

eb

**Elektrische
Bahnen**

**Elektrotechnik
im Verkehrswesen**

Energie-Verbrauchsanalyse und
-Einsparpotenziale bei Klimaanlage

Energie-Verbrauchsanalyse und -Einsparpotenziale bei Klimaanlageanlagen

Gabriel Haller und Manfred Kreitmayer, Wien

Der Energiebedarf für die Klimatisierung von Schienenfahrzeugen ist nicht unerheblich. Ausgehend von den Anforderungen an die thermische Behaglichkeit wurde im Klima-Wind-Kanal der Energieverbrauch einer Klimaanlage unter definierten Umgebungsbedingungen untersucht. Die Analyse ergab, dass der Verbrauch im Einklang mit einer gesamtsystemischen Betrachtungsweise ohne Komforteinbußen deutlich reduziert werden könnte, und zwar zum Beispiel mit einer von der Besetzung abhängigen Frischluftmengenregelung oder durch Abluftwärme-Rückgewinnung.

Power consumption analysis and potential power savings of air-conditioning systems

A considerable amount of power is required for the air-conditioning of rail vehicles. Based on the thermal comfort standards a test was made in the climatic wind tunnel to determine the power consumption of an air-conditioning system under defined ambient conditions. The analysis revealed that power consumption could be noticeably reduced without any sacrifice of comfort if considering the system as a whole, e.g. by controlling the outside air intake in dependence of the passenger load or using a concept of the recovery of heat from the exhaust air.

Analyse des besoins en énergie et économies potentielles avec les climatiseurs

Le besoin en énergie pour la climatisation des véhicules ferroviaires n'est pas considérable. En plus des exigences liées au confort thermique, le besoin en énergie d'un système de climatisation est recherché sous des conditions d'environnement dans la soufflerie climatique. L'analyse montre que le besoin, avec prise en considération du système complet, pourrait sans diminution du confort, être franchement réduit, par exemple avec une utilisation de la régulation indépendante d'air frais ou bien à travers le gain sur la soufflerie d'air chaud.

1 Einführung

Das Komfortangebot in Schienenfahrzeugen zu verbessern, ist eine wichtige Maßnahme zur Steigerung der Attraktivität des öffentlichen Verkehrs. Vor allem die Fahrzeugklimatisierung kann hier einen im wahrsten Sinn des Wortes „fühlbaren“ Beitrag leisten.

Für dieses Mehr an thermischer Behaglichkeit für die Fahrgäste wird aber nicht unerheblich mehr Energie benötigt, was zum Beispiel bei einem Reisezugwagen bis zu 100 MWh/a betragen kann. Bewährte Klimakonzepte bieten heute meist eine sehr gute thermische Behaglichkeit in Schienenfahrzeugen, eine Energieverbrauchsoptimierung stand dabei aber bisher nicht im Vordergrund.

Mit steigender ökologischer und ökonomischer Ausrichtung der Bahnunternehmen gewinnt nunmehr das Erschließen von Energieeinsparpotenzialen, wie sie unter anderem bei der Klimatisierung von Schienenfahrzeugen gegeben sind, immer mehr an Bedeutung.

2 Thermische Behaglichkeit

2.1 Definition

Thermische Behaglichkeit ist gegeben, wenn eine Person die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Luftbewegung

und die Wärmestrahlung der Umgebung als optimal empfindet, also weder wärmere noch kältere und weder trockenere noch feuchtere Raumluft wünscht.

Die thermische Behaglichkeit wird beeinflusst durch:

- persönliche Faktoren, wie Aktivitätsgrad, Bekleidung, Aufenthaltsdauer
- räumliche Faktoren, wie Strahlungstemperatur, Temperatur der Umschließungsflächen
- raumlufttechnische Faktoren, wie Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchte

Diese Faktoren wirken in komplexer Weise auf den Wärmehaushalt des Menschen ein. Daher ist für eine Gruppe von Personen in einem Fahrzeug nur unter Berücksichtigung aller Einflussgrößen ein Zustand erreichbar, der von einem möglichst hohen Prozentsatz der Fahrzeuginsassen als behaglich empfunden wird.

2.2 Normen

Neben der Richtlinie UIC 553 – Lüftung, Heizung und Klimatisierung der Reisezugwagen – und der dazugehörigen Richtlinie UIC 553-1 wurden in den letzten Jahren folgende Europäischen Normen neu erstellt, die auch die unterschiedlichen Betriebserfordernisse, wie Einsatzort und Klimazone, berücksichtigen:

- EN 13129-1:2003: Bahnanwendungen – Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs – Teil 1: Behaglichkeitsparameter
- EN 13129-2:2004: Bahnanwendungen – Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des Fernverkehrs – Teil 2: Typenprüfung
- EN 14750-1:2006: Bahnanwendungen – Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs – Teil 1: Behaglichkeitsparameter
- EN 14750-2:2006: Bahnanwendungen – Luftbehandlung in Schienenfahrzeugen des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs – Teil 2: Typprüfungen
- EN 14813-1:2006: Bahnanwendungen – Luftbehandlung in Führerräumen – Teil 1: Behaglichkeitsparameter
- EN 14813-2:2006: Bahnanwendungen – Luftbehandlung in Führerräumen – Teil 2: Typprüfungen

Tabelle 1: Von EN für unterschiedliche Randbedingungen geforderte Mindest-Frischlufthmenge in m³/h pro Person im Fahrgast- und im Führerraum.

