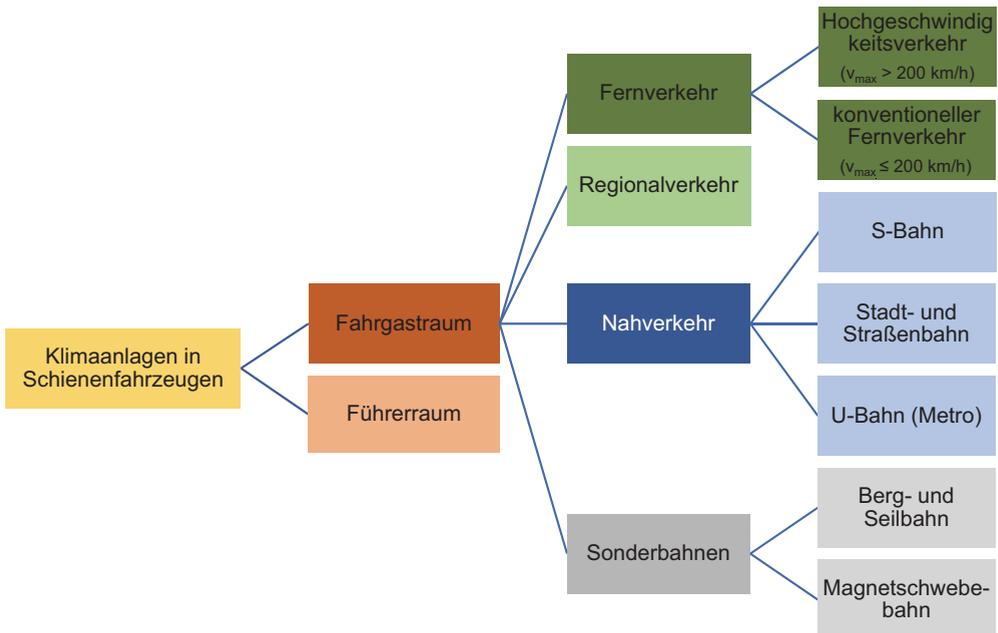


## 1.2 Klimaanlage für Schienenfahrzeuge

In modernen Schienenfahrzeugen gehören Klimaanlage zum Stand der Technik. Man findet sie im Führerraum, um für die Triebfahrzeugführer an ihrem Arbeitsplatz ein angemessenes Arbeitsklima zu schaffen, und in Fahrgasträumen der unterschiedlichen Fahrzeugkategorien, um den Passagieren ein komfortables, ein behagliches Reisen zu ermöglichen. Bei den verschiedenen Fahrzeugkategorien vom Fernverkehr bis zu Sonderbahnen und den diversen Fahrzeugtypen ergeben sich vielfältige Anforderungen für die Auslegung, den Bau und den Betrieb der Klimaanlage. Bild 1.1 vermittelt einen Eindruck über die Vielfalt der zu klimatisierenden Schienenfahrzeuge.

Allein bei der Deutschen Bahn AG waren 2019 rund 29.000 Klimaanlage im Einsatz, davon entfallen 11.000 auf Führerräume, 14.400 Anlagen dienen zur Klimatisierung von Fahrgasträumen des Regionalverkehrs und 3.600 sind in Fahrgasträumen von Fernverkehrsfahrzeugen installiert [1]. Bei der SBB waren Ende 2011 ca. 80 % der Fernverkehrsfahrzeuge und ca. 50 % der Regionalverkehrsfahrzeuge mit Klimaanlage ausgestattet [11]. Die Anzahl der Klimaanlage in Schienenfahrzeugen wird weiter ansteigen, denn es ist davon auszugehen, dass alle neu zu beschaffenden Fahrzeuge klimatisiert sein werden.

