

Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel in Wärmepumpen

Martin Zogg

Vortrag am SVK-Kolloquium vom 3. November 1999 in Olten

Im Auftrag des Bundesamts für Energie werden in einer umfassenden Ökobilanz [2] die Umweltverträglichkeit natürlicher Kältemittel mit den heute üblichen Fluorkohlenwasserstoffen für Wärmepumpen, Kaltwassersätze, Solesätze und die Supermarktkühlung verglichen. In diesem Beitrag wird daraus die Umweltrelevanz der Verwendung der natürlichen Kältemittel Propan und CO₂ anstelle der Fluorkohlenwasserstoffe R134a, R407C, R404A und Isceon 59 in Wärmepumpen aufgezeigt. Es werden acht Umwelteinwirkungen für die erwähnten Kältemittel und dem teilhalogenierten Kohlenwasserstoff R22 als Referenz verglichen. Dabei werden die Kältemittelverluste, die Stromerzeugung für den Betrieb, die Herstellung sowie die Entsorgung der Anlagen einschliesslich der Kältemittel und der Transporte berücksichtigt. Es zeigt sich, dass bei Wärmepumpen unter der Voraussetzung vergleichbarer Leistungszahlen natürliche Kältemittel nur bei den Umwelteinwirkungen Treibhauseffekt und Ozonschichtabbau deutliche und bei der Giftwirkung auf den Erdboden (terrestrische Ökotoxizität) noch erkennbare Vorteile bringen. Grundsätzlich liessen sich diese bei Wärmepumpen durch rigorose Reduktion der Kältemittelverluste und Einführung neuer Produktionsverfahren für die FKW aus heutiger Sicht bis zur Belanglosigkeit reduzieren. Auch dann bleiben aber die Bedenken vor bisher unbekanntem Langzeitwirkungen der FKW.

Abgrenzung der Untersuchung

Bei der Wahl des Kältemittels kommt der Umweltverträglichkeit eine hohe Bedeutung zu. Dies illustrieren die weltweiten Ausstiegsszenarien aus den FCKW¹-Kältemitteln. Sind nun aber die als Alternativen akzeptierten Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) wirklich hinreichend umweltverträglich, oder muss noch ein Schritt weiter zu natürlichen Kältemitteln gegangen werden?

Zur Klärung dieser für die Wärmepumpen- und Kältetechnik wichtigen Frage liess das Bundesamt für Energie im Jahr 1966 eine erste Studie zur Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel ausarbeiten [1]. Die Diskussionen hörten seither nicht auf. Deshalb wurde eine zweite, umfassendere Arbeit in Auftrag gegeben [2]. In dieser neuen Untersuchung werden erstmals die FCKW-Emission bei der FKW-Produktion und die toxischen Abbauprodukte der FKW wie auch weitere neue Erkenntnisse berücksichtigt. Sie umfasst nebst der Raumheizung mit Sole/Wasser- und Luft/Wasser-Wärmepumpen auch die Raumkühlung mit Kaltwassersätzen, die Erzeugung von Industriekälte mit Solesätzen und die Supermarktkühlung. In diesem Beitrag wird über die Ergebnisse für die Raumheizung mit Wärmepumpen berichtet.

In der Kälte- und Wärmepumpentechnik wird die Umweltverträglichkeit der Kältemittel im Allgemeinen nur durch die zwei Umwelteinwirkungen Treibhauseffekt und

¹ Die Kältemittel dieser Gruppe enthalten keinen Wasserstoff. Sie müssten deshalb eigentlich als FCK (Fluor-Chlor-Kohlenstoff) und nicht wie leider üblich als FCKW (Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe) bezeichnet werden. Das englische CFC (chlorofluorocarbons) ist dagegen eine korrekte Bezeichnung.

Ozonschichtabbau beurteilt. Wie im Bild 1 gezeigt wird, erfassen die dafür üblichen Kenngrößen TEWI (total equivalent warming impact – Mass für die Treibhauswirkung, Näheres in [3]) und ODP (ozone depletion potential - Mass für die ozonschichtschädigende Wirkung, Näheres in [3]) nur einen Teil dieser Umwelteinwirkungen. Bei der Interpretation des ODP führt dies oft zum falschen Schluss, dass bei der Verwendung von Wärmepumpen- und Kälteanlagen mit FKW-Kältemitteln (mit ODP Null) kein Treibhauseffekt mehr zu erwarten sei. Weitere Umwelteinwirkungen werden meist nicht berücksichtigt. Die neue BFE-Studie [2] geht hier wesentlich weiter. Sie umfasst nicht nur zwei sondern die im Bild 1 gezeigten **acht Umwelteinwirkungen**. Diese werden für die nachstehenden **Teilvorgänge** in sehr detaillierter Weise vom Rohstoff bis zur Entsorgung mit Einbezug des Transports berechnet:

- Kältemittlemission im Betrieb und bei der Kältemittelfüllung (3% der Füllung)
- Stromproduktion für den Betrieb der Anlage (CH-Strommix inklusive 65% Importanteil, westeuropäischer Strommix, Kombikraftwerk und Blockheizkraftwerk)
- Fertigung der Anlage (ab den Rohstoffen)
- Entsorgung der Anlage mit Kältemittelverlust (20% der Füllung)
- Kältemittelherstellung.

