenngleich die Streuung der Einzelwerte hoch ist.

Um zu diesen Ergebnissen zu gelangen, wurde das InnoTram (Cobra 3020) mit Sonnenschutzfolien ausgerüstet und für rund ein Jahr wurde der Energiebedarf mit dem Rest der Flotte ohne Sonnenschutzfolien verglichen (*Referenzflotte*) verglichen. Die Energiemessung stützte sich auf die Fahrzeugsoftware (EcoDrive) und wurde mit Wetterdaten (Station Mythenquai) verknüpft. Der Erhebungszeitraum umfasste den 03.07.2024 bis 15.07.2025.

Für die Wirtschaftlichkeitsrechnung wurden betriebsnahe Annahmen angesetzt. Mit Materialkosten von ca. 7'000 CHF und einem Installationsaufwand von rund 6 Personentage ergibt sich eine Amortisationszeit von knapp 10 Jahren. Die Massnahme ist betrieblich niedrigschwellig und reversibel, sicherheitsrelevante Systeme bleiben unberührt. Negative Komfort- oder Sicherheitsauswirkungen wurden nicht festgestellt.

Diese Studie hat mehrere Limitationen: In der Studie wurde lediglich ein Fahrzeug in der Versuchsgruppe mit 87 Fahrzeugen in der Referenzgruppe verglichen. Dies führte unter anderem dazu, dass die Standardabweichung bei den Ergebnissen grösser ist, als die mittleren Unterschiede zwischen den beiden Gruppen. Eine breitere Einführung auf mehreren Fahrzeugen würde die statistische Aussagekraft deutlich erhöhen.

Kurzfazit: Sonnenschutzfolien senkten den Kühlbedarf des InnoTrams messbar, ohne den Heizbedarf in bedeutender Weise zu erhöhen, die Massnahme ist technisch einfach und wirtschaftlich in ca. 10 Jahren amortisierbar, sofern eine entsprechende Lebensdauer erreicht wird.

Executive Summary en français

Dans le cadre du programme de recherche et d'innovation Stratégie énergétique 2050 dans les transports publics de l'Office fédéral des transports (ESöV 2050), les VBZ ont étudié si l'application de films de protection solaire à sélectivité spectrale sur les trams Cobra permettait de réduire la consommation d'énergie pour la climatisation, sans pour autant augmenter significativement la consommation d'énergie pour le chauffage en hiver.

Les mesures ont montré que la puissance frigorifique du véhicule équipé de films de protection solaire était inférieure d'environ 1,1 kW à celle de la flotte de référence. En hiver, la différence au niveau de la puissance de chauffage était nettement plus faible, avec un écart moyen de seulement 0,2 kW. Sur une base annuelle, cela se traduit par une économie d'environ 3,6 MWh par tram (soit env. -25 %), ce qui correspond à 1 080 CHF par véhicule, sur la base d'un coût de l'énergie de 300 CHF/MWh. La direction des effets est cohérente à travers les différentes plages de température et de rayonnement, bien que la dispersion des valeurs individuelles soit importante.

Pour parvenir à ces résultats, le InnoTram (Cobra 3020) a été équipé de films de protection solaire et sa consommation énergétique a été suivie pendant environ un an, puis comparée à celle de la flotte de référence, qui ne disposait pas de ces films.

Les mesures d'énergie se sont appuyées sur les données logicielles du véhicule (EcoDrive) et ont été croisées avec les données météorologiques de la station de Mythenquai. La période d'observation s'étendait du 03.07.2024 au 15.07.2025.

Pour le calcul de la rentabilité, des hypothèses opérationnelles ont été utilisées. Avec des coûts matériels d'environ 7 000 CHF et un effort d'installation estimé à environ 6 journées-personne, la période d'amortissement est d'un peu moins de 10 ans. La mesure est simple à mettre en œuvre et réversible, sans impact sur les systèmes critiques pour la sécurité. Aucun effet négatif sur le confort ou la sécurité n'a été constaté.

Cette étude présente plusieurs limitations :

- Un seul véhicule a été équipé et comparé à une flotte de référence de 87 véhicules, ce qui limite la solidité statistique des résultats.
- L'écart-type des mesures est supérieur à la différence moyenne entre les deux groupes.

Une mise en place plus large sur plusieurs véhicules améliorerait nettement la fiabilité statistique et permettrait de tirer des conclusions plus robustes.

Conclusion : Les films de protection solaire ont permis de réduire de manière mesurable les besoins en climatisation de l'InnoTram, sans augmentation significative des besoins en chauffage. La mesure est techniquement simple, réversible et rentable sur une période d'environ 10 ans, à condition que la durée de vie du film soit suffisante.

Executive Summary in English

As part of the Energy Strategy 2050 Research and Innovation Program for Public Transport of the Federal Office of Transport (ESöV 2050), VBZ investigated whether spectrally selective solar protection films on Cobra trams could reduce the energy demand for air conditioning without significantly increasing the energy required for heating during winter.

The measurements showed that the cooling power of the vehicle equipped with solar protection films was approximately 1.1 kW lower than that of the reference fleet. In winter, the difference in heating power was much smaller, with an average difference of only 0.2 kW. On an annual basis, this results in an energy saving of around 3.6 MWh per tram (approx. -25%), which corresponds to CHF 1,080 per vehicle, based on an energy cost of CHF 300/MWh. The direction of the effects was consistent across different temperature and radiation ranges, although the variability of individual measurements was high.

To obtain these results, the InnoTram (Cobra 3020) was fitted with solar protection films and its energy consumption was monitored for about one year. The data was then compared to that of a reference fleet without films. Energy measurements were based on the vehicle's software (EcoDrive) and were correlated with weather data from the Mythenquai station. The observation period covered 03 July 2024 to 15 July 2025.

For the cost-effectiveness analysis, operational assumptions were applied. With material costs of approximately CHF 7,000 and an installation effort of around six person-days, the payback period was calculated to be just under 10 years. The measure is operationally simple and reversible, with no impact on safety-critical systems. No negative effects on comfort or safety were observed.

This study has several limitations:

- Only one vehicle was equipped and compared with a reference group of 87 vehicles, which limits the statistical significance of the results.
- The standard deviation of the data was larger than the mean differences between the two groups.

A broader implementation across several vehicles would greatly improve statistical reliability and provide a stronger basis for decision-making.

Summary conclusion: The solar protection films measurably reduced the cooling demand of the InnoTram without meaningfully increasing the heating demand. The measure is technically straightforward, reversible, and economically viable within roughly 10 years, provided that the film's service life is sufficient.

1. Ausgangslage

Die HLK trägt erwiesenermassen wesentlich zum Energieverbrauch des öffentlichen Verkehrs bei und bietet entsprechend grosses Potenzial für Energieeinsparungen. Dies wurde in der Fachliteratur vielfach belegt und konnte auch von der VBZ durch eigene Simulationen und Messungen an Tram- und Busfahrzeugen bestätigt werden. So schreibt beispielsweise Mikołaj Bartomiejczyk, dass der Energieverbrauch der Hilfsbetriebe (inkl. HLK) nahezu die Hälfte des gesamten Energieverbrauchs eines Fahrzeugs ausmachen kann [3]. Im Rahmen des ESöV-Projekts 239 haben die VBZ auch gemessen, dass an sehr kalten Tagen (Tagesdurchschnittstemperatur unter ca. 0°C) – je nach Temperatureinstellung (16°C – 20°C Heiztemperatur) – der Energiebedarf für das Heizen von Cobra-Trams zwischen 75% und 90% desjenigen für den Fahrtrieb betragen kann [8].

Es existieren verschiedene Ansätze, um den Energieverbrauch der HLK zu senken, zum Beispiel eine effizientere Wärme- und Kältebereitstellung (z. B. mit Wärmepumpe), eine verbesserte thermische Isolierung (Doppelverglasung, Türluftschleier, etc.), oder zum Beispiel bedarfsgerechte Lüftung mit CO₂ Sensoren. In diesem Projekt wird untersucht, wie viel Energie eingespart werden kann, wenn an den Fenstern eines VBZ-Cobra-Trams eine Sonnenschutzfolie angebracht wird. Diese Folien reduzieren die eindringende Sonneneinstrahlung, welche den Innenraum des Fahrzeugs im Sommer zusätzlich aufheizt.

Die Sonnenschutzfolie kann innerhalb von wenigen Tagen auf ein ganzes Fahrzeug aufgebracht werden und resultiert dabei lediglich in einer Modifikation der Oberfläche – ohne jegliche Notwendigkeit, das Fahrzeug selbst zu verändern, weder Hardware, Software, noch das elektrische System.

