

Die Klimatisierung von Reisezugwagen

Ein geschichtlicher Rückblick, der aktuelle Stand der Technik
und der Versuch eines Ausblicks

Ingwer Ebinger



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences



Gliederung

- 1. Kurze Geschichte der Eisenbahn**
- 2. Klimatechnik in Reisezugwagen**
- 3. Entwicklungspotentiale**
- 4. Zusammenfassung**

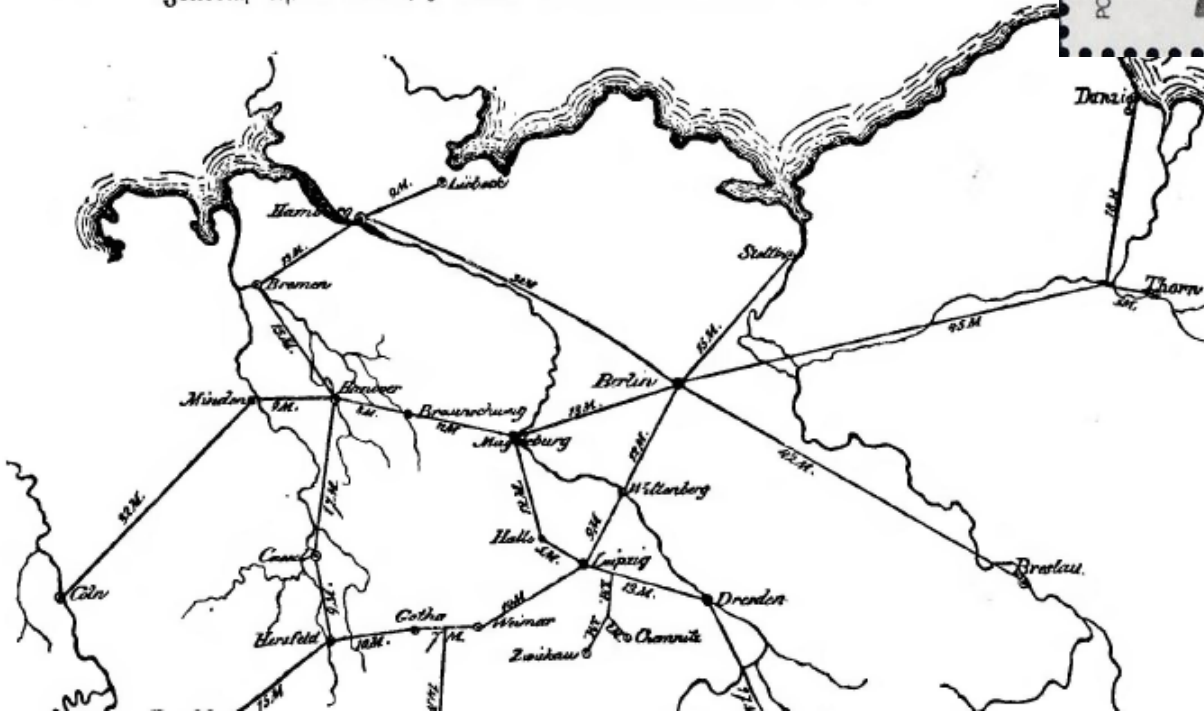
Die Klimatisierung von Reisezugwagen

1. Kurze Geschichte der Eisenbahn

Friedrich List propagiert den Aufbau eines deutschen Eisenbahnnetzes zur Entwicklung der Wirtschaft und zur Überwindung der Zollgrenzen. (1833)



Friedrich List's Entwurf zu einem Deutschen Eisenbahnsystem aus dem Jahre 1833.



Hochschule für Verkehrswesen
„Friedrich List“
in Dresden; 1953-1992

Entwicklung der Fahrzeuge (Beispiele aus dem Fernverkehr)

ICE-Flotte (ICE-1, ICE-2, ICE-3, ICE-T)



Aktuell: ICE-4



IC mit Doppelstockwagen



Zukunft (?): Next Generation Train (NGT)



2. Klimatechnik in Reisezugwagen

Bereits in den Anfangsjahren wurde der Beheizung von Eisenbahnfahrzeugen die notwendige Aufmerksamkeit zu teil. In der [Enzyklopädie des Eisenbahnwesens von 1912](#) findet man dazu:

Für Eisenbahnwagen stehen folgende **Heizvorrichtungen** in Verwendung:

- Wärmflaschen** (ältestes System seit 1848, Wasserfüllung 70 °C bis 100 °C; 3-4 Stunden; Füllung mit essigsauerm Natron [PCM]; 10 bis 15 Stunden)
- Preßkohlen** (Kästen mit glühenden Kohlen unter den Sitzen, 7-9 Stunden)
- Ofenheizung** (gußeiserne Füllöfen in den Waggons; 8-10 Stunden)
- Luftheizung** (außerhalb des Wagens erwärmte Luft wird genutzt)
- Gasheizung** (gasbetriebener Brenner mit gußeisernem Gehäuse)

Ofenheizung (Schmalspurbahnwagen)



Die Klimatisierung von Reisezugwagen

2. Historische Klimatechnik in Reisezugwagen

Warmwasserheizung (Weitstreckenpersonenwagen)

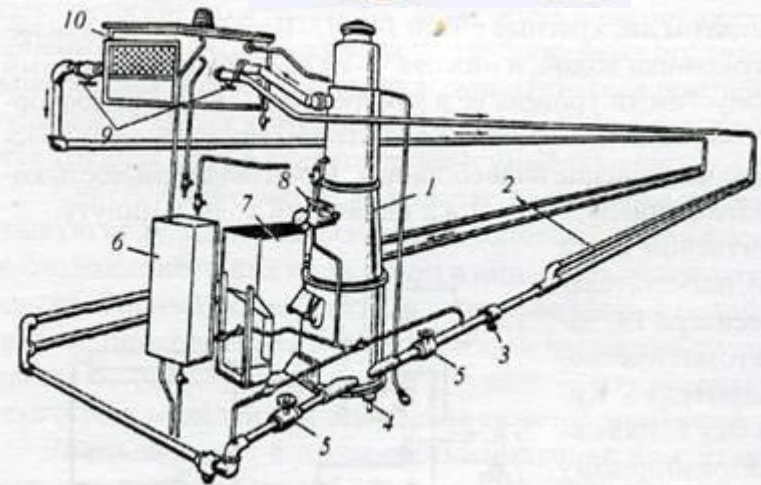
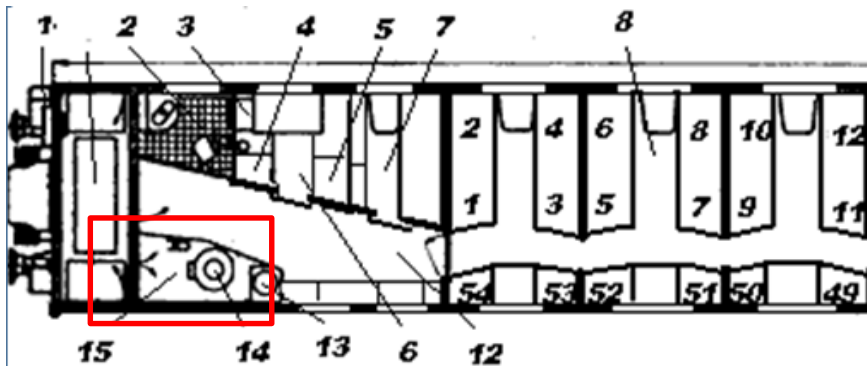
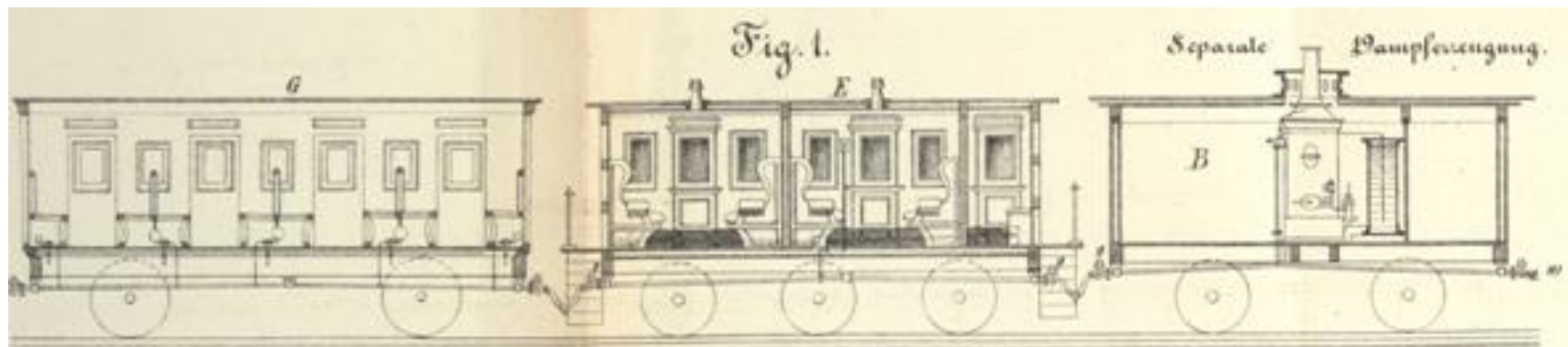
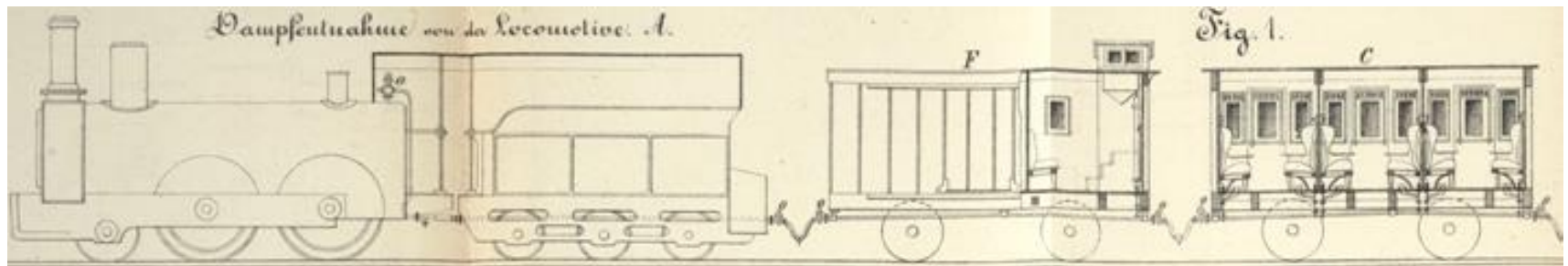


Рис. 5.17. Система водяного отопления пассажирских вагонов

Abbildung: train-photo.ru; vagoni-jd.ru

Dampfheizung

(1869; Dampfantnahme von der Lokomotive oder aus Heizkesselwagen)



Elektrische Heizung (aus isolierendem, hitzebeständigem Material hergestellte Platten, auf denen ein Widerstandsdraht in Schraubenwindungen aufgewickelt ist)

Dieses Heizsystem ist gegenüber allen übrigen im allgemeinen wenig wirtschaftlich, hat daher trotz seiner großen Vorteile, bzw. des hohen Wirkungsgrades der Anlage (Umsetzung von elektrischer Energie in Wärme), der leichten Regelbarkeit und der Unabhängigkeit der Wirkung von der Zugslänge, bei Dampfbahnen fast keine Anwendung; es ist auch bei den Fahrbetriebsmitteln der elektrischen Vollbahnen und Straßenbahnen, bei denen eine Heizung erfolgt, verhältnismäßig wenig in Anwendung.

