

NATÜRLICHE KÄLTEMITTEL FÜR PKW-KLIMAAANLAGEN

Ein Beitrag zum Klimaschutz



Impressum

Herausgeber: Umweltbundesamt
Pressestelle
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau

E-Mail: pressestelle@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Autor: Gabriele Hoffmann,
Dr. Wolfgang Plehn

Stand: September 2010

Gestaltung: UBA

Titelfoto: UBA-Dienstfahrzeug mit
CO₂-Klimaanlage © UBA

Inhalt

1. Einführung	2
2. Die heutige Situation	2
2.1 Bestand und Klimatisierungsgrad von Pkw	2
2.2 Das Treibhausgas Tetrafluorethan (R134a)	2
2.3 Beitrag zum Treibhauseffekt: Pkw-Klimaanlage und Kältemittelfreisetzung	2
2.4 Gesetzliche Regelungen	3
3. Kältemittel für die Pkw-Klimatisierung	3
3.1 Kohlendioxid (R744) - als Kältemittel ein Beitrag zum Klimaschutz	3
3.2 Kohlenwasserstoffe - in Australien inzwischen verbreitet eingesetzt	4
3.3 Fluorierte Ersatzkältemittel - ein Lösungsweg?	4
3.3.1 1,1-Difluorethan (R152a)	4
3.3.2 2,3,3,3-Tetrafluorpropen (R1234yf)	4
3.3.3 Weitere fluorierte Kältemittel	6
4. Ausblick	6
5. Verwendete Literatur	7

1. Einführung

Pkw-Klimaanlagen enthalten heute ein Kältemittel, das einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung des Treibhauseffektes leistet. Derzeit stammen etwa 30 % der weltweiten Emissionen teilfluorierter Kohlenwasserstoffe aus Pkw-Klimaanlagen [UNEP 2009]. Deshalb ist in Europa nach der Richtlinie 2006/40/EG über Emissionen aus Klimaanlagen in Kraftfahrzeugen dieses Kältemittel, beginnend ab dem Jahr 2011, durch einen weniger klimaschädlichen Stoff zu ersetzen.

2. Die heutige Situation

2.1 Bestand und Klimatisierungsgrad von Pkw

Am 1. Januar 2010 waren in Deutschland 41,7 Millionen Pkw zugelassen. Bereits drei Viertel aller in Deutschland zugelassenen Pkw sind klimatisiert. In den vergangenen Jahren hat der Ausrüstungsgrad der Neufahrzeuge mit Klimaanlagen stark zugenommen. War im Jahr 1995 nur ein Viertel aller in Deutschland neu zugelassenen Pkw klimatisiert, sind es im Jahr 2008 mit 96 Prozent fast alle neuen Pkw [KBA 2010; Schwarz 2004; Schwarz 2010].

2.2 Das Treibhausgas Tetrafluorethan (R134a)

Als Kältemittel in mobilen Klimaanlagen wird heute fast ausschließlich Tetrafluorethan eingesetzt. Tetrafluorethan ist ein teilfluorierter Kohlenwasserstoff, abgekürzt HFKW¹-134a, als Kältemittel ist die Bezeichnung R134a üblich, wobei „R“ für Refrigerant (deutsch: Kältemittel) steht. Sein Beitrag zum Treibhauseffekt (GWP)², ist 1430 mal³ höher als der von Kohlendioxid.

Noch bis zum Jahr 2017 dürfen in Europa Klimaanlagen von vielen neuen Pkw mit dem Kältemittel R134a befüllt sein (siehe auch Kapitel 2.4 Gesetzliche Regelungen). Obwohl sich die durchschnittliche Füllmenge in den letzten Jahren auf unter 0,7 Kilogramm Kältemittel pro Klimaanlage verringert hat, erhöhte sich durch den stark steigenden Ausrüstungsgrad mit Klimaanlagen der jährliche Verbrauch des Kältemittels R134a zur Erstbefüllung von Pkw-Klimaanlagen deutlich. Im Jahr 1995 wurden in Deutschland in Pkw-Klimaanlagen noch 1.400 Tonnen des Kältemittels R134a eingefüllt, im Jahr 2008 bereits 3800 Tonnen.

Insgesamt befanden sich im Jahr 2008 in Deutschlands Pkw-Klimaanlagen etwa 23.645 Tonnen des Kältemittels R134a, das entspricht einer Menge von etwa 31 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten [Schwarz 2010].

2.3 Beitrag zum Treibhauseffekt: Pkw-Klimaanlage und Kältemittelfreisetzung

Die Pkw-Klimaanlage arbeitet wie ein Kühlschrank mit einer Kompressionskälteanlage, wobei der Innenraum des Pkw dem Kühlschrankinnenraum entspricht. Klimaanlagen für Pkw sind aber im Gegensatz zum Kühlschrank keine völlig abgeschlossenen Systeme, denn die Kompressoren werden mechanisch über eine Welle vom Fahrzeugmotor angetrieben und sind den Vibrationen des Motors ausgesetzt; das Kältemittel strömt durch Schläuche zu den übrigen Bauteilen des Kältekreislaufs. Daher tritt bereits im Normalbetrieb der Anlage im Pkw Kältemittel allmählich durch die Dichtungen der Klimaanlage in die Atmosphäre aus. Die Freisetzung des Kältemittels in die Umwelt erfolgt aber auch bei der Erstbefüllung, beim Service in der Werkstatt, bei der Zerstörung der Anlage durch Unfälle oder Steinschlag und bei der Entsorgung der Klimaanlagen [Schwarz 2001; Schwarz 2005].