Wie das Bild 1 verdeutlicht, enthält der TEWI nur die zwei ersten Beiträge – und diese je nach Kältemittel bei schweizerischen Stromproduktionsverhältnissen auch nur zu 68 bis 82%.

					untersuchte Umwelteinwirkungen
					nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf
TEWI					Treibhauseffekt
ODP					Ozonschichtabbau
					Versäuerung
					Sommersmogbildung
					Aquatische Ökotoxizität
					Terrestrische Ökotoxizität
					Radioaktivität
Kältemittlemission	Strombereitstellung	Fertigung der Anlage	Entsorgung der Anlage	Kältemittelherstellung	
					68..82% des Treibhauseffekts
					untersuchte Teilvorgänge

Bild 1: Untersuchte Umwelteinwirkungen und Teilvorgänge. Vergleich mit dem TEWI (total equivalent warming impact) und dem ODP (ozone depletion potential) .

Ökobilanz für 7 kW-Wärmepumpe (Sole/Wasser)

Im Folgenden wird nur auf die Ergebnisse für **Wärmepumpen** als einem der vier in [2] untersuchten typischen Anwendungsbeispiele eingegangen. Den Ökobilanzen liegen dabei die in der Tabelle 1 zusammengestellten Annahmen zugrunde.

Standardfall	Varianten
Bilanzgrenze: Wärmepumpe und Wärmequelle (aber ohne Wärmeverteilung!)	
Einstufiger Prozess (1 Kompressor, 1 Expansionsventil), optimiert für R134a	
Sole/Wasser (mit Bau der Erdwärmesonde)	Luft/Wasser
Jahresarbeitszahlen Sole-Wasser mit den Kältemitteln CO ₂ : 3.62 (Annahme), Propan: 3.82, R134a: 4.16, R404A: 3.62, R407C: 3.70, Isceon 59: 4.16 (Annahme), R22: 3.82 Die Abhängigkeiten der Umwelteinwirkungen von der Jahresarbeitszahl von 3 bis 4.5 werden in [2] aufgezeigt.	Luft-Wasser CO ₂ : 3.25 (Annahme) Propan: 3.59, R134a: 3.59, R404A: 3.25, R407C: 3.48, Isceon 59: 3.59 (Ann.), R22: 3.59
Heizleistung: 7 kW _{th} bei 0/35°C	50 kW _{th}
Heizungssystem mit 45°C Vorlauftemperatur bei -8°C Aussentemperatur	
Kältemittelfüllung: 1 kg bei Propan und bei CO ₂ ; 2 kg bei FKW	L/W 7 kW _{th} : 1.5 / 3 kg S/W 50 kW _{th} : 5 / 10 kg L/W 50 kW _{th} : 7.5 / 15 kg
Kältemittelleckage im Betrieb 8% pro Jahr (Mittel heute) Kältemittelverluste beim Füllen 3% der Füllung Kältemittelverluste beim Entsorgen 20 % der Füllung bei CO ₂ 100%.	2% pro Jahr (Ziel)
Betrieb mit CH-Strommix (inklusive 65% des Imports - 35% zeitgleicher Transitanteil des Imports)	Europäischer Mix (UCPTE), Gas-Kombikraftwerk, Gas-BHKW
Lebensdauer Wärmepumpe 15 a Lebensdauer Erdwärmesonde 15 a Jahresbetriebsdauer 1850 h / a	

Tabelle 1: Bilanzierungsannahmen für die Wärmepumpe.

Die Ergebnisse der Ökobilanzen für die Standardwärmepumpe werden einander im Bild 2 für natürliche Kältemittel (CO₂ und Propan), Fluorkohlenwasserstoffe (R134a, R404A, R407C und Isceon59) und dem teilhalogenierten Kohlenwasserstoff R22 als Referenzkältemittel gegenübergestellt. Dabei werden die jeweiligen Höchstwerte für einen besseren Vergleich als 100% gesetzt. Die Tabelle 2 enthält die Absolutwerte der acht untersuchten Umwelteinwirkungen.

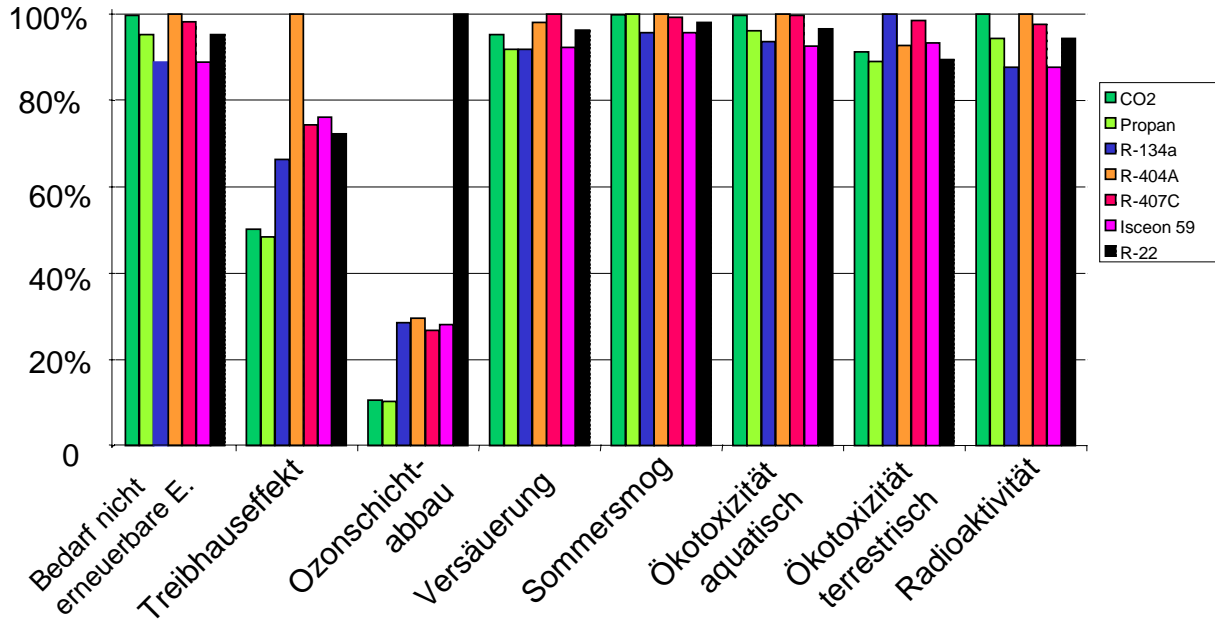


Bild 2: Ergebnisse der Ökobilanzen für die 7 kW_{th}-Standardwärmepumpe (Sole/Wasser, mit der Umweltbelastung zur Erdwärmesondenbohrung). Absolutwerte der einzelnen Umwelteinwirkungen in der Tabelle 2 (nach [2]).

