

Institut für Thermodynamik  
Technische Universität Braunschweig



# Ökologische Bewertung von $CO_2$ als Kältemittel in Omnibusklimaanlagen

Ergänzung zum Abschlussbericht über  
ein Entwicklungsprojekt mit dem Titel  
*„Entwicklung einer seriennahen  $CO_2$  Omnibusklimaanlage“*,  
gefördert unter dem Aktenzeichen 10833 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Torsten Wendler, Dipl.-Phys. Sven Försterling

Braunschweig, Juni 2001



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Ersatzkältemittel für mobile Klimaanlage . . . . .	1
1.2	Klimaanlagen im mobilen Einsatz . . . . .	2
1.3	Emissionen durch Klimaanlage . . . . .	3
1.4	Der TEWI-Ansatz . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Berechnungsgrundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Berechnung der Kälteleitung und des COP . . . . .	5
2.2	Die TEWI-Formel . . . . .	6
2.3	Weitere Parameter . . . . .	8
2.4	Ein vereinfachtes Fahrzeugklimamodell . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Klimadaten</b>	<b>11</b>
3.1	Klimadaten nach DIN 4710 . . . . .	11
3.2	Bestimmung der Betriebszeit . . . . .	11
3.3	Einschränkungen . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Bewertung</b>	<b>15</b>
4.1	Direkter TEWI-Beitrag . . . . .	15
4.2	Indirekter TEWI-Beitrag . . . . .	16
4.2.1	TEWI-Anteil für den Verdichterantrieb . . . . .	16
4.2.2	TEWI-Anteil für den Anlagentransport . . . . .	17
4.2.3	TEWI-Anteil für die Gebläse . . . . .	17
4.3	Abschließende TEWI-Berechnung . . . . .	18
4.4	Bewertung der Ergebnisse . . . . .	19
4.4.1	Bewertung des TEWI-Ansatzes . . . . .	19
4.4.2	Bewertung der Busklimaanlagen . . . . .	21
4.4.3	Bewertung von $CO_2$ als Kältemittel . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>23</b>
	Literaturverzeichnis . . . . .	25



# Abbildungsverzeichnis

1.1	HFKW-Emissionen in Deutschland . . . . .	2
2.1	COP der Busklimaanlagen . . . . .	8
3.1	Prozentuale Verteilung der Betriebsstunden der Busanlagen . . . . .	13
3.2	Absolute Verteilung der Betriebsstunden der Busanlagen . . . . .	13
4.1	Abhängigkeit des direkten TEWI-Beitrags von $L/m_{KM}$ und $\alpha$ . . . . .	16
4.2	Auswertung des TEWI der Busklimaanlagen . . . . .	19
4.3	Abhängigkeit des indirekten TEWI-Beitrags der $CO_2$ -Busklimaanlage von $\beta$ und $\eta_{tot}$ . . . . .	20
4.4	Vergleich der R134a-Busklimaanlage mit verschiedenen $CO_2$ -Anlagen . . . .	21



# Tabellenverzeichnis

2.1	COP der Anlagen . . . . .	6
2.2	Verzeichnis der TEWI-Formelzeichen . . . . .	7
2.3	Parameter in der TEWI-Formel . . . . .	8
3.1	Tabellarische Berechnung der Kälteleistung . . . . .	12
3.2	Betriebsstunden der Anlagen . . . . .	12
4.1	Direkter TEWI-Beitrag der Anlagen . . . . .	15
4.2	Ermittlung des $(\dot{Q}_0/\text{COP}) \cdot \tau$ -Faktors . . . . .	17
4.3	Gebälseanteil am TEWI . . . . .	18
4.4	TEWI der vier Anlagen . . . . .	18
4.5	COP der Busklimaanlagen mit variierten COP . . . . .	22



# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Ersatzkältemittel für mobile Klimaanlage

Es wird angenommen, dass die sogenannten Treibhausgase zur weltweiten Erwärmung der Erdatmosphäre und den daraus entstehenden Klimaveränderungen beitragen. Die Verringerung der weltweiten Treibhausgasemissionen ist somit eine der dringlichsten Aufgaben der Umweltschutzpolitik. Durch das Kyoto-Protokoll von 1997 soll eine Reduzierung der Emissionen von Kohlendioxid  $\text{CO}_2$ , Methan ( $\text{CH}_4$ ), Distickstoff ( $\text{N}_2\text{O}$ ), Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ), perfluorierter Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) und der wasserstoffhaltenden Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) erzielt werden.

Nach dem Verbot der ozonschichtabbauenden FCKW<sup>1</sup> wurden diese im Kältemittelbereich von den HFKW abgelöst. Dadurch stiegen die Emissionen von HFKW in der BRD von 200 t (1990) auf 2.884 t (1999) an [7], wie es in Abbildung 1.1 dargestellt ist. Da diese HFKW sehr hohe GWP<sup>2</sup> bis zu 3.800 (R143a) [6] besitzen, ist es zum Erreichen der Ziele des Kyoto-Protokolls notwendig ihren Ausstoß zu vermindern.

Das Kältemittel R134a (Tetrafluorethan), das vor einigen Jahren als Ersatz für das ozonschädliche R12 in Umlauf kam, ist ein HFKW. R134a ist heute das vorherrschende Kältemittel in der mobilen Anwendung. Aufgrund seines hohen GWP kann es nur eine mittelfristige Lösung darstellen, da nur Systeme, die mit natürlichen Kältemitteln arbeiten, eine langfristige und umweltverträgliche Alternative darstellen.

Es wird überlegt, ob das natürlich vorkommende Gas  $\text{CO}_2$  (R744) geeignet ist, R134a als Kältemittel in der mobilen Anwendung abzulösen.

Als Beitrag zu dieser Diskussion soll in dieser Studie eine TEWI<sup>3</sup> - Berechnung für mobile Klimaanlage durchgeführt werden. Dazu wird ein theoretischer Vergleich zwischen

---

<sup>1</sup>FluorChlorKohlenWasserstoffe

<sup>2</sup>Global Warming Potential (deutsch: THP Treibhauspotential) . Maß für die Treibhauswirksamkeit. Mit GWP ohne Index ist in dieser Studie immer das  $\text{GWP}_{100}$  gemeint, also das auf 100 Jahre bezogene GWP relativ zu  $\text{CO}_2$  mit  $\text{GWP}=1$ .

<sup>3</sup>Total Equivalent Warming Impact. Siehe auch Abschnitte 1.4 und 2.2

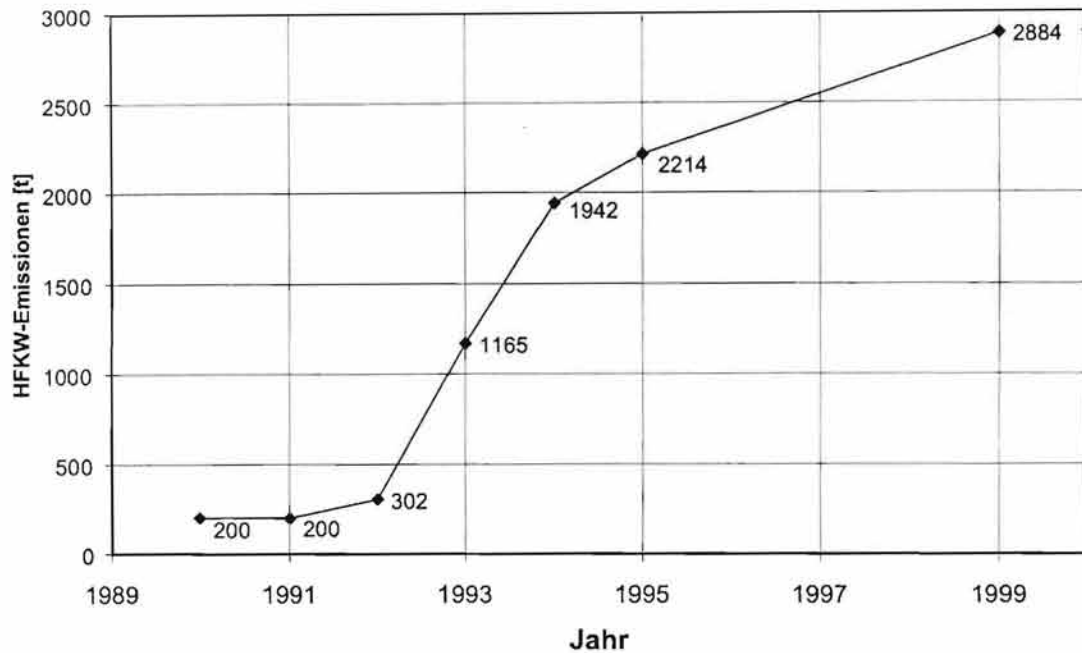


Abbildung 1.1: Entwicklung der HFKW-Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland seit 1990 [7]

einer R134a-Omnibusklimaanlage und einer CO<sub>2</sub>-Omnibusklimaanlage durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden zwei vergleichbare Busklimaanlagen der Firma Konvekta AG, die im Stadtbusverkehr der Stadt Bad-Hersfeld eingesetzt sind, ausgewählt. Mit Hilfe einer Simulationsplattform [2] konnten beiden Anlagen implementiert und die Leistungsdaten berechnet werden.

