

# Ecotram – Verbesserung der Energieeffizienz im Bereich der thermischen Komfortsysteme

Das Projekt Ecotram wurde im Jahre 2009 von fünf Konsortialpartnern mit dem Ziel gestartet, geeignete Maßnahmen zu entwickeln um den Energieverbrauch des Heizungs-, Klimatisierungs- und Lüftungssystems (HKL) einer Straßenbahn zu senken. Dabei wurden anhand realer Betriebsmessungen und Klimawindkanalversuchen geeignete Maßnahmen evaluiert und im anschließenden Fahrgastbetrieb nachweislich quantifiziert.

## WARUM DIE ENERGIEEFFIZIENZ BEI HKL-SYSTEMEN EINE ROLLE SPIELT

Moderne Schienenfahrzeuge besitzen in der Regel umfassende Heizungs-, Klimatisierungs- und Lüftungssysteme (HKL), die bei allen Umgebungsbedingungen ein angenehmes Klima für den Fahrgast bzw. Fahrer bereitstellen. HKL-Systeme benötigen abhängig vom Fahrgastaufkommen und äußeren Einflüssen (Temperatur, Sonnenstrahlung, Luftfeuchte, etc.) einen nicht unwesentlichen Energiebedarf.

In Betriebsmessungen konnte immer wieder beobachtet werden, dass die HKL-Anlage neben der Traktion der größte Energieverbraucher von Schienenfahrzeugen im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) ist.

Außerdem sind die Auslegungsparameter für die Entwicklung von HKL-Systemen einer hoch dynamischen Variabilität ausgesetzt, die einerseits durch wechselnde Umweltbedingungen (Licht-Schattenwechsel aufgrund Wolken, Gewitter mit schnell ansteigender Luftfeuchte, Starkwind, etc.)



**Dipl. Ing. Dr. techn. Walter Martin Struckl**  
Senior Engineer / Projektleiter  
Ecotram, Siemens AG Österreich  
walter.struckl@siemens.com



**Dipl. Ing. Gregor Richter**  
Projektleiter  
Rail Tec Arsenal  
gregor.richter@rta.eu

**BILD 1:** Die für das Ecotram Projekt umgebaute Straßenbahn ULF A1 mit Spezialbeklebung bei Testfahrten in Wien (Quelle: Siemens)



andererseits durch betriebliche Ereignisse (hohe Fluktuation der Fahrgäste in Umsteigebahnhöfen, Wartezeiten in Umkehrschleifen ohne Fahrgäste, etc.) ständig wechselt.

Auf Grund dieser Erkenntnisse wurde im Jahre 2009 die Projektidee zu Ecotram geboren, die sich eine Senkung des Energieverbrauchs des HKL-Systems zum Ziel setzte.

## DIE ENERGIEEFFIZIENZMASSNAHMEN IM PROJEKT ECOTRAM

Das Ecotram Projekt basiert auf dem Ansatz energetische Verbesserungsmaßnahmen zu identifizieren, zu entwickeln und zu testen.

Ecotram besteht aus zwei Projektphasen, welche sich in einen theoretischen und einen praktischen Teil gliedern (vgl. Bild 2). Ziel der ersten, theoretischen Phase war die Untersuchung der energetischen Potenziale im Bereich des HKL-Systems, welche unter Berücksichtigung der technischen Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit im Falle des Siemens Straßenbahnfahrzeuges ULF Typ A1 (vgl. Bild 1) der Wiener Linien möglich war. Dabei wurden Messungen im Fahrbetrieb



und im Klimawindkanal durchgeführt, die Aufschluss über den tatsächlichen Energieverbrauch des HKL-Systems inklusive der unterschiedlichen Subsysteme (beispielsweise Klimakompressor) geben sollte. Aus den Ergebnissen der Messungen konnten wichtige Basisdaten für ein Simulationsmodell zur Energieberechnung und des technisch-wirtschaftlichen Evaluierungsprozesses abgeleitet werden. Die Ergebnisse der Evaluierung führten zu einem Maßnahmenkatalog, in dem die effizientesten Maßnahmen für den Betreiber Wiener Linien konzeptioniert wurden.