Die Fahrzeuge der Cobra-Flotte sind mit einer Software zur Fahrzeugsteuerung ausgestattet, welche automatisch mehrere Energieverbrauchsparameter aufzeichnet – unter anderem auch denjenigen für die HLK. Diese Methode zur Energieverbrauchsmessung wurde bereits im ESöV-Projekt P-239 erfolgreich eingesetzt, um Energieeinsparungen zu quantifizieren [8].

Die Ziele dieses Projekts sind die Quantifizierung der tatsächlichen Energieeinsparungen – insbesondere im Hinblick darauf, ob diese im Winter durch einen erhöhten Heizbedarf relativiert werden. Dies ist ein zentraler Punkt, da im Winter tendenziell mehr Energie fürs Heizen benötigt wird als im Sommer fürs Kühlen. Zudem steht im Sommer in der Schweiz generell mehr erneuerbare Energie (insbesondere wegen Photovoltaik) zur Verfügung als im Winter, wodurch es nicht ideal wäre, wenn durch Einsparungen im Sommer ein Mehrverbrauch im Winter entstehen würde. Aktuell ist die Versorgungssicherheit im Winter herausfordernd, während im Sommer künftig mit grossen Überschüssen an Solarstrom zu rechnen ist [18].

Die Erkenntnisse zu den Energieeinsparungen der Sonnenschutzfolien sowie die Material- und Installationskosten dienen den VBZ und anderen Verkehrsbetrieben als Grundlage für die Entscheidung, ob der Einsatz von Sonnenschutzfolien bei ihrer Fahrzeugflotte aus energetischer perspektive und wirtschaftlich sinnvoll ist.

Literatur und Branchenerfahrungen

Der Schutz vor Sonnenlicht und Hitze ist ein grundlegendes menschliches Bedürfnis – und seit langer Zeit Gegenstand technischer Entwicklungen [8]. Sonnenschutzfolien werden seit den 1960er-Jahren eingesetzt, zunächst zur Reduktion von Lichteinfall und später, ab den 1990er-Jahren, auch zur Reflexion von Wärmestrahlung [10].

Die bestehende Forschung zu Sonnenschutzfolien konzentriert sich überwiegend auf Anwendungen im Gebäudebereich. Bahadori-Jahromi konnte zum Beispiel in einer Studie zeigen, dass durch den Einsatz von Fensterfolien der jährliche Energiebedarf für Kühlung um bis zu 35 % reduziert werden kann, während sich der Heizenergiebedarf im Winter um lediglich 2 % erhöht [4]. Eine Untersuchung an zwei Bürogebäuden in Shanghai wies Energieeinsparungen zwischen 18 % und 22 % durch Sonnenschutzfolien nach. In Innenräumen wurden dabei Temperaturreduktionen von 3 bis 5 Kelvin gemessen, was den Einsatz von Klimaanlage entsprechend reduziert [15]. Die Amortisationszeit lag in mehreren Studien typischerweise zwischen 3 und 5 Jahren, abhängig von Gebäudetyp, Klimazone und Energiepreisen.

Für den öffentlichen Verkehr existieren bisher weniger Studien. Der Hersteller ContraVision, bekannt für Werbefolien auf Bussen, liess durch Theseus-FE untersuchen, dass sich die HLK-Last durch spezielle Folien um bis zu 23 % reduzieren lässt [6]. Ein Bericht im Auftrag der EU-Rail erwähnt, dass Sonnenschutzfolien bis zu 35 % der Wärmeeinstrahlung reflektieren können [8].

Darüber hinaus haben die Autoren mit mehreren Verkehrsunternehmen gesprochen, darunter die KVB, die Wiener Linien und der RBS, die Sonnenschutzfolien auf ausgewählten Fahrzeugen installiert haben

– allerdings ohne systematische Messung des Energieverbrauchs. Sie verfolgten verschiedene Ziele, die Reduktion der Innenraumtemperatur in Fahrzeugen ohne Klimaanlage und die Minimierung der direkten Sonneneinstrahlung in Fahrzeugen ohne Sonnenstoren. Die Erfahrungen aller drei Betreiber waren durchwegs positiv: RBS beispielsweise berichtet von weniger Fahrgastbeschwerden und spürbar kühleren Innenräumen in den beklebten Fahrzeugen.

2. Ziel der Arbeit

Die VBZ verfolgen mit dem vorliegenden Projekt drei Hauptziele:

1. **Quantifizierung der Energieeinsparungen im Sommer:**
Es wird davon ausgegangen, dass das mit Sonnenschutzfolie beklebte Cobra-Tram (Testfahrzeug) im Sommer messbare Einsparungen beim Energieverbrauch für die Kühlung im Vergleich zur restlichen Flotte aufweist. Ziel ist es, diese Energieeinsparungen zu quantifizieren.
2. **Bewertung des Heizenergiebedarfs im Winter:**
Durch die reduzierte Sonneneinstrahlung im Testfahrzeug ist es denkbar, dass im Winter mehr Energie für das Heizen benötigt wird. Im ungünstigsten Fall könnte dieser zusätzliche Energiebedarf sogar grosser sein, als die Einsparungen in der Sommerperiode. Ziel ist es daher, den zusätzlichen Heizenergiebedarf im Winter zu quantifizieren und mit den Einsparungen im Sommer zu vergleichen.
3. **Bereitstellung einer Entscheidungsgrundlage für Betreiber:**
Die gewonnenen Erkenntnisse und die quantifizierten Netto-Energieeinsparungen sollen in einer Form aufbereitet werden, die eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die VBZ – und gegebenenfalls weitere Verkehrsunternehmen – ob eine Installation sinnvoll ist.

3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

Übersicht:

Die Daten wurden zwischen 3. Juli 2024 bis 15. Juli 2025 gesammelt. Die Sonnenschutzfolien wurden auf einem Fahrzeug installiert. Die HLK-Energie wurde bei der gesamten Cobra-Flotte von 88 Fahrzeugen gemessen von den VBZ durchgeführt. Die Cobra-Trams (siehe Abbildung 1) 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.

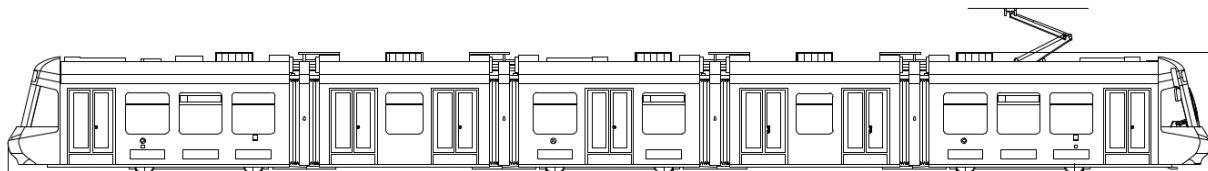


Abbildung 1: VBZ Cobra-Tram

Das VBZ InnoTram:

Die Sonnenschutzfolie wurde auf dem Cobra-Tram 3020 – dem InnoTram [13] – installiert. Das InnoTram (siehe Abbildung 2) ist ein Cobra-Tram, das dazu dient, neue Technologien gemeinsam mit Lieferanten, Universitäten und Hochschulen zu testen, mit diesen Partnern zusammenzuarbeiten und die Entwicklungen der Öffentlichkeit zu präsentieren. Die Sonnenschutzfolie wurde zum Start des InnoTrams am 2. Juli 2024 angebracht. Der Grund, weshalb in diesem Projekt nur ein Fahrzeug in der Versuchsgruppe eingesetzt wurde, liegt darin, dass Sonnenschutzfolien kein Standard sind bei den VBZ Cobra Trams, und diese Massnahme nur für ein Fahrzeug zu Testzwecken vorgesehen war.



Abbildung 2: VBZ Cobra 3020 – Das InnoTram

Folgendes wurde in der VBZ-Medienmitteilung kommuniziert:

"Folien sollen Aufheizen der Fahrzeuge mindern.

In den Wintermonaten sparen die VBZ unter anderem mit einer 2022 vorgenommenen leichten Absenkung der Temperatur im Fahrgastraum Energie. Auch für die warme Jahreszeit werden mögliche Ansätze für mehr Energieeffizienz geprüft. Während sich die Fahrzeughülle nur mit grossem technischem und finanziellem Aufwand optimieren lässt, erwarten Geoffrey Klein und Iwo Fischer von mit einer Wärmeschutzfolie beklebten Scheiben, dass sich der Fahrgastraum wesentlich weniger aufheizt, was sich direkt in einem geringeren Kühlungsbedarf niederschlägt. Versuche anderer Verkehrsbetriebe bestätigen diesen positiven Effekt. In Wien beispielsweise senken Folien die Innentemperatur bei direkter Sonnenbestrahlung im Sommer um bis zu 4 Grad, was sich in einem erheblich tieferen Energieverbrauch für die Kühlung niederschlägt. [11]"

Die Sonnenschutzfolien:

Folgendes Produkt wurde verwendet: 3M™ Prestige 40 Exterior Window Film Sonnenschutzfolie [2].