## 1.2 Klimaanlagen im mobilen Einsatz

In der Bundesrepublik Deutschland wurden im Jahr 1999 6.300 Omnibusse neu zugelassen [8]. Insgesamt waren 1999 in Deutschland ca. 42.000 bis 50.000 Busse in Betrieb (davon ca. 12.000 Reise- und Überlandbusse) [9] [10]. Der Anteil der mit Klimaanlage ausgerüsteten Stadtbusse ist zwar im Moment insgesamt gering, wird sich aber voraussichtlich in den nächsten Jahren aufgrund wachsenden Wettbewerbs im ÖPNV<sup>4</sup> und einem gesteigerten Komfortbedürfnis der Fahrgäste deutlich steigern. Die ungefähr 12000 Reise- und Überlandbussen sind mittlerweile fast alle serienmäßig mit einer Klimaanlage ausgestattet. Da diese Anlagen jährliche Laufleistungen von bis zu 1.000 Betriebsstunden erreichen<sup>5</sup>, ist ein umweltfreundlicher Betrieb von höchster Wichtigkeit.

<sup>4</sup>Öffentlicher Personen Nahverkehr

<sup>5</sup>Daten für die R134a-Frischdienst- und Bus-Anlagen; zum Vergleich: Privat-PKW ca. 100 Stunden [1]

## 1.3 Emissionen durch Klimaanlage

Fast alle in heutiger Zeit verwendeten Kältemittel sind Treibhausgase, d.h. sie tragen zum anthropogenen Treibhauseffekt, also zur Erwärmung der Erdatmosphäre bei. Ihr jeweiliger Beitrag zum Treibhauseffekt ist je nach Kältemittel sehr unterschiedlich.

Bei den in dieser Studie betrachteten Kältemitteln R134a und CO<sub>2</sub> sind die direkten Auswirkungen von R134a auf den Treibhauseffekt 1.200 mal größer als die von CO<sub>2</sub>, d.h. der GWP von R134a ist 1.200<sup>6</sup> [6]. Der Beitrag mobiler Klimaanlage zur Emission von Treibhausgasen lässt sich in zwei Einzelbeiträge aufteilen: Einen *direkten* Beitrag, d.h. Emissionen die durch Leckage von Kältemittel entstehen, und einen *indirekten* Beitrag aus dem Energiebedarf für Betrieb und Transport der Anlage.

### Direkte Emissionen

Der direkte Beitrag aus Leckage setzt sich nicht nur aus Verlusten zusammen, die während des Betriebes durch Diffusion oder Undichtigkeit entstehen, sondern beinhaltet auch das bei Wartung, Reparatur oder Unfall freiwerdende Kältemittel. Er enthält auch den Anteil des Kältemittels, der am Ende der Lebensdauer der Anlage nicht dem Recycling zugeführt wird (oder nicht zugeführt werden kann).

Da die an dieser Stelle entstehenden Treibhausgasemissionen aus entweichendem Kältemittel entstehen, ist an dieser Stelle unbedingt das GWP des Kältemittels zu beachten.

### Indirekte Emissionen

Der indirekte Anteil der Treibhausgasemissionen enthält zum einen den Energieaufwand für den Betrieb der Anlage und zum Anderen den Aufwand, um die Anlage mit dem Fahrzeug zu transportieren. Der erste Anteil wird maßgeblich von den Eigenschaften der Klima- bzw. Kälteanlage bestimmt, nämlich über den COP und die Kälteleistung sowie die Betriebsdauer.

Der Transportanteil ist auch vom Gewicht der Klimaanlage abhängig, jedoch in erster Linie vom Fahrzeug. Er soll in dieser Studie vernachlässigt werden. Dies fällt allerdings im Vergleich der ausgeführten Anlagen nicht ins Gewicht.

## 1.4 Der TEWI-Ansatz

Um die Treibhauswirksamkeit von Fahrzeugklimaanlagen einschätzen zu können, wurde vor einigen Jahren der TEWI-Ansatz entwickelt. Er berücksichtigt direkte und indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen der Anlagen. Grundlage ist die Umrechnung aller Emissionen in ein

<sup>6</sup>In der Literatur wird auch manchmal ein GWP von R134a von 1300 angegeben [5].

CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Der TEWI-Ansatz berücksichtigt somit alle während der Betriebszeit entstehenden Emissionen.

In jüngerer Zeit wurde auch der LCCP<sup>7</sup>-Ansatz vorgestellt, der zusätzlich auch noch auf die Energieaufwendungen und Emissionen für Herstellung, Wartung und Entsorgung der Anlage eingeht. Dieser soll hier nicht verwendet werden, da er zu viele Unwägbarkeiten und Abschätzungen einbringt, die das Ergebnis verfälschen würden, so dass die Vergleichbarkeit nicht mehr gegeben ist.

---

<sup>7</sup>Life-Cycle Climate Performance

# Kapitel 2

## Berechnungsgrundlagen

Für die Untersuchung wurde eine  $CO_2$ -Omnibusklimaanlage ohne Sammler und inneren Wärmeübertrager untersucht, für die eine optimale Kältemittelbefüllung ermittelt wurde. Eine genauere Beschreibung dieser Anlage und auch der verwendeten Verdichterwirkungsgrade ist in der Literatur [3] zu finden. Für die  $R134a$ -Anlage wurde eine handelsübliche Omnibusklimaanlage der Firma Konvekta AG verwendet, die mit einem Sammler ausgestattet ist. Die Leistungsdaten für den  $R134a$ -Verdichter wurden entsprechenden Datenblättern [13] und [14] entnommen.

### 2.1 Berechnung der Kälteleistung und des COP

Der COP<sup>1</sup> ist definiert als Quotient aus der effektiven Kälteleistung  $\dot{Q}_0$  und der Antriebsleistung des Verdichters  $P_W$ :

$$COP = \frac{\dot{Q}_0}{P_W}$$

In der effektiven Kälteleistung ist bereits eine Temperaturerhöhung der Innenraumluft durch die Gebläse berücksichtigt. Der COP wird nicht von der Simulationsplattform ausgegeben, lässt sich jedoch aus dem effektiv-isentropen Gütegrad  $\eta_{sV}$  und der Kenntnis der isentropen Verdichtungsendenthalpie  $(h_d)_{s=const}$  berechnen<sup>2</sup>. Der COP gibt Auskunft über die Effizienz des Gesamtprozesses und trägt entscheidend zur Berechnung des TEWI bei. Der COP und die Kälteleistung der simulierten Anlagen sind in Tabelle 2.1 und Abbildung 2.1 in Abhängigkeit von der Außentemperatur dargestellt.

Die konstante für einen optimalen COP angepasste Füllmenge der  $CO_2$ -Busanlage beträgt 4.0 kg.

---

<sup>1</sup>Coefficient Of Performance - Internationale Bezeichnung für die Kälteleistungszahl  $\epsilon$

<sup>2</sup>Zur Berechnung von  $(h_d)_{s=const}$  wurde das Programm Refcalc aus der Coolpack-Sammlung verwendet. [12]

Außentemperatur	R134a Bus	CO <sub>2</sub> Bus	R134a Bus	CO <sub>2</sub> Bus
	COP bei 20°C	COP bei 20°C	$\dot{Q}_0$ bei 20°C	$\dot{Q}_0$ bei 20°C
10°C	3,83	4,2	19,30	29,98
15°C	3,46	3,79	18,75	28,13
20°C	3,14	3,33	18,16	26,59
25°C	2,83	2,93	17,50	24,97
30°C	2,53	2,56	16,81	23,30
35°C	2,26	2,23	16,17	21,61

Tabelle 2.1: COP und  $\dot{Q}_0$  der beiden Anlagen bei verschiedenen Außentemperaturen und einer Innenraumtemperatur von 20°C

## 2.2 Die TEWI-Formel

Die TEWI-Formel wird im Allgemeinen in der folgenden Form angegeben [1]:

$$TEWI = GWP_{100} \cdot [L \cdot n + m_{KM} \cdot (1 - \alpha_{re})] + \frac{\dot{Q}_0}{COP} \cdot \frac{\tau}{\eta_{tot}} \cdot \beta \cdot n + \gamma \cdot \delta \cdot m_{KA} \cdot D \cdot n$$

Die Bedeutung der Formelzeichen ist in Tabelle 2.2 auf Seite 7 erklärt.

Zum besseren Verständnis kann man diese Formel in zwei wesentliche Einzelteile aufteilen:

**Der indirekte TEWI-Beitrag:** gibt die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Energieaufwand für den Betrieb und Transport der Anlage wieder:

$$TEWI_{indirekt} = \overbrace{\frac{\dot{Q}_0}{COP} \cdot \frac{\tau}{\eta_{tot}} \cdot \beta \cdot n}^{\text{Betrieb}} + \overbrace{\gamma \cdot \delta \cdot m_{KA} \cdot D \cdot n}^{\text{Transport}}$$

Der Transportanteil kann aufgrund des geringen relativen Eigengewichtes einer Busklimaanlage vernachlässigt werden.

