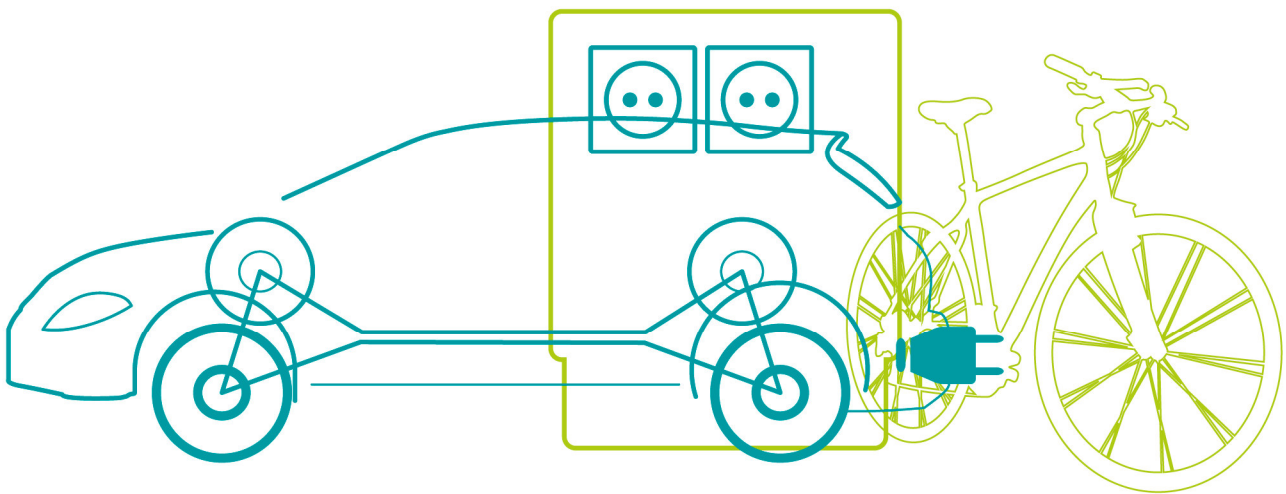




EcoTram II

Energieoptimierung der
thermischen Fahrzeugsysteme bei
Schienenfahrzeugen – Evaluierung



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

EcoTram II

Energieoptimierung der thermischen Fahrzeugsysteme bei
Schienenfahrzeugen – Evaluierung

AutorInnen:

Technische Universität Wien, Institut für Mechanik und Mechatronik:

Ao.Univ.Prof. Dr. Martin Kozek

Dipl.-Ing. Raphael Hofstädter

Dipl.-Ing. Christian Dullinger

RTA - Rail Tec Arsenal Fahrzeugversuchsanlage GmbH:

Dipl.-Ing. Gabriel Haller

Ing. Hermann Ferschitz

Dipl.-Ing. Gregor Richter

Schieneninfrastruktur-Dienstleistungsgesellschaft m.b.H.:

Mag. Nicole Witura

DI Gerald Schabl

Mag. Katharina Nowotny

Siemens AG Österreich:

Dr. Walter Martin Struckl

DI Martin Kollmann

Hr. Canori Michael

Vossloh Kiepe Ges.m.b.H.:

Ing. Markus Pollreis

Matthias Weiss

Wiener Linien GmbH & Co KG:

DI David Abed-Navandi

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
2.1	Aufgabenstellung	5
2.2	Schwerpunkte des Projektes	5
2.3	Einordnung in das Programm	6
2.4	Verwendete Methoden	6
2.5	Aufbau der Arbeit	6
3	Inhaltliche Darstellung	7
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	8
4.1	Ergebnisse	8
4.1.1	Projektmanagement	8
4.1.2	Regelung	8
4.1.3	Klimagerät	9
4.1.4	Fahrzeug	10
4.1.5	Messphase	10
4.1.6	Evaluierung	11
4.2	Schlussfolgerungen	15
5	Ausblick und Empfehlungen	15
6	Literaturverzeichnis	16
7	Anhang	16
	Abbildungsverzeichnis	16

2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung

Das Verkehrsaufkommen in den Städten der Welt erhöht sich kontinuierlich. Um dem Verkehrsinfarkt zu entgehen wird versucht den Verkehr auf die öffentlichen Verkehrsmittel zu verlagern. Dazu muss den Konsumenten der Öffentliche Personennahverkehr schmackhaft gemacht werden. Neben kurzen Fahrzeiten, einem dichten Taktfahrplan und kurzen Umsteigewegen ist der Komfort im Fahrzeug ein entscheidender Bestandteil, um Autofahrer zum Umsteigen auf öffentliche Verkehrsmittel zu bewegen. Aus technischer Sicht stellt das Erreichen eines gewissen Grades an thermischem Komfort keine Herausforderung dar. In den letzten Jahrzehnten wurde Stück um Stück etabliertes Wissen aus der Gebäudetechnik auch auf Schienenfahrzeuge angewendet. Die Zuluft, die von einer Klimaanlage ins Wageninnere geblasen wird, wird zuerst gefiltert, abgekühlt und entfeuchtet oder angewärmt, um dem Konsumentenwunsch so gut wie möglich zu entsprechen. Die technischen Einrichtungen dazu benötigen einerseits Energie für den Betrieb und andererseits erhöhen sie das Gewicht des Fahrzeugs und damit auch die notwendige Antriebsenergie. Während bei der Antriebstechnik zur Energierückgewinnung schon großer technischer Aufwand betrieben wird, gibt es bei der Optimierung des Energieverbrauchs der Fahrzeugklimatisierung noch großes Potenzial - die notwendige Energie für die Klimatisierung des Fahrzeugs kann bis zu 40% des gesamt Energieverbrauchs ausmachen.

