



**Dipl.-Ing. J. Hellmann,**  
Anwendungstechnik Löse- und  
Kältemittel, Solvay Fluor und  
Derivate GmbH, Hannover.



**Dr. P. Barthélemy,**  
Leiter der Abteilung  
Anwendungstechnik,  
Solvay Fluor und Derivate  
GmbH, Hannover.

## AFEAS-TEWI III-Studie

### Ergebnisse und Bewertung von alternativen Kältemitteln\*

J. Hellmann und P. Barthélemy, Hannover

**Die Abschätzung des Gesamtbeitrags zum Treibhauseffekt von Anwendungen der Kälte-/Klimatechnik erfolgt nach dem TEWI-Konzept. Im Auftrag von AFEAS und dem DoE (Department of Energy, USA) wurde die TEWI-Studie bezüglich des Einsatzes alternativer Kältemittel und Technologien durchgeführt. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse dieser Studie zusammengefaßt. Im Ergebnis dieser Betrachtung wird festgestellt, daß der Energieverbrauch der Anwendung (indirekter Beitrag zum TEWI) den größeren Einfluß auf den Gesamt-TEWI hat als der direkte Beitrag des Kältemittels. Der Einsatz von toxischen oder brennbaren Kältemitteln führt nicht zwangsläufig zu einer Reduktion des Gesamt-TEWI.**

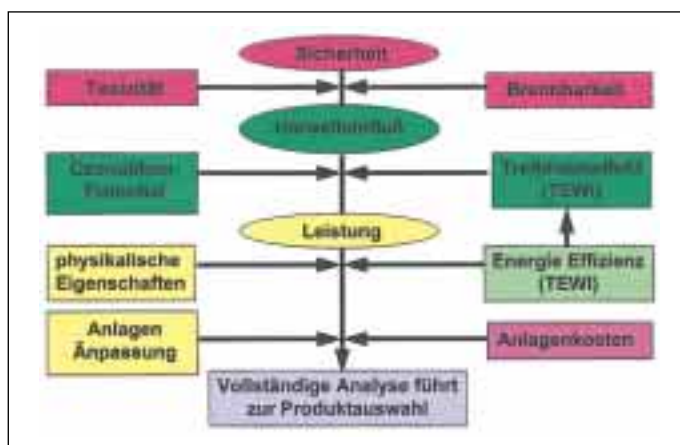
#### Einleitung

Die TEWI III-Studie [1] wurde im Auftrag von AFEAS (Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study), einer internationalen Vereinigung der Produzenten von Fluorchemikalien und dem Department of Energy (DoE)

der Vereinigten Staaten erstellt. Die Studie vergleicht für Anwendungen der Kälte- und Klimatechnik den Beitrag zum Treibhauseffekt. Dazu werden Ersatzkältemittel auf Basis von HFKW, HFKW-Gemischen, Kohlenwasserstoffen und Ammoniak sowie alternative Technologien berücksichtigt, die während des weltweiten Ausstiegs aus Anwendungen von HFCKW, z. B. R 22, kommerzialisiert werden könnten. Ferner wurden neueste Ergebnisse hinsichtlich der Anlagenleistungsdaten bei Einsatz der oben genannten Kältemittel zur Bewertung zugrunde gelegt. Regionale Unterschiede werden in der TEWI III-Studie berücksichtigt. Sowohl Experten aus Industrie und Forschung als auch Vertreter der Gesetzgebung wurden in die Erarbeitung der Studie involviert.

Obwohl das TEWI-Konzept (TEWI = Total Equivalent Warming Impact) zur Bewertung unterschiedlicher Technologien geeignet ist, sollte es nicht das einzige Kriterium sein. Aus Abb. 1 wird ersichtlich, daß Kriterien, wie Sicherheit, Umwelteinfluß, Anlagen- und Betriebskosten etc., bei der Wahl der „besten Technik“ für einen gegebenen

**Abb. 1** Einflußfaktoren für Produktauswahl bei ganzheitlicher Betrachtungsweise.



\* Als Vortrag gehalten anlässlich der Deutschen Kälte- und Klima-Tagung des DKV vom 19.-21. November 1997 in Hamburg.

Anwendungsfall berücksichtigt werden müssen. Das TEWI-Konzept allein führt nicht zu einer vollständigen Beurteilung des Umwelteinflusses. Es wird der Beitrag zum Treibhauseffekt aus der Energieerzeugung erfaßt, aber weitere umweltbelastende Emissionen aus der Energieerzeugung werden vom TEWI-Konzept nicht berücksichtigt. Bei der Energieerzeugung aus fossilen Energieträgern entstehen immer Emissionen, die zur Versauerung, Überdüngung (Eutrophierung) oder Sommersmog-Bildung beitragen. Ökobilanzen liefern hier ein differenziertes Bild. Dieser Aspekt wird in diesem Beitrag noch diskutiert.

Die Kälte- und Klimatechnik trägt nach Ansicht einer Studie der March Consulting Group [2] durch den Ausstieg aus der Anwendung von FCKW deutlich zur Reduktion der Treibhausbelastung bei. Gemäß dieser Studie wird der Gesamt-TEWI der Kälte-/Klimatechnik zum Treibhauseffekt von 1990 bis 2010 um 60 % sinken. Diese Voraussage beruht auf der Annahme einer weitverbreiteten Anwendung von HFKW-Kältemitteln. Allein der direkte TEWI-Beitrag würde um 85 % in dem oben genannten Zeitraum sinken.

Die hier vorliegende Zusammenfassung beschränkt sich exemplarisch auf die TEWI-Ergebnisse für Kühlschränke, gewerbliche Kälteanlagen sowie Klimaanlage und Wärmepumpen für europäische Bedingungen. TEWI-Ergebnisse für Pkw-Klimaanlagen werden in einer TEWI-Analyse im Vergleich zur Ökobilanz verglichen. Ergebnisse des TEWI-Vergleichs von Absorptionsanlagen und Kaltwassersätzen sind in der TEWI III-Studie enthalten, werden hier aber nicht weiter diskutiert.

