

# NEUE ENERGIEN 2020

## Publizierbarer Endbericht

### Programmsteuerung

Klima- und Energiefonds

### Programmabwicklung

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

### Kurztitel

EcoTram

### Langtitel

Energieoptimierung der thermischen Fahrzeugsysteme bei Schienenfahrzeugen

### Programm/Programmlinie

Neue Energien 2020. 3. Ausschreibung

### Projektpartner

Technische Universität Wien, Institut für Mechanik und Mechatronik

RTA - Rail Tec Arsenal Fahrzeugversuchsanlage GmbH

Schieneninfrastruktur-Dienstleistungsgesellschaft m.b.H.

Siemens AG Österreich:

Vossloh Kiepe Ges.m.b.H.

Wiener Linien GmbH & Co KG

### Projektstart u. -dauer

1.12.2009, 22 Monate

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	2
1.1	Aufgabenstellung .....	2
1.2	Schwerpunkte des Projektes .....	2
1.3	Einordnung in das Programm .....	3
1.4	Verwendete Methoden .....	3
1.5	Aufbau der Arbeit .....	3
2	Inhaltliche Darstellung .....	3
3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....	6
3.1	Welche Erkenntnisse für das Projektteam wurden aus dem Projekt gewonnen? .....	6
3.2	Wie arbeitet das Projektteam mit den erarbeiteten Ergebnissen weiter .....	7
4	Ausblick und Empfehlungen .....	8
5	Literatur .....	9
6	Anhang .....	10

# 1 Einleitung

## 1.1 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.

## 1.2 Schwerpunkte des Projektes

Die Schwerpunkte des Projekts „EcoTram“ liegen darin, innovative Maßnahmen zu identifizieren, die ökologisch sinnvoll und technisch möglich sind und wirtschaftliche Einsparungen bringen. Um diese Ziele messbar zu machen, wurden folgende Hauptziele festgelegt:

- Erstellung eines Energieprofils Ist-Zustand
- Maßnahmenkatalog zur Steigerung der Energieeffizienz
- Bewertung von Maßnahmen (Energiespar-Potenzial)
- Simulationsmodell

Mit dem Ist-Zustand des Energieprofils wird der derzeitige Energieverbrauch des Fahrzeugs in allen auftretenden Betriebszuständen vermessen und eine klare Ausgangsbasis geschaffen. Die technischen Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz werden einzeln aufgelistet, diskutiert und in einem Katalog zusammengefasst. Diese Maßnahmen werden dann einer detaillierten Prüfung unterzogen, im Bezug auf das ökologische, technische und wirtschaftliche Potential. Es soll auch ein Simulationsmodell entwickelt werden, das den thermischen Zustand des Schienenfahrzeugs und der Klimaanlage möglichst genau quantitativ beschreibt sowie die derzeitige Reglerlogik abbildet.

### **1.3 Einordnung in das Programm**

Die Projektart des geförderten Projektes ist Industrielle Forschung. Es kann dem Themenfeld „Energieeffiziente Fahrzeugkomponenten und –systeme“ zugordnete werden.

### **1.4 Verwendete Methoden**

**Klima-Wind-Kanal Messungen**

**Vor-Ort Messungen in der Straßenbahn**

**Analytische Modellbildung**

**Datenbasierte Modellbildung**

**Gewichtete Nutzwertanalyse**

### **1.5 Aufbau der Arbeit**

Das Projekt wurde in folgende Phasen gegliedert

- Projektmanagement
- Administration
- Definition der Verbesserungspotenziale
- Messphase
- Dynamische Simulation
- Auswertungsphase