Der Energiebedarf zur Klimatisierung ist beachtenswert. Er hängt natürlich sehr stark vom Einsatzgebiet und von der Fahrzeugart ab, sodass hier nur grobe Richtwerte genannt werden können. Bei Fahrzeugen des Fernverkehrs kann der Bordenergiebedarf für Komforteinrichtungen nahezu 20 %–30 % des Gesamtenergiebedarfs betragen, wovon 80 % auf die Klimatisierung entfallen [2]. In Metrofahrzeugen kann dieser Anteil noch deutlich höher sein (bis zu 40 %). Für



**Bild 1.1** Einsatzfelder für Klimaanlage in Schienenfahrzeugen

einen Reisezugwagen kann daraus ein jährlicher Energiebedarf zwischen 75 MWh [3] und 100 MWh [4] entstehen. Im Kühlbetrieb sind dabei elektrische Leistungen von ca. 35 kW und im Heizbetrieb von ca. 55 kW bereitzustellen. Damit ist die Klimaanlage ein auslegungsbestimmendes Element für das Bordnetz. Darüber hinaus haben Klimaanlage noch einen beachtenswerten Raumbedarf und sie tragen infolge ihrer Masse zum Traktionsenergiebedarf bei.

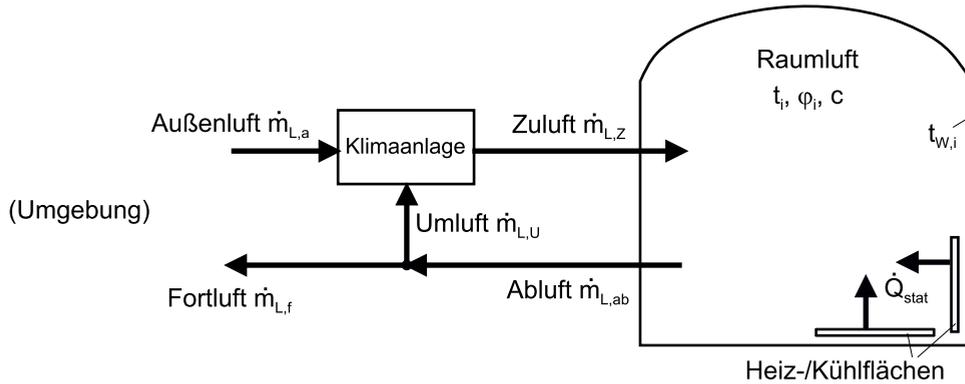
Auf die Energieeffizienz von Klimaanlage ist ein besonderes Augenmerk zu richten. Das resultiert einerseits aus den steigenden Energiekosten und andererseits aus den bei der Energiebereitstellung zu erwartenden CO<sub>2</sub>-Emissionen. Unter Berücksichtigung eines spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors von 0,537 kg (CO<sub>2</sub>)/kWh [5] für den Energieträger Strom (Inland) entspricht der Energiebedarf von 75 MWh einer jährlichen CO<sub>2</sub>-Emission von 40,3 t (CO<sub>2</sub>) pro Fahrzeug. Aus umweltschutztechnischer Sicht sind auch die benötigten Kältemittel zu bewerten. Die Kältemittelfüllmenge beträgt bei Führerraumklimaanlagen 2 kg bis 3 kg und bei den Klimaanlage für die Fahrgasträume durchschnittlich 15 kg pro Wagen. Der Kältemitteljahresbedarf der gesamten DB-Flotte liegt bei rund 20 t [1]. Dieser resultiert aus der Notwendigkeit, anlagenseitige Kältemittelverluste zu ersetzen. Das bisher am häufigsten in den Fahrzeugklimaanlagen eingesetzte Kältemittel ist R134a. Entweicht es aus der Anlage in die Umwelt, wird seine umweltschädigende Wirkung durch ein CO<sub>2</sub>-Äquivalent ausgedrückt. Nimmt man an, dass jährlich 5 % der Kältemittelfüllmenge ungewollt entweichen, würde das bei einer Klimaanlage in Reisezugwagen, die 15 kg des Kältemittels R134a enthält, einem jährlichen CO<sub>2</sub>-Äquivalent von ca. 1 t (CO<sub>2</sub>) entsprechen.

Schon anhand dieser wenigen Fakten wird deutlich, dass Klimaanlage wichtige Komponenten in modernen Schienenfahrzeugen sind, deren Komplexität eine detaillierte Betrachtung zu den aus den Einsatzbedingungen und Zielvorgaben resultierenden Kälte- und Heizleistungen, zum Energiebedarf und nicht zuletzt zum Umweltschutz erfordern. Die nachfolgenden Ausführungen sollen zum grundlegenden Verständnis bezüglich der Anforderungen an Klimaanlage für Schienenfahrzeuge und deren Auslegung beitragen.