**Grenzen der TEWI-Studie**

Es ist schwierig, einen absoluten TEWI-Wert zu berechnen. TEWI ist daher in erster Linie ein vergleichendes Werkzeug, um den Einfluß verschiedener Kältemittel in einer Anwendung auf Basis von standardisierten Annahmen (z. B. Betriebsbedingungen, Leckageraten, CO<sub>2</sub>-Emission der Energieerzeugung) zu bewerten. Die Annahmen basieren auf Durchschnittswerten oder Abschätzungen. Die Abschätzungen, z. B. der Leckraten, wurden zusammen mit Experten aus der Industrie getroffen, um ein möglichst repräsentatives Bild herzustellen.

Die in der TEWI III-Studie genutzten Treibhauspotentiale (GWP) der Kälte-

**Tabelle 1**  
Parameter für einen typischen europäischen Kühlschrank.

Parameter	Wert
Volumen (innen)	230 Liter
Volumen Isolationsschaum	0,1539 m <sup>3</sup>
Kältemittel Füllmenge R 134a R 600a	0,127 kg 0,045 kg
Energieverbrauch pro Jahr R 141b bzw. R 245fa Schaum R 134a Schaum Cyclopentan Schaum	300 kWh/Jahr 312 kWh/Jahr 328 kWh/Jahr
CO <sub>2</sub> Emission pro kWh Energie	0,47 kg/kWh
Nutzungsdauer	15 Jahre

bzw. Schaumtreibmittel basieren auf Angaben des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [3], wobei diese GWPs auf das GWP von CO<sub>2</sub> (GWP=1,0) bezogen werden. Seit 1991 wird von Gesetzgebern ein Integrationszeithorizont (ITH) von 100 Jahren gewählt, da die Emissionen von Treibhausgasen bereits das Erdklima in den nächsten Jahrzehnten beeinflussen könnten. Die TEWI III-Studie gibt eine Unsicherheit von mindestens ± 20 % für die GWP-Werte für Kälte- und Schaumtreibmittel an. Der indirekte Beitrag durch CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Energieerzeugung kann genauer bestimmt werden. In der TEWI III-Studie ist ein Fehler von ± 3–4% für nationale Durchschnittswerte angegeben.

Aufgrund dieser Unsicherheiten werden, gemäß der Studie, TEWI-Ergebnisse mit geringen Unterschieden (< 5 %) als gleichwertig betrachtet, wenn der Stand der Technik der Anwendung und die genutzte Energiequelle gleich sind.

Es wird vorgeschlagen, der Technologie den Vorzug zu geben, die die bessere Energieeffizienz aufweist. Beim Vergleich von Alternativen sind hierbei Sicherheitsaspekte, Umwelteinflüsse sowie Kosten zu berücksichtigen. Diese Überlegung entspricht dem Gedanken der „besten verfügbaren Technik ohne übermäßige Kosten“ (BATNEEC = best available technique not entailing excessive cost). In einigen Fällen kann diese Entscheidung zur Auswahl einer Anwendung mit etwas höherem direkten TEWI-Beitrag als das Minimum führen. In diesen Situationen kann darüber diskutiert werden, ob die Schonung von Energieressourcen Priorität gegenüber geringen TEWI-Differenzen hat, insbesondere im Hinblick auf die oben genannten Unsicherheiten.

Bei einer TEWI-Analyse wird die CO<sub>2</sub>-Emission pro erzeugter kWh Energie zur Berechnung des indirekten TEWI-Beitrags berücksichtigt. Die CO<sub>2</sub>-Emission für die Elektrizitätserzeugung ist

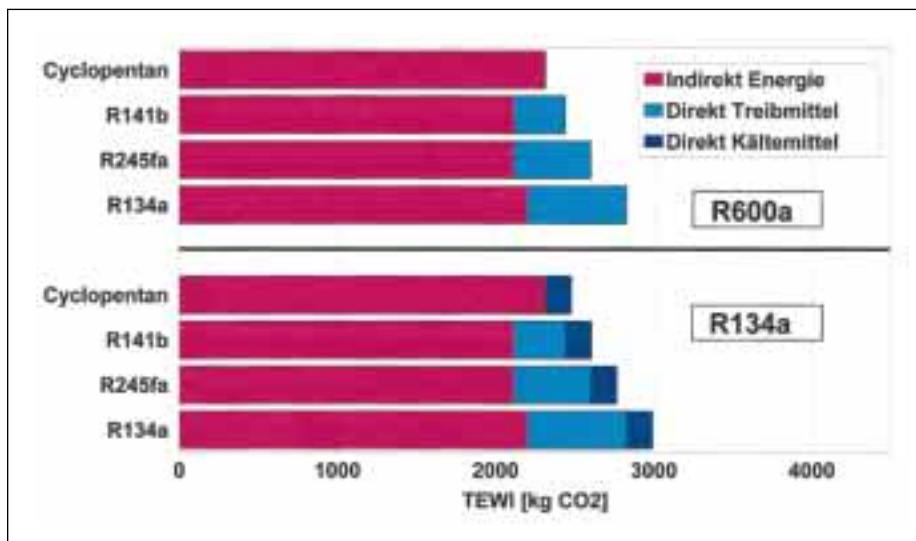


Abb. 2 TEWI-Vergleich für europäische Kühlschränke.

abhängig von der Mischung der in Kraftwerken eingesetzten Energieträger. Die nationalen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Kraftwerken können variieren, was zu geringfügig abweichenden Trends oder Schlüssen aus der TEWI-Betrachtung führen kann. Die Belastung des Erdklimas durch den Treibhauseffekt ist ein globales Problem. Um diesem Aspekt gerecht zu werden, stützt sich die Studie auf veröffentlichte Daten zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Kraftwerken und nutzt Durchschnittswerte für die Regionen Nordamerika, Japan und Europa. Der europäische Durchschnittswert beträgt gemäß der Studie 0,47 kgCO<sub>2</sub>/kWh.

Ferner werden in einigen Fällen der TEWI III-Studie etablierte Anwendungen mit noch in der Entwicklung befindlichen verglichen, für die endgültige Anlagenleistungen oder -konfigurationen noch nicht feststehen. Ist in diesen Fällen der TEWI-Wert der zukünftigen Technologie um 10 % oder mehr unterhalb des TEWIs der etablierten Anwendung, so ist gemäß der Studie eine weitere Analyse und Entwicklung gerechtfertigt.