## **2 Inhaltliche Darstellung**

In der Phase „Definition der Verbesserungspotentiale“ wurde als repräsentative Strecke für die weiteren Betrachtungen die Linie 62 ausgewählt. Auf der Strecke gibt es „Hochgeschwindigkeitsbereich“ (Hochgeschwindigkeit für eine Straßenbahn ist > 60 km/h), Tunnelfahrten und normale Stadtfahrt. Für die Strecke wurden verschiedene Betriebsparameter und Rahmenbedingungen erhoben (z.B.: Besetzungsgrad der Straßenbahn [durchschnittlicher, maximal und minimaler] für jede Haltestelle und Fahrtrichtung). Gleichzeitig wurden, ausgehend vom Kenntnisstand des Fahrzeugherstellers und des HVAC Ausrüsters, bekannte energieeffiziente Optimierungen untersucht. Außerdem wurde eine umfassende Literatur- und Patentrecherche durchgeführt. Die gefundenen Maßnahmen wurden nach wirtschaftlichen und energetischen Auswirkungen grob bewertet, um wenig effiziente Maßnahmen möglichst früh ausschließen zu können. (So wurde die Maßnahme „Windvorhang“, bei der es zu einer Erhöhung des Energieverbrauchs kommen wäre, nicht weiter verfolgt.) Im darauf folgenden Arbeitspaket der Phase wurde ein verbindlicher Katalog von Messzielen erstellt, der die Arbeitsgrundlage für die Messphase darstellte. Vor allem wurden die repräsentativen Messgrößen und die notwendige Genauigkeit festgelegt.

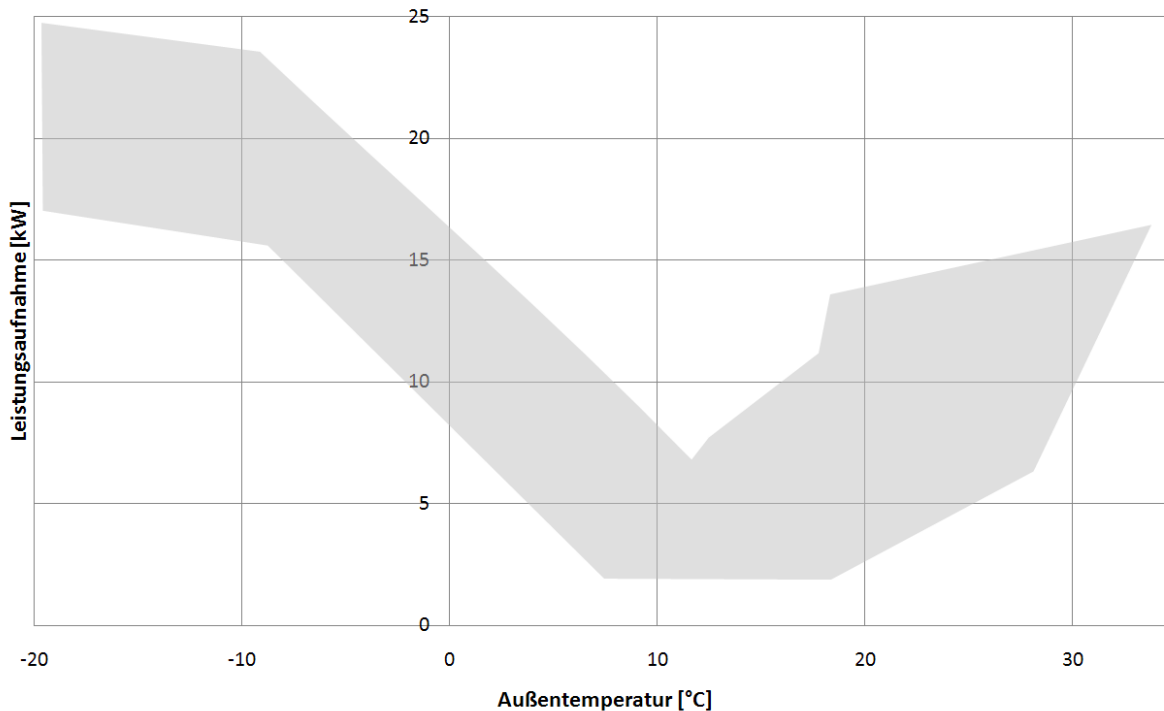
In der Messphase wurde mit den definierten Messzielen das Messprogramm in den Klima-Wind-Kanal-Versuchen und für die Streckenmessung festgelegt, sowie ein Messstellenplan entwickelt. Danach wurde das Fahrzeug für die Messungen im Klima-Wind-Kanal vorbereitet und mit Messausrüstung ausgestattet. Anschließend wurden die Messungen nach dem Programm im Klima-Wind-Kanal durchgeführt. Während den Messungen fand die Pressekonferenz statt, bei der das Bild (siehe Abbildung 1) entstand.