- eine metallfreie, spektral-selektive, Multi-Layer Sonnenschutzfolie mit kratzfester Oberfläche und wetterbeständigem Acrylatklebstoff.
- zur Applikation auf der Aussenseite von Glasscheiben vorgesehen.
- Materialbasis - Multi-Layer PET/PMMA
- Klebstoff - Acrylatklebstoff
- Schutzfolie - Silikonisiertes PET

Auswahl: Dieses Produkt wurde aufgrund positiver Rückmeldungen von anderem Betreiber ausgewählt, darunter die Kölner Verkehrs-Betriebe (KVB), die Wiener Linien und der Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS).

Installation: Die Folien wurden an allen Fenstern und Türen des Fahrgastraums installiert, mit Ausnahme der gewölbten Heckscheiben des Fahrzeugs. Eine adäquate Installation der Folie auf einem gewölbten Fenster war nicht möglich. Selbst wenn es möglich gewesen wäre, bestand keine Absicht, etwas auf das Fahrertraumfenster zu installieren, da das potenzielle Sicherheitsrisiko einer beeinträchtigten Sicht nicht geprüft wurde. Die Installationszeit beträgt ca. 1,5 Tage.

Wartung: Nach einer Trocknungszeit von etwa einer Woche, während der das Fahrzeug nicht gewaschen werden durfte, hat die Sonnenschutzfolie keinen weiteren Einfluss auf die Fahrzeugwartung und erfordert selbst keine Wartungstätigkeiten. Das Fahrzeug kann auch ohne Bedenken gewaschen werden.

Lebensdauer: 3M macht keine verbindliche Aussage zur Lebensdauer der installierten Sonnenschutzfolie. Dies liegt vermutlich daran, dass diese von zahlreichen externen Faktoren (Fahrzeug, Installation, Temperaturen usw.) beeinflusst werden könnte. Die Autoren haben diesbezüglich Rücksprache mit dem RBS gehalten. RBS teilte mit, dass die Sonnenschutzfolie auf einem ihrer Fahrzeuge seit fast sechs Jahren im Einsatz sind – ohne sichtbare Schäden oder Alterungserscheinungen. Derzeit sehen sie keine Hinweise auf eine begrenzte Lebensdauer der Folieninstallation.

Das Fehlen konkreter Angaben zur Lebensdauer erschwert jedoch die Wirtschaftlichkeitsbewertung und die fundierte Entscheidungsfindung hinsichtlich einer breiteren Anwendung der Folien.

Temperatureinstellungen und Energiemessungen:

Der Heizsollwert und die Kühlstufe wurde bei allen Fahrzeugen wie folgt eingestellt:

- Winter: Solltemperatur Heizung 16°C
- Sommer: Kühlstufe 22°C (Hinweis: Kühlstufe 22°C ≠ Solltemperatur 22°C)¹

Jedes Tram speichert täglich automatisch die Energiemenge, die für Heizung und – indirekt – für die Klimaanlage verbraucht wird. Diese Daten werden regelmässig ausgelesen und für Analysen genutzt.

Cobra-Tram Heizung und Kühlung [12]

Die Heizungselemente des Cobra-Trams sind 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 entspricht dies praktisch der Stundenleistung jedes der fünf Motoren desselben Trams. Es werden Widerstandsheizungen eingesetzt, die mit 600 VDC (Spannungsebene der Fahrleitung) betrieben werden [15]. 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 1 die Daten einer (einzelnen) Fahrgastraum-Klimaanlage.

Geräteeigenschaften 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 1: Geräteeigenschaften Fahrgastraum-Klimageräte

Energiemessfunktionalität des Cobra-Trams [12]

Die Cobra-Tram Flotte (inklusive der Fahrzeugsteuerung) wurde vom Fahrzeuglieferanten Bombardier Transportation geliefert (heute Alstom). Die Energiemessungsfunktion 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

¹ Wie die Innenraumtemperatur der Cobra-Trams in Abhängigkeit von den Temperatureinstellungen und der Aussentemperatur geregelt wird, ist im ESöV-Projekt 239 – Schlussbericht detailliert beschrieben. Beim Heizen wird auf einen fixen Wert geregelt, beim Kühlen jedoch nicht. Deshalb ist der Ausdruck "Kühlstufe" treffender als "Solltemperatur" [12].

Tabelle 2) aufgezeichnet. Dieses neue Cobra Fahrzeugsteuerungssoftware Release wurde vor einigen Jahren im Rahmen eines VBZ EcoDrive Programms entwickelt.

Der Energieverbrauch wird von der Fahrzeugsteuerungssoftware berechnet, wobei sowohl intern gemessene Werte wie die Netzspannung als auch die Widerstandswerte (für die einzelnen Heizelemente) verwendet werden. Die Energiemessfunktion der Fahrzeugsoftware 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 beginnt einen neuen Datensatz. 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 so gewählt, weil die Fahrzeugdiagnosedatenbank mit nur wenig Speicherplatz ausgestattet ist.

Diese Softwareversion wurde in erster Linie zur Messung des Traktionsenergieverbrauchs entwickelt, um die Tramfahrerinnen und Tramfahrer beim energieeffizienteren Fahren zu unterstützen. Sie beinhaltet jedoch auch Messungen des HLK-Energieverbrauchs, die für diese Studie verwendet wurden.

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

Tabelle 2: EcoDrive 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 Heizung 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.

Methodik:

Schritt 0: Vorprojekt (Jan. 2024 – 2. Jul. 2024)

Das VBZ-InnoTram-Projekt wurde genehmigt und die Sonnenschutzfolie dafür beschafft. Die Installation wurde vom VBZ-Schriftenmalerei-Team geplant und durchgeführt.

Schritt 1: Energieverbrauchsdatenerhebung (03.07.2024 – 15.07.2025)

Alle Fahrzeuge erfassen täglich ihre Energiedaten und speichern diese im Fahrzeugdiagnosesystem. Die gesammelten Diagnosedaten werden vierteljährlich von den Instandhaltungsteams ausgelesen und in einer zentralen Diagnosedatenbank abgelegt.

Erfassung der Heizdaten:

Die Fahrzeugsteuerung registriert, ob ein Heizgerät eingeschaltet ist. Ist dies der Fall, wird die gemessene Fahrleitungsspannung im Quadrat mit dem Widerstandswert des Heizgeräts sowie einem Korrekturfaktor multipliziert und über die Zeit integriert. Dieser Vorgang wird für alle Heizgeräte durchgeführt und die Ergebnisse summiert, sodass der gesamte Heizenergieverbrauch der 600-V-Widerstandsheizungen resultiert. Anschliessend wird dieser Energiewert durch die Einsatzdauer des Fahrzeugs geteilt (Zeitraum zwischen Anmeldung und Abmeldung auf einer Linie), wodurch eine mittlere Heizleistung resultiert. Die Einsatzdauer wird aus dem integrierten Bordinformationssystem (IBIS) entnommen. So wird etwa täglich ein mittlerer Heizwert für den ganzen Tag (Einsatz) generiert.

Erfassung der Kühlkosten:

Die Kühlkosten werden indirekt aus den Messungen des Hilfsbetriebe-Umrichter ermittelt. Dabei wird der gemessene Energieverbrauch des HBU ebenfalls durch die oben genannte Einsatzdauer geteilt, wodurch eine mittlere HBU-Leistung resultiert. Von diesem Wert wird ein konstanter Leistungsanteil abgezogen, der für nicht klimarelevante Systeme (z. B. Beleuchtung, Steckdosen, Türen) angesetzt wird. Dieser Anteil wird als über das Jahr hinweg konstant angenommen. Der verbleibende Restwert stellt die mittlere Kühlleistung des Cobra-Fahrzeugs pro Einsatz dar.

Schritt 2: Datenanalyse und schreiben des Schlussberichts (Jul. 2025 – Aug. 2025)

Die Energiedaten werden analysiert und der Schlussbericht wird erstellt.

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. 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 (24h-Durchschnitt) wurde zu jedem Energiedatensatz hinzugefügt (die Quelle hierfür war die Wetterstation Mythenquai der Stadt Zürich [1]). Die durchschnittliche Heiz- und Kühlleistung pro Linie/Kurs wird berechnet, indem die Energie für Heizen oder Kühlen pro Messung (kWh) durch die Zeit (h), in der das Fahrzeug eingeschaltet war, dividiert wurde, um sie in eine Leistung (kW) umzurechnen (siehe Abschnitt Methodik). Dadurch wurde für jede Messung eine durchschnittliche Tagesheiz-/kühlleistung berechnet und der entsprechenden Tagesdurchschnittstemperatur zugeordnet. Wenn ein Fahrzeug im Einzelfall mehrfach pro Tag in den Betrieb ausrückt, werden mehr als ein Energiedatensatz pro Tram und Tag generiert. Diese Datensätze werden dann nicht speziell miteinander verrechnet, sondern es resultieren dann einfach mehr als eine mittlere Heiz- oder Kühlleistung für dieses Tram an diesem Tag. Die Daten wurden dann in Temperaturgruppen gruppiert, eine Gruppe pro zwei Grad Celsius.