Es fällt auf, dass die TEWI-Formel die Energie für eventuell vorhandene Nebenaggregate, insbesondere für die Gebläse vernachlässigt. In den COP geht nur die Antriebsleistung des Verdichters ein. Zur Berücksichtigung der Gebläseleistung wird deshalb dem indirekten TEWI-Beitrag noch ein additiver Term der Art  $TEWI_{\text{Gebläse}} = \left( \frac{\tau}{\eta_{tot}} \cdot \beta \cdot n \cdot P_{\text{Gebläse}} \right)$  hinzugefügt.

**Der direkte TEWI-Anteil:** setzt sich zusammen aus dem Term für das durch Leckage verlorene und nachgefüllte Kältemittel und dem am Ende der Lebensdauer nicht zurück-

TEWI	Total Equivalent Warming Impact	[kg CO <sub>2</sub> ]
GWP <sub>100</sub>	Global Warming Potential	$\left[ \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg Kältemittel}} \right]$
L	Leckagerate	$\left[ \frac{\text{kg Kältemittel}}{\text{Jahr}} \right]$
n	Betriebszeit der Klimaanlage	[Jahre]
m <sub>KM</sub>	Kältemittelfüllmenge	[kg]
α <sub>re</sub>	Recycling-Faktor	[-]
Q̇ <sub>0</sub>	Kälteleistung	[kW]
COP	Coefficient of Performance	[-]
τ	Jährliche Betriebsstunden	$\left[ \frac{\text{h}}{\text{a}} \right]$
η <sub>tot</sub>	Gesamtwirkungsgrad der Antriebseinheit	[-]
β	CO <sub>2</sub> -Emissionen pro erzeugter kWh	$\left[ \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kWh}} \right]$
γ	zusätzlicher Kraftstoffverbrauch pro 100 kg Last 10.000 km	$\left[ \frac{\text{dm}^3 \text{ Kraftstoff}}{100\text{kg} \cdot 10000\text{km}} \right]$
δ	CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Liter Kraftstoff	$\left[ \frac{\text{kg CO}_2}{\text{dm}^3 \text{ Kraftstoff}} \right]$
m <sub>KA</sub>	Masse der Klimaanlage	[kg]
D	Gefahrenre Distanz pro Jahr	$\left[ \frac{\text{km}}{\text{Jahr}} \right]$

Tabelle 2.2: Verzeichnis der in der TEWI-Formel verwendeten Zeichen mit Einheit

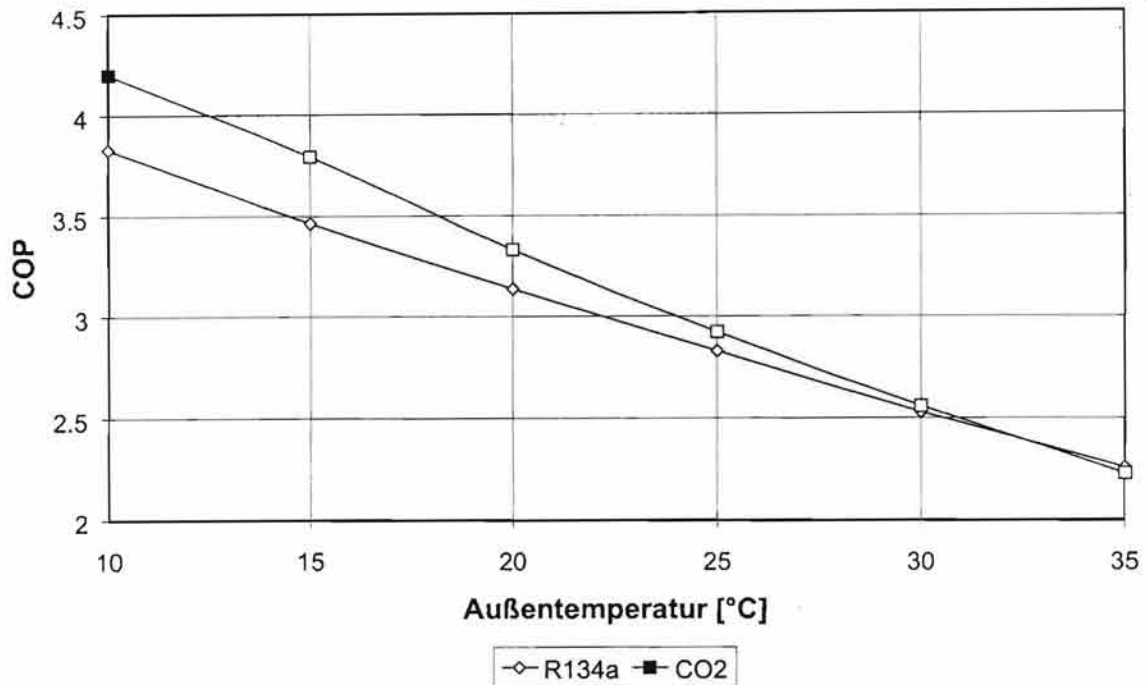


Abbildung 2.1: COP der Busklimaanlagen bei verschiedenen Außentemperaturen und konstanter Innenraumtemperatur 20°C. Hier arbeitet die CO<sub>2</sub>-Anlage über den gesamten relevanten Temperaturbereich besser als die R134a-Anlage.

gewonnene Kältemittel:

$$TEWI_{direkt} = GWP_{100} \cdot \left[ \overbrace{L \cdot n}^{Leckage} + \overbrace{m_{KM} \cdot (1 - \alpha_{re})}^{Entsorgung} \right]$$

## 2.3 Weitere Parameter

Wie man sieht, gehen in die TEWI-Formel mehrere Parameter ein, die nicht unmittelbar bestimmbar sind, wie z.B. der Gesamtwirkungsgrad der Antriebseinheit  $\eta_{tot}$ . Soweit sie nicht in dieser Arbeit anders genannt werden, wurden deshalb die von Pettersen und Hafner [1] vorgegebenen Werte verwendet (Tab. 2.3).

	R134a-Bus	CO <sub>2</sub> -Bus
GWP <sub>100</sub>	1.200	1
L	0,15 $\frac{\text{kg}}{\text{Jahr}}$	0,4 $\frac{\text{kg}}{\text{Jahr}}$
n	10 Jahre	10 Jahre
m <sub>KM</sub>	5,0 kg	4,0 kg
$\alpha_{re}$	0,75	0
$\eta_{tot}$	0,21	0,21
$\beta$	0,243 $\frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}}$	0,243 $\frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}}$

Tabelle 2.3: Werte der in dieser Studie nicht berechneten Parameter der TEWI-Formel

Das GWP von  $\text{CO}_2$  wird in der Literatur teilweise mit 0 angegeben, da  $\text{CO}_2$  als Abfallprodukt aus Industrieabgasen gewonnen wird. Es soll hier aber definitionsgemäß mit 1 verwendet werden.

**Leckagerate L:** Pettersen und Hafner geben die Leckagerate L mit  $0,1 \cdot m_{\text{KM}}$  an. Es ist jedoch zu vermuten, dass der Wert für R134a Klimaanlage deutlich höher liegen kann (einige Autoren nennen Werte bis zu 0,2). Gleichzeitig liegt der Wert für  $\text{CO}_2$ -Anlagen in der Regel niedriger (praktisch 0), da diese aufgrund der höheren Drücke viel aufwendiger gebaut sind und z.B. keine Schläuche verwendet werden, die Diffusion begünstigen.

**Recyclingfaktor:** Wird in [1] für R134a mit 0,75 angegeben. Ob dieser Wert tatsächlich erreicht wird, ist zweifelhaft, da dazu recht aufwendige Verfahren nötig sind. Gerade in kleineren, nicht spezialisierten Wartungs- und Reparaturbetrieben könnte ein deutlich größerer Teil des Kältemittels entweichen.

**$\text{CO}_2$ -Emissionen pro erzeugter kWh:** Dieser Wert wurde übernommen. Es ist zwar nicht realistisch, dass sich Busmotoren genauso verhalten wie ein PKW-Motor, es lagen jedoch keine alternativen Werte vor.

Ferner sind für die Berechnung des TEWI noch die Betriebsstunden, der COP und die Kälteleistung von Bedeutung. Für die Bestimmung der Betriebsstunden ist eine Betrachtung des Klimas notwendig.

## 2.4 Ein vereinfachtes Fahrzeugklimamodell

Der Kälteleistungsbedarf der Klimaanlage ergibt sich aus drei Summanden:

- der im Inneren des Fahrzeuges freiwerdenden Quellwärme  $\dot{Q}_Q$ , die aus der Körperwärme der Passagiere entsteht.
- dem durch konvektiven Wärmeübergang in oder aus dem Fahrzeug übertragenen Wärmestrom  $\dot{Q}_K$ .
- dem durch Strahlung aufgenommenen Wärmestrom  $\dot{Q}_S$ .

