Klimawandel und Klimapolitik

Fakten, Zusammenhänge, Perspektiven

von
Christian Brückner, Basel
26. Oktober 2026

Zusammenfassung (Executive Summary)

Seit etwa 1970 steigt der weltweite Verbrauch fossiler Energien. Ungefähr parallel dazu steigt die langjährige Durchschnittstemperatur der Erdoberfläche und der Atmosphäre (vgl. dazu nachstehend Kapitel I. Tatsachen).

Seit 1992 gibt es politische Bemühungen, die verhängnisvolle Entwicklung in den Griff zu bekommen. Die Erfolge sind gering. Zwar haben einige Länder ihre Emissionen seit 1992 reduziert. Aber grosse Länder, allen voran China, das 30% der globalen Emissionen verursacht, steigern ihre Emissionen laufend in einem Ausmass, das die globale Gesamtmenge Jahr für Jahr weiter in die Höhe treibt.

An der Weltklimakonferenz von 2015 in Paris bestand Einigkeit, dass zur Verhinderung katastrophaler Zustände die weitere Erwärmung bei 1,5 Grad Celsius, höchstens bei 2 Grad Celsius über dem vorindustriellen globalen Durchschnitt begrenzt werden müsse. Zur Erreichung dieses Ziels wurde in Aussicht genommen, dass die Menschheit bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts zu *netto null Emissionen* gelangen müsse. Viele Länder haben seither "Netto Null 2050" als nationale Ziele in Gesetzen verankert.

Die Erreichbarkeit einer globalen Netto-Null-Klimabilanz ist aber nicht wahrscheinlich. Kein einziges Land befindet sich heute auf einem Pfad, der bei linearer Fortschreibung im Jahr 2050 zu Netto Null führen würde. Die USA, Verursacher von 11% der globalen Emissionen, zeigen sich gegenüber dem Klimaschutz gleichgültig. Auch die meisten Entwicklungs- und Schwellenländer geben dem wirtschaftlichen Aufschwung die Priorität vor dem Klimaschutz.

Schliesslich erfolgt die technische Absenkung von Treibhausgasen, die zur Erreichung von Netto Null nötig wäre, bis heute nur in Vorzeigeprojekten und in kleinen Mengen. Angesichts der voraussehbar hohen Kosten ist nicht wahrscheinlich, dass solche Absenkungen jemals in einem klimarelevanten Umfang gemacht werden (vgl. dazu nachstehend Kapitel II. Zusammenhänge). Daraus folgt, dass die Klimaerwärmung bis zum Jahr 2050 und darüber hinaus mit hoher Wahrscheinlichkeit ihren Fortgang nimmt.

Trotz der offensichtlichen Unerreichbarkeit behält "Netto Null 2050" die Strahlkraft eines Hoffnungssymbols. Verantwortungsbewusste Menschen wollen sich nicht damit abfinden, dass die Erwärmung unbegrenzt fortschreitet. Gerade weil die tatsächliche Entwicklung in der falschen Richtung läuft, möchten sie hoffen können, dass irgendwann eine Wende kommt. "Netto Null" gibt diese Hoffnung, erst recht, wenn die Formel in Gesetzen des eigenen Landes festgeschrieben ist.

"Netto Null" gibt nicht nur Hoffnung, sondern auch Gewissensberuhigung. Klarerweise ist die Erreichung von "Netto Null" die *Aufgabe des Staates*, und damit zugleich das *staatliche Versprechen an die Bevölkerung*, die Wende herbeizuführen. Es entbindet die Privatpersonen von ihrer individuellen Verantwortung und von der Notwendigkeit, ihren Lebensstil freiwillig zu ändern. Wo der Staat Netto Null verspricht, können die Privaten guten Gewissens konsumieren, worauf sie Lust haben, soweit der Staat es nicht ausdrücklich verbietet oder durch Lenkungsabgaben unerschwinglich macht.