2.2 Schwerpunkte des Projektes

Projekthinhalt ist die Erstellung eines nichtkommerziellen Prototyps eines Schienenfahrzeugs (ULF) mit energieeffizienten thermischen Fahrzeugkomponenten. Umbaumaßnahmen am Fahrzeug, an den Heizungs-Klima-Lüftungsgeräten sowie ein neues Regelkonzept sollen wesentliche Einsparungen bringen. Anhand von Messungen im Klima-Wind-Kanal und im Passagierbetrieb sollen die erreichten Einsparungen erfasst und dargestellt werden.

Um diese Ziele messbar zu machen, wurden folgende Hauptziele festgelegt:

- Erreichte Energieeinsparungen sind dargestellt
- Das Gesamtpotenzial der Maßnahmen ist erfasst
- Ein nichtkommerzieller Prototyp ist umgerüstet
- Detaillierte Messergebnisse zur Energieeffizienz liegen vor
- Ein modellprädiktiver Regler ist entwickelt
- Neue Technologien sind verfügbar

2.3 Einordnung in das Programm

Die Projektart des geförderten Projektes ist Experimentelle Entwicklung. Es kann dem Themenfeld „Energieeffiziente Fahrzeugkomponenten und –systeme“ zugeordnet werden.

2.4 Verwendete Methoden

Folgende Methoden wurden eingesetzt um die Hauptziele des Projekts zu erreichen:

- Erweiterung des daten-getriebenen Simulationsmodells des thermischen Wagenkastens um zusätzliche Stell- und Störeingänge unter Verwendung von thermodynamischen Energie- und Massenbilanzen.
- Modellierung der Klimaanlage mittels thermodynamischen Grundgleichungen
- modellbasierte prädiktive Regelung (model predictive control – MPC) die die Klimaanlage unter Einhaltung technischer Grenzen energieoptimal regelt
- Konstruktion der modifizierten Klimaanlage mittels 3D CAD
- Klima-Wind-Kanal Messungen zur Validierung der umgesetzten Maßnahmen
- Vor-Ort Messungen in der Straßenbahn zur Validierung der umgesetzten Maßnahmen im Passagierbetrieb

2.5 Aufbau der Arbeit

Das Projekt wurde in folgende Phasen gegliedert

- Projektmanagement
- Administration
- Regelung
- Klimageräte
- Fahrzeug
- Messphase
- Evaluierung

3 Inhaltliche Darstellung

Basierend auf den im Vorgängerprojekt „EcoTram“ durch Simulation gewonnen Erkenntnissen über das thermische Verhalten des Fahrzeugs wurden die Anforderungen der Projektpartner an die weitere Simulation und den Reglerentwurf festgelegt. Große Aufmerksamkeit wurde auf die Definition der Schnittstellen der beiden Arbeitspakete Software entwickeln und Regler implementieren gelegt. Die Änderungen am Simulationsmodell wurden ausgewählt, die neuen Komponenten durch physikalisch-phänomenologische Grundgleichungen der Thermodynamik modelliert und ins Modell integriert. Komponenten, deren Dynamik nicht generisch nachbildbar war, wurden unter Verwendung der Messergebnisse datenbasiert modelliert. Ein modellbasierender, prädiktiver Regler wurde entworfen und von der Matlab/Simulink Umgebung auf die Hardware des Reglers portiert. Die Reglerimplementierung wurde so durchgeführt, dass Änderungen an den Reglerparametern leicht möglich waren. Bei der Optimierung des Reglers wurde dem Erkenntnisgewinn durch die Messung im Klima-Wind-Kanal und auf der Strecke Rechnung getragen. Diese Optimierung erfolgte durch einen iterativen Prozess von Reglerentwurf, Validierung am Modell oder in der Realität und Anpassung der Entwurfsparameter anhand einer Bewertung der Reglerperformance.

Ein nicht-kommerzieller Prototyp eines Klimaanlagegeräts wurde entwickelt, der alle technisch möglichen und wirtschaftlich sinnvollen energieeffizienz-steigernden Maßnahmen aus dem FFG Vorgängerprojekt „EcoTram“ beinhaltet. Die technischen Spezifikationen des Klimaanlagegeräts (HVAC) wurden festgelegt, die Änderungen am bestehenden HVAC Gerät geplant und die Detailkonstruktion konzipiert. Anschließend erfolgte die Materialienbeschaffung und die Umsetzung der Änderungen an einem neuen HVAC Gerät (Vossloh Kiepe HKL 338 Eco), sowie die Abstimmungen zwischen Soft- und Hardware. Es erfolgte eine Anpassung der Steuerungselektronik an die neu integrierten Maßnahmen und die Einbindung des TU Reglers in die Software. Der nicht-kommerzieller Prototyp der HVAC wurde von Vossloh-Kiepe einer Vielzahl von standardisierten Tests unterzogen, um dessen Sicherheit zu garantieren. Es wurden drei Geräte gebaut um das Schienenfahrzeug ULF A1 komplett auf neue Geräte umrüsten zu können. Dieses Vorgehen war notwendig um den Energieverbrauch der Klimageräte vor dem Umbau mit dem Verbrauch nach dem Umbau vergleichen zu können.