**Abbildung 1: Pressekonferenz im Klima-Wind-Kanal, Mai 2010 (v.l.n.r.: Haller, Kozek, Dlaska, Lichtenegger, Wolfram, Schuster)**

Nach den Klima-Wind-Kanal-Versuchen wurde ein Teil der Messeinrichtungen wieder abgebaut und das Fahrzeug für die Messung auf der Strecke vorbereitet, die im Anschluss begannen. Da die Streckenmessungen gute Ergebnisse lieferten, wurde die Dauer die Messungen auf insgesamt 16 Monate ausgeweitet. Die Messphase wurde beendet nachdem die Messausrüstung wieder aus dem Fahrzeug ausgebaut worden war. In Abbildung 7 ist der gemessene Energieverbrauch eines Klimageräts im ULF A1 als grauer Bereich über der Temperatur dargestellt. Der Bereich ergibt sich, da zusätzliche Einflüsse (Sonne, Besetzung etc.) nicht einzeln aufgelistet sind.

Leistungsaufnahme der Klimageräte im ULF A1



**Abbildung 2: Die Leistungsaufnahme der Klimageräte ist als grauer Bereich über der Temperatur dargestellt. Die Leistungsaufnahme hängt aber auch von mehreren anderen Faktoren ab, u.a. Besetzungsgrad, Einstrahlung der Sonne und Betriebszustand der Klimaanlage**

In der Phase Dynamische Simulation wurde ein Modell des Fahrzeugs in thermisch-energetischer Sicht erstellt. Im ersten Schritt wurden die Anforderungen aller Projektpartner sowie die Struktur des Modells festgelegt. Mit Grundgleichungen der Thermodynamik wurde ein grob diskretisiertes Modell des Fahrzeugs, der Klimaanlage und des Reglers erstellt und mit Messdaten validiert. Für Modellteile, die keine ausreichende Genauigkeit aufwiesen, wurde eine BlackBox Identifikation durchgeführt (mathematische Modellierung aus Messdaten). Im letzten Arbeitspaket der Phase wurden mit dem erstellten Modelle der Straßenbahn mehrere Simulationen über verschiedene Zeitbereiche durchgeführt.

Durch die vorhergehenden Arbeiten sind umfangreiche Mess- und Simulationsdaten angefallen. Um die Daten zu nutzen war es notwendig, diese auf eine geeignete Art aufzubereiten. Dazu wurden geeignete Software-Werkzeuge entwickelt und angewendet. Beim Erstellen des Energieprofil-Modells wurde besonderes Augenmerk auf die Generalisierungsfähigkeit gelegt. Dadurch wird die Übertragung der Methode auf andere Fahrzeuge deutlich erleichtert.

Um einen Katalog der Umbaumaßnahmen zu erhalten wurden die gefundenen Maßnahmen detaillierter betrachtet und die zu erreichende Einsparung (wirtschaftliches Kriterium) mit der

technologischen Möglichkeit (technisches Kriterium) gegeneinander abgewogen. Für die erhaltenen Umbaumaßnahmen wurde im letzten Teil ein Umrüstplan erstellt.