Umwelteinwirkung	100% im Bild 2 bedeuten
nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf	0.733 [TJ Primärenergie-Aequivalent]
Treibhauseffekt	28'500 [kg CO ₂ -Aequivalent]
Ozonschichtabbau	0.27 [kg R11-Aequivalent]
Versäuerung	106 [kg SO ₂ -Aequivalent]
Sommersmogbildung	41.9 [kg Ethylen-Aequivalent]
aquatische Ökotoxizität	3.4E6 [kg 1,4-DCB ² -Aequivalent]
terrestrische Ökotoxizität	66 [kg 1,4-DCB-Aequivalent]
Radioaktivität	12'200 [kBq U235-Aequivalent]

Tabelle 2: Absolutwerte der im Bild 2 gezeigten Umwelteinwirkungen für die 7 kW_{th}-Sole/Wasser-Wärmepumpe zur Erzeugung von 1 TJ Wärme.

Der **nicht erneuerbare Primärenergiebedarf** wird im Wesentlichen durch die Leistungszahl beziehungsweise die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe bestimmt. Da diese nicht nur von den thermodynamischen Eigenschaften des Kältemittels sondern auch von der optimalen Abstimmung der Komponenten des ganzen Kältekreislaufs auf das jeweilige Kältemittel abhängt, sind die Unterschiede im Primärenergiebedarf nur bedingt relevant für die Wahl zwischen natürlichen und FKW-Kältemitteln. Beim angenommenen schweizerischen Strommix fallen über 75% des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs auf Uran, 11% bis 12% auf Erdöl, 7% auf Steinkohle und 3% auf Braunkohle.

Beim Treibhauseffekt ist die Abhängigkeit vom Kältemittel deutlich. Während er bei den natürlichen Kältemittel zu über 90% durch CO₂ bedingt ist, beträgt der Anteil der Kältemittlemissionen bei den FKW und dem R22 31% bis 48%. Gegenüber FKWs ergeben natürliche Kältemittel eine **Reduktion des Treibhauseffekts um 28% bis 58%**. Wie im Bild 4 gezeigt wird, schrumpft dieser Vorteil bei künftigen geringeren

² DCB Dichlorbenzol

Kältemittelverlusten wesentlich.

R22 wird infolge seines hohen **Ozonschichtabbaupotentials** für Neuanlagen in der Schweiz ab 2002 nicht mehr zugelassen. Der Ausstieg steht auch in anderen Ländern kurz bevor. Bei R22 fallen 86% des Ozonschichtabbaueffekts auf Kältemittelverluste. FKW aus heutiger mittlerer Produktion ergeben gegenüber R22 eine Reduktion des Ozonschichtabbaupotentials von rund 70%. Natürliche Kältemittel ergeben gegenüber FKW eine weitere erhebliche Reduktion. Das wesentlich schlechtere Abschneiden der FKW-Gruppe gegenüber den natürlichen Kältemitteln ist auf die bei der Herstellung von R134a frei werdenden FCKW-Emissionen zurückzuführen. Diese wenig bekannten FCKW-Emissionen erreichen gemäss einer Herstellerumfrage³ im Mittel ein erstaunliches Ausmass. Ihre Wirkung entspricht pro kg produziertem R134a dem Treibhauseffekt von 77 kg CO₂-Äquivalenten. Daraus wird aufgrund der im Herstellungsprozess entstehenden Zwischenprodukte (R113, R124 und andere) und der angenommenen Leckagen in [2] auf ein Ozonschichtabbaupotential von 0.0082 kg R-11-Äquivalenten geschlossen. Gemäss Einzelfirmenangaben erreichen neuere Produktionsanlagen mit Verbrennung der FCKW-Nebenprodukte allerdings wesentlich geringere Produktionsemissionen. Hier wäre mehr Transparenz und ein entsprechender Öffentlichkeitsdruck für die Schonung der Umwelt von grosser Bedeutung!

Auch bei natürlichen Kältemitteln ist das Ozonschichtabbaupotenzial nicht Null. Bei der Stromproduktion treten bei der Urananreicherung R114- Emissionen, auf Bohrinseln und Schiffen Halon- Emissionen und bei Isolationen R141b-Emissionen auf. Gegenüber FKWs ergeben natürliche Kältemittel bei mittleren globalen Herstellungsverfahren eine **Reduktion des Ozonschichtabbaupotentials um 60% bis 65%**. Bei modernen FKW-Herstellungsverfahren wird diese Reduktion allerdings wesentlich geringer ausfallen.

Die Hauptursache für die Umwelteinwirkungen **Versäuerung, Sommersmogbildung, aquatische Ökotoxizität und Radioaktivität** liegt wie beim Primärenergiebedarf in der Stromerzeugung. Zur Reduktion dieser Umwelteinwirkungen ist das Erreichen einer hohen thermodynamischen Effizienz der Wärmepumpe (hohe Leistungszahlen, hohe Jahresarbeitszahlen des Gesamtsystems) entscheidend. In dieser Richtung können Wärmepumpen sowohl mit natürlichen wie auch mit FKW-Kältemitteln verbessert werden. Bei CO₂ ist dies allerdings nur bei hoher Temperaturspannung auf der Wärmeabgabeseite aussichtsreich.