### Ergebnisse und Diskussion

Das TEWI-Konzept ist eine geeignete Methode zur Abschätzung des Beitrages der Betriebsmittelemissionen (direkter Beitrag) und des Energieverbrauchs (indirekter Beitrag) einer Anwendung zum Treibhauseffekt. Dabei wird die gesamte Nutzungsdauer der Anwendung betrachtet und ein CO<sub>2</sub>-massenäquivalenter Anteil für diesen Zeitraum errechnet. Für die Kälte-/Klima-Anwendungen besteht der direkte TEWI-Anteil aus den Kältemittelmmissionen bei Leckagen sowohl während des Betriebs und in Wartungsfällen als auch bei der Außerbetriebnahme. Bei der Bewertung von Kühlschränken wird zusätzlich der direkte Beitrag des Treibmittels aus dem Isolationsschaum berücksichtigt.

Der indirekte TEWI-Beitrag beinhaltet den äquivalenten CO<sub>2</sub>-Anteil, der mit dem Energieverbrauch der Anwendung und der Erzeugung von Elektrizität aus fossilen Brennstoffen bzw. der Verbrennung von Benzin zum Fahrzeugantrieb zusammenhängt.

Der Energieverbrauch bzw. der TEWI-Beitrag, der aus der Materialherstellung der Kälteanlagenkomponenten resultiert, wird in der TEWI III-Studie nicht berücksichtigt. Eine umfassende Ökobilanz dagegen berücksichtigt die

### Berechnungsformel für TEWI-Faktor.

**Berechnungsformel TEWI-Faktor**

$$TEWI = \underbrace{(GWP \times L \times n)}_{\text{direkter Beitrag}} + \underbrace{\{GWP \times m \cdot (1-\alpha)\}}_{\text{indirekter Beitrag}} + \underbrace{(n \times E \times \beta)}_{\text{indirekter Beitrag}}$$

mit:

- GWP = Global Warming Potential, 100 Jahre Zeithorizont
- L = Leckage Kältemittel, Betrieb und Wartung, in kg/Jahr
- n = Nutzungsdauer der Anwendung in Jahre
- m = Masse des Kältemittels in kg
- α = Rückgewinnungsfaktor Kältemittel, dimensionslos
- E = Energieverbrauch in kWh/Jahr
- β = CO<sub>2</sub>- Emission in kg/kWh Energie

se Beiträge. Ein Vergleich von zwei Technologien mit unterschiedlichem Materialaufwand wird zu Unterschieden im Umwelteinfluß führen.

### Kühlschränke

Laut der TEWI III-Studie werden jährlich ca. 62 Millionen Kühlschränke produziert. Zusätzlich sind Hunderte von Millionen Kühlschränken in Betrieb. Darüberhinaus wird zukünftig eine deutlich steigende Nachfrage in den Entwicklungsländern erwartet. Angesichts der weitverbreiteten Nutzung, sind Kühlschränke bedeutende Verbraucher von Elektrizität. Die Produzenten von Kühlschränken sind bestrebt, den Stromverbrauch von Kühlschränken durch Verbesserungen der Isolationsschäume und des Kältemittelkreislaufs zu senken.

Neben dem indirekten Beitrag zum TEWI durch den Stromverbrauch, tragen Emissionen der Treibmittel und Kältemittel, insbesondere bei der Außerbetriebnahme, direkt zum TEWI bei. Heute werden als Kältemittel R 134a und R 600a (Isobutan) eingesetzt, in den Entwicklungsländern nach wie vor FCKW. Als Treibmittel für den Isolationsschaum werden beispielsweise das HFCKW-141b und Cyclopentan eingesetzt. Die Suche nach Ersatzstoffen für R 141b ist noch nicht

endgültig abgeschlossen. Die Studie bewertet neben R 141b und Cyclopentan auch die potentiellen Ersatztreibmittel auf Basis von HFKW, R 245fa und R 134a, die zu R 141b getriebenen Schäumen vergleichbare Isolationseigenschaften aufweisen. Dies trifft auch auf R 365mfc zu, das zur Zeit intensiv als R 141b Ersatz in Isolationsschäumen untersucht wird [4], aber nicht in der TEWI III-Studie berücksichtigt ist. Isolationsschäume, die mit diesem HFKW getrieben sind, haben im Vergleich zu R 245fa-Schäumen eine vergleichbare Wärmedämmung. Die dargestellten TEWI-Ergebnisse für R 245fa können daher auf R 365mfc übertragen werden.

Der TEWI-Vergleich basiert auf einem Kühlschrank, dessen Isolationsschaum mit R 141b getrieben ist und der mit den Kältemitteln R 134a bzw. R 600a betrieben wird. Bezüglich des Energieverbrauchs werden in der Studie die Kältemittel R 600a und R 134a als gleichwertig behandelt. In Tabelle 1 sind die Parameter für einen typischen europäischen Kühlschrank zusammengefaßt.

Der Energieverbrauch des „Standard“-Kühlschranks basiert auf Angaben der Industrie. In Abb. 2 sind die TEWI-Ergebnisse für R 600a und R 134a-Kühlschränke dargestellt, wobei die

Kältemittel	direkter TEWI-Anteil am Gesamt TEWI [%]	Gesamt-TEWI-Reduktion rel. zu R22 [%]
R 22	9–11	–
R 134a	6–8	3
R 407C (100 % R 22)	8–10	1
R 410A (105 % R 22)	7–9	7
R 290 (100 % R 22)	0	11

**Tabelle 2** Direkter TEWI-Anteil der Kältemittel und TEWI-Reduktion durch Einsatz von Ersatzkältemitteln in Wärmepumpen im Vergleich zu R 22.

Schaumtreibmittel R 141b, Cyclopentan, R 245fa und R 134a verglichen werden.

Aus Abb. 2 wird deutlich, daß der indirekte Beitrag zum TEWI (Energieverbrauch) bei Kühlschränken wesentlich ist. Der Einsatz von Cyclopentan bzw. R 134a führt zu Schäumen, die im Vergleich zu R 141b-Schäumen eine geringere Wärmedämmung haben. Die mit Cyclopentan geschäumten Kühlschränke verbrauchen im Vergleich zu R 141b ca. 9 % mehr Energie, bei gleicher Wandstärke des Isolations-schaums.