Überprüfung der Leistungsfähigkeit der Heizungsanlage und Bewertung des thermischen Komforts

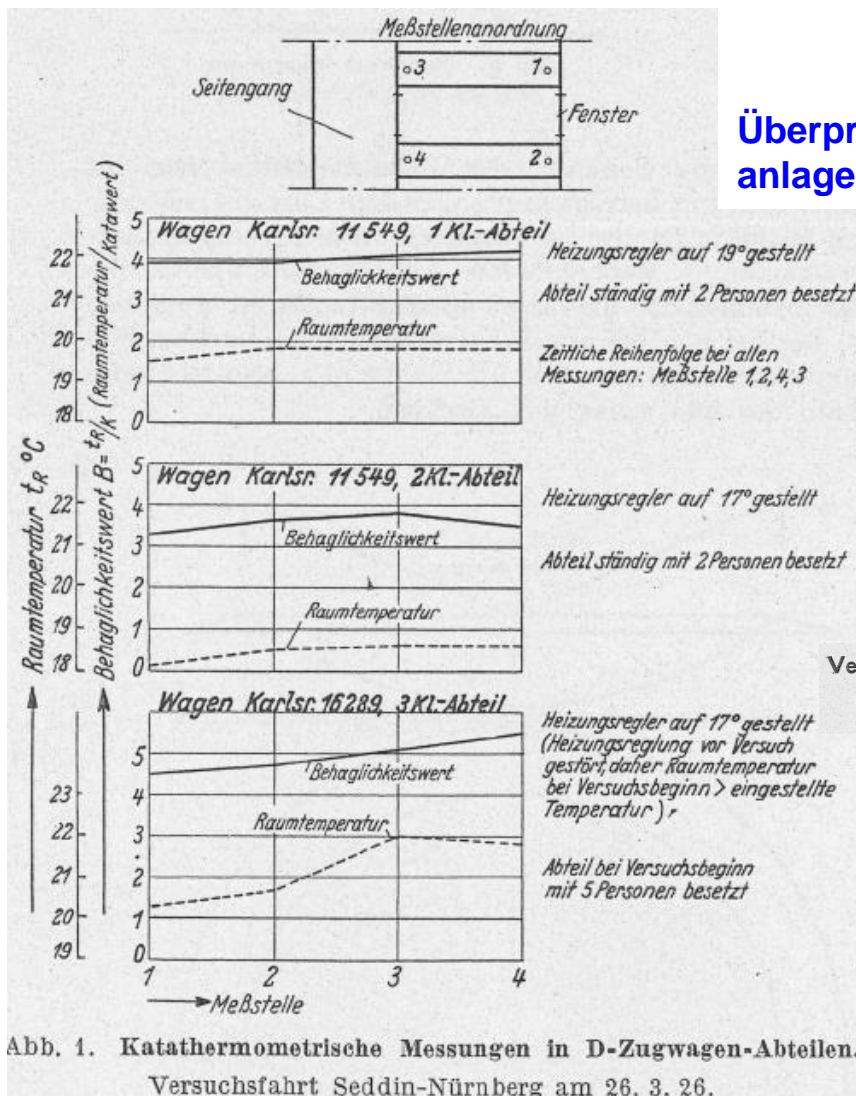


Abb. 1. Katathermometrische Messungen in D-Zugwagen-Abteilen.
 Versuchsfahrt Seddin-Nürnberg am 26. 3. 26.

GESUNDHEITS-INGENIEUR

Nr. 32

8. August 1936

59. Jahrgang

Versuche zur Hygiene der Heizung und Lüftung in Eisenbahnwagen

Von Reichsbahnrat Dipl.-Ing. Helmut Baur, Wagenversuchsabteilung der Deutschen Reichsbahn und Regierungsrat Dr. Walther Liese, Reichsgesundheitsamt

2. Historische Klimatechnik in Reisezugwagen

Die **Lüftung der Wagen** geschieht vielfach noch durch Offenhalten der Fenster.

Am besten lüftet man durch **Sauger**; es ist aber bisher kein System bekannt, das einen dauernden Gehalt der Luft in den Abteilen von höchstens **1% CO₂** gewährleistet. Für die Sauger bestehen verschiedene Systeme: Torpedo-, Grove- (Allzeit voran), Potsdamer-, und Voß-Wolpert-Sauger.

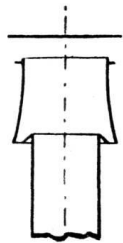


Abb. 48.
Wolpert-Sauger.

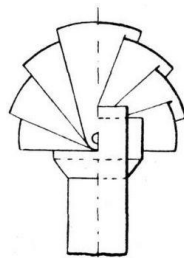


Abb. 49. Grove-Sauger.

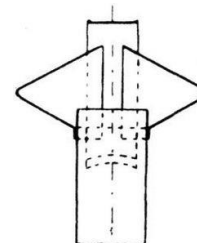
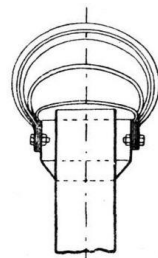


Abb. 50. Torpedosauger.

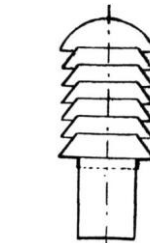
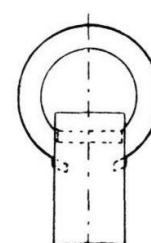


Abb. 51.
Potsdamer Sauger.

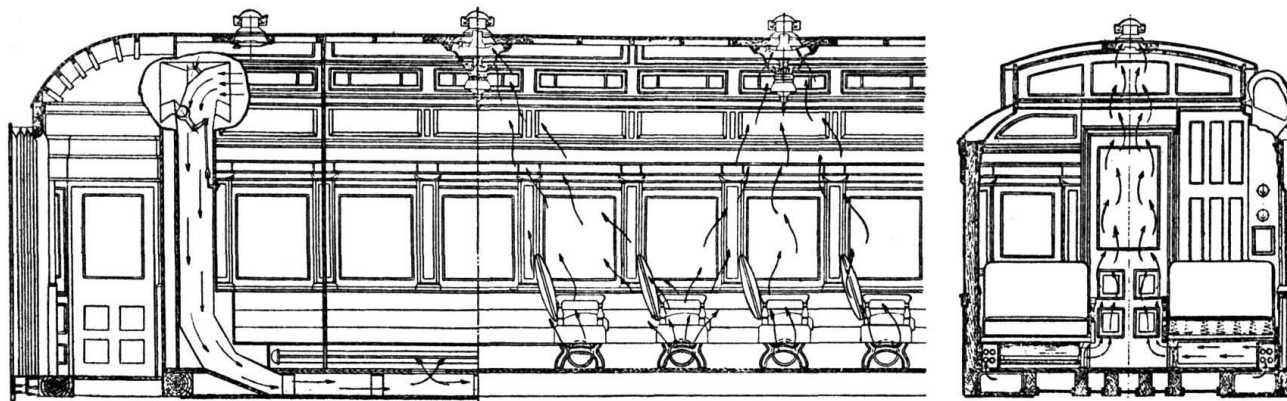


Abb. 53. Entlüftungseinrichtung in P. der Pennsylvania-Eisenbahn.

Für 1 Reisenden werden
pro Stunde 1000 Kubikfuß
(**28,32 m³**) Luft gefördert.

Luftheizung und Druckbelüftung in Reisezugwagen

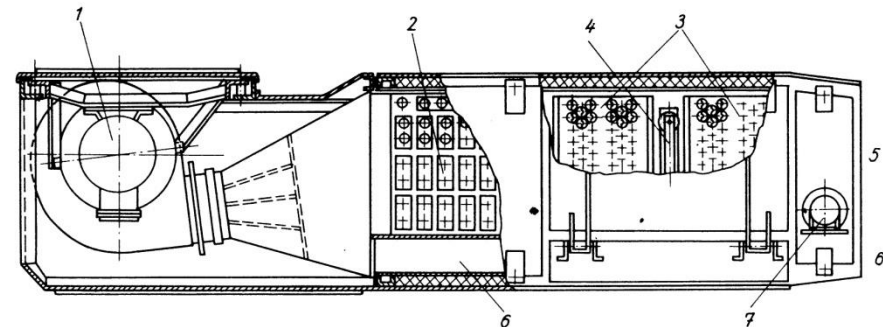
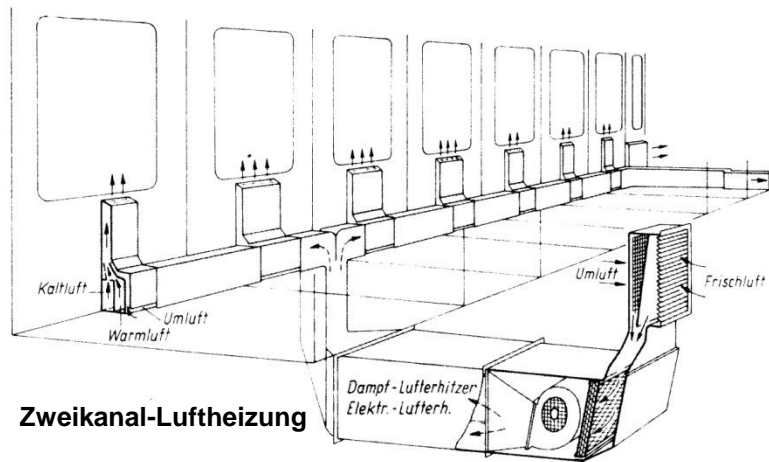


Bild 4/20 Luftheizaggregat (Leistung: $2 \times 20 \text{ kW} / 144 \text{ MJ/h}$)

1 Doppelradiallüfter, 2 Wärmetauscher Dampfheizung, 3 Wärmetauscher elektrische Mehrspannungsheizung, 4 Luftmangelsicherung, 5 Austrittsöffnung Warmkanal, 6 Austrittsöffnung Kaltkanal, 7 Elektrischer Klappenantrieb für Kaltkanal

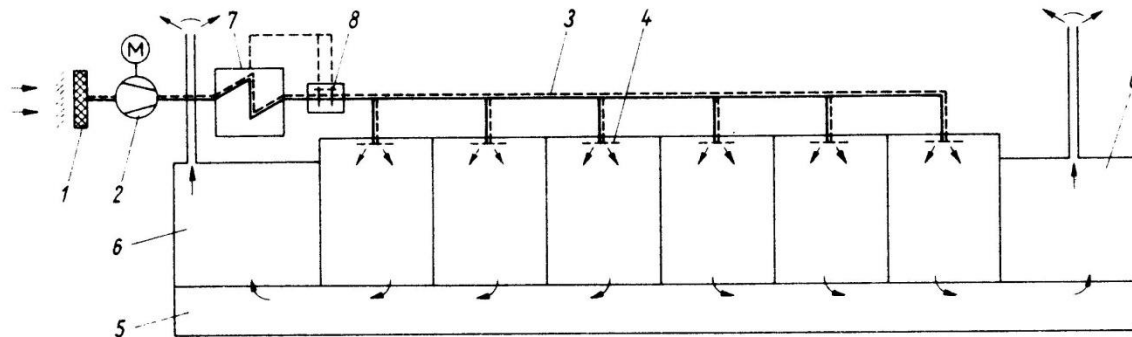


Bild 237
Schema einer Druckbelüftung

1 Luftfilter, 2 Lüfter, 3 Luftkanal, 4 Lochdecke, 5 Seitengang, 6 Einstiegraum, 7 Luftheizer, 8 Luftthermometer

Klimaanlagen in Reisezugwagen



Salonwagen der Kaiserin Auguste Victoria (1911)
Kokszentralheizung,
**Kühlung durch Wasser, das auf ein Segeltuch
gesprüht wurde**



Zweiteiliger Gelenkdoppelstockwagen (1936)
Kühlung mit Eisblöcken

Klimatisierung der Doppelstockwagen (Lübeck-Büchner Eisenbahn 1936) - Wassereisbunker

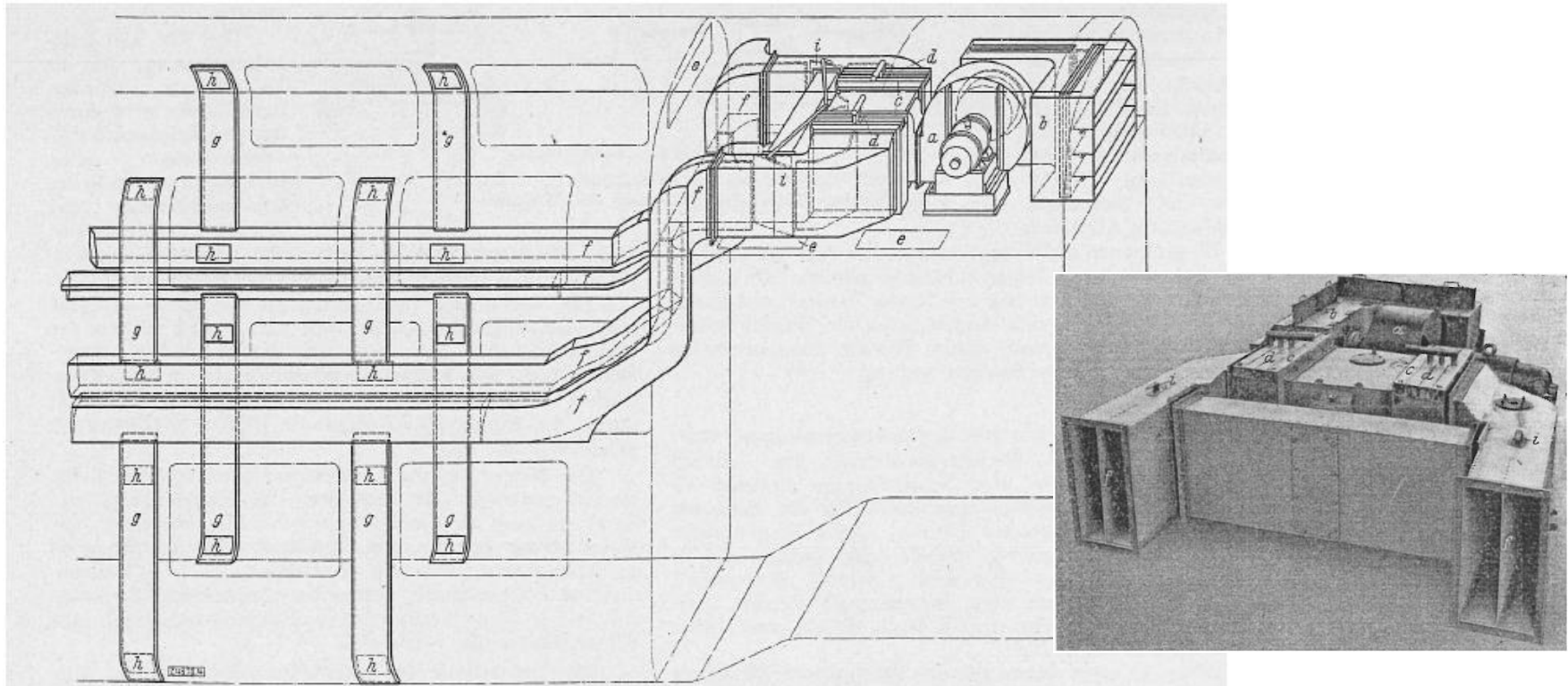


Bild 4 und 5. Anordnung und Aufbau der Lüftungsanlage.