Wer sich nicht mit Hoffnungen begnügt, muss jedoch damit rechnen, dass es keine Wende gibt und dass jede heute freigesetzte Menge von Treibhausgasen mit grosser Wahrscheinlichkeit eine definitive Belastung des Klimas bleibt. Wer es ernst meint, folgt der Regel, *hier und jetzt, Jahr für Jahr und ohne zeitliche Begrenzung schädliche Emissionen zu vermeiden*.

Inhalt

Zusammenfassung (Executive Summary)

I. Fakten
A. Klima und Klimawandel
1. Das Klima der letzten 2000 Jahre
2. Steigender Verbrauch fossiler Primärenergien
3. Emissionen 2025
4. Physikalische Begriffe und Fakten
a) Treibhausgase
b) Direkte und indirekte Emissionen; Fussabdruck
c) Mengenverhältnisse der natürlichen Reservoire und der menschgemachten Emissionen
d) Kipppunkte und Rückkopplungen
5. Emissionen nach Sektoren
6. Entwicklung von Weltbevölkerung, Primärenergien, Elektrifizierung und Klima-Fussabdrücken 1900-2024
B. Klimapolitik
1. Aufkommen des öffentlichen Klimabewusstseins 1900-1992
2. Entwicklung 1992-2025
3. Internationale Luft- und Seeschifffahrt
4. Länder mit sinkenden und mit steigenden Emissionen (2015-2025)
5. Aktuelle Situation (2026)
6. Finanzströme von Industrie- zu Schwellen- und Entwicklungsländern

II. Zusammenhänge
A. Klimakennwerte von Primär- und Sekundärenergien
1. Begriffe
2. Fossile Primärenergien
3. Nicht-fossile Primärenergien
4. Sekundärenergien
B. Speicherung von Energie
C. Absenkung von Treibhausgasen
1. Absenkung von CO2
2. CCS
3. CCU und CCUS
4. DACCS
5. BECCS
6. Anwendung der Verfahren
7. Andere Absenkungsmethoden
8. Keine Absenkung anderer Treibhausgase
D. Klimaschutz im Spannungsfeld zwischen Fremd- und Eigennutzen
E. Klimaschutz im Spannungsfeld zwischen Verursachern und Opfern
F. "Netto Null 2050"
1. Entstehung der Formel "Netto Null"
2. Globale und territoriale Bedeutung
3. Innerer Widerspruch des territorialen Begriffs
4. Weg zu Netto Null
4. Schlechte psychologische Wirkung
5. Inszenierte Irreführung
6. Kostenvermeidung durch Kompensationen
G. Schwierigkeit geologischer Absenkungen
1. Vorbemerkung
2. Nicht nachgewiesene Machbarkeit, voraussehbare Unerschwinglichkeit
3. Fehlendes Eigeninteresse

III. Perspektiven
A. Wie geht es weiter?
B. Konsequenzen
C. Ideen für klimagerechtes Handeln
1. Einbezug des Konsums
2. Behörden
3. Privatpersonen
D. Fazit