Die Freisetzung von Kältemitteln – die sogenannten Kältemittlemissionen – steigen in Deutschland weiter an. Waren es im Jahr 1995 erst 133 Tonnen R134a, betrug die Freisetzung vom Kältemittel im Jahr 2008 schon 2700 Tonnen. Das entspricht einem Beitrag zum Treibhauseffekt pro Jahr von 3,5 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten. Zum Vergleich: Wenn heute in Deutschland 2 Millionen sparsame Pkw ein Jahr lang fahren, setzen sie ebenfalls etwa 3,5 Millionen Tonnen CO₂ frei.⁴

Bezieht man die Kältemittlemission auf die mit dem Auto zurückgelegten Kilometer, werden durch das Kältemittel etwa 7 Gramm CO₂ zusätzlich zum Kohlendioxid, das aus dem Kraftstoff stammt, freigesetzt.⁵

Schon heute ist in Deutschland über ein Drittel aller Emissionen der Stoffgruppe der teilfluorierten Kohlenwasserstoffe auf Pkw-Klimaanlagen zurückzuführen. Falls weiterhin R134a eingesetzt wird, ist mit einem weiteren Anstieg der Emissionen auf 3.500 Tonnen dieses Kältemittels im Jahr 2020 zu rechnen [Schwarz 2003; Schwarz 2010]. In vielen Ländern mit im Durchschnitt älteren Fahrzeugen und weniger entwickeltem Service- und oft fehlenden Entsorgungsstrukturen liegen die Kältemittlemissionen über die Lebensdauer des Pkw meist deutlich höher. Weltweit wird erwartet, dass die Emissionen ohne Maßnahmen weiter ansteigen und im Jahr 2020 über 180.000 Tonnen R134a pro Jahr betragen werden, dies entspricht ungefähr 240 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten [UNEP 2009].

2.4 Gesetzliche Regelungen

Am 4. Juli 2006 trat die EU-Richtlinie⁶ über Emissionen aus Klimaanlage in Kraftfahrzeugen, auch MAC⁷-Richtlinie genannt, in Kraft. Beginnend ab 1. Januar 2011 verbietet diese EU-Richtlinie Klimaanlage, die als Kältemittel fluorierte Treibhausgase mit einem Treibhauspotenzial (GWP) über 150 enthalten in Pkw und kleineren Nutzfahrzeugen⁸. Der Ausstieg erfolgt langsam. Nicht mehr zugelassen und verkauft werden dürfen ab dem 1. Januar 2011 zunächst neue Fahrzeugtypen mit solchen Klimaanlage. Auch ist der nachträgliche Einbau in jegliche Fahrzeuge verboten. Ab dem 1. Januar 2017 müssen alle Klimaanlage neu gebauter Pkw- und Pkw-ähnlicher Nutzfahrzeuge mit einem Kältemittel mit einem GWP kleiner 150 befüllt sein⁹.

Außerdem enthält die Richtlinie Anforderungen an die Dichtheit von Klimaanlage, die für alle neu hergestellten Pkw und kleinere Nutzfahrzeuge mit R134a-Anlagen seit dem 21. Juni 2009 gelten und im Rahmen der Typenzulassung nachzuweisen sind.

3. Kältemittel für die Pkw-Klimatisierung

3.1 Kohlendioxid (R744) – als Kältemittel ein Beitrag zum Klimaschutz

Seitdem bekannt ist, dass die synthetischen Kältemittel die Ozonschicht schädigen und den Treibhauseffekt verstärken¹⁰, ist der Einsatz natürlicher Kältemittel wie CO₂ die umweltfreundlichste und zukunftsfähigste Lösung. Kohlendioxid (CO₂), ein Bestandteil der Luft, wurde bereits Mitte des letzten Jahrhunderts zur Kälteerzeugung verwendet. Wegen seiner guten kältetechnischen Eigenschaften und seines als Kältemittel sehr geringen Treibhauspotentials ist es in den letzten 10 Jahren zu einer Renaissance des Kältemittels CO₂ gekommen. Mit dem inzwischen erreichten technischen Wissensstand lassen sich mit CO₂ sehr energieeffiziente Kälte- und Wärmekreisläufe realisieren. Heute ist CO₂ als Kältemittel beispielsweise für den Supermarkt und in Heißwasser-Wärmepumpen eingeführt. Als Kältemittel wird CO₂ mit dem Kürzel R744 bezeichnet.

Auch für Pkw-Klimaanlagen haben deutsche Automobilhersteller und -zulieferer bereits in den 90er Jahren, schon vor Inkrafttreten der EU-Richtlinie, CO₂ als am besten geeignetes Kältemittel identifiziert. Die deutschen Automobilhersteller hatten im Jahr 2007 schließlich angekündigt, das Kältemittel CO₂ zu verwenden und mit der Vorbereitung der Serieneinführung begonnen. Entscheidend für die Wahl von CO₂ waren, neben den guten kälte-

technischen Eigenschaften, der für ein Kältemittel sehr geringe Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt (GWP von 1) und seine Stoffeigenschaften „nicht brennbar“ und „nicht giftig“. CO₂ ist kostengünstig und weltweit verfügbar, es fällt zum Beispiel als Nebenprodukt in der chemischen Industrie und bei der Luftzerlegung an.

Im Vergleich mit R134a und R152a (1,1-Difluorethan) ist mit CO₂ eine schnellere Abkühlung sowie ein schnelleres Aufwärmen des Fahrgastraums möglich, was nicht nur zu einem Komfortgewinn für den Endkunden führt, sondern auch die Sicherheit steigert, da beschlagene Scheiben schneller von Feuchtigkeit befreit werden können. Die Tests an Klimaanlage und im Pkw zeigen die hohe Effizienz von CO₂ als Kältemittel in Pkw-Klimaanlagen [Wieschollek, Heckt 2007; Wolf 2007; Neksa u.a. 2007; UBA 2008; Graz 2009].

Klimaanlagen mit dem Kältemittel CO₂ müssen, im Vergleich zum Kältemittel R134a, für höhere Drücke (von bis zu 135 bar) ausgelegt sein. Dafür war die Entwicklung neuer Komponenten für den Kältekreislauf erforderlich, die mit dem ingenieurtechnischen Sachverstand europäischer Ingenieure erfolgreich gelöst wurde. Der benötigte Bauraum, ein für die Gesamtfahrzeugkonstruktion wichtiger Faktor, erhöht sich für die neue CO₂-Technik nicht, die Anlagen haben sich wegen der guten kältetechnischen Eigenschaften von CO₂ eher ein etwas kleineres Volumen. Vorsorge muss getroffen werden, damit im Innenraum des Fahrzeuges keine zu hohen CO₂-Konzentrationen entstehen.