- | | | |
|---|---|--|
| <i>a</i> Gebläse | <i>c</i> Lufterhitzer | <i>g</i> flache senkrechte Verteilungsschächte zu den Ausblaseöffnungen <i>h</i> |
| <i>b</i> Kammer mit einstellbaren Ansaugöffnungen für Frischluft und Umluft und Filtern | <i>d</i> Luftkühler | <i>i</i> Verteilklappen für einseitige Luftführung |
| | <i>e</i> Rücksaugeöffnungen für Umluftbetrieb | |
| | <i>f</i> Hauptverteilkonäle | |

Klimaanlage mit Befeuchtungseinrichtung

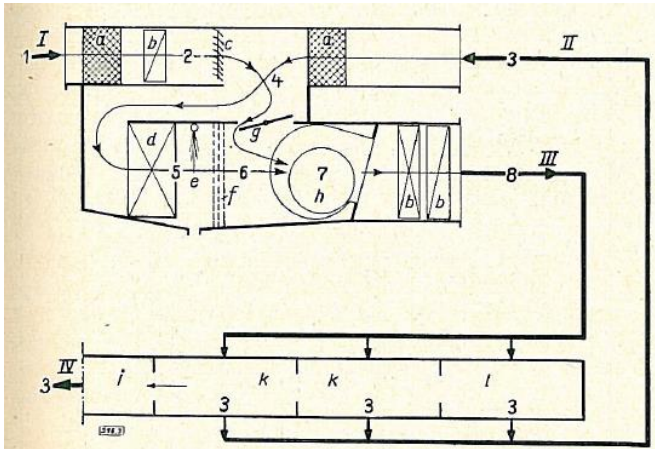


Bild 3. Schema des Klimagerätes und der Luftführung

- | | |
|---------------------------|----------------------|
| a Filter | i halbes Küchenglied |
| b Heizapparat | k Zwischenglieder |
| c Frischluftklappe | l Kopfglied |
| d Kühler | |
| e Befeuchtungseinrichtung | I Frischluft |
| f Tropfenfänger | II Rückluft |
| g Nebenschlußklappe | III Zuluft |
| h Lüfter | IV Abluft |

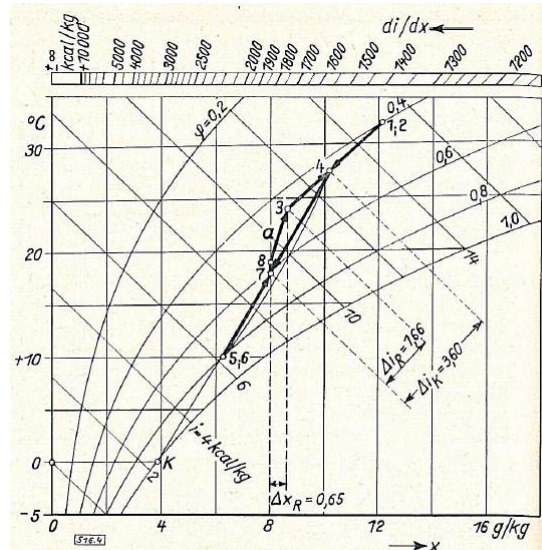


Bild 4. Zustandsänderung der Luft im Klimagerät bei Sommerbetrieb und 100% Besetzung (Die Strecke 7—8 entspricht der Lüfterleistung) ¹⁾

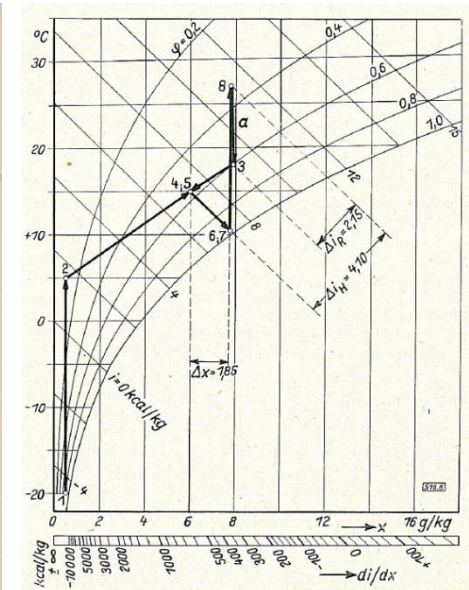
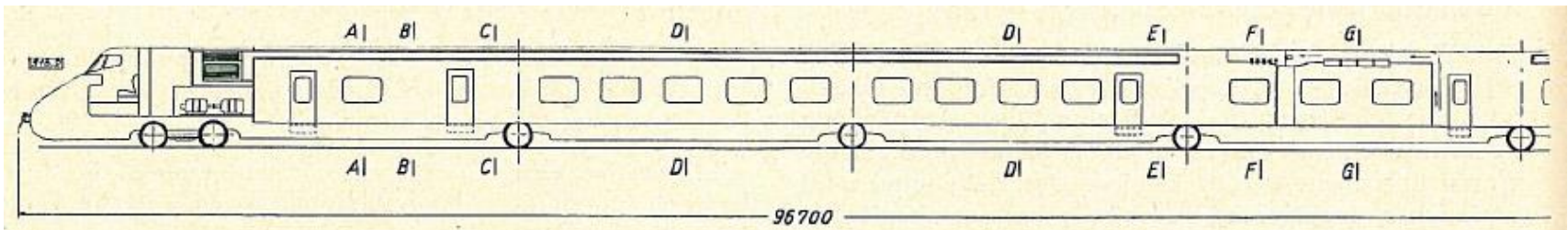


Bild 6. Die Zustandsänderung der Luft im Klimagerät bei Winterbetrieb, 25% Besetzung und ohne Sonneneinstrahlung



Klimaanlage mit Jettair-Apparat

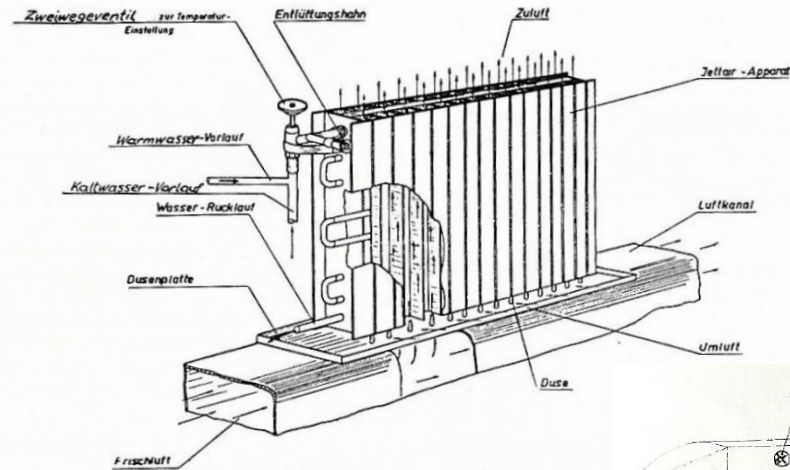


Bild 1. Jettair-Apparat A

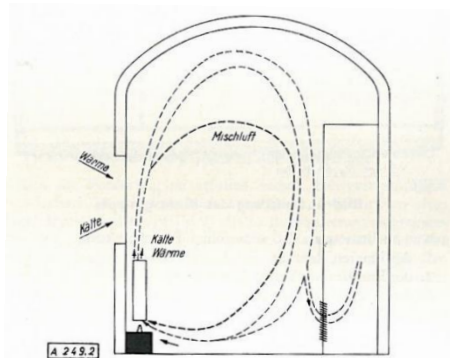


Bild 2. Wirkungsweise des Jettair-Apparates in einem Schlafwagenabteil

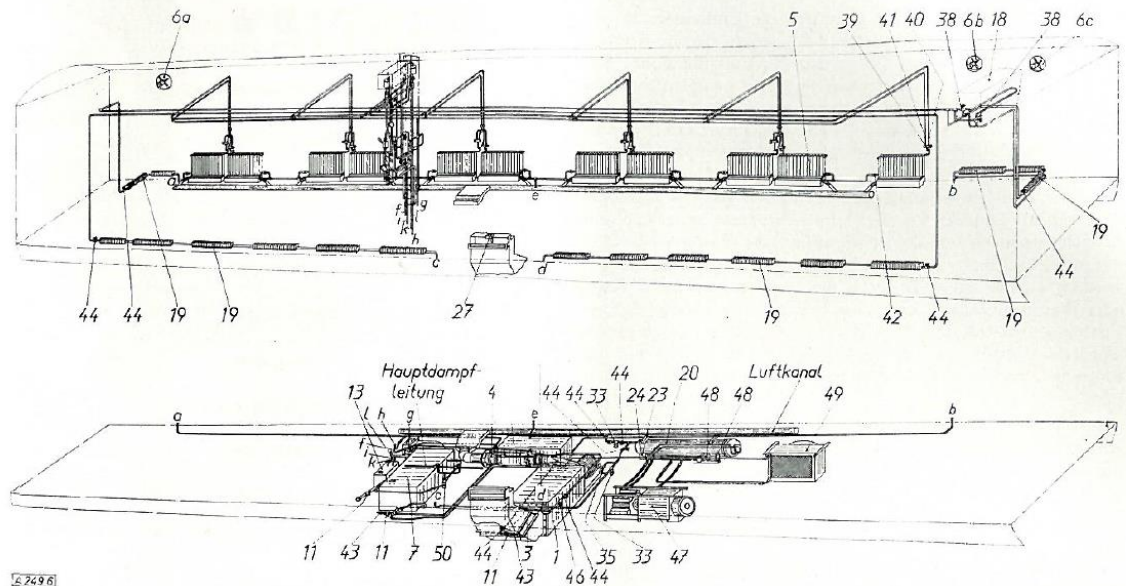
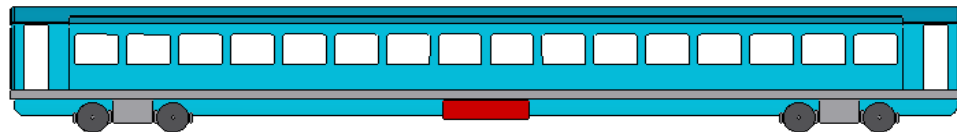