Der direkte TEWI-Beitrag ist in erster Linie auf das fluorierte Schaumtreibmittel zurückzuführen. Bei der Verwendung von R 141b als Schaumtreibmittel beträgt der Anteil am Gesamt-TEWI ca. 13 %. Der Anteil des Kältemittels R 134a am Gesamt-TEWI beträgt in den betrachteten Fällen ca. 6 %.

In der Studie wird angenommen, daß das Kältemittel und das Schaumtreibmittel bei der Verschrottung des Kühlschranks zu 100 % emittiert werden. Dies trifft auf Deutschland nicht zu, da Kältemittel und Schaumtreibmittel zurückgewonnen bzw. thermisch entsorgt werden. Der Unterschied im Gesamt-TEWI eines R 134a-/Cyclopentan-Kühlschranks zu einem R 600a-/Cyclopentan-Kühlschrank beträgt bei der Annahme einer Rückgewinnungsrate für das Kältemittel von 60 % nur noch ca. 3 %. Damit besteht unter Anwendung der im vorhergehenden Abschnitt genannten Grenze von 5 % Unsicherheit im Gesamt-TEWI kein Unterschied zwischen R 600a- und R 134a-Kühlschränken. Der Einsatz von R 600a oder R 134a als Kältemittel im Kühlschrank hat keinen signifikanten Einfluß auf den Gesamt-TEWI. Die Reduktion des TEWIs durch Einsatz von optimierten Verdichtern und gut isolierenden Schaumtreibmitteln, gekoppelt mit einer möglichst vollständigen Entsorgung der Kälte- und Treibmittel, steht bei Kühlschränken im Vordergrund. Die Reduktion des Energieverbrauchs trägt zur Reduktion des TEWIs und des gesamten Umwelteinflusses bei.

**Klimageräte und Wärmepumpen**

Die Anwendung von Klimageräten ist global gesehen neben Kühlschränken am weitesten verbreitet und hat somit in der Summe einen signifikanten Beitrag zum Treibhauseffekt. Die weltweit

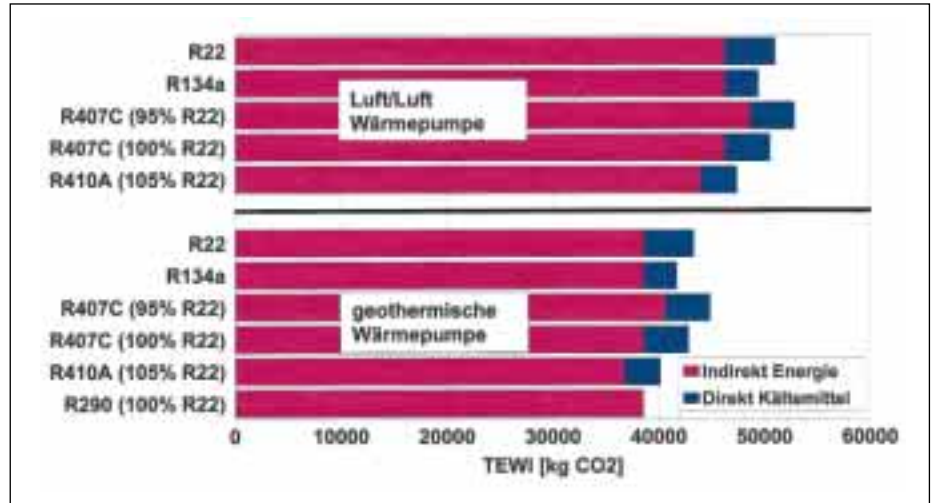


Abb. 3 TEWI-Vergleich für europäische Wärmepumpen.

installierte Kapazität von dezentralisierten Klimageräten (unitary equipment) ist im Vergleich zu zentralen Kaltwassersätzen (1991: Schätzung  $2,11 \times 10^8$  kW weltweit) um ca. Faktor 4 größer. Etwa 90 % dieser Anlagen sind in den USA und Japan installiert. Im Vergleich hierzu ist die Anwendung von Wärmepumpen und Klimageräten in Europa weniger verbreitet. Allerdings wird eine steigende Nachfrage für diese Anwendungen in Europa verzeichnet.

Die TEWI III-Studie vergleicht die Kältemittel R 22, R 134a, R 407C und R 410A in Luft/Luft- und geothermischen Wärmepumpen mit Kälte- und Wärmeträgern. Ein Vergleich des Kältemittels R 290 ist in der Studie für europäische Anwendungen nicht enthalten. In dem hier vorliegenden Beitrag

wurden die Ergebnisse der TEWI III-Studie für geothermische Wärmepumpen mit einer Bewertung für R 290 ergänzt. Aus Sicherheitsgründen ist aufgrund der relativ großen R 290-Füllmenge eine Außenaufstellung erforderlich. In diesem Fall ist eine Frostschutzeinrichtung, d. h. eine Ölwanneheizung, erforderlich, die das Öl auf Betriebstemperatur hält. Im Vergleich zur Ölwanneheizung von Wärmepumpen, die im Haus aufgestellt sind (z. B. mit HFKW-Kältemitteln), wird in diesem Fall mehr elektrische Energie benötigt. Bei Außenaufstellung ist zur Ölerwärmung eine höhere Temperaturdifferenz zu überwinden. Die Auswirkung des Stromverbrauchs der Ölwanneheizung auf den Gesamt-TEWI wurde hier jedoch nicht berücksichtigt.