Heute sind alle Komponenten für die CO₂-Klimaanlage entwickelt, so dass die Technik serienreif ist. Mehrere große Automobilfirmen und Zulieferer in Europa, USA und Japan rüsteten, oft in gemeinsamen Programmen, Versuchsfahrzeuge mit CO₂-Klimaanlagen aus [Mager 2003; Wertenbach 2005; Neksa 2007; Parsch 2007; Riegel 2007; Morgenstern 2008; SAE 2009].

Ein weiterer Vorteil der CO₂-Klimaanlage ist, dass sie neben der Kühlfunktion im Sommer im Winter als Wärmepumpe zum schnellen Aufheizen des Fahrgastraums und insbesondere der Frontscheibe genutzt werden kann, wodurch die Sicherheit verbessert wird und andere übliche, weniger effiziente Zuheizsysteme verzichtbar werden. Eine Zuheizung ist zukünftig bei vielen Fahrzeugen, insbesondere bei hybrid- oder voll-elektrisch angetriebenen Fahrzeugen erforderlich, da die Abwärme eines sehr effizienten Motors oder Elektromotors zu gering ist, um ausreichend Wärme bereitzustellen [VDA 2004; Heinle u. a. 2003; Heckt 2004; Neksa 2005; TWK 2010].

Analysen des Ausstoßes an klimawirksamen Gasen der Pkw-Klimaanlagen mit verschiedenen Kältemitteln (LCCP)¹¹ mit experimentell ermittelten technischen Daten von CO₂-Komponenten zeigen Vorteile vom Kältemittel CO₂ in Bezug auf den Treibhausgasausstoß über den Lebensweg gegenüber R134a und R1234yf bei fast allen Klimabedingungen [Hafner 2004,2007; Neksa 2007; Wolf 2007].

3.2 Kohlenwasserstoffe - in Australien inzwischen verbreitet eingesetzt

Kohlenwasserstoffe, wie z. B. Propan oder Butan, haben sich als Kältemittel in zahlreichen Anwendungen bewährt. Da sie kein Ozonzerstörungspotenzial besitzen und ihr Treibhauspotenzial sehr gering ist, wird ihr Einsatz z.B. von Nichtregierungsorganisationen auch in mobilen Klimaanlagen befürwortet. In Australien und den USA sind Demonstrationsprojekte durchgeführt worden, bei denen herkömmliche Klimaanlagen z.B. mit Mischungen der Kohlenwasserstoffe Propan und Isobutan befüllt wurden [COM 2003; Maclaine-cross 2004]. Schätzungen gehen davon aus, dass in Australien in Klimaanlagen von etwa 1 Million Pkw Kohlenwasserstoffe nachgefüllt wurden [Hoare 2010].

Die leichte Entzündlichkeit von Kohlenwasserstoffen kann ein Risiko für die Fahrzeuginsassen darstellen. Ihr Einsatz in Autoklimaanlagen ist deshalb z. B. in den Vereinigten Staaten untersagt [EPA 2003]. Im Gegensatz zu den brennbaren fluorierten Treibhausgasen bildet sich beim Verbrennen von Kältemitteln auf der Basis von Kohlenwasserstoffen (z. B. bei einem Unfall) kein Fluorwasserstoff. Für die meisten Automobilhersteller kommt der Einsatz von Kohlenwasserstoffen in Fahrzeugklimaanlagen in der Regel nur in Betracht, wenn das Kältemittel durch die Verwendung eines zweiten Kreislaufes hermetisch abgeschlossen im Motorraum untergebracht werden kann, wie es für R152a nötig ist (s. Abschnitt 3.3.1).

3.3 Fluorierte Ersatzkältemittel - ein Lösungsweg?

Ziel von Teilen der Automobilindustrie war, einen Austauschstoff zu finden, bei dem die herkömmliche Anlagentechnik nicht verändert werden muss (ein sog. Drop-in-Stoff). Die chemische Industrie hat zunächst den teilfluorierten Kohlenwasserstoff HFKW-152a (R152a) vorgeschlagen und seit 2006 in rascher Folge verschiedenste neue Ersatzkältemittel mit einem Treibhauspotenzial unter 150 für Pkw-Klimaanlagen vorgestellt und wieder verworfen. Weiterverfolgt wurde bisher das HFKW-1234yf (R1234yf).

3.3.1 1.1-Difluorethan (R152a)

Einige, insbesondere US-amerikanische Hersteller erwägen, statt R134a ein anderes Treibhausgas, den teilfluorierten Kohlenwasserstoff (HFKW) 1.1-Difluorethan (R152a) einzusetzen. R152a hat mit einem GWP von 140 gegenüber dem heutigen Kältemittel R134a mit einem GWP von 1.430 ein geringeres Treibhauspotenzial.

R152a ist jedoch genau wie Kohlenwasserstoffe entflammbar, die Selbstentzündungstemperatur beträgt 455 °C. Im Brandfall setzt R152a als fluoriertes Stoff u. a. giftigen Fluorwasserstoff (HF) frei.

Im Jahr 2008 hat die amerikanische Umweltbehörde EPA das Kältemittel R152a zum Einsatz in Pkw-Klimaanlagen zugelassen, aber mit Auflagen versehen¹² [EPA 2008]. Eine Maßnahme, um die Sicherheit zu gewährleisten, ist z.B. die Installation eines zweiten Wärmetauschers in Verbindung mit einem zweiten Kreislauf, was die Energieeffizienz senken und die Kosten, die Größe und das Gewicht der Anlage erhöhen würde. Das Personal in der Produktion und im Service muss im Umgang mit einem entflammbaren Kältemittel geschult werden.

Bereits im Jahr 1990 hatten Sicherheitsbedenken dazu geführt, dass R152a von den deutschen Automobilherstellern als Ersatzstoff für den Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW) R12¹³ ausgeschlossen wurde. Einige Experten bezweifelten, dass alle Sicherheitsprobleme mit verhältnismäßigem Aufwand gelöst werden können [Mager 2005].