Bild 6. Lageplan der Klimaanlage

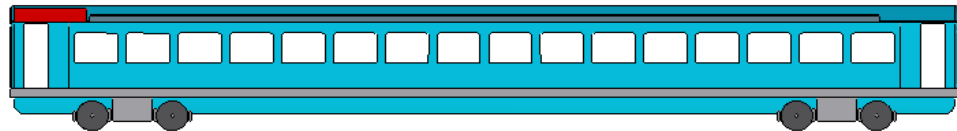
Anlagenkonfiguration

Kompaktanlagen

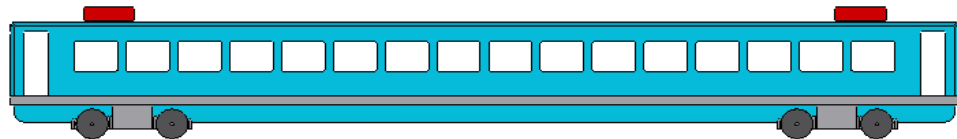
Unterfluranlage



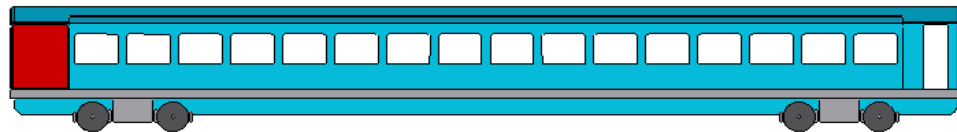
Dacheinbau



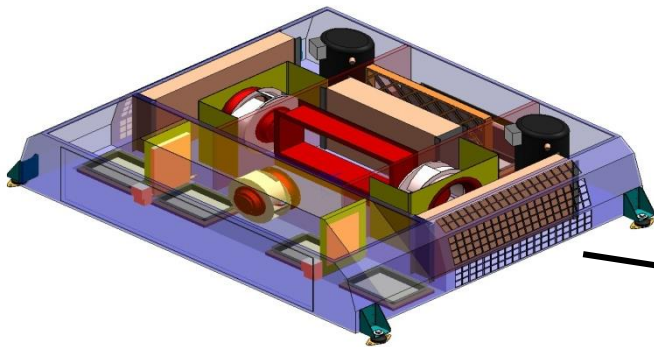
Aufdachanlagen



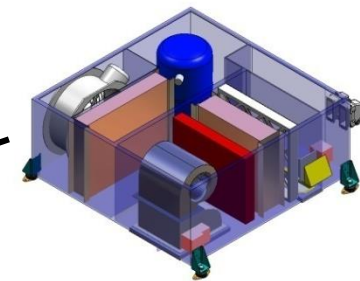
Schrankgerät



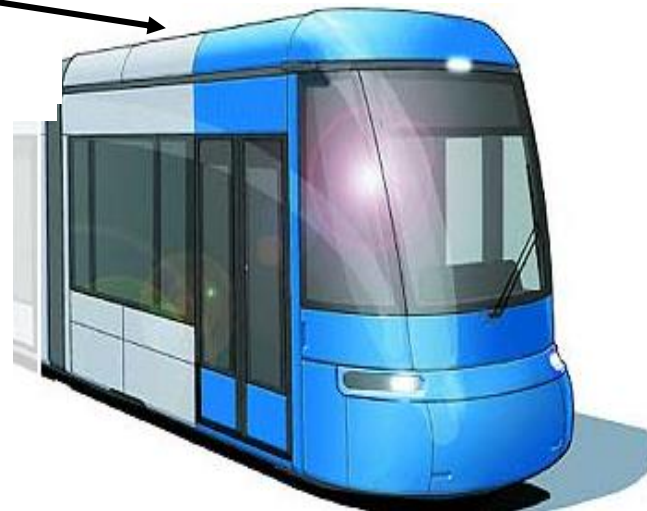
Beispiele für Kompaktanlagen



**Klimatisierung
Fahrgastraum**

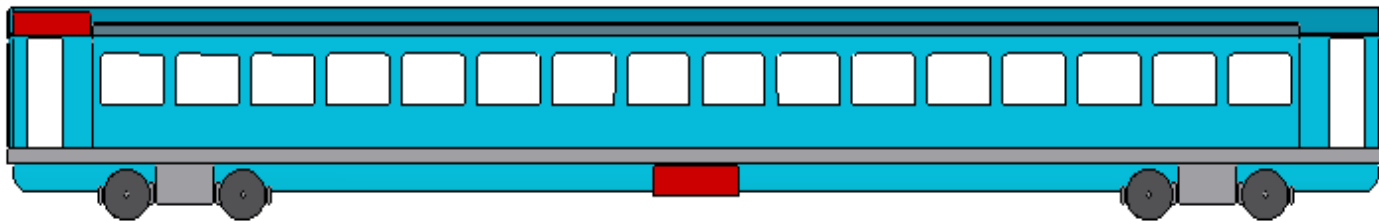


**Klimatisierung
Fahrerstand**

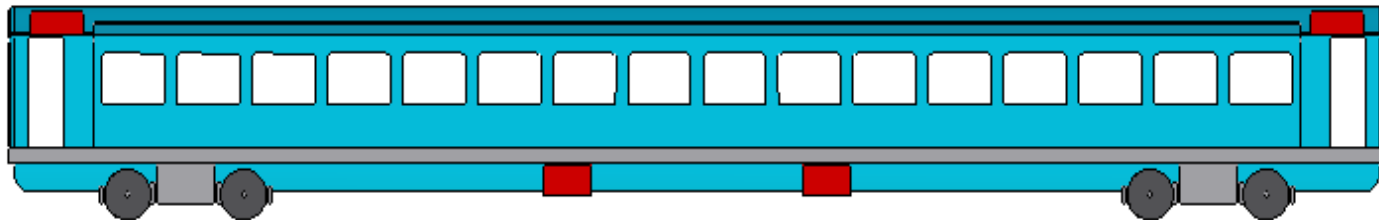


Klimaanlagensysteme für Straßenbahnen

Splitanlagen



Einseitiges Luftbehandlungsgerät



Zwei Luftbehandlungsgeräte jeweils an den Wagenenden

Beispiel für eine Splitanlage



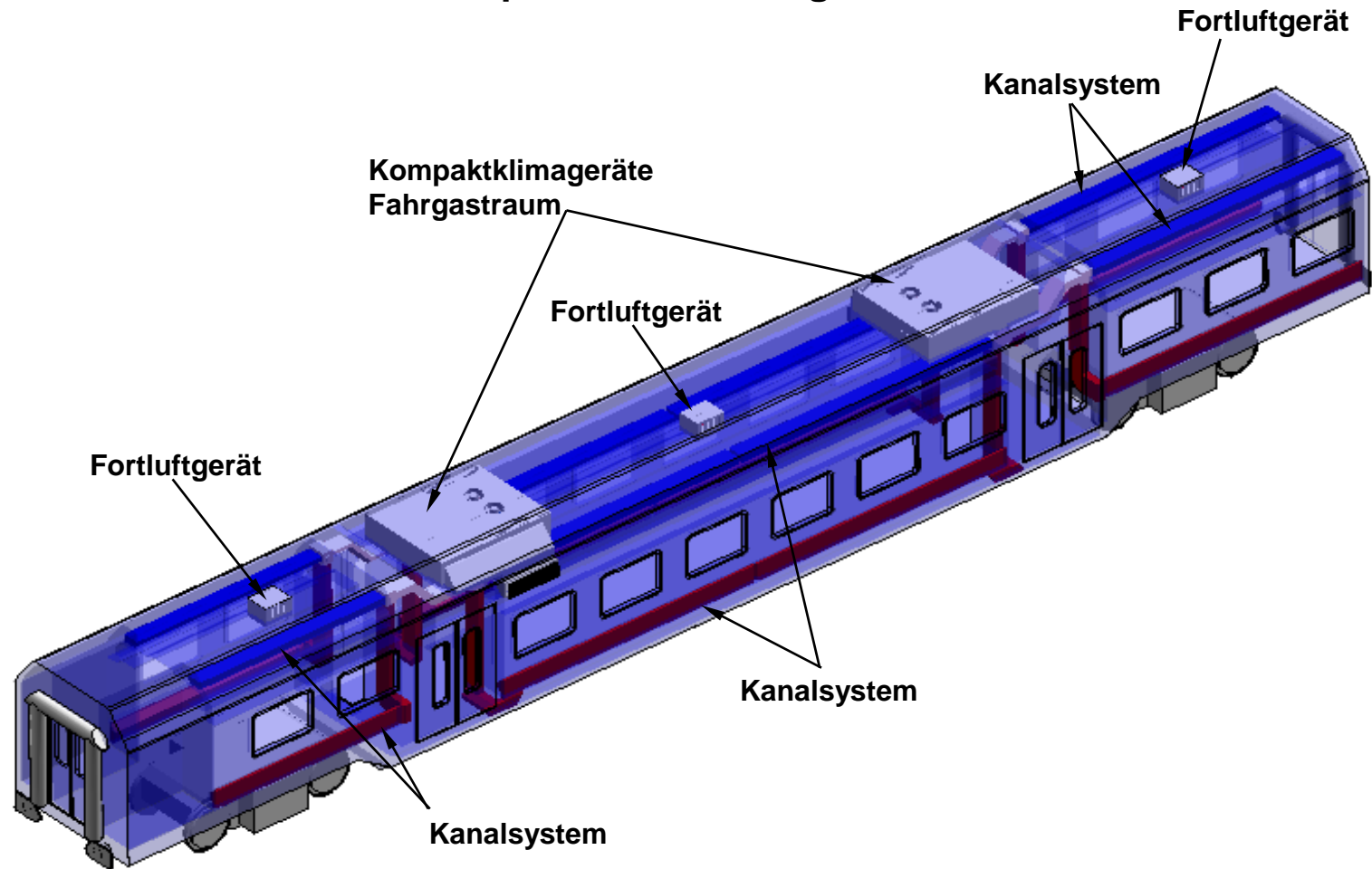
Luftbehandlungs-
gerät



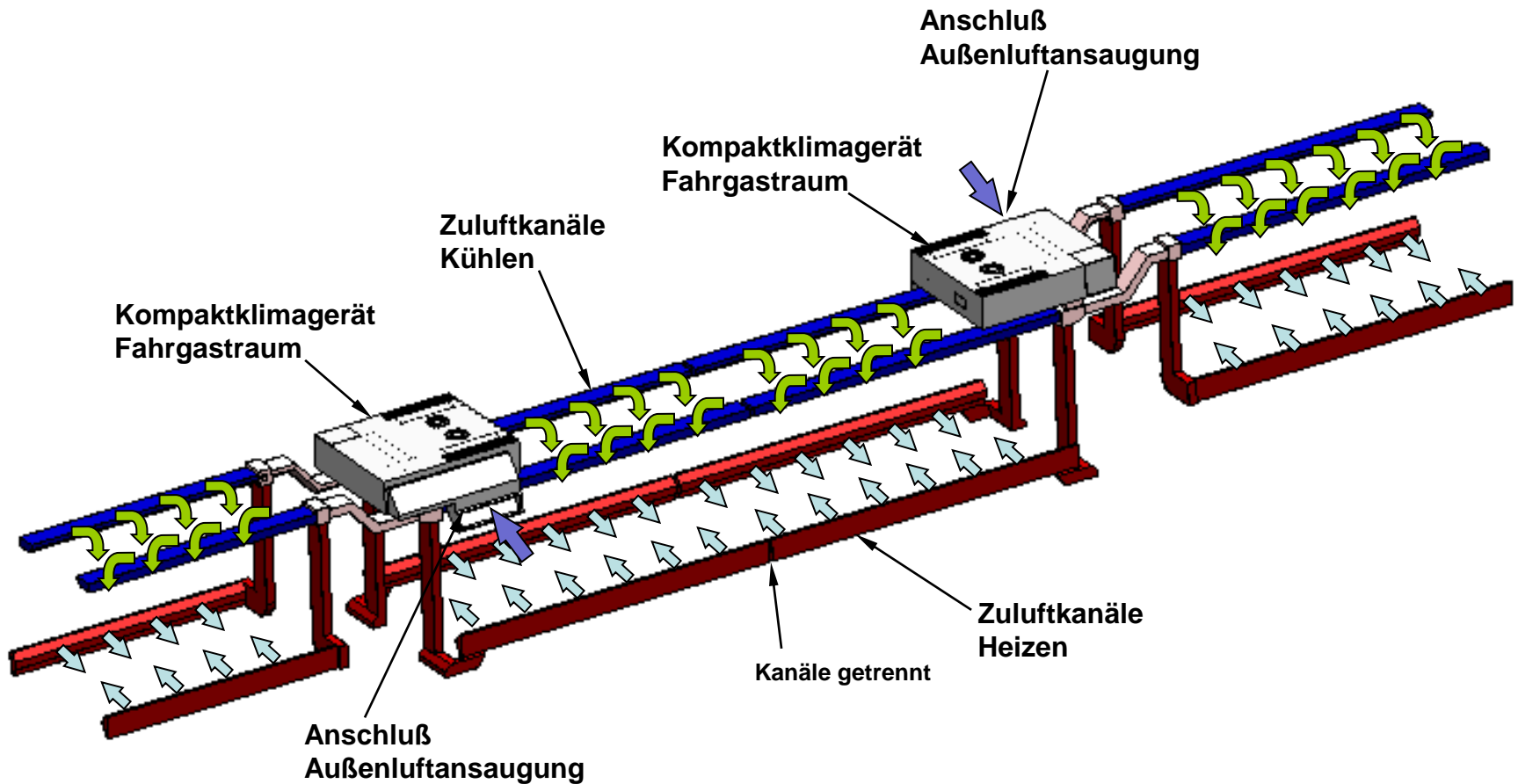
Kälteaggregat

Klimaanlagensysteme für den Transrapid Shanghai

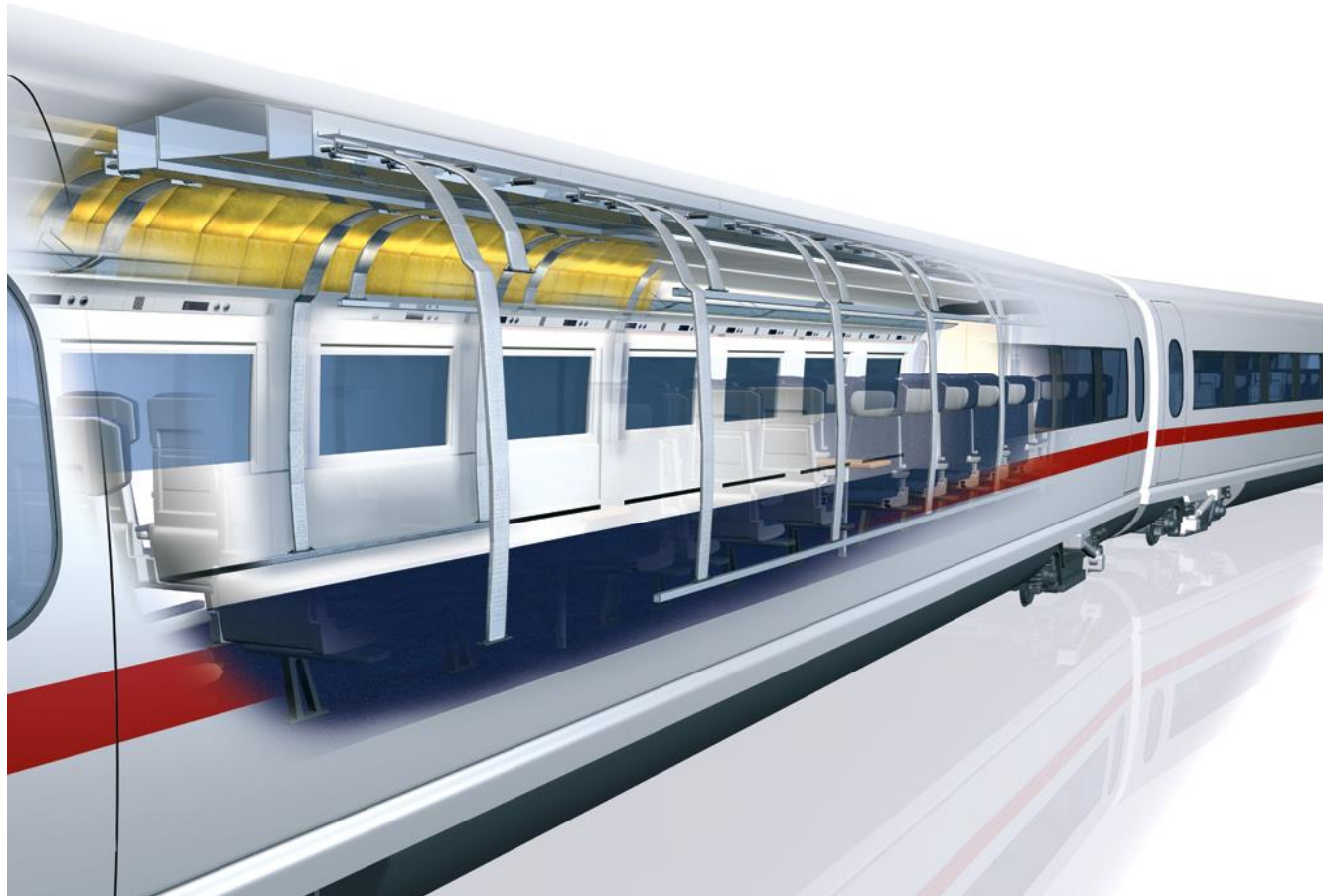
Einbauverhältnisse - Beispiel Aufdachanlage -



Kanalsystem - Beispiel Aufdachanlage -



Kanalsystem - ICE 4 -



Auslegungsparameter

Außenluftzustand Strahlung

	Länder	Winter	Sommer		
	zum Beispiel	Minimal-Temperaturen	Höchste Außen-temperaturen	Relative Luft-feuchte	Gleichwertige Strahlungs-leistung der Sonne
Zone I	Griechenland, Portugal, Spanien	-10°C	+40°C	40%	800 W/m ²