Außentemperatur T_a	Fernverkehr	Nahverkehr	Führerraum
	EN 13129-1	EN 14750-1	EN 14813-1
		Kategorie A	Kategorie B
$T_a \leq -20 \text{ °C}$	10	15	12
$-20 \text{ °C} < T_a < -5 \text{ °C}$	15	zum Erreichen der Leistungsfähigkeit Reduktion zulässig auf 10	zum Erreichen der Leistungsfähigkeit Reduktion zulässig auf 8
$-5 \text{ °C} < T_a \leq +26 \text{ °C}$	20		
$T_a > +26 \text{ °C}$	15		

Tabelle 2: In EN geforderter Gesamt-Wärmedurchgangskoeffizient k in W/m²·K abhängig von Klimazone für Winter und Fahrzeugkategorie.

Zone	Fernverkehr		Nahverkehr		Führerraum	
	EN 13129-1		EN 14750-1		EN 14813-1	
	doppelstöckig		Kategorie		Kategorie	
	nein	ja	A	B	A	B
I	2,0	2,5	2,5	3,5	2,2	4,0
II	1,6	2,5	2,2	3,0	2,0	3,5
III	1,2	-	2,0	2,5	2,0	3,0

Wie aus der Aufstellung ersichtlich ist, spezifiziert Teil 1 der Normen die Behaglichkeitsparameter unter definierten Randbedingungen und damit auch die Leistungsfähigkeit der klimatechnischen Einrichtungen, während Teil 2 das Versuchsprogramm und die Messverfahren zur Beurteilung der klimatechnischen Einrichtungen beschreibt.

Dem Einsatz entsprechend, sind die Anforderungen so abgestimmt, dass die erwartete thermische Behaglichkeit gewährleistet ist, die Anlage jedoch nicht für etwaige Extrembedingungen überdimensioniert ist. Beispielsweise ist an einem Hochsommertag im Fahrgastraum einer Straßenbahn oder U-Bahn eine Temperaturabsenkung um wenige Kelvin mit entsprechender Entfeuchtung bereits ausreichend.

2.3 Behaglichkeitsparameter

In den genannten Normen sind als Behaglichkeitsparameter Lufttemperatur, Oberflächentemperatur, Strömungsgeschwindigkeit und relative Luftfeuchte definiert.

Für die Lufttemperaturen gelten neben der mittleren Raumlufttemperatur auch Kriterien hinsichtlich der horizontalen und vertikalen Temperaturverteilung, um örtliches thermisches Unbehagen möglichst gering zu halten. Auch für die Oberflächentemperaturen sind unterschiedliche Anforderungen definiert, die einen Kompromiss zwischen subjektiv Wünschenswertem und praktisch Machbarem darstellen.

Um eventuelle örtliche Zegerscheinungen analysieren und gegebenenfalls auf ein annehmbares Maß einschränken zu können, sind in den Normen zulässige Strömungsgeschwindigkeiten definiert, und zwar jeweils als Grenzkurve in Abhängigkeit von der örtlichen Lufttemperatur.

Die Anforderungen an die relative Luftfeuchte haben zum Ziel, bei klimatisierten Fahrzeugen eine ausreichende

Entfeuchtung zu gewährleisten. In den Normen sind die zulässigen relativen Luftfeuchtebereiche in Diagrammen definiert.

2.4 Frischluftmenge und Wärmedurchgangskoeffizient

Ebenfalls in den Normen definiert sind die Frischluftmenge und der Gesamt-Wärmedurchgangskoeffizient, der k -Wert, des Fahrzeugs, da diese fahrzeugspezifischen Parameter die Behaglichkeitsparameter maßgeblich beeinflussen.

Erhöhte CO₂-Konzentrationen rufen Ermüdung, Konzentrationsschwierigkeiten und den Eindruck stickiger und verbrauchter Luft hervor; daher ist stets eine definierte Frischluftmenge zuzuführen. Die in den Normen geforderten Werte (Tabelle 1) stellen einen Kompromiss zwischen einer energetisch vertretbaren Betriebsweise und einer ausreichenden Reduktion der CO₂-Konzentration dar.

Der in den Normen definierte Gesamt-Wärmedurchgangskoeffizient (Tabelle 2) charakterisiert die thermische Qualität eines Fahrzeugs, also die Wirksamkeit der Wärmedämmung und den Einfluss von Undichtigkeiten. Mangelnde Wärmedämmung wirkt sich direkt auf die Oberflächentemperaturen im Fahrzeuginneren aus und beeinflusst damit über die Strahlungstemperatur sehr stark die thermische Behaglichkeit für die Fahrgäste.

2.5 Komfortkennwerte

Um die Analyse einzelner Behaglichkeitsparameter und deren wechselseitige Beeinflussung zum Zwecke der Beschreibung der thermischen Behaglichkeit zu vereinfachen, wird das so genannte vorausgesagte mittlere Votum, das PMV (predicted mean vote) verwendet. Das PMV

Tabelle 3: Zuordnungsskala von vorausgesagtem mittlerem Votum (PMV) und subjektivem Behaglichkeitsempfinden.

PMV	Empfinden
+3	zu warm
+2	warm
+1	etwas warm
0	neutral
-1	etwas kühl
-2	kühl
-3	kalt

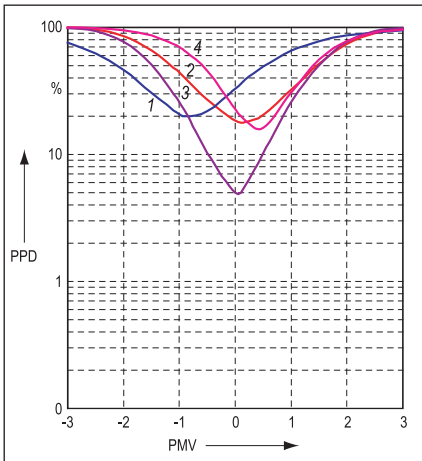


Bild 1: Zusammenhang zwischen dem vorausgesagten mittleren Votum (PMV) nach Tabelle 3 und dem Prozentsatz Unzufriedener (PPD).

- 1 PPD Sommer
- 2 PPD Winter
- 3 PPD ISO 7730 [1], Fanger [2]
- 4 PPD Mayer [3]

ist der Durchschnittswert der Klimabeurteilung durch eine hinreichend große Personengruppe anhand der sieben-teiligen Skala nach Tabelle 3.

Der vorausgesagte Prozentsatz Unzufriedener, PPD (predicted percentage dissatisfied) genannt, stellt eine qualitative Voraussage der Anzahl der mit einem bestimmten Umgebungsklima unzufriedenen Menschen dar. Die Kurven nach ISO 7730 [1] und Fanger [2] in Bild 1 veranschaulichen den Zusammenhang zwischen PMV und PPD. Der geringste mögliche Prozentsatz Unzufriedener liegt bei dieser Kurve bei 5%. Neuere Untersuchungen nach Mayer [3] geben einen geringsten möglichen Prozentsatz von 18% an.

Bei Untersuchungen von Schienenfahrzeugen des Fern- und Nahverkehrs [4] wurde der geringste mögliche Prozentsatz Unzufriedener aus den Befragungsergebnissen

ebenfalls mit 18% für den Winterbetrieb und 20% für den Sommerbetrieb ermittelt (Bild 1).

Bei Einhaltung der normierten Behaglichkeitsbedingungen werden diese Prozentsätze auch in der Praxis erreicht.

3 Energieverbrauchsanalyse

3.1 Messung auf der Steckdose oder im Klima-Wind-Kanal

Um den Energiebedarf und damit den Verbrauch elektrischer Energie der Klimaanlage in Schienenfahrzeugen analysieren zu können, sind möglichst genaue Leistungsdaten bei verschiedenen Umgebungs- und Betriebszuständen erforderlich.

Bei Messungen auf der Strecke kann zwar der Gesamtenergieverbrauch über den gewählten Untersuchungszeitraum und unter den dabei herrschenden Umgebungsbedingungen erfasst werden. Auch können bei Paralleluntersuchungen mit zum Beispiel zwei Wagen mit unterschiedlichen Klimaanlage im gleichen Zugverband die Ergebnisse direkt miteinander verglichen werden. Eine genaue und vor allem reproduzierbare, systematische Ermittlung der Leistungsaufnahme bei verschiedenen Umgebungs- und Betriebszuständen ist aber aufgrund der sich ständig ändernden Bedingungen nur schwer möglich.

In einem Klima-Wind-Kanal dagegen können die verschiedenen Umgebungs- und Betriebsbedingungen, wie zum Beispiel in Form einer Besetzungssimulation, beliebig eingestellt und die Leistungsdaten bei konstanten Bedingungen ermittelt werden.

Viele der für die Energieanalyse als notwendiger betrachteten Parameterkombinationen der Umgebungs- oder Betriebsbedingungen werden bereits durch vorgesehene Klimaversuche der einschlägigen Normen abgedeckt (Tabelle 4), sodass mit der Leistungsdatenermittlung ein Zusatznutzen entsteht.

Die ergänzenden Versuche betreffen vor allem den Übergangsbereich zwischen Heizen und Kühlen, der detaillierter untersucht werden muss, um den Leistungskurvenverlauf für verschiedene Lastzustände durchgehend darstellen zu können.

Für die Leistungsdatenermittlung würde an sich ausreichen, den Gesamtenergieverbrauch des Fahrzeuges

mit allen Nebenaggregaten, neben der Klimaanlage auch Bordumrichter und Batterieladung, breitbandig zu erfassen; für den Betreiber ist nämlich der Gesamtverbrauch elektrischer Energie maßgebend, also zum Beispiel auch die Verlustleistung des Bordumrichters, und die weiteren Nebenaggregate haben einen gegenüber der Klimaanlage

Tabelle 4: Standard-Testprogramm nach [5] mit Besetzungsgrad und Umgebungsbedingungen als Parameter.

Besetzung	simulierter Fahrtwind km/h	Eintrag Sonne W/m ²	Außentemperatur °C					
			-20	-10	0	+10	+22	+35
0	Stillstand	0	x	x	x	x	x	x
0	jeweilige	0	x	x	x	X	←	x
100	mittlere Fahrgeschwindigkeit	0	X	X	x	X	→	x
100	700	700				X	←	x

x Versuche in EN 13129 enthalten
 X, x konstante Bedingungen, Beharrungszustand
 ← → zwischen 10 °C und 35 °C veränderliche Außentemperatur, um 3 K/h sinkend oder steigend

vergleichsweise geringen und konstanten Energieverbrauch, der bei Bedarf auch leicht herausgerechnet werden kann.

Für eine detaillierte Analyse und für Schlussfolgerungen für Energieeinsparpotenziale der Klimaanlage können und werden natürlich auch die Energieverbräuche diverser Einzelverbraucher, wie Gebläse, Nachheizkörper, Hauptheizregister, Kompressor, messtechnisch erfasst (Bild 2).

Das nachfolgend gezeigte Beispiel basiert auf solchen Gesamtenergieverbrauchs-Messungen, enthält also die Energieverbräuche aller Nebenaggregate. Bild 3 zeigt das Ergebnis einer Messung an einem Doppelstock-Reisezugwagen bei einer Außentemperatur von 0 °C, bei Fahrtwind-Minimum (Stillstand) und ohne Besetzung. Aus der gemessenen Momentanleistung ist deutlich das Regeln über die Heizregisterstufen mit je zirka 16 kW ersichtlich. Die mittlere Leistungsaufnahme beträgt hierbei rund 20 kW bei einer eingeregelt mittleren Raumlufttemperatur von 22 °C. Der Beharrungszustand nach einer Temperatur-Sollwertänderung von 20 °C auf 22 °C am Beginn des Versuches war bereits nach zwei Stunden erreicht.

Auf diese Weise wird die Leistungsaufnahme bei allen erforderlichen Parameterkombinationen ermittelt und somit können temperaturabhängige Leistungskennlinien erstellt werden, die die Basis für weitergehende Berechnungen und Analysen sind.

3.2 Berechnung des Energieverbrauchs

In Bild 4 ist das Prinzipschema zur Berechnung des Energieverbrauchs dargestellt. Zunächst sind die mittels Standard-Testprogramm ermittelten Leistungskennlinien erforderlich. Im oberen linken Diagramm von Bild 4 sind zwei Leistungskennlinien eines Reisezugwagens mit und ohne Besetzung bei 120 km/h dargestellt.

Um praxisnah den Energieverbrauch berechnen zu können, sind weiters die für den Einsatzbereich des Fahrzeuges maßgeblichen Klimadaten erforderlich. Im unteren linken Diagramm in Bild 4 sind die mittleren Tagestemperaturverläufe für jeden Monat eines Jahres dargestellt [6].

Mit den Leistungskennlinien, den Klimadaten und spezifischen Betriebsparametern wie Fahrzeugeinsatz und Besetzungsgrad können zum Beispiel der jährliche Energieverbrauch kundenspezifisch berechnet werden. Im oberen rechten Diagramm von Bild 4 ist dieser monatsweise dargestellt.

Werden gleiche standardisierte Parameter für die Berechnungen herangezogen, sind direkte Vergleiche der Energieeffizienz von Fahrzeugen oder Ausführungen möglich; es können Optimierungsbemühungen quantitativ nachgewiesen, aber auch Einsparungspotenziale erkannt und analysiert werden. Weiters ist damit die Grundlage dafür gegeben, LCC-Angaben objektiv belegen und die Klimatisierung eines Fahrzeuges unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz mittels des so genannten Energy Labelling, der Einstufung in Energieeffizienzklassen A bis G, bewerten zu können.



Bild 2: Messaufbau zum Erfassen der Momentanleistungen sowie der Energieverbräuche von Einzelkomponenten der Klimaanlage.

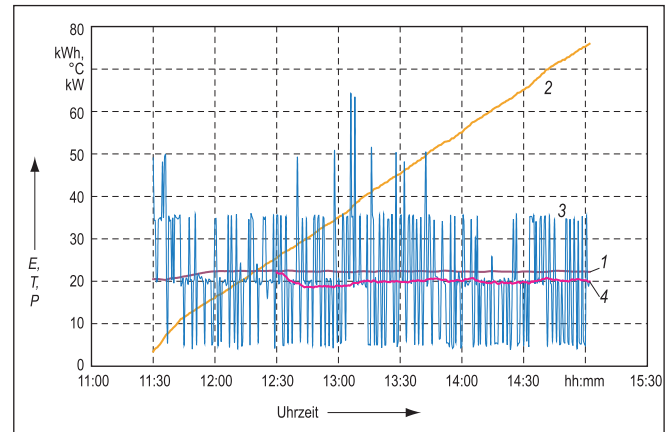


Bild 3: Energieverbrauchsmessung an einem Doppelstock-Reisezugwagen bei 0 °C, Fahrtwind Minimum (Stillstand) und ohne Besetzung.

- 1 mittlere Raumlufttemperatur
- 2 Energieverbrauch
- 3 Momentanleistung
- 4 gemittelte Leistung

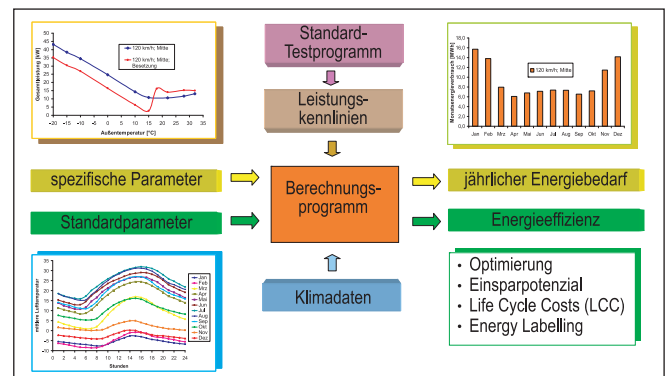


Bild 4: Prinzipschema für das Berechnen der Energieverbräuche und Energieeffizienz.

4 Einsparpotenziale

4.1 Überblick

Die Lastberechnung ist die Grundlage für die aufzuwendende Heiz-, Kälte-, Ent- und Befeuchtungsleistung zur thermischen Aufbereitung eines Zuluft-Massestromes, mit dessen Hilfe die thermischen Lasten zu kompensieren sind.

Thermische Lasten entstehen im Raum durch innere und äußere Störgrößen, die sich nachteilig auf den vor-

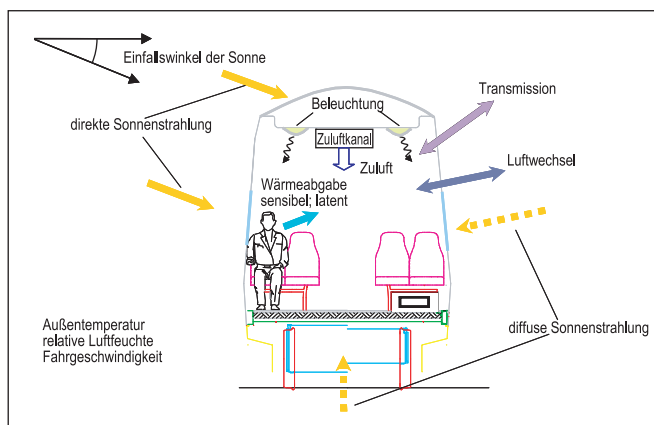


Bild 5: Schematische Darstellung der Störgrößen hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit für einen Fahrgastraum.

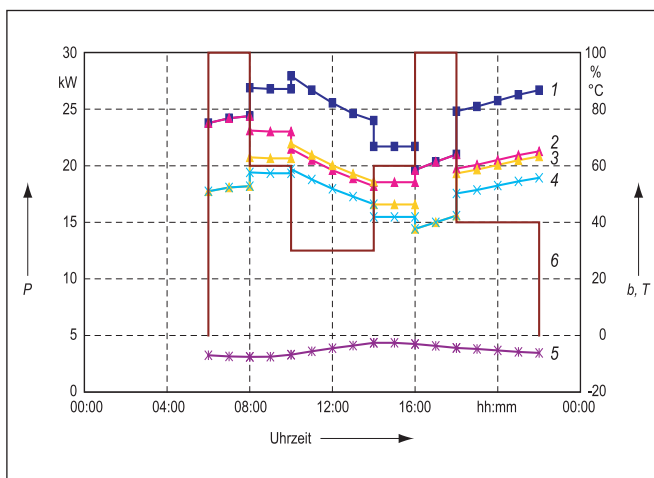


Bild 6: Gegenüberstellung der ausgewerteten Leistungen für die Klimatisierung ohne und mit Optimierungsmaßnahmen unter Ansatz eines gewählten Besetzungsprofils für den mittleren Tagestempverlauf im Januar nach [6].

- 1 ohne Maßnahmen
- 2 bei besetzungsabhängiger Frischluftmenge (1)
- 3 bei Abluftwärme-Rückgewinnung (2)
- 4 mit Maßnahmen (1) + (2)
- 5 Außentemperatur
- 6 Besetzungsgrad

geschriebenen Raumluftzustand auswirken und somit einen wesentlichen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit im Fahrgastraum haben.

Störgrößen werden allgemein unterteilt in:

- innere Störgrößen, wie Wärme- und Feuchtigkeitsabgabe durch den Menschen, Wärmeabgabe durch Beleuchtungskörper, Schaltschränke
- äußere Störgrößen, wie Wärmestrom durch direkte oder diffuse Sonnenstrahlung und Transmission sowie Enthalpie- und Feuchtigkeitsstrom durch ungewollten Luftwechsel

Wie aus dem Bild 5 ersichtlich, wird der Energiebedarf zur Klimatisierung von Schienenfahrzeugen durch viele Faktoren beeinflusst und hieraus abgeleitet gibt es die unterschiedlichsten Ansätze, den Energiebedarf für die Klimatisierung zu optimieren.

Jedoch sind immer alle singulären Energieeinsparungsmaßnahmen auf ihre gesamtsystemischen Aus-

wirkungen zu untersuchen. Zum Beispiel würde eine stärkere Wärmedämmung des Wagenkastens zwar den Energiebedarf für die Klimatisierung reduzieren, andererseits aber infolge der damit verbundenen Gewichtszunahme des Fahrzeugs einen Mehrverbrauch bei der Traktion bedeuten. Bei gesamtenergetischer Betrachtung wäre der Energieeinsparungseffekt geringer oder er würde sich sogar gänzlich aufheben.

Aufgrund der Komplexität der Möglichkeiten und Auswirkungen ist eine gesamtsystemische Betrachtung und Optimierung notwendig, weshalb die Energieverbrauchsoptimierung nicht alleinige Aufgabe des „Klimalieferanten“ sein kann.

Die Einsparpotenziale reichen von einfachen Maßnahmen, wie

- besetzungsabhängig geregelte Frischluftmenge,
- intelligente, optimierte Klimaregelung,
- bedarfsbezogene Sollwertanpassung, bis hin zu Neukonzepten, wie
- optimierte Wärmedämmung des Wagenkastens und/oder Kanalsystems,
- aktive Isolierung, beispielsweise Nutzung der Abluftwärme zum Erwärmen von Wagenkastenflächen,
- Abluftwärmerückgewinnung,
- lastabhängige Kälteanlage,
- Wärmepumpe.

Auch eine regelmäßige Wartung und die Überprüfung der vorgesehenen Parameter können den Energieverbrauch deutlich reduzieren helfen.

4.2 Luftmengenregelung und Abluftwärme-Rückgewinnung

Im Folgenden werden als Beispiele zwei Maßnahmen, nämlich die besetzungsabhängige geregelte Frischluftmenge und die Abluftwärme-Rückgewinnung auf ihre Energieeinsparungseffekte bei der Klimatisierung eines Reisezugwagens untersucht.

Die Basis-Leistungskennlinien mit/ohne Besetzung bei Fahrt mit 120 km/h stammen von dem unter 3.2 erwähnten Reisezugwagen. Die temperaturabhängigen Frischluftmengen entsprachen bei diesen Messungen den Normanforderungen gemäß Tabelle 1.

Da weniger Passagiere auch weniger Frischluft benötigen, kann bei einer Fahrgastbelegung von unter 100 % durch bedarfsoptimierte Steuerung der Frischluftmengen beim Konditionieren, dem Erwärmen oder Abkühlen/Entfeuchten, der Frischluft Energie eingespart werden. Um diese Maßnahme umsetzen zu können, sind ein Signal über den aktuellen Fahrzeugbesetzungsgrad sowie eine Einrichtung zum Einstellen der Frischluftmenge mittels Lüfterdrehzahl-Regelung oder Klappen notwendig. Der Besetzungsgrad kann über einen Luftqualitätssensor, einen CO₂-Sensor, oder über eine vor allem bei Nahverkehrsfahrzeugen zur Bremssteuerung oft schon vorhandene Sensorik für das Fahrzeuggewicht erfasst werden.

Bei der Rückgewinnung von Abluftwärme wird über einen Luft/Luft-Wärmetauscher die Abluftwärmeenergie auf den benötigten Frischluft-Massenstrom übertragen, sodass für die Restkonditionierung deutlich weniger Energie benötigt wird. Für die weiteren Betrachtungen wurde ein Wirkungsgrad des Wärmetauschers von 60 % angenommen.

Weiters wurden für die vergleichenden Betrachtungen folgende allgemeinen Festlegungen und Annahmen zugrunde gelegt:

- Besetzungseinfluss durch Wärmeabgabe der Passagiere berücksichtigt
- täglicher Fahrzeugeinsatz von 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr
- gemäß Besetzungsprofil in Bild 6 zwischen 30 % und 100 % Belegung der Sitzplätze, mittlerer Besetzungsgrad 56 %
- Einsparungseffekte nur für den Heizbetrieb betrachtet

In Bild 6 ist der Leistungsbedarf für die beschriebenen Maßnahmen unter Anwendung des gewählten Besetzungsprofils für einen mittleren Tagestemperaturverlauf im Januar dargestellt. Man erkennt daraus schon, dass der Einsparungseffekt durch eine besetzungsabhängige Frischluftzufuhr natürlich deutlich vom Besetzungsgrad abhängt und gemäß Definition bei Besetzung von 100 % gleich Null ist. Der Einsparungseffekt der Abluftwärme-Rückgewinnung hingegen ist vom Besetzungsgrad unabhängig. Durch die Kombination beider Maßnahmen wird ein zusätzlicher Einsparungseffekt erzielt.

Das Bild 7 verdeutlicht diese Aussage; hier ist der Leistungsbedarf der untersuchten Maßnahmen in Abhängigkeit vom Besetzungsgrad bei einer Außentemperatur von -10°C dargestellt. Das Verhältnis der Leistungskurven zueinander ist auch für alle anderen Außentemperaturen im Heizbetrieb gültig.

Die Abnahme des Leistungsbedarfes bei den Kurven *ohne Maßnahmen* und *Abluftwärme-Rückgewinnung* mit steigendem Besetzungsgrad ist durch den steigenden Wärmeeintrag durch die Fahrgäste bedingt.

Bei einem hohen durchschnittlichen Besetzungsgrad wird vom Energieeinsparungseffekt her eher der Abluftwärme-Rückgewinnung der Vorzug zu geben sein; bei durchschnittlichen Besetzungsgraden dagegen werden auch mit der einfacher zu realisierenden besetzungsabhängigen Frischluftregelung nennenswerte Einsparungen realisiert werden können.

In Bild 8 ist der Leistungsbedarf der untersuchten Maßnahmen in Abhängigkeit von der Außentemperatur für einen Besetzungsgrad von 60 % dargestellt. Hier zeigt sich auch, dass der Einsparungseffekt bei tieferen Außentemperaturen oder bei einer größeren Temperaturdifferenz zwischen innen und außen deutlich stärker ist als bei gemäßigteren Außentemperaturen oder kleineren Temperaturdifferenzen.

Wie unter den Annahmen bereits erwähnt, wurden mögliche Einsparungseffekte im Kühlbetrieb nicht untersucht, weil hierfür zu viele anlagenspezifische Annahmen erforderlich wären, wie eine lastabhängige

Bild 7: Leistungsbedarf ohne und mit Optimierungsmaßnahmen mit den Bezeichnungen nach Bild 6 in Abhängigkeit vom Besetzungsgrad bei -10°C Außentemperatur.

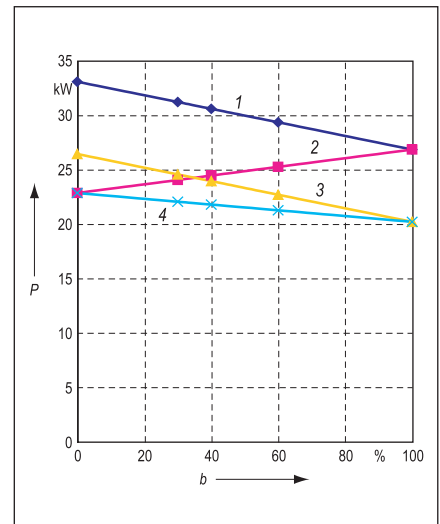


Bild 8: Leistungsbedarf ohne und mit Optimierungsmaßnahmen mit den Bezeichnungen nach Bild 6 in Abhängigkeit von der Außentemperatur für einen Besetzungsgrad von 60 %.

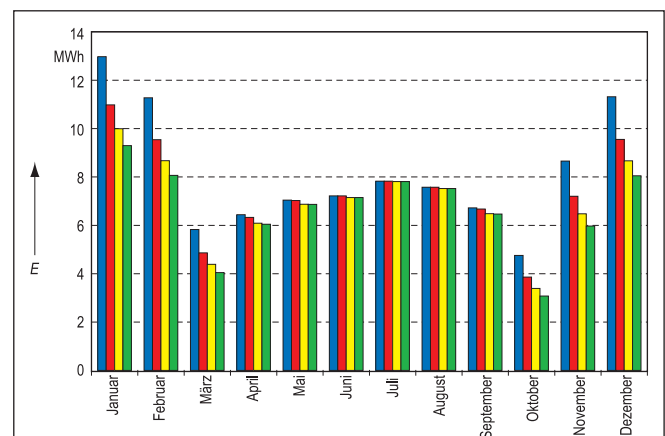
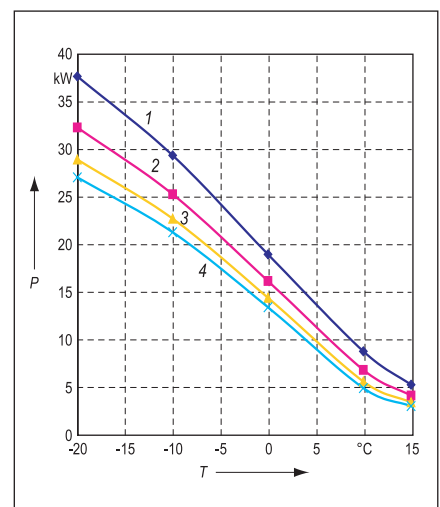


Bild 9: Gegenüberstellung der Monatsenergieverbräuche ohne und mit Optimierungsmaßnahmen.

blau ohne Maßnahmen
rot bei besetzungsabhängiger Frischluftmenge (1)
gelb bei Abluftwärme-Rückgewinnung (2)
grün mit Maßnahmen (1) + (2)

Regelbarkeit der Kälteanlage, die keine singuläre Betrachtung ermöglicht hätten.

In Bild 9 sind die Energieverbräuche für die untersuchten Maßnahmen monatsbezogen gegenübergestellt.

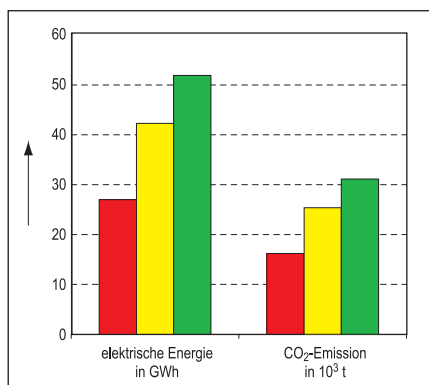


Bild 10: Jahreseinsparpotenzial durch die Optimierungsmaßnahmen bei 3000 Fahrzeugen. Bezeichnung siehe Bild 9

Tabelle 5 zeigt den Jahresenergieverbrauch und die im Vergleich zum Ausgangszustand mögliche Energieeinsparung. Mit einem Einsparpotenzial von 8,8 % bei der besetzungsabhängigen Regelung ist durchaus auch die Nachrüstung eines CO₂-Sensors bei Fahrzeugen überlegenswert; sie würde sich bei Vorliegen der notwendigen Voraussetzungen, wie regelbare Frischluftklappe oder programmierbare Steuerung, die bei den meisten moderneren Fahrzeugen vorhanden sind, in kurzer Zeit amortisieren. Die Abluftwärme-Rückgewinnung ist mit 13,8 % Einsparpotenzial effizienter und vor allem unabhängig vom Besetzungsgrad. Eine Implementierung ist aber eher nur bei Neufahrzeugen sinnvoll, da hierfür in der Regel das Luftführungskonzept geändert werden muss.

Tabelle 5: Jahresverbrauch an elektrischer Energie für die Klimatisierung und Einspareffekt der untersuchten Maßnahmen.

Maßnahme	Verbrauch	Einsparung
Ausgangszustand	98 MWh/a	–
besetzungsabhängige Frischluftmenge (1)	89 MWh/a	8,8 %
Abluftwärme-Rückgewinnung (2)	84 MWh/a	13,8 %
Kombination (1) + (2)	80 MWh/a	16,9 %

In jeden Fall zeigen die untersuchten Maßnahmen, dass es Einsparpotenziale gibt, die bei konsequenter Umsetzung im Schienenfahrzeugbereich zu nennenswerter Senkung des Gesamtenergieverbrauchs und der Emissionen führen würden.

In Bild 10 sind die untersuchten Maßnahmen auf ein Jahreseinsparpotenzial bei 3000 Fahrzeugen und der damit erzielbare Beitrag zur CO₂-Reduktion dargestellt.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit der Analyse zweier konkreter Maßnahmen wurde das Energieeinsparpotenzial bei Klimaanlagen verdeutlicht und auf die volkswirtschaftlich interessanten Auswirkungen der damit verbundenen Emissionsreduktionen hingewiesen.

Für die Statuserhebung von Energieverbräuchen bei der Klimatisierung, aber auch zur Optimierung oder Ve-

rifizierung von Energieeinsparungsmaßnahmen bietet sich das vorgestellte Standard-Testprogramm in einem Klima-Wind-Kanal an, da damit die erforderlichen Umgebungs- und Betriebsbedingungen eingestellt und exakte Leistungsdaten als Basis für weitere Analysen ermittelt werden können.

Auch können damit konkret geforderte, unter definierten Randbedingungen zu erfüllende Jahresenergieverbräuche als Teil der LCC überprüft werden. In weiterer Folge wäre auch die Energieeffizienz der Klimatisierung eines Fahrzeuges mittels eines Energie-Labels bewertbar. Rail Tec Arsenal leistet bei derartigen Untersuchungen einen wichtigen Beitrag.

Das Ziel all dieser Bemühungen ist es, den Schienenverkehr energieeffizienter zu machen.

Literatur

- [1] EN ISO 7730: 1995: Gemäßigtes Umgebungsklima: Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit.
- [2] Fanger, P. O.: Thermal Comfort, Reprinted, R. Krieger Publishing Company, Malabar 1982.
- [3] Mayer, E.; Conrad, W.: Untersuchung der thermischen Behaglichkeit bei Quelläftung und Flächenkühlung. In: Mayer, E. (Hrsg.): Menschengerechte Raumklimatisierung durch Quelläftung und Flächenkühlung, Bauforschung für die Praxis, Band 13, IRB Verlag, Stuttgart 1995.
- [4] Bencsics, D.; Sorgalla, U.; Haller, G.: Subjective thermal comfort in railway vehicles, Proceedings of Workshop "Mobile Air Conditioning", Vienna 2002.
- [5] Kreitmayer, M.; Haller, G.: Energy management in railway vehicles - analysis of energy consumption under testing conditions, Proceedings of Workshop "Mobile Air Conditioning", Vienna 2002.
- [6] VDI-Richtlinie 2078, Entwurf Anhang A1: Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume, Düsseldorf 1990.



Dipl.-Ing. Gabriel Haller, MAS (45), Studium des Maschinenbaus an der TU Wien, Sponsion 1987, ab 2000 bis 2002 Postgraduate-Studium Kommunikation und Management Development an der Universität Krens; ab 1987 Projektleiter für Klimatechnik und Brandschutz in der Versuchs- und Forschungsanstalt der Gemeinde Wien, ab 1989 Projektleiter und ab 1996 Geschäftsfeldleiter in der Fahrzeugversuchsanlage des Österreichischen Forschungs- und Prüfzentrums Arsenal; seit 2003 Technisch-wissenschaftlicher Leiter der Rail Tec Arsenal.

Adresse: RTA Rail Tec Arsenal Fahrzeugversuchsanlagen GmbH,
Paukerwerkstr. 3, 1210 Wien, Österreich;
Fon: +43 1 256 8081-404, Fax: -600;
E-Mail: gabriel.haller@rta.co.at



Ing. Manfred Kreitmayer (32), Studium an der HTL für Elektrotechnik in Hollabrunn; ab 1996 Projektleiter in der Fahrzeugversuchsanlage des Österreichischen Forschungs- und Prüfzentrums Arsenal; seit 2003 Leiter Anlagenbetrieb in der Rail Tec Arsenal.

Adresse: siehe oben;
Fon: +43 1 256 8081-307, Fax: -600;
E-Mail: manfred.kreitmayer@rta.co.at