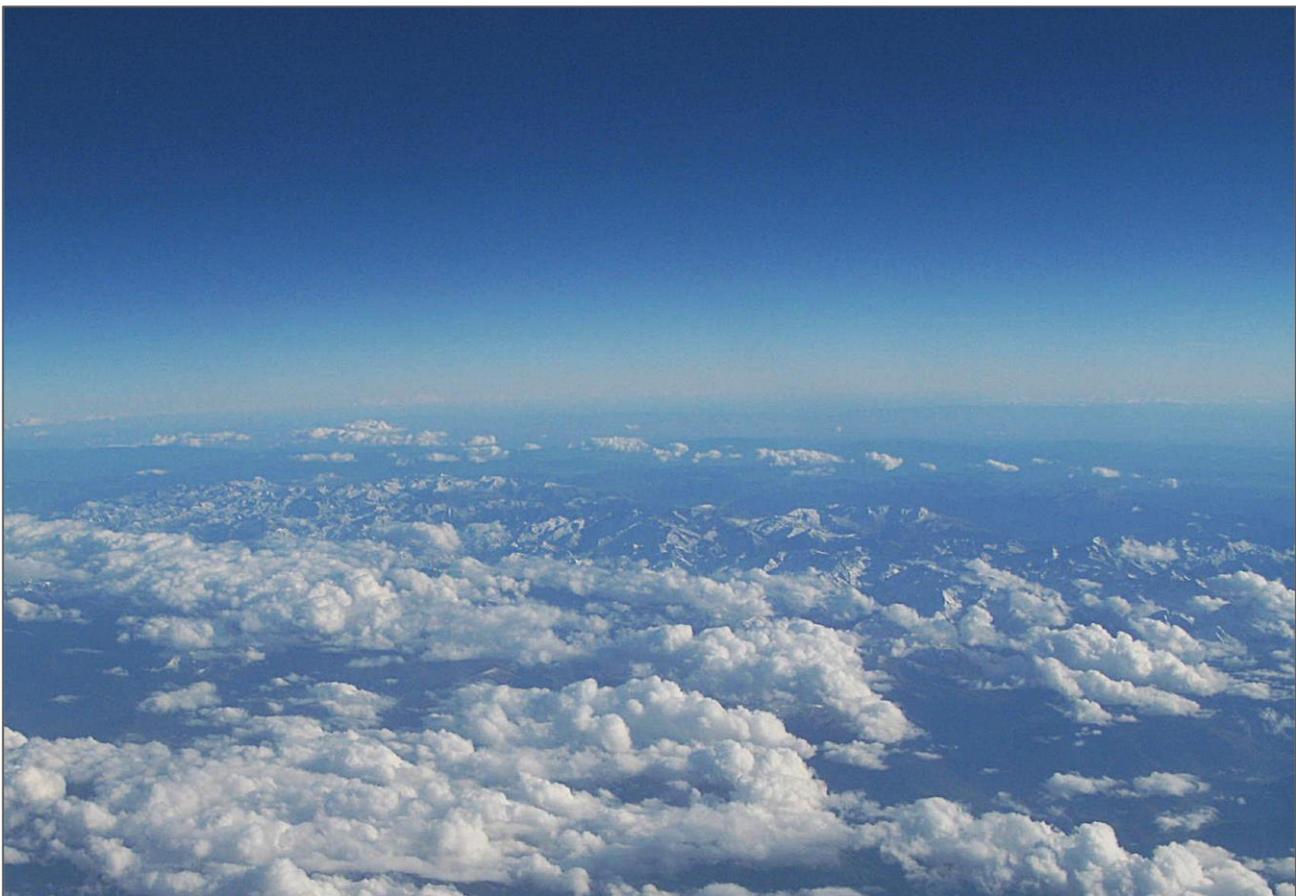


Wie Treibhausgase wirken



Die Atmosphäre ist der instabilste Teil des gesamten Klimasystems. Im untersten Abschnitt, in der Troposphäre findet das sich ständig schnell verändernde sichtbare Wettergeschehen statt. Die Vorgänge in den darüber liegenden Atmosphäreabschnitten können wir messen und nur in den polaren Gegenden auch als Nordlichter sehen.

Treibhausgase in der Atmosphäre verursachen den Treibhauseffekt, indem sie die thermische Infrarotstrahlung absorbieren und wieder in alle Richtungen – auch zur Erdoberfläche hin - ausstrahlen. Damit kommt ein Teil der absorbierten Strahlung wieder zur Erdoberfläche zurück. Beim Strahlungsgleichgewicht zwischen eingefangener und abgestrahlter Wärmestrahlung gibt es daher einen Unterschied zwischen dem Wert in der obersten und in der untersten Atmosphäre. Die oberste Atmosphäre ist an der Grenze zum umgebenden Weltraum bei etwa -18°C und die in der Nähe der Erdoberfläche bei etwa $+15^{\circ}\text{C}$ im Strahlungsgleichgewicht. Die Bereiche nahe der Erdoberfläche erhalten durch den natürlichen Treibhauseffekt einer Atmosphärenhülle mehr Strahlungsener-

gie, sind damit wärmer und müssen daher für einen Gleichgewichtszustand auch mehr Energie abstrahlen.

Die Treibhausgase entstehen teilweise durch natürliche und teilweise durch vom Menschen angewendete Prozesse. Einige Treibhausgase kommen nicht natürlich vor und werden ausschließlich vom Menschen produziert, wie beispielsweise bestimmte Stoffgruppen der Halogenkohlenwasserstoffe und andere chlor-, brom- und fluorhaltige Substanzen, zu denen auch Schwefelhexafluorid (SF_6) und Stickstofftrifluorid (NF_3) zählen. Dazu kann grundlegend festgehalten werden, dass der Mensch mit seinen Prozessen und Produkten in das bisher bestehende Gleichgewicht der Atmosphärenzusammensetzung eingreift. Die Haupttreibhausgase in unserer Atmosphäre sind Wasserdampf (H_2O), Kohlendioxid (CO_2), Lachgas (N_2O), Methan (CH_4) und Ozon (O_3).