Zone II	Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Frankreich, Italien, Tschechien, Ungarn u.a.	-20°C	+35°C	50%	700 W/m ²
Zone III	Finnland, Norwegen, Schweden	-40 °C	+28°C	45%	600 W/m ²

Außenluftvolumen- strom

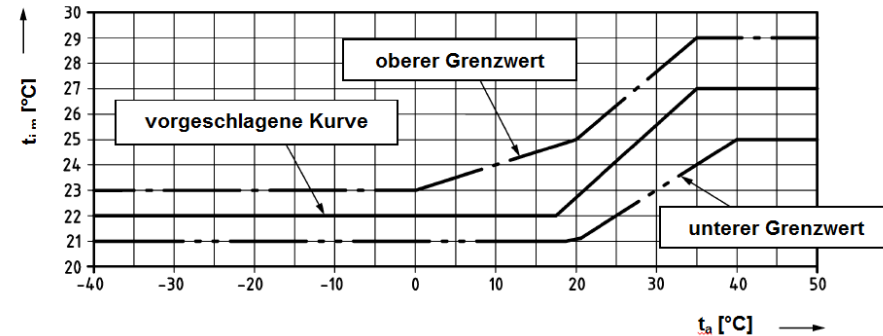
(Wagen mit Klimaanlage)

Außentemperatur (ta)	Geringste Aussenluftmenge bezogen auf +22°C und 50% Feuchte
$ta \leq -20^\circ\text{C}$	10 m ³ /h pro Sitz- oder Liegeplatz
$-20^\circ\text{C} < ta \leq -5^\circ\text{C}$	15 m ³ /h pro Sitz- oder Liegeplatz
$-5^\circ\text{C} < ta \leq +26^\circ\text{C}$	20 m ³ /h pro Sitz- oder Liegeplatz
$ta > +26^\circ\text{C}$	15 m ³ /h pro Sitz- oder Liegeplatz

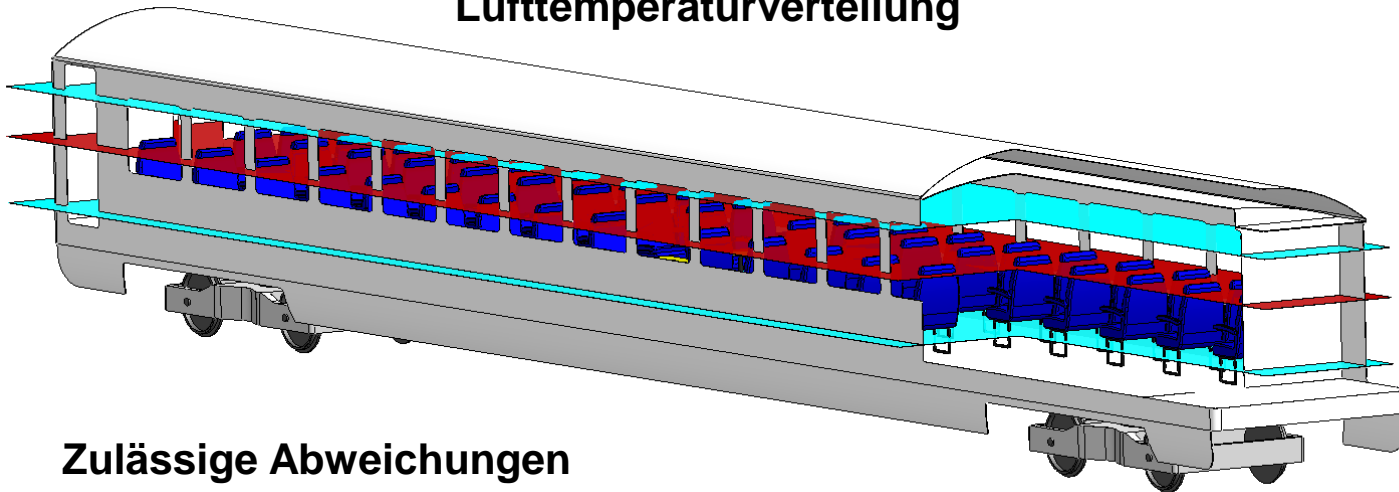
Raumluftzustand (Behaglichkeitszone)

Regelkurve der Raumlufttemperatur (mittlere Fahrgastraumtemperatur 1,1 m ü. FOK)

$$\begin{array}{ll}
 t_a < 17,5 \text{ °C} & t_i = 22 \text{ °C} \\
 17,5 \text{ °C} < t_a < 35 \text{ °C} & t_i = 22 + 2/7 (t_a - 17,5) \text{ °C} \\
 t_a > 35 \text{ °C} & t_i = 27 \text{ °C}
 \end{array}$$



Lufttemperaturverteilung

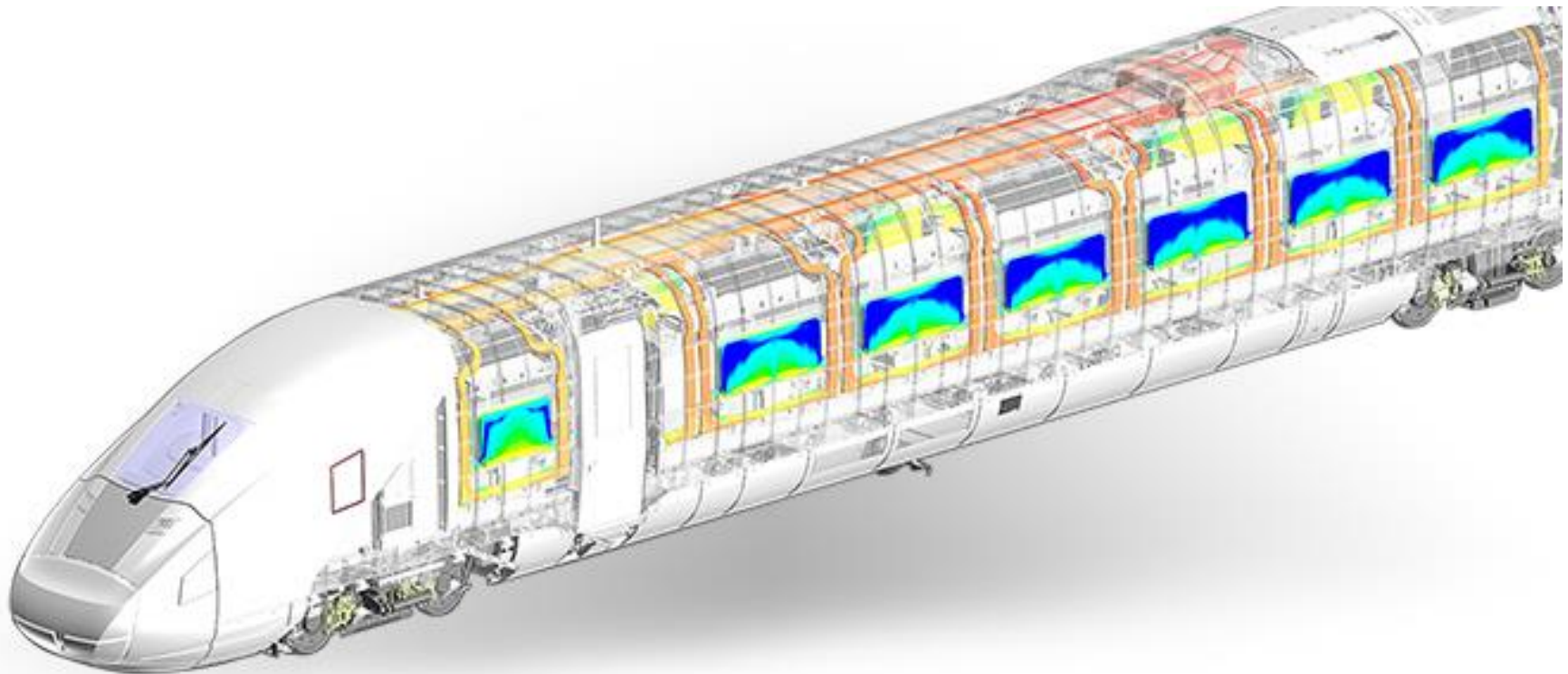


Zulässige Abweichungen

- Mittlere Fahrgastraumtemperatur vom Sollwert $\pm 1 \text{ K}$
- Unterschiede der Extremwerte in 1,1m ü. FOK $\leq 2 \text{ K}$
- Minimal- und Maximalwerte in den Messebenen 0,1 m und 1,7 m ü. FOK $\leq 3 \text{ K}$