Sämtliche Umbauarbeiten an der bestehenden Fahrzeugstruktur wurden koordiniert, geplant und umgesetzt. Sämtliche Spezifikationen, die für die Entwicklung der jeweiligen Maßnahme erforderlich waren, wurden in Zusammenarbeit mit den beteiligten Projektpartnern getroffen. D.h. die notwendigen technischen Anforderungen und Parameter bezüglich der elektrischen und mechanischen Hardware sowie der Software wurden definiert. unter Berücksichtigung der zuvor getroffenen und festgelegten Spezifikationen wurden die ausgewählten Maßnahmen konstruktiv am Fahrzeug umgesetzt. Anschließend erfolgten die Umbauten am Fahrzeug zu einem nichtkommerziellen Prototyp.

Danach erfolgte die Fahrzeuginbetriebsetzung. Die erforderlichen Testversuche für die statische und dynamische Inbetriebsetzung wurden durchgeführt und die erforderlichen Zulassungen und Genehmigungen für den Fahrgastbetrieb eingeholt.

In der Messphase wurden die Maßnahmen zur Energieeinsparung und die Simulation validiert, wobei eine detaillierte Vorbereitung der Versuche erfolgte. Auf Basis des ausgearbeiteten Messstellenplans wurde das Fahrzeug mit Messtechnik ausgerüstet. Der Aufbau der Messtechnik und der Besetzungssimulation erfolgte in der Vorbereitungshalle der RTA. Während der Messung im Klima-Wind-Kanal wurden der gesamte Temperaturbereich, der dem Einsatzbereich des Schienenfahrzeugs entspricht, abgefahren, und der jeweilige Energieverbrauch der Klimaanlage und anderer relevanter Nebenaggregate gemessen. Vorab wurde die Funktion der neuen Geräte überprüft und umfangreiche Einstell- und Optimierungsarbeiten durchgeführt.

Um die im Klima-Wind-Kanal vorgenommenen Messungen zu validieren, sowie zusätzliche Erkenntnisse über betriebliche Einflüsse zu gewinnen, wurde ein Fahrzeug geeignet instrumentiert und mit einem Datenlogger ausgerüstet. Das Fahrzeug über einen Zeitraum von 9 Monaten in den Regelbetrieb aufgenommen und Messdaten erfasst. Für die Messung im Betrieb wurde die im Vorprojekt „EcoTram“ bewerte Technik benutzt.

In der Evaluierungsphase wurden die in „EcoTram II“ gesammelten Daten aus der Klima-Wind-Kanal Messung und der Streckenmessung systematisch analysiert. Der neue Energieverbrauch der Klimaanlagegeräte wurde mit dem alten Energieverbrauch verglichen, der im Projekt „EcoTram“ vermessen wurde. Anhand der gemessenen und berechneten Einsparung wurde das Potential der entwickelten Technologie dargestellt und im Hinblick auf die wirtschaftliche Verwertung bewertet.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1 Ergebnisse

4.1.1 Projektmanagement

Die Berichte der Arbeitspaketverantwortlichen wurden allen Projektpartnern zur Information übermittelt und dokumentiert. Sämtliche Projektsitzungen wurden protokolliert, entsprechende To-Do-Listen und die abgestimmten Protokolle wurden allen Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

4.1.2 Regelung

Ein Dokument mit dem Titel „Spezifikationen (des Reglers) festlegen“ wurde erstellt und vorgelegt. Es enthält u.a. die notwendigen Spezifikationen für den Reglerentwurf, die notwendigen Beschränkungen für den Reglerentwurf und die Hardwareanforderungen.

Im Deliverable zum *Arbeitspaket „Simulationen adaptieren und auswerten“* wurden die notwendigen Änderungen festgelegt und diese Änderungen im Simulationsmodell umgesetzt (Matlab/Simulink). Das vorliegende Reglerentwurfsmodell wurde dokumentiert und plausibilisiert.

Im Deliverable zum *Arbeitspaket „Regler entwerfen“* wurde ein modellprädiktiver Regler für das Simulationsmodell erstellt, dessen closed-loop Stabilität in der Simulation überprüft und die Methodik dokumentiert.

Im Deliverable zum *Arbeitspaket „Regler implementieren“* wurde der MPC-Algorithmus am Steuergerät lauffähig implementiert und alle Regler-Funktionen im Labor erfolgreich getestet und dokumentiert.

Im Deliverable zum *Arbeitspaket „Regelung optimieren“* wurde die Regelung vor allem hinsichtlich ihrer Parameter optimiert. Es wurden die erreichten closed-loop Kennzahlen dargestellt und ein Vergleich mit dem bisherigen Konzept und den in der Simulation erzielten Ergebnissen durchgeführt. Der optimierte Regler wurde am Prototyp erfolgreich implementiert und dessen Kennzahlen erfasst.