3.3.2 2,3,3,3-Tetrafluorpropen (R1234yf)

Der Stoff mit der Kurzbezeichnung R1234yf ist als Kältemittel ein relativ neuer Stoff, der zur Stoffgruppe der fluorierten Kohlenwasserstoffe (kurz: HFKW) gehört. Der chemische Name des Stoffes ist 2,3,3,3-Tetrafluorpropen.

R1234yf hat ein Treibhauspotenzial (GWP) von 4. Die atmosphärische Lebensdauer ist mit 11 Tagen gering, aber die Zerfallsprodukte entsprechen denen des Kältemittels R134a [Nielsen u.a. 2007; Papadimitrou u.a. 2008; Yau 2008].¹⁴ Ein sehr stabiles Zerfallsprodukt ist die algentoxische Trifluoressigsäure, die sich in der Umwelt anreichern kann. [Kajihara 2010; Luecken 2010].

R1234yf ist wie R152a und Kohlenwasserstoffe entflammbar, nach der GHS-Verordnung von muss R1234yf mit als extrem entzündbares Gas gekennzeichnet sein [GHS 2008]. Die Selbstentzündungstemperatur von R1234yf beträgt 405 °C (Vergleich: Propan 470 °C) [Honeywell 2008; Du Pont 2009]. R1234yf ist etwa 4-mal

schwerer als Luft. Es kann sich am Boden sammeln und dort explosionsfähige Gemische bilden. Beim Verbrennen bildet R1234yf wie alle fluorhaltigen Kältemittel giftigen Fluorwasserstoff (HF).

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) belegte in anwendungsnahen Versuchen bei der Verwendung von R1234yf die Bildung explosibler Gasmischungen und die Bildung von giftigem Fluorwasserstoff (HF). Konzentrationen über 90 ppm HF bei Brand oder Explosion im Fahrgastinnenraum wurden festgestellt.

Außerdem bildet sich bereits ohne Explosion oder Brand an heißen Oberflächen, die im Motorraum üblich sind, Fluorwasserstoff. Die ermittelten Konzentrationen von Fluorwasserstoff liegen in der Regel über dem AEGL 2-Wert¹⁵, dessen Überschreitung zu irreversiblen Schäden für die menschliche Gesundheit führt. [BAM 2010; UBA 2010a, b].

Die Untersuchungen der BAM zeigen, dass mit dem Einsatz von R1234yf Gefahren verbunden sind. Diese ergeben sich aus dem beim Brandfall und bei hohen Temperaturen bereits ohne Brand aus dem Kältemittel R1234yf entstehenden Fluorwasserstoff. In Deutschland brennen jährlich zwischen 30.000 bis 40.000 Fahrzeuge. Die Bildung von Fluorwasserstoff bei einem solchen Ereignis ist zu erwarten. Die BAM hat das zusätzliche Risiko auftragsgemäß nicht quantifiziert – dies können nur die Automobilhersteller für konkrete Fahrzeuge tun – verweist aber darauf, dass im Falle eines Einsatzes von R1234yf eine umfassende Risikoanalyse erforderlich ist und viele Maßnahmen zur Vorsorge getroffen werden müssen. Mögliche Maßnahmen sind beispielsweise die konsequente Abschirmung heißer Oberflächen im Motorraum, der Einbau eines automatischen Löschsystems im Motorraum, Vorkehrungen, die eine Einleitung von Fluorwasserstoff in den Passagiererraum unmöglich machen, die Vermeidung der Funkenbildung auch im Falle eines Unfalls (u. a. Abschaltung der Stromzufuhr) und die Information von Rettungskräften.

Die Pkw-Hersteller erhofften sich von dem neuen Kältemittel einen Ersatzstoff, der direkt in die herkömmliche Klimaanlage an Stelle des alten Kältemittels eingefüllt werden kann, in der Kältetechnik nennt man das einen „Drop-In“-Stoff. R1234yf kann allerdings nicht einfach in die alte R134a Anlage eingefüllt werden. Es müssen mindestens Kunststoffmaterialien wie Dichtungen und Schläuche ausgetauscht werden, ein neues, passendes Kälteöl gefunden werden. Weiterhin ist die Verträglichkeit des Kältemittels und seiner

Verunreinigungen mit dem Kälteöl und den weiteren Materialien der Klimaanlage sicherzustellen, wobei sich weitere Änderungen der Anlage ergeben können. Insofern ist mit R1234yf kein Drop-in-Stoff gefunden worden.

Die thermodynamischen Eigenschaften von R1234yf sind denen von R134a zwar ähnlich, aber R1234yf hat eine um 8 bis 15 % geringere Kälteleistung als R134a [Petitjean 2010; Eusitice 2010; Wiescholke 2009].

R1234yf ist empfindlicher als andere Kältemittel gegenüber Feuchtigkeit und Luft. Die Entwicklung von passenden Kälteölen und Additiven für das Kältemittel R1234yf wird von Ölherstellern und Kältetechnikinstituten als wesentlich komplizierter als für R134a eingeschätzt. Alle Materialien des Kältekreislaufes müssen auf die Verträglichkeit mit dem noch zu entwickelnden Kältemittel/Öl/Additiv-System getestet werden. R1234yf enthält bis zu 0,5 % Verunreinigungen, deren Zusammensetzung sich je nach Herstellungsprozess unterscheidet und die z.T. toxisch sind, wie 1,2,3,3-Pentafluorpropen (1225ye). Diese Verunreinigungen können die Stabilität des Kältemittel/Öl/Additiv-Systems und der Kältekreislaufkomponenten und Dichtungen wesentlich verringern [Low, Schwennesen 2009; Seeton 2010; Grimm 2010; Dixon 2010].

Den Großteil der Herstellungspatente für R1234yf halten die amerikanischen Chemiefirmen Honeywell und DuPont [Patente 2010]. Ein Europäisches Patent für die Verwendung von R1234yf in Klimaanlage wurde erteilt [Chemie. DE 2010].

Die Produktionstechnologie für R1234yf ist noch nicht im großtechnischen Maßstab in Betrieb, ab dem 4. Quartal 2011 plant DuPont erste kommerzielle Lieferungen an die Autoindustrie. Eine Anlage für den Bedarf im Weltmaßstab soll später folgen [Seeton 2010]. Zu den Kosten der Kältemittels R1234yf als auch zu den Kosten für die Anlagentechnik für R1234yf sind bisher keine konkreten Angaben erhältlich. Genannt werden Kältemittelkosten die 10- bis 20-mal höher sind als für R134a [Sorg 2009; Eustice 2010].