### 1.3 Grundlegende Aufgaben und Konzeptionen

Die Aufgabe einer Klimaanlage wird oft auf die Einhaltung einer gewünschten Raumlufttemperatur  $t_i$  reduziert. Versteht man jedoch als eigentliches Ziel die Gewährleistung behaglicher Aufenthaltsbedingungen im Innenraum, so müssen auch die relative Raumluftfeuchte  $\phi_i$ , die Luftgeschwindigkeit  $c$  sowie die Wandinnentemperaturen  $t_{w,i}$  (und ggf. weitere Parameter) berücksichtigt werden (siehe Kapitel 2.2). Weiterhin muss die Qualität der Raumluft durch Zufuhr aufbereiteter Außenluft aufrechterhalten werden, wodurch die Klimaanlage oft zugleich eine Lüftungsfunktion aufweist (ebda.).

Entsprechend sieht das am häufigsten verwendete Anlagenkonzept die Zufuhr von aufbereiteter Zuluft in dem Fahrzeuginnenraum vor (Bild 1.2). Hierzu muss die eigentliche „Klimaanlage“ (auch als Luftaufbereitungsanlage bezeichnet) mindestens über Einrichtungen zum Fördern, zum Heizen bzw. Kühlen sowie zum Reinigen/Filtern der zu konditionierenden Luft verfügen (siehe Kapitel 2.2 und 7). Diese Lösung verbindet die Heiz- bzw. Kühlfunktion mit der Lüftungsfunktion auf vorteilhafte Weise. Ist aus energetischen Gründen der erforderliche Zuluftmassenstrom größer als die benötigte Außenluftmenge, kann zur Energieeinsparung ein Raum-



**Bild 1.2** Schematische Darstellung üblicher Klimatisierungskonzepte für Schienenfahrzeuge sowie der relevanten Luftarten

**Tabelle 1.1** Luftarten an Schienenfahrzeug-Klimaanlagen

| Luftart   | Index | Massestrom                           | Erklärung   |
|-----------|-------|--------------------------------------|---|
| Zuluft    | Z     | Zuluftmassenstrom $\dot{m}_{L,Z}$    | dem Raum zugeführte aufbereitete Luft   |
| Außenluft | a     | Außenluftmassenstrom $\dot{m}_{L,a}$ | von außen angesaugte und zugeführte (Frisch-) Luft                              |
| Abluft    | ab    | Abluftmassenstrom $\dot{m}_{L,ab}$   | aus dem Raum abgeführte/abströmende Luft  |
| Umluft    | U     | Umluftmassenstrom $\dot{m}_{L,U}$    | Abluft, die nach Aufbereitung in der Klimaanlage dem Raum wieder zugeführt wird |
| Fortluft  | f     | Fortluftmassenstrom $\dot{m}_{L,f}$  | nach außen in die Umgebung fortgeführte Luft                                    |

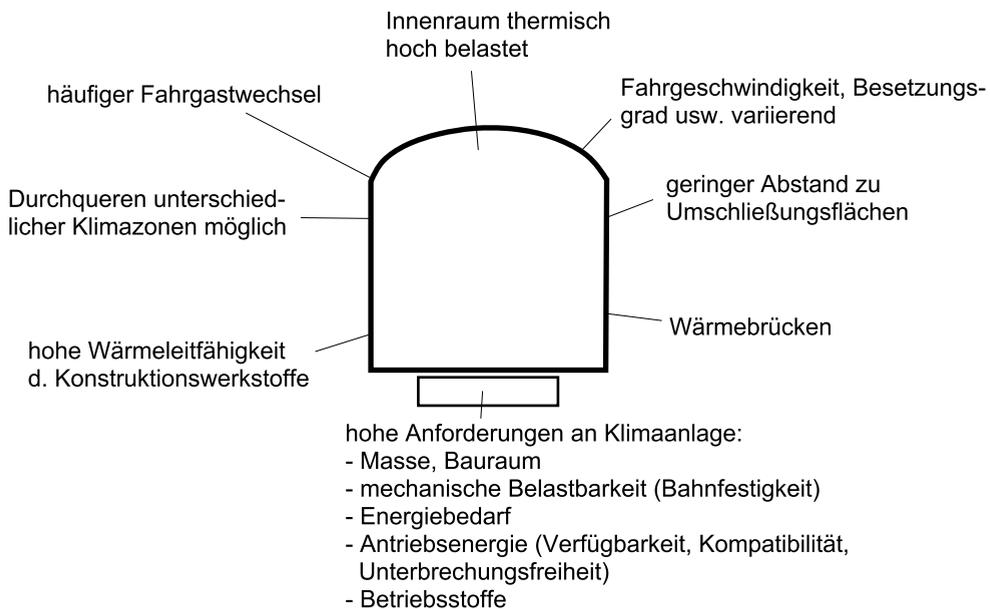
luftanteil, die sog. Umluft, beigemischt werden. Insgesamt unterscheidet man bei Schienenfahrzeug-Klimaanlagen die in Tabelle 1.1 aufgeführten Luftarten<sup>1)</sup> (siehe auch Bild 1.2):