4.1.3 Klimagerät

Nach Auslegung der neuen HKL-Anlagen wurde die Spezifikationen der einzelnen Neukomponenten erfolgreich abgeschlossen und die Komponenten demnach bestellt. Anhand eines 3D-Modelles wurde die Integration der neuen bzw. abgewandelten Komponenten in die neue HKL-Anlage geplant und weitgehend optimiert. Die Erstmusterprüfungen der bestellten Komponenten wurden positiv durchgeführt. Der mechanische Umbau der HKL-Anlage auf Basis des erstellten 3D-Modelles zu einer Wärmepumpe wurde erfolgreich umgesetzt. Es musste aus Platzgründen eine spezielle Verschaltung der Kältekomponenten erarbeitet werden, deren erfinderischer Ansatz sogar in einem Patent von Vossloh Kiepe mündete. Die Integration des neuen Reglers und der zusätzlichen Sensoren (GPS und Sonnensensor) am Fahrzeug und in die Steuerung der HKL-Anlage wurde spezifiziert und erfolgreich getestet. Anfängliche Kommunikationsprobleme zwischen dem TU-Regler und der HKL-Steuerung wurden in mehreren Arbeitssitzungen ausgemerzt. Weiters wurde ein „Backup-Programm“ in der HKL-Steuerung integriert, um bei einem eventuellen Ausfall des TU-Reglers die HKL-Anlage weiter in einem vereinfachten Betrieb zu halten und damit einen Ausfall des gesamten Fahrzeuges zu verhindern. Die festgelegte Gerätefunktionalität sowie deren sicherer Betrieb vor allem in Hinblick auf Brandschutz wurden von VKA überprüft und positiv bewertet. Die Leistungsdaten der Anlage, vor allem der Wärmepumpe, aber auch der Klimaanlage, wurden in einem externen Institut ermittelt. Basierend auf den Messungen am Prototyp sowie den gewonnenen Erkenntnissen während der Versuchsdurchführung wurden 3 HVAC-Geräte für den Einsatz an einem Kurzzug im Passagierbetrieb hergestellt. Nach der Produktion wurden alle Geräte vor Auslieferung nochmals einer vereinfachten Serienüberprüfung (basierend auf den durchgeführten Typtests) unterzogen, um die Sicherheit am Fahrzeug garantieren zu können.

Obwohl das Projekt EcoTram II ein ausdrückliches Forschungsprojekt darstellt, ist es gelungen, ein Gerät zu entwickeln, mit dem, abgesehen von der EMV-Prüfung – diese war im Projekt nicht vorgesehen – alle für die serienreife notwendigen Anforderungen erfüllt werden konnten.

4.1.4 Fahrzeug

Es wurde ein Umbaudokument erstellt, in welchem alle notwendigen Arbeitsschritte beim Umbau des Fahrzeuges leicht verständlich und technisch detailliert beschrieben sind. Das Dokument umfasst die Darstellung der elektrischen Leitungen, den Umbau der Komponenten, Softwareänderungen sowie eine technische Fotodokumentation.

Auf Basis der Umbaudokumentation wurde im Arbeitspaket „Konstruktion konzipieren“ ein logistischer Umbauplan erstellt, in dem alle wesentlichen Arbeitsschritte mit notwendigen Kapazitäten und Gerätschaften dargestellt wurden. Folgend wurden auch die Materialbeschaffung und Liefertermine hiermit festgelegt.

Im *Arbeitspaket „Umbauten integrieren“* konnten die Umbaumaßnahmen wie geplant bei den Wiener Linien am Fahrzeug termingerecht durchgeführt werden. Ein Termin- und Arbeitsplan wurde erstellt (Umbauplan).

Im *Arbeitspaket „Fahrzeug in Betrieb setzen“* wurde die statische und dynamische Inbetriebsetzung erfolgreich abgeschlossen und der Funktionstest am Fahrzeug erfolgreich abgeschlossen. Anschließend wurde das Fahrzeug in den Fahrgastbetrieb aufgenommen.

4.1.5 Messphase

Die vollständige Messung der elektrischen Energie der Klimageräte im Rahmen der Messphase im Sommer 2013 wurde im Arbeitspaket „Messprogramm vorbereiten“ sichergestellt. Zusätzlich zur bestehenden Messung konnte die Leistung im frequenzvariablen 400 V Teil gemessen werden. Weiterhin arbeitete der neue Regler der Klimageräte komplett unabhängig von der Messtechnik, da die benötigten Komponenten wie GPS und Sonnensensor direkt an den Regler angeschlossen wurden.

Im *Arbeitspaket „Messungen im Klima-Wind-Kanal durchführen“* wurden Messungen im Klima-Wind-Kanal durchgeführt, die es ermöglichten, das tatsächlich erreichte Einsparpotential zu bestimmen. Hierzu wurde der Energieverbrauch der Klimaanlage gemäß spezifiziertem Messprogramm unter verschiedenen Bedingungen gemessen. Insgesamt standen 14 Tage für Messungen und Einstellarbeiten im Klima-Wind-Kanal zur Verfügung. Da es zu Beginn einige größere technische Herausforderungen beim Einstellen und Optimieren der Klimageräte und des Reglers gab, konnte nicht das komplette ursprünglich geplante Messprogramm durchgeführt werden. Es konnte aber ausreichend genügend Versuche gemacht werden, um den Energieverbrauch zu bewerten. Alle Details sind im Bericht „Energieverbrauchsmessungen an einer Straßenbahn Typ A1 Ulf im Rahmen des Forschungsprojekt EcoTram II“ festgehalten.

Im *Arbeitspaket „Messungen im Betrieb durchführen“* wurden Messungen im Fahrgastbetrieb über eine Zeitdauer von 9 Monaten durchgeführt. Hierzu wurde ein Teil der Messtechnik genutzt, die auch schon bei den Messungen im Klima-Wind-Kanal genutzt wurden. Diese war unsichtbar für die Fahrgäste hinter einer Voute im Dachbereich verbaut.