Trotz der Nachteile des Kältemittels und der offenen Fragen gaben die deutschen Automobilhersteller im Mai 2010 bekannt, dass sie ab dem Jahr 2011 das brennbare, fluorierte Kältemittel R1234yf für Klimaanlage neuer Pkw-Typen einsetzen wollen.

3.3.3 Weitere fluorierte Kältemittel

Im Jahr 2009 hat ein Chemikalienhersteller wiederum ein neues Kältemittelgemisch aus fluorierten Kohlenwasserstoffen vorgestellt, das aber erst frühestens 2014 auf dem Markt verfügbar sein soll. Das Treibhauspotenzial soll nahe 150 sein. Auch dieses Gemisch ist entflammbar. Allerdings soll die dieses Kältemittel energetisch besser als R134a und R1234yf sein. [Low 2009; Low, Schwennesen 2009; UNEP 2010]. Nähere Informationen sind derzeit nicht erhältlich, so dass eine Bewertung des Kältemittelgemisches nicht möglich ist.

Insgesamt gesehen ist – aus technischen Gründen und aus Sicht des Klimaschutzes – das Kältemittel CO₂ für die mobile Klimatisierung weiterhin die beste Alternative.

4. Ausblick

Für Pkw-Klimaanlagen ist CO₂ das am besten geeignete neue Kältemittel. CO₂ ist nicht brennbar und hat eine gute Kälteleistung. CO₂-Klimaanlagen sind energieeffizient: Im Sommer ist der Mehrverbrauch geringer und im Winter kann die Klimaanlage als Wärmepumpe geschaltet werden. CO₂ ist weltweit zu günstigen Preisen verfügbar.

CO₂ als Kältemittel hat das größte und kostengünstigste Minderungspotenzial für Treibhausgasemissionen bei Pkw weltweit. Die Emissionen des Kältemittels R134a werden weltweit weiter ansteigen; ohne Minderungsmaßnahmen werden sie im Jahr 2020 weltweit über 180.000 Tonnen betragen, dies entspricht ungefähr 240 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten¹⁶. Mit dem Einsatz von CO₂ als Kältemittel ließen sich diese Emissionen weitgehend vermeiden. Um eine vergleichbare Ersparnis mit motorischen Maßnahmen zu erreichen, müssten die Automobilhersteller den Kraftstoffverbrauch um etwa 10 % senken¹⁷.

Das fluorierte Kältemittel R1234yf erfüllt zwar die Anforderungen der Richtlinie 2006/40/EG über Emissionen aus Klimaanlagen in Kraftfahrzeugen, es ist aber keine Lösung, die den globalen Klimaschutz nachhaltig voran bringt. Das Treibhauspotential von R1234yf ist viermal höher als das von CO₂, und durch die Beibehaltung der bisherigen Klimatechnik können klimaschädliches R134a oder andere billigere Kältemittel nachgefüllt werden. Dies ist bei Anlagen mit dem Kältemittel CO₂ nicht möglich.

Auch für die Klimatisierung von zukünftigen hocheffizienten Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, aber auch von Hybrid- und Elektrofahrzeugen ist das Kältemittel CO₂ technisch die beste Lösung, um Kühlung und Heizung effizient zu kombinieren.

5. Verwendete Literatur

BAM - Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (2010): Ignition behaviour of HFO1234yf. Final Test Report, 22. Juni 2010, Messungen im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 363 01 262, (http://www.umweltbundesamt.de/produkte/dokumente/test_report_hfo1234yf_2010_06.pdf, 27.08.2010).

Chemie.DE - Information Service GmbH (2010): Honeywell erhält europäisches Patent für Kühlmittel mit niedrigem Treibhauspotenzial. Pressemitteilung chemie.de vom 6. Januar 2010 (<http://www.chemie.de/news/d/111381/>, 23.06.2010); Patent Nr. EP 1 716 216 B9, Titel: Compositions Containing Fluorine Substituted Olefins (<https://data.epo.org/publication-server>, 25.10.2010).

COM - European Commission, DG Environment (2003): How to Considerably Reduce Greenhouse Gas Emissions due to Mobile Air Conditioners. Consultation Paper, Brüssel, Belgien: COM.

Dargay, Joyce; Gately, Dermot; Sommer, Martin (2007): Vehicle Ownership and Income Growth, Worldwide: 1960-2030. January 2007, Joyce Dargay, Institute for Transport Studies, University of Leeds, England, UK

Dixon, Liz (2010) Results of Shrieve Evaluations of 1234yf Refrigerant on Mobile A/C Lubricant Performance and System Chemistry. SAE – Automotive Refrigerant and System Efficiency Symposium, 13-15. Juli 2010, Scottsdale, Arizona, USA.

Du Pont (2009): Material Safety Data Sheet 2,3,3,3-Tetrafluoro-1-propene. 1. Dezember 2009. EPA - US Environmental Protection Agency (2003): Questions and Answers on Alternative Refrigerants. (www.epa.gov/ozone/snap/refrigerants/qa.html#q12 30.10.03).

EPA - Environmental Protection Agency (2008):, 40 CFR Part 82 Alternatives for the Motor Vehicle Air Conditioning Sector Under the Significant New Alternatives Policy (SNAP) Program, Protection of the Stratospheric Ozone, Final rule. EPA-HQ-OAR-2004-0488, FRL-8578-1, Federal Register, Vol. 73, No. 114., June 12, 2008, Rules and Regulations, S. 33304.

Eustice, Harry (2010): A Vehicle Manufacturer's Perspective on Alternative Refrigerant Development. General Motors, MAC UNEP Workshop 3.-4 Juni 2010, Nanjing, China: UNEP.

GHS (2008): Verordnung (EG) 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG

und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr.1907/2006 (<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:353:0001:1355:DE:PDF>, 27.08.2010).