Wie ebenfalls aus Bild 1.2 hervorgeht, kann die Innenraumkonditionierung des Weiteren durch statische Heiz- oder Kühlflächen erfolgen. So wurden Schienenfahrzeuge über einen langen Zeitraum fast ausschließlich mit Heizflächen konditioniert (Heizkörper, Konvektoren, Radiatoren), da die technischen Möglichkeiten zur maschinellen Lüftung nicht zur Verfügung standen (s. Kapitel 1.1). Bei modernen Klimatisierungskonzepten wird hingegen die Zufuhr aufbereiteter Zuluft gelegentlich mit der Anwendung statischer Heiz- bzw. Kühlflächen kombiniert (nähere Erläuterungen in Kapitel 7).

<sup>1)</sup> In der stationären Klimatechnik (Gebäudetechnik) unterscheidet man teilweise weitere Luftarten [81], worauf hier nicht eingegangen werden soll.

## 1.4 Besondere Anforderungen an Klimaanlage für Schienenfahrzeuge

Von der Grundfunktion her unterscheiden sich Schienenfahrzeug-Klimaanlagen kaum von stationären Klimaanlage<sup>2)</sup>. Im praktischen Betrieb entstehen durch den Bahneinsatz jedoch teilweise erheblich abweichende Anforderungen, wie in Bild 1.3 schematisch dargestellt. Im Vergleich zu Gebäuden weisen Schienenfahrzeuge im Regelfall pro Person ein erheblich geringeres Raumluftvolumen und ein wesentlich geringeres thermisches Speicherverhalten auf [14]. Dies bewirkt eine deutlich höhere thermische Belastung des Innenraums. Gleichzeitig wirken sich durch die typischerweise engen Raumverhältnisse die thermischen Eigenschaften der Umschließungsflächen (Wände, Decke, Fußboden) viel stärker auf das Behaglichkeitsempfinden der Fahrzeuginsassen aus.



**Bild 1.3** Spezielle Anforderungen an Klimaanlage für Schienenfahrzeuge – schematische Zusammenstellung

Weiterhin weisen die üblicherweise verwendeten metallischen Werkstoffe (Stahl, Aluminium) eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit auf, sodass einerseits hohe Anforderungen an die Wärmedämmung bestehen und sich andererseits die negativen Auswirkungen von Wärmebrücken viel stärker ausprägen können. Eine naheliegende fahrzeugtypische Besonderheit ist die permanente Einwirkung des Fahrtwinds und die hieraus folgende Beeinflussung des Wärmedurchgangs durch die Fahrzeugaußenwände. Entsprechendes gilt für die ungewollt eindringenden Außenluftmengen bei regelmäßigen Türöffnungsvorgängen oder auch die vor allem im Fernverkehr

<sup>2)</sup> Vereinbarungsgemäß soll im Bereich der Schienenfahrzeugtechnik die Bezeichnung „Klimaanlage“ verwendet werden, sobald die Funktion der Luftkühlung vorhanden ist. In der Gebäudetechnik wird in Abhängigkeit von den Luftbehandlungsfunktionen häufig die Unterscheidung in Teilklimaanlagen und Klimaanlagen vorge schlagen [81].

bestehende Möglichkeit, dass ein Fahrzeug mehrere Klimazonen mit unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen durchqueren kann.