Die zweite Projektphase zielte auf die praktische Erprobung bzw. Umsetzung der in Phase 1 vorgeschlagenen Umrüstmaßnahmen ab, wichtige Themen, wie Zulassung, Schnittstellenklärung und Messkonzepte waren abzuklären. Die Maßnahmen wurden am Fahrzeug umgerüstet und mit Hilfe von vorher entwickelten Umbaukonzepten in der Werkstätte der Wiener Linien umgesetzt. Die alten drei HKL-Dachgeräte wurden abgehoben und durch die neue Vossloh Kiepe HKL 338 Eco ersetzt. Zeitlich parallel zum Umbau des Fahrzeuges wurden Kabel und Messtechnik in das Fahrzeug eingebaut.

Auf Basis der Evaluierung wurden folgende Maßnahmen (siehe Bild 3) für die Umrüstung des Serienfahrzeuges umgesetzt, wobei durch die bereits bestehenden Schnittstellen am Wagenkasten der Einbau- raum weitgehend vordefiniert war.

**STUFENLOSES ELEKTRISCHES HEIZREGISTER**

Die Ansteuerung des Heizregisters und das Heizregister selbst wurden getauscht. Zweistufig wurde das Heizregister mit Halbleitern verschleißfrei gesteuert, so dass die Heizleistung nun quasi stufenlos und effizienter geregelt werden konnte.

**VARIABLE FRISCHLUFTMENGE**

Das Klimagerät wurde mit einem drehzahl-gesteuerten Umlüfter und einer zusätzlichen Frischluftklappe ausgestattet. Frischluft- und Umluftmenge konnten variiert werden. Somit konnte energetisch effizienter geregelt werden, da in Zusammenhang mit der CO<sub>2</sub>-Steuerung weniger Frischluft gekühlt oder erwärmt werden musste.

**CO<sub>2</sub> ABHÄNGIGE STEUERUNG**

CO<sub>2</sub>-Fühler können den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft im Fahrgastraum messen. Anhand des CO<sub>2</sub>-Gehalts konnte die optimale Frischluftmenge ermittelt werden und damit Energie eingespart werden. Herkömmliche Geräte arbeiten oftmals mit einer Frischluftmenge, die auf die maximale Fahrgastanzahl ausgelegt ist.

**WÄRMEPUMPE**

Grundsätzlich neu ist die Verwendung einer Wärmepumpe im Klimagerät einer Straßenbahn. Der Kältekreislauf des bestehenden Kompressors der Kälteanlage wird hierbei umgedreht und bringt Wärmeenergie von Außen ins Fahrzeug. Die Wärmepumpe kann wirtschaftlich im Temperaturbereich von +3 °C bis +20 °C arbeiten und ersetzt das elektrische Heizregister. Besondere Herausforderung war es die notwendigen Ventile im bestehenden Bauraum des HKL Gerätes unterzubringen und ohne einen Flüssigkeitsabscheider zu arbeiten.

Der Wirkungsgrad der Wärmepumpe ist im Vergleich zum Heizregister ca. doppelt so hoch.

# www.eurailpress.de/archiv

Das Portal für die Bahnbranche

Über 210.000 Seiten  
Bahn-Fachwissen!



Recherchieren Sie in allen Ausgaben seit 1952 - exklusiv für Abonnenten.

- Komfortable Volltextsuche
- Beiträge im PDF-Format
- Download direkt auf den PC