I. Fakten[1]

A. Klima und Klimawandel

1. Das Klima der letzten 2000 Jahre

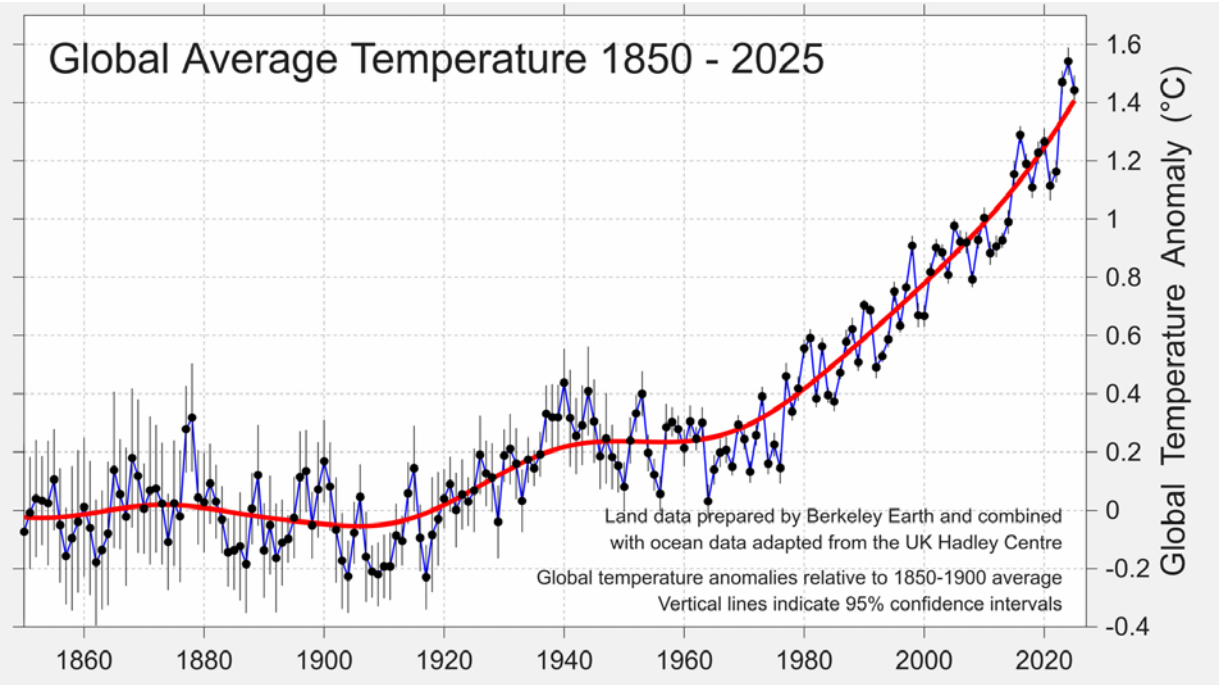
Die Temperatur der Erdatmosphäre - im Folgenden kurz Klima genannt - hat in den vergangenen 2000 Jahren Schwankungen erlebt. Diese erfolgten nicht an allen Orten der Erdoberfläche zur gleichen Zeit und mit gleicher Heftigkeit. In Teilen Europas und des Nordatlantikraums gab es vom 3. Jahrhundert v. Chr. bis zum 4. Jahrhundert n. Chr. eine Erwärmung, die als *römische Warmphase* bezeichnet wird. Sie war weder überall gleich stark noch weltweit gleichzeitig. Zwischen etwa 950 und 1250 herrschten im Nordatlantikraum und in Teilen Europas zeitweise milde Bedingungen. Die Epoche wird als *mittelalterlichen Klima-Anomalie* bezeichnet. Beginn, Dauer und Stärke unterschieden sich erheblich von Region zu Region; es handelte sich nicht um eine weltweit gleichzeitig auftretende Warmzeit. Dürrekatastrophen, d.h. Jahre mit heissen, regenarmen Sommermonaten und Hungersnöten, gab es in Europa mehrfach (1304, 1473, 1503, 1504, 1540, 1719, 1949). In einzelnen Perioden zogen sich Gletscher in den Alpen und in Skandinavien zurück. Sie schmolzen aber nicht generell oder dauerhaft ab. Etwa ab dem 14. Jahrhundert bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts traten in Europa und im Nordatlantikraum häufiger kühle Phasen auf. Diese Epoche wird als *Kleine Eiszeit* bezeichnet. Besonders ausgeprägte Kälte- und Gletschervorstossphasen lagen im 17. und frühen 19. Jahrhundert. Viele Alpengletscher erreichten zwischen 1250 und 1850/60 mehrmals annähernd maximale nacheiszeitliche Ausdehnungen.

Seit dem späten 19. Jahrhundert steigt die globale Mitteltemperatur, wenn auch mit grossen jährlichen Ausschlägen nach oben und unten, zeitweilig überlagert von natürlichen Schwankungen, abkühlenden Vulkanausbrüchen und dem Einfluss von Luftschadstoffen. Nach 1970 hat sich die Erwärmung beschleunigt. Während der vergangenen 50 Jahre war der Temperaturanstieg schneller als in jedem anderen 50-Jahres-Zeitraum seit mindestens 2000 Jahren. Während die älteren Warm- und Kältephasen regional und zeitlich uneinheitlich waren, ist die Erwärmung seit 1970 nahezu global. Das erhärtet ihren Kausalzusammenhang mit den wachsenden menschlichen Treibhausgasemissionen[2].