Wasserdampf

Wasserdampf wird auch vom Menschen durch viele Prozesse erzeugt. Da die Fähigkeit der Atmosphäre Wasserdampf aufzunehmen jedoch stark von der jeweiligen Temperatur abhängt – je wärmer es ist, desto mehr Wasserdampf kann die Atmosphäre aufnehmen – wirkt Wasserdampf als Verstärker, sowohl bei einer Erwärmung, als auch bei einer Abkühlung der Atmosphäre. Zudem muss berücksichtigt werden, dass der Feuchtegehalt mit zunehmender Höhe und dabei abnehmender Temperatur in der oberen Atmosphäre stark abnimmt. Das Wasser wird durch Wolkenbildung und Wetterprozesse schnell wieder zurück zur Erdoberfläche gebracht. Im Bezug auf Wasserdampf sind zwar noch nicht alle Zusammenhänge über die atmosphärische Wasserdampfdruckkopplung geklärt, aber im Bezug auf den anthropogenen Anteil des Treibhauseffekts hat Wasserdampf nur einen sehr geringen Einfluss.

Kohlendioxid

Bei fast jedem Verbrennungsprozess entsteht Kohlendioxid, sodass in Deutschland mehr als 95 % der CO_2 -Emissionen durch solche Prozesse verursacht werden. Nach der Verbrennung wird das entstandene CO_2 meist als farbloses und geruchsloses Gas in die Atmosphäre entsorgt. Beispiele für diese Entsorgungspfade sind entweder Schornsteine oder die Auspufföffnungen aller Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor, die bei manchen Modellen überdimensional groß gestaltet wurden. Die Verweildauer von CO_2 in der Atmosphäre kann bis zu 1.000 Jahre betragen. Das vom Menschen erzeugte CO_2 stammt in Deutschland überwiegend aus den Emissionsquellen der Strom- und Wärmeenergieerzeugung, des Verkehrs, der industriellen Produktion sowie aus vielseitigen Quellen von Kleinverbrauchern und den oft unterschiedlichen Quellen in den Haushalten.

Methan

Überall dort, wo organisches Material unter Luftausschluss – also ohne Sauerstoff – abgebaut wird, entsteht auch Methan (CH_4) als gasförmiges Abbauprodukt. Neben den na-

türlichen Methanquellen wie Feuchtgebiete, auftauende Permafrostgebiete, Flüsse und Seen oder geologische Quellen, werden derzeit etwa 50 – 65 % des Methans über anthropogene Methanquellen emittiert. Dazu gehören auch die Gebiete, in denen Pflanzen auf gefluteten Feldern angebaut werden (beispielsweise Reis).



Aus einem abgedeckten Deponiekörper treten Gasdrainageleitungen zutage, über die Deponiegas aufgefangen und in einer Sammelleitung zum Weiterbearbeiten transportiert wird. In Deponiegas sind bis zu 60 % Methan, enthalten. In Deutschland entstehen jährlich etwa 1,5 Mrd. Normkubikmeter an Methangas mit einem Energiegehalt von etwa 15.000 GWh aus Deponien.

In Deutschland entsteht Methan vor allem bei der Massentierhaltung, aber auch in anderen Bereichen der Land- und Forstwirtschaft, in Klärwerken und in Mülldeponien. Sofern solche Deponien abgedeckt und geschlossen wurden, wird das Methan häufig in Gasdrainageleitungen aufgefangen, gewaschen und als zurückgewonnener Rohstoff Erdgas wiederverwendet. Die derzeit als die größtmögliche Methanquelle bekannten Methanhydratlager in den Sedimenten der Weltmeere sind in den bisher genannten Zahlen nicht berücksichtigt. Diese Methanquelle ist derzeit noch nicht aktiviert, könnte aber über einen Temperaturanstieg des Meereswassers zu einem Kipp-Punkt im Klimasystem führen. Obwohl Methan durchschnittlich nur etwa zwischen 9 und 12,4 Jahren in der Atmosphäre verweilt, zeigt es als Treibhausgas - bezogen auf 100 Jahre - eine 25 bis 32-fach stärkere Wirkung als Kohlendioxid.

Lachgas (Distickstoffoxid)

Wo stickstoffhaltige Verbindungen im Boden durch Mikroorganismen abgebaut werden, entsteht als Abbauprodukt auch Lachgas (N_2O), das dann aus den entsprechenden Bö-

den in die Atmosphäre austritt. Die Hauptquellen dieser Emissionen sind einerseits landwirtschaftlich genutzte und mit stickstoffhaltigen Düngemitteln gedüngte Böden und andererseits die Massentierhaltung. Vor allem beim Anbau von Energiepflanzen wie Raps oder Mais werden die Böden oft überdüngt. Zu den Hauptemissionsquellen zählen auch Prozesse in der chemischen Industrie - vor allem in der Düngemittelproduktion und der Kunststoffindustrie - oder verschiedene Verbrennungsprozesse, zu denen auch die Verbrennung von Treibstoffen in Kolbenmotoren gehört. Außerdem entsteht Lachgas auch dort, wo Nitrat oder Ammoniak in angrenzende Naturräume gelangt. Dies kann auch über den Grundwasserpfad mit stark nitratbelastetem Grundwasser geschehen. Lachgas hat als Treibhausgas - bezogen auf 100 Jahre - eine etwa 300-fach stärkere Wirkung als Kohlendioxid und kann bis zu 121 Jahre lang in der Atmosphäre verweilen. Aufgrund dieser Faktoren beträgt der Anteil, den Lachgas zum anthropogen verursachten Teil des Treibhauseffekts beiträgt derzeit zwischen 6 und 9 %.