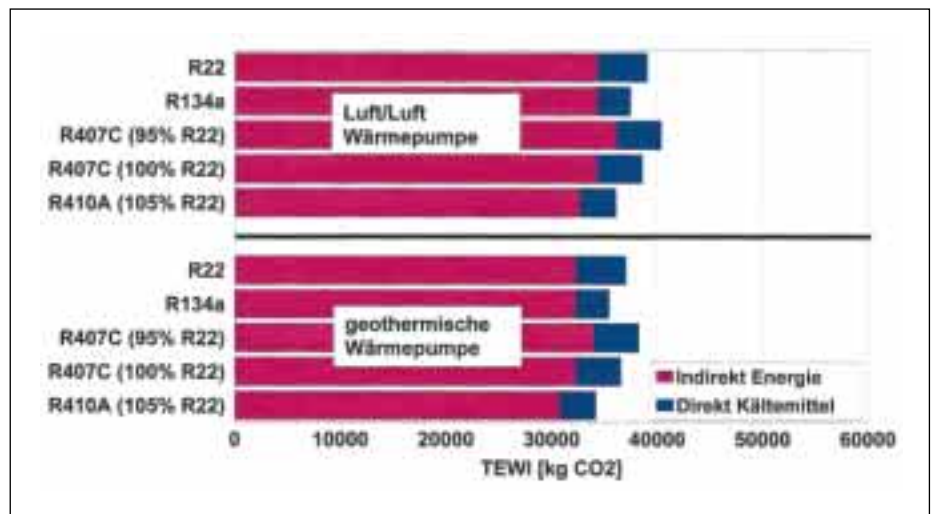


Abb. 4 TEWI-Vergleich für südeuropäische Klimatisierung.

Die zusätzliche Bewertung ist unter der Annahme einer zu R 22 identischen Heizleistungszahl und Heizleistung für R 290 durchgeführt. Dadurch reduziert sich der Gesamt-TEWI für die mit R 290 betriebene Wärmepumpe um den direkten TEWI-Beitrag von R 22. Die in der TEWI III-Studie angenommenen jährlichen Heiz- und Kühllasten sowie die entsprechenden Jahresarbeitszahlen für R 22-Systeme basieren auf Angaben des IEA Wärmepumpenzentrums [5], wobei zwischen den Heiz- und Kälteleistungszahlen nicht unterschieden wird. Ferner wird eine zu R 22 identische Jahresarbeitszahl für R 134a angenommen. Ergänzend wird hier bemerkt, daß in der Regel die Leistungswerte von R 134a im Bereich der Klima- und Normalkühlanlagen höhere Kälteleistungszahlen ergeben. Bei Berücksichtigung einer im Vergleich zu R 22 höheren Kälteleistungszahl für R 134a wird der indirekte TEWI-Beitrag reduziert. Für R 407C unterscheidet die Studie zwei Fälle. Im ersten Fall wird angenommen, daß die Jahresarbeitszahl im Vergleich zu R 22 um 5 % reduziert ist. Im zweiten Fall wird durch Anlagenoptimierung eine zu R 22 identische Energieausbeute erzielt. Für R 410A wird mit einer um 5 % höheren Jahresarbeitszahl gerechnet. Die relativen Angaben zur Jahresarbeitszahl der verschiedenen Kältemittel basieren auf veröffentlichten Versuchsergebnissen.

In Abb. 3 sind die Ergebnisse für Wärmepumpen mit 10 kW Heizleistung dargestellt. In der TEWI III-Studie sind hierzu Annahmen gemacht, die im folgenden zusammengefaßt werden. Die Berechnungen basieren auf einer jährlichen Heizlast (europäischer Durchschnitt) von 16 400 kWh/Jahr [5]. Eine jährliche Leckrate von 5 % der Füllmenge sowie ein Verlust bei der Außerbetriebnahme von 15 % der Füllmenge wird angenommen. Diese Annahme trifft auf Deutschland nicht unbedingt zu. Leckraten von 1 % sind nach dem heutigem Stand der Technik realistisch [6]. Die Füllmengen für R 22 und R 407C sind gleich. Beim Einsatz von R 134a bzw. R 410A reduzieren sich die Füllmengen um 13 % bzw. um 29 %. Die Nutzungsdauer beträgt 15 Jahre. Für die CO<sub>2</sub>-Emission pro kWh Elektrizität wird mit dem europäischen Durchschnitt (0,47 kg CO<sub>2</sub>/kWh) gerechnet.

In Tab. 2 ist der direkte TEWI-Anteil der halogenierten Kältemittel am Ge-

Parameter	DX-Kälteanlagen	indirekte Systeme	dezentrale Systeme
Verdampfungstemperatur [°C]	-7	-10	-7
Verflüssigungstemperatur [°C]	36	36	39
Kühllast [kW]	132	132	132
Kältemittelfüllmenge [%]	100	11	25
heutige Leckraten bez. auf Füllmenge [%]	13,5	4	5
angestrebte Leckraten in 5-7 Jahren [%]	6	2	2
Kältemittelverluste bei Außerbetriebnahme [%]	0	0	0
Nutzungsdauer [Jahre]	15	15	15

Tabelle 3 Annahmen für Supermarktkälteanlagen (Normalkühlung).

samt-TEWI sowie die Gesamt-TEWI Reduktion bei Einsatz der Ersatzkältemittel gegenüber R 22 dargestellt. Der Einsatz von R 134a oder R 407C führt im Vergleich zu R 22 zu ähnlichen TEWI-Werten. Durch den Einsatz von R 410A kann der TEWI deutlicher reduziert werden. Aufgrund der angenommenen höheren Jahresarbeitszahl führt der Einsatz von R 410A im dargestellten Beispiel zum geringsten Energieverbrauch, auch im Vergleich zu R 290.

Praktische Messungen an Erdreich-Wärmepumpen, die nach dem Prinzip der Direktexpansion arbeiten, führten zu vergleichbaren Ergebnissen [7]. Die von den Autoren dieses Beitrages ergänzte TEWI-Berechnung für R 290 wurde für geothermische Wärmepumpen mit Kälte- und Wärmeträgern durchgeführt. Daraus resultierte eine TEWI-Reduktion gegenüber R 22 von 11 %. Im Vergleich zum Einsatz von R 410A ergibt eine geringfügige Verbesserung von etwa 4 % und ein höherer Energieverbrauch (ca. 5 %). Der TEWI der beiden Technologien ist un-

ter Berücksichtigung der in Abschnitt 2 genannten Fehlergrenzen gleichwertig. Wird der Schonung von Energieressourcen gegenüber geringer TEWI-Differenzen Priorität gegeben, so ist R 410A die beste Lösung für Wärmepumpenanwendungen. Sicherheits- und Kostenaspekte beeinflussen zusätzlich die Entscheidung zugunsten von R 410A.