Beispielhafte Darstellung der Daten:

date_start	fahrzei	kWh	kWh H	kWh HBU	duration driving	duration	pro h	kWh Tr pro h Fahrzeit	kWh heiz pro h Gesamtzei	iz pro l	hat geh	kWh HBU pro h Fahrzeit	pro h
2024-07-03 00:00:00	3045	995.6	25.88	178.71	46135	86684	41.347	77.68852281	1.074800425	2.0195	1	13.94507424	7.4219
2024-07-03 00:00:00	3031	750.24	16.36	137.69	35842	54847	49.244	75.35472351	1.073823545	1.6432	1	13.829697	9.0376
2024-07-03 00:00:00	3016	210.45	4.39	33.69	9768	15718	48.201	77.56142506	1.005471434	1.6179	1	12.41646192	7.7162
2024-07-03 00:00:00	3070	414.79	9.03	73.49	22086	33960	43.971	67.61043195	0.957243816	1.4719	1	11.97881011	7.7905
2024-07-03 00:00:00	3029	717.04	11.47	125	31762	51404	50.217	81.27145646	0.803283791	1.3	1	14.16787356	8.7542
2024-07-03 00:00:00	3037	780.76	11.72	142.09	32701	54841	51.252	85.95260084	0.769351398	1.2902	1	15.64245742	9.3274
2024-07-03 00:00:00	3041	1094.5	18.07	182.13	45064	86759	45.415	87.43404935	0.749801173	1.4435	1	14.54970708	7.5573
2024-07-03 00:00:00	3024	738.28	11.47	132.57	32642	55498	47.89	81.42295202	0.744026812	1.265	1	14.62079529	8.5994
2024-07-03 00:00:00	3027	690.18	8.79	135.99	32728	55172	45.035	75.91811293	0.573551802	0.9669	1	14.95856759	8.8734
2024-07-03 00:00:00	3044	726.56	7.81	126.22	33230	52715	49.618	78.71248872	0.533358627	0.8461	1	13.67414986	8.6198
2024-07-03 00:00:00	3058	830.81	11.96	156.74	37616	91157	32.811	79.51180349	0.472327962	1.1446	1	15.00083803	6.19
2024-07-03 00:00:00	3006	824.95	14.4	167.97	42524	116729	25.442	69.83867933	0.444105578	1.2191	1	14.22001693	5.1803
2024-07-03 00:00:00	3049	762.45	5.86	131.84	32548	52436	52.346	84.33144894	0.402319017	0.6482	1	14.58227848	9.0515
2024-07-03 00:00:00	3018	1007.3	10.5	184.81	47158	105068	34.514	76.89791764	0.359767008	0.8016	1	14.1082319	6.3322

Abbildung 3: Energiedatensätze (Beispiele)

Hinweis: Fahrten mit kurzer Dauer (kleiner als 60 Minuten) wurden aus der Studie entfernt. Es wird vermutet, dass diese bei diesen kurzen Fahrten möglicherweise 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 Fahrten unter einer Stunde ist dies jedoch genau umgekehrt, was die Messungen verfälschen würde. Die gleiche Methode wurde in P-239 verwendet [12]. Ausserdem wurden Fahrten aussortiert, bei denen das Verhältnis aus Fahrzeit und Gesamtzeit unter

35% lag, weil hier davon ausgegangen werden muss, dass es sich um keinen normalen Fahrgastbetrieb gehandelt hat.

HBU und Klimaanlage-Energie

Hinweis zur Klimaanlageenergie: Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei der Kühlenergie um eine indirekte Messung. Es wurde nämlich die HBU-Energie gemessen. Diese beinhaltet einen konstanten Teil (Tagesdurchschnittstemperatur unter ca. 12°C) und einen variablen Teil (Tagesdurchschnittstemperatur über ca. 12°C) (Siehe [12]). Der konstante 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 durchschnittliche Tages-Kühlenergie auf 6.1 kW berechnet (als Differenz zwischen 15 kW und 8.9 kW).

4. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zur Kühlleistung und Heizleistung mit und ohne Sonnenschutzfolie aufgeführt. Die Energiedaten wurden mit den Daten zur Tagesdurchschnitts-Sonneneinstrahlung und Tagesdurchschnittstemperatur der Messstation Mythenquai verknüpft. Es zeigte sich, dass die Sonneneinstrahlung stark ($r \approx 0.79$) mit der durchschnittlichen Temperatur korrelierte (siehe Abbildung 4). Die Analyse wurde durchgeführt, um aufzuzeigen, dass Temperatur und Strahlung nicht völlig unabhängige Variablen sind, sondern häufig miteinander in Zusammenhang stehen. Daher erlaubt die Auswertung des Energieverbrauchs in Abhängigkeit von der Aussentemperatur auch Rückschlüsse auf die Wirkung der Sonnenschutzfolien – obwohl nicht die Temperatur selbst, sondern die Einstrahlung den entscheidenden Einfluss hat.

Zusammenhang zwischen Tagesmittelwerten von Temperatur und Globalstrahlung
Messstation Mythenquai

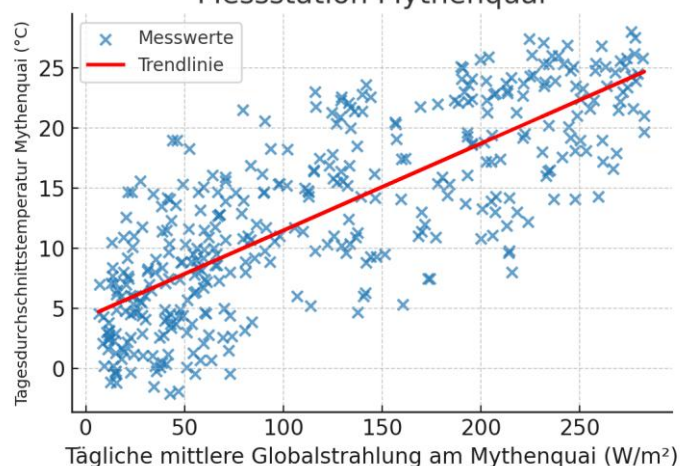


Abbildung 4: Korrelation Tagesdurchschnittstemperatur und -Durchschnittseinstrahlung (1 Jahr)

Kühlleistung

Abbildung 5 zeigt die durchschnittliche Kühlleistung des InnoTrams (Cobra-Tram mit Sonnenschutzfolie) in Abhängigkeit der Tagesdurchschnittstemperatur, im Vergleich zur übrigen Cobra-Flotte ohne Folien. Tagesmittelwerte unter 10 °C wurden bei der Auswertung nicht berücksichtigt, da in diesem Bereich kaum Kühlbedarf besteht und somit nur geringe oder keine Kühlleistung zu erwarten ist.

Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, wurde die Kühlleistung indirekt aus der HBU-Leistung abgeleitet, wobei ein temperaturunabhängiger, konstanter Basisanteil abgezogen wurde.

Die Auswertung zeigt, dass das InnoTram bei allen untersuchten Tagestemperaturgruppen eine geringere Kühlleistung aufwies als die übrige Flotte ohne Sonnenschutzfolie. Die Differenz schwankt dabei je nach Temperaturgruppe zwischen 0.5 und 2.1 kW, im Durchschnitt über alle Temperaturgruppen beträgt sie rund 1.1 kW. Der Mittelwert beim InnoTram ist allerdings naturgemäss wegen der deutlich geringeren Anzahl Messpunkte anfällig auf einzelne Ausreisser nach oben oder unten.

Insgesamt deuten die Resultate aber auf folgende Richtung: Die Sonnenschutzfolie reduziert die durchschnittliche Kühlleistung. Interessant ist, dass die Differenzen bei den geringeren Temperaturen grösser sind als bei den höheren Temperaturen. Die Autoren wissen nicht, ob dies einen Grund haben könnte, oder ein Zufallsbefund aufgrund der Messmethode (nur ein Test-Fahrzeug) sein könnte.