Darüber hinaus sind auch aus anlagentechnischer Sicht spezielle Restriktionen zu erwarten: Zusätzliche Masse und Bauraumbedarf sind insbesondere bei Fahrzeugen sehr problematisch. Aus Sicht der mechanischen Festigkeit sind zudem die bahntypischen Rüttel- und Stoßbelastungen zu beachten („Bahnfestigkeit“). Auch die Energieversorgung an Bord eines Fahrzeugs unterliegt grundsätzlich engeren Grenzen. Neben der eigentlichen Verfügbarkeit von ausreichend Antriebsenergie sind praktische Fragen, wie beispielsweise die Kompatibilität verschiedener Versorgungssysteme oder die Sicherung einer unterbrechungsfreien Energieversorgung, zu beachten. Letztlich führten diese besonderen Anforderungen zur Etablierung von speziell für den Schienenfahrzeugeinsatz entwickelten Klimaanlage.

### 2.2.6 Anforderungen an die Raumluftqualität

Die Qualität der Raumluft im Sinne ihrer stofflichen Zusammensetzung wird hauptsächlich durch folgende Parameter bestimmt:

- Kohlendioxidgehalt  $r_i$  der Raumluft,
- Gehalt an sonstigen gasförmigen Schad- und Geruchsstoffen („Fehlgerüche“ [81], „Riech- und Ekelstoffe“ [90], [91] usw.),
- Staubgehalt,
- ggf. Krankheitserreger und sonstige Keime in der Raumluft.

Einen guten Überblick über diese Einflussfaktoren und insbesondere über die physiologische Wirkung des Kohlendioxids vermittelt u. a. [81]. Aus praktischen Gründen wird im Regelfall nur der CO<sub>2</sub>-Gehalt  $r_i$  (in parts per million ppm, Volumenanteile) als Maß für die Raumluftqualität verwendet [ebda.]. Hinweise zur weiterführenden Beurteilung der Raumluftqualität finden sich beispielsweise in der VDI-Richtlinie VDI 6022-3 [68] sowie in der Norm DIN EN 16798-1:2021-04 [69]. Eine vereinfachte, grundlegende Beurteilung der Raumluftqualität anhand des CO<sub>2</sub>-Gehalts ist beispielsweise mit folgenden Leitwerten nach [81] möglich:

- $r_i < 1000$  ppm:                   hygienisch unbedenklich;
- $r_i = (1000 \dots 2000)$  ppm:    hygienisch auffällig;
- $r_i > 2000$  ppm:                   hygienisch inakzeptabel.

Eine detailliertere Einstufung nach [68] ist in Tabelle 2.7 zusammengefasst. Unter Beachtung der dort angegebenen typischen Anwendungen erscheint eine „mittlere/normale“ Raumluftqualität (RAL2) mit

$$r_i \leq 1500 \text{ ppm}$$

als sinnvolle Zielstellung für Fahrzeuge.

**Tabelle 2.7** Einstufung der Raumluftqualitäten gemäß VDI-Richtlinie 6022-3 [68]

| Kennz. | Raumluftqualität | Anwendungsempfehlung für                    | CO <sub>2</sub> -Gehalt $r_i$ |
|--------|------------------|---|-------------------------------|
| RAL1   | hoch             | Personen mit erhöhtem Gesundheitsrisiko     | $\leq 1000$ ppm               |
| RAL2   | mittel/normal    | dauerhaften Aufenthalt von Personen         | $\leq 1500$ ppm               |
| RAL3   | mäßig/moderat    | dauerhaften Aufenthalt von Personen         | $\leq 2000$ ppm               |
| RAL4   | niedrig          | zeitlich begrenzten Aufenthalt von Personen | $> 2000$ ppm                  |

Für die technische Realisierung in der Fahrzeugtechnik schlagen sich diese Anforderungen letztlich im erforderlichen Außenluftvolumenstrom  $\dot{V}_a$  nieder, der für die Erhaltung der Raumluftqualität eingebracht werden muss. Ausgehend von einer vollständigen Durchmischung lässt sich aus der stationären CO<sub>2</sub>-Volumenstrombilanz leicht die Berechnungsgleichung