Beispiel für eine CFD-Simulation

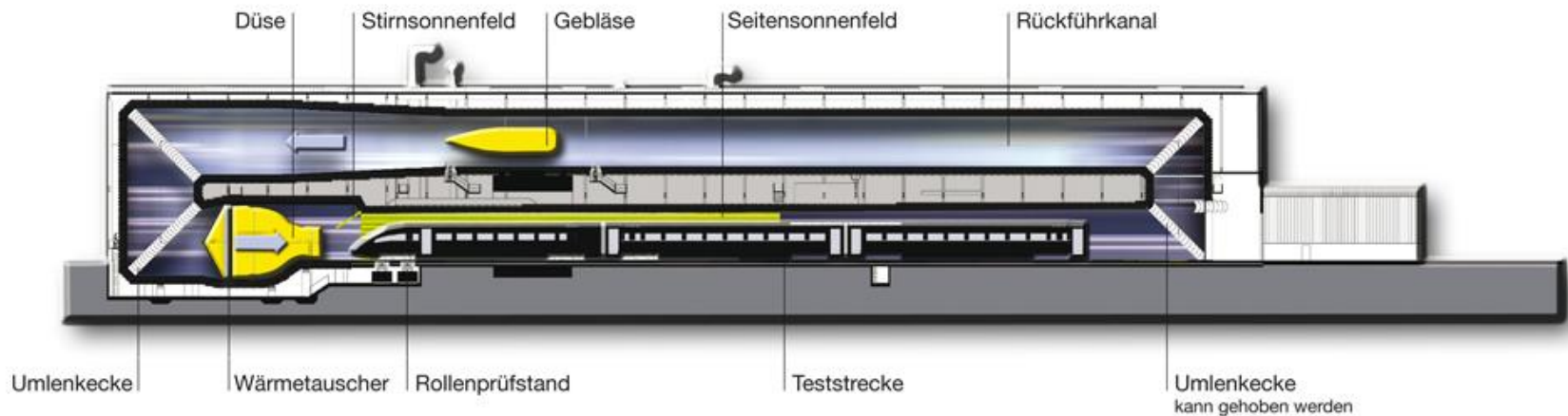
- ICE 4 -



Typ-Prüfung im Klimawindkanal

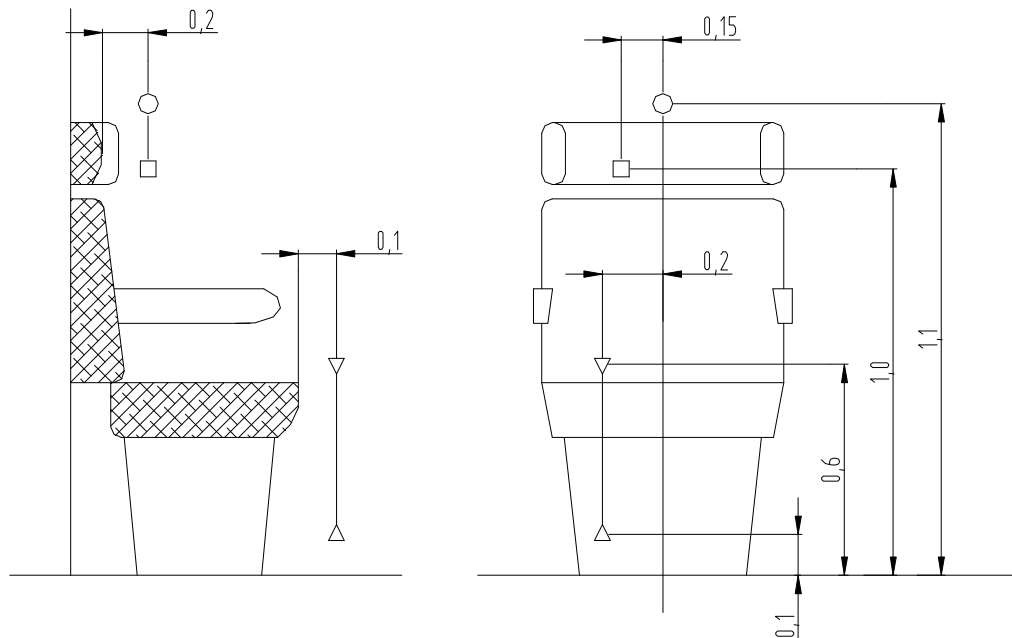
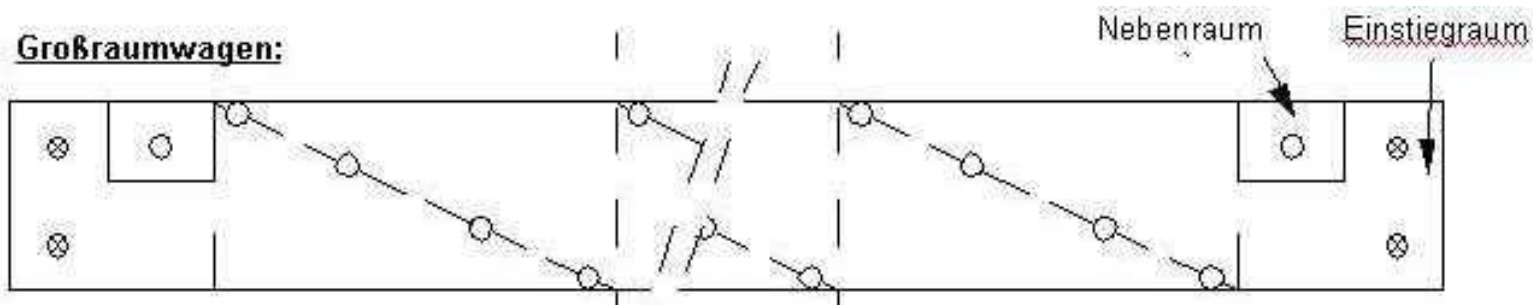
Simulation der Umgebungsbedingungen

- Lufttemperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Sonnenstrahlung
- Windgeschwindigkeit

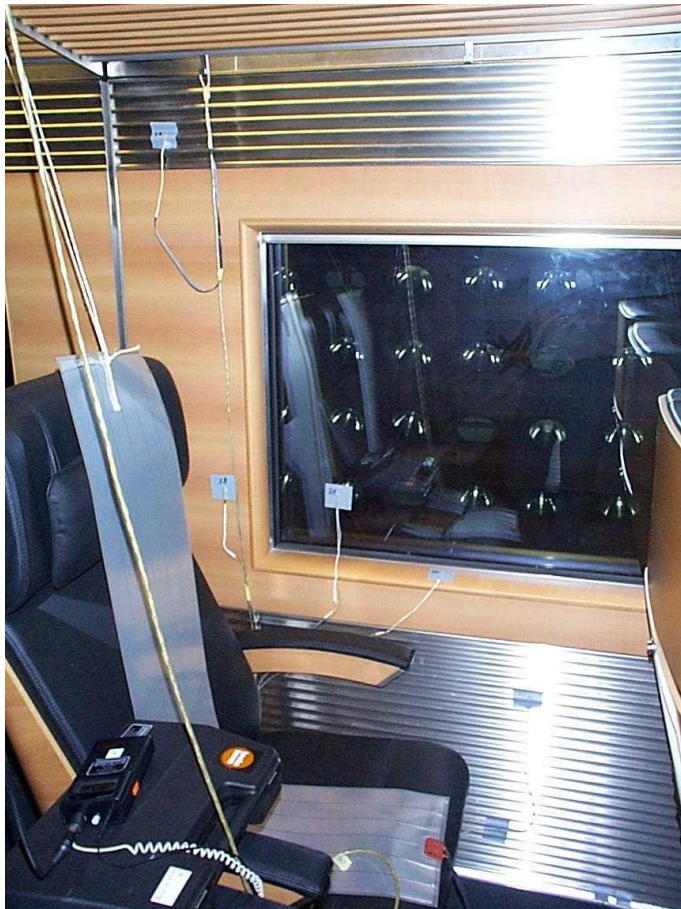


Messung der Raumlufttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten

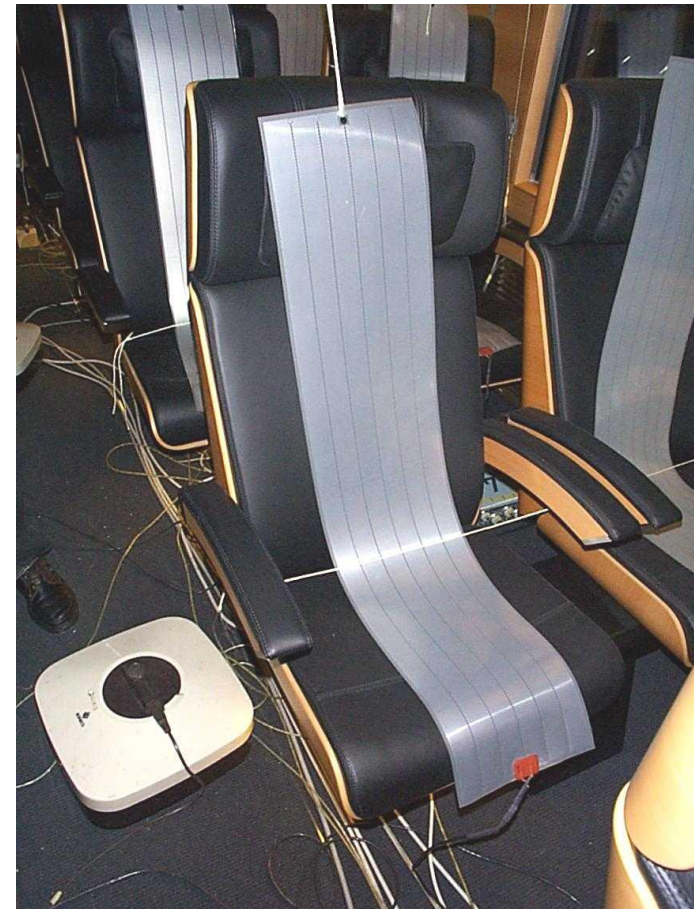
Großraumwagen:



Messung der Oberflächentemperaturen



Simulation der Personen (sensibel und latent)



Druckschutz bei Fahrzeugen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs

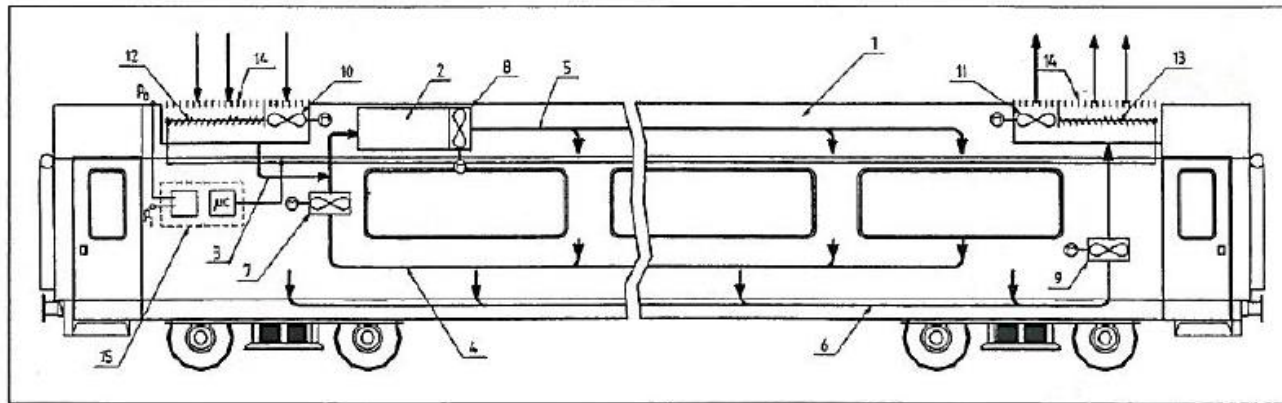
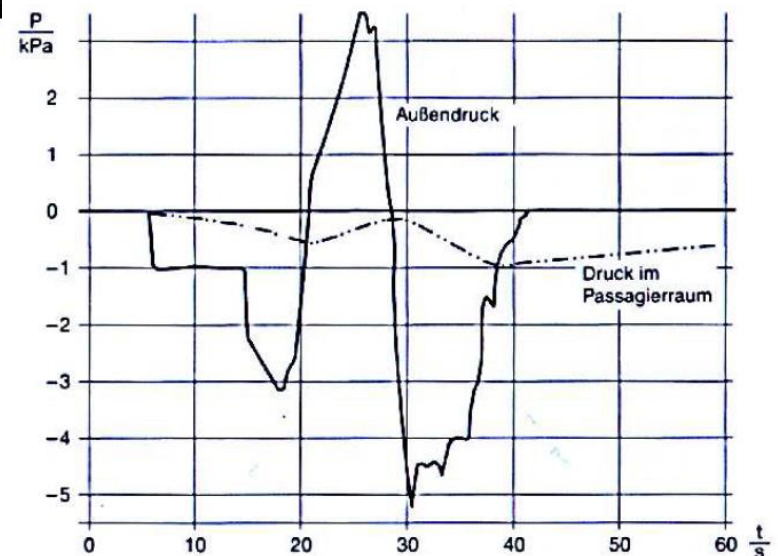


Abb. 1 Schema der Luftführung mit Dachkompaktklimagerät (2) und Frisch- und Fortluftseite (12, 13).

Druckänderungen an der Fahrzeugaußenhaut und im Inneren

max. Außendruckänderung zwischen +3900 Pa und -5500 Pa¹
 zulässige Kabinendruckänderung ± 1000 Pa mit einer
 maximalen Druckänderung von 200 Pa/s



¹ UIC 660: Bestimmungen zur Sicherung der technischen Verträglichkeit der Hochgeschwindigkeitszüge

Abbildung: Fahrzeug: Die Kälte 9/1995; Diagramm: Köhler, Uni Hannover, 2007

Druckschutz bei Fahrzeugen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs

Untersuchungen zu Druckstößen bei Zugbegegnungen in Tunneln bei der Deutschen Reichsbahn (VDI-Zeitschrift 1927)

202

Tollmien: Luftwiderstand und Druckverlauf

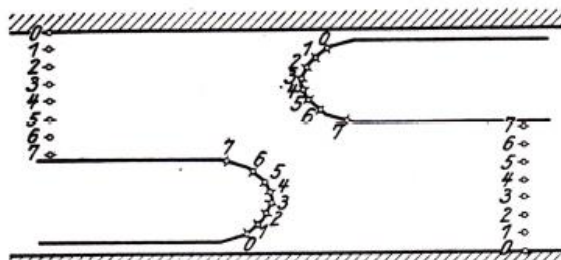
 Zeitschrift des Vereines
deutscher Ingenieure.