In der Auswertungsphase wurden die Daten aus den Messungen und der Simulation analysiert und in Abhängigkeit der wichtigsten Parameter der Energieverbrauch des Fahrzeugs über das Messjahr berechnet. Die Schlussfolgerung des Projektes war ein Katalog von möglichen Umbaumaßnahmen am Schienenfahrzeug ULF anhand dessen ein Umrüstplan entworfen wurde.

### **3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

#### **3.1 Welche Erkenntnisse für das Projektteam wurden aus dem Projekt gewonnen?**

Grundsätzlich stellen die Deliverables zu den Arbeitspaketen die geplante Ergebnisse und Erkenntnisse aus diesem Projekt dar, da die Hauptziele des Projektes im Erkenntnisgewinn bestanden. Mit den erreichten Ergebnissen wird im nachfolgenden Projekt „EcoTram II“ weitergearbeitet werden. Die erreichten Ergebnisse können den Hauptzielen zugeordnet werden

- Energieprofil Ist-Zustand
- Maßnahmenkatalog zur Steigerung der Energieeffizienz
- Bewertung von Maßnahmen (Energiespar-Potenzial)
- Simulationsmodell

und sind hier noch einmal zusammengefasst. Zusätzlich traten noch einige nicht zu erwartende Ergebnisse auf, die weiter unter beschrieben sind.

#### **Geplante Ergebnisse**

##### Energieprofil Ist-Zustand

Durch die Messungen im Klima-Wind-Kanal wurde stationäre und dynamische Versuche durchgeführt und zu einem Energieprofil kombiniert. Für die Streckenmessdaten wurde das entwickelte Verfahren erneut angewendet und die Ergebnisse beider Energieprofile des Ist-Zustands verglichen. So konnte nicht nur ein Energieprofil des Ist-Zustandes über die Außentemperatur ermittelt werden, sondern auch anhand des umfassenden Datenmaterials gezeigt werden, dass die beiden Energieprofile identisch sind (im Rahmen der üblichen Messunsicherheit). Dadurch konnte die zusätzliche Erkenntnis gewonnen werden: „Klima-Wind-Kanal Versuche stellen die thermische Umwelt qualitativ und quantitativ korrekt dar.“ Es wurden sogar die bei der Messung gefundenen Artefakte (siehe Zusätzliche Ergebnisse) bestätigt.

##### Maßnahmenkatalog zur Steigerung der Energieeffizienz

Die gesamte Phase 1.3 beschäftigte sich mit dem Steigern der Energieeffizienz. Im AP 1.3.1 wurden Informationen über den Ist-Zustand der Betrieblichen Rahmenbedingungen gesammelt. Die in einem Brainstorming ermittelten technischen Möglichkeiten (AP 1.3.2) wurden danach untersucht und

ungeeignete Maßnahmen ausgeschlossen (z.B.: Windvorhang vor den Türen). So wurde ein Maßnahmenkatalog zur Steigerung der Energieeffizienz erhalten.

#### Bewertung von Maßnahmen (Energiespar-Potenzial)

Mit dem gefundenen Maßnahmen wurde eine gewichtete Nutzwertanalyse durchgeführt. Dabei wurden die Maßnahmen anhand einer Abwägung zwischen energetisch/technischen und wirtschaftlichen Kriterien ausgewählt. Die Parameter für diese Auswahl wurden von den Projektpartnern gemeinsam festgelegt. Es zeigte sich, dass diese Auswahl abhängig von den gewählten Gewichten war. Daher wurde die Auswahl zusätzlich einer Sensitivitätsanalyse der Gewichtungparameter unterzogen. So konnte gezeigt werden, dass die gewählten Maßnahmen robust gegenüber Veränderungen der Gewichtungen sind. Das ist insbesondere für die Generalisierung wichtig.