$$\dot{V}_a = \frac{\dot{V}_{\text{CO}_2, \text{P}}}{r_i - r_a} \tag{2.3}$$

bzw. in der personenbezogenen Form

$$\dot{V}_{a,M} = \frac{\dot{V}_{CO_2,M}}{r_i - r_a} \quad (2.4)$$

ableiten. Hierbei sind  $\dot{V}_{CO_2,P}$  der von den Passagieren abgegebene Volumenstrom  $CO_2$  und  $r_i$  bzw.  $r_a$  die  $CO_2$ -Konzentration in der Raum- bzw. in der Außenluft (in ppm). Entsprechend sind  $\dot{V}_{CO_2,M}$  und  $\dot{V}_{a,M}$  die personenbezogenen Werte in  $m^3/h/Person$ . Für die Außenluft wird zumeist ein Kohlendioxidgehalt  $r_a = 400$  ppm angenommen ([81], [90], [144]). Insbesondere für Fahrzeugklimaanlagen ist darüber hinaus zu prüfen, ob ein Einsatz in Gebieten mit schlechterer Außenluftqualität infrage kommt. In diesem Fall können  $CO_2$ -Konzentrationen bis zu  $r_a = 600$  ppm angesetzt werden ([81]; weitere Hinweise u. a. in [68] und [69]). Mit der in Kapitel 6.4 erläuterten personenbezogenen  $CO_2$ -Abgabe

$$\dot{V}_{CO_2,M} = 0,02 \frac{m_{CO_2}^3}{h \cdot Person}$$

und der  $CO_2$ -Konzentration in der Außenluft  $r_a = 400$  ppm erhält man dann mittels Gl. (2.4) einen personenbezogenen Mindest-Außenluftvolumenstrom

$$\dot{V}_{a,M,min} = 18,2 \frac{m^3}{h \cdot Person}$$

zum Aufrechterhalten einer Raumluftkonzentration von  $r_i = 1500$  ppm Kohlendioxid. Dies begründet den oft erwähnten Anhaltswert [90] von

$$\dot{V}_{a,M,min} = 20 \frac{m^3}{h \cdot Person}$$

zur Absicherung akzeptabler Raumluftqualität<sup>3)</sup>, der jedoch in der Gebäudetechnik zumeist als nicht ausreichend gilt ([69], [81]). Letztlich finden sich derartige personenbezogene Mindest-Außenluftvolumenströme auch in der einschlägigen Normung für die Klimatisierung von Schienenfahrzeugen wieder ([144], [148], [149], [163]). Diese Werte ermöglichen eine einfache Bemessung des erforderlichen Außenluftvolumenstroms  $\dot{V}_a$  über

$$\dot{V}_a = n_P \cdot \dot{V}_{a,M}$$

Hierbei ist  $n_P$  die Anzahl der Fahrgäste und  $\dot{V}_{a,M}$  der personenbezogene Außenluftvolumenstrom. Eine Zusammenstellung normativer Werte für  $\dot{V}_{a,M}$  findet sich in Tabelle 2.8.

Ergänzend sind in Bild 2.14 die erzielbaren  $CO_2$ -Raumluftkonzentrationen  $r_i$  in Abhängigkeit von  $\dot{V}_{a,M}$  und für unterschiedlichen  $CO_2$ -Gehalt der Außenluft  $r_a$  gemäß Gl. (2.4) grafisch dargestellt. Insbesondere bei den sehr niedrigen, jedoch normkonformen  $\dot{V}_{a,M}$ -Werten für ÖPNV-Fahrzeuge [149] ist mit deutlich eingeschränkter Luftqualität zu rechnen.

Zusätzlich zur erreichbaren Luftqualität im stationären Betrieb ist der zügige Abbau unerwünscht hoher  $CO_2$ -Konzentrationen  $r_i$  in der Raumluft zu beachten. Ursachen solcher temporär erhöhten  $r_i$ -Werte können vor allem Tunnelfahrten (Druckschutzbetrieb mit Umluft, hohe  $CO_2$ -Konzentration in der Außenluft) sowie auch ggf. Havarien bei Verwendung von

<sup>3)</sup> Die Norm DIN EN 16798-1 [69] nennt einen Mindestwert für den Außenluftvolumenstrom in Höhe von 4 l/s/Person (entspricht 14,4  $m^3/h/Person$ ). Dieser Wert bezieht sich nur auf den Abbau der menschlichen Emissionen und berücksichtigt keine sonstigen Schadstoffausdünstungen (vgl. Kapitel 6.4).