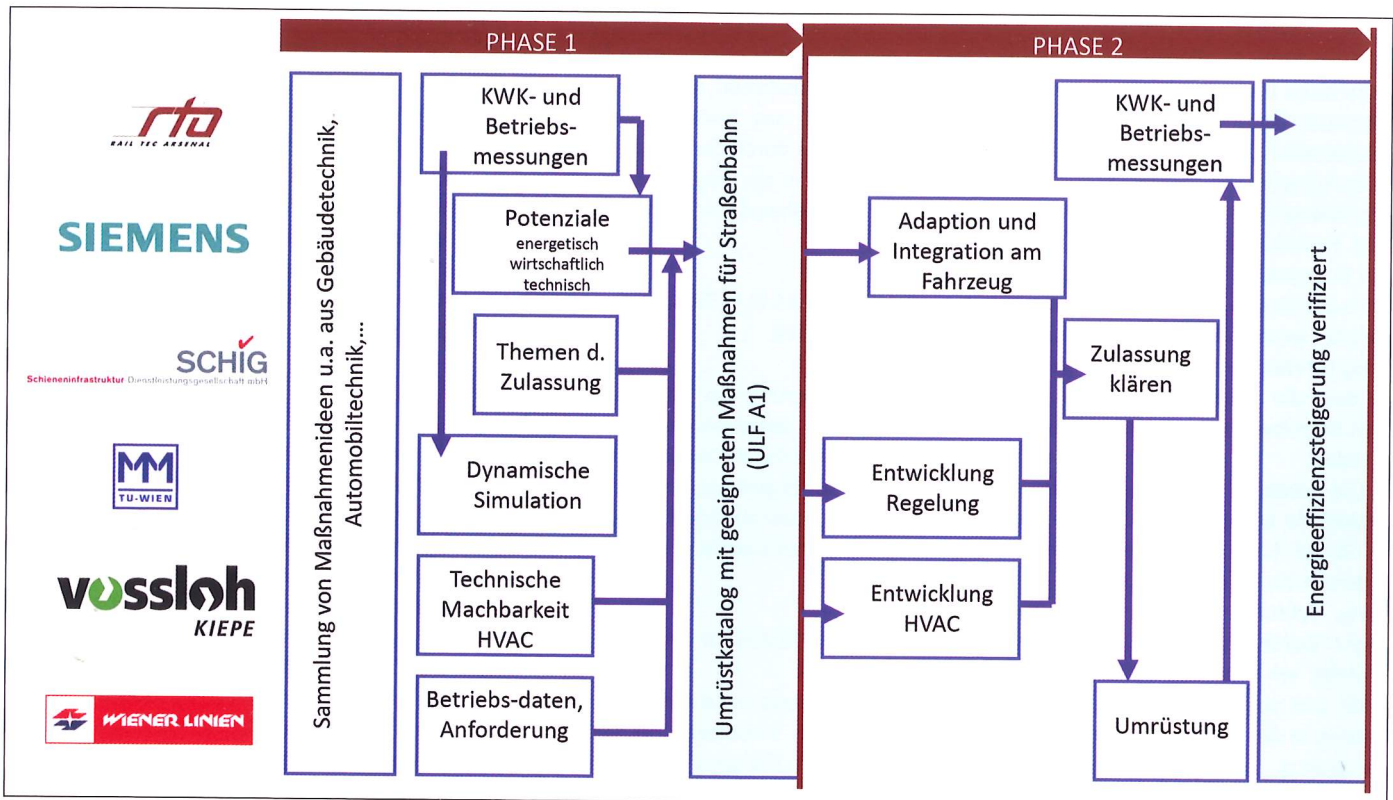


BILD 2: Projektphasen und Arbeitsergebnisse unter Berücksichtigung der arbeitspaketverantwortlichen Projektpartner (Quelle: Siemens)

KOMPRESSOR MIT VARIABLER SPANNUNGSVERSORGUNG

Die Kompressordrehzahl wird abhängig von der Spannung und der Frequenz im Bereich von 30 bis 90 Hz gesteuert. Somit kann die Leistung im Kühl- und Wärmepumpenbetrieb ohne einen Bypass fein reguliert werden. Vor allem im Kühlbetrieb arbeitet das Klimagerät energieeffizienter, da die Kälteleistung bedarfsgenau abgerufen werden kann und der Bypass, der sonst überschüssige Kälteleistung vernichtet, nicht eingesetzt werden muss.

KÄLTEMITTEL

Das herkömmliche Kältemittel 134a wurde durch 407c ersetzt. Dies war sinnvoll, um

eine höhere Leistungsausbeute im Betrieb der Wärmepumpe zu erreichen.