---

[1] Im vorliegenden Text dienen die Fussnoten zu Erläuterungen, die bei rascher Lektüre übersprungen werden können. Auf Quellenangaben wird verzichtet. Die meisten statistischen Daten und viele Fakten sind mit künstlicher Intelligenz recherchiert und überprüft. Der vorliegende Text soll der Leserschaft die klimatisch relevanten Fakten mit ihren Grössenordnungen leichtverständlich vor Augen führen. Mengenangaben, die von Jahr zu Jahr schwanken, werden deshalb meist als gerundete, leicht merkbare Durchschnitte der jüngsten verfügbaren Daten präsentiert. Die genauen Werte für einzelne Jahre können im Internet beschafft werden. Wo Mengenangaben im Text mit "rund" gekennzeichnet sind, handelt es sich um vereinfachende Auf- oder Abrundungen; "etwa" bedeutet eine Unbestimmtheit in der Informationsquelle.

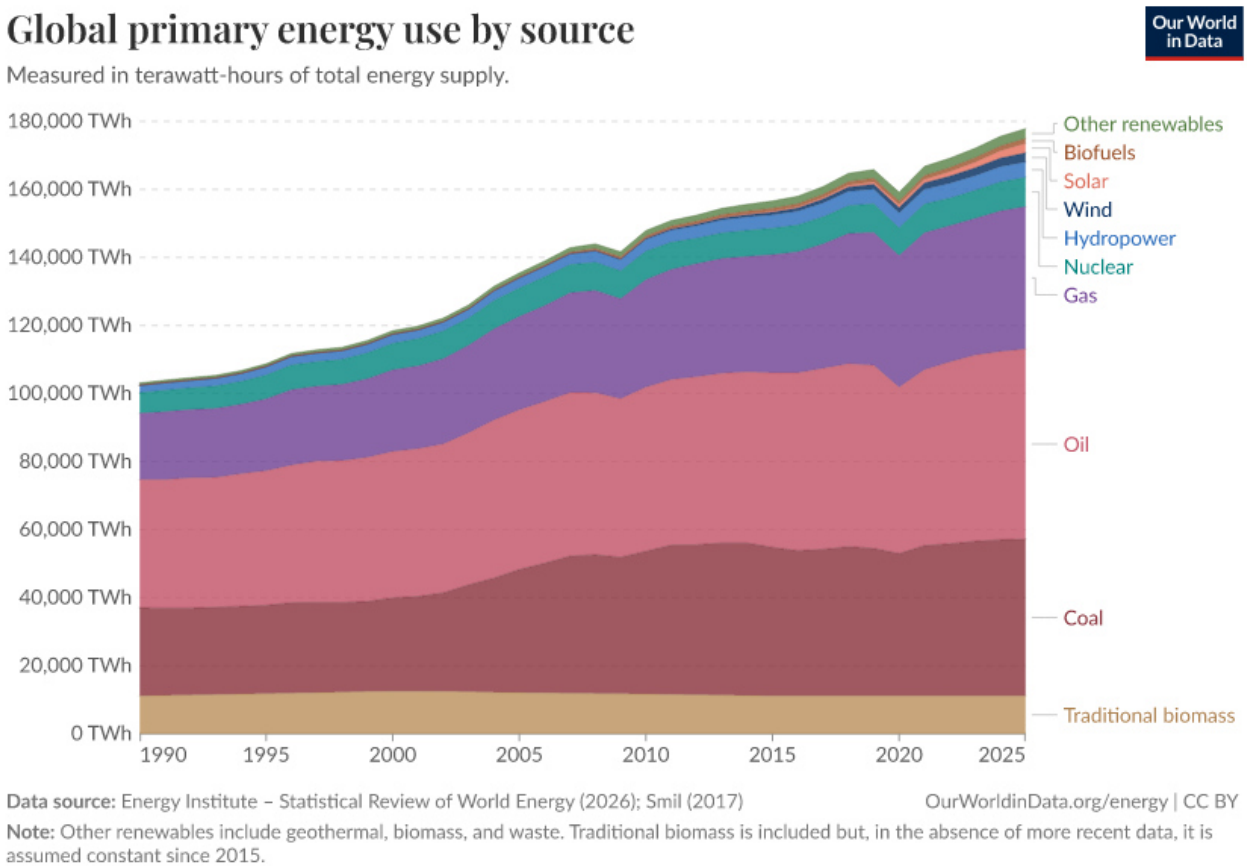
[2] Die Freisetzung von Gasen in die Atmosphäre wird als *Emission* bezeichnet. Im vorliegenden Text wird unter "Emission" stets die Freisetzung von Treibhausgasen verstanden.