Die Beheizung von Wohnungen mit elektrischem Strom bzw. Erdgas, sowie gasbefeuerte Absorptionswärmepumpen, wurden in der Studie ebenfalls berücksichtigt. Die Anwendung von gasbefeuerten Absorptionswärmepumpen führt zu TEWI-Werten, die mit den oben für Luft/Luft-Wärmepumpen dargestellten Ergebnissen vergleichbar sind. Geothermische Wärmepumpen ergeben den günstigsten TEWI-Wert. Hohe Anschaffungskosten, insbesondere für die Absorptionsanlage, stehen der sehr guten Umweltverträglichkeit gegenüber. Die Gasheizung ist in der Anschaffung preiswerter, ihre Anwendung führt jedoch nicht zur TEWI-Reduktion. Vom TEWI-Standpunkt

Parameter	R 134a		CO <sub>2</sub>	
	TEWI [kg CO <sub>2</sub> ]	Energie [MJ]	TEWI [kg CO <sub>2</sub> ]	Energie [MJ]
Produktion Kältemittel (pro kg)	10	180	0,3	18
Kältemittelverluste	500-1600	-	1	-
Betrieb Klimaanlage (Laufleistung 160 000 km)	1500	28 500	1700	32 000
Transport Klimaanlage (Laufleistung 160 000 km)	240	4700	330	6400
Summe	2250-3350	33 380	2031	38 418

Tabelle 4 TEWI/Ökobilanz für Pkw-Klimatisierung: Vergleich von R 134a mit CO<sub>2</sub>.

betrachtet ist die elektrische Heizung nicht zu empfehlen. Der TEWI-Wert ist im Vergleich zu einer der o. g. Wärmepumpen um bis zu ca. 140 % größer. Der großflächige Einsatz von Wärmepumpen ermöglicht, unabhängig vom Kältemittel, eine erhebliche Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes.

Die Diskussion der Wärmepumpen-Ergebnisse trifft im Wesentlichen auch auf die Anwendung der betrachteten Kältemittel in Klimageräten zu. Klimaanwendungen für R 290 (Europa) wurden in der TEWI-Studie nicht berücksichtigt. Bei Splitgeräten wäre aus Sicherheitsgründen der Einsatz von Kälte-trägern erforderlich, wodurch die Energieeffizienz im Vergleich zu R 22 und den Ersatzkältemitteln reduziert und kein TEWI-Vorteil erzielt wird. Ein Vergleich für entsprechende amerikanische Klimageräte unter Verwendung von R 290 kann der Studie entnommen werden.

In Abb. 4 sind die Ergebnisse für Klimageräte unter südeuropäischen Bedingungen (Griechenland) dargestellt. Die Ergebnisse basieren auf den oben genannten Annahmen (Kältemittelverluste, relative Jahresarbeitszahlen, Nutzungsdauer) für Wärmepumpen. Die Kühllast beträgt in diesem Beispiel bezogen auf Griechenland 7500 kWh/Jahr. Ferner ist für die CO<sub>2</sub>-Emission pro kWh Elektrizität der griechische Durchschnitt (0,976 kg CO<sub>2</sub>/kWh) zugrunde gelegt.

Aus Abb. 3 und Abb. 4 wird deutlich, daß bei der Wärmepumpen- und Klima-Anwendung der indirekte TEWI-Anteil deutlich überwiegt. Die TEWI-Ergebnisse für Kältemittelgemische unterscheiden sich nicht signifikant von den R 22-Ergebnissen. Energieeinsparungen durch Anlagenoptimierung und weitere Reduktion der Kältemittelverluste bieten ein Verbesserungspotential. Absolut gesehen bietet R 410A von allen betrachteten Kältemitteln das größte Potential zur Energieeinsparung.

### Gewerbliche Kälteanlagen

Die TEWI III-Studie beschränkt sich auf Supermarktkälteanlagen und betrachtet den Tief- und Normalkühlbereich. Die Studie vergleicht für den Normalkühlbereich die Kältemittel R 134a, R 404A, R 410A, R 507 und R 717 (NH<sub>3</sub>) und für Tieftemperaturanlagen die Kältemittel R 404A, R 407A, R 407C, R 507 und R 717. Bei den heute installierten direktexpandierenden Kälteanlagen (kurz: DX-Kälteanla-

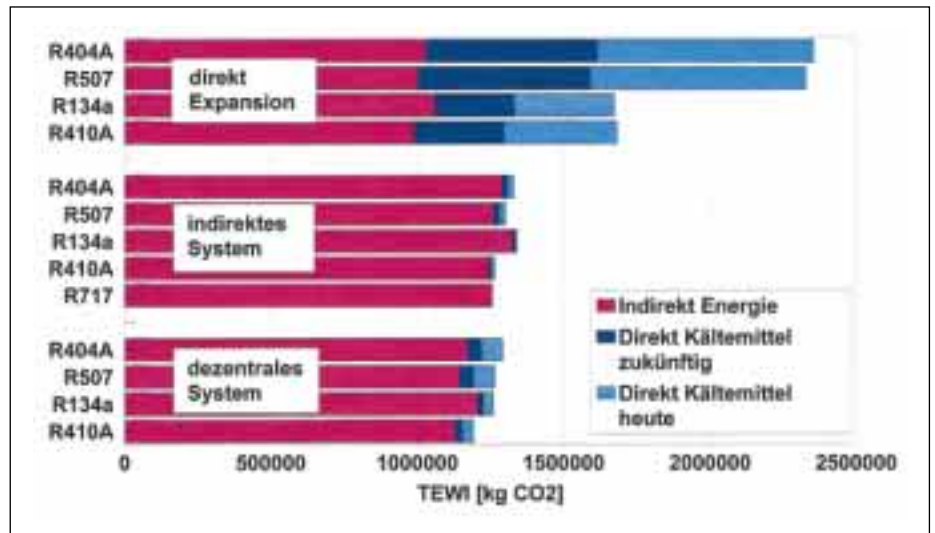


Abb. 5 TEWI für Supermarktkälteanlagen (Normalkühlung).

gen) werden große Kältemittelfüllmengen benötigt. Derartige Anlagen sind zentral installiert und verteilen das Kältemittel über lange Rohrleitungen zu den Verbrauchsstellen. Die Leckraten dieser Systeme sind deutlich höher als bei den bisher diskutierten Anwendungen, wodurch der direkte TEWI-Beitrag einen deutlich höheren Anteil hat. Bei indirekten Systemen werden Kältesolen zur Kälteverteilung eingesetzt. Ein weiteres Merkmal dieser Systeme ist, daß sich kein Kältemittel in den Verkaufsräumen befindet. Bei dezentralisierten Systemen ist die Kälteanlage in der Nähe der Verbrauchsstellen platziert. Die Wärmeabgabe erfolgt bei diesen Systemen über einen Wärmeträger.