SONNENSCHUTZFOLIEN

Im Kühlbetrieb wird ca. 1/3 der notwendigen Kühlleistung für den Ausgleich der durch die Sonnenstrahlung ins Fahrzeug eingebrachten Wärme benötigt. Hierbei hat der Transmissionswert der Fensterscheiben den größten Einfluss. Da es aus Gewichtsgründen nicht möglich war die Einfachverglasung durch Isolierverglasung auszutauschen, wurden die Scheiben der Ecotram mit Sonnenschutzfolien beklebt. Diese Folien weisen ca. dreimal mehr Sonnenenergie ab, so dass sich im Sommer der Innenraum weniger erwärmt. Gleichzeitig wurde es im Fahrgastraum etwas dunkler, jedoch gab es

hierzu aus dem Betrieb keine negative Rückmeldung der Fahrgäste. Durch die Sonnenschutzfolien musste im Sommer weniger Kälteleistung bereitgestellt werden. Der negative Effekt durch einen höheren Heizbedarf im Winter dürfte geringer sein als die Einsparungen im Sommer.

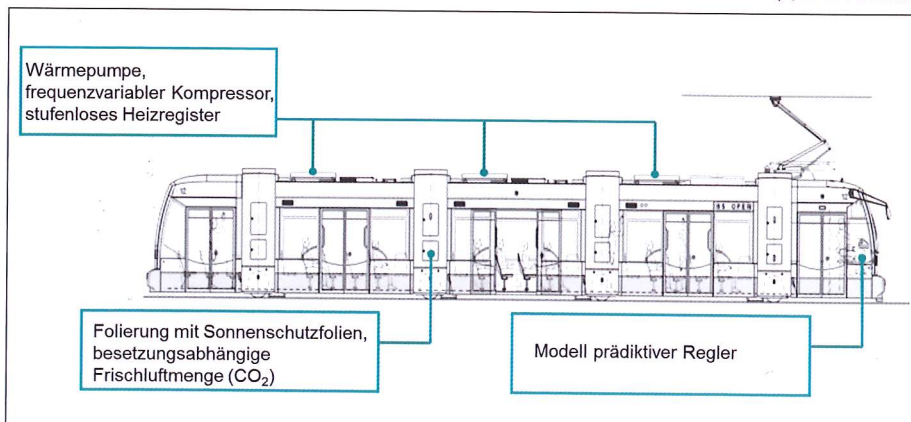
FAHRZEUGFARBE

Voruntersuchungen hatten gezeigt, dass die Oberflächentemperatur von weiß lackierten Oberflächen im Sommer ca. 20 Kelvin kälter sind als schwarz lackierte Oberflächen. Da man das Fahrzeug für den Testbetrieb nicht umlackieren wollte, entschied man sich für eine weiße Folienbeklebung. Durch die weiße Farbe heizte sich das Fahrzeug weniger auf, als durch die herkömmliche grau rote Lackierung. Durch die weiße Farbe des Fahrzeugs musste im Sommer weniger Kälteleistung bereitgestellt werden, vergleichbar mit dem Effekt der Sonnenschutzfolien.

KLIMAREGLER

Die herkömmlichen Klimageräte hatten einen Regler, der mit einem Zustandsautomaten auf die Innenraumtemperatur regelte, aber keine Rücksicht auf eine energieeffiziente Erzeugung der Heiz- bzw. Kühlleistung nahm. Die Anzahl an Schaltstufen im Seriengerät von Lüfter, Kompressor und Heizregister umfasste 72 Schaltzustände. Das neue HKL-System der Ecotram hat durch die feinen

BILD 3: Übersicht Energieeffizienzmaßnahmen am Siemens ULF A1 (Quelle: Siemens)