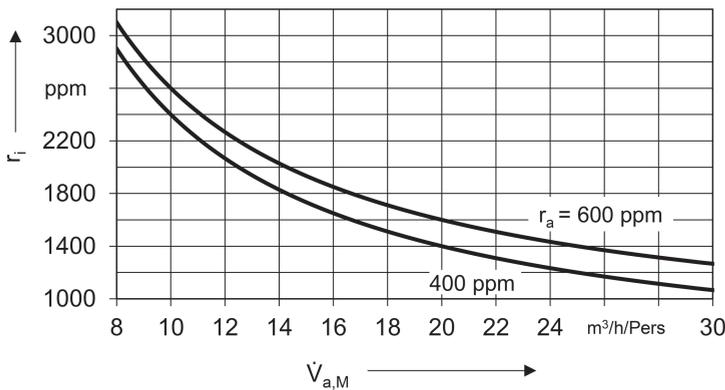
## 2 Randbedingungen und Anforderungen

**Tabelle 2.8** Personenbezogener Mindest-Außenluftvolumenstrom  $\dot{V}_{a,M}$  für verschiedene Fahrzeugarten gemäß einschlägiger Bahntechnik-Normung in  $\text{m}^3/\text{h}/\text{Person}$  ([144], [148], [149], [163])

| Fahrzeugart             | Normativ/Anwendungsbereich             |  | $\dot{V}_{a,M}$ in $\frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{Person}}$ |                           |
|-------------------------|--|--|--|---------------------------|
| Fernverkehr             | DIN EN 13129 [144]                     | – mit Klimaanlage                          | $t_a < -15\text{ °C}$  | 10 <sup>A)</sup>          |
|                         |  |  | $-15\text{ °C} \leq t_a \leq -5\text{ °C}$                           | 15                        |
|                         |  |  | $-5\text{ °C} < t_a \leq +26\text{ °C}$                              | 20                        |
|                         |  |  | $t_a > +26\text{ °C}$  | 15                        |
|                         | – nur Lüftung/Heizung                  | $t_a < -15\text{ °C}$                      | 10   |                           |
|                         |  | $-15\text{ °C} \leq t_a \leq -5\text{ °C}$ | 15   |                           |
|                         |  | $-5\text{ °C} < t_a$                       | 20   |                           |
|                         | $t_a \geq +15\text{ °C}$ <sup>B)</sup> | 30 (je Sitz-/Liegeplatz)                   |  |                           |
|                         | ASHRAE 23-2016 [163]                   |  | 20,4   |                           |
| Nahverkehr              | DIN EN 14750-1:2006 [149]              | – Kategorie A                              | regulär  | 15                        |
|                         |  |  | reduziert  | 10                        |
|                         |  | – Kategorie B                              | regulär  | 12                        |
|                         |  |  | reduziert  | 8                         |
|                         | ASHRAE 23-2016 [163]                   | – städtisch („Urban Service“)              |  | 12,8                      |
| – regional („Commuter“) |  |  | 17   |                           |
| Führerstände            | DIN EN 14813-1:2011 [148]              | – klimatisiert                             |  | 30                        |
|                         |  | – beheizt/belüftet                         | normal   | 30                        |
|                         |  |  | Belüftungsbetrieb  | 300 $\text{m}^3/\text{h}$ |

<sup>A)</sup> Die Angaben in DIN EN 13129 beziehen sich auf den Luftzustand  $t = 20\text{ °C}$  und  $\varphi = 50\%$  bei Normaldruck (Dichte  $\rho = 1,1989\text{ kg}/\text{m}^3$ ).

<sup>B)</sup> Diese Anforderung gilt bei Fahrzeugen mit Heizungs-/Lüftungsanlage auch dann, wenn die mittlere Raumlufttemperatur mehr als 1 K von dem Sollwert der Raumlufttemperatur abweicht.



**Bild 2.14**

Im stationären Betrieb erzielbare  $\text{CO}_2$ -Raumluftkonzentration  $r_i$  (in ppm) in Abhängigkeit vom personenbezogenen Außenluftvolumenstrom  $\dot{V}_{a,M}$  bei unterschiedlichen  $\text{CO}_2$ -Außenluftkonzentrationen  $r_a$  (ebenfalls in ppm)

CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen (siehe Kapitel 4.3.5) sein. Ausgehend von der instationären Volumenstrombilanz kann der zeitabhängige Verlauf der CO<sub>2</sub>-Raumluftkonzentration  $r_i(\tau)$  mit der Gleichung