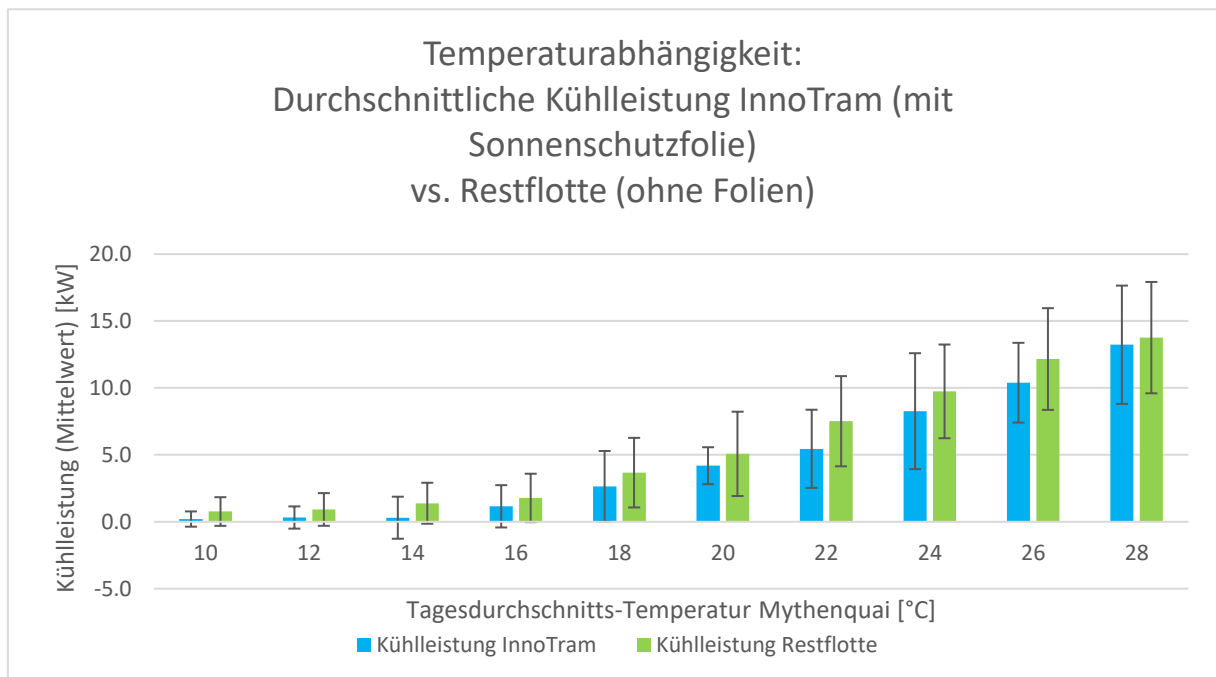


Abbildung 5: Kühlleistung InnoTram (Sonnenschutzfolien) vs. Restflotte in Abhängigkeit der Aussentemperatur.

Es muss an dieser Stelle einschränkend erwähnt werden, dass die Standardabweichung der Kühlleistung der einzelnen Datenpunkte grösser war als die gemessene Differenz zwischen dem InnoTram und der Referenzflotte (siehe Tabelle 3). Die absolute Standardabweichung der Kühlleistung wurde mit zunehmender Temperatur tendenziell grösser. Die Autoren vermuten, dass dies dadurch begründet ist, dass auch die absolute Kühlleistung mit zunehmender Temperatur grösser wird (siehe auch Kapitel 5 Diskussion).

Aussentemperatur [°C]	Standardabweichung Kühlleistung InnoTram (mit Sonnenschutzfolie) [kW]	Standardabweichung Kühlleistung Restflotte (ohne Sonnenschutzfolie) [kW]
10	0.57	1.07
12	0.83	1.22
14	1.57	1.53
16	1.58	1.81
18	2.64	2.60
20	1.38	3.15
22	2.92	3.37
24	4.33	3.50
26	2.98	3.80
28	4.42	4.16

Tabelle 3: Standardabweichungen Kühlleistung nach Aussentemperatur.

Darüber hinaus wurde auch die Abhängigkeit zwischen Kühlleistung und Tagesdurchschnitts-Globalstrahlung betrachtet (siehe Abbildung 6). Diese Globalstrahlung wurde am Standort Mythenquai gemessen und über einen ganzen Tag gemittelt (die Nacht ist ebenfalls eingerechnet). Es zeigt sich, dass das InnoTram mit Sonnenschutzfolien in 7 von 8 Strahlungsgruppen gleich viel oder weniger Kühlleistung verwendet hat als die Referenzflotte. Auch hier deutet der Trend also in die Richtung, dass die Sonnenschutzfolien die Kühlleistung reduzieren. Allerdings werden auch diese Resultate mit einer hohen Standardabweichung begleitet (siehe Tabelle 4), die grösser als die gemessene durchschnittliche Differenz zwischen InnoTram und Referenzflotte ist.

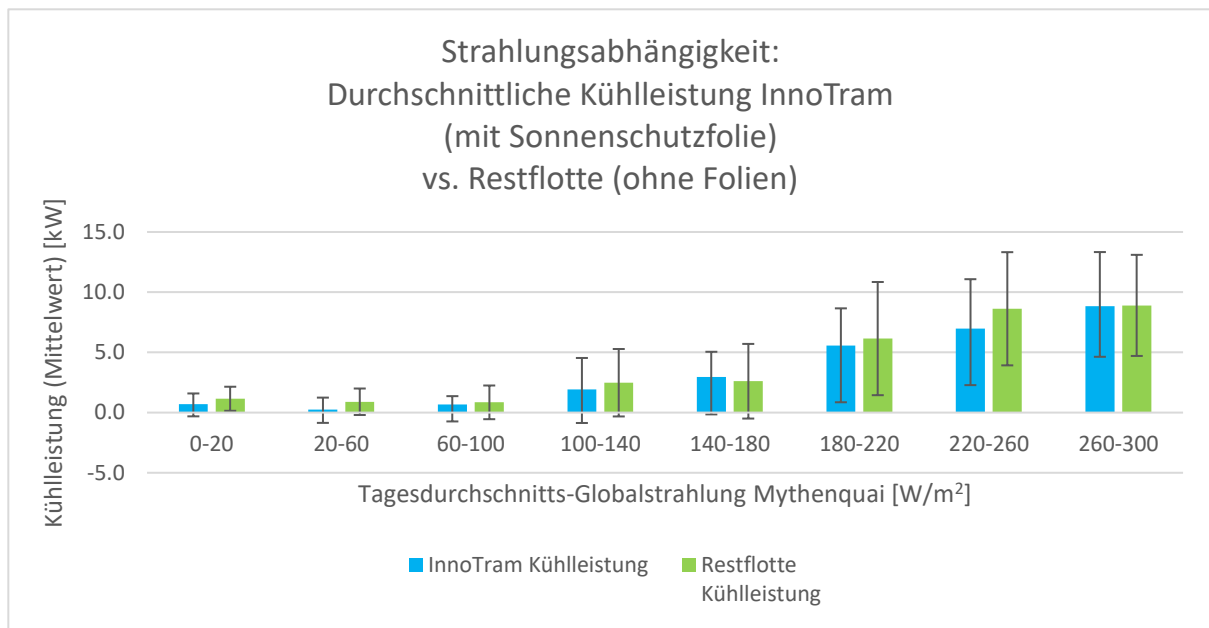


Abbildung 6: Kühlleistung InnoTram (Sonnenschutzfolien) vs. Restflotte in Abhängigkeit der durchschnittlichen Globalstrahlung am Standort Mythenquai.

Tagesdurchschnitts-Globalstrahlung [W/m²]	Standardabweichung Kühlleistung InnoTram (mit Sonnenschutzfolie) [kW]	Standardabweichung Kühlleistung Restflotte (ohne Sonnenschutzfolie) [kW]
0-20	0.9	1.0
20-60	1.0	1.1
60-100	0.7	1.4
100-140	2.6	2.8
140-180	2.1	3.1
180-220	3.1	4.7
220-260	4.1	4.7
260-300	4.5	4.2

Tabelle 4: Standardabweichungen Kühlleistung nach Tagesdurchschnittlicher Einstrahlung.

Heizleistung

Abbildung 7 zeigt die durchschnittliche Heizleistung des InnoTrams (Cobra-Tram mit Sonnenschutzfolie) im Vergleich zur restlichen Cobra-Flotte ohne Folien. Ab einer Tagesdurchschnittstemperatur von 20°C gab es keine Heizleistung mehr. Wie bei der Kühlleistung wird ein linearer Zusammenhang zwischen Aussentemperatur und Heizleistung erkennbar. Bei der Heizleistung jedoch ist, im Gegensatz zur Kühlleistung, kein grosser Unterschied zwischen den beiden untersuchten Gruppen mehr zu erkennen. Je nach Aussentemperatur verbrauchte das InnoTram teils mehr, teils weniger Heizenergie als die Referenzfahrzeuge ohne Folie.