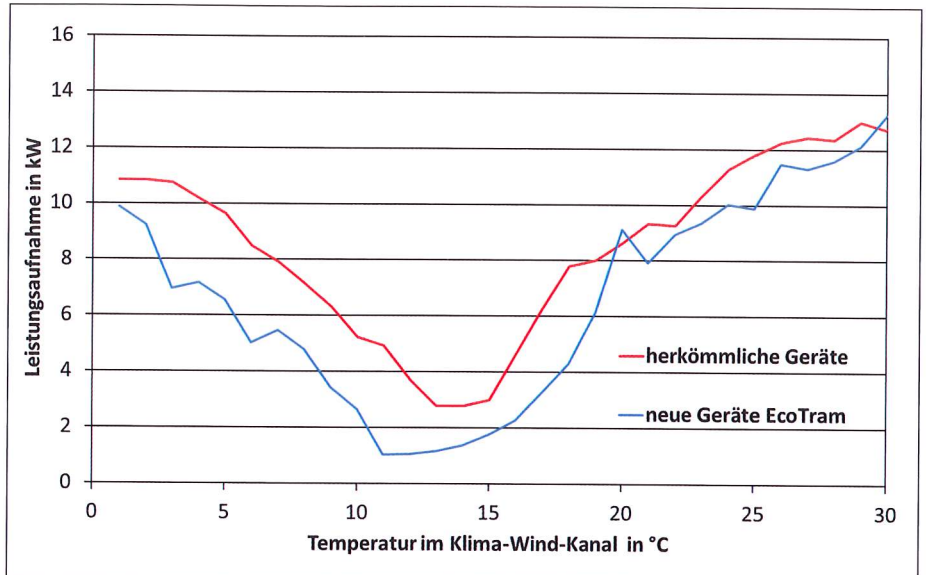


Abstufungen ca. 1,2 Millionen Schaltzustände zu bieten, die sich je nach Betriebsparameter auf den energieoptimalen Zustand einregeln. Der Führungsregler berechnet auf Basis aller ihm zur Verfügung stehenden Messdaten die notwendige Heiz- bzw. Kühlleistung, die durch die HKL-Geräte eingebracht werden muss, um die Innenraumtemperatur zu regeln. Ein anschließender Folgeregler ist darauf optimiert aus einem Kennfeld den sparsamsten Schaltzustand für die Klimageräte auszuwählen. Das Kennfeld wurde in aufwendigen Versuchen im Klimawindkanal Wien ermittelt. Der Regler ist das Herzstück der neuen HKL-Geräte und hilft über den gesamten Temperaturbereich Energie zu sparen, indem alle Komponenten des Klimageräts optimal angesteuert werden.

Nach Abschluss der Zulassungsfahrten und der Betriebsfreigabe für die oben genannten Maßnahmen konnte die Ecotram für die Messungen im Klimawindkanal und im Fahrbetrieb freigegeben werden.

### EVALUIERUNG DER MASSNAHMEN IM KLIMAWINDKANAL UND BETRIEB

Nach dem Umbau des Fahrzeuges und der Inbetriebnahme der neuen HKL-Geräte



**BILD 4:** Leistungsaufnahme des Serienfahrzeuges ULF A1 (in roter Farbe) und der umgebauten ULF A1 im Klimawindkanal (in blauer Farbe) (Quelle: RTA)

solte überprüft werden, wie hoch die Einsparungen an Energie sind. Hierzu wurden im Klimawindkanal ausführliche Versuche durchgeführt, während die Leistungsaufnahme der HKL-Geräte vermessen wurde. Jedes der HKL-Geräte wird mit verschie-

denen Spannungen versorgt: DC 600 V für das Heizregister, AC 400 V 50 Hz für die Lüfter und AC 400 V frequenzvariabel für den Kompressor zum Kühlen und Betrieb der Wärmepumpe. Somit wurde jeweils Strom und Spannung gemessen, aus dem die aktu- »