### Durch Menschen produzierte Quellwärme

Ein Mensch gibt bei einer Umgebungstemperatur von  $20^\circ\text{C}$  in ruhiger, sitzender Tätigkeit eine Wärmeleistung von ca. 100 W ab[11]. Bei den Berechnungen in dieser Arbeit sollen ungefähr halb besetzte Busse mit 25 Passagieren angenommen werden. Daraus ergibt sich ein Quellwärmestrom  $\dot{Q}_Q$  von ca. 2.500 W. Diese Zahl ist natürlich abhängig von Einsatzort,

Zeit, Linie, usw. des Busses, es liegt jedoch außerhalb der Möglichkeiten dieser Studie alle diese Faktoren zu betrachten, sie sind auch für einen Vergleich der Klimaanlage von nachrangiger Bedeutung.

### Konvektive Wärme

Das Fahrzeug nimmt an allen Außenflächen Wärme auf, sofern die Außentemperatur größer als die Innentemperatur ist. Andernfalls wird Wärme abgegeben. Um diesen Wärmestrom abschätzen zu können, ist die Kenntnis des  $k_A$ -Wertes nötig. Messungen an Schienenbussen haben eine Wärmedurchgangszahl  $k$  von ca.  $3-4 \frac{W}{m^2K}$  ergeben. In dieser Arbeit wird für den Bus der schlechtere Wert  $4 \frac{W}{m^2K}$  angenommen<sup>3</sup>. Als Fläche werden nur das Dach, der Unterboden und die Seitenwände betrachtet ( $120 m^2$ )<sup>4</sup>, Front und Rückseite (jeweils  $7,2 m^2$ ) werden vernachlässigt. Der  $k_A$ -Wert für den Bus beträgt somit ca.  $480 \frac{W}{K}$ .

In dieser Studie wurden Wetterdaten nach DIN 4710 [4] verwendet.

### Strahlungswärme

Da es sich bei der Einstrahlung auf den Bus um eine gerichtete Größe handelt, ist die Betrachtung der eingestrahnten Wärme in der Realität sehr kompliziert. In dieser Arbeit soll eine vereinfachte Vorstellung benutzt werden, die folgendermaßen hergeleitet wurde: Als Maß für die Strahlungsenergie wurde die Globalstrahlung nach DIN 4710 verwendet. Diese Daten sind repräsentativ für alle Monate und Wetterlagen, so dass man sonstige Wetterparameter wie Bedeckungsgrad oder Außentemperatur vernachlässigen kann. Es wurde angenommen, dass in dem Maße Strahlung aufgenommen wird, wie bei einer Fläche von  $30 m^2$  bei 100-prozentiger Absorption. Dies ist natürlich nur eine grobe Abschätzung. Im Rahmen dieser Studie wäre aber die Rechnung mit einem genaueren klimatischen Modell der Fahrzeuge zu aufwendig gewesen.

---

<sup>3</sup>In der Realität sind diese Werte natürlich stark abhängig vom Fahrzustand, also Geschwindigkeit, Wind, etc.

<sup>4</sup>Die Abmessungen entsprechen einem MAN Niederflur-Linienbus der Baureihe NL223/263/313 [15]

# Kapitel 3

## Klimadaten

Für die Berechnung des TEWI wurden in dieser Studie Klimadaten für Deutschland nach DIN 4710 bezogen auf die Stadt Braunschweig<sup>1</sup> verwendet.

### 3.1 Klimadaten nach DIN 4710

Die in DIN 4710 gesammelten Klimadaten gelten für die Auslegung aller Klima- und Heizungssysteme. Es werden allerdings keine expliziten Rechenvorschriften gemacht. Im Folgenden soll der durchgeführte Rechengang beschrieben werden.

DIN 4710 stellt folgende Daten zur Verfügung: Die durchschnittliche Anzahl der heiteren, bewölkten und trüben<sup>2</sup> Tage pro Monat. Für jede Art Tag sind die Temperaturen im Tagesgang gegeben. Weiterhin ist für jeden Monat die Globalstrahlung im Tagesgang gegeben.

Aus diesen Daten lässt sich zusammen mit dem kA-Wert des Fahrzeugs, der Quellwärme und der festgelegten Absorptionsfläche für jede Stunde des Jahres eine benötigte Kälteleistung berechnen. In Tabelle 3.1 ist der Rechengang tabellarisch aufgetragen.

Die Stunden werden nach Außentemperatur in Temperaturbereiche von jeweils 5 K eingeteilt<sup>3</sup>, damit der Faktor  $\frac{Q_0}{COP} \cdot \tau$  aus der TEWI-Formel genauer ausgewertet werden kann.

### 3.2 Bestimmung der Betriebszeit

Mit der Kälteleistung der Anlagen lässt sich die erforderliche Kälteleistung direkt in Betriebszeiten umrechnen.

---

<sup>1</sup>(52° 16' 09" Nord, 10° 31' 16" Ost)

<sup>2</sup>heiter: Bedeckungsgrad < 20%; bewölkt: 20% < Bedeckungsgrad < 80%; trübe: Bedeckungsgrad > 80%

<sup>3</sup>Der Temperaturklasse 5°C gehören z.B. alle Stunden an, deren Temperatur zwischen 2,5 °C und 7,5 °C liegt.

Monat		April	Mai	Juni
Art des Tages		bewölkt	heiter	trübe
(1) Mittlere Anzahl der Tage		17,3	2	9,9
Uhrzeit		09:00	14:00	20:00
(2) Temperatur [°C]		7,9	25,8	14,7
Temperaturklasse [°C]		10	25	15
(3) Globalstrahlung [ $\frac{W}{m^2}$ ]		338,8	384,4	1,4
(4) Quellwärme [W]	= (9) · (10)	2.500	2.500	2.500
(5) konv. Wärme [W]	= [(2) - (11)] · (12)	-5.808	2.784	-2.544
(6) Strahlung [W]	= (3) · (13)	10.164	11.532	42
(7) Gesamt (ein Tag) [W]	= (4) + (5) + (6)	6.856	16.816	-2
(8) Gesamt (alle Tage) [W]	= (1) · (7)	118.608,8	33.632	-19,8

(9) Passagiere: 25                      (11) Innentemperatur: 20°C    (13) 100%-Fläche: 30 m<sup>2</sup>  
 (10) Wärme pro Person: 100 W    (12) kA-Wert: 480 [ $\frac{W}{m^2}$ ]

Tabelle 3.1: Tabellarische Berechnung der Kälteleistung für die Busklimaanlagen an drei unterschiedlichen Datensätzen, die insgesamt 29,2 Stunden repräsentieren.

Für die Auswertung werden bei den Busklimaanlagen die Stunden zwischen 6:00 Uhr Morgens und 22:00 Uhr Abends betrachtet. Dies entspricht in etwa der täglichen Betriebszeit eines Stadtbusses <sup>4</sup>.

Nach dieser Berechnung wurde die Zahl der Betriebsstunden mit 0,8 multipliziert, um wiederzugeben, dass die Fahrzeuge nicht 365 Tage im Jahr im Einsatz sind. Deshalb wurden alle Sonntage (14%) und weitere 22 Tage (6%) für Wartung, Reparatur, und sonstigen Stillstand abgezogen.

In Abbildung 3.1 ist die prozentuale Verteilung der Betriebsstunden auf die Klassen zu sehen. In Abbildung 3.2 ist die Verteilung mit der absoluten Zahl der Betriebsstunden für die Busanlagen dargestellt. Eine tabellarische Aufschlüsselung ist in Tabelle 3.2 zu finden.

Außen- temperatur	CO <sub>2</sub> -Bus 20°C	R134a-Bus 20°C
10°C	71,4	111,0
15°C	266,1	399,2
20°C	277,4	406,1
25°C	81,7	116,6
Summe:	696,6	1.032,9

Tabelle 3.2: Betriebsstunden der Anlagen, aufgeschlüsselt nach Außentemperatur

<sup>4</sup>Nach Auskunft der Stoag - Stadtwerke Oberhausen AG

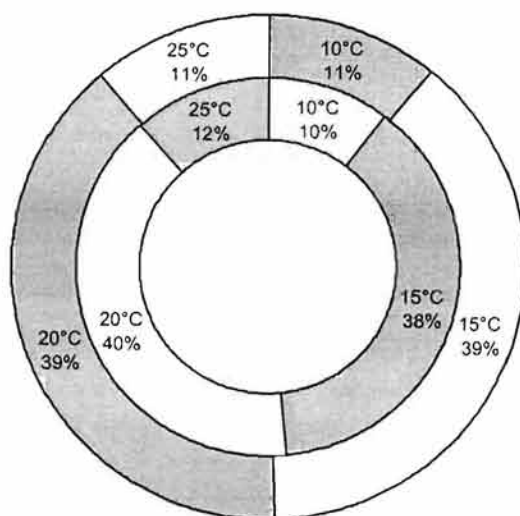


Abbildung 3.1: Prozentuale Verteilung der Betriebsstunden auf die Temperaturklassen. Innen die Verteilung für die CO<sub>2</sub>-Busklimaanlage, außen die R134a-Anlage. Wie man sieht, ist die Verteilung bei beiden Anlagen nahezu gleich, in Abbildung 3.2 sieht man allerdings, dass die R134a-Anlage viel mehr Betriebsstunden leisten muss.