Vor allem zu Beginn der Messungen traten vereinzelt Störungen auf, die vom jeweils zuständigen Projektpartner behoben wurden. So musste ein verfrühtes Auslösen des Motorschutzes für den

Kompressor der Klimaanlage korrigiert werden und der Enteisungszyklus der HKL-Anlagen angepasst werden. Im Laufe der Messfahrten wurde auch ein Problem mit der Phasenanschnittsteuerung der Zuluftlüfter diagnostiziert. Um einen möglichen, längeren Ausfall der Anlagen zu vermeiden, wurde die Phasenanschnittsteuerung präventiv durch kleine, nur für die Zuluftlüfter zuständige Frequenzumformer ersetzt.

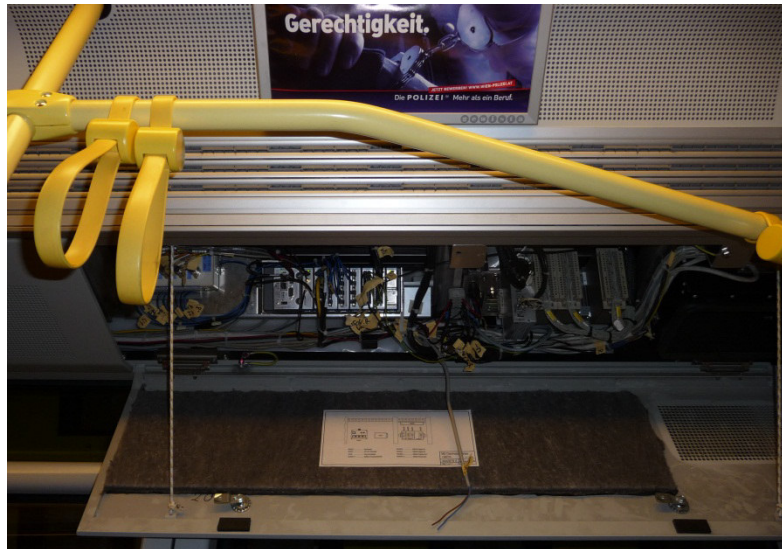


Abbildung 1: Messtechnik in der Straßenbahn

Durch die Messtechnik wurden allen wichtigen Daten aufgezeichnet. Von besonderem Interesse waren hierbei die Außentemperatur, die Leistungsaufnahme der Klimageräte und deren Schaltzustand. Insgesamt wurden 3,8 GB Daten gesammelt.

Durch die Wiener Linien wurde die Straßenbahn im normalen Einsatz auf der Linie 62 (Kärntner Ring, Oper - Lainz, Wolkersbergenstraße) eingesetzt.

4.1.6 Evaluierung

Als Ergebnis der Messungen im Klima-Wind-Kanal ergibt sich die Leistungsaufnahme der Klimageräte über der Außentemperatur. In Abbildung 2 ist das Ergebnis für den neuen Zustand (EcoTram) dem alten Zustand (ULF mit herkömmlichen Klimageräten) gegenübergestellt, für eine fiktive Besetzung und Sonnenstrahlung. Deutlich sichtbar ist, dass der Energieverbrauch der optimierten Klimageräte deutlich unter den der herkömmlichen Geräte liegt. Ausnahme ist der Bereich bei einer Außentemperatur von ca. 20°C. In diesem Bereich kann es vorkommen, dass der prädiktive Regler auf Grund seines Designs entfeuchtet (Heizung und Kühlung gleichzeitig aktiv). Aus energetischer Sicht schlecht, jedoch ist es so möglich sehr fein dosiert die Energie zum Kühlen ins Fahrzeug einzubringen, wohingegen reines Kühlen vielleicht zu viel Energie ins Fahrzeug einbringen würde.