Globale Jahrestemperatur, jährliche Schwankungen und langfristiges Mittel, 1850-2025

2. Steigender Verbrauch fossiler Primärenergien

Die Menschheit deckt ihren wachsenden Energiebedarf zu einem grossen Teil mit fossilen Energien. Ihr Verbrauch verursacht wachsende Emissionen.



Globaler Verbrauch von Primärenergien, 1990-2025

3. Emissionen 2025

Die Menschheit verursacht gegenwärtig jährlich rund 42 Mrd. Tonnen (Gigatonnen, abgekürzt Gt) CO_2, einschliesslich der Nettoemissionen aus Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF)[3], sowie andere Treibhausgase in der Grössenordnung von rund 15 Gt CO_2eq. Das ergibt zusammen rund 57 Gt CO_2eq jährlich. Die Mengen sind im langjährigen Durchschnitt steigend. Fast die Hälfte der weltweiten Emissionen stammen aus China (rund 30%), USA (rund 11%) und Indien (rund 8%). Die weltweit gemittelte CO_2-Konzentration in der Atmosphäre erreichte 2025 mit einem Jahresmittel von rund 425,6 ppm[4] einen neuen historischen Höchststand.

4. Physikalische Begriffe und Fakten

a) Treibhausgase

Unter einem Treibhausgas (THG) versteht man ein Gas, dessen Moleküle einen grossen Teil des sichtbaren Sonnenlichts passieren lassen, aber Teile der langwelligen Infrarotstrahlung abfangen und wieder abgeben können und dadurch Wärme zurückhalten, vergleichbar der transparenten Hülle eines Treibhauses. Im Einzelnen:

Die Sonne führt der Erde Energie in Form von Strahlung zu. Dazu gehören sichtbares Licht sowie die sehr kurzwellige ultraviolette und die langwellige infrarote Strahlung. Ein Teil dieser Strahlung wird von Wolken, der Atmosphäre und der Erdoberfläche in den Weltraum reflektiert. Der übrige Teil wird von der Atmosphäre und der Erdoberfläche aufgenommen und erwärmt sie. Die erwärmte Erdoberfläche gibt Wärme als langwellige Infrarotstrahlung ab.

Treibhausgase fangen einen Teil dieser Strahlung ab. Die von den THG-Molekülen aufgenommene Energie wird durch Zusammenstösse mit anderen Molekülen auf diese übertragen. Gleichzeitig senden THG-Moleküle Infrarotstrahlung in alle Richtungen aus - auch zurück zur Erdoberfläche. Dadurch bleiben die Erdoberfläche und die unteren Luftschichten wärmer, als sie es ohne Treibhausgase wären.

Trockene Luft besteht zu rund 78,1 Prozent aus Stickstoff (N_2), zu 20,9 Prozent aus Sauerstoff (O_2) und zu knapp einem Prozent aus weiteren Gasen. Stickstoff- und Sauerstoffmoleküle absorbieren die von der Erde ausgehende Infrarotstrahlung kaum und tragen daher praktisch nicht zum Treibhauseffekt bei.

---

[3] Engl. *Land Use, Land Use Change and Forestry*, abgekürzt LULUCF, umfasst in den Treibhausgasinventaren Entwaldung und Wiederaufforstung, Umwandlung von Wald in Acker- oder Weideland, Aufgabe von Landwirtschaftsflächen und natürliche Wiederbewaldung, Veränderungen des Kohlenstoffvorrats in Böden, Entwässerung oder Wiedervernässung von Mooren, Bewirtschaftung von Wald, Acker- und Grünland. Das erste "L" umfasst einen Teil der Landwirtschaft, nämlich die CO_2-Änderung des Kohlenstoffvorrats eines landwirtschaftlich genutzten Bodens - etwa durch Umwandlung von Wald in Ackerland oder durch Humusverlust, wogegen die landwirtschaftlichen Methan- und Lachgasemissionen in der Regel dem Sektor Landwirtschaft, nicht LULUCF, zugeordnet werden. Der *Sektor Landwirtschaft* erfasst in den internationalen Treibhausgasinventaren die wirtschaftliche Tätigkeit: Ackerbau, Viehhaltung, Dünger- und Gülleeinsatz, Reisanbau usw. Klimatisch wichtig sind im Sektor Landwirtschaft vor allem Methan aus Wiederkäuern und Gülle sowie Lachgas aus Böden und Düngung. Wird Wald gerodet, um eine Rinderweide anzulegen, so gehört die dadurch verursachte CO_2-Freisetzung aus Bäumen und Böden zu LULUCF; das danach jährlich von den Rindern ausgestossene Methan gehört zur Landwirtschaft. - In den Emissionsbilanzen einzelner Länder wird LULUCF oft ausgeschlossen, da deren jährliche Nettoemissionen erheblich schwanken und methodisch unsicher sind. Die globale LULUCF-Bilanz ist derzeit netto eine Emissionsquelle, keine Absenkung. Sie liegt in der Grössenordnung von 3-5 Gt CO_2eq netto pro Jahr.

[4] Statt in Prozenten gibt man den CO_2-Gehalt bzw. die CO_2-Konzentration auch in Millionstel-Einheiten an (engl. *parts per million*, abgekürzt *ppm*).

Kohlendioxid ist das wichtigste langlebige Treibhausgas, dessen Konzentration in der Atmosphäre durch menschliche Tätigkeiten erhöht wird. Seine chemische Formel lautet CO_2, weil jedes Molekül aus einem Kohlenstoffatom (chemisches Symbol "C", von lateinisch "carbo" = Kohle) und zwei Sauerstoffatomen ("O" von "oxygenium") besteht.

Kohlenstoff ist ein chemisches Element und kommt unter anderem in Lebewesen, Böden, Ozeanen, Gesteinen und fossilen Brennstoffen vor. Kohle, Erdöl und Erdgas entstanden über Jahrmillionen aus organischem Material und enthalten grosse Mengen Kohlenstoff.

Bei der Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas verbindet sich der darin enthaltene Kohlenstoff mit Sauerstoff gemäss der chemischen Formel $C + O_2 \rightarrow CO_2$. Ein Kohlenstoffatom hat eine relative Masse von rund 12, ein CO_2-Molekül eine solche von rund 44. Deshalb entstehen bei der Oxydation einer Tonne Kohlenstoff 3,67 Tonnen Kohlendioxid ($44 \div 12 = 3{,}67$).

Weitere für den Klimawandel wichtige Treibhausgase - in der vorliegenden Arbeit als "die anderen Treibhausgase" bezeichnet - sind Methan[5], Lachgas[6] und die sogenannten F-Gase[7]. Sie unterscheiden sich untereinander z.T. stark hinsichtlich ihrer Verweildauer in der Atmosphäre und ihrer Strahlungswirkung, d.h. ihrer Fähigkeit, die Wärmeabstrahlung der Erde ins Weltall zu drosseln. Sie machen gewichtsmässig einen sehr geringen Teil der menschlichen Emissionen aus und sind in der Atmosphäre in viel geringeren Konzentrationen als CO_2 vorhanden, sind aber pro Gewicht viel schädlicher als CO_2.

Damit sich Emissionen verschiedener Treibhausgase vergleichen und addieren lassen, werden sie in CO_2-*Äquivalente* (CO_2eq) umgerechnet. Das erlaubt es, die gesamte Treibhausgasbelastung durch alle Gase in einer einzigen Zahl zu anzugeben[8]. Im Folgenden werden die klimawirksamen

---

5 Methan ist ein gasförmiger Kohlenwasserstoff mit der Formel CH_4, bestehend aus einem Kohlenstoffatom und vier Wasserstoffatomen. Es ist der Hauptbestandteil von Erdgas (meist etwa 80-98%). Es entsteht überall dort, wo organisches Material ohne Sauerstoff zersetzt wird. Methan aus Erdgas ist fossiles Methan. Entsteht Methan aus heutiger Biomasse in Mooren, Sümpfen, Deponien, Mägen von Wiederkäuern und Biogasanlagen, d.h. aus Pflanzenresten, Gülle, Klärschlamm, Küchenabfällen oder Energiepflanzen, so heisst es Biomethan. Methan ist brennbar. Bei vollständiger Verbrennung entstehen CO_2 und H_2O (Wasser). Ein Kubikmeter Methan enthält etwa 10 kWh Heizwertenergie und damit etwa gleich viel wie ein Kubikmeter Erdgas. Entweicht Methan unverbrannt, so ist es ein starkes Treibhausgas.

6 Lachgas ist Distickstoffmonoxid (N_2O), ein farbloses, leicht süsslich riechendes Gas. Es ist ein starkes und sehr langlebiges Treibhausgas, über 100 Jahre etwa 270-mal klimawirksamer, d.h. schädlicher, als CO_2, durchschnittlich rund 120 Jahre in der Atmosphäre und zugleich eine Substanz, die zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht beiträgt. Es wird u.a. als Narkose- und Schmerzmittel sowie als Treibgas, beispielsweise zum Aufschäumen von Dosen-Schlagsahne, verwendet. Lachgas brennt nicht selbst, kann Verbrennung aber fördern. Es entsteht überwiegend durch Mikroorganismen im Stickstoffkreislauf. Feuchte, stickstoffreiche und zeitweise sauerstoffarme Böden sind besonders wichtige Quellen. Aus solchen natürlichen Prozessen stammen rund 60% der Lachgasemissionen. Rund 40% sind menschengemacht. Sie entstehen zu etwa drei Vierteln in der Landwirtschaft durch Stickstoffdüngung, Gülle, Mist, Ernterückstände und stickstoffreiche Weideflächen, zu 17% in der Industrie und zu kleineren Anteilen in der Abwasser- und Abfallbeseitigung, Biomasseverbrennung und Medizin. An den gesamten anthropogenen THG-Emissionen von 53,2 Gt CO_2eq hat Lachgas mit 2,6 Gt CO_2eq einen Anteil von etwa 4,8%.

7 Der Begriff "F-Gase" steht für fluorierte Treibhausgase. Es sind künstlich hergestellte, sehr klimawirksame Gase. Dazu zählen vor allem *HFKW/HFCs* als Kältemittel in Klimaanlagen, Kühlschränken und Wärmepumpen, *PFK/PFCs* aus Aluminium- und Halbleiterproduktion, SF_6 als Isoliergas in elektrischen Schaltanlagen und das bei bei der Herstellung von Elektronik und Solarzellen verwendete NF_3. Die F-Gase werden in weit kleineren Mengen ausgestossen als CO_2, können aber pro Kilogramm - je nach Gas - ein Vielfaches bis Zehntausendfaches der Erwärmungswirkung von CO_2 haben. Viele bleiben zudem sehr lange in der Atmosphäre. Deshalb sind sie Teil der politischen Netto-null-Treibhausgasziele.

8 Die atmosphärische Verweildauer ist bei CO_2 uneinheitlich, indem ein Teil nach einigen Jahrzehnten unschädlich wird, ein erheblicher Teil aber Jahrhunderte bis Jahrtausende bleibt; Methan verweilt etwa 12 Jahre, Lachgas 110 Jahre, F-Gase je nach Stoff wenige Jahre bis rund 50'000 Jahre. Bei der Angabe der CO_2-Äquivalente wird die unterschiedliche Verweildauer berücksichtigt und die Schädlichkeit jedes Stoffs auf den Zeitraum von 100 Jahren ab seiner Emission berechnet gemäss der Formel GWP100 *(Global Warming Potential over 100 years,*

Treibhausgase in der Regel gesamthaft mit ihren CO_2-Äquivalenten unter der Bezeichnung "CO_2eq" zusammengefasst.