Halogenkohlenwasserstoffe

Es gibt viele verschiedenartige halogenierte Kohlenwasserstoffverbindungen. Es sind Kohlenwasserstoffmoleküle, bei denen mindestens ein Wasserstoffatom durch ein Halogen – entweder Fluor, Brom, Chlor oder Jod – ersetzt ist. Diese fettlöslichen Substanzen sind meist hervorragende organische Lösungsmittel. Es gibt viele verschiedenartige Halogenkohlenwasserstoffe, bei denen entweder nur ein Halogen, oder auch mehrere unterschiedliche Halogene in die chemische Verbindung eingebaut wurden. Dementsprechend vielseitig sind auch die Eigenschaften und die entsprechenden Anwendungsbereiche dieser Verbindungsgruppen. Es gibt dabei viele Verbindungen die krebserregend und/oder giftig sind. Einige dieser Gruppen wirken als ozonabbauende Substanzen und bei einigen Gruppen wirken die Verbindungen auch als Treibhausgase. Halogenkohlenwasserstoffe können daher als Ausgangsstoff zur Herstellung von Arzneistoffen und auch von Kunststoffen, als Feuerlöschmittel, als Flammenschutzmittel, als Fungizide, als Insektizide, als Kältemittel, als Lösungsmittel, als Mittel zur Reinigungsbehandlung von Schmelzen, als Narkosemittel, als Treibgaskomponente oder als Weichmacher eingesetzt werden.

Die industriell genutzten Halogenkohlenwasserstoffe werden künstlich hergestellt. Es gibt aber auch natürlich vorkommende Verbindungen halogener Kohlenwasserstoffe, die von Meeresalgen, Schwämmen, Korallen oder von verschiedenen Bakterien, Pilzen oder höheren Pflanzen gebildet werden. Dies sind überwiegend einfache Verbindungen der Chlorkohlenwasserstoffe (CKW), wie beispielsweise Tetrachlormethan (CCl_4). Die am häufigsten durch Mikroorganismen und Bakterien natürlich gebildete Verbindung ist Monochlormethan (CH_3Cl), wovon jährlich schätzungsweise etwa 5 Mill. t entstehen. Auch beim Absterben von Organismen wie Kieselalgen oder Mikroalgen werden natürlich gebildete Halogenkohlenwasserstoffe in die Umwelt freigesetzt. Hochrechnungen deuten darauf hin, dass beispielsweise in den arktischen Meeren auf diese Wei-

se jährlich zwischen 10.000 und 150.000 t Tribrommethan (CH_3Br = *Bromoform*) als erhebliche Menge an die Atmosphäre abgegeben werden kann.

Unter den Halogenkohlenwasserstoffen haben zwei Stoffgruppen die Eigenschaft als Treibhausgas zu wirken: Die Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) und die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW). Diese Stoffgruppen werden nicht natürlich gebildet und sind daher allein vom Menschen produziert. Bei den Fluorkohlenwasserstoffen gibt es vollständig, oder nur teilweise fluorierte Verbindungen. Die FKW sind entweder gasförmig oder leichtflüchtige Flüssigkeiten und in Wasser kaum löslich. Die vollständig fluorierten Verbindungen sind sehr stabil und bleiben daher lange in der Atmosphäre bestehen. FKW werden erst im obersten Atmosphärenabschnitt, in der Ionosphäre abgebaut. Die nur teilweise fluorierten Substanzen können bis zu 300 Jahre in der Atmosphäre verweilen und haben eine bis zu 14.800-fach stärkere Treibhausgaswirkung als Kohlendioxid. Aufgrund der noch wesentlich höheren Stabilität der vollfluorierten FKW können sie – je nach Verbindung – zwischen 2.600 und etwa 50.000 Jahre in der Atmosphäre verweilen und haben als Treibhauspotential – bezogen auf 100 Jahre – eine zwischen 7.390 und 17.340-fach stärkere Wirkung als CO_2 .

Die Fluorchlorkohlenwasserstoffe wurden hauptsächlich als Kältemittel, als Treibgase und als Treibmittel bei der Schaumstoffproduktion verwendet. Aufgrund ihrer großen Stabilität und ihrer Flüchtigkeit haben diese Substanzen eine hohe Verweildauer in der Atmosphäre und können in die Stratosphäre aufsteigen. Dort werden sie durch die UV-Strahlung zerlegt, wobei die dort freigesetzten Halogenradikale mit Ozon reagieren und damit die Ozonschicht angreifen. Aus diesem Grund wurde der Gebrauch dieser Verbindungen schon von 1995 an eingeschränkt und vom Jahr 2000 an sogar verboten. Inzwischen nimmt ihr Gehalt in der Atmosphäre langsam ab und an einigen Beispielen konnte sogar beobachtet werden, dass dieses Verbot nicht immer und überall eingehalten wurde. So konnte festgestellt werden, dass etwa von 2012 an eine Quelle in Ostasien jährlich etwa 13.000 t Trichlorfluormethan (CCl_3F) emittiert hatte. Chinesische Baustoffhersteller verwenden diese Substanz zur Herstellung von Isolierschaum. Zusätzlich absorbieren die FCKW Sonnenstrahlung im Infrarotbereich und wirken damit auch als Treibhausgase. FCKW können – je nach Substanz – zwischen etwa 40 und 1.700 Jahre in der Atmosphäre verweilen und haben als Treibhauspotential – bezogen auf 100 Jahre – eine bis zu 13.900-fach stärkere Wirkung als CO_2 . Die derzeit nachgewiesenen Konzentrationen einzelner FCKW in der Atmosphäre liegen im Bereich zwischen 5 und etwa 540 ppt (parts per trillion).

Weitere fluorhaltige Treibhausgase (F-Gase)

Von den vielen weiteren Halogenverbindungen, die auch eine Treibhausgaswirkung aufweisen, sollen hier die beiden gasförmigen Substanzen Schwefelhexafluorid (SF_6) und Stickstofftrifluorid (NF_3) angesprochen werden.

Schwefelhexafluorid ist ein farb- und geruchloses, ungiftiges, nicht brennbares und äußerst reaktionsträges Gas, das schwerer als Luft ist und als Schutz- und Isoliergas in Hochspannungsanlagen und Starkstromisolatoren eingesetzt wird. Von dort kann es in die Atmosphäre entweichen, wenn die entsprechenden Anlagenteile nur ungenügend abgedichtet sind. Schwefelhexafluorid ist dem neuesten Sachstandbericht des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change – *Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen*) entsprechend das derzeit stärkste bekannte Treibhausgas. Es kann bis zu 3.200 Jahre in der Atmosphäre verweilen und hat - bezogen auf 100 Jahre - mit einer 22.800-fach stärkeren Wirkung als CO₂ das derzeit stärkste Treibhauspotential. Die Konzentration in der Atmosphäre beträgt derzeit etwa 10 ppt und steigt jährlich etwa um 0,3 ppt an. Der Einfluss dieses Gases auf die Erderwärmung wird derzeit noch als gemäßigt betrachtet.