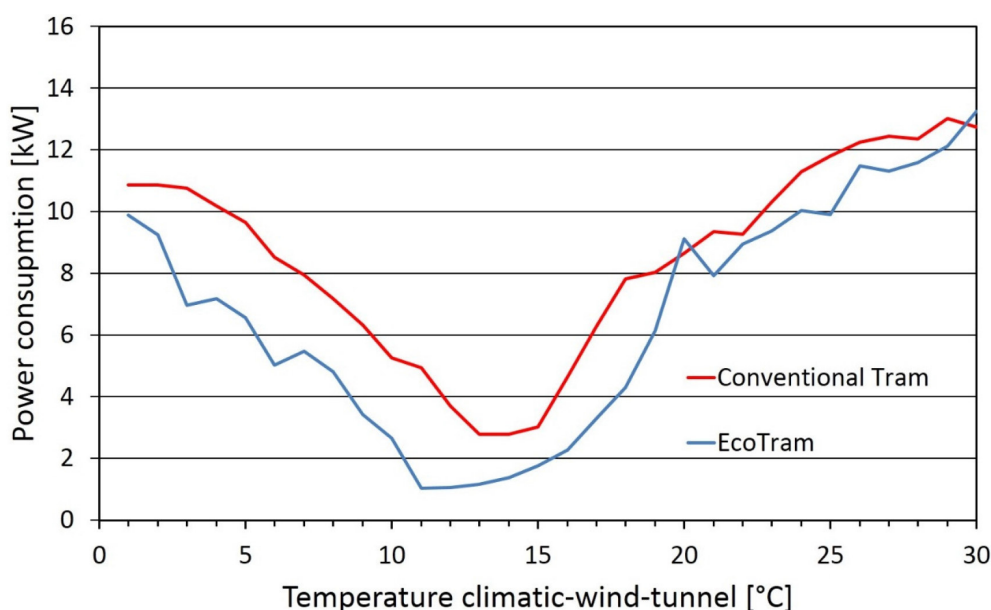


Abbildung 2: Leistungsaufnahme der herkömmlichen und der neuen Klimageräte

Berechnet man aus den erstellten Kurven das mögliche Einsparpotential ergibt es eine Summe von 32%. Dies nimmt jedoch keine Rücksicht auf die tatsächliche Temperaturverteilung über ein Jahr. Somit ist es sinnvoller einen Jahresenergieverbrauch anhand einer gemessenen Temperaturklassifikation zu berechnen. Hierzu wird in Gradschritten die gemessene Leistungsaufnahme mit der Anzahl der Stunden, in denen die jeweilige Temperatur gemessen worden ist, multipliziert und zum Energieverbrauch summiert. In Abbildung 3 ist der Energieverbrauch der Klimageräte bezogen auf die Häufigkeit der Außentemperatur im Zeitraum September 2010 bis August 2011 dargestellt. Dieses Verfahren geht davon aus, dass die Besetzung und Fahrtgeschwindigkeit im Mittel konstant ist und dass die Sonnenstrahlung mit der Außentemperatur korreliert. Somit ergibt sich für den Zeitraum September 2010 bis August 2011 folgender Energieverbrauch → **herkömmliches Fahrzeug 33,15 MWh, EcoTram 24,7 MWh**

Auf Basis dieser Rechnung benötigen die drei Klimageräte des Erprobungsträgers EcoTram im Jahr 26% weniger Energie. In einfachen Zahlen verdeutlicht benötigen die neuen Klimageräte im Mittel **5,7 kW** Leistung anstatt **7,7 kW** Leistung.

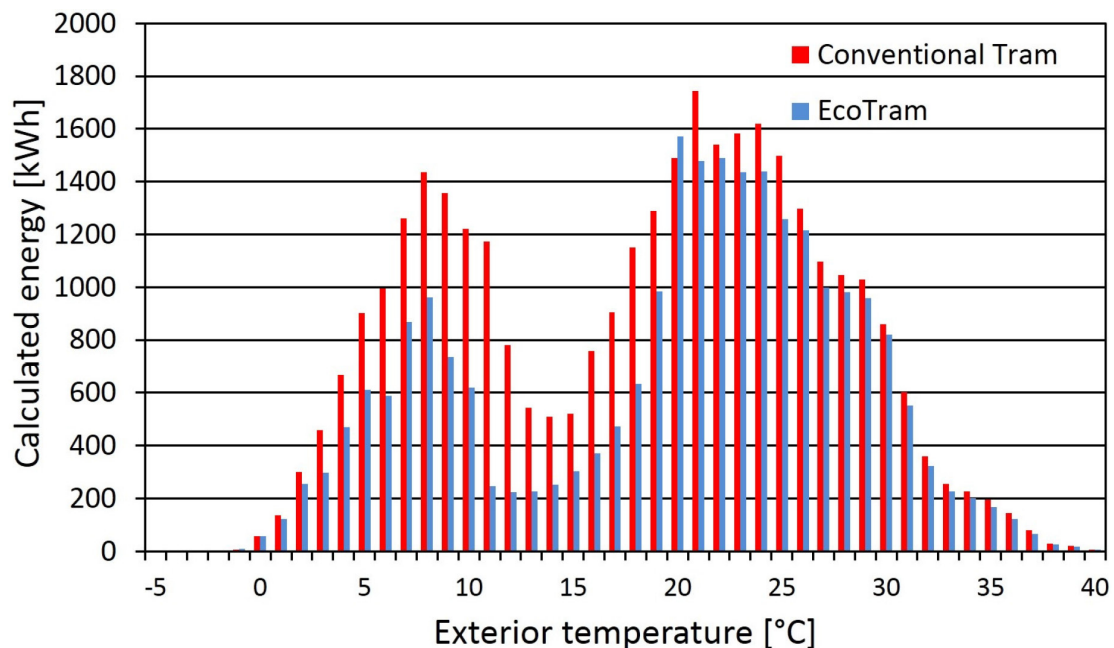


Abbildung 3: Energieverbrauch der der Klimageräte bezogen auf die Häufigkeit der Außentemperatur im Zeitraum Sept. 2010 bis August.2011.

Ähnlich wurde mit den Messdaten der Streckenmessung verfahren, wobei hier eine Clusterung viel aufwendiger war. Von Juli 2013 bis Mai 2014 war die Straßenbahn im Passagierbetrieb auf der Linie 62 unterwegs. Auch hierbei wurden allen Messdaten kontinuierlich aufgezeichnet. Ziel der Messung im Betrieb war es die Zuverlässigkeit zu überprüfen und zu testen, ob sich die im Klima-Wind-Kanal gemessene Energieeinsparung bewahrheitet. Die Erfahrungen der letzten neun Monate zeigten, dass die Klimageräte zuverlässig arbeiten. Lediglich die Funktion des Abtaubetriebs der Wärmepumpe musste angepasst werden. Vermehrte Beschwerden von Fahrgästen traten erfreulicher Weise nicht auf. Weitere Erkenntnis konnten über den Einsatz der Wärmepumpe gewonnen werden. Durch die großstädtische Lage, waren auch im Winter die Außentemperaturen mild und es konnte über weite Zeiträume mit der Wärmepumpe geheizt werden.

Auch hier wurde für die Auswertung die Leistungsaufnahme der Klimageräte über der Außentemperatur ermittelt.