Im Durchschnitt beträgt die Differenz bei der Heizleistung lediglich 0.2 kW – deutlich weniger als bei der Kühlleistung, bei der im Mittel 1.1 kW eingespart wurden. Dies legt nahe, dass der Einsatz der Sonnenschutzfolie keinen nennenswerten Einfluss auf den Heizbedarf hatte und somit in Bezug auf die Heizleistung kein nennenswerter Unterschied zwischen den beiden Fahrzeuggruppen festgestellt werden konnte. Jedoch ist auch hier die hohe Standardabweichung anzumerken, die grösser war als die gemessene Differenz in der Heizleistung (siehe Tabelle 5: Standardabweichungen Heizleistung nach tagesdurchschnittlicher Aussentemperatur).

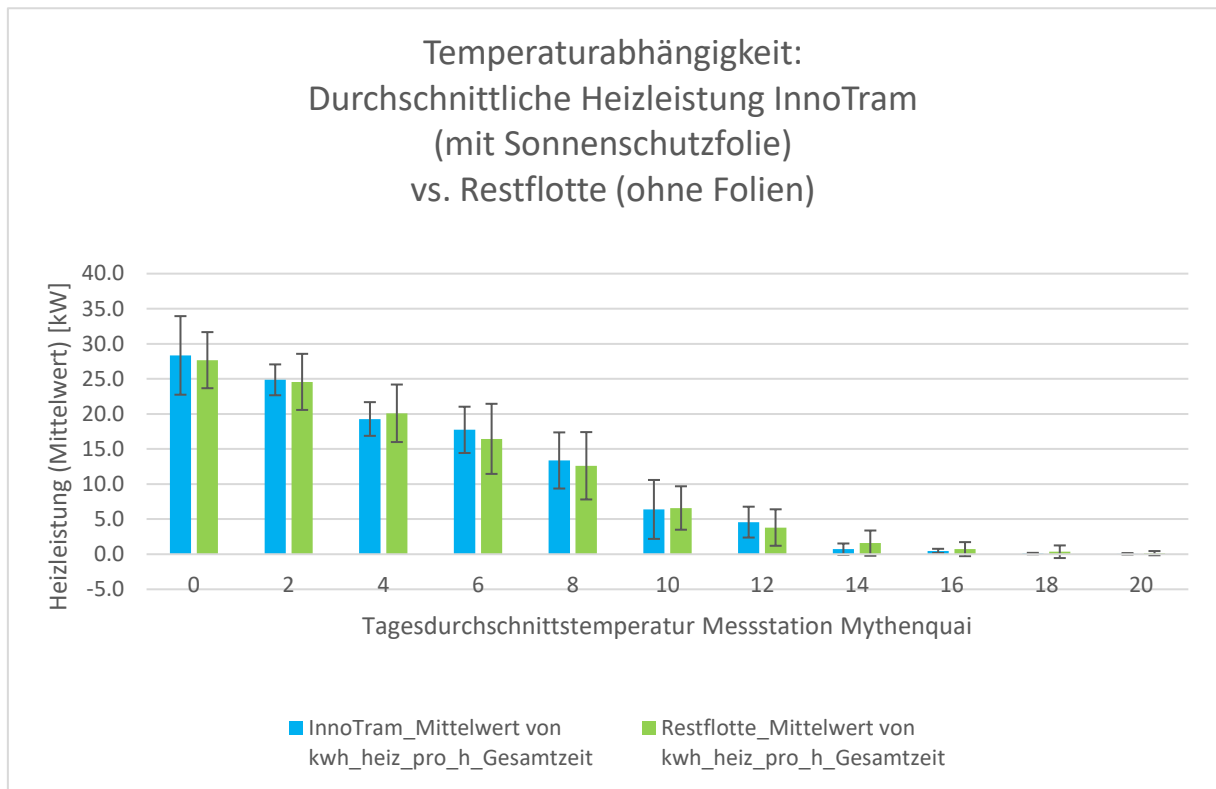


Abbildung 7: Durchschnittliche Heizleistung InnoTram (Sonnenschutzfolien) vs. Restflotte in Abhängigkeit der Aussentemperatur.

Aussentemperatur [°C]	Standardabweichung Heizleistung InnoTram (mit Sonnenschutzfolie) [kW]	Standardabweichung Heizleistung Restflotte (ohne Sonnenschutzfolie) [kW]
0	5.6	4.0
2	2.2	4.0
4	2.4	4.1
6	3.3	5.0
8	4.0	4.8
10	4.2	3.1
12	2.2	2.6
14	0.8	1.8
16	0.3	1.0
18	0.1	0.9
20	0.1	0.3

Tabelle 5: Standardabweichungen Heizleistung nach tagesdurchschnittlicher Aussentemperatur.

Wird die durchschnittliche Heizleistung zusätzlich nach Strahlungsgruppen unterteilt, ergibt sich das in Abbildung 8 dargestellte Bild. Auf die Auswertung der InnoTram-Daten ab einer Einstrahlung von 100 W/m² wurde verzichtet, da in diesem Bereich pro Gruppe weniger als fünf Messpunkte vorlagen. Abbildung 8 zeigt, dass die erforderliche Heizleistung mit zunehmender Einstrahlung tendenziell abnimmt. Der Anstieg der Referenzflotte im Bereich von 140–180 W/m² lässt sich nicht zufriedenstellend erklären.

Das InnoTram wies in zwei von drei Einstrahlungsbereichen eine geringere Heizleistung als die Referenzflotte auf, in einem Bereich hingegen eine höhere. Insgesamt lassen die Ergebnisse hier keinen eindeutigen Schluss zu. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Sonnenschutzfolien nicht zu einem geringeren Heizbedarf führen. Daher wird an dieser Stelle festgehalten, dass die Sonnenschutzfolien tendenziell nicht zu einem höheren Heizbedarf führen – was mit den weiter oben dargestellten Resultaten übereinstimmt.

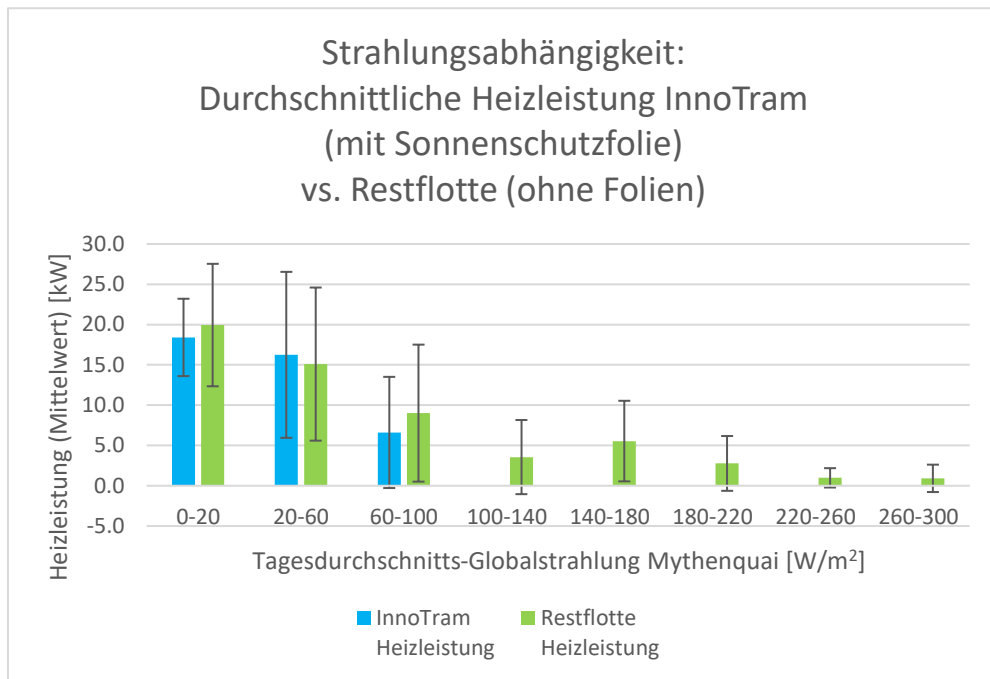


Abbildung 8: Durchschnittliche Heizleistung InnoTram (Sonnenschutzfolien) vs. Restflotte in Abhängigkeit der durchschnittlichen Globalstrahlung am Standort Mythenquai.

Tagesdurchschnitts-Globalstrahlung [W/m²]	Standardabweichung Heizleistung InnoTram (mit Sonnenschutzfolie) [kW]	Standardabweichung Heizleistung Restflotte (ohne Sonnenschutzfolie) [kW]
0-20	4.8	7.6
20-60	10.3	9.5
60-100	6.9	8.5
100-140	Zu wenig Daten	4.6
140-180	Zu wenig Daten	5.0
180-220	Zu wenig Daten	3.4
220-260	Zu wenig Daten	1.2
260-300	Zu wenig Daten	1.7

Tabelle 6: Standardabweichungen Heizleistung nach Tagesdurchschnittlicher Einstrahlung.