In Umspann- und Lastverteilerwerken werden unterschiedliche Spannungsebenen so miteinander verschaltet, dass die angeschlossenen Verbraucherstationen mit der jeweils benötigten Energie versorgt werden. Neben Transformatoren und Schaltanlagen im Hochspannungsbereich werden auch viele Starkstromschalter und Starkstromisolatoren benötigt. Diese können auch Schutz- oder Isoliergase enthalten.

Bei einem Vergleich der gemeldeten Emissionen der Vertragsstaaten des Kyoto-Protokolls mit der jährlichen Steigerung bei den Messwerten aus der Atmosphäre zeigt sich allerdings, dass wesentlich mehr Schwefelhexafluorid in die Atmosphäre gelangt, als angegeben wird. Derzeit wird angedacht, dass aus Hochspannungsanlagen wesentlich mehr SF₆ entweicht als bisher angenommen. Außerdem scheint China beim Ausbau seiner Energieversorgung dieses Schutzgas häufig zu verwenden. Auch Deutschland muss damit rechnen, dass der Gebrauch dieses starken Treibhausgases wesentlich gesteigert werden könnte. Sofern aufgrund der von der Automobilindustrie bevorzugten Umstel-

lung des Verkehrs auf batteriebetriebene Elektroautos mehr Kraftwerke, Umspannwerke und Überlandleitungen gebaut werden müssen, um den erforderlichen Strom überhaupt zur Verfügung stellen zu können, wird auch viel mehr Schutzgas für die zusätzliche Hochspannungs- und Starkstromtechnik benötigt werden. Die Klimafolgen einer solchen zusätzlichen Umweltbelastung müssen dann der von den Herstellern bevorzugten Umstellung der Kraftfahrzeuge auf batteriebetriebene Elektroautos zugerechnet werden.

Stickstofftrifluorid ist ein farbloses, brandförderndes Gas mit einem speziellen Geruch, das beim Einatmen gesundheitsschädlich wirkt und die Organe schädigen kann. Es wird zum Aufdampfen dünner Schichten in der Elektronikindustrie bei der Herstellung von Halbleiterelementen, und Flüssigkristallbildschirmen, sowie in der Solarindustrie bei der Herstellung von Dünnschichtsolarzellen verwendet. Es zeigt starke Treibhausgaswirkungen und wurde deshalb von 2013 an als weiteres Treibhausgas in die Verlängerung des Kyoto-Protokolls aufgenommen. Es ist das derzeit drittstärkste Treibhausgas, kann bis zu 740 Jahre in der Atmosphäre verweilen und hat - bezogen auf 100 Jahre - als Treibhauspotential eine 19.700-fach stärkere Wirkung als CO₂. Die Konzentration dieses Klimagases in der Atmosphäre stieg zwischen 1978 und 2008 von 0,02 ppt auf 0,45 ppt an und lag 2016 bei knapp 1 ppt.

Die Messungen zeigen auch, dass dieses Treibhausgas – entsprechend der Standorte der herstellenden Industrie - in der Atmosphäre unterschiedlich verteilt ist: Die Konzentrationen sind auf der nördlichen Halbkugel signifikant höher als auf der südlichen Halbkugel. Stickstofftrifluorid wurde in die Industrieproduktion als Alternative zu den stark klimawirksamen vollständig fluorierten Fluorkohlenwasserstoffen eingeführt. Gleichzeitig haben die asiatischen Länder, in denen inzwischen der Hauptanteil der weltweiten Produktion von Solarzellen, Flachbildschirmen und Halbleiterelementen stattfindet, das verlängerte Kyoto-Protokoll nicht unterschrieben. Damit zeigt sich am Beispiel von NF₃ ein großes Dilemma des globalen Klimaschutzes: Während sich vor allem die EU und ihre Mitglieder um Emissionsbegrenzung bemühen, steigen in den asiatischen Produktionszentren die Emissionen an. Es muss bezweifelt werden, dass solche gegensätzlichen Verhaltensweisen zu einem auch nur annähernd ausgeglichenen Ergebnis führen können.

Weitere Verunreinigungen ohne direkten Treibhausgaseffekt

Die Treibhausgase greifen über die Wärmestrahlung direkt in die Energiebilanz des Systems Erde ein. Es gibt jedoch auch noch weitere Verunreinigungen in der Atmosphäre, die entweder indirekt über eine chemische Einwirkung auf die Treibhausgase oder auf anderen Wegen in die Energiebilanz des Systems Erde eingreifen.

Ozon

Ozon ist ein instabiles Molekül aus drei Sauerstoffatomen (O₃), das als farblos bis bläuliches Gas einen eher unangenehm stechenden Geruch aufweist und als starkes Oxi-

tionsmittel von bestimmten Konzentrationen an ein Reizgas mit möglichen gesundheitsschädlichen Wirkungen ist. Es zerfällt mit einer Halbwertszeit von etwa drei Tagen in ein O_2 -Molekül und ein einzelnes Sauerstoffatom, welches sehr stark oxidierend wirkt und auch organische Verbindungen in lebenden Zellen angreift. Ozon tötet auch Mikroorganismen und zeigt daher auch bakterizide Wirkungen. Daher gibt es in Europa Ozon-Schwellenwerte für Menschen, Tiere und Pflanzen.

Ozon wird in allen Bereichen der Atmosphäre nachgewiesen, aber es zeigen sich zwei Bereiche, in denen höhere Ozongehalte ermittelt wurden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Verteilung von Ozon einerseits von chemischen Reaktionen und andererseits von komplexen atmosphärischen Strömungen abhängt. In der untersten Atmosphärenschicht - der Troposphäre - bildet sich Ozon unter dem Einfluss der noch vorhandenen schwachen UV-Strahlung des Sonnenlichts durch Reaktionen zwischen Vorläufergasen und dem Sauerstoffmolekül O_2 . Dabei wird Ozon auch als Klimagas wirksam. Als Vorläufergase wurden auch Stickoxide (NO_x) und Kohlenmooxid (CO) ermittelt. Vor allem in Ballungsgebieten entsteht Ozon in Bodennähe als „Sommersmog“, der zum Großteil auf die Emission der Stickoxide im Verkehrssektor zurückgeführt wird.