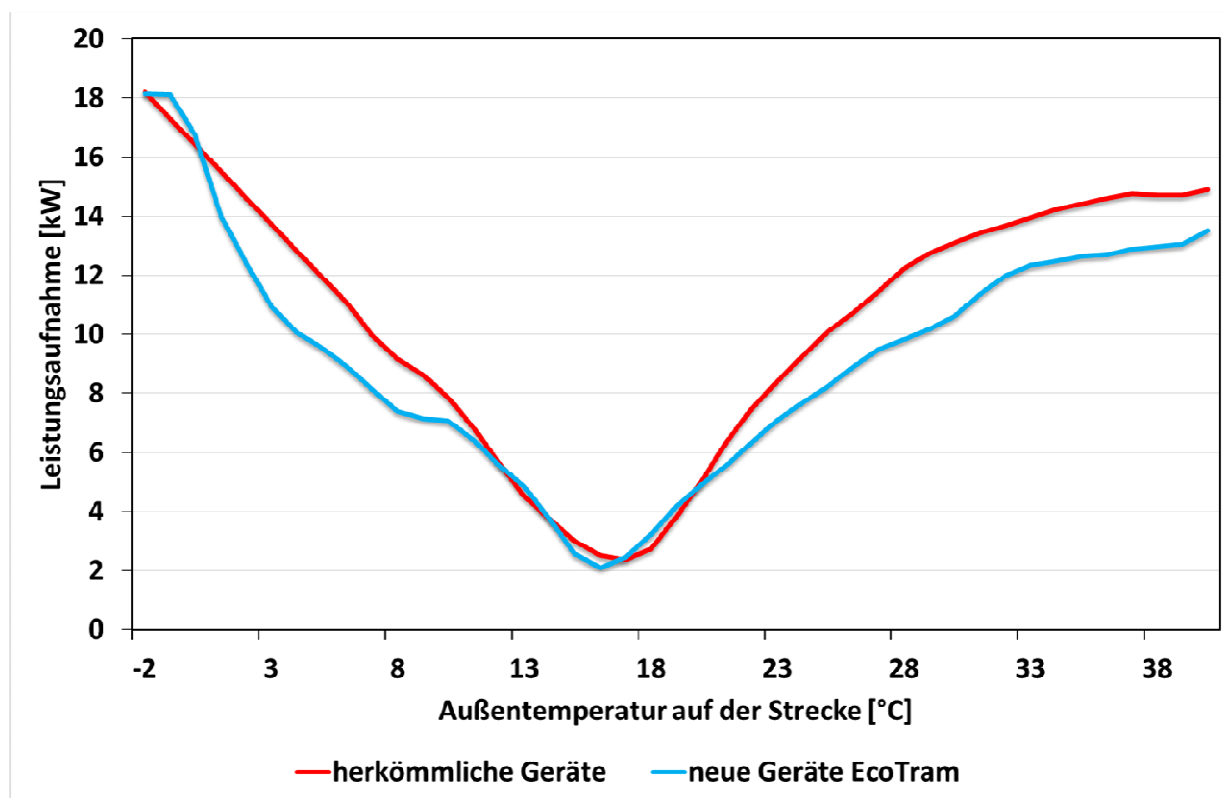


Abbildung 9: Vergleich der Leistungsaufnahme der Streckenmessung

Vergleicht man den Verlauf der Daten aus dem Klima-Wind-Kanal und der Streckenmessung wird die gerade in den Randbereichen ein sehr ähnlicher Verlauf deutlich. Leider zeigt sich gerade im häufig vorkommenden Übergangsbereich zwischen 10°C und 20°C kein geringerer Energieverbrauch. Trotzdem beträgt das gemessene Einsparpotential der Klimageräte 13%, unabhängig ob der Energieverbrauch auf die Daten des Jahres 2010/11 oder 2013/14 hochgerechnet werden. Bei einem bisherigen Energieverbrauch von ca. 32500 kWh ergibt sich somit ein Potential von 4225 kWh je Fahrzeug, was dem jährlichen Energieverbrauch eines Vierpersonenhaushalts entspricht. Ursachen für die geringen Einsparungen im Übergangsbereich auf der Strecke können unterschiedlich sein, vielleicht arbeitet der Regler in diesem Arbeitspunkt durch die dynamische Beanspruchung nicht optimal oder das Öffnen der Türen und der Wechsel der Fahrgäste haben einen größeren Einfluss als gedacht. Weiterhin ist zu beachten, dass Parameter wie Besetzung, Luftfeuchtigkeit und Strecke bei der Betrachtung der Ergebnisse nicht egalisiert wurden.

Die Abweichungen zwischen Windkanal und Messungen im Betrieb können auf viele der oben beschriebenen Parameter zurückgeführt werden, wobei immer die Vergleichbarkeit von Laborwerten und realer Welt geringfügig differenzieren. Eine sehr gute Vergleichbarkeit von Fahrzeugtypen kann aber durch die Messungen der Energie des Klimatisierungssystems im Klima-Wind-Kanal unter gleichen Parametern garantiert werden.

Im *Arbeitspaket „Erreichte Einsparungen darstellen“* wurden die in "EcoTram II" tatsächlich erreichten Einsparungen im Passagierbetrieb dargestellt.

4.2 Schlussfolgerungen

Für das Projektteam: im Zuge der Entwicklung und Umbauarbeiten auf das neue System sind zusätzliche Möglichkeiten aufgefallen, durch die man weiter Energie sparen könnte. Abgesehen von den ohnehin bekannten Einschränkungen (unveränderliche Schnittstellen und Baugrößen) hätten Maßnahmen wie feinere Regelungsmöglichkeiten des Kondensatorlüfters, Nutzung von Abwärmen und verfeinerte Regelalgorithmen der Steuerung weiter großes Einsparpotential. Diese Möglichkeiten haben sich erst im Laufe des Projektes ergeben und konnten weder zeitlich noch finanziell im EcoTram-Projekt noch untergebracht werden.