Graz, Martin (2009) Investigation on Additional Fuel Consumption for a R134a and R744 AC-System in a VW Touran. VDA Alternate Refrigerant Wintermeeting, 11.-12. Februar 2009, Saalfelden, Österreich, (<http://www.vda-wintermeeting.de/Presentations.24.0.html>, 23.07.2010).

Grimm, Ulrich (2010): Complex Interactions of Low GWP Refrigerants, A/C Oils, and Materials in MAC Circuits. SAE – Automotive Refrigerant and System Efficiency Symposium, 13-15. Juli 2010, Scottsdale, Arizona, USA.

Hafner, Armin; Jakobsen, Arne; Nekså, Petter; Pettersen, Jostein (2004): Life Cycle Climate Performance (LCCP) of Mobile Air-Conditioning Systems with HFC-134a and R-744. VDA Alternate Refrigerant Wintermeeting, 18.-19. Februar 2004, Saalfelden, Österreich.

Hafner, Armin; Nekså, Petter (2007): Global Environmental and Economic Benefits of Introducing R744 Mobile Air Conditioning. SINTEF Energy Research, Norwegen, (<http://www.r744.com/article.view.php?Id=532>, 13.09.2010).

Heckt, Roman (2004) CO₂ Heat Pump- optimized for fuel economy - Assessment of Different Refrigerant Based Supplemental Heaters in Vehicle Testing. VDA Winter Meeting, 18. Februar 2004, Saalfelden, Österreich, (<http://www.vda-wintermeeting.de>, 20.07.2010).

Heinle u. a. (2003): Zuheizsysteme für effiziente Pkw-Motoren. In: DKV-Tagungsbericht 2003, Bonn, Arbeitsabteilung III, 19.-21. November 2003, Stuttgart: DKV.

Hoare, B. (2010): Natural Refrigerants – an update from downunder. Green Cooling Association, Atmosphere 2010 (http://www.atmosphere2010.com/files/speakers/presentations/pdf/Hoare_green_cooling_association.pdf

Honeywell (2008): Material Safety Data Sheet 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene, HFO-1234yf. 10. November 2008.

Hurley, M.D., Wallington, T.J., Javadi, M.S., Nielsen, O.J. (2008): Atmospheric Chemistry of CF₃CF=CH₂: Products and mechanisms of Cl atom and OH radical initiated oxidation. Chemical Physics Letters 450, S. 263-267.

Kajihara, Hideo; Kazuya, Inoue; Kikuo, Yoshida; Ryuichi, Nagaosa (2010): Estimation of environmental concentrations and deposition fluxes of R-1234YF and its decomposition products emitted from air condition-

ning equipment to atmosphere. 2010 International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology, 17 – 19 February 2010, Tokyo, Japan.

KBA – Kraftfahrt-Bundesamt (2010) - Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2010. (http://www.kba.de/cln_016/nn_124584/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand__node.html?__nnn=true, 5.10.2010).

Luecken, Deborah; Waterland, Rober L.; Papasavva, Stella; Taddonio, Kristen; Hutzell, William T.; Rugh, John P.; Andersen, Stephen O. (2010): Ozone and TFA Impacts in North America from Degradation of 2,3,3,3-Tetrafluoropropene (HFO-1234yf), A Potential Greenhouse Gas Replacement. Environmental Science & Technology Vol. 44, No.1, S.343-348.

Maclaine-cross, Ian (2004): Usage and Risk of Hydrocarbon Refrigerants in Motor Cars for Australia and the United States. International Journal of Refrigeration, Volume 27, Issue 4, Juni, S. 339-345.

Mager, Robert (2003): New Technology: CO₂ (R 744) as an Alternative Refrigerant. Presentation at stakeholder conference on “Options to Reduce Greenhouse Gas Emissions due to Mobile Air Conditioning”. Organised by the European Commission and the US Environmental Protection Agency, 10.-11. Februar 2003, Brüssel, Belgien, (http://ec.europa.eu/environment/archives/mac2003/programme_presentations.htm 4.01.2010).

Mager, Robert (2005): Adaption of HFC-152a for a MAC System in a Passenger Vehicle. VDA Alternate Refrigerant Wintermeeting, 23.-25. Februar 2005 Saalfelden, Österreich, (<http://www.vda-wintermeeting.de/Archiv.26.0.html>, 20.07.2010).

Morgenstern, Stefan (2008): R744 MAC Status and System Standardisation. VDA Alternate Refrigerant Wintermeeting, 13.- 14. Februar 2008, Saalfelden, Österreich, (<http://www.vda-wintermeeting.de/Archiv.26.0.html>, 20.07.2010).

Nekså, Petter; Hafner, Armin; Wolf, Frank; Lien Kjerstin; Obrist Frank (2007): R744 the Global Solutions Advantages & Possibilities, VDA Alternate Refrigerant Wintermeeting, 14.-15. Februar 2007, Saalfelden, Österreich, (<http://www.vda-wintermeeting.de/Archiv.26.0.html>, 20.07.2010).

Nielsen, O.J.; Javadi, M.S; Sulbaek Andersen, M.P ; Hurley, M.D.; T.J. Wallington, T.J.; Singh, R. (2007): Atmospheric Chemistry of CF₃CF=CH₂: Kinetics and mechanisms of gas-phase reactions with Cl atoms, OH radicals, and O₃. Chemical Physics Letters 439, S.18-22.

Papadimitrou, V.C. u.a. (2008): CF₃CF=CH₂ and Z-CF₃CF=CHF: Temperature dependent OH rate coefficients and global warming potentials. Phys. Chem. Chem. Phys. Vol 10, S. 808-820.

Parsch, Willi (2007): ixetic- Precision to move. VDA Alternate Refrigerant Wintermeeting, 14.-15. Februar 2007, Saalfelden, Österreich, (<http://www.vda-wintermeeting.de/Archiv.26.0.html>, 20.07.2010).

Patente (2010): Patente zu HFKW-1234yf zu finden unter <http://www.faqs.org/patents>; Suche nach Stichwort „1234yf“.

Petitjean, Christophe; Benouali, Jugurtha (2010): R-1234yf Validation and A/C System Energy Efficiency Improvements. SAE – Automotive Refrigerant and System Efficiency Symposium, 13-15. Juli 2010, Scottsdale, Arizona, USA.