Mit den Verbrennungsprozessen in den Motoren der Kraftfahrzeuge wird derzeit über den Verkehrssektor ein Großteil an klimaschädlichen Substanzen in die Atmosphäre entsorgt. Dazu gehören Kohlendioxid, Stickoxide, Feinstaub, Ruß und – je nach Brennstoff – auch weitere Gase, die über verschiedenartige Auspuffanlagen emittiert werden.

Im darüberliegenden Atmosphärenabschnitt – in der Stratosphäre – entsteht Ozon in etwa 25 – 30 km Höhe in der Ozonschicht ebenfalls durch die Sonneneinstrahlung. Auf-

grund der dort energiereicheren Strahlung werden Sauerstoffmoleküle (O_2) in zwei Sauerstoffatome (O) gespalten, die sich dann wieder mit je einem Sauerstoffmolekül zu Ozon (O_3) verbinden. In diesem Bereich absorbiert das Ozon die für Lebewesen zu starke UV-Strahlung und schützt damit die Erdoberfläche vor einer für das Leben zu hohen Strahlenbelastung. Ozon ist daher in der Stratosphäre erwünscht und in der Troposphäre sowie in Bodennähe unerwünscht. Es gibt aber auch in der Stratosphäre klimawirksame Prozesse, durch die Ozon in der Ozonschicht abgebaut wird. Vor allem die langlebigen FCKW, aber auch einige andere ozonabbauende Substanzen greifen das Ozon in der Ozonschicht an. Wird diese dadurch auf nur die Hälfte der ursprünglichen Dicke reduziert, wird dieser Bereich als Ozonloch bezeichnet. Dort kann dann wesentlich mehr hochenergetische Strahlung bis auf die Erdoberfläche durchdringen und so auch mehr Wärmeenergie in die Atmosphäre eintragen.

Neuere Ergebnisse und Erkenntnisse deuten darauf hin, dass die Ozonchemie einige wichtige Effekte in der Atmosphäre bewirkt, die in etliche Klimamodelle noch nicht integriert wurden. Ozon könnte durch Wechselwirkungen in der Stratosphäre und durch die atmosphärischen Transportströmungen als Klimagas mit bewirken, dass der Klimawandel und die Erderwärmung möglicherweise etwas langsamer ablaufen, als derzeit in manchen Klimamodellen berechnet. Letztendlich muss festgehalten werden, dass die Sonnenstrahlung sowohl beim Entstehen, als auch beim Abbau von Ozon beteiligt ist. In der Stratosphäre ist dabei ein empfindliches Gleichgewicht entstanden, in das die Menschen derzeit mit ihren Emissionen nachhaltig eingreifen.

Stickstoffoxide und nitrose Gase

Für verschiedene Gase die aus Atomen der Elemente Stickstoff(N) und Sauerstoff(O) bestehen, gibt es für Stickstoffoxide die Sammelbezeichnung (NO_x) und für nitrose Gase die Sammelbezeichnung (NO_y). Bei den Stickstoffoxiden werden nur die beiden wichtigsten Verbindungen Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) zusammengefasst. Als nitrose Gase werden Mischungen aus verschiedenen Stickoxiden mit unterschiedlichen Zusammensetzungen bezeichnet.

Stickstoffoxide können in entsprechenden Konzentrationen in der Luft zu vielen negativen Wirkungen sowohl für die Gesundheit der Menschen, als auch für die jeweilige Umgebung in der Umwelt führen. Dazu gehören einerseits mögliche Reizungen und Schädigungen der Lungen – vor allem bei Kindern – und andererseits wird unter Mitwirkung verschiedener weiterer Einflüsse das Entstehen des Sauren Regens oder zusammen mit flüchtigen Kohlenwasserstoffen die Ozonbildung oder das Entstehen von Smog sowie ein Beitrag zur Feinstaubbelastung auf diese Stoffgruppe zurückgeführt.

Stickstoffoxide bilden sich als endotherme Verbindungen nur bei Energiezufuhr. Dennoch gibt es sowohl anthropogene als auch natürliche Quellen für die in der Atmosphäre vorhandenen Stickoxide. So tragen in den Sommermonaten Blitze als natürliche Quelle zur Entstehung bei. Je nach Lokalität und Wettersituation können in der oberen Troposphäre bis zu 90 % der Stickoxide in Gewitterstürmen entstehen. In der unteren

Troposphäre sollen bis zu 20 % der ermittelten Gesamtmenge an Stickoxiden durch lokale Gewitterereignisse entstehen.

Der anthropogen erzeugte Anteil an Stickoxiden in der unteren Troposphäre und in den bodennahen Atmosphärebereichen ist allerdings auf unerwünschte Nebenreaktionen bei den verschiedenartigsten Verbrennungsprozessen zurückzuführen. Als Hauptquellen werden Verbrennungsmotoren und die verschiedenartigen Feuerungsanlagen für Kohle, Öl, Gas, Holz oder Abfälle gesehen. Vor allem in Ballungsgebieten wird der Verkehrsbereich zum Hauptemittenten für Stickstoffoxide (NO_x).

In Zeitreihen über mehrere Jahre an einer Lokation können zwar – bedingt durch photochemischen Abbau im Sommer und stärkere Emissionsquellen im Winter jahreszeitliche Konzentrationsschwankungen erkannt, aber keine Trends abgelesen werden. In den Jahren zwischen 1996 und 2014 betrug am Observatorium Hohenpeissenberg in der untersten Atmosphäre der durchschnittliche Gehalt an Stickstoffmonoxid (NO) etwa 0,3 ppb (*parts per billion*), an Stickstoffdioxid (NO₂) etwa 2,6 ppb und an nitrosen Gasen etwa 4,2 ppb. Stickoxide werden letztendlich durch Auswaschprozesse wieder aus der Atmosphäre entfernt.