Generell wurde die Erkenntnis gewonnen, dass mit den Maßnahmen im Zuge des Projektes EcoTram die Möglichkeiten noch lange nicht ausgeschöpft sind und noch weitere Potentiale zur Energieeinsparung zur näheren Erprobung bereit stehen.

Zumindest für VKA als HKL-Lieferant werden die Ergebnisse aus EcoTram verwendet, um künftige Anfragen nach Wärmepumpen mit handfesten Zahlen hinterlegen zu können bzw. Kunden von der Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen zu überzeugen.

5 Ausblick und Empfehlungen

Das Forschungsprojekt EcoTram wurde im Mai 2014 erfolgreich abgeschlossen. Weiteres Entwicklungspotential bietet die Auslegung von Wärmepumpe bzw. Kältekreislauf für die Doppelnutzung. Auch die Möglichkeit Klimaanlage mit neuen Methoden zu regeln bietet viele Möglichkeiten. Der Klima-Wind-Kanal Wien konnte ideal für die Optimierung und Erprobung einer Neuentwicklung eingesetzt werden. Neben dem technologischen Erkenntnisgewinn für Siemens konnte auch das Hauptziel erreicht werden: Mit modernen neuen Klimageräten kann bis zu 26 % elektrische Energie für die Klimatisierung einer Straßenbahn eingespart werden. Besonders hervorzuheben ist, dass viele Maßnahmen bei der Neuentwicklung von Klimageräten und Fahrzeugen einfach und wirtschaftlich umgesetzt werden könnten, da viele Komponenten vorhanden sind und mit entsprechendem Know-How angepasst werden können. Dies trifft nicht nur auf Straßenbahnen zu, sondern kann auch allen Arten von Schienenfahrzeugen Anwendung finden. Eine Nutzung der Ergebnisse außerhalb des Schienenverkehrs ist auch vorstellbar.

6 Literaturverzeichnis

Folgende wissenschaftliche Publikationen wurden im Rahmen des Projekts publiziert:

- 42. Tagung Moderne Schienenfahrzeuge "ECOTRAM - Evaluierung von Energiesparmaßnahmen bei Straßenbahnen unter realen Betriebsbedingungen"
- R. Hofstädter, M. Kozek:
"Extension of a Thermal Simulation Model for a Tram and Simulation with On-Site Measurement Data";
Vortrag: MATHMOD 2012 - 7th Vienna International Conference on Mathematical Modelling, Wien/AT; 14.02.2012 - 17.02.2012; in: "*Preprints Mathmod 2012 Vienna, Abstract Volume*", (2012), S. 78.
- R. Hofstädter, M. Kozek:
"*Holistic Thermal Simulation Model of a Tram*";
Vortrag: CSSim2011, 2nd International Conference on Computer Modelling and Simulation, Brno, Czech Republic; 05.09.2011 - 07.09.2011; in: "*Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Modelling and Simulation-CSSim2011*", (2011), ISBN: 9788021443204; 8 S.
- R. Hofstädter, M. Kozek, G. Richter:
"*Modular thermodynamic modelling of a light rail vehicle*";
Vortrag: Railways and Environment, Delft; 16.12.2010 - 17.12.2010; in: "*Book of extended abstracts*", (2010), ISBN: 978-94-91085-02-4; S. 100 - 102.
- M. Kozek, R. Hofstädter:
"*Model predictive control for HVAC in light rail and metro vehicles*";
Vortrag: Urban and Suburban Rail Vehicles - New Challenges for Climatic Testing, Wien (eingeladen); 31.05.2012 - 01.06.2012; in: "*International Workshop: Urban and Suburban Rail Vehicles - New Challenges for Climatic Testing*", Vienna Climatic Wind Tunnel, (2012).

In folgenden Zeitschriften über das Projekt berichtet:

- Fachmagazing Railvolution 2/14 „EcoTram – Energy-Efficient Air Conditioning For Trams“

7 Anhang

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messtechnik in der Straßenbahn.....	11
Abbildung 2: Leistungsaufnahme der herkömmlichen und der neuen Klimageräte	12
Abbildung 3: Energieverbrauch der der Klimageräte bezogen auf die Häufigkeit der Außentemperatur im Zeitraum Sept. 2010 bis August.2011.....	13

IMPRESSUM

Verfasser

Siemens AG Österreich
IC RL MCL EN

Projektleiter:
Dr. Walter M. Struckl

Leberstrasse 34, 1110 Wien
Tel.: +43 (0) 51707 - 0
Mobil: +43 (0) 664 - 88555 370
E-Mail: walter.struckl@siemens.com
Web: www.siemens.at

Projekt- bzw. KooperationspartnerInnen:

- Wiener Linien GmbH & Co KG
- Schieneninfrastruktur -
Dienstleistungsgesellschaft mbH
- Vossloh Kiepe GmbH
- RTA Rail Tec Arsenal
- Fahrzeugversuchsanlage GmbH
- Technische Universität Wien Institut für
Mechanik und Mechatronik

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds
Gumpendorfer Straße 5/22
1060 Wien
E-Mail: office@klimafonds.gv.at
Web: www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige
Verantwortung für den Inhalt dieses
Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise
die Meinung des Klima- und Energiefonds
wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die
Weiternutzung der hier enthaltenen
Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH