

Klima-Wind-Kanal Wien

# Thermische Behaglichkeit in Schienenfahrzeugen

Dipl.-Ing. Gabriel Haller

Fachpublikation September 2006



Qualität bei jedem Wetter

**rta**  
RAIL TEC ARSENAL



# Thermische Behaglichkeit in Schienenfahrzeugen

Die Verbesserung des Komfortangebots in Schienenfahrzeugen 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.

Während der gesamte Bahnfernverkehr bis auf wenige Ausnahmen bereits voll klimatisiert ist, haben sich Klimaanlageanlagen im öffentlichen Schienennahverkehr in Mitteleuropa bislang noch nicht so richtig durchgesetzt. Als Folge des allgemeinen Klimawandels und der gestiegenen Komfortwartungen der Fahrgäste – nicht zuletzt aufgrund der Vergleichsmöglichkeit mit dem eigenen klimatisierten PKW – wird jedoch auch hier der Bedarf an klimatisierten Fahrzeugen in Zukunft stark steigen.

Diese Informationsbroschüre gibt einen **Überblick über den derzeitigen Stand der Anforderungen** an Klimaanlageanlagen in Schienenfahrzeugen. Durch eine eingehende Analyse der Komfortkennwerte werden sämtliche Möglichkeiten der Einflussnahme auf die thermische Behaglichkeit dargestellt. Die Broschüre versteht sich als Leitfaden für die thermische Behaglichkeit in Schienenfahrzeugen und wendet sich gleichermaßen an Bahnbetreiber, Fahrzeugindustrie und Hersteller von Klimaanlageanlagen.

## Was ist thermische Behaglichkeit?

Thermische Behaglichkeit ist gegeben, „wenn eine Person die Lufttemperatur, die Luftfeuchte, die Luftbewegung und die Wärmestrahlung der Umgebung als optimal empfindet und weder wärmere noch kältere, weder trockenere noch feuchtere Raumluft wünscht“.

Die **thermische Behaglichkeit** wird beeinflusst durch:

- ▶ **Persönliche Faktoren** (Aktivitätsgrad, Bekleidung, Aufenthaltsdauer)
- ▶ **Räumliche Faktoren** (Strahlungstemperatur, Temperatur der Umschließungsflächen)
- ▶ **Raumlufttechnische Faktoren** (Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchte)

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

Weitere Einflussfaktoren für die thermische Behaglichkeit sind Luftqualität (Staubgehalt, Gehalt an Mikroorganismen, Gase und Dämpfe, Gerüche, Ionengehalt, elektrische und elektrostatische Felder), Lärm, Beleuchtung, Farbgebung etc. Diese Faktoren haben zwar keinen direkten Einfluss auf das thermische Empfinden des Menschen, können dieses aber subjektiv beeinflussen.

## Die Normen

Im Lauf der letzten Jahrzehnte wurden im Klima-Wind-Kanal Wien und in der Vorgängeranlage im Wiener Arsenal zahlreiche Versuche und Messungen zur thermischen Behaglichkeit in Schienenfahrzeugen durchgeführt.

Aufgrund dieser Ergebnisse entwickelte die UIC/ERRI vor mehr als drei Jahrzehnten die Richtlinie UIC 553 „Lüftung, Heizung und Klimatisierung der Reisezugwagen“, in der die Behaglichkeitsanforderungen für Reisezugwagen definiert sind. In der zugehörigen Richtlinie UIC 553-1 werden die erforderlichen Versuche zum Nachweis dieser Anforderungen beschrieben.

In den letzten Jahren wurden folgende neue Europäische Normen zum Thema thermische Behaglichkeit erstellt, die auch die unterschiedlichen Betriebserfordernisse von Schienenfahrzeugen (Einsatzart, Klimazone etc.) 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: Typprüfungen
- ▶ **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

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.

**Fahrzeugkategorien und Klimazonen**

Die Behaglichkeitsbedingungen der **Fernverkehrsnorm** gelten für alle Fahrzeugarten, also sowohl für Abteil- als auch für Großraumwagen (ein- oder doppelstöckig).

Bei den **Nahverkehrs- und Führerstandsnormen** hingegen werden jeweils zwei Kategorien definiert, die sich in ihren Anforderungen an die Behaglichkeitsparameter unterscheiden. Der Betreiber hat in den vertraglichen Vereinbarungen die Kategorie zu spezifizieren. Als Hilfestellung für diese Spezifikation ist in den Normen eine Klassifizierungsmatrix angegeben (Tabelle 1).

Tabelle 1: Fahrzeugklassifizierung für Nahverkehrsfahrzeuge		
Kriterium	Kategorie A	Kategorie B
Stehende Fahrgäste	< 4 Fahrgäste/m <sup>2</sup>	≥ 4 Fahrgäste/m <sup>2</sup>
Durchschnittliche Verweildauer der Fahrgäste	> 20 min	≤ 20 min
Durchschnittliche Fahrzeit zwischen 2 Halten	> 3 min	≤ 3 min

Im Nahverkehr fallen Fahrzeuge für Vorortbahnen oder Regionalbahnen üblicherweise in Kategorie A, alle anderen Fahrzeuge, wie U-Bahnen oder Straßenbahnen, in Kategorie B.

Für Führerstände gelten üblicherweise die Behaglichkeitskriterien der Kategorie A sowohl im Fern- als auch im Re-

gionalverkehr. Im innerstädtischen Verkehr fällt der Führerstand in Kategorie B, insbesondere wenn dieser nicht durch Trennwände oder dergleichen vom Fahrgastraum getrennt ist.

Weiters wird entsprechend dem Einsatzort auch der klimatologische Einsatzbereich für den Sommer- und Wintereinsatz in jeweils drei Klimazonen unterteilt – so wird ein Fahrzeug für Südeuropa keine aufwendige Heizung benötigen, sehr wohl aber eine leistungsfähige Klimaanlage, die auch bei Temperaturen von 40°C, einer relativen Luftfeuchte von 40 % und einer Sonnenlast von bis zu 800 W/m<sup>2</sup> ein angenehmes Raumklima gewährleistet.

Mitteleuropäische Länder sind der Zone II zugeordnet, was bedeutet, dass die Heizleistung für eine Außentemperatur von -20°C und die Kühlleistung für eine Außentemperatur von 35°C / 50 % relative Luftfeuchte und eine Sonnenlast von 700 W/m<sup>2</sup> auszuliegen sind.

Abhängig von den Außenbedingungen (Temperatur, relative Luftfeuchte und Strahlungsleistung der Sonne) der jeweiligen Klimazone, den Betriebserfordernissen (Fern- und Nahverkehr, Führerstand) und der zu erwartenden Fahrzeugbesetzung im Sommer sind die geforderte Raumlufttemperatur und relative Luftfeuchte im Fahrzeug und damit der Auslegungspunkt für die Kälte- bzw. Heizleistung definiert (Tabelle 2).

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

**Tabelle 2: Vergleich der Auslegungsbedingungen der maximal zulässigen mittleren Raumlufttemperatur/relativen Luftfeuchte**

Klimazonen		Fernverkehr EN 13129-1	Nahverkehr EN 14750-1		Führerstand EN 14813-1	
Zone	Temperatur/rel. Luftfeuchte; Strahlungsleistung d. Sonne		Kategorie A	Kategorie B	Kategorie A	Kategorie B
I	+40°C / 40 %; 800 W/m <sup>2</sup>	+27°C / 51,6 %	+30°C / 50,0 %	+32°C / 57,4 %	+27°C / 50,0 %	+30°C / 60,0 %
Sommer <sup>*)</sup> II	+35°C / 50 %; 700 W/m <sup>2</sup>	+27°C / 51,6 %	+30°C / 50,0 %	+33°C / 55,0 %	+26°C / 52,5 %	+28°C / 65,0 %
III	+28°C / 45 %; 600 W/m <sup>2</sup>	+25,25°C / 57,5 %	+26°C / 63,0 %	+29°C / 64,5 %	+22°C / 60,0 %	+24°C / 75,0 %
I	-10°C					
Winter <sup>**)</sup> II	-20°C	+22°C	+15°C	+10°C	+18°C	
III	-40°C					

\*) Besetzung: Alle Sitzplätze beim Fernverkehr und Führerstand bzw. alle Sitzplätze + 2 Personen/m<sup>2</sup> Stehfläche beim Nahverkehr, Fahrzeug im Stillstand

\*\*) Ohne Sonnenlast und Besetzung, allerdings mit Fahrtwind (regulärer Fahrbetrieb)

**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.

In Tabelle 3 sind die Anforderungen an Luft- und Oberflächentemperaturen für den Fern- und Nahverkehr bzw. für den Führerstand zusammengefasst.

Um örtliche Zugserscheinungen einschränken und analysieren zu können, sind in den Normen zulässige **Strömungsgeschwindigkeiten** als Grenzkurve in Abhängigkeit von der örtlichen Lufttemperatur definiert.

In Tabelle 4 sind die maximal zulässigen Luftgeschwindigkeiten beispielhaft für zwei Temperaturwerte für die Fahrgasträume im Fern- und Nahverkehr bzw. für den Führerstand gegenübergestellt.

**Tabelle 3: Vergleich unterschiedlicher Anforderungen an Luft- und Oberflächentemperatur**

Beschreibung der Normanforderung	Fernverkehr EN 13129-1	Nahverkehr EN 14750-1		Führerstand EN 14813-1	
		Kategorie A	Kategorie B	Kategorie A	Kategorie B
Abweichung der mittlere Raumlufttemperatur $T_{im}$ in den Fahrgasträumen vom Sollwert $T_{ic}$	+/-1 K	+/-2 K	+/-2 K	+/-1 K	+/-2 K
Horizontale Temperaturverteilung in 1,1 m Höhe	2 K 3 K für Liegewagen	4 K	8 K	-	-
Vertikale Temperaturverteilung	3 K	4 K	8 K	3 K	6 K
Mittlere Raumlufttemperatur im Seitengang	$> T_{ic} - 6$ K im Heizbetrieb $< T_{ic} + 5$ K im Kühlbetrieb	-	-	-	-
Raumlufttemperatur $T_i$ im Einstieg	$+10^{\circ}\text{C} < T_i < T_{ic}$ im Heizbetrieb $T_i < T_{ic} + 9$ K u. $< +35^{\circ}\text{C}$ im Kühlbetrieb	$+3^{\circ}\text{C} < T_i < T_{im}$ im Heizbetrieb $T_i < T_{em}$ im Kühlbetrieb		-	-
Raumlufttemperatur in den Nebenräumen	$> T_{ic} - 6$ K im Heizbetrieb $< T_{ic} + 6$ K im Kühlbetrieb	$> T_{im} - 6$ K und $> 3^{\circ}\text{C}$ im Heizbetrieb $< T_{im} + 6$ K im Kühlbetrieb		-	-
Raumlufttemperatur $T_i$ im Kinderbetreuungsraum	$T_{im} < T_i < T_{ic} + 4$ K	-	-	-	-
Oberflächentemperatur der Wände und Decken im Heizbetrieb	$> T_{im} - 7$ K Einstock $> T_{im} - 10$ K Doppelstock	$> T_{im} - 10$ K	$> T_{im} - 13$ K	$> T_{im} - 7$ K	$> T_{im} - 12$ K
Oberflächentemperatur der Fenster/ Fensterrahmen im Heizbetrieb	$> T_{im} - 12$ K / $> T_{im} - 9$ K	$> T_{im} - 15$ K		$> T_{im} - 12$ K	$> T_{im} - 15$ K
Oberflächentemperatur der Fußböden	$> +8^{\circ}\text{C}$ nach 1 h Vorheizbeginn $> T_{im} - 10$ K nach 3 h Vorheizbeginn $< +27^{\circ}\text{C}$ bei Fußbodenheizung	-	-	-	-
Spezifische Oberflächen-temperaturkriterien	-	$\geq +3^{\circ}\text{C}$ niedrigste Oberflächen-temperatur ausgenommen Fenster		$< +35^{\circ}\text{C}$ bei allen beheizten Flächen	



**Tabelle 4:** Vergleich maximal zulässiger Strömungsgeschwindigkeiten

Örtliche Raumlufttemperatur $T_i$	Fernverkehr EN 13129-1	Nahverkehr EN 14750-1		Führerstand EN 14813-1
		Kategorie A	Kategorie B	
+22°C	0,25 m/s	0,25 m/s	0,35 m/s	0,25 m/s
+27°C	0,6 m/s	0,8 m/s	1,1 m/s	0,6 m/s 0,3 m/s (Kopf Fahrer)

Die Anforderungen an die relative Luftfeuchte sind in den Normen in Diagrammen definiert und sollen bei klimatisierten Fahrzeugen eine ausreichende Entfeuchtung gewährleisten.

**Frischlufthmenge und Wärmedurchgangskoeffizient**

Ebenfalls in den Normen definiert sind die Frischlufthmenge und der Gesamtwärmedurchgangskoeffizient (k-Wert) des Fahrzeugs, da diese Parameter die Behaglichkeitsparameter maßgeblich beeinflussen.

Erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen rufen Ermüdung, Konzentrationsschwierigkeiten und den Eindruck stickiger und verbrauchter Luft hervor und erfordern daher die Zuführung

einer definierten **Frischlufthmenge**. Die in den Normen geforderten Werte (Tabelle 5) stellen einen Kompromiss zwischen einer energetisch vertretbaren Betriebsweise und einer ausreichenden Reduktion der CO<sub>2</sub>-Konzentration dar.

Der in den Normen definierte **Gesamtwärmedurchgangskoeffizient** (Tabelle 6) charakterisiert die thermische Qualität eines Fahrzeugs, d.h. 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 der Fahrgäste.

**Tabelle 5:** Übersicht über die erforderlichen Mindestfrischlufthmengen

Außentemperatur $T_{em}$	Fernverkehr EN 13129-1	Nahverkehr EN 14750-1		Führerstand EN 14813-1
		Kategorie A	Kategorie B	
$T_{em} \leq -20^\circ\text{C}$	10 m <sup>3</sup> /h/Person	15 m <sup>3</sup> /h/Person	12 m <sup>3</sup> /h/Person	30 m <sup>3</sup> /h/Person
$-20^\circ\text{C} < T_{em} \leq -5^\circ\text{C}$	15 m <sup>3</sup> /h/Person	Zur Erreichung der Leistungsfähigkeit Reduktion auf 10 m <sup>3</sup> /h/Person zulässig	Zur Erreichung der Leistungsfähigkeit Reduktion auf 8 m <sup>3</sup> /h/Person zulässig	
$-5^\circ\text{C} < T_{em} \leq +26^\circ\text{C}$	20 m <sup>3</sup> /h/Person			
$T_{em} > +26^\circ\text{C}$	15 m <sup>3</sup> /h/Person			

**Tabelle 6:** Geforderter Gesamtwärmedurchgangskoeffizient in Abhängigkeit von Klimazone und Fahrzeugkategorie

Zone (Winter)	Fernverkehr EN 13129-1		Nahverkehr EN 14750-1		Führerstand EN 14813-1	
	Einstock	Doppelstock	Kategorie A	Kategorie B	Kategorie A	Kategorie B
I	2,0 W/m <sup>2</sup> K	2,5 W/m <sup>2</sup> K	2,5 W/m <sup>2</sup> K	3,5 W/m <sup>2</sup> K	2,2 W/m <sup>2</sup> K	4,0 W/m <sup>2</sup> K
II	1,6 W/m <sup>2</sup> K	2,5 W/m <sup>2</sup> K	2,2 W/m <sup>2</sup> K	3,0 W/m <sup>2</sup> K	2,0 W/m <sup>2</sup> K	3,5 W/m <sup>2</sup> K
III	1,2 W/m <sup>2</sup> K	-	2,0 W/m <sup>2</sup> K	2,5 W/m <sup>2</sup> K	2,0 W/m <sup>2</sup> K	3,0 W/m <sup>2</sup> K

### Typprüfungen

Teil 2 der Normen definiert das Versuchsprogramm und die Messverfahren zur Beurteilung der Behaglichkeitsparameter und Leistungsfähigkeit des Klimasystems.

Für Typprüfungen von Fernverkehrszügen ist in jedem Fall eine geeignete Versuchseinrichtung (z.B. ein Klima-Wind-Kanal) erforderlich, um die Umgebungsbedingungen in der erforderlichen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit gewährleisten zu können.

Bei den Nahverkehrs- und Führerstandsnormen sind zwei Arten der Versuchsdurchführung zulässig:

- ▶ **Test Level 1 (TL1)** ist eine vereinfachte Versuchsreihe, die lediglich grundlegende Informationen über die Funktionalität des Systems gibt. Diese Versuchsreihe kann in einem (Hersteller-)Werk oder einer Werkstatt mit stark reduzierten Anforderungen an die Umgebungsbedingungen durchgeführt werden.
- ▶ **Test Level 2 (TL2)** ist ein vollständiges Versuchsprogramm zur Überprüfung der Behaglichkeitsparameter und der Leistungsfähigkeit des Systems und erfordert entsprechend qualitativ hochwertige Versuchseinrichtungen.

Der Betreiber kann zwischen den beiden Versuchsdurchführungsarten (TL1 oder TL2) wählen. Gibt es hierzu keine Angaben, sind die Versuche mit TL2 durchzuführen.

Der Umfang der Messstellen und der Versuchsprogramme für die Beurteilung der Behaglichkeitsparameter ist auf die Betreiberanforderungen abgestimmt. Der Zeitbedarf für die reinen Behaglichkeitsversuche (24 h Tage, ohne Bestimmung des k-Werts) beträgt:

- ▶ **3 Tage** für Kategorie B der Führerstands- bzw. Nahverkehrsnorm
- ▶ **4 Tage** für Kategorie A der Nahverkehrsnorm
- ▶ **5 Tage** für Kategorie A der Führerstandsnorm
- ▶ **8 Tage** für Fernverkehrsnorm bzw. UIC 553

Die Behaglichkeitsparameter werden bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen untersucht und in einer Bewertungsmatrix zusammengefasst. Tabelle 7 zeigt als Beispiel die Bewertung für ein Nahverkehrsfahrzeug der Kategorie A und Klimazone II.

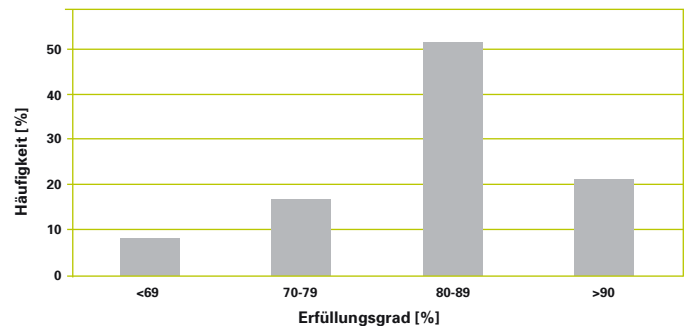
### Sinn und Unsinn in der Normanwendung

Mit den oben beschriebenen Normen stehen für ganz Europa einheitliche Kriterien für Behaglichkeitsparameter in Schienenfahrzeugen zur Verfügung. Die Anforderungen sind technisch erfüllbar, auch wenn statistische Betrachtungen von Klimaversuchen im Klima-Wind-Kanal Wien ein anderes Bild ergeben.

So zeigt Abbildung 1 die Häufigkeitsverteilung der Gesamterfüllungsgrade für Schienenfahrzeuge des Fernverkehrs in den Jahren 2003 bis 2005. Es ist deutlich zu erkennen, dass die meisten Fahrzeuge zwischen 80 % und 89 % Gesamterfüllungsgrad liegen. Diese Darstellung kann zwar lediglich als Anhaltswert dienen, da ein direkter Vergleich zwischen den Ergebnissen von Klimatests an Schienenfahrzeugen auf-

grund abweichender Versuchs- und Anforderungsdefinitionen nicht immer möglich ist, zeigt aber in jedem Fall, dass nicht alle Behaglichkeitskriterien unter allen Umgebungsbedingungen erfüllt werden. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass Klimaversuche natürlich zu Optimierungs- und Verbesserungsmaßnahmen genutzt werden und der optimierte Zustand in der Regel nicht mehr nachgewiesen wird. Entscheidend dabei ist, dass alle Erkenntnisse in die Serie einfließen. Dies ist nicht immer der Fall. Hier ist der Betreiber in seinem eigenen Interesse gefordert, den Versuchen beizuwohnen, um vorgenommenen Maßnahmen am Versuchsfahrzeug dann auch in der Serie überprüfen zu können.

**Abbildung 1:** Häufigkeitsverteilung der Gesamterfüllungsgrade von Fernverkehrsfahrzeugen 2003-2005



Abgesehen vom Gesamterfüllungsgrad sollte jedoch die Erfüllung der Einzelanforderungen immer im Vordergrund stehen. Denn obwohl eine größere Abweichung eines einzelnen Parameters den Gesamterfüllungsgrad möglicherweise kaum beeinflusst, kann sie für den Fahrgast einen unakzeptablen thermischen Zustand bedeuten. Solange die Ergebnisse der Klimaversuche und die mögliche Minderleistung der Klimaanlage bei einzelnen Behaglichkeitskriterien fachlich objektiv diskutiert und gelöst werden, stellt dies noch kein Problem dar, zumal einzelne Abweichungen oft durch andere Behaglichkeitsparameter ausgeglichen werden können. Argumentieren die Betreiber auf dieser Basis jedoch die Nichterfüllung der gesamten Klimanorm, um entsprechende vertragliche Konsequenzen zu ziehen, die von der Preisminderung der Klimaanlage bis zur Nichtübernahme des Fahrzeuges reichen, so ist Handlungsbedarf gegeben. Denn die Betreiber handeln hier kurzsichtig: Die Industrie wird in Zukunft entweder Mehrkosten einrechnen oder eine Reduzierung der Normanforderungen fordern, was wiederum eine Verschlechterung des Klimakomforts bedeutet.

Sinnvoller ist es, wenn Betreiber und Hersteller im Vorfeld gemeinsam die Anforderungen definieren und die zulässigen Abweichungen festlegen. Beispielhaft sind in Tabelle 7 neben den Behaglichkeitsanforderungen nach EN 14750-1 auch abweichende Kriterien (Abweichung mittlere Raumlufttemperatur vom Sollwert +/-3 K, vertikale Temperaturverteilung < 6 K) definiert, die bei bestimmten extremen Versuchsbedingungen zur Bewertung herangezogen werden (lila hinterlegte Zellen). Weiters sollten vorab auch bestimmte Erfüllungsgrade vereinbart werden (z.B. 100 % für Lufttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten in den Fahrgasträumen). Damit wird eine Präzisierung der Anforderungen im Sinne der Normen erreicht, die stärker auf die spezifischen Anforderungen des Betreibers Rücksicht nimmt und gleichzeitig der Industrie mehr Rechtssicherheit bietet.

## Komfortkennwerte

Im vorigen Kapitel wurden die Normanforderungen an die einzelnen Behaglichkeitsparameter in Schienenfahrzeugen eingehend vorgestellt. Da diese Parameter in komplexer Weise auf den Wärmehaushalt des Menschen einwirken, soll im Folgenden eine Möglichkeit vorgestellt werden die thermische Behaglichkeit mittels „globaler“ Kennwerte zu beschreiben.

Diese Komfortkennwerte wurden ursprünglich zur Beschreibung der thermischen Behaglichkeit in Gebäuden entwickelt und sind in ISO 7730 [1] genormt. Sie können und werden aber auch für Behaglichkeitsuntersuchungen in Fahrzeugen herangezogen.

### Vorausgesagtes mittleres Votum PMV

Zur Beschreibung der thermischen Behaglichkeit dient das vorausgesagte mittlere Votum PMV (predicted mean vote), das den Durchschnittswert der Klimabeurteilung einer großen Gruppe anhand einer 7-teiligen Skala (Tabelle 8) vorausagt.

**Tabelle 8:** Behaglichkeitsskala des vorausgesagten mittleren Votums PMV

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

Der Zusammenhang der Einzelbehaglichkeitsparameter ist durch die folgende empirisch ermittelte Komfortgleichung für das PMV nach ISO 7730 [1] definiert:

**Tabelle 7:** Übersicht- und Bewertungsmatrix der Klimatests für ein Nahverkehrsfahrzeug der Kategorie A un

Versuche nach EN 14750-2													
Versuch	Versuchsbedingungen				9.1.1		9.1.2		9.1.3		9.2.1		
	$T_{em} / rF$ [°C] / [%]	Wind [km/h]	Sonne [W/m²]	Besetzung [%]	Abweichung Mittelwert zu Sollwert +/-2 K		Horizontale Verteilung < 4 K		Vertikale Verteilung < 4 K		Temperatur der Einstiege Heizen $T_i$ in 1,7 m: $+3^\circ\text{C} < T_i < T_{im}$ $T_i$ in 0,1 m: $> +3^\circ\text{C}$ Kühlen $T_i < T_{em}$		
					+/-3 K				< 6 K				
TL211	-20 / -	Min.	0	0	x		x		x			x	
TL212	-20 / -	Min.	0	0	x		x		x			x	
TL213 Heizleistung	-20 / -	Max.	0	0	x		x		x			x	
TL215	0 / -	Min.	0	0	x		x		x			x	
TL216	0 / -	Max.	0	0	x		x		x			x	
TL217	0 / -	Min.	0	100	x		x		x			x	
TL218 Türöffnung	0 / -	Min.	0	0	x		x		x			x	
TL221	+35 / 50	Min.	700	0	x		x		x			x	
TL222	+35 / 50	Min.	700	100	x		x		x			x	
TL223 Kühlleistung	+35 / 50	Min.	700	100	x		x		x			x	
TL224	+28 / 60	Min.	0	0	x		x		x			x	
TL225	+28 / 60	Min.	700	0	x		x		x			x	
TL226	+28 / 60	Min.	700	100	x		x		x			x	
TL227 Türöffnung	+28 / 60	Min.	700	100	x		x		x			x	
TL228	+28 / 60	Min.	700	100	x		x		x			x	
<b>Performance in Bezug auf einzelne Behaglichkeitsanforderungen [%]</b>					<b>100</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>80</b>	<b>20</b>

Versuche nach EN 14750-2					Weitere Anforderungen nach EN 14750-1							
Versuch	Versuchsbedingungen				10.1.2		10.1.3		7.2		7.4	
	$T_{em} / rF$ [°C] / [%]	Wind [km/h]	Sonne [W/m²]	Besetzung [%]	k-Wert gesamt < 2,2 W/m²K		k-Wert Einstiege < 3,2 W/m²K		Vorheizen		Vorkühlen	
TL219	+5 / -	Min.	0	0	x		x					
TL210	-20 / -	Min.	0	0					x			
TL214	0 / -	Min.	0	0					x			
TL220	+35 / 50	Min.	700	0							x	



$$PMV = \left( 0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028 \right) \cdot \left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] \\ - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) \\ - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - T_{im}) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] \\ - f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_{im}) \end{array} \right\}$$

wobei

$$T_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \left\{ 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_{im}) \right\}$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot (T_{cl} - T_{im}) \text{ für } 2,38 \cdot (T_{cl} - T_{im})^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \text{ für } 2,38 \cdot (T_{cl} - T_{im})^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 \cdot I_{cl} \text{ für } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{°C} / \text{W} \\ 1,00 + 1,290 \cdot I_{cl} \text{ für } I_{cl} \geq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{°C} / \text{W} \end{cases}$$

dabei bedeutet:

- PMV**..... Vorausgesagtes mittleres Votum
- M**..... Energieumsatz, bezogen auf die Oberfläche des menschlichen Körpers [W/m<sup>2</sup>]  
Metabolische Einheit des Ruheenergieumsatzes in sitzender Position: 1 met = 58 W/m<sup>2</sup>
- W**..... Abgegebene mechanische Leistung [W/m<sup>2</sup>] (für die meisten Arbeiten = 0 W/m<sup>2</sup>)
- I<sub>cl</sub>**..... Isolationswert der Bekleidung [m<sup>2</sup>·°C/W]  
Einheit des Isolationswertes der Bekleidung:  
0,155 m<sup>2</sup>·°C/W = 1 clo (clothing units)

- f<sub>cl</sub>**..... Verhältnis der Oberfläche eines bekleideten Körpers zur Oberfläche des nackten Körpers [-]
- T<sub>im</sub>**..... Mittlere Raumlufttemperatur [°C]
- T<sub>r</sub>**..... Strahlungstemperatur [°C]
- v<sub>ar</sub>**..... Relative Luftgeschwindigkeit [m/s]
- p<sub>a</sub>**..... Partieller Wasserdampfdruck [Pa] durch relative Luftfeuchte φ[%] und Temperatur [°C] definiert
- h<sub>c</sub>**..... Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [W/m<sup>2</sup>K]
- T<sub>cl</sub>**..... Oberflächentemperatur der Kleidung [°C]

Klimazone II nach EN 14750

Behaglichkeitsbedingungen nach EN 14750-1

9.2.3		9.3			9.4.1			9.4.2			9.4.3			9.5			9.6		
Temperatur der Nebenräume Heizen T <sub>i</sub> > T <sub>im</sub> - 6 K bzw. T <sub>i</sub> > 3°C Kühlen T <sub>i</sub> < T <sub>im</sub> + 6 K		Relative Luftfeuchte nach Anhang C			Oberflächen-temperatur Seitenwände, Decke Heizen > T <sub>im</sub> - 10 K			Oberflächen-temperatur Fenster Heizen > T <sub>im</sub> - 15 K			Oberflächen-temperatur Seitenwände, Decke und Fußboden Heizen > +3°C			Temperaturen der Lufteinlässe Heizen < +65°C Kühlen > +5°C			Luftgeschwindigkeiten nach Anhang B		
x							x			x			x			x			
x							x			x			x			x			
	x						x			x			x			x			
x						x			x			x			x				
x						x			x			x			x				
x						x			x			x			x				
x		x													x				
x		x													x				
x		x													x				
x		x													x				
x		x													x				
x		x													x				
93	7	100	0	0	57	0	43	57	0	43	100	0	0	100	0	0	100	0	0

Bereiche	Erfüllungsgrad [%]	Gesamtpformance [%]		
Fahrgasträume Lufttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten	100	100	0	0
Fahrgasträume gesamt	90	90	0	10
Nebenräume	-	87		13
Fahrzeug gesamt	90	90	0	10

TLxxx... Versuche im Heizbetrieb

TLxxx... Versuche im Kühlbetrieb

TLxxx...Sonstige Versuche

x erfüllt

x teilweise nicht erfüllt

x nicht erfüllt

Blau hinterlegte Zellen: Kundenspezifische Anforderung und Bewertung  
Lila hinterlegte Zellen: Keine Eintragung und Berechnung

Aus obiger Gleichung lässt sich iterativ das PMV für verschiedene Kombinationen von Bekleidung, Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchte und Strahlungstemperatur errechnen.

Die Einzelparameter Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und relative Luftfeuchte (durch Eingabe des entsprechenden partiellen Wasserdampfdrucks) können direkt aus Messungen bzw. als Normanforderung in die Gleichung eingesetzt werden. Für die örtliche Strahlungstemperatur sind jedoch zunächst weitere Überlegungen notwendig.

### Örtliche Strahlungstemperatur

Die örtliche Strahlungstemperatur gleicht zwar der Raumschließungstemperatur, allerdings sind Oberflächentemperaturen in den Fahrgastinnenräumen punktuell sehr unterschiedlich.

Einen möglichen Ansatz für die Bestimmung der Strahlungstemperatur bietet näherungsweise die Gleichung

$$T_r = \frac{A_1 \cdot T_1 + A_2 \cdot T_2 + \dots + A_n \cdot T_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n},$$

wobei die Strahlungstemperatur als „Temperatur der Umgebung“ oder „als einheitliche Hüllfläche der Temperatur“ aufgefasst werden kann. Allerdings wird der Abstand der einzelnen Fahrgäste zur Raumschließungsfläche in dieser Gleichung nicht berücksichtigt.

Weiters besteht die Möglichkeit, die Strahlungstemperatur mit Hilfe der Einstrahlzahlen wie in [2] beschrieben zu bestimmen. Diese Berechnung ist jedoch sehr zeitaufwendig, da der Fahrgastraum für jede Ermittlung neu modelliert werden muss.

Daher wurde eine vereinfachte Berechnung der Einstrahlzahlen gewählt, die auf folgendem Prinzip beruht:

Von dem zu betrachtenden Standort werden jene Winkel im Grund- und Aufriss bestimmt (so genannte „view factors“), die die Oberflächen mit gleichförmiger Oberflächentemperatur aufspannen (z.B. Fenster). Damit werden auf der Oberfläche einer Einheitskugel im betrachteten Standort jeweils die Verhältnisse zur Gesamtoberfläche der Einheitskugel ermittelt. Mit diesen und den zugehörigen Oberflächentemperaturen wird schließlich die mittlere Strahlungstemperatur berechnet. Diese Methode ist für nicht allzu große Winkel hinreichend genau, größere Winkel (> 50°) werden in mehrere Teile unterteilt.

Mit dem oben skizzierten Verfahren wurde die Strahlungstemperatur an zwei unterschiedlichen Fahrzeugen mit verschiedenen Oberflächentemperaturen an Wand, Boden und Fenster berechnet.

In Tabelle 9 sind die mittleren Strahlungstemperaturen für ein Fernverkehrsfahrzeug (Abteilwagen) bei typischen Oberflächentemperaturen im Winter- und Sommerbetrieb dargestellt. Im Winterbetrieb wurden für die Oberflächentemperaturen von Wand, Boden und Fenster jeweils Abstufungen von 2 K ausgehend von den Minimalanforderungen der Fernverkehrsnorm (vgl. Tabelle 2) bei einer mittleren Raumlufthtemperatur von 22°C gewählt. Bei der minimal zulässigen Oberflächentemperatur ergibt sich eine Strahlungstemperatur von 14,2°C. Für den Sommerbetrieb wurden typische Oberflächentemperaturen mit und ohne Sonnenlast für die Berechnung herangezogen.

**Tabelle 9:** Strahlungstemperaturen in einem Fernverkehrsfahrzeug bei verschiedenen Oberflächentemperaturen

Betriebsart	Oberflächentemperatur [°C]			Strahlungstemperatur T <sub>r</sub> [°C]
	Wand	Boden	Fenster	
Winter	13,0	10,0	8,0	12,6
Winter bei minimal zulässigen Normanforderung	15,0	12,0	10,0	14,2
Winter	17,0	14,0	12,0	15,8
Winter	19,0	16,0	14,0	17,3
Winter	21,0	18,0	16,0	18,9
Sommer ohne Sonne	26,0	26,0	26,0	26,0
Sommer ohne Sonne	28,0	28,0	28,0	27,6
Sommer ohne Sonne	30,0	30,0	30,0	29,1
Sommer mit Sonne gemessene Werte bei einer Außentemperatur von 35°C und einer Strahlungsleistung von 700 W/m <sup>2</sup>	31,0	30,0	39,0	29,7
Sommer mit Sonne	33,0	32,0	41,0	31,2
Sommer mit Sonne	35,0	34,0	43,0	32,8

In Tabelle 10 sind die mittleren Strahlungstemperaturen für ein Nahverkehrsfahrzeug (Doppelstockwagen) mit der gleichen Systematik, allerdings mit den Minimalanforderungen der Nahverkehrsnorm bei einer mittleren Raumlufttemperatur von 21°C (Sollwert im Winterbetrieb) dargestellt. Bei der minimal zulässigen Oberflächentemperatur ergibt sich eine Strahlungstemperatur von 10,6°C.

Die örtlichen Strahlungstemperaturen unterschieden sich bei Betrachtung der Einzelplätze nur um maximal 1,4 K, weshalb auf eine detaillierte Auflistung der Einzelwerte verzichtet wurde.

Bei Berechnung der beiden Fahrzeuge mit gleichen Oberflächentemperaturen und Umgebungsbedingungen wurde aufgrund der unterschiedlichen Geometrien ein maximaler Strahlungstemperaturunterschied von 1,9 K festgestellt.

**Vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener PPD**

Der vorausgesagte Prozentsatz Unzufriedener PPD (predicted percentage dissatisfied) stellt eine qualitative Voraussage der Anzahl der mit einem bestimmten Umgebungsklima unzufriedenen Menschen dar. Der Zusammenhang zwischen vorausgesagtem mittlerem Votum PMV und vorausgesagtem Prozentsatz Unzufriedener PPD ist durch folgende Gleichung nach ISO 7730 [1] gegeben.

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-\left(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2\right)}$$

Die Kurve nach ISO 7730 [1] und Fanger [2] in Abbildung 2 veranschaulicht diesen Zusammenhang. Der geringstmögliche Prozentsatz Unzufriedener liegt hier bei 5 %.

Die Komfortkennwerte PMV und PPD wurden aus umfangreichen Studien zur Analyse der thermischen Behaglichkeit in Gebäuden entwickelt und können prinzipiell auch für die Bewertung der thermischen Behaglichkeit in Schienenfahrzeugen angewendet werden.

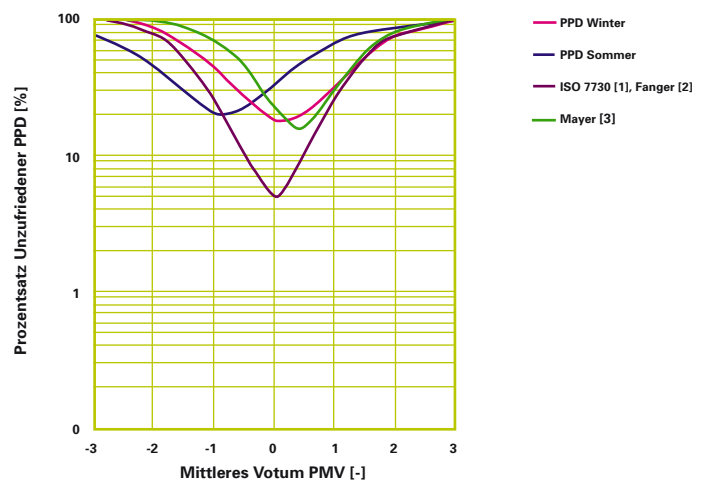
Inwieweit die grundsätzlichen Erkenntnisse für Gebäude auch bei den instationären Vorgängen in einem Schienenfahrzeug gelten, war u.a. Ziel eines Forschungsprojekts, das im Auftrag des Österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) durch das ÖFPZ Arsenal in den Jahren 2000-2002 durchgeführt wurde. Mit Hilfe von Felduntersuchungen gemeinsam mit den drei Österreichischen Bahnunternehmen ÖBB, Wiener Linien

und Wiener Lokalbahnen wurde erstmals die reale thermische Situation in ausgewählten Schienenfahrzeugen erfasst [4]. Dabei wurden einerseits Passagiere über ihr subjektives Empfinden befragt und andererseits die objektive thermische Situation mit Komfortmessungen ermittelt. Eine dritte Bewertungsgrundlage bildeten die Messergebnisse der Typprüfungen im Klima-Wind-Kanal.

Für die untersuchten Schienenfahrzeuge (Fernverkehr, Nahverkehr, U-Bahn) wurde der geringstmögliche Prozentsatz Unzufriedener mit 18 % für den Winterbetrieb bzw. 20 % für den Sommerbetrieb errechnet (Abbildung 2), was etwa dem Prozentsatz nach Mayer entspricht [3]. Allerdings divergierten die Wünsche der Passagiere bei Sommer- und Winterbedingungen.

- ▶ Im Sommer ist eine Verschiebung der PPD-Kurve nach links oben feststellbar. Das heißt, dass die Fahrgäste im Sommer eine (deutlich) kühlere Fahrzeugtemperatur wünschen. Das Minimum der PPD-Kurve liegt bei einem PMV von -0,87.
- ▶ Im Winter ist eine Verschiebung der PPD-Kurve nach rechts oben feststellbar. Das heißt, dass die Fahrgäste im Winter eine wärmere Fahrzeugtemperatur wünschen. Das Minimum der PPD-Kurve liegt bei einem PMV von +0,18.

**Abbildung 2:** Zusammenhang zwischen dem mittleren Votum und dem Prozentsatz Unzufriedener



**Tabelle 10:** Strahlungstemperaturen in einem Nahverkehrsfahrzeug bei verschiedenen Oberflächentemperaturen

Betriebsart	Oberflächentemperatur [°C]			Strahlungstemperatur T <sub>r</sub> [°C]
	Wand	Boden	Fenster	
Winter	5,0	3,0	0,0	9,3
Winter bei minimal zulässigen Normanforderung	7,0	5,0	2,0	10,6
Winter	9,0	7,0	4,0	11,9
Winter	11,0	9,0	6,0	13,2
Winter	13,0	11,0	8,0	14,5

### Örtliches thermisches Unbehagen

Um einen thermisch optimalen Zustand zu erreichen ( $PPD \leq 5\%$ ), muss nicht nur die Komfortgleichung mit  $PMV = 0$  erfüllt werden. Eine Person kann sich durchaus unbehaglich fühlen, wenn sie einen Körperteil als zu kalt oder zu warm empfindet, auch wenn – bezogen auf den ganzen Körper – ein zufrieden stellender Zustand erreicht wird. Solch eine lokale thermische Unbehaglichkeit wird meist als lokale Zugserscheinung empfunden, kann aber auch durch eine Asymmetrie der Strahlungstemperatur, durch große Temperaturunterschiede zwischen Oberflächen- und Lufttemperatur oder durch Unterschiede in der vertikalen Temperaturschichtung verursacht werden. Der genaue Zusammenhang zwischen globaler und lokaler thermischer Behaglichkeit ist noch nicht hinreichend untersucht. Einige Untersuchungsergebnisse über örtliches thermisches Unbehagen (Strahlungsasymmetrie, örtliche Zugserscheinungen, vertikale Temperaturdifferenzen, Körperkontakt mit kalten und warmen Flächen) sind in [5] zu finden.

### Zusammenhang zwischen Komfortkennwerten und Normanforderungen

Im folgenden Kapitel soll hinterfragt werden, inwieweit das Raumklima bei Erfüllen der Normanforderungen von den Fahrgästen als thermisch behaglich empfunden wird bzw. wie die einzelnen Behaglichkeitsparameter zusammenhängen und wie stark sie sich wechselseitig beeinflussen.

### Winterbedingungen im Fernverkehr

Für die Betrachtungen an einem Fernverkehrsfahrzeug (Abteilwagen) unter Winterbedingungen wurden folgende Grundparameter angenommen:

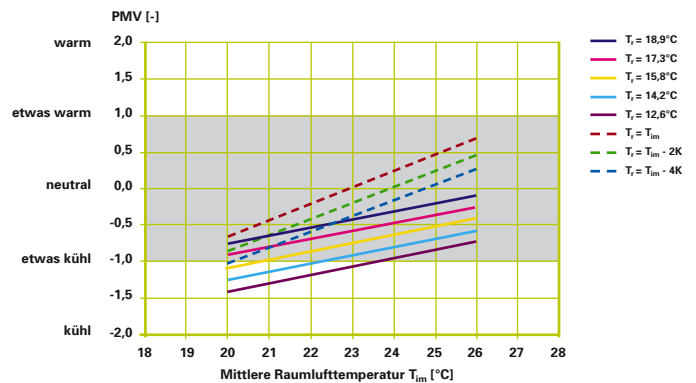
- ▶ Energieumsatz  $M = 1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2$
- ▶ Abgegebene mechanische Leistung  $W = 0 \text{ W/m}^2$
- ▶ Isolationswerte der Bekleidung  $I_{cl} = 1,3 \text{ clo}$
- ▶ Strahlungstemperatur  $T_r = 14,2^\circ\text{C}$  (bei minimal zulässiger Oberflächentemperatur gemäß Fernverkehrsnorm, vgl. Tabelle 9)
- ▶ Relative Luftgeschwindigkeit  $v_{ar} = 0,1 \text{ m/s}$
- ▶ Relative Luftfeuchte  $\varphi = 10\%$

Die Ergebnisse der Variation einzelner Parameter sind zur besseren Vergleichbarkeit immer mit der mittleren Raumlufttemperatur korreliert, wobei der grau hinterlegte PMV-Bereich von -1 bis +1 nach [1] einem PPD von ungefähr 25 % entspricht.

Abbildung 3 zeigt den Einfluss unterschiedlicher Strahlungstemperaturen auf das PMV. Als Strahlungstemperaturen wurden sowohl die Ergebnisse der Oberflächentemperaturberechnungen (vgl. Tabelle 9) als auch Strahlungstemperaturwerte mit einem konstanten Delta zur mittleren Raumlufttemperatur herangezogen.

Bei einer Strahlungstemperatur von  $14,2^\circ\text{C}$  (minimal zulässige Oberflächentemperatur) kann bei einer mittleren Raumlufttemperatur von  $22^\circ\text{C}$  gerade noch ein PMV von -1 eingehalten werden.

**Abbildung 3:** Variation der Strahlungstemperatur  $T_r$  und der mittleren Raumlufttemperatur  $T_{im}$



Allgemein zeigt sich, dass eine Veränderung der Strahlungstemperatur deutliche Auswirkungen auf das PMV hat. Zu geringe Strahlungstemperaturen können durch Erhöhen der mittleren Raumlufttemperatur kompensiert werden.

**Abbildung 4:** Variation des Isolationswertes der Bekleidung  $I_{cl}$  und der mittleren Raumlufttemperatur  $T_{im}$

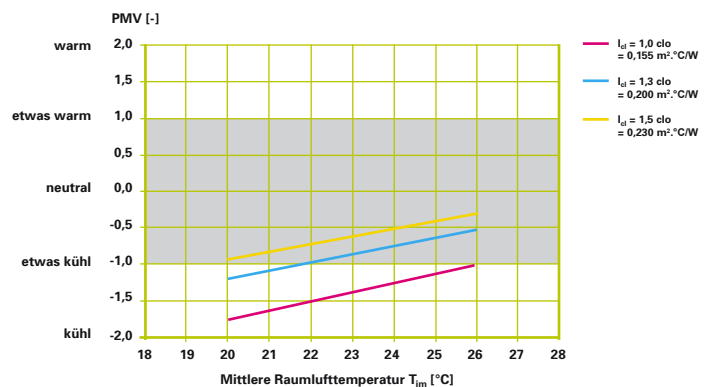


Abbildung 4 zeigt den Einfluss unterschiedlicher Isolationswerte der Bekleidung. Die für die Berechnungen bzw. Vergleiche verwendeten Isolationswerte sind in Tabelle 11 angeführt (vgl. auch [1]). Für sitzende Personen kann der Stuhl eine zusätzliche Isolation von 0 bis 0,4 clo bedeuten. Bei allen Berechnungen unter Winterbedingungen wurde daher ein Isolationswert von 1,3 clo statt 1,0 clo angenommen.

Da auch der Isolationswert der Bekleidung deutliche Auswirkungen auf das PMV hat, ist der Isolationswert in jedem Fall mit den Anforderungen an die Komfortkennwerte zu definieren.

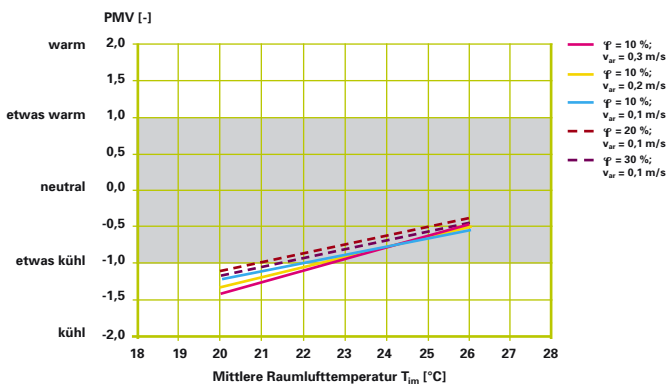
**Tabelle 11:** Übersicht über verwendete Isolationswerte der Bekleidung

Bekleidungsart	Isolationswert der Bekleidung $I_{cl}$	
	[clo]	[ $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ ]
Leichte Sommerkleidung	0,5	0,080
Mittlere Kleidung	1,0	0,160
Warme Kleidung	1,3	0,200
Sehr warme Kleidung	1,5	0,230

Abbildung 5 zeigt den Einfluss der Luftgeschwindigkeit und der relativen Luftfeuchte, die bei Winterbedingungen aufgrund fehlender Regelung oft sehr niedrig ist.

Wie aus dem Diagramm ersichtlich, ist der Einfluss der Luftfeuchte auf das PMV gering. Dies gilt auch für die „globale“ Strömungsgeschwindigkeit, wobei hier insbesondere lokale thermische Phänomene, wie z.B. Zugerscheinungen an sensiblen Körperregionen, separat zu betrachten sind (siehe auch „Örtliches thermisches Unbehagen“, auf Seite 10).

**Abbildung 5:** Variation der relativen Luftfeuchte  $\varphi$ , Luftgeschwindigkeit  $v_{ar}$  und mittleren Raumlufttemperatur  $T_{im}$



**Winterbedingungen im Nahverkehr**

Für eine vergleichende Betrachtung eines Nahverkehrsfahrzeugs können alle Grundparameter mit Ausnahme der Strahlungstemperatur und der mittleren Raumlufttemperatur beibehalten werden. Letztere beträgt für die Temperatureinstellung „Mitte“ 21°C statt 22°C, wodurch auch der Darstellungsbereich der mittleren Raumlufttemperatur entsprechend zu ändern ist.

**Abbildung 6:** Variation der Strahlungstemperatur  $T_r$  und mittleren Raumlufttemperatur  $T_{im}$

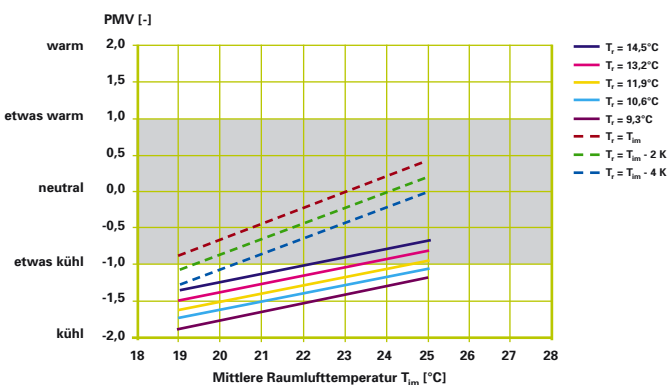


Abbildung 6 zeigt wieder den Einfluss der Strahlungstemperatur auf das PMV, wobei hier jedoch die Ergebnisse der Oberflächentemperaturberechnungen aus Tabelle 10 als Strahlungstemperaturwerte herangezogen wurden. Die PMV-Ergebnisse für die Strahlungstemperaturen mit konstantem Delta zur mittleren Raumlufttemperatur sind identisch mit jenen in Abbildung 3 und zu Referenzzwecken dargestellt.

Bei einer Strahlungstemperatur von 10,6°C (bei minimal zulässiger Oberflächentemperatur gemäß Nahverkehrsnorm, vgl. Tabelle 10) beträgt das PMV bei einer mittleren Raumlufttemperatur von 21°C lediglich -1,5. Durch Erhöhung der mittleren Raumlufttemperatur, der Strahlungstemperatur (Oberflächentemperatur) oder Annahme eines höheren Isolationswertes der Bekleidung könnte das PMV natürlich verbessert werden.

**Sommerbedingungen im Fernverkehr**

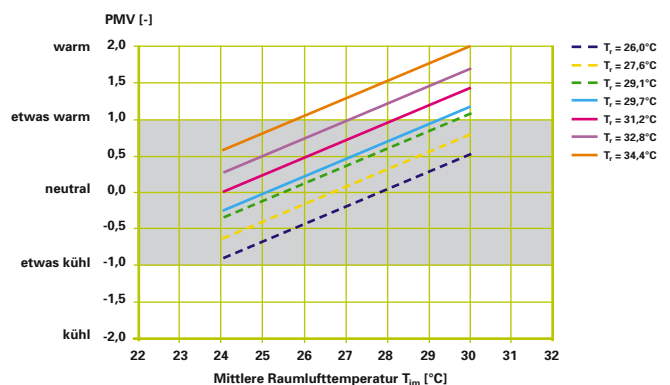
Die Auswirkungen der Sommerbedingungen wurden an einem Fernverkehrsfahrzeug (Abteilmotoren) untersucht, wobei folgende Grundparameter angenommen wurden:

- ▶ Energieumsatz  $M = 1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2$
- ▶ Abgegebene mechanische Leistung  $W = 0 \text{ W/m}^2$
- ▶ Isolationswert der Bekleidung  $I_{cl} = 0,5 \text{ clo}$
- ▶ Strahlungstemperatur  $T_r = 29,7^\circ\text{C}$  (vgl. Tabelle 9)
- ▶ Relative Luftgeschwindigkeit  $v_{ar} = 0,2 \text{ m/s}$
- ▶ Relative Luftfeuchte  $\varphi = 40 \%$

Die Ergebnisse der Variation einzelner Parameter sind zur besseren Vergleichbarkeit wieder mit der mittleren Raumlufttemperatur korreliert, wobei der grau hinterlegte PMV-Bereich von -1 bis +1 nach [1] einem PPD von ungefähr 25 % entspricht.

Abbildung 7 zeigt den Einfluss unterschiedlicher Strahlungstemperaturen auf das PMV. Als Strahlungstemperaturwerte wurden die Ergebnisse der Oberflächentemperaturberechnungen mit und ohne Sonneneinstrahlung (vgl. Tabelle 9) herangezogen.

**Abbildung 7:** Variation der Strahlungstemperatur  $T_r$  und mittleren Raumlufttemperatur  $T_{im}$



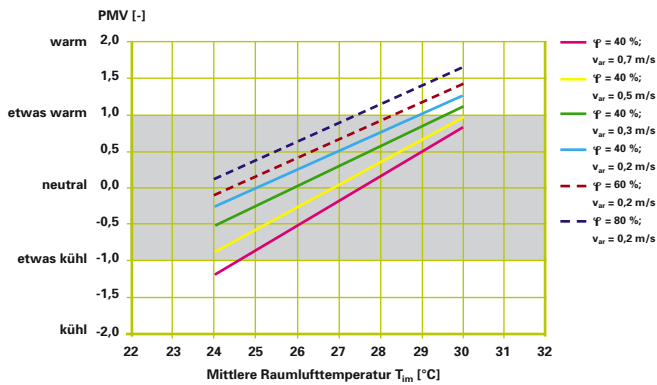
Bei einer Strahlungstemperatur von 29,7°C (entspricht typischen Oberflächentemperaturen bei 35°C und 700 W/m<sup>2</sup> Strahlungsleistung) kann bei einer mittleren Raumlufttemperatur von 27°C gerade noch ein PMV von 0,5 eingehalten werden.

Auch hier hat die Veränderung der Strahlungstemperatur deutliche Auswirkungen auf das PMV. Zu hohe Strahlungstemperaturen können durch Absenken der mittleren Raumlufttemperatur kompensiert werden.



Abbildung 8 zeigt den Einfluss der Luftgeschwindigkeit und der relativen Luftfeuchte auf das PMV. Wie aus dem Diagramm ersichtlich, ist der Einfluss der Luftfeuchte auf das PMV gering. Es ist aber zu beachten, dass der Behaglichkeitsbereich der Komfortgleichungen nur für eine relative Luftfeuchte von 25 % bis 65 % definiert ist und damit die Berechnung mit einer relativen Luftfeuchte von 80 % nur informativen Charakter hat. Dies gilt auch für die „globale“ Strömungsgeschwindigkeit, die in den Normen nur bis 0,5 m/s definiert ist.

**Abbildung 8:** Variation der relativen Luftfeuchte  $\varphi_r$ , Luftgeschwindigkeit  $v_{ar}$  und mittleren Raumlufttemperatur  $T_{im}$



## Schlussfolgerungen und Ausblick

Die „Klimakomfortnormen“ für Schienenfahrzeuge des Fern- und Nahverkehrs definieren europaweit einheitliche Kriterien für die thermische Behaglichkeit in Fahrgasträumen und Führerständen. Die Umsetzung der Normen bringt nicht nur eine bessere Planbarkeit und ein geringeres Risiko für den Fahrzeughersteller mit sich, sondern garantiert dem Betreiber auch qualitativ höherwertige Fahrzeuge und trägt so letztendlich zu einer Komfortverbesserung für den Fahrgast bei.

Aufgrund des komplexen Zusammenspiels der Einzelbehaglichkeitsparameter ist eine Präzisierung der Anforderungen im Vorfeld sinnvoll, um die spezifischen Erwartungen des Betreibers bestmöglich erfüllen und spätere Diskussionen vermeiden zu können.

Zur Erfüllung der thermischen Behaglichkeitsanforderungen ist das richtige Klimakonzept ganz entscheidend (einige Klimakonzeptlösungen für Schienenfahrzeuge des innerstädtischen und regionalen Nahverkehrs sind in [6] beschrieben). Von zentraler Bedeutung sind dabei die Abstimmung der Luftverteilung auf das Fahrzeug und die Optimierung der Regelung unter allen klimatischen Einsatzbedingungen. Diese Optimierungsarbeiten können nur am Gesamtfahrzeug in entsprechenden klimatechnischen Einrichtungen sinnvoll durchgeführt werden.

Die Komfortkennwertanalyse hat gezeigt, dass der von einzelnen Bahnunternehmen geforderte zulässige Prozentsatz Unzufriedener von max. 25 % realisierbar ist. Wesentlich dabei ist die Berücksichtigung und Vereinbarung der maßgeblichen Randbedingungen, wie z.B. Isolationswert der Bekleidung.

In Zukunft sollte auch dem Thema Energieeffizienz bei der Konzeption der Klimaanlage mehr Augenmerk geschenkt werden (siehe [7]). Obwohl in den Normen einige energiesparende Maßnahmen, z.B. Einschränkung der Frischluftmenge, vorgesehen sind, besteht in vielen Bereichen noch Verbesserungspotential. Zu den vielversprechendsten Ansätzen zählen unter anderem die Regelung der Frischluftmenge in Abhängigkeit von der CO<sub>2</sub>-Konzentration oder die Abluftwärmerückgewinnung.

Ziel all dieser Bemühungen muss es sein, den Schienenverkehr zuverlässiger, energieeffizienter und attraktiver zu machen. Klimatechnische Untersuchungen leisten dazu einen wichtigen Beitrag.

## Literatur

- [1] EN ISO 7730: *Gemäßigtes Umgebungsklima: Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit*, 1995
- [2] Fanger, P. O.: *Thermal Comfort*, Reprinted, R. Krieger Publishing Company, Malabar 1982
- [3] Mayer, E., Conrad, W.: *Untersuchung der thermischen Behaglichkeit bei Quelllüftung und Flächenkühlung*, in: Mayer, E. (Hg.): *Menschengerechte Raumklimatisierung durch Quelllüftung 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] Fanger, P. O., Pedersen, C.J.K.: *Discomfort due to air velocities in spaces*. In Proc. of the Meeting of Commission B1, B2 and E1 of the IIF, Belgrade 1977/11
- [6] Haller G.: *Thermischer Komfort in Nahverkehrsfahrzeugen*, ZEVrail Glasers Annalen, Juni 2004
- [7] Kreitmayer M., Haller G.: *Energy management in railway vehicles - analysis of energy consumption under testing conditions*, Proceedings of Workshop "Mobile Air Conditioning", Vienna, 2002

## **Impressum**

**RTA Rail Tec Arsenal Fahrzeugversuchsanlage GmbH**

1210 Wien

Paukerwerkstrasse 3

Österreich

Tel: +43 1 256 80 81

Fax: +43 1 256 80 81-600

[contact@rta.co.at](mailto:contact@rta.co.at)

[www.rta.co.at](http://www.rta.co.at)

**Für den Inhalt verantwortlich:** Dipl.-Ing. Gabriel Haller

**Grafische Gestaltung:** [www.gruenberg4.at](http://www.gruenberg4.at)

**Druck:** Druckerei Robitschek

Fachpublikation September 2006



**RTA Rail Tec Arsenal Fahrzeugversuchsanlage GmbH**  
1210 Wien | Paukerwerkstrasse 3 | Österreich  
Tel: +43 1 256 80 81 | [contact@rta.co.at](mailto:contact@rta.co.at) | [www.rta.co.at](http://www.rta.co.at)

**rta**  
RAIL TEC ARSENAL