Bilanz Energieeinsparung

Auf Grundlage der zuvor dargestellten Ergebnisse zur Heiz- und Kühlleistung wurde die jährliche Energieeinsparung für ein Tram mit Sonnenschutzfolie berechnet. Dabei wurde angenommen, dass der Einsatz der Folie im Winter keinen zusätzlichen Heizbedarf verursacht. Es wurde für jeden Tag im Untersuchungszeitraum mit einer Tagesdurchschnittstemperatur von $> 10^{\circ}\text{C}$ (es wird angenommen, dass unter 10°C nicht gekühlt werden muss) wurde die entsprechende durchschnittliche Energieeinsparung für diese Temperaturgruppe herangezogen und die entsprechende durchschnittliche Einsparung bei der Kühlleistung (siehe Abbildung 5) berechnet.

Zur Abschätzung der Gesamteinsparung wurden folgende Betriebsannahmen getroffen:

Betriebsdaten	Wert	Bemerkung
Betriebsdaten	18 h/Tag	Ein Tram fährt etwa 18h pro Tag
Einsatzquote	80 %	Ein Tram ist zu 80% der Tage im Einsatz
Strompreis	300 CHF/MWh	Angenommener Strompreis in Zürich. Kann sich von Jahr zu Jahr ändern und dient einzig als grober Richtwert.

Tabelle 7: Betriebsdaten für die Verkehrsbetriebe Zürich.

Die in Tabelle 7 aufgeführten Werte basieren auf typischen Erfahrungswerten und können je nach Jahr, Linie und betrieblicher Situation leicht variieren. Insbesondere der Strompreis ist jährlichen Schwankungen unterworfen. Die aktuellen Strompreise der Stadt Zürich finden sich bei ewz [19].

Auf Basis dieser Annahmen ergibt sich für das Tram mit installierter Sonnenschutzfolie eine jährliche Energieeinsparung von rund **3.60 MWh**. Das InnoTram verbrauchte im betrachteten Zeitraum also etwa 10.8 MWh Kühlenergie, die Referenzflotte im Schnitt 14.4 MWh. Die Reduktion im Strombedarf für die Kühlung beträgt also rund 25 %. Bei einem angenommenen Strompreis von 300 CHF/MWh entspricht dies einer jährlichen Kosteneinsparung von etwa **1080 CHF**. Dieses Resultat liegt im Bereich der im Vorfeld geschätzten Erwartungen und bestätigt die Wirksamkeit der Sonnenschutzfolie in Bezug auf den Energieverbrauch.

Installationskosten

Aufwand: Die Installation erfordert nach VBZ-internen Schätzungen pro Tram ca. 6 Personentage.

Materialkosten: Die Sonnenschutzfolien kosten laut einer Richtpreisschätzung pro Tram ca. **7000 CHF**.

Wirtschaftlichkeitsrechnung

- Die Installation der Sonnenschutzfolie führt zu einer **jährlichen Energieeinsparung von ca. 3,60 MWh**, was bei einem Strompreis von **300 CHF/MWh** einer **Kosteneinsparung von rund 1080 CHF pro Jahr** entspricht.
- Die **Materialkosten** pro Tram liegen bei **ca. 7000 CHF**, hinzu kommen **geschätzte Arbeitskosten** von ca. 6 Personentagen.
→ **Gesamtinvestition pro Tram: ca. 10'000 CHF**.
- Die Amortisationsdauer lässt sich wie folgt berechnen:
$$t_{\text{Amortisation}} = \text{Investitionskosten} / \text{jährliche Einsparung}$$
$$= 10'000 \text{ CHF} / 1'080 \text{ CHF/Jahr} \approx \text{ca. 10 Jahre}$$
- Damit amortisiert sich die Investition **nach rund 10 Jahren**.

5. Diskussion

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von Sonnenschutzfolien an Cobra-Trams zu einer messbaren Reduktion der durchschnittlichen Kühlleistung führt. Wichtige Anmerkung: Die in Kapitel 4 Ergebnisse präsentierten Zahlen gelten primär nur für diesen Fahrzeugtyp. Wenn andere Betreiber die Ergebnisse ebenfalls verwenden möchten, müssen sie die Fahrzeugspezifischen Gegebenheiten berücksichtigen (Klimatische Gegebenheiten, Heiztechnologie, Fahrzeuggrösse, Anzahl Türöffnungen im System, etc.). Vermutlich fallen die Einsparungen bei Regionen mit wärmeren Temperaturen und sonnigerem Wetter / längeren Tagen grösser aus und umgekehrt. Da der Effekt im Winter eher gering war, wird nicht davon ausgegangen, dass die Heiztechnologie (z.B. Wärmepumpe vs. Heizregister) die Einsparungen gross beeinflussen würden.

Mit einer durchschnittlichen Einsparung von 1.1 kW (Mittelwert der Temperaturbereiche über 10°C) lässt sich eine deutliche Entlastung der Klimaanlage feststellen. Prozentual war der Kühlenergiebedarf beim InnoTram ca. 25 % geringer als bei der Referenzflotte. Diese prozentuale Einsparung ist ähnlich zur Schätzung von "ContraVision", einem Fensterfolien-Hersteller. Dieser schätzt, dass bei Bussen an klaren Tagen und Temperaturen über 17-20°C rund 23 % der aufgewendeten Kühlenergie mit Fensterfolien eingespart werden kann [6]. Besonders relevant ist dies im Hinblick auf den zunehmenden Kühlbedarf infolge klimatischer Veränderungen.

Demgegenüber konnte bei der Heizleistung im Winter kein nennenswerter Unterschied zwischen dem InnoTram und der Referenzflotte ohne Folien festgestellt werden. Die gemessene Differenz in Abhängigkeit zur Aussentemperatur betrug im Mittel lediglich 0.2 kW und lag damit im Bereich der natürlichen Messstreuung. Dies legt nahe, dass der potenzielle Verlust an Sonnenwärme durch die Folie in der Heizperiode vernachlässigbar ist, respektive dass der Wärmeeintrag bei kalten Temperaturen überschätzt wird. Es wird auch vermutet, dass dies daran liegen könnte, dass es im Winter häufige Nebelperioden gibt, und die Anzahl Sonnenstunden geringer sind als im Sommer. Die Befürchtung, dass sich die Einsparungen im Sommer durch einen erhöhten Heizbedarf im Winter neutralisieren, wird durch die vorliegenden Daten also nicht gestützt. Eine Einsparung im Sommer zulasten eines Mehrverbrauchs im Sommer wäre problematisch gewesen, da die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom (z. B. Photovoltaik) im Winter deutlich eingeschränkter ist als im Sommer.

Die jährliche Energieeinsparung von rund 3,60 MWh sowie die daraus resultierende monetäre Einsparung von ca. 1'080 CHF pro Fahrzeug und Jahr belegen die energetische Relevanz der Massnahme. Die Materialkosten von ca. 7'000 CHF pro Tram und Arbeitsaufwand von ca. 6 Personentagen führen aber zu einer langen Amortisationszeit von ca. 10 Jahren. Für die Wirtschaftlichkeit ist es also zwingend,

dass die Folien mindestens 10 Jahre ohne zusätzliche Wartung oder Beschädigung befestigt bleiben können.

Trotz der grundsätzlich positiven Resultate sind gewisse Limitationen zu beachten: Die Studie basiert auf einem einzelnen beklebten Fahrzeug (dem InnoTram), was die Ergebnisse in Form von Mittelwerten anfälliger auf bestimmte Einzeleffekte macht (bestimmte Linieneffekte, Tageseffekte, Betriebseffekte, etc.). Eine Analyse nach Linie, Uhrzeit, Wochentag, Passagierauslastung, detailliertere Wetterinformationen etc. könnte die Vergleichbarkeit und die Ergebnisse verbessern, jedoch war dies aufgrund der vorhandenen Daten nicht möglich. Darüber hinaus wurden potenzielle Einflüsse wie Verschmutzung der Folie, Alterungseffekte oder saisonale Besonderheiten (z. B. Fahrpläne, Störungen) nicht separat untersucht. Auch die Kopplung an eine einzelne Wetterstation bildet lokale Abweichungen entlang der Linien nur näherungsweise ab.