Riegel, Harald (2007): Status of R744 Development. VDA Alternate Refrigerant Wintermeeting, 14.-15. Februar 2007, Saalfelden, Österreich, (<http://www.vda-wintermeeting.de/Archiv.26.0.html>, 20.07.2010).

SAE-Society of Automotive Engineers (2009) SAE CRP (Cooperative Research Programs) 1234: Industry Evaluation of low global warming potential refrigerant HFO-1234yf. 10. November 2009 (<http://www.sae.org/standardsdev/tsb/cooperative/crp1234-3.pdf>, 3.07.2010).

Schwarz, Winfried (2001): Emissionen des Kältemittels R 134a aus mobilen Klimaanlage. Jährliche Emissionsraten von bis zu sieben Jahre alten Pkw-Klimaanlagen. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 360 09 006, Berlin: UBA, (<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2082.pdf>, 21.06.2010).

Schwarz, Winfried (2004): Emissionen, Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren von fluorierten Treibhausgasen (F-Gase) in Deutschland für die Jahre 1995-1998. Anpassung an die Anforderungen der internationalen Berichterstattung und Implementierung der Daten in das zentrale System Emissionen (ZSE). Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 201 41 261/01, Frankfurt/Main: Öko-Recherche.

Schwarz, Winfried (2005): Emissionen, Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren von fluorierten Treibhausgasen (F-Gasen) in Deutschland für die Jahre 1995-2001. Umweltbundesamt, Texte 14/2005.

Schwarz, Winfried (2003a): Emissionen und Emissionsprognose von H-FKW, FKW und SF₆ in Deutschland. Aktueller Stand und Entwicklung eines Systems zur jährlichen Ermittlung. Emissionsdaten bis zum Jahr 2001 und Emissionsprognosen für

die Jahre 2005, 2010 und 2020. 1. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben, erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 202 41 356, Berlin: UBA, (www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/treibhausgase.htm 30.12.03).

Schwarz, Winfried (2010): Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2008. Umweltbundesamt, Texte 41/2010:UBA.

Seeton, Christopher (2010): Countdown to R1234yf. Industry Preparation. Refrigerant and System Efficiency Symposium, 13-15. Juli 2010, Scottsdale, Arizona, USA.

Sorg, Walter (2009): Entwicklungsperspektiven im Kältemittelbereich (2). Deutsche Kälte-Klima-Tagung des DKV, 19.-20. November 2009, Berlin.

TREMOT - Transport Emission Model (2010): Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030. TREMOD Version 5.1 vom 19.4.2010. (<http://www.umweltbundesamt.de/verkehr/index-daten.htm>, 11.10.2010)

Tuazon, Ernesto C.; Atkinson, Roger (1993): Tropospheric Degradation Products of CH₂FCF₃ (HFC-134a). Journal of Atmospheric Chemistry 16 (4), S. 301-312.

TWK – Test- und Weiterbildungszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik (2010): Symposium: Kfz – Klimatisierung bei elektrischer Mobilität., 16.09. 2010, Karlsruhe: TWK.

UBA – Umweltbundesamt (2008): Presse-Hintergrundpapier: Natürliche Kältemittel – CO₂-Klimaanlagen im Praxistest, aktualisierte Fassung vom Mai 2009 (<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3639.pdf>, 25.10.2010).

UBA – Umweltbundesamt (2010a): Sicherheitsrisiken bei Pkw-Klimaanlagen nicht auszuschließen?. Presse-Information 006/2010, Dessau-Roßlau, 12. Februar 2010, (<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/d-pinfo10.htm>, 5.07.2010).

UBA – Umweltbundesamt (2010b): Umweltbundesamt für Kohlendioxid in Klimaanlagen -Tetrafluorpropen ist klima- und umweltschädlicher. Presse-Information 043/2010, Dessau-Roßlau, 26. August 2010, (http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2010/pd10-043_umweltbundesamt_fuer_kohlendioxid_in_klimaanlagen.htm, 27.08.2010).

UNEP – United Nations Environment Programme (2009): Task Force Decision XX/8 Report: Assessment of Alternatives to HCFCs and HFCs and Update of the

TEAP2005 Supplement Report Data. UNEP, Technology and Economic Assessment Panel, Mai 2009 (http://www.unep.ch/ozone/Assessment_Panels/TEAP/Reports/TEAP_Reports/teap-may-2009-decisionXX-8-task-force-report.pdf, 1.10.2010).

UNEP – United Nations Environment Programme (2010): TEAP 2010 Progress Report: Volume 1: Assessment of HCFCs and Environmentally Sound Alternatives, Scoping Study on Alternatives to HCFC refrigerants under high ambient Temperature conditions. UNEP, Technology and Economic Assessment Panel, Mai 2010 (http://www.unep.ch/ozone/Assessment_Panels/TEAP/Reports/TEAP_Reports/teap-2010-progress-report-volume1-May2010.pdf, 1.10.2010).

VDA – Verband der Automobilindustrie (2004): VDA Alternative Refrigerant Wintermeeting. 18.-19. Februar 2004, Saalfelden, Österreich.
Wertenbach, Jürgen (2005): SAE Alternate Refrigerant Cooperative Research Project Phase I and II. VDA Wintermeeting, 23.-24. Februar 2005, Saalfelden, Österreich.

Wiescholleck, Florian; Heckt, Roman (2007): Improved Efficiency for Small Cars with R744. VDA Alternate Refrigerant Wintermeeting, 14.-15. Februar 2007, Saalfelden, Österreich, (<http://www.vda-wintermeeting.de/Archiv.26.0.html>, 20.07.2010).

Wiescholleck, Florian (2009): Compressor Testing Results & Findings with the usage of HFO -1234yf. VDA Alternate Refrigerant Winter Meeting, 11-12. Februar 2009, Saalfelden Österreich, (<http://www.vda-wintermeeting.de>, 21.07.2010).

Wolf, Frank et al. (2007): R744 system efficiency improvements through new developments. JSAE Symposium Review of Automotive Air-Conditioning, 23.-25. Januar 2007, Tokio, Japan.

Yau, Jeffrey (2008): HFO-1234yf-Low GWP Refrigerant Update. Next Generation MAC Workshop, 23.-25. November 2008, Shanghai, China.

¹ HFKW-Kohlenwasserstoffe, die neben Kohlenstoff nur aus Wasserstoff und Fluor bestehen.

² Treibhauspotential –engl. Global Warming Potential (GWP) bezeichnet, wie viel Mal mehr ein Stoff zur Erwärmung der Erdatmosphäre beiträgt im Vergleich zu Kohlendioxid. Der Treibhauseffekt an sich ist absolut notwendig für das Leben auf der Erde, die Gase in der Atmosphäre halten die Wärmeabstrahlung der Erde teilweise zurück. Das Prinzip ist ähnlich wie beim Treibhaus, daher der Name. Problem ist, dass seit der Industrialisierung immer mehr treibhauswirksame Stoffe in die Atmosphäre freigesetzt werden (sog. anthropogener Treibhauseffekt), was zu einer Erhöhung der Temperaturen auf der Erde beiträgt und weitere Veränderungen des Klimas zur Folge hat.

³ Hinweis: Nach neuesten Berechnungen liegt das Treibhauspotential (GWP) für R134a bei 1430; alle hier verwendeten Zahlen stammen aus Berechnungen für den Weltklimarat (IPCC), bei dem der Faktor 1300 noch als Rechengrundlage diente. Verwendet wird üblicherweise das GWP für einen Zeitraum von 100 Jahren (GWP_{100}).

⁴ Durchschnittliche Jahresfahrleistung (gefahrne Strecke) 14.000 km/Jahr [TREMOT 2010], CO_2 Emission eines sparsamen Pkw ca. 120 g/km

⁵ Emission pro Pkw und Jahr 10% bei einer durchschnittlichen Gesamtfüllmenge von 0,69kg (Jahr 2008) ergeben sich 69 g/Jahr Kältemittel, Jahresfahrleistung von 14000 km/Jahr, Treibhauseffekt (GWP_{100}) von R134a=1430.

⁶ EU-Richtlinie 2006/40/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 17. Mai. 2006 über Emissionen aus Klimaanlagen in Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates, Amtsblatt der Europäischen Union Nr. L 161 vom 14.06.2006, S. 12-18.

⁷ MAC – Mobile Airconditioning – engl. für Fahrzeugklimaanlage.

⁸ Die Richtlinie gilt für kleinere Kraftfahrzeuge zur Personenbeförderung (Fahrzeugklasse M1) und zur Güterbeförderung (Fahrzeugklasse N1, Gruppe 1). Zur Klasse M1 zählen vor allem die Pkw und Kleinbusse, aber auch Sonderfahrzeuge wie Wohnmobile, Kranken- und Leichenwagen und beschussgeschützte oder rollstuhlgerechte Fahrzeuge. Zur Klasse N1, Gruppe 1 gehören kleinere Nutzfahrzeuge wie Kleintransporter, aber auch Sonderfahrzeuge wie Wohnanhänger.

⁹ Fahrzeuge der Klassen M1 und N1, Gruppe 1, deren Typgenehmigungen vor dem 1. Januar 2011 erfolgten.

¹⁰ Die FCKW (die Fluorchlorkohlenwasserstoffe) schädigen die Ozonschicht und verstärken den Treibhauseffekt, die FKW und H-FKW (voll- und teilfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe) verstärken „nur“ den Treibhauseffekt. Daher wurden die FKW und H-FK zunächst die Ersatzstoffe für FCKW.

¹¹ LCCP – engl. Life-Cycle Climate Performance – Analyse über den Lebenszyklus, die die Auswirkungen eines Produktes auf das Klima berechnet. Ein Autohersteller aus den USA entwickelte dieses Programm, mit dem der Ausstoß an klimawirksamen Gasen der Pkw-Klimaanlagen mit verschiedenen Kältemitteln berechnet werden kann (LCCP). Dabei werden die direkten und indirekten Emissionen an Treibhausgasen über den gesamten Lebenszyklus der Klimaanlage von der Herstellung über den Betrieb bis zur Entsorgung ermittelt. Allerdings ergeben sich, je nach zu Grunde gelegten Daten, Messwerten und Techniken unterschiedlichste Ergebnisse für die einzelnen Kältemittel. Eine LCCP ist weniger ausführlich als eine Lebenszyklusanalyse, die neben den klimawirksamen auch andere Stoffe und andere Wirkungen z.B. Toxizität und Versauerung einbezieht und neben der Atmosphäre andere Medien wie Boden, Luft, Pflanzen betrachtet. Außerdem gibt es bisher keine verbindliche Norm zur Erstellung von LCCPs.

¹² Voraussehbare Leckagen in den Fahrzeuginnenraum dürfen bei eingeschalteter Zündung nicht zu R152a-Konzentrationen über 3,7 Vol% über 15 Sekunden führen.

¹³ FCKW R12, ein die Ozonschicht schädigendes Kältemittel mit hohem Treibhauseffekt, das seit 1995 in Deutschland verboten ist und vor R134a für die Pkw-Klimatisierung zum Einsatz kam.

¹⁴ Zerfallsprodukte von R134a sind beispielsweise $HC(O)F$ und CF_3 -Radikale an der Erdoberfläche sowie $CF_3C(O)F$ in der Tropopause (Atmosphäreschicht, deren obere Grenzschicht in ca. 10 bis 15 km Höhe liegt, darüber beginnt die wesentlich weniger bewegte Stratosphäre) [Tuazon, Atkinson 1993; Hurley u.a. 2008].

¹⁵ AEGL = Acute Exposure Guideline Levels, Richtwerte für die akute Exposition, veröffentlicht durch US-National Research Council und National Academy of Science, AEGL 2 Wert für HF ist 95 ppm (Dauer 10 Minuten).

¹⁶ Daten aus Literatur [UNEP 2009], das entspricht bei 1,5 Milliarden Pkw in 2020 [Dargay 2007] 160 kg CO_2 -Äquivalenten pro Pkw pro Jahr

¹⁷ bei CO_2 Emission pro Pkw von 120 g/km und einer Jahresfahrleistung 14000 km /Jahr