#### Simulationsmodell

Die Arbeitspakete der gesamten Phase 1.5 beschäftigen sich mit dem Erstellen des dynamischen Simulationsmodells. Zusätzlich wurden noch spezielle Versuche im Klima-Wind-Kanal durchgeführt um verschiedene Parameter des Modells zu bestimmen. Mit den festgelegten Spezifikationen aus AP 1.5.1 wurde in den darauf folgenden Arbeitspaketen das dynamische Simulationsmodell entwickelt (AP 1.5.2 und AP 1.5.3). Mit dem erhaltenen Simulationsmodell wurden die Messdaten der Streckenmessung nachsimuliert. Über ein Jahr gerechnet ergibt sich ein geringer Simulationsfehler von etwa 10%. Die Generalisierungsfähigkeit soll im nachfolgenden Projekt „EcoTram II“ nachgewiesen werden.

Zusätzlich zu den systematisch erworbenen Erkenntnissen und Ergebnissen wurden einige nicht zu erwartende Ergebnisse erreicht.

#### **Zusätzliche Ergebnisse**

Es konnten einige Situationen identifiziert werden, in denen es zu einem Energieverbrauch kommt, ohne dass dadurch der thermische Komfort im Fahrzeuginneren verbessert wird. Die aufgetretenen Ereignisse konnten den beiden Kategorien Heizung-, Lüftungs- und „Betrieb des Fahrzeugs“ zugeordnet werden.

### **3.2 Wie arbeitet das Projektteam mit den erarbeiteten Ergebnissen weiter**

Die in diesem Projekt erarbeiteten Ergebnisse über Einsparungspotentiale an thermischen System Schienennahverkehrsmittel stellen das Fundament für das nachfolgende Projekt „EcoTram II“ dar. Ohne die in diesem Projekt geleisteten Arbeiten wäre „EcoTram II“ nicht möglich.

#### Ziele und Inhalte von „EcoTram II“<sup>1</sup>:

Hauptziel von „EcoTram II“ ist die Evaluierung der in „EcoTram“ ausgewählten Maßnahmen an einem nicht-kommerziellen Prototyp. Speziell sind dies die nach einer ersten Vorauswahl identifizierten Maßnahmen Fahrzeugmodifikationen, innovatives HKL-Gerät mit Wärmepumpe und die modellprädiktive Regelung. Weitere Ziele sind die messtechnische Validierung der damit erreichten Einsparungen im Klima-Wind-Kanal und im Betrieb, die Darstellung der erreichten Einsparungen am konkreten Beispiel ULF sowie die Bewertung aller untersuchten Maßnahmen in Bezug auf Neukonstruktionen bzw. die Umrüstung anderer Fahrzeuge. Zu diesem Zweck gibt es drei parallele Projektphasen: (1) Modifikationen am Fahrzeug, wobei vor allem kosteneffiziente aber innovative Maßnahmen geplant sind. (2) Die HKL-Geräte werden komplett neu konzipiert, wobei Wärmepumpe, frequenzvariable Ansteuerung und neue Steuergeräte zum Einsatz kommen. (3) Als Regelalgorithmus wird ein modellprädiktiver Regler entwickelt, welcher an sich eine große Innovation im Bereich HKL-Geräte darstellt. Nachdem alle Umbauten integriert sind und der nicht-kommerzielle Prototyp in Betrieb genommen ist, werden Messungen im Klima-Wind-Kanal und im Passagierbetrieb durchgeführt. Durch Auswertung und Vergleich der Messungen mit den Ergebnissen aus „EcoTram“ können stichhaltige Zahlen zur Energieeinsparung vorgelegt werden.

## **4 Ausblick und Empfehlungen**

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich dieses Projekt systematisch mit der Optimierung der thermischen Systeme eines Fahrzeugs im Schienennahverkehr beschäftigt hat. Es konnten verschiedene Möglichkeiten gefunden werden, die technisch machbar und wirtschaftlich vielversprechend sind, um die Energieeffizienz zu verbessern.