Kohlenwasserstoffe

In der Stoffgruppe der Kohlenwasserstoffe gibt es nur chemische Substanzen, die aus den Elementen Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H) bestehen. Dennoch sind in dieser Stoffgruppe äußerst verschiedenartige Verbindungen vertreten. Es können Kohlenstoffatome, oder unterschiedlich lange Kohlenstoffketten, oder verzweigte Strukturen, oder Kohlenstoffringe mit angelagerten Wasserstoffatomen sein. Kohlenwasserstoffe sind meist nicht oder nur sehr schlecht wasserlöslich, sie meiden das Wasser und sind hydrophob. Dementsprechend sind sie gut fettlöslich oder können Fette gut lösen, sie sind daher lipophil. Kohlenwasserstoffe und Kohlenwasserstoffgemische reagieren mit Sauerstoff und sind daher brennbar. Sie können – je nach Sauerstoffangebot bei der Verbrennung - vollständig oder unvollständig verbrennen. Bei der vollständigen Verbrennung entstehen durch die Redoxreaktion Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O). Bei der unvollständigen Verbrennung, bei der auch weniger Energie freigesetzt wird, entstehen auch viele unerwünschte Nebenprodukte wie beispielsweise Kohlenmonoxid (CO), Kohlenstoff in der Form von Ruß und weitere Kohlenwasserstoffe, die wiederum weiterreagieren und Folgeprodukte mit möglicherweise umweltbelastenden Eigenschaften bilden können.

In der Natur sind Kohlenwasserstoffe in vielfältiger Form vorhanden. Aufgrund der natürlichen Vorgänge hat sich daher auch schon vor geologisch langer Zeit eine Form der natürlichen Endlagerung für Kohlenstoff und Kohlenwasserstoffe ergeben. Diese Endlager werden heute von uns Menschen als Lagerstätten gesucht und abgebaut oder ausgebeutet, sodass der fossile Kohlenstoffanteil aus den jeweiligen Endlagern befreit und als CO₂ wieder in die Atmosphäre „entsorgt“ und dort angereichert wird. Dabei spielen

derzeit die Kohlenwasserstoffe eine Hauptrolle. Sie sind einerseits in abgebauter Kohle enthalten und andererseits bestehen die Rohstoffe Erdöl und Erdgas überwiegend aus Kohlenwasserstoffen.

Auf der Erde sind Kohlenwasserstoffe zudem auch Stoffwechselprodukte vieler Organismen. Inzwischen konnten Kohlenwasserstoffe meist in der Form von Methan (CH_4) oder Ethan (C_2H_6) auch im Weltall in Kometen, auf Planeten und Monden sowie in der interstellaren Materie nachgewiesen werden.

Kohlenwasserstoffe werden als Energieträger in brennbaren Gasen, Flüssiggas, Benzin, Dieselkraftstoff, Heizöl, Kerosin und als Raketentreibstoffe verwendet. Außerdem sind sie in der chemischen Industrie Grundstoff für verschiedene Verfahren zur Herstellung vieler Produkte.

Die Weltgesundheitsorganisation –WHO stellt fest, dass Kohlenwasserstoffe den Hauptanteil aller flüchtigen organischen Verbindungen darstellen, die überwiegend als umweltschädliche Emissionen gelten. Aufgrund des hohen Sauerstoffanteils hat unsere Atmosphäre einen oxidierenden Charakter. Die meist komplexen Vorgänge beim Abbau von Kohlenwasserstoffen, die auch als die „Brennstoffe der Atmosphäre“ betrachtet werden, haben dabei teilweise starke Auswirkungen auf das Klima und auf die Gesundheit von Menschen und Pflanzen. Obwohl es auch natürliche Emissionsvorgänge von Kohlenwasserstoffen in die Atmosphäre gibt, greift der Mensch derzeit mit dem Verbrennen von Kraftstoffen aus fossilen Quellen, dem Einsatz von Lösungsmitteln und dem teilweise lokal starken Verbrennen von Biomassen stark in das inzwischen gestörte atmosphärische Gleichgewicht zwischen Emission und Abbau von Kohlenwasserstoffen und Folgeprodukten ein.

Ruß

Auch der aus einer unvollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen, aus dem Abbrennen von Biomasse an der Erdoberfläche oder aus anderen Quellen resultierende und in die Atmosphäre emittierte Ruß führt zu einer Erwärmung der unteren Atmosphärenbereiche. Die dunklen Rußpartikel absorbieren die Sonnenstrahlung und emittieren diese Energie teilweise auch wieder zur Erdoberfläche hin. Sinken solche Partikel auf Schneeflächen oder Gletscher ab, verringern sie dort das Abstrahlvermögen und verstärken die Erwärmung. Dies führt dann zusätzlich zum Abschmelzen der eigentlich hellen Flächen, die für ein reflektieren von einstrahlender Energie wichtig sind.

Zum Abbrennen von Biomasse und damit zur Rußbildung gehören auch die inzwischen leider großflächig stattfindenden Waldrodungen beispielsweise in Brasilien. Auch durch die großflächigen Waldbrände in Australien wird viel Ruß in die Atmosphäre emittiert, der durch die starken Winde zudem weit verteilt wird. Auch durch das Verbrennen von Holz zu Koch und Heizzwecken, oder das Verbrennen von Kohle in Kohleöfen, sowie durch Dieselfahrzeuge ohne Rußfilter - und hier vor allem durch LKWs - werden Rußpartikel in die Atmosphäre emittiert. Der Anteil der zusätzlichen Energie, die von emit-

tierten Rußpartikeln in der Troposphäre für die untere Atmosphäre zur Verfügung steht, wird derzeit auf etwa 10 % des dort zur Erwärmung verfügbaren Energieanteils (des Strahlungsantriebs) geschätzt.



Mit dem Abbrennen von Biomasse zum Roden von Wäldern (Brandrodung durch Buschfeuer) greift der Mensch stark in das bestehende natürliche Gleichgewicht in unserer Atmosphäre ein. In solchen Waldbränden wird sowohl Kohlendioxid, Ruß und aufgrund unvollständiger Verbrennungen auch Kohlenmonoxid emittiert.

Neue klimaaktive Substanzen

Nachfolgend beschreiben wir zwei Beispiele von Ersatzstoffen, deren Wirkungen auf das globale Klima inzwischen bekannt sind.