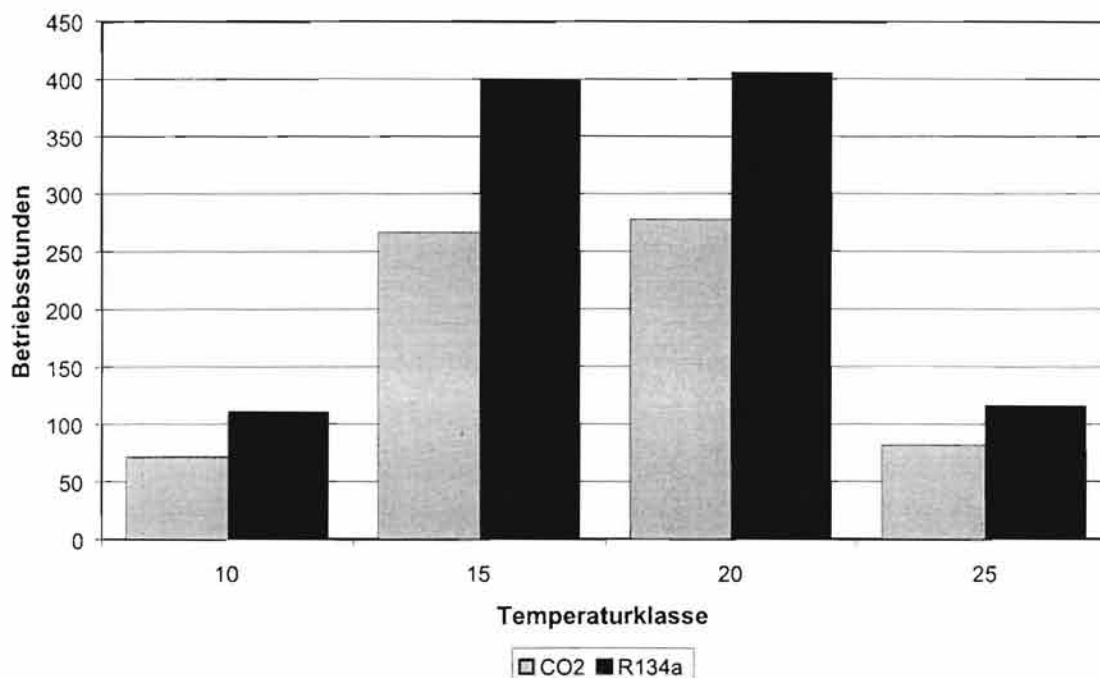


Abbildung 3.2: Absolute Verteilung der Betriebsstunden auf die Temperaturklassen für die Busklimaanlagen. Die R134a-Busklimaanlage muss aufgrund ihrer niedrigeren Gesamtleistung mehr Gesamtstunden leisten, die prozentuale Verteilung ist allerdings nahezu gleich.

### 3.3 Einschränkungen

Leider mussten die folgenden Vereinfachungen gemacht werden, um vernünftige Ergebnisse zu erzielen:

- Die hier vorgeführte Berechnung der Betriebszeiten der Anlage geht von der Voraussetzung aus, dass die Anlagen im stationären Betrieb bei 1.500 Umdrehungen / min laufen. Dies ist in der Realität nicht der Fall.  
Zum einen müssten instationäre Zustände beim Einschalten der Anlagen betrachtet werden, zum anderen fahren insbesondere Stadtbusse mit stark variierenden Drehzahlen. Die ermittelten Daten können also nur als erste Abschätzung dienen und sollten nach Möglichkeit mit Messwerten verglichen werden.
- Die Innenraumtemperatur wurde als konstant betrachtet. Cool-Down-Phasen, in denen eine evtl. viel höhere Kälteleistung benötigt wird, wurden so nicht berücksichtigt.
- Ferner wurde in dieser Arbeit vorausgesetzt, dass die Klimatisierung mit Umluft aus dem Fahrzeuginneren geschieht.
- Die Simulationsplattform rechnet im Moment nur mit trockener Luft. Die verwendeten Stoffwerte der Luft stimmen also nicht mit denen von realer Umgebungsluft überein. Effekte wie Kondensation im Verdampfer oder sogar Eisbildung auf der Außenseite der Rohrleitungen konnten nicht berücksichtigt werden.  
Außerdem wurde auch der Umgebungsdruck der Luft bei 1013 hPa (Standardatmosphäre) konstant gehalten.

# Kapitel 4

## Ergebnisse und Bewertung

### 4.1 Direkter TEWI-Beitrag

Wie schon in Abschnitt 2.2 auf Seite 6 dargestellt, wird der direkte TEWI-Beitrag folgendermaßen berechnet:

$$TEWI_{direkt} = GWP_{100} \cdot \left[ \overbrace{L \cdot n}^{Leckage} + \overbrace{m_{KM} \cdot (1 - \alpha_{re})}^{Entsorgung} \right]$$

Die Koeffizienten sind in Tabelle 2.3 auf Seite 8 aufgetragen. Daraus lassen sich die in Tabelle 4.1 aufgelisteten direkten TEWI-Beiträge berechnen. Zusätzlich sind auch die Werte für verschiedene Leckagen  $L = x \cdot m_{KM}$  und unterschiedliche Recyclinganteile des R134a aufgelistet:

Es ist deutlich zu sehen, dass R134a aufgrund seines hohen GWP hier wesentlich schlechter

L	$\alpha_{re}$	CO <sub>2</sub> -Bus	R134a-Bus
0 · m <sub>KM</sub>	0,5	4	3.000
0 · m <sub>KM</sub>	<b>0,75</b>	4	1.500
0 · m <sub>KM</sub>	1,0	4	0
<b>0,1 · m<sub>KM</sub></b>	0,5	8	9.000
<b>0,1 · m<sub>KM</sub></b>	<b>0,75</b>	<b>8</b>	<b>7.500</b>
<b>0,1 · m<sub>KM</sub></b>	1,0	8	6.000
0,2 · m <sub>KM</sub>	0,5	12	15.000
0,2 · m <sub>KM</sub>	<b>0,75</b>	12	13.500
0,2 · m <sub>KM</sub>	1,0	12	12.000

Tabelle 4.1: Direkter TEWI-Beitrag in [kg CO<sub>2</sub>] der Anlagen mit verschiedenen Leckagen und Recyclingfaktoren. Fettgedruckt sind die von Pettersen und Hafner [1] verwendeten Werte gegeben. Da CO<sub>2</sub> nicht dem Recycling zugeführt wird, ändern sich die Werte mit unterschiedlichen  $\alpha_{re}$  nicht. Die Füllmengen betragen: CO<sub>2</sub>-Busklimaanlage: 4kg ; R134a-Busklimaanlage: 5 kg.

abschneidet. Der idealfall ohne Leckage und mit vollständigem Recycling ist mit vernünft-

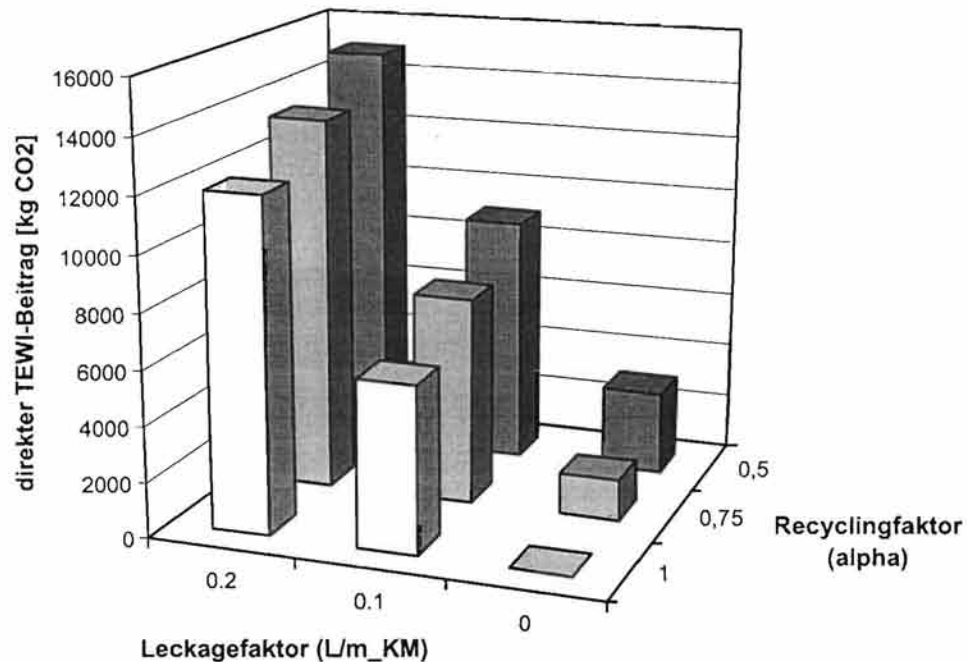


Abbildung 4.1: Abhängigkeit des direkten TEWI-Beitrags vom Leckagefaktor  $L/m_{KM}$  und Recyclingfaktor  $\alpha_{re}$  für die R134a-Busklimaanlage.

tigem Aufwand nicht zu erreichen.