## Connecting Forces – Driving Innovation.

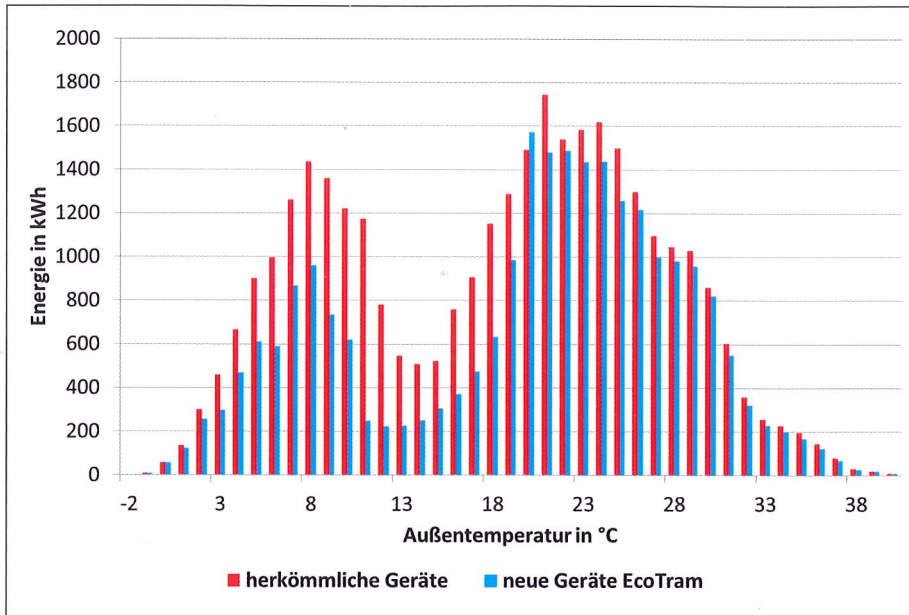
Viele Güter- und Personenzüge sind mit unseren Produkten, Komponenten und Systemen weltweit im Einsatz. Als Spezialist für Antriebstechnik bieten wir Ihnen optimal auf Ihre Anforderungen angepasste Lösungen. Erhöhen Sie die Zuverlässigkeit, die Sicherheit und die Effizienz im täglichen Betrieb Ihrer Schienenfahrzeuge durch Systemkompetenz und Service aus einer Hand.  
voith.de



Besuchen Sie uns auf der InnoTrans:  
Halle 1.2, Stand 220







**BILD 5:** Energieverbrauch der Klimageräte bezogen auf die Häufigkeit der jährlich auftretenden Außentemperatur in Wien (Quelle: RTA)

elle Leistungsaufnahme bzw. die benötigte Energie berechnet wurde.

Alle Messwerte wurden zusammen mit weiteren Daten in einer autonomen Datenerfassung aufgezeichnet, die sowohl im Klimawindkanal, als auch im späteren Betrieb kontinuierlich Messdaten aufzeichnete. Neben der Leistungsmessung wurden Innen- und Außentemperatur, Luftfeuchtigkeit und Sonneneinstrahlung, Betriebsparameter der HKL-Geräte und Position bzw. Geschwindigkeit des Fahrzeugs aufgezeichnet.

Vor den eigentlichen Messungen des Energieverbrauchs wurde die Wärmepumpe ausführlich getestet und optimiert. Hierbei war zum einen das Umschalten zwischen Heizen (mit der Wärmepumpe) und Kühlen eine technische Herausforderung, zum anderen die untere Einsatzgrenze, bis zu der die Wärmepumpe effizient betrieben werden konnte. Anschließend wurden verschiedene Rampenversuche durchgeführt, um den Energieverbrauch zu bewerten. Hierbei wurde bei konstanten Bedingungen die Lufttemperatur kontinuierlich geändert. Mit einem Gradienten von 3 Kelvin pro Stunde wurde hierbei der Temperaturbereich von +0°C bis +28°C durchgeführt. Diese Rampenversuche wurden mit unterschiedlichen Randbedingungen, wie Sonnensimulation, Fahrgeschwindigkeit und Besetzungssimulation durchgeführt. Die Rampenversuche wurden bei einem Serienfahrzeug ULF A1 im Jahre 2010 und dem Erprobungsfahrzeug Ecotram im Jahre 2013 durchgeführt, wobei die Ergebnisse anhand der Leistungsaufnahme der HKL-Geräte und der Außentemperatur in Bild 4 dargestellt wurden.