Sulfurylfluorid

Sulfurylfluorid oder auch Sulfuryldifluorid (SO_2F_2) wird als farb- und geruchsloses Gas als Insektizid bei Lebensmitteln und zum Bekämpfen von Holzschädlingen in Gebäuden eingesetzt. Es wird als Ersatz des Schädlingsbekämpfungsmittels Methylbromid (CH_3Br) verwendet, welches im Montreal-Protokoll von 1987 als schädlich für die Ozonschicht in der Stratosphäre aufgeführt ist.

Da Sulfurylfluorid die Ozonschicht nicht angreift, wurde es als Schädlingsbekämpfungsmittel zugelassen. Inzwischen zeigen jedoch atmosphärische Messungen an, dass diese Substanz als Treibhausgas betrachtet werden muss. Die Verweildauer in der Atmosphäre wird derzeit mit 36 Jahren angegeben. Das Treibhauspotential wird - bezogen auf 100 Jahre - mit einer 4090-fach stärkeren Wirkung als CO_2 angegeben. An einigen europäischen Stationen zum Messen der Hintergrundbelastungen in der Atmosphäre wird der-

zeit ein jährlicher Anstieg der Sulfurylfluoridkonzentrationen von 5,4 % ermittelt. Die mittlere Konzentration an diesen Stationen betrug im Jahr 2016 etwa 2,4 ppt.

Hydrofluorether

Hydrofluorether – HFE sind eine Stoffgruppe der fluorierten organischen Verbindungen. Sie werden hauptsächlich als Reinigungs- und Lösemittel vor allem auch in der Elektronikindustrie beim Herstellen und zur Oberflächenbeschichtung elektronischer Bauteile eingesetzt. Dort werden überwiegend Gemische aus verschiedenen HFE-Verbindungen verwendet. Einige Hydrofluorether werden in der Medizin als inhalative Anästhetika, als Narkosemittel, eingesetzt. In Deutschland errechnet sich bei jährlich 7 Mill. Operationen ein Gesamtverbrauch von etwa 150 t dieser Narkosegase. Sie werden unverändert wieder ausgeatmet. Daher können hierbei Verbrauch und Emission gleichgesetzt werden. Die Emissionen der drei Narkosegase Isofluran, Desfluran und Sevofluran waren im Jahr 2012 etwa sechs Mal so hoch wie die Summe der Emissionen aus industriellen HFE-Anwendungen in Deutschland. Allerdings muss damit gerechnet werden, dass es künftig mehr industrielle Anwendungen der HFE-Verbindungen geben wird.

Hydrofluorether wurden ursprünglich als Ersatz für Substanzen entwickelt, welche die Ozonschicht in der Stratosphäre angreifen. Die Vertreter dieser Stoffgruppe müssen allerdings ebenfalls als Klimagase betrachtet werden. Die Verweildauer eines solchen Stoffgemischs in der Atmosphäre wird derzeit von einem Hersteller mit 4,1 Jahren angegeben. Das Treibhausgaspotential dieses Stoffgemischs ist – bezogen auf 100 Jahre und den Herstellerangaben entsprechend - mit einer 320-fach stärkeren Wirkung als CO₂ angegeben. In einer Studie des Bundesumweltamtes – UBA werden für verschiedene HFE-Substanzen auch einzelne Verweilzeiten in der Atmosphäre zwischen 55 und 1.800 Jahren angegeben. Auch für die Treibhauspotentiale dieser einzelnen Verbindungen – bezogen auf 100 Jahre - werden Werte zwischen der 59- und der 1.870 fach stärkeren Wirkung als CO₂ angegeben.

Hinweise auf Literaturquellen

Die Chemie-Schule (2019a): Halogenkohlenwasserstoffe. – online Publikation:
<https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Halogenkohlenwasserstoffe>

Die Chemie-Schule (2019b): Stickstofftrifluorid. – online Dokumentation:
<https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Stickstofftrifluorid>

Die Chemie-Schule (2019c): Sulfuryldifluorid. – online Dokumentation:
<https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Sulfuryldifluorid>

- Deutscher Wetterdienst – DWD - Forschung (2019a): Kohlenwasserstoffe „Brennstoffe“ der Atmosphäre. – online Publikation:
https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung_atmosphaere/spurengase/inh_nav/voc.html
- Deutscher Wetterdienst – DWD - Forschung (2019b): Stickoxide (NO, NO₂, NO_x, NO_y). – online Publikation:
https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung_atmosphaere/spurengase/inh_nav/nox_node.html
- Deutscher Wetterdienst – DWD - Wetterlexikon (2019c): Ozon. – online Publikation:
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101946&lv3=101994>
- Deutschlandfunk (2011): Schwefelhexafluorid – Supertreibhausgas mit Durchhaltevermögen. – online Publikation:
https://www.deutschlandfunk.de/schwefelhexafluorid-supertreibhausgas-mit.676.de.html?dram:article_id=28617
- Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt – Empa (2016): Kontinuierliche Messung von Nicht-CO₂- Treibhausgasen auf dem Jungfraujoch (HALCLIM-2015-18)–Erster Zwischenbericht. - Empa Projekt-Nr.: 201'203, online Publikation:
https://www.empa.ch/documents/56101/190047/HALCLIM_6_Zwischenbericht/d2443424-b999-443a-a79e-e7ef806b6b66
- Europäische Umweltagentur – EUA (2016): Troposphärisches Ozon. – online Publikation:
<https://www.eea.europa.eu/de/publications/92-828-3351-8/page005.html>
- Forum Umweltbildung (2019): Tabelle der wichtigsten Treibhausgase. –online Publikation:
https://www.umweltbildung.at/cms/praxisdb/dateien/75_thdown.pdf
- Franck, A. (2019): Ozon. – online Publikation: <https://www.planet-wissen.de/natur/klima/klimawandel/pwieozon100.html>
- Informationsportal Klimafreundliche Kälte (2019): Emissionen fluorierter Treibhausgase. – online Publikation: <https://www.kaeltemittel-info.de/informationen/allgemeine-informationen/emissionen-fluorierter-treibhausgase/>
- Kasang, D. (2019): Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) als Treibhausgase. – online Publikation: <https://bildungserver.hamburg.de/treibhausgase/2058180/fckw-treibhausgase-artikel/>
- Kehren, J. (2010): Hydrofluorether im Vergleich zu alternativen Reinigungslösemitteln. – online Publikation: <http://multimedia.3m.com/mws/media/6862280/a-comparison-of-hydrofluorether-other-alt-solvent-cleaning-sys.pdf>
- Lexikon der Nachhaltigkeit (2015): Treibhausgase. – online Publikation:
https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/treibhausgase_1109.htm