Die hohe Streuung respektive hohe Standardabweichung deutet überdies auf heterogene Einsätze hin (siehe Kapitel 4 Ergebnisse). Beispielsweise wird aus Gründen der Datenverfügbarkeit einem Einsatz früh am Morgen bei kühlen Temperaturen die gleiche Tagesdurchschnittstemperatur wie einem Einsatz am Nachmittag zugeordnet. Ausserdem unterscheiden sich Linien in Fahrprofil, Schattenanteil, Tunneldurchfahrten, Haltestellendichte, etc., was ebenfalls einen Einfluss auf den Energieverbrauch haben kann. Bei vielen Tagen und vielen Fahrzeugen (Referenzflotte) gleichen sich diese Effekte wahrscheinlich für den Mittelwert gegenseitig aus. Beim InnoTram handelte es sich aber nur um ein einzelnes Fahrzeug. Hier wäre es hilfreich gewesen, mehrere Fahrzeuge mit einer Folie im Einsatz zu haben. Die verwendeten Daten erlaubten es leider nicht, eine Detailansicht des Trameinsatzes (z. B. genau Uhrzeit des Einsatzes) zu bekommen.

Es wurde auch darauf verzichtet, systematisch Innenraumtemperaturen zu erfassen, da die Temperatur im Winter auf einen fixen Wert geregelt wird, und im Sommer ebenfalls anhand der Aussentemperatur geregelt wird. Die Sonnenschutzfolien sollten also keinen Einfluss auf die Temperaturempfindung der Fahrgäste gehabt haben. Allerdings ist nicht auszuschliessen, dass die Folien einen gewissen positiven oder negativen ästhetischen Effekt auf die Fahrgäste gehabt haben könnte.

Das Projekt zeigt, dass sich mit vergleichsweise geringem technischem Aufwand ein konkreter Beitrag zur Energieeinsparung im öffentlichen Verkehr erzielen lässt. Sicherheits- und Komfortaspekte bleiben mit der gewählten Ausführung gewahrt. Der Fahrerstand bleibt aus Gründen der Sicht und Normkonformität ohne Sonnenschutzfolie. Die Massnahme ist reversibel, einfach skalierbar und verursacht keine sicherheitsrelevanten Eingriffe in die Fahrzeugtechnik. Sie eignet sich daher besonders für bestehende Fahrzeugflotten, bei denen umfassendere thermische Nachrüstungen (z. B. Doppelverglasungen und spezielle feste Beschichtungen) nur schwer realisierbar sind. Ausserdem eignet sich die Massnahme auch für Fahrzeuge, die über keine Klimaanlage verfügen – zwar wird mit den Folien in diesem Fall keine Energie eingespart, aber im Sommer liesse sich dadurch vermutlich eine angenehmere Innenraumtemperatur erzielen.

6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die wichtigsten Schlussfolgerungen des Projekts sind nachfolgend aufgeführt:

- **Sonnenschutzfolien senken den Kühlbedarf** und steigern damit die Energieeffizienz des Fahrzeugs. Beim folierten InnoTram betrug die Reduktion im Vergleich zur Referenzflotte knapp 25 % bzw. rund 3,6 MWh pro Jahr. Dies entspricht einer jährlichen Kosteneinsparung von etwa 1 080 CHF pro Tram (bei 300 CHF/MWh).
- **Im Winter konnten keine messbaren negativen Effekte auf die Heizleistung festgestellt werden.** Die thermische Bilanz bleibt damit auch in der kalten Jahreszeit neutral.
- **Die Installation ist technisch unkompliziert, reversibel und ohne Eingriffe in sicherheitsrelevante Systeme** möglich. Die Montagezeit liegt bei etwa 6 Personentagen.
- **Die Amortisationszeit (Material und Arbeit) beträgt rund 10 Jahre.** Die Wirtschaftlichkeit verbessert sich mit einer längeren Restlebensdauer der Fahrzeugflotte und mit steigenden Energiepreisen, insbesondere in den Sommermonaten. Umgekehrt wirken sich höhere Materialpreise und gestiegene Arbeitskosten negativ auf die Amortisationszeit aus.

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbol / Abkürzung	Bedeutung / Einheit	Erklärung
°C	Grad Celsius	Temperatur
BAV	Bundesamt für Verkehr	—
DC	Direct Current	Spannungs- respektive Stromform (z. B. 600 VDC für Heizelemente)
EcoDrive	Software zum energieoptimierten Fahren der VBZ	Software zur Messung und Visualisierung
ESöV 2050	Energiestrategie öffentlicher Verkehr 2050	Programm des Bundesamts für Verkehr (BAV)
HBU	Hilfsbetriebe-Umrichter (inkl. Klimatisierung, Lüftung, Batterieladen etc.)	—
HLK	Heizung, Lüftung, Kühlung	—
IBIS	Integriertes Bordinformationssystem	Das IBIS-Trapeze ist im VBZ-Kontext die konkrete Umsetzung dieses Systems durch die Firma Trapeze Switzerland GmbH.
InnoTram	Cobra-Tram 3020	Innovatives Test-Tram der VBZ
Kurs / Linie	Kurs: Einsatz eines Trams auf einer Linie an einem Tag	—
KVB	Kölner Verkehrs-Betriebe	—
kW	Kilowatt	Leistungseinheit
kWh	Kilowattstunde	Energieeinheit
MWh	Megawattstunde	1000 kWh
Mythenquai	Standort der Wetterstation der Stadt Zürich	Quelle für Tagesdurchschnittstemperatur
OFT	Office fédéral des transports	—
PET	Polyethylenterephthalat	Kunststoffmaterial der Folie
PMMA	Polymethylmethacrylat (Acrylglas)	Bestandteil der Sonnenschutzfolie
RBS	Regionalverkehr Bern-Solothurn	—
VBZ	Verkehrsbetriebe Zürich	—
XML	Extensible Markup Language	Datenformat

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] 3M™ Sonnenschutzfolie, Prestige Exterior Serie, https://www.3mschweiz.ch/3M/de_CH/p/d/b00016721/, 30.07.2025
- [3] 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>.
- [4] Bahadori-Jahromi, A.; Rotimi, A.; Mylona, A.; Godfrey, P.; Cook, D. Impact of Window Films on the Overall Energy Consumption of Existing UK Hotel Buildings. Sustainability 2017, 9, 731.
- [5] Chunying Li, Junyi Tan, Tin-Tai Chow, Zhongzhu Qiu, Experimental and theoretical study on the effect of window films on building energy consumption, Energy and Buildings, Volume 102, 2015, Pages 129-138.
- [6] Contra Vision Bus Window Wraps, A case study of how the energy consumption of air conditioning (HVAC) units is reduced, https://www.theseus-fe.com/thse_content/publications/slides/20191127_slides_contra-vision_contravision-bus-window-wraps-hvac-case-study-theseus-fe_en.pdf, 30.07.2025
- [7] Danny H.W Li, Joseph C Lam, Chris C.S Lau, T.W Huan, Lighting and energy performance of solar film coating in air-conditioned cellular offices, Renewable Energy, Volume 29, Issue 6, 2004, Pages 921-937.
- [8] Energy saving in Rail overview report , TASK 1 UIC AND UNIFE Energy saving in Rail: Consumption assessment, efficiency improvement and saving strategies, Version 14 March 2024, ERSIPB-EDSIPB-B-S2R-219-01 - 20240314_Energy_saving_measures_in_rail_report_changes_2_.pdf
- [9] The History of Window Blinds, <https://luxdezine.com/the-history-of-window-blinds/>, 30.07.2025
- [10] The History of Window Tint, <https://solarcontrolfilms.com/the-history-of-window-tint/>, 30.07.2025
- [11] Jedes Kilowatt zählt, <https://vbzonline.ch/jedes-kilowatt-zaehlt/>, 30.07.2025
- [12] Klein, G und Inderbitzin, F: Energieeinsparung im Trambetrieb bei verschiedenen Innenraum Temperatursollwerteinstellungen Quantifizierung und Flottenerfahrungen, ESöV 2050 Projekt 239, 03.01.2023
- [13] InnoTram macht Innovationen sichtbar, <https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/die-vbz/medien/medienmitteilung/2024/07/InnoTram.html>, 30.07.2025
- [14] Plummer, J.R. (2015) Window Film: A Cost Effective Window Retrofit. Available online: <http://www.greenbuilder-media.com/buildingscience/window-film-a-cost-effective-window-retrofit> (accessed on 15 October 2024).
- [15] Strelbel, Sven (2017) Untersuchung Heizenergiebedarf eines Cobra-Trams im Winterbetrieb, Hochschule für Technik Rapperswil.
- [16] Yin, Rongxin, Peng Xu, and Pengyuan Shen. "Case study: Energy savings from solar window film in two commercial buildings in Shanghai." Energy and Buildings 45 (2012): 132-140.
- [17] Wetterstation Mythenquai aktuelle Wetterwerte, <https://www.tecson.ch/wetterstation-mythenquai-aktuelle-wetterwerte.html>, 30.07.2025.
- [18] Avenir Suisse (Blog), Christoph Eisenring & Simon Stocker, <https://www.avenir-suisse.ch/das-schweizer-sommerstrom-problem/>, 26.08.2024
- [19] <https://www.ewz.ch/de/private/strom/tarife/tarifuebersicht.html>

Anhang

Keine.