Bei der **Versäuerung** erreicht der durch die synthetischen Kältemittel bedingte Anteil nur etwa 5% bis 10%. Der Rest ist auf die Stromproduktion zurückzuführen (SO₂ 60% bis 70%, NO_x 24% bis 27%). Für die **Sommersmogbildung** sind die bei der Stromerzeugung entstehenden Stickoxide (Beitrag gut 67%) und Kohlenwasserstoffe die Hauptursache. Zur **aquatischen Ökotoxizität** (Giftwirkung auf die Gewässer) tragen die FKW-Kältemittel lediglich 0.8% bis 1.7% bei. Der hohe 1,4-DCB-Wert erklärt sich durch die viel geringere aquatische Ökotoxizität dieser Substanz in Gewässern.

Zwar liegen auch bei der terrestrischen Ökotoxizität (Giftwirkung auf den Erdboden) die Hauptursachen in der Stromerzeugung. Es lassen sich aber doch geringe Auswirkungen der Kältemittelwahl erkennen. Auffallend ist der erhebliche Beitrag von R134a. Hier entstehen als toxische Abbauprodukte kurzlebige Stoffe (Salzsäure, Flusssäure) und die langlebige Trifluoressigsäure TFA. Dieser sehr problematische Stoff trägt beim R134a 9.6%, beim Isceon 59 5.2%, beim R407C 5.2% und beim R404A 0.7% zur terrestrischen Ökotoxizität bei. Mit natürlichen Kältemitteln lässt sich

³ AFEAS Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study [3]

die **terrestrische Ökotoxizität** somit **gegenüber R134a um rund 10% und gegenüber Isceon 59 und R407C um rund 5% senken.**

Zusammenfassend lässt sich aus dem Bild 2 trotz dem dominierenden Einfluss der Stromproduktion auf die meisten Umwelteinwirkungen folgender Schluss ziehen: Natürliche Kältemittel belasten die Umwelt deutlich weniger als FKW. Dies gilt allerdings nur, wenn mit den natürlichen Kältemitteln vergleichbare Jahresarbeitszahlen wie mit FKW-Kältemitteln erreicht werden. Natürliche Kältemittel bewirken unter dieser Voraussetzung gegenüber FKW-Kältemitteln bei der untersuchten 7 kW-S/W-Standardwärmepumpe (Tabelle 1):

- einen deutlich geringeren Treibhauseffekt (Reduktion um 25 % bis 55%),
- einen wesentlich geringeren Ozonschichtabbau (Reduktion um 60% bis 65%) und
- eine etwas geringere terrestrische Ökotoxizität (Reduktion bis 10%).

Diese Vorteile der natürlichen Kältemittel nehmen bei geringeren Kältemittelverlusten und neuen FKW-Herstellungsprozessen allerdings deutlich ab.

Einfluss der Stromerzeugung

Die Dominanz der Stromerzeugung auf die meisten Umwelteinwirkungen verlangt nach einem Vergleich mit den Resultaten der Ökobilanzen für unterschiedliche Stromerzeugungsarten. Entsprechende Bilanzierungen wurden für die nachstehenden Stromerzeugungsarten durchgeführt:

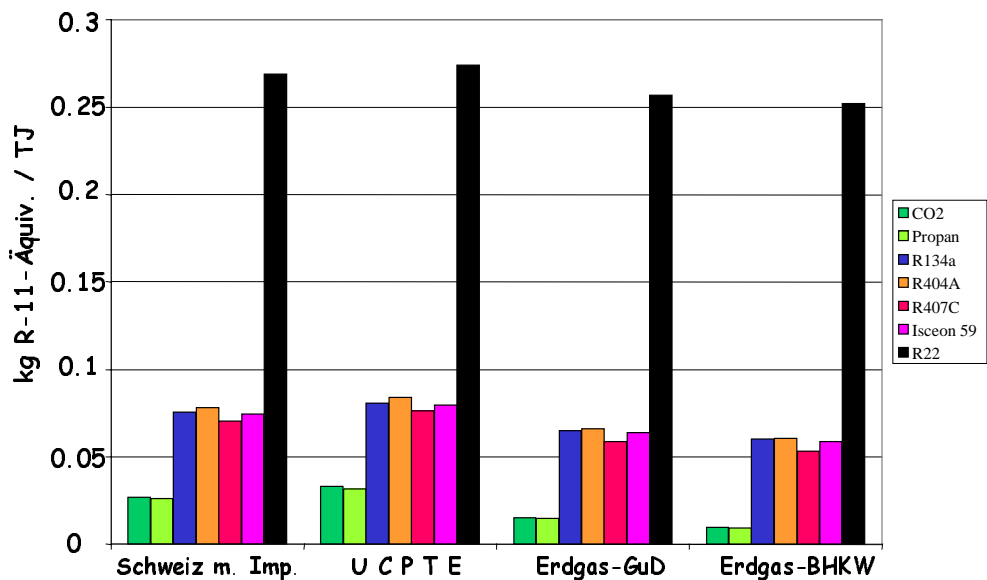
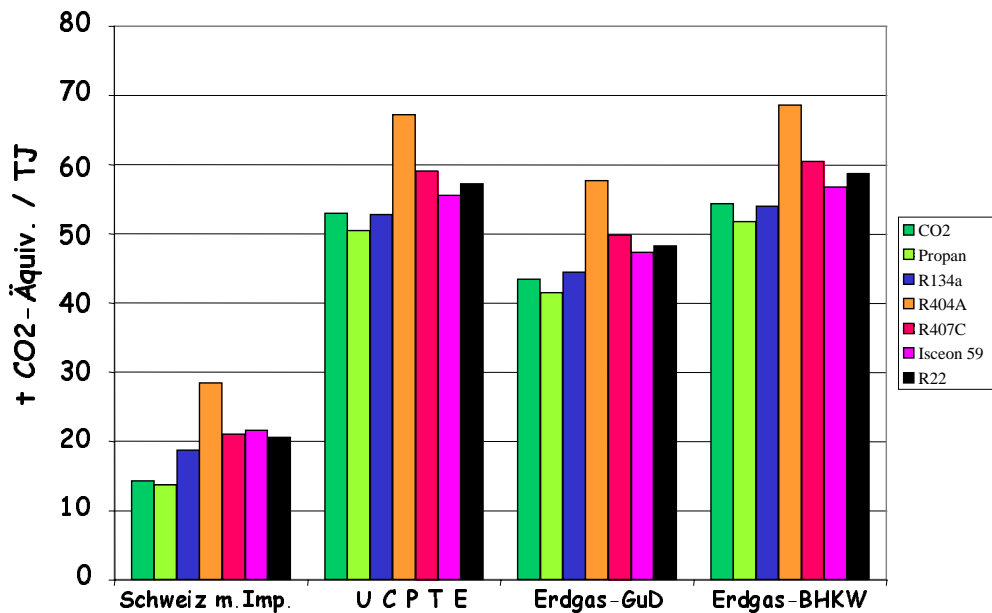
1. **Schweizerischer Strommix** mit Inlanderzeugung und 65% des importierten Stroms (die restlichen 35% des importierten Stroms werden als zeitgleicher Transit betrachtet). Dieser Strommix wird in der Untersuchung als Standard verwendet.
2. **Westeuropäischer Strommix UCPTÉ**
Der UCPTÉ⁴-Mix enthält die durchschnittliche Stromproduktion von Belgien, Deutschland, Frankreich, Griechenland, Italien, Kroatien/Slowenien/ Restjugoslawien, Luxemburg, Niederlande, Österreich, Portugal, Schweiz und Spanien in den Jahren 1990-1994.
3. **Erdgas-Kombikraftwerk GuD⁵** mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 57%.
4. **Gasmotor-Blockheizkraftwerk** mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 32.5% und einem thermischen Wirkungsgrad von 55%. Von den Emissionen des Gasmotors werden gemäss dem Exergieverhältnis von Strom und Wärme 76% der Stromproduktion angerechnet. Gemäss der neuen schweizerischen Luftreinhalteverordnung wird mit NO_x-Emissionen von 250 mg/Nm³ gerechnet (Magermotor ohne Katalysator).

Die Fälle 1 und 2 beschreiben die heutige Stromproduktion. Die Fälle 3 und 4 stehen für Zukunftsszenarien. Das Bild 3 zeigt die Ergebnisse für die für die Kältemittelwahl relevanten drei Umwelteinwirkungen. Da die stromproduktionsbedingten Emissionen bei Treibhauseffekt nun ein noch höheres Gewicht erhalten, werden die prozentualen

⁴ Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Electricité

⁵ GuD: Kombiniertes Gas- und Dampfturbinenprozess

Vorteile der natürlichen Kältemittel entsprechend geringer. Beim Ozonschichtabbau ergeben sich für den europäischen Strommix ähnliche Verhältnisse wie beim schweizerischen Strommix. Bei den Zukunftsszenarien Erdgas-Kombikraftwerk und Gas-motor-BHKW werden die Vorteile der natürlichen Kältemittel deutlicher. Bei der terrestrischen Ökotoxizität ergibt sich ein unterschiedliches Bild: Während die kleinen Verbesserungen gegenüber den FKW durch die Verwendung natürlicher Kältemittel bei den Zukunftsszenarien erhalten bleiben, lassen sich diese beim westeuropäischen Strommix nicht mehr klar feststellen. Der Grund liegt bei den hohen Emissionen der Stein- und Braunkohlekraftwerke, was hier zu einer stärkeren Reaktion auf Unterschiede in den Leistungszahlen führt.



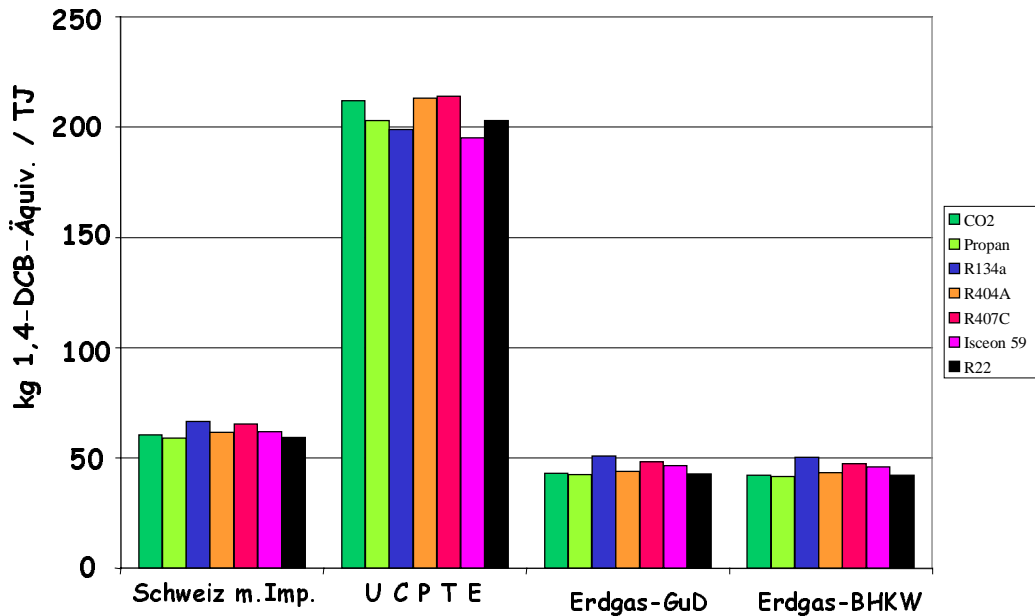
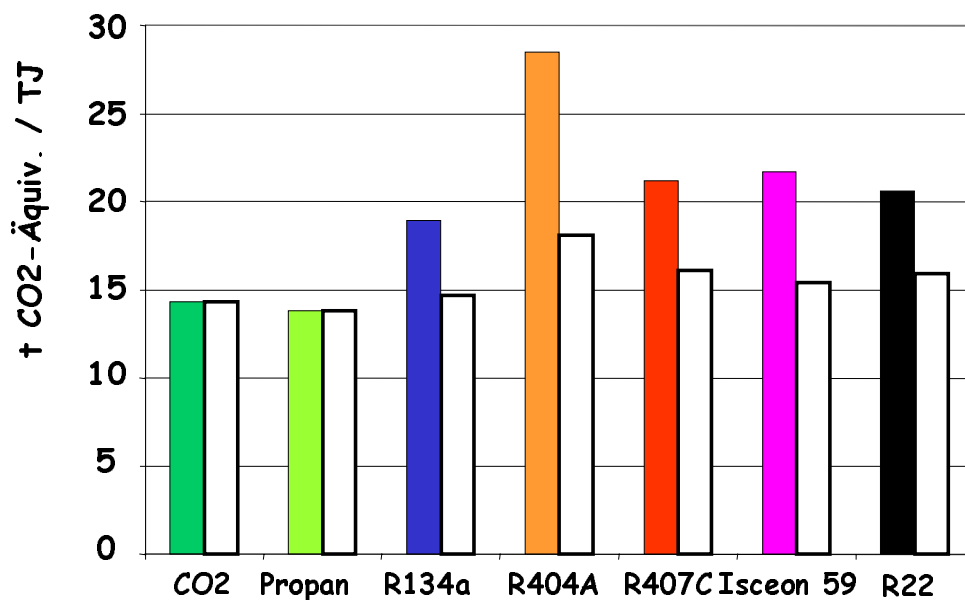


Bild 3: Vergleich der für die Kältemittelwahl relevanten Umwelteinwirkungen für unterschiedliche Stromproduktionsarten. Es wird jeweils die gleiche Heizleistung von 1 TJ vorausgesetzt. Oben: Treibhauseffekt, Mitte: Ozonschichtabbau, unten: terrestrische Ökotoxizität. (nach [2])

Einfluss des Kältemittelverlusts

Im Standardfall wurde mit relativ hohen jährlichen Kältemittelverlusten im Betrieb von 8% gerechnet. Darin eingeschlossen sind allerdings Totalverluste infolge schadhafter Leitungen und falscher Manipulationen. Künftiger Zielwert ist ein Kältemittelverlust von 2% pro Jahr. Wie das [Bild 4](#) anhand der relevanten drei Umwelteinwirkungen zeigt, können damit die Nachteile der R134a-haltigen FKW-Kältemittel gegenüber den natürlichen Kältemitteln teilweise erheblich reduziert werden. Insbesondere bei der terrestrischen Ökotoxizität lassen sich bei den reduzierten Kältemittelverlusten kaum noch Unterschiede zwischen den Kältemitteln feststellen. Wenn aus Sicherheitsgründen (Propan) oder infolge einer zu bescheidenen Leistungszahl (CO₂ bei geringen Temperaturspreizungen auf der Wärmeabgabeseite) auf den Übergang zu natürlichen Kältemitteln verzichtet wird, ist einer Senkung des Kältemittelverlusts somit grösste Aufmerksamkeit zu schenken!



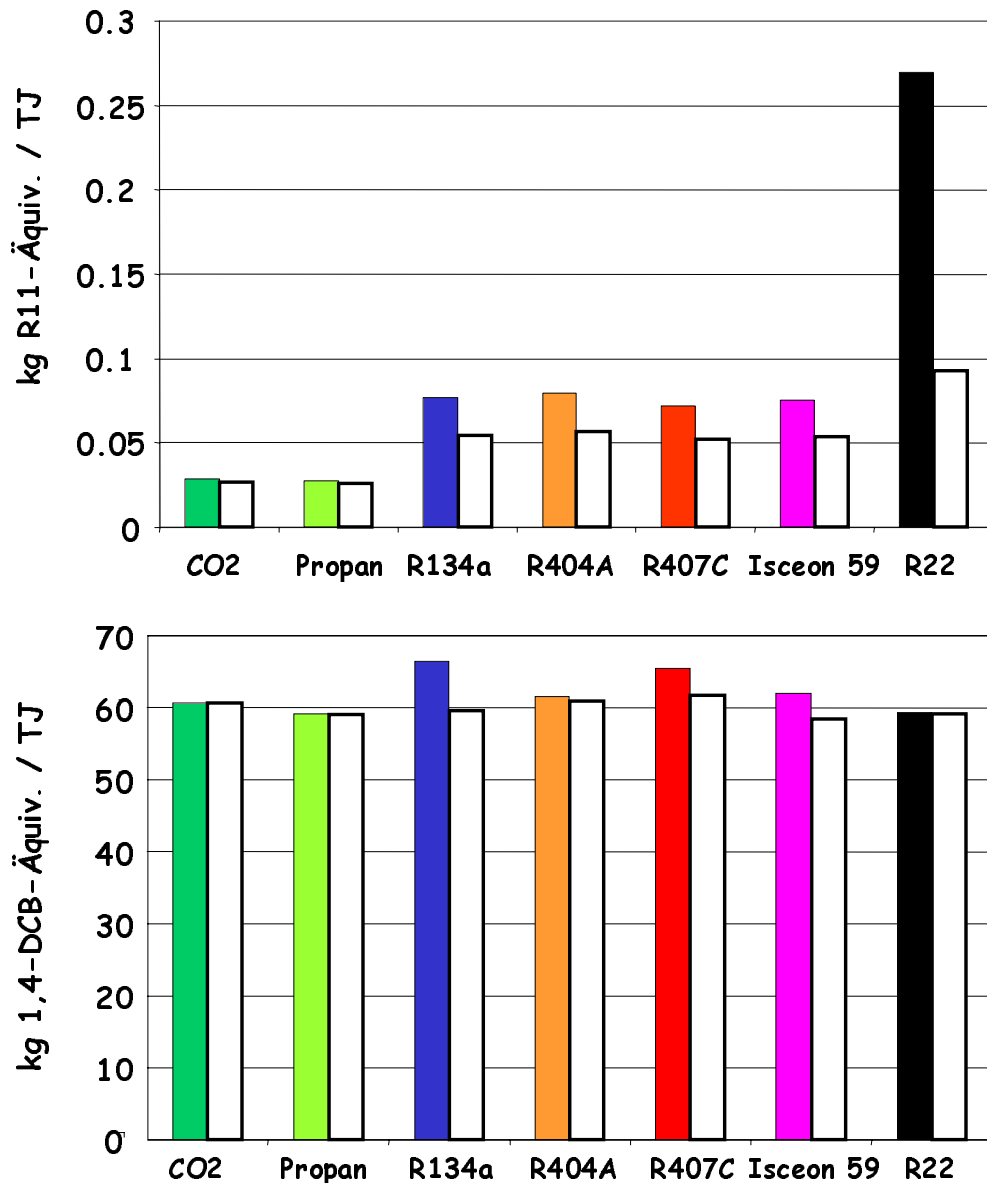


Bild 4: Vergleich der für die Kältemittelwahl relevanten Umwelteinwirkungen für unterschiedliche Kältemittelverluste im Betrieb. Links (ausgefüllt): 8% pro Jahr; rechts Zukunftserwartung 2% pro Jahr. Oben: Treibhauseffekt, Mitte: Ozonschichtabbau, unten: terrestrische Ökotoxizität. CH-Strommix. (nach [2])

Einfluss von Grösse und Bauart der Wärmepumpe

Zur Klärung des Einflusses der Wärmepumpengrösse und der Art der Wärmequelle wurden zusätzlich zur Standardwärmepumpe nach der Tabelle 1 eine Sole/Wasser-Wärmepumpe mit 50 kW Wärmeleistung und Luft/Wasser-Wärmepumpen mit 7 kW und 50 kW Wärmeleistung untersucht: Bild 5. Auffallend ist bei den natürlichen Kältemitteln das bessere Abschneiden der Luft/Wasser-Wärmepumpe gegenüber der Sole/Wasser-Wärmepumpe beim Treibhauseffekt und beim Ozonschichtabbau und die generell geringere terrestrische Ökotoxizität der Luft/Wasser-Aggregate. Dies ist auf die doch erhebliche Umweltbelastung durch den Bau der Erdwärmesonden zurückzuführen. Die absoluten Werte der Umwelteinwirkungen sind bei den 50 kW-Wärmepumpen infolge der geringeren spezifischen Füllmenge kleiner.