Abb. 10. Festlegung der Stromlinien bei der Begegnung zweier Züge im Tunnel

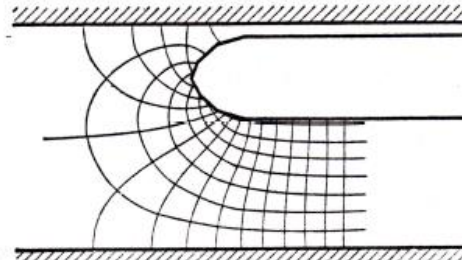


Abb. 11. Strömungsnetz bei Fahrt eines Zuges im Tunnel

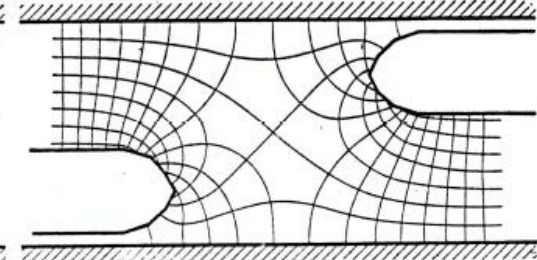


Abb. 12

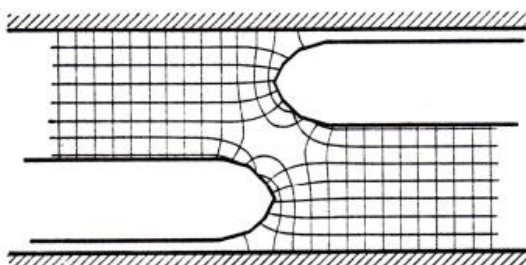


Abb. 13

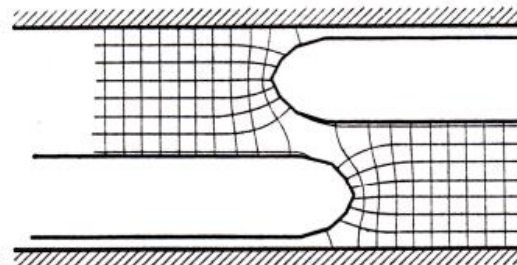


Abb. 14

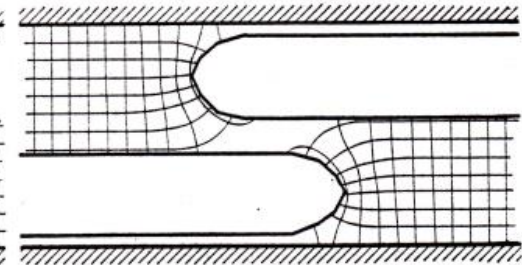
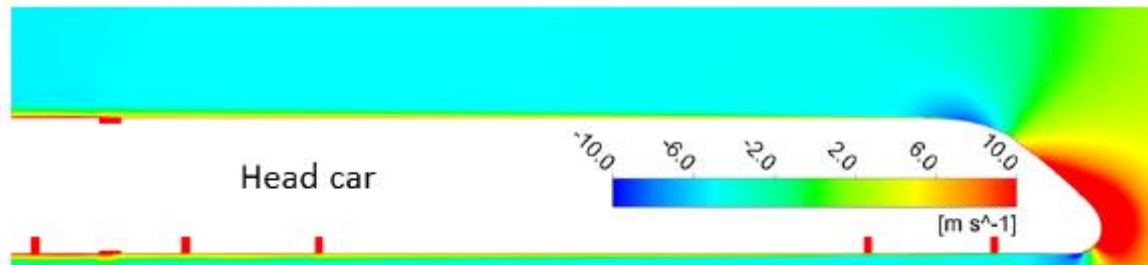
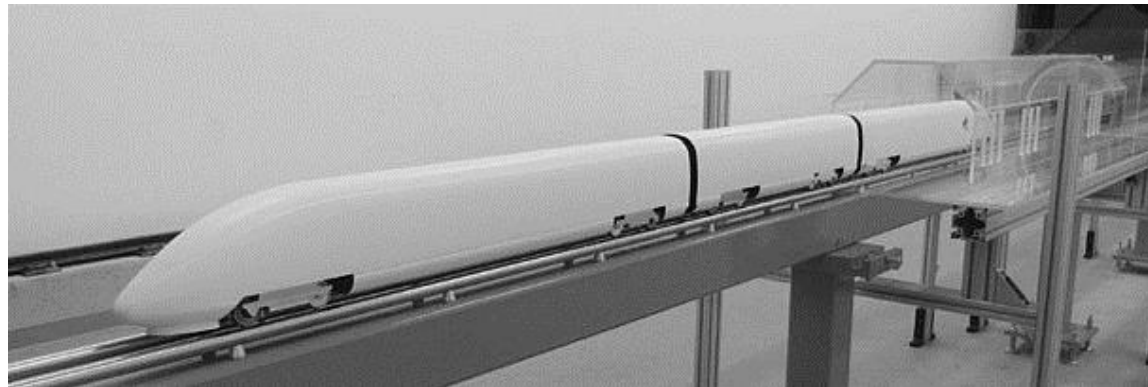


Abb. 15

Abb. 12 bis 15. Strömungsnetz bei der Begegnung zweier Züge im Tunnel

Druckschutz bei Fahrzeugen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs

Heute: Modellversuche und Berechnungen mittel CFD



3. Entwicklungspotentiale

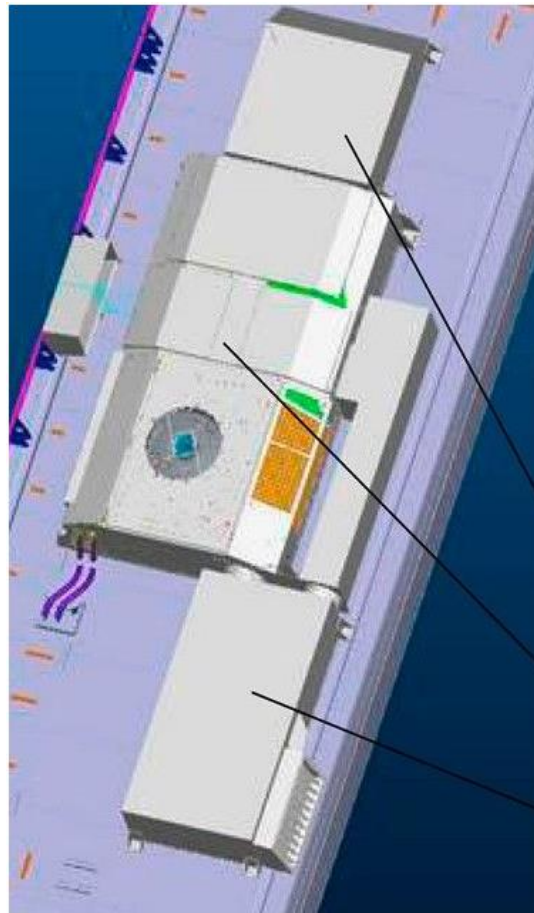
Reduzierung des Energiebedarfs

- Verbesserung des k-Wertes der Fahrzeuge
- Bedarfsoptimierte Außenluftzufuhr (CO₂-Sensor)
- Abluftwärmenutzung (Wärmerückgewinnung)
- Nutzung der Bremsabwärme
- Wärmepumpeneinsatz
- Freie Kühlung

Verbesserung der Kälteanlagen

- Verbesserung der Dichtheit der Anlagen
- Einsatz alternativer Kältemittel
- Neue Verdichtertechnologien

Wärmerückgewinnung



Schalldämpfer

Klimagerät

WRG Einheit

Wärmepumpe



Luftbehandlungsgerät 1

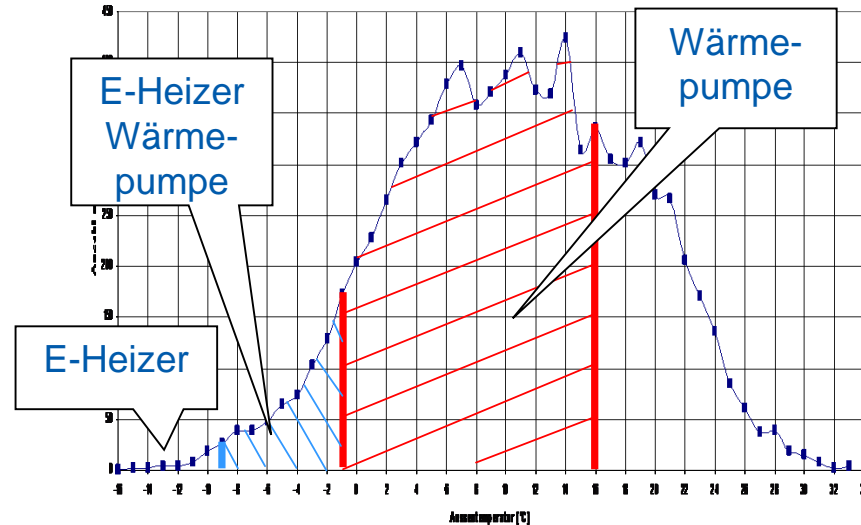
Kaltwassersatz Wärmepumpe

Unterflur-Heizgerät

Luftbehandlungsgerät 2

Häufigkeit in Antriebsstunden (Stuttgart)

Potentialabschätzung anhand der Jahreshäufigkeitsverteilung der Lufttemperatur (Stuttgart)



Aktuelle Frage: Welches Kältemittel wird zukünftig eingesetzt?

derzeit eingesetzte Kälteerzeugungsverfahren

Kaltdampfkältemaschine mit synthetischen Kältemitteln (alle Hersteller)

Standardprozess für alle Einsatzgebiete

Kältemittel : **R134a (GWP 1430)**, **R407C (GWP 1774)** u.a.

Fahrgasträume, Fahrerstände

Kaltluft-Kältemaschine (bisher nur wenige Hersteller)

Hochgeschwindigkeitsverkehr (ICE 3; 504 Anlagen)

Fahrgasträume

Überkritischer Prozeß (CO₂) (verschiedene Hersteller)

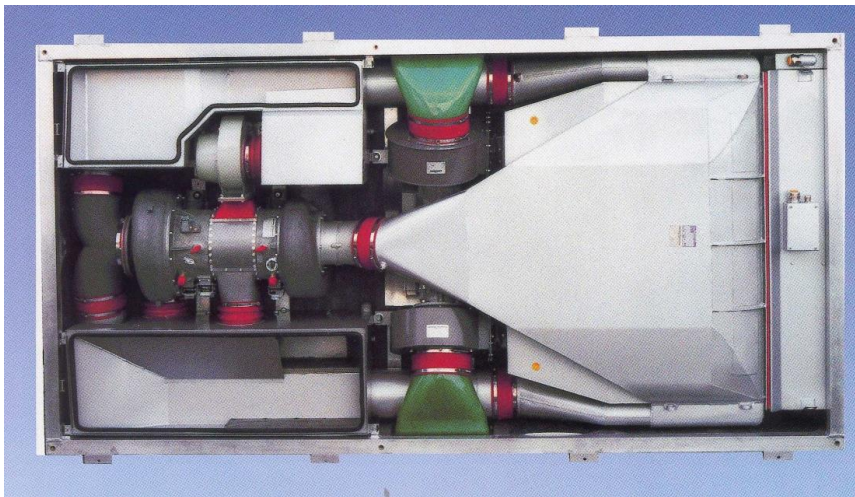
Entwicklungsstadium (Fahrerstand und Fahrgastraum)

Bisher **kein Serieneinsatz** bekannt

Kältemittel

Kaltluft-Kältemaschine (KLKM)

Seriengerät einer KLKM aus dem ICE



Redesign einer KLKM aus dem ICE



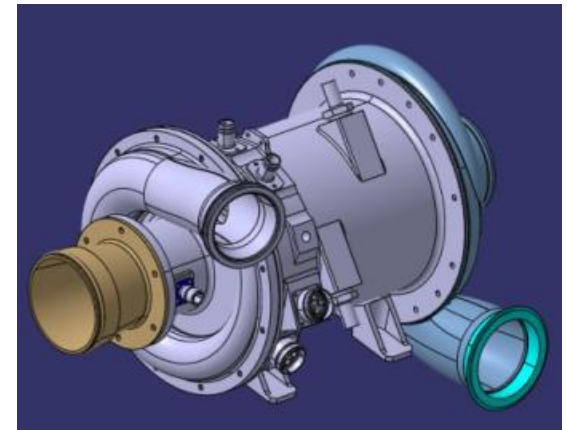
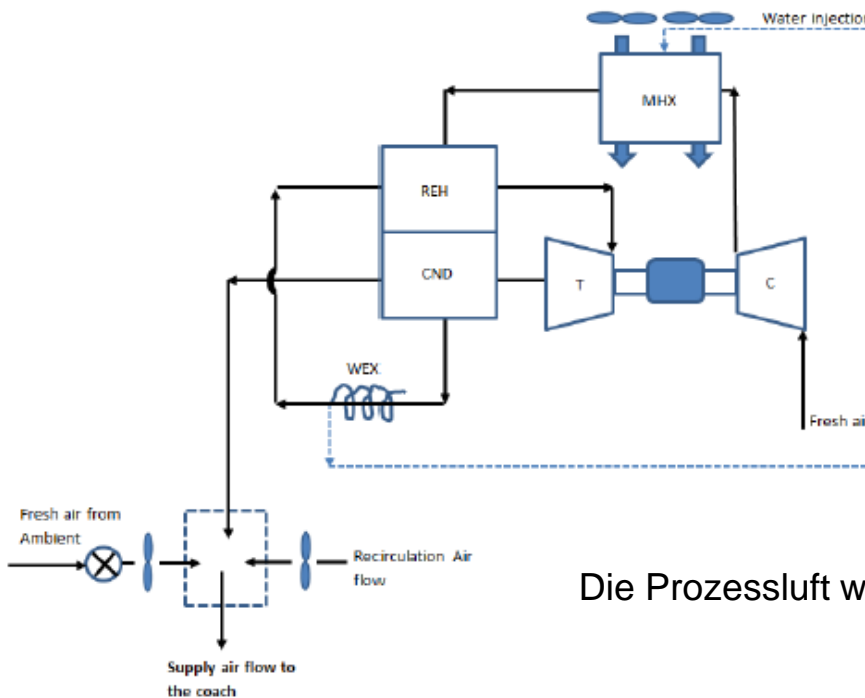
Liebherr