Der direkte TEWI-Beitrag ist von den Umgebungsvariablen (Temperaturen, Betriebsstunden, etc.) unabhängig. In Abbildung 4.1 ist für die R134a-Busklimaanlage die Abhängigkeit des direkten TEWI-Beitrages von Leckage- und Recyclingfaktor illustriert. Man erkennt deutlich, wie wichtig insbesondere der Einfluss der Leckage ist.

## 4.2 Indirekter TEWI-Beitrag

Der indirekte TEWI-Beitrag berechnet sich nach der Formel

$$TEWI_{indirekt} = \underbrace{\frac{\dot{Q}_0}{COP} \cdot \frac{\tau}{\eta_{tot}} \cdot \beta \cdot n}_{\text{Betrieb}} + \underbrace{\gamma \cdot \delta \cdot m_{KA} \cdot D \cdot n}_{\text{Transport}}$$

Also dem Beitrag aus dem Energiebedarf für Betrieb und Transport.

### 4.2.1 TEWI-Anteil für den Verdichterantrieb

Dieser Betrag gibt den Energieverbrauch des Verdichters wieder, da der COP aus Kälteleistung und Antriebsenergie berechnet wird. Wie schon in Abschnitt 2.2 erwähnt, fehlt der Beitrag aus dem Energiebedarf der Gebläse. Auf diesen wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

Der Betriebs-Anteil berechnet sich aus den Konstanten  $\beta$  und  $\eta_{\text{tot}}$ , die von der Antriebs-einheit des Fahrzeugs bestimmt werden, sowie den Variablen Kälteleistung  $\dot{Q}_0$ , Betriebsstunden  $\tau$  und dem COP. Da diese drei Variablen von der Außentemperatur abhängen, ist es sinnvoll, sie für jede Temperaturklasse einzeln zu multiplizieren, und die Ergebnisse zu addieren. Der schematische Rechengang ist in Tabelle 4.2 aufgetragen.

Nachdem man auf diese Weise den Faktor berechnet hat, kann man den indirekten TEWI-

Temperaturklasse [°C]	Kälteleistung [kW]	Betriebsstunden [h/a]	COP [-]	$(\dot{Q}_0/\text{COP}) \cdot \tau$ [kWh/a]
10	29,98	71,43	4,2	509,85
15	28,13	266,10	3,79	1.975,04
20	26,59	277,38	3,33	2214,85
25	24,97	81,71	2,93	696,38
Summe:				5.396,13

Tabelle 4.2: Ermittlung des  $(\dot{Q}_0/\text{COP}) \cdot \tau$ -Faktors zur Auswertung des indirekten TEWI-Beitrags der CO<sub>2</sub>-Busklimaanlage

Beitrag aus dem Betrieb berechnen. In Tabelle 4.4 ist der indirekte TEWI-Beitrag aus dem Betrieb für die beiden Busanlagen aufgetragen.

#### 4.2.2 TEWI-Anteil für den Anlagentransport

Da für die Koeffizienten zur Berechnung des Transportanteils keine Werte vorliegen, wird er vernachlässigt. Dies ist insofern legitim, dass er bei den jeweils verglichenen Anlagen relativ gleich sein könnte, da sie sich im Gewicht so gut wie nicht unterscheiden. Zusätzlich ist das Anlagengewicht gegenüber dem Fahrzeuggewicht relativ klein.

#### 4.2.3 TEWI-Anteil für die Gebläse

Die ursprüngliche TEWI-Formel sieht keinen Beitrag für den Energieverbrauch von Nebenaggregaten, insbesondere der Gebläse, vor (siehe Abschnitt 2.2). Aus bereits mehrfach genannten Gründen führt dies jedoch zu einer starken Verfälschung des Ergebnisses, da der Energiebedarf der Gebläse, relativ hoch ist. So beträgt die Antriebsleistung im Verdichter der CO<sub>2</sub>-Busklimaanlage ca. 7,5 kW, die Gebläse der Anlage benötigen 1,032 kW, immerhin 13,76 % der Verdichterleistung<sup>1</sup>.

Es werden bei den Bussen jedoch nur die Gebläse am Gaskühler in den TEWI einbezogen, da die Verdampfergebläse nicht getaktet werden und immer laufen, um eine Luftzirkulation im Bus zu erreichen.

<sup>1</sup>Petterson und Hafner [1] geben für PKW-Anlagen einen Anteil von 15 % für alle Nebenaggregate an

Man kann einen TEWI-Beitrag aus der Gebläseleistung wie folgt berechnen:

$$TEWI_{\text{Gebläse}} = P_{\text{Gebläse}} \cdot \tau \cdot \frac{\beta}{\eta_{\text{tot}}}$$

Das bedeutet für die betrachteten Anlagen die in Tabelle 4.3 aufgelisteten Werte.

	CO <sub>2</sub> -Bus 20°C	R134a-Bus 20°C
Gebläseleistung [kW]	1,032	1,032
Betriebsstunden [h/a]	697	1033
TEWI <sub>Gebläse</sub> [kg CO <sub>2</sub> ]	8.319	12.347

Tabelle 4.3: Gebläseanteil am TEWI

Die R134a-Anlage schneidet bei diesem Anteil schlechter ab, da sie aufgrund ihrer geringeren Kälteleistung mehr Betriebsstunden leistet.

### 4.3 Abschließende TEWI-Berechnung

Nachdem man diese Berechnungen angestellt hat, kann man den TEWI Wert der Anlagen berechnen. Es soll hier zwischen zwei verschiedenen TEWI Werten unterschieden werden:

$$TEWI = TEWI_{\text{direkt}} + TEWI_{\text{indirekt}}$$

$$TEWI^* = TEWI_{\text{direkt}} + TEWI_{\text{indirekt}} + TEWI_{\text{Gebläse}}$$

Die Bezeichnung TEWI\* wird hier verwendet, um den TEWI zu bezeichnen, der den neu eingeführten Gebläseanteil berücksichtigt. Da dieser Beitrag im allgemein verwendeten TEWI nicht enthalten ist, werden bei allen Ergebnissen TEWI und TEWI\* getrennt ausgewiesen. In Tafel 4.4 sind abschließend die TEWI-Werte für die in Tabelle 2.3 auf Seite 8 gegebenen Werte der Parameter zusammengestellt.

In Abbildung 4.2 sind diese Werte graphisch dargestellt.

	CO <sub>2</sub> -Bus 20°C	R134a-Bus 20°C
TEWI <sub>direkt</sub> [kgCO <sub>2</sub> ]	8	7.500
TEWI <sub>indirekt</sub> [kgCO <sub>2</sub> ]	62.441	67.026
TEWI <sub>gesamt</sub> [kgCO <sub>2</sub> ]	62.449	74.526
TEWI <sub>Gebläse</sub> [kgCO <sub>2</sub> ]	8.319	12.346
TEWI* <sub>gesamt</sub> [kgCO <sub>2</sub> ]	70.1768	86.872

Tabelle 4.4: Die TEWI-Werte der Busanlagen

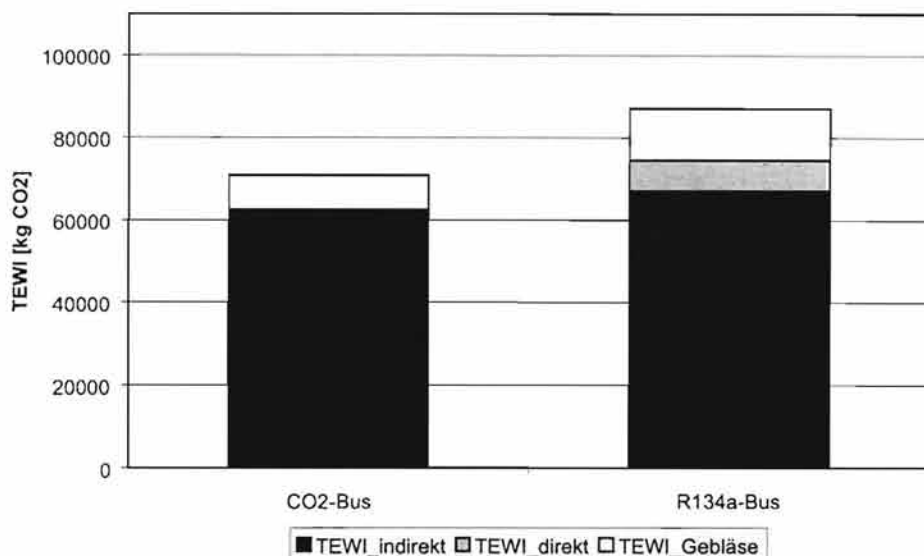


Abbildung 4.2: Graphische Auswertung des TEWI der Busklimaanlagen

## 4.4 Bewertung der Ergebnisse

### 4.4.1 Bewertung des TEWI-Ansatzes

Der TEWI-Ansatz wird im Allgemeinen dafür kritisiert, dass für seine Bestimmung zahlreiche Variablen abgeschätzt werden müssen. In dieser Studie sind das die Werte von Leckagerate  $L/m_{KM}$ , Recyclingfaktor  $\alpha_{re}$ , Wirkungsgrad der Antriebsanheit  $\eta_{tot}$  und  $CO_2$ -Ausstoß  $\beta$ . An dieser Stelle soll dies am Beispiel der Busklimaanlagen genauer untersucht werden. Für die Leckagerate und den Recyclingfaktor wurden die Auswirkungen bereits diskutiert. Eine Änderung von  $\eta_{tot}$  und  $\beta$  ist von geringerem Einfluss, da sie den indirekten TEWI-Beitrag proportional verzerren. Nimmt man für die zu vergleichenden Anlagen gleiche Werte an, so bleibt die Grundaussage, welche den besseren  $TEWI_{indirekt}$  besitzt, erhalten. Der indirekte TEWI der in dieser Arbeit betrachteten R134a-Busklimaanlage ist ca. 7,34% größer als der indirekte TEWI der  $CO_2$ -Anlage.