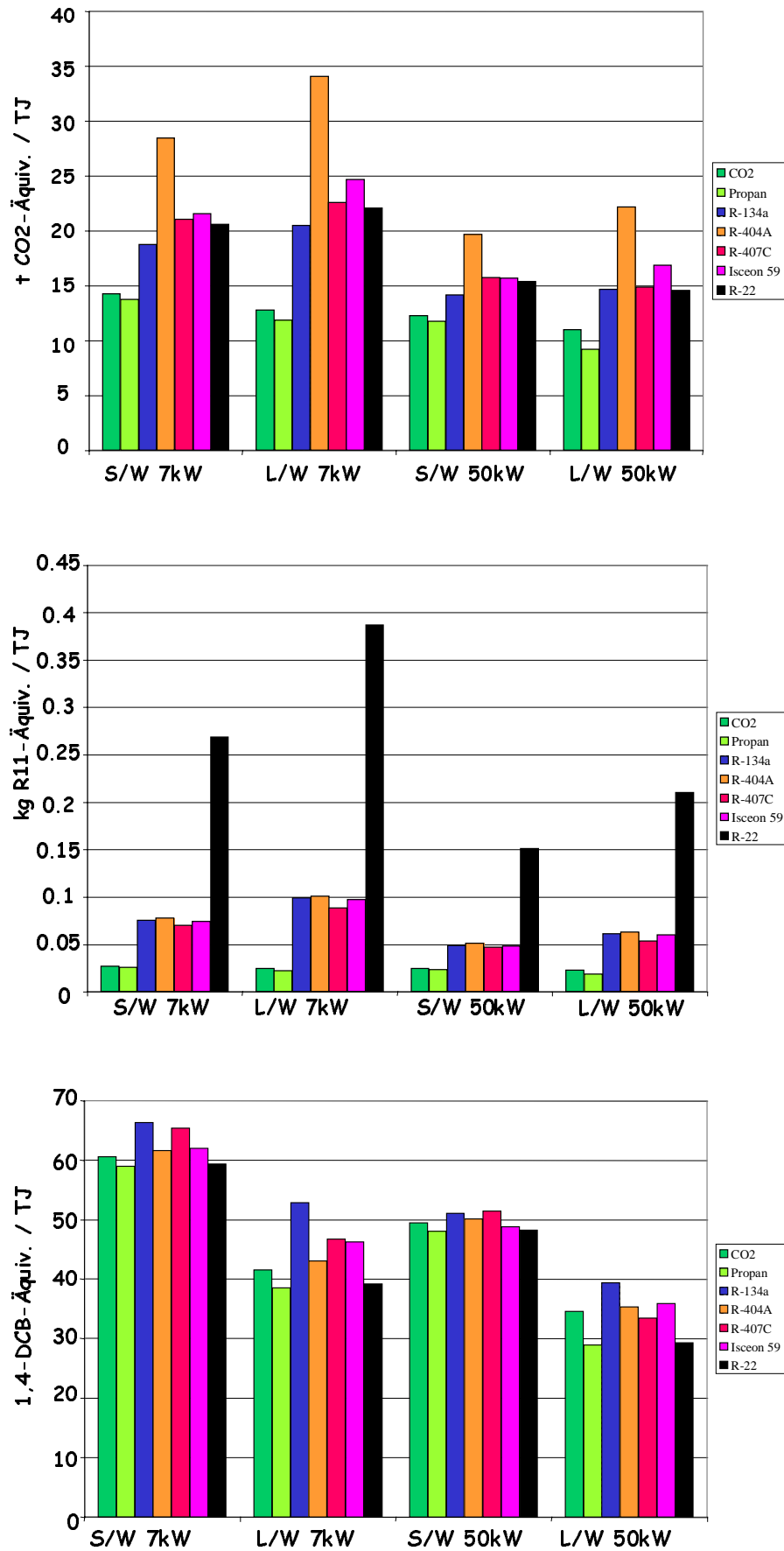


Bild 5: Vergleich der für die Kältemittelwahl relevanten Umwelteinwirkungen für unterschiedliche Wärmepumpen. Oben: Treibhauseffekt, Mitte: Ozonschichtabbau, unten: terrestrische Ökotoxizität. CH-Strommix (nach [2]).

Schlussfolgerungen

1. Die **Emissionen aus der Erzeugung des elektrischen Stroms** sind für die meisten Umwelteinwirkungen dominant. Voraussetzung für den Übergang zu natürlichen Kältemitteln ist deshalb das Erreichen einer vergleichbaren Leistungszahl wie mit den FKW. Problematisch ist in dieser Beziehung CO₂ bei kleinen Temperaturspreizungen auf der Wärmesenkenseite.
2. Bei vergleichbaren Leistungszahlen und heutigen durchschnittlichen Kältemittelverlusten belasten **natürliche Kältemittel** die Umwelt weniger als FKW. Sie bewirken bei Wärmepumpen für die in der Tabelle 1 beschriebenen Systeme im Bereich von 7 kW bis 50 kW Wärmeleistung, Erdboden oder Luft als Wärmequelle und Jahreskältemittelverluste im Betrieb von 2% bis 8% insbesondere
 - einen **geringeren Treibhauseffekt** (Reduktion um 5% bis 65%)
 - einen **geringeren Ozonschichtabbau** (Reduktion um 50% bis 80% bei durchschnittlichen heutigen FKW-Herstellungsverfahren – wesentlich weniger bei modernen Herstellungsverfahren)
 - bei höheren Kältemittelverlusten etwas weniger **terrestrische Ökotoxizität** (Reduktion um 0 bis 20%).
3. Eine **wesentliche Verbesserung** der Umweltverträglichkeit ist auch **bei der Verwendung von FKWs** zu erreichen durch:
 - Modernisierung der FKW-Produktionsprozesse (FCKW-Verbrennung) und
 - Reduktion der Kältemittelverluste bei Füllung, Betrieb, Wartung und Entsorgung.
4. Nach konsequenter Realisierung der unter 3 aufgeführten Massnahmen kann aus heutiger Sicht nicht mehr von einer eindeutigen ökologischen Überlegenheit natürlicher Kältemittel gesprochen werden. Das **Langzeitverhalten der FKW ist aber noch wenig bekannt**. Nach den FCKW-Erfahrungen ist Vorsicht geboten. **Ein Übergang zu natürlichen Kältemitteln** ist deshalb dann ratsam,
 - **wenn das Risiko bei vergleichbaren Leistungszahlen und Systemkosten tragbar ist** (z.B. Kohlenwasserstoffe für aussen aufgestellte Wärmepumpen) und
 - **wenn technische Alternativen genügend entwickelt sind** (z.B. künftig CO₂ bei hohen Temperaturspreizungen auf der Wärmesenkenseite und in der Transportkühlung).

-
- [1] Thomas Weibel: Vergleichende Umweltrelevanz des Einsatzes alternativer Kältemittel in Kompressions-Wärmepumpen und –Kälteanlagen, Bundesamt für Energie 1996 (zu beziehen unter der Artikel-Nr. 30465 bei ENET, Administration und Versand, Postfach 130, 3000 Bern 16, n+1@email.ch, 031-352-19-00)
Zusammenfassung von M.Zogg im Tagungsband des SVK-Herbstkolloquiums 1999.
- [2] Rolf Frischknecht: Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel, Ökobilanzen für Wärmepumpen und Kälteanlagen. Forschungsprojekt des Bundesamts für Energie, ab Januar 2000 unter der Nummer 9933303 bei ENET erhältlich.
- [3] Homepage der FKW-Hersteller www.afeas.org