Kältemittel

Kaltluft-Kältemaschine (KLKM)

Entwicklungspotential

Nächste Generation – ACS „open direct loop“

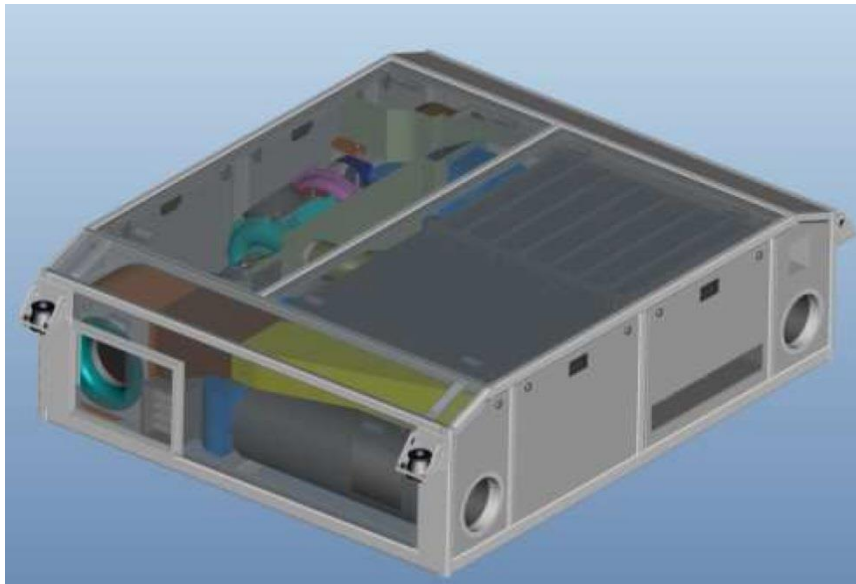


Die Prozessluft wird zur Zuluft (wie im Flugzeug)

Kältemittel

Kaltluft-Kältemaschine (KLKM)

Prototyp einer KLKM mit Wärmepumpenschaltung im Gerät



Innotrans 2012

Kältemittel

3. Entwicklungspotentiale

Klimaanlage mit CO₂ als Kältemittel

Prototyp einer Fahrgastraumklimaanlage mit Wärmepumpenfunktion



Innotrans 2006

Kältemittel

Klimaanlage mit CO₂ als Kältemittel

Prototyp: Klimagerät für Fahrgastraum



Innotrans 2016

Kältemittel

Alternativen zu flourierten Kältemitteln mit hohem GWP-Wert

Low-GWP-Kältemittel	R1234yf		(GWP = 4, vorrangig in PKW-Klimaanlagen, Gefahrenklasse A2L (low flammability); sicherheitstechnisch umstritten)
Natürliche Kältemittel	R 729	Luft	(GWP = 0)
	R744	CO₂	(GWP = 1)
	R 290	Propan	(GWP = 3, brennbar)
	R 718	Wasser	(GWP = 0)

Kältemittel

Klimaanlage mit brennbaren Kältemitteln ?

R1234yf Gefahr des Entflammens bannen?

Frankfurter Rundschau

Mercedes-Pkw

Daimler löst das Klimaanlagen-Problem

....wird Daimler in diesen Neuwagen eine Art automatischen Feuerlöscher einbauen – eine Schutzeinrichtung“ im Motorraum, die einen durch R1234yf entstandenen Brand durch Freisetzung des Edelgases Argon ersticken würde.



„Technisch möglich sei das unter anderem durch den Einsatz des Gases Argon, das im Falle eines Unfalls ausströmen soll und die erhitzten Bauteile im Motorraum herunterkühlt. Dadurch soll verhindert werden, dass R1234yf in Brand gerät, wobei hochgiftiger Fluorwasserstoff (Flusssäure) entstehen kann.“

Kältemittel

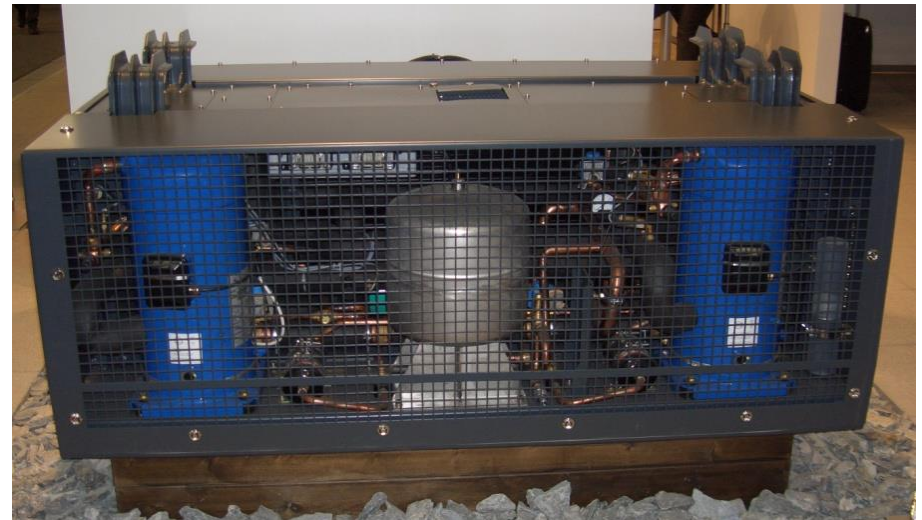
Klimaanlage mit brennbaren Kältemitteln ?

Neue Lösungen für brandschutztechnischen Absicherung der Kältebereitstellungsanlagen erforderlich.

Indirekte Systeme mit zentraler Kälteerzeugung und Kälte-trägerkreislauf



IC 3 der DSB ab 1989



Kältesatz Innotrans 2006

Kältemittel

Klimaanlage mit brennbaren Kältemitteln ?

Feuerlöschanlagen in Schienenfahrzeugen?

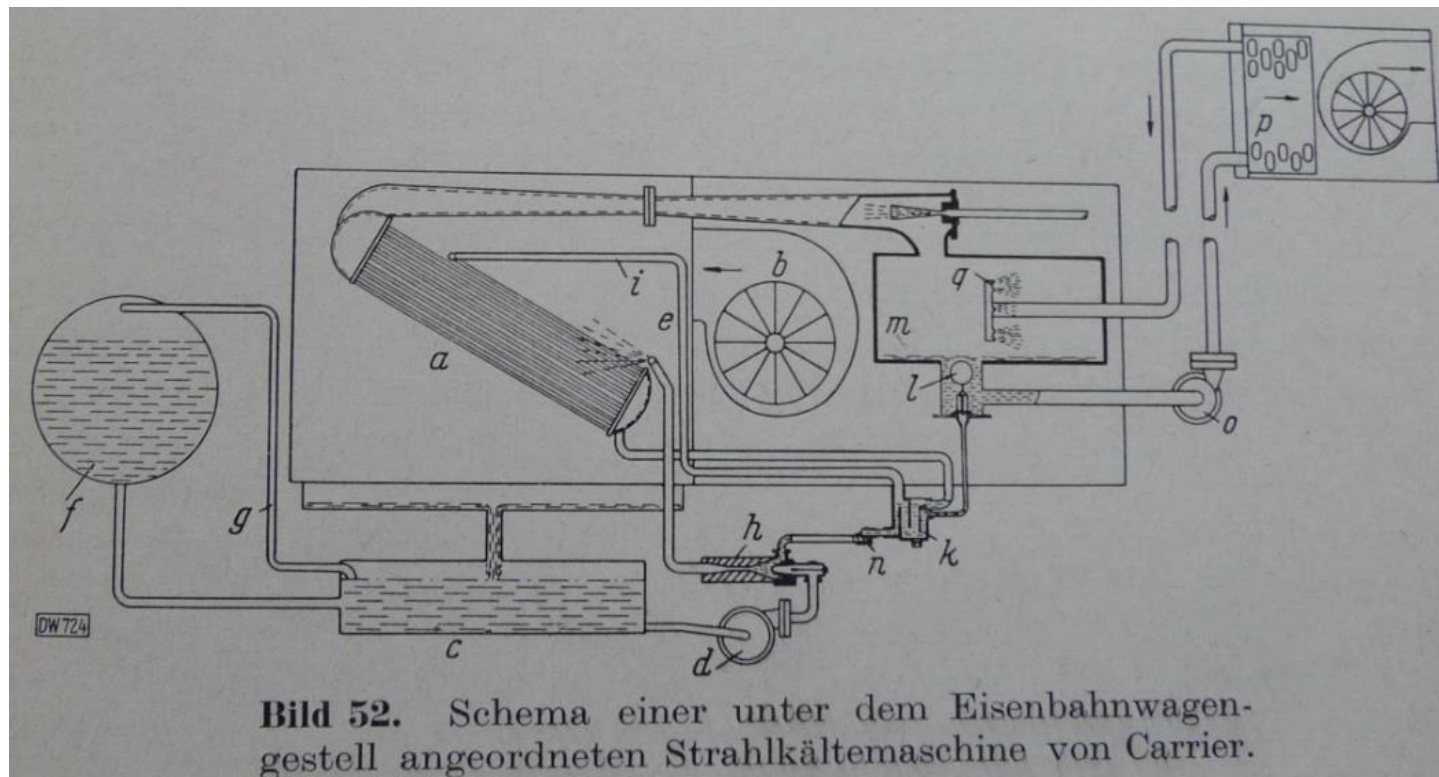


Sprinkleranlagen in den U-Bahnfahrzeugen der Hamburger Hochbahn (DT 4 und DT 5)

Kältemittel

Klimaanlage mit Wasser als Kältemittel ?

Für die Speisewagen der Santa Fe Eisenbahn hat die Carrier Corporation **1930** eine Klimaanlage mit Wasser als Kältemittel gebaut (Dampfstrahl-Ejektor).

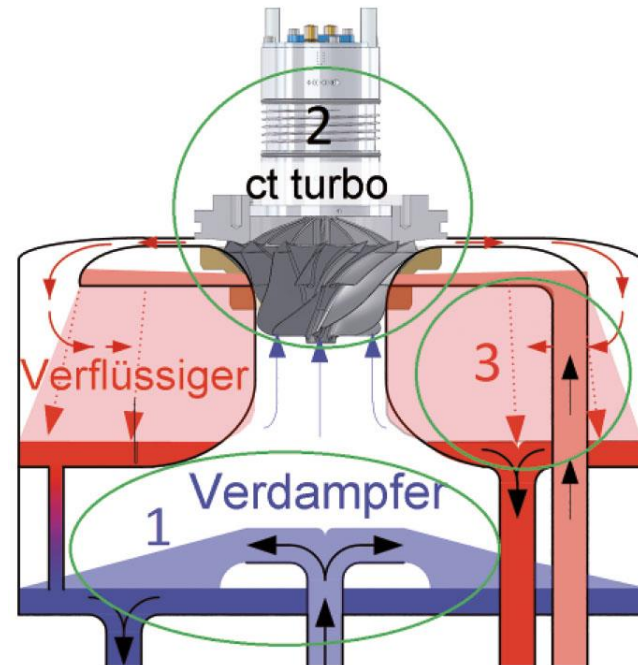


Kältemittel

3. Entwicklungspotentiale

Klimaanlage mit Wasser als Kältemittel ?

Schnelllaufende Turboverdichter machen einen Einsatz von Wasser als Kältemittel möglich



4. Zusammenfassung

- Schienenfahrzeuge für die Personenbeförderung sind heute standardmäßig klimatisiert



HGV



SPNV



ÖPNV

- Eine ordnungsgemäß dimensionierte Klimaanlage ist in der Lage, den gewünschten Raumluftzustand während der gesamten Einsatzzeit herzustellen und aufrecht zu erhalten
- Die Dimensionierung der Klimaanlage für Reisezugwagen erfolgt nach international gültigen Vorschriften unter Berücksichtigung von Kundenwünschen
- Zur Überprüfung der Anlagenleistungen werden umfangreiche Typprüfungen durchgeführt
- Unterschiedliche Fahrzeugtypen erfordern verschiedene Anlagenkonfigurationen
- Die Kälteerzeugungsverfahren wurden anhand von Beispielen vorgestellt
- Vorhandene Entwicklungspotentiale müssen im Serieneinsatz eingeführt und ausgeschöpft werden

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

ingwer.ebinger@haw-hamburg.de



**Baureihe kkStB 310
der kaiserlich-königlichen Staatsbahnen**



Foto: tobias.b.köhler, Decin hl.n., 19.05.2001