Die Ergebnisse in Abb. 5 basieren auf einer Reihe von Annahmen (siehe Tabelle 3). Die TEWI III-Studie nimmt bei der Bewertung des indirekten Systems aufgrund des Einsatzes eines Kälte-trägers eine um 3K tiefere Verdampfungstemperatur an. Die Wärmeabgabe erfolgt direkt an die Umgebung. Bei dezentralen Systemen erhöht sich gemäß der Studie die Verflüssigungstemperatur um 3K aufgrund des Einsatzes eines Wärmeträgers. Die Kältemittelfüllmengen basieren auf den Einsatz von R 22 für die Normalkühlung. Die Füllmengen der Ersatzkältemittel resultieren aus dem Verhältnis der jeweiligen Flüssigkeitsdichten zur Dichte von R 22. Den in Tabelle 3 genannten jährlichen Leckraten liegen Angaben des ARI (American Refrigeration Institute) zugrunde. Ferner berücksichtigt die Studie in ihren Ergebnissen die zukünftig zu erwartenden

Verringerungen der Leckraten aufgrund der Verbesserung der Dichtheit von Supermarktkälteanlagen. Eine vollständige Rückgewinnung der Kältemittel bei Außerbetriebnahme der Anlage wird in der Studie vorausgesetzt. Der CO<sub>2</sub>-Emission pro kWh Elektrizität liegt der europäische Durchschnitt zugrunde.

Die Kälteleistungszahlen der verschiedenen Kältemittel basieren in der Studie auf veröffentlichten Daten. Die Analyse der indirekten bzw. dezentralen Systeme berücksichtigt den Einfluß der Temperaturerhöhung bei der Verdampfung bzw. Verflüssigung auf die Kälteleistungszahl durch theoretische Berechnungen. Die Verdichterleistungsaufnahme resultiert aus dem Verhältnis der angenommenen Kühllast zur Kälteleistungszahl. Der jährliche Energiebedarf wird aus diesem Verhältnis und der angenommenen äquivalenten Verdichterlaufzeit bei Vollast (3504 Stunden; entspricht 40 % Laufzeit bei Vollast und 8760 Stunden pro Jahr) errechnet. Der Energieverbrauch der Sole-Pumpen und der Verflüssiger-Ventilatoren sind berücksichtigt und basieren auf Expertenangaben.

In Abb. 5 sind die Ergebnisse für den Normalkühlbereich für Direktexpansionsanlagen, indirekte und dezentralisierte Kälteanlagen dargestellt. Der mittelgraue Balken stellt die zukünftig reduzierten direkten TEWI-Anteile dar. Der nach dem heutigen Stand der Technik resultierende direkte TEWI-Beitrag ist die Summe aus den mittel- und hellgrauen Balken. Bei Einsatz von indirekten bzw. dezentralen Systemen kann

die Kältemittelfüllmenge (75–90 %), und damit der direkte TEWI-Beitrag durch Kältemittellemissionen, deutlich reduziert werden. Der Energiebedarf dieser Systeme ist allerdings im Vergleich zu direktexpandierenden Kälteanlagen höher. Der direkte TEWI-Anteil der Kältemittel überwiegt in DX-Systemen, kann jedoch durch angestrebte Verringerungen der Leckagen deutlich reduziert werden. Bei Einsatz der Kältemittel R 134a und R 410A können zukünftig gegenüber indirekten bzw. dezentralen Systemen vergleichbare TEWI-Resultate erzielt werden und ein Beitrag zur Schonung von Energieressourcen geleistet werden. Die TEWI-Unterschiede zwischen dezentralen und indirekten Systemen sind relativ gering (+2 bis –7 %), unabhängig von der Wahl des Kältemittels. Die Ergebnisse für Tieftemperaturanlagen stimmen tendenziell mit den in Abb. 5 gezeigten Resultaten überein.

#### TEWI-Analyse im Vergleich zur Ökobilanz

Die TEWI-Analyse bewertet z. B. den Beitrag von Kälteanlagen zum Treibhauseffekt über die gesamte Nutzungsdauer der Anwendung. TEWI ist aber nur ein Teil einer ganzheitlichen Bewertung. Im Umweltmanagement wird die genormte Ökobilanz genutzt, um ein Produkt über die gesamte Nutzungsdauer zu beurteilen. Gemeinsamkeiten der Ökobilanz und des TEWI-Konzepts bezüglich der Bewertung von Kältemitteln sind die Zusammenfassung der Emissionen zur potentiellen Umweltwirkung sowie die Betrachtung und Variation der Anwendung. Im folgenden werden am Beispiel des Einsatzes der Kältemittel R 134a und CO<sub>2</sub> in Pkw-Klimaanlagen die Gemeinsamkeiten aufgezeigt. Der TEWI-Beitrag, der aus der Produktion der Kältemittel resultiert, ist hierbei berücksichtigt. Ferner wird der Energiebedarf für die Produktion der beiden Kältemittel und ihrer Anwendung in Pkw-Klimaanlagen verglichen. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse in Anlehnung an die TEWI III-Studie zusammengefaßt.

Aus Tabelle 4 wird deutlich, daß der TEWI-Beitrag aus der Produktion der Kältemittel zu vernachlässigen ist. Die TEWI-Analyse ergibt im Vergleich zu R 134a für die Anwendung von CO<sub>2</sub> eine TEWI-Reduktion von bis zu 40 %, abhängig von den angenommenen R 134a-Leckageverlusten. Wird der Energiebedarf der beiden Technolo-

gien verglichen, benötigt die R 134a-Klimaanlage ca. 15 % weniger Energie. Dies ist auf den höheren Benzinverbrauch der CO<sub>2</sub>-Klimaanlage zurückzuführen, der aus der geringeren Kälteleistungszahl und dem angenommenen höheren Gewicht der Anlage im Vergleich zu R 134a resultiert.