Deutlich erkennbar ist, dass der Energieverbrauch der optimierten HKL-Geräte deutlich

unter dem der herkömmlichen Geräte liegt. Ausnahme ist der Bereich bei einer Außentemperatur von ca. +20°C. In diesem Bereich wird aufgrund der Regelerarchitektur ein rascher Wechsel zwischen Heiz- und Kühlzyklen verursacht. Auswirkungen dieser Schaltbedingungen sind ein kleiner, punktueller Anstieg des HKL Energieverbrauchs, welcher durch eine Adaption der Schaltbedingungen in diesem Bereich kompensiert werden kann.

Berechnet man aus den Kurven in Bild 4 das mögliche Einsparpotenzial des HKL-Systems des Serienfahrzeuges ULF A1 gegenüber des HKL-Systems der Ecotram, ergibt sich dieser Wert. Dieser berücksichtigt jedoch nicht die tatsächliche Temperaturverteilung über ein Jahr. Somit ist es sinnvoller, einen Jahresenergieverbrauch anhand einer gemessenen Temperaturklassifikation (Temperaturhistogramm) 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. Dieses Verfahren geht davon aus, dass die Besetzung

und Fahrtgeschwindigkeit im Mittel konstant sind und dass die Sonnenstrahlung mit der Außentemperatur korreliert. Auf Basis der Berechnung der Klimawindkanal-Daten konnte eine Einsparung von 26% bezogen auf das HKL System von Ecotram gegenüber dem Serienfahrzeug ULF A1 nachgewiesen werden (vgl. Bild 5). Konkret benötigen die neuen Klimageräte im Mittel 5,7 kW Leistung anstatt 7,7 kW Leistung.

Nach den Messungen im Klimawindkanal wurden auch Messungen im Fahrgastbetrieb auf der Linie 62 in Wien durchgeführt, wobei die Messperiode fast ein Jahr dauerte.

Seit Juli 2013 war die umgebaute Ecotram Straßenbahn im Passagierbetrieb auf der Linie 62 in Wien unterwegs. Auch hierbei wurden alle Messdaten kontinuierlich aufgezeichnet. Ziel der Messungen im Betrieb war es, die Zuverlässigkeit zu überprüfen und die im Klimawindkanal gemessene Energieeinsparung zu verifizieren. Die Messungen im Fahrgastbetrieb der Ecotram ergaben eine Energiereduktion des HKL-Systems um 13% bezogen auf das HKL-System des Serienfahrzeuges ULF A1. Aufgrund der langen Vergleichszeiträume und der sich ständig wechselnden Betriebsumgebung (Tunnel, Temperaturen, Linienführung und Fahrgastwechsel) müssten zwei Testfahrzeuge eigentlich dieselbe Strecke zur selben Fahrzeit absolvieren, um einen direkten Vergleich herleiten zu können. Der Testbetrieb wurde im Mai 2014 beendet.

Das Forschungsprojekt Ecotram wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im Rahmen von „Neue Energien 2020“ gefördert. ◀

**Literatur**

- Struckl W., 2007: Dissertation, Green Line – Umweltgerechte Produktentwicklungsstrategien für Schienenfahrzeuge auf Basis der Lebenszyklusanalyse des Metrofahrzeuges Oslo, TU Wien, 11/2007
- Richter G., 2010: Ecotram Research Project: How much energy is used by the HVAC of a tram? Measurements in the Climatic Wind Tunnel and in service, Railvolution; Volume 10, No. 6/2010
- Canori M., 2010: Diplomarbeit, Ecotram – Handlungsmaßnahmen zur Energieverbrauchssenkung der Heiz-, Kühl- und Lüftungsgeräte, TU Wien, 12/2010

**► SUMMARY**

**Ecotram – Improving the energy efficiency of thermal comfort systems**

The project content is the integrated optimisation of heating, ventilation and air conditioning (HVAC) of the Siemens ULF A1 tram, aimed at improved efficiency while simultaneously conserving thermal comfort. Using measurements made at the climatic wind tunnel and during operation as well as simulations, the relationships between all relevant parameters were analysed and evaluated. Based on these findings, measures for optimising a Siemens ULF A1 were modified with the aim of lowering the energy demand for thermal systems onboard. After a test cycle in the climatic wind tunnel, the Ecotram HVAC system now uses 26% less energy than that installed on the serial ULF A1. The project was finalised in May 2014.