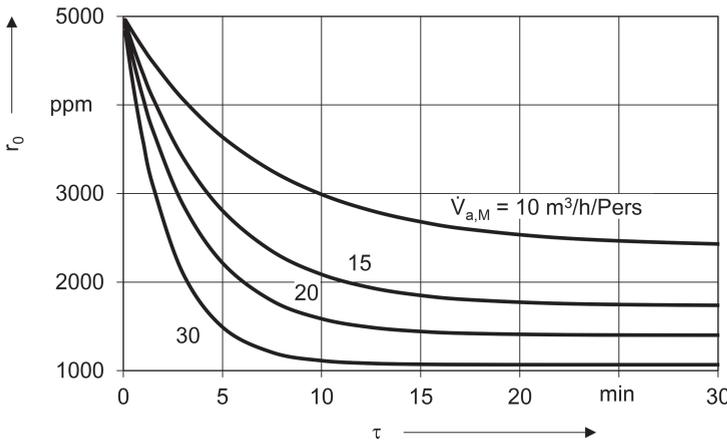
$$r_i(\tau) = r_{i,0} + \frac{\dot{V}_{\text{CO}_2, \text{M}} + (r_a - r_{i,0}) \cdot \dot{V}_{\text{a}, \text{M}}}{\dot{V}_{\text{a}, \text{M}}} \left(1 - e^{-\frac{\dot{V}_{\text{a}, \text{M}}}{V_{\text{R}, \text{M}}} \tau}\right) \quad (2.5)$$

berechnet werden (ebenfalls vollständige Durchmischung vorausgesetzt) ([70], [71]). Weiterhin lässt sich hieraus die Berechnungsgleichung für die erforderliche Zeitdauer  $\tau_{\text{Abb}}$  ableiten, die zum Abbau einer bestimmten CO<sub>2</sub>-Ausgangskonzentration  $r_{i,0}$  bis zum Erreichen der Zielkonzentration  $r_{i, \text{soll}}$  benötigt wird:

$$\tau_{\text{Abb}} = \frac{V_{\text{R}, \text{M}} \ln \frac{\dot{V}_{\text{a}, \text{M}}(r_{i,0} - r_a) - \dot{V}_{\text{CO}_2, \text{M}}}{\dot{V}_{\text{a}, \text{M}}(r_{i, \text{soll}} - r_a) - \dot{V}_{\text{CO}_2, \text{M}}}}{\dot{V}_{\text{a}, \text{M}}} \quad (2.6)$$

Neben den bereits erläuterten Größen muss in diesem Zusammenhang auch das verfügbare Raumluftvolumen  $V_{\text{R}}$  bzw. das personenbezogene verfügbare Raumluftvolumen  $V_{\text{R}, \text{M}}$  berücksichtigt werden.

Der aus Gleichung (2.5) folgende zeitliche Verlauf des CO<sub>2</sub>-Konzentrationsabbaus in einem Fernverkehrsfahrzeug ist in Bild 2.15 grafisch dargestellt. Angenommen wird eine Kohlendioxid-Anfangskonzentration  $r_{i,0} = 5000$  ppm. Dies entspricht der maximal zulässigen Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) [72]. Der Kurvenverlauf zeigt, dass eine höhere personenbezogene Außenluftzufuhr erwartungsgemäß einen schnelleren Abbau der CO<sub>2</sub>-Konzentration bewirkt. Als theoretischer Grenzwert wird bei  $\tau \rightarrow \infty$  der stationäre Konzentrationsgrenzwert gemäß Gleichung (2.4) bzw. Bild 2.14 erreicht.



**Bild 2.15**  
Zeitlicher Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft  $r_i(\tau)$  bei unterschiedlichen personenbezogenen Außenluftvolumenströmen  $\dot{V}_{\text{a}, \text{M}}$  in einem Fernverkehrsfahrzeug ( $V_{\text{R}} = 100 \text{ m}^3$ ;  $n_{\text{p}} = 89$  Personen,  $r_a = 400 \text{ ppm}$ ,  $r_{i,0} = 5000 \text{ ppm}$ )

## 2.3 Meteorologische Randbedingungen

Die wesentlichen Klimaparameter Außenlufttemperatur  $t_a$ , Außenluftfeuchte  $\phi_a$  und (richtungsabhängige) Sonnenstrahlungsintensität  $\dot{q}_s$  weisen einen stochastischen zeitlichen Verlauf auf und sind praktisch nur für sehr kurze Zeiträume prognostizierbar (Stunden bis wenige Tage). Dies lässt sich beispielhaft anhand von Bild 2.16 demonstrieren. Die jeweils am 30. Juli in