Nimmt man an, dass  $\beta$  eine Unsicherheit von  $\pm 15\%$  und  $\eta_{tot}$  von  $\pm 0.05$  hat, schwankt der indirekte TEWI-Beitrag der  $CO_2$ -Anlage zwischen 94.247 kg  $CO_2$  und 42.868 kg  $CO_2$ . Für die R134a-Anlage liegt der Bereich zwischen 101.168 kg  $CO_2$  und 46.015 kg  $CO_2$ . Diese starken Schwankungen zeigen, dass der TEWI-Ansatz nicht geeignet ist, einzelne Anlagen zu beurteilen.

Betrachtet man jedoch die Differenz der indirekten TEWI-Werte für die beiden Anlagen, so schwankt diese nur zwischen 6.921 kg  $CO_2$  und 3.147 kg  $CO_2$ . Dies ist weniger als 7,5 zugehörigen indirekten TEWI-Werte.

Eine Fehleinschätzung dieser Werte bewirkt also eine relativ geringe Verzerrung des Vergleichsergebnisses, das Absolutergebnis wird jedoch stark verzerrt. Abbildung 4.3 zeigt den

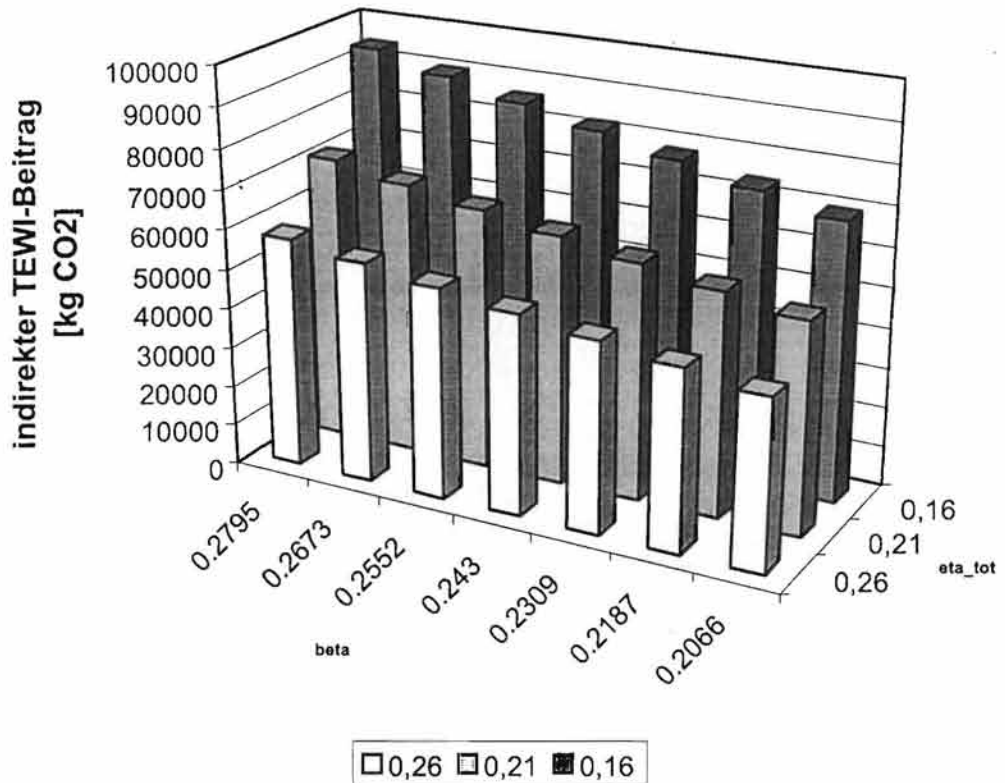


Abbildung 4.3: Abhängigkeit des indirekten TEWI-Beitrags der CO<sub>2</sub>-Busklimaanlage von  $\beta$  und  $\eta_{tot}$

Zusammenhang von  $\beta$ ,  $\eta_{tot}$  und indirektem TEWI-Beitrags der CO<sub>2</sub>-Busklimaanlage.

Die genaue Bestimmung des direkten TEWI-Anteils ist im Vergleich wesentlich wichtiger, da er bei CO<sub>2</sub> so gut wie nicht eingeht, und bei R134a durch ungünstige Wahl der Parameter praktisch unbegrenzt hochgerechnet werden kann. Allerdings sollten Werte wie Leckage und Wartungsverluste relativ einfach erhoben werden können, so dass in Zukunft exakte Werte dafür zur Verfügung stehen können.

Der in dieser Studie neu eingeführte Gebläse-Anteil im TEWI ist zwar auf jeden Fall bei größeren Anlagen relevant, favorisiert jedoch stark Anlagen mit hohen Kälteleistungen, in diesem Fall also die CO<sub>2</sub>-Anlagen. Er muss deshalb mit großer Vorsicht verwendet werden. Als Randbedingung hätten auch zwei Anlagen mit gleicher Kälteleistung betrachtet werden können, allerdings müssten die R134a-Anlagen dazu mit deutlich größeren Komponenten ausgestattet werden.

Abschließend lässt sich sagen, dass sich der TEWI-Ansatz gut eignet, um die ökologischen Auswirkungen von Fahrzeug-Klimaanlagen vergleichend zu beurteilen. Aufgrund der Einschränkungen ist es jedoch sehr schwer, absolute Werte anzugeben.

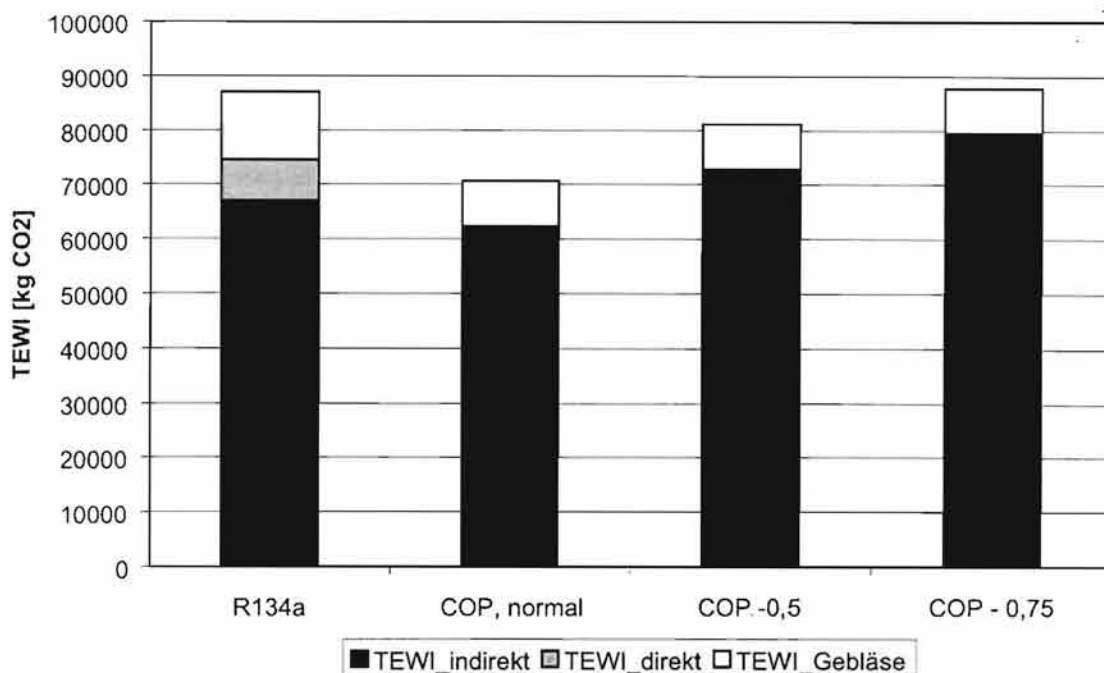


Abbildung 4.4: Vergleich der R134a-Busklimateanlage mit verschiedenen CO<sub>2</sub>-Anlagen mit reduzierten COP.