Ökobilanzen sind – in Erweiterung des TEWI-Konzeptes – geeignet sowohl Treibhauseffekte als auch Energieeffizienz und darüber hinaus Emissionen, die zur Versauerung oder Überdüngung (Eutrophierung) beitragen, in Gesamtsystemen zu analysieren. Auch die Bildung von Sommersmog-relevanten Emissionen (höherer Benzinverbrauch, Emissionen von Kohlenwasserstoffen) können mit Ökobilanzen zumindest abgeschätzt werden. Im Rahmen einer Ökobilanz ist der Einsatz von R 134a in Pkw-Klimaanlagen gegenüber CO<sub>2</sub> vorteilhaft, da insgesamt weniger Energie verbraucht wird. Der aus dem höheren Energiebedarf der Anwendung von CO<sub>2</sub> in Pkw-Klimaanlagen resultierende Umwelteinfluß kann mit einer Ökobilanz abgeschätzt werden. Ein Analyseergebnis nach dem TEWI-Konzept würde dagegen den Einsatz von CO<sub>2</sub> favorisieren. Obwohl nicht alle der oben genannten Umweltparameter für das gewählte Beispiel relevant sind, liefert eine Ökobilanz ein differenzierteres und vollständigeres Umweltprofil. Die TEWI-Bewertung impliziert ein „gut/schlecht“-Urteil. Aufgrund der multidimensionalen Betrachtungsweise sollte die Ökobilanz im Gegensatz zu eindimensionalen „Werkzeugen“ (z. B. TEWI) den Vorrang erhalten. Die Durchführung von Ökobilanzen ist im Gegensatz zur TEWI-Analyse Gegenstand internationaler Normung (EN ISO 14 040).

#### Zusammenfassung

In den letzten 7 Jahren wurden die Emissionen von halogenierten Kohlenwasserstoffen drastisch reduziert. Der Anteil der FCKW, HFCKW und HFKW am Treibhauseffekt wird aufgrund der Umsetzung des Montreal-Protokolls bis zum Jahr 2100 um 64 % abnehmen (IPCC-Hypothese; Anteil am „Radiative Forcing“: 10,2 % in 1992, 7,2 % in 2020, 3,7 % in 2100) [8]. Maßnahmen zur Reduktion von Emissionen bzw. Verbesserung der Energieeffizienz wurden bei diesem Szenario nicht berücksichtigt. Darüberhinaus schätzt das International Institute of Refrigeration (IIR), daß unter Berücksichtigung

der derzeitigen Verbesserungen in der Anlagenauslegung und Wartung der Anteil („Radiative Forcing“) von HFKW im Jahr 2100 um ca. 91 % reduziert werden könnte, wobei der Anteil von FCKW und HFCKW nach diesem Szenario gegen Null gehen wird.

In der TEWI III-Studie wird festgestellt, daß die TEWI-Reduktion durch Einsatz von Kohlenwasserstoffen oder Ammoniak als Kältemittel in Anwendungen mit niedrigen Leckraten zu vernachlässigen ist. Der Energieverbrauch kann unter Umständen im Vergleich zur HFKW-Anwendung steigen. Durch Reduktion von Leckagen und Einsatz von Kälteanlagen mit hoher Energieeffizienz kann der TEWI für alle diskutierten Kältemittel reduziert werden. Doch ist der TEWI nicht das einzige Kriterium zur Auswahl einer Kälte- oder Klimaanlage. Weitere Kriterien sind die Invest- und Betriebskosten, Energiekosten, Handhabung der Anlagen und Kältemittel und nicht zuletzt Sicherheitsaspekte. Ferner führt die multidimensionale Betrachtungsweise einer Ökobilanz für die Anwendung eines Produktes zu einem differenzierteren Bild. Hierbei werden neben der CO<sub>2</sub>-Emission aus der Energieerzeugung auch weitere, die Umwelt beeinflussende Effekte aus dem Energieverbrauch berücksichtigt.

#### Danksagung:

Für die Informationen zu Ökobilanzen (Abschnitt 4) bedanken sich die Autoren bei Herrn Dr. Krähling, Solvay Deutschland.

#### Literatur

- [1] Sand, J. R.; Fischer, S. K.; Baxter, V. D.: Energy and Global Warming Impacts of HFC Refrigerants and Emerging Technologies: TEWI Phase 3, (1997), Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (USA). Weitere Information: Mrs. Katie D. Smythe; AFEAS Program Administrator, The West Tower – Suite 400; 1333 H Street NW; Washington D.C. 20005-4707, USA.
- [2] „Refrigeration and Global Warming – An Independent Review of the Role of HFC Refrigerants“, by March Consulting Group, Telegraphic House, Waterfront Quay, Salford Quays, Manchester M5 2XW, England, September 1997.
- [3] IPCC, Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Working Group 1, Cambridge University Press, Cambridge, UK (1996).
- [4] Zipfel, L., Krücke, W., Börner, K., Barthélemy, P., Dournel, P.: HFC-365mfc and HFC-245fa Progress in Application of New HFC Blowing Agents, Proceedings. Polyurethanes World Congress 1997, Utrecht 29. September bis 1. Oktober, 1997.
- [5] International Heat Pump Status and Policy Review, Report HPC-AR3, IEA Heat Pump Centre, September 1994.
- [6] Afjei, T.: Environmental Impact/Annex 25, Mitteilung der Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung (INFEL), Lagerstr. 1, 8021 Zürich (Schweiz).
- [7] König, H.: Comparison of R 410A, R 407C and Propane in Heat Pump Applications, International Institute of Refrigeration, Conference „Heat Pump Systems, Energy Efficiency and Global Warming, Linz, Österreich, September 1997.
- [8] International Institute of Refrigeration, „12th Informatory Note on Fluorocarbon and Refrigeration: Fluorocarbons and Global Warming“, Juni 1997.