- Neue Züricher Zeitung – NZZ (2015): Ozon als unterschätzter Klimafaktor. – online Publikation:** <https://www.nzz.ch/wissenschaft/klima/ozon-als-unterschaetzter-klimafaktor-1.18460347>
- Paeger, J. (2015): Ökosystem Erde – Treibhausgase. – online Publikation:** <http://www.oekosystem-erde.de/html/treibhausgase.html>
- Robert Koch Institut (2010): Klimawandel und Gesundheit – ein Sachstandsbericht. – online Publikation:** https://www.rki.de/DE/Content/Gesund/Umwelteinfluesse/Klimawandel/Klimawandel-Gesundheit-Sachstandsbericht.pdf?__blob=publicationFile
- Schweizerische Eidgenossenschaft – Bundesamt für Umwelt – BAFU (2015): Vom Menschen verursachte Treibhausgase. – online Publikation:** https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/vom_menschen_verursachtetreibhausgase.pdf.download.pdf/vom_menschen_verursachtetreibhausgase.pdf
- Spektrum der Wissenschaft-Lexikon der Biologie (2019a): Halogenkohlenwasserstoffe. – online Publikation:** <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/halogenkohlenwasserstoffe/30376>
- Spektrum der Wissenschaft-Lexikon der Biologie (2019b): Klimaänderungen. – online Publikation:** <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/klimaaenderungen/36346>
- Spektrum der Wissenschaft-Lexikon der Biologie (2019c): Kohlenwasserstoffe. – online Publikation:** <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/kohlenwasserstoffe/36603>
- Spektrum der Wissenschaft-Lexikon der Biologie (2019d): Luftverschmutzung. – online Publikation:** <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/luftverschmutzung/40053>
- Spektrum der Wissenschaft-Lexikon der Biologie (2019e): Ozon. – online Publikation:** <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/ozon/48721>
- Spektrum der Wissenschaft-Lexikon der Biologie (2019f): Smog. – online Publikation:** <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/smog/61923>
- Umweltbundesamt – UBA (2019a): Die Treibhausgase. – online Publikation:** <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>
- Umweltbundesamt – UBA (2019b): Fluorierte Treibhausgase und FCKW. – online Publikation:** <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaftskonsum/produkte/fluorierte-treibhausgase-fckw>

Umweltbundesamt – UBA (2019c): Glossar. – online Publikation:

<https://www.umweltbundesamt.de/service/glossar/>

Umweltbundesamt – UBA (2019d): Treibhauspotentiale (Global Warming Potential, GWP) ausgewählter Verbindungen und deren Gemische gemäß Viertem Sachstandsbericht des IPCCbezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren. – online Publikation:

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2503/dokument_e/treibhauspotentiale_ausgewaehelter_verbindungen_und_derer_gemische.pdf

Umweltbundesamt – UBA (2015): Implementierung der ab dem Berichtsjahr 2013 gültigen IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2006 in die Inventurerhebung fluorierter Treibhausgase (HFKW, FKW, SF6, NF3). – Climate Change 17/2015, Forschungskennzahl 3712 41 103 1, UBA-FB 002184, online Publikation:

https://www.oekorecherche.de/sites/default/files/publikationen/climate_change_17_2015_implementierung_der_ab_dem_berichtsjahr_2013.pdf

Umweltbundesamt – UBA (2013): Ist nicht Wasserdampf statt CO2 das wichtigste Treibhausgas?. – online Publikation:

<https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/ist-nicht-wasserdampf-statt-co2-das-wichtigste>

Umweltbundesamt – UBA (2011): Häufig gestellte Fragen zum Thema Stickstoffoxide (NOx) – und Antworten darauf. – online Publikation:

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/faq_nox.pdf

Waffenschmidt, E. (2008): NF3 – Das vergessene Treibhausgas. – online Publikation:

https://www.sfv.de/artikel/2008/nf3_-_das_vergessene_treibhausgas.htm

Wiki-Bildungsserver (2019a): Atmosphäre (einfach).- online Publikation:

[https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Atmosph%C3%A4re_\(einfach\)](https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Atmosph%C3%A4re_(einfach))

Wiki-Bildungsserver (2019b): Methan.- online Publikation:

<https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Methan>

Wikipedia (2019a): Erdatmosphäre. – online Publikation:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Erdatmosph%C3%A4re>

Wikipedia (2019b): Fluorchlorkohlenwasserstoffe. – online Publikation:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Fluorchlorkohlenwasserstoffe>

Wikipedia (2019c): Fluorkohlenwasserstoffe. – online Publikation:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Fluorkohlenwasserstoffe>

Wikipedia (2019d): Hydrofluorether. – online Publikation:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrofluorether>

Wikipedia (2019e): Kohlenwasserstoffe. – online Publikation:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenwasserstoffe>

Wikipedia (2019f): Methan. – online Publikation: <https://de.wikipedia.org/wiki/Methan>

**Wikipedia (2019g): Schwefelhexafluorid. – online Publikation:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Schwefelhexafluorid>**

**Wikipedia (2019h): Stickstofftrifluorid. – online Publikation:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Stickstofftrifluorid>**

**Wikipedia (2019i): Sulfurylfluorid. – online Publikation:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Sulfurylfluorid>**

**Wikipedia (2019j): Treibhauspotential. – online Publikation:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Treibhauspotential>**

**Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2019): Anthropogene Treibhausgase.
– online Publikation:
<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimasystem/antriebe/anthropogene-treibhausgase>**

FiWiSo-Allianz

rnl im Dezember 2019

Bilder: copyright rnl.jpeg