#### 4.4.2 Bewertung der Busklimateanlagen

Wie man in Abbildung 4.2 und Tabelle 4.4 deutlich sieht, ist die CO<sub>2</sub>-Busklimateanlage der R134a-Anlage im TEWI deutlich überlegen. Der Unterschied im TEWI beträgt ca. 12 t CO<sub>2</sub>. Selbst wenn man einen idealen direkten TEWI der R134a Anlage von 0 annehmen würde, wäre die CO<sub>2</sub>-Anlage noch besser.

Dies liegt an ihrem besseren COP über den gesamten Einsatzbereich (siehe Tabelle 2.1). Nimmt man an, dass die CO<sub>2</sub>-Anlage über den gesamten Temperaturbereich einen um 0,5 schlechteren COP als errechnet hätte - also schlechter als die R134a-Anlage -, stiege ihr indirekter TEWI-Anteil auf ca. 73 t CO<sub>2</sub> an. Ihr TEWI wäre immer noch ca. 1,5 t CO<sub>2</sub> besser als die R134a-Anlage.

Betrachtet man den TEWI\* so ist der Vorteil der CO<sub>2</sub>-Busklimateanlage weitere 4 t CO<sub>2</sub> größer. Sie könnte einen insgesamt um 0,75 verschlechterten COP aufweisen, und wäre immer in etwa genauso ökologisch sinnvoll wie die R134a-Anlage (bei unverändert höherer Kälteleistung). Dies ist in Abbildung 4.4 zu sehen und in Tabelle 4.5 nachzulesen. Dies belegt mit nur geringer Unsicherheit, dass die CO<sub>2</sub>-Busklimateanlage der R134a-Anlage ökologisch überlegen ist, da ihr TEWI geringer ist und sie außerdem die höhere Kälteleistung erbringt.

COP-Reduktion	R134a-Bus	CO <sub>2</sub> -Bus		
	0	0	0,5	0,75
TEWI <sub>direkt</sub> [kgCO <sub>2</sub> ]	7.500	8	8	8
TEWI <sub>indirekt</sub> [kgCO <sub>2</sub> ]	67.026	62.441	72.898	79.584
TEWI <sub>Gebälse</sub> [kgCO <sub>2</sub> ]	12.347	8.319	8.319	8.319
TEWI [kgCO <sub>2</sub> ]	74.526	62.449	72.906	79.592
TEWI* [kgCO <sub>2</sub> ]	86.873	70.768	81.225	87.911

Tabelle 4.5: Tabellarischer Vergleich der R134a-Busklimaanlage mit verschiedenen CO<sub>2</sub>-Anlagen mit reduzierten COP.

#### 4.4.3 Bewertung von CO<sub>2</sub> als Kältemittel

Bei den in dieser Arbeit untersuchten Anlagen hat sich herausgestellt, dass die CO<sub>2</sub>-Anlagen in ihren ökologischen Auswirkungen günstiger sind, als die entsprechenden R134a-Anlagen. Dies liegt allerdings weniger an den Eigenschaften des CO<sub>2</sub>, als an der Tatsache, dass ihre Wirkungsgrade denen der R134a überlegen oder nur schwach unterlegen sind.

Dabei bringen die CO<sub>2</sub>-Anlagen zwischen 40 und 60 % mehr Kälteleistung. Die Abmessungen der Wärmetauscher sind vergleichbar groß, die Rohrleitungen sind in den CO<sub>2</sub>-Anlagen kleiner. Die CO<sub>2</sub>-Verdichter haben ein geringeres Hubvolumen und können dadurch, trotz größerer Wandstärken, kompakter gebaut werden.

CO<sub>2</sub> ist in der Herstellung billiger als R134a, außerdem ist die Herstellung umweltfreundlicher. Es muss nicht aufwendig entsorgt oder dem Recycling zugeführt werden.

Dies deutet darauf hin, dass CO<sub>2</sub> eine sinnvolle Alternative als Kältemittel für mobile Anlagen darstellt. Nachteilig sind die insgesamt hohen Betriebsdrücke, die besondere Anforderungen an Dichtigkeit und Haltbarkeit an die Anlage stellen. Diese Probleme lassen sich jedoch mit vertretbarem Aufwand lösen.

Aspekte wie Lebensdauer, Zuverlässigkeit und Fertigungskosten konnten in dieser Arbeit nicht behandelt werden, es ist jedoch zu erwarten, dass die in diesem Bereich zur Zeit evtl. noch vorhandenen Probleme durch eine entsprechende Forschung und Entwicklung gelöst werden können. Die sehr positiven Ergebnisse, die die in dieser Arbeit betrachteten CO<sub>2</sub>-Verdichter geliefert haben, obwohl ihre Entwicklung noch nicht abgeschlossen ist, gibt auf jeden Fall Grund zum Optimismus.

Wird dieses Potential voll ausgenutzt, sinkt - mit steigenden Wirkungsgraden - der indirekte TEWI-Beitrag, was den Vorsprung der CO<sub>2</sub>-Anlagen weiter vergrößern wird.

# Kapitel 5

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde eine CO<sub>2</sub>-Bus- Klimaanlage mit einer entsprechenden R134a-Anlage verglichen, um sie ökologisch zu bewerten. Dazu wurde der TEWI-Ansatz verwendet, dessen Transport-Beitrag vernachlässigt wurde. Es wurde allerdings ein zusätzlicher TEWI-Beitrag für die Gebläse der Anlagen eingeführt und untersucht.

Die Simulation der Anlagen mit Hilfe einer objektorientierten Simulationsplattform ergab, dass die betrachtete CO<sub>2</sub>-Anlage der R134a-Anlage in Bezug auf Kälteleistung deutlich überlegen ist. Aus den durch die Simulation gewonnenen Daten wurde der COP der Anlagen für verschiedene Umgebungsbedingungen errechnet.

Um den TEWI berechnen zu können, wurden die erforderlichen Parameter abgeschätzt und diskutiert. Zur Berechnung der erforderlichen Kälteleistung war die Entwicklung eines einfachen Fahrzeugklimamodells notwendig. Aus diesem diesem Modell und aus Klimadaten nach DIN 4710 wurde die jährliche Betriebszeit der Anlagen berechnet. Um die realen Einsatzbedingungen näherungsweise abzubilden, wurden diese Daten nach Zugehörigkeit zu einer Temperaturklasse eingeteilt. Anschließend konnte die TEWI-Formel getrennt nach ihren Anteilen Leckage, Entsorgung, Betrieb und dem neu eingeführten Gebläse-Anteil ausgewertet werden. Dabei wurde Wert darauf gelegt zu diskutieren, welchen Einfluss die äußeren Variablen und abgeschätzten Parameter auf das Ergebnis haben.

Diese Überlegungen führten zu der Schlußfolgerung, dass die untersuchte CO<sub>2</sub>-Busklimaanlage der R134a-Busklimaanlage in ökologischer Hinsicht klar überlegen ist. Die in dieser Arbeit gewonnenen Daten lassen schließlich den Schluss zu, dass CO<sub>2</sub> als Kältemittel in der mobilen Anwendung das Potenzial besitzt R134a als vorherrschendes Kältemittel abzulösen, was bedeutende ökologische Vorteile brächte.



# Literaturverzeichnis

- [1] Pettersen, Hafner: Energetischer Wirkungsgrad und TEWI von CO<sub>2</sub>-Fahrzeug-Klimaanlagen, Trondheim, 1996 5, 2.2, 2.3, 2.3, 4.1, 1
- [2] Tegethoff, Wilhelm: Eine objektorientierte Simulationsplattform für Kälte-, Klima- und Wärmepumpensysteme, VDI Verlag, Düsseldorf 1999 3
- [3] Försterling, Kaiser, Köhler, Lemke, Sonnekalb: Entwicklung und Test einer seriennahen Kohlendioxid-Omnibusklimaanlage mit dem Schwerpunkt der Verdichterentwicklung, Schwalmstadt, 2000 2
- [4] Deutsches Institut für Normung: DIN 4710 - Meteorologische Daten zur Berechnung des Energieverbrauches von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen, November 1982 11
- [5] Engelhardt, Rolf: Gesetzliche Regelungen und Konsequenzen für den Einsatz alternativer Kältemittel, Dresden, 1995 6
- [6] Veith: Grundkursus der Kältetechnik, Heidelberg, 2, 6
- [7] Bundesministerium f. Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Nationales Klimaschutzprogramm, Berlin, 2000 1, 1.1
- [8] Verband der Automobilindustrie: Jahresbericht 2000 1.2
- [9] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen: Aktuell 2000/2001, Köln 1.2
- [10] Internationaler Bustouristik Verband e.V.: Allgemeine Informationen 1.2
- [11] Recknagel, Sprenger, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, München, 1981 2.4
- [12] Technical University of Denmark, Department of Energy Engineering: Coolpack Version 1.40 2
- [13] Fa. Bock Kältemaschinen: FKX 40 Fahrzeugverdichter, Produktprospekt 2
- [14] Fa. Bitzer: Verdichter 4UFCY ... 4NFCY für Fahrzeugklimatisierung und -kühlung, Produktprospekt 2

[15] Fa. MAN: NL 223/263/313 Niederflur-Linienbus, Datenblatt 4