Ob die Energieeffizienz tatsächlich technologisch umsetzbar ist, wird Gegenstand des Projekts „EcoTram II“ sein und dort auch ausführlich untersucht werden. Da viele der Technologien noch nicht in Schienenfahrzeugen des Schienennahverkehrs eingesetzt wurden, wird hier Neuland betreten und die eine oder andere Herausforderung zu bewältigen sein.

Abschließend empfiehlt das Projektkonsortium das gefundene Einsparungspotential aufzugreifen und die Verbesserungen an einer Straßenbahn zu erproben. Dies kann am besten in einem nicht-kommerziellen Prototypen erfolgen, der auch im normalen Betrieb eingesetzt werden sollte.

---

<sup>1</sup> entnommen aus dem FFG Antrag für das Folgeprojekt „EcoTram II“  
3. AS NE 2020 Endbericht: EcoTram



## 5 Literatur

Folgende wissenschaftliche Publikationen wurden im Rahmen des Projekts publiziert:

- Amri, H., Hofstädter, R.N., Kozek, M.: Energy Efficient Design and Simulation of a Demand Controlled Heating and Ventilation Unit. In: print (2011)
- Hofstädter, R.N., Richter, G., Kozek, M.: Modular thermodynamic modelling of a light rail vehicle. In: *Railways and Environment*. Delft University of Technology, The Netherlands, Delft (12 2010)
- Hofstädter, R.N., Kozek, M.: Holistic Thermal Simulation Model of a Tram, In: *International Conference on Computer Modelling and Simulation*, conference proceedings, Brno, 9 2011

In folgenden Zeitschriften über das Projekt berichtet:

- *Magazin Pictures of Future*, –, Ausgabe Nachhaltige Mobilität | Modernisierung von Straßenbahnen, Christine Rüth, Herbst 2010
- *Wirtschaftsblatt*, Ursula Rischaneck | 30.09.2011 | 00:30 "Auch eine elektrische Tram kann deutlich grüner werden"  
<http://www.wirtschaftsblatt.at/archiv/auch-eine-elektrische-tram-kann-deutlich-gruener-werden-490459/index.do>
- *Hitech Magazin*, Siemens AG Österreich  
[https://www.cee.siemens.com/web/at/de/corporate/portal/Nachhaltigkeit/Kunden\\_Portfolio/Industrie/Pages/EcoTram.aspx](https://www.cee.siemens.com/web/at/de/corporate/portal/Nachhaltigkeit/Kunden_Portfolio/Industrie/Pages/EcoTram.aspx)
- Kiepe Intern, Ausgabe März 2011

## 6 Anhang

Seit dem Jahr 1992 vergibt der VCÖ jährlich den Mobilitätspreis. Der VCÖ-Mobilitätspreis ist Österreichs größter Wettbewerb für nachhaltige Mobilität und effizienten Transport. Mit dem Mobilitätspreis werden innovative Verkehrsprojekte ausgezeichnet, die Vorbildwirkung haben und zur Nachahmung anregen.<sup>2</sup>

Im September 2010 erreichte das Projektkonsortium in der Kategorie „Öffentlicher Verkehr“ den 2. Platz. Der Preis wurde von den beiden Ministern Doris Bures (Verkehrsministerin), Nikolaus Berlakovich (Umweltminister) und Willi Nowak (VCÖ-Geschäftsführer) vergeben.



**Abbildung 3: VCÖ-Mobilitätspreis, September 2010 (v.l.n.r.: BM N. Berlakovich (BMLFUW), DI U. Puz (SCHIG mbH), Mag. N. Witura (SCHIG mbH), Ao Univ. Prof. Dr. M. Kozek (TU Wien), Ing. M. Pollreis (Vossloh Kiepe), BM D. Bures (BMVIT), W. Nowak (VCÖ), Dir. DI Günter Steinbauer (Wiener Linien), Mag. A. Pálffy (Siemens AG Österreich)) (VCÖ Verkehrsclub Österreich/APA-Fotoservice/Preiss)**

<sup>2</sup> <http://www.vco.at/> (Über VCÖ)