Wasser vermischt sich bei der Verdunstung gasförmig mit der Luft und hat als Wasserdampf ebenfalls eine starke Treibhausgaswirkung. Anders als CO_2 verbleibt ein einzelnes Wassermolekül aber meist nur kurze Zeit als Dampf in der Atmosphäre, bevor es als Regen oder Schnee ausfällt. Da die Atmosphäre temperatur- und höhenabhängig unterschiedliche Mengen von Wasserdampf aufnimmt und wieder abgibt, wird Wasserdampf in den üblichen Treibhausgas-Inventaren nicht ausgewiesen.

b) Direkte und indirekte Emissionen; Fussabdruck

Direkte Emissionen eines Landes sind diejenigen, die *auf seinem Territorium* in die Atmosphäre freigesetzt werden. Als *indirekt* gelten die Emissionen, die bei der Herstellung und dem Transport von importierten Energien, Gütern und Dienstleistungen *ausserhalb des Territoriums* entstehen, in welchem sie konsumiert werden. Die direkten Emissionen entstehen im Inland vor allem beim Heizen und Autofahren, ferner in der Industrie und Landwirtschaft. Die indirekten betreffen den Konsum und industriellen Verbrauch: Fast jedes aus dem Ausland importierten Gut enthält Stoffe und Bestandteile, bei deren Gewinnung und Herstellung Treibhausgase freigesetzt wurden.

Unter *Fussabdruck* wird hier die Summe der von einem Land *direkt* ***und*** *indirekt* verursachen Emissionen verstanden, wobei in der Fussabdruck-Berechnung jene direkten Emissionen subtrahiert werden, die bei der Herstellung exportierter Güter entstehen. Die Formel lautet demgemäss: *Fussabdruck = direkte Emissionen zuzüglich importierte (d.h. indirekte) Emissionen, abzüglich exportierte direkte Emissionen.*

Der Fussabdruck der Schweiz besteht je nach Jahr und Berechnung zu rund zwei Dritteln bis drei Vierteln aus indirekten Emissionen. Eine angenäherte, leicht merkbare Verhältniszahl für das Jahr 2025 quantifiziert die direkten Emissionen pro Einwohner mit 4 t, den Fussabdruck mit 14 t CO_2eq.[9]

c) Mengenverhältnisse der natürlichen Reservoire und der menschgemachten Emissionen

Der Anteil von CO_2 in der Luft ist gering. Um 1900 betrug die CO_2-Konzentration etwa 0,03% (= 296 ppm). 2025 war sie rund 426 ppm. Sie wächst zurzeit jährlich um durchschnittlich 2,7 ppm.

Eine Steigerung der Konzentration um 1 ppm entspricht einem Zuwachs von etwa 7,8 Gt CO_2 in der Atmosphäre.

Zur Veranschaulichung: 1 Gt Wasser mit dem spezifischen Gewicht 1 würde ein würfelförmiges Behältnis von 1 km Seitenlänge füllen. CO_2 hat in verflüssigter Form ein spezifisches Gewicht von etwa 0,9, ist also leichter als Wasser. 1 Gt CO_2 würde in verflüssigter Form einen Würfel von etwa 1,1 km Seitenlänge füllen.

Treibhauspotenzial über einen Zeitraum von 100 Jahren). CO_2-Äquivalente sind nicht Gewichtsäquivalente, sondern Schädlichkeitsäquivalente.

9 Zur Ermittlung und Eindämmung auch der indirekten Emissionen haben das *World Resources Institute (WRI)* und der *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)* seit 2001 das sogenannte *GHG Protocol* entwickelt. Die überarbeitete Ausgabe von 2004 wurde weltweit zum massgeblichen Standard für klima-ambitionierte Unternehmen, Behörden, Städte, Hochschulen, Banken usw. Die Erfassung von Emissionen gemäss GHG-Protocol gehört nicht zur staatlichen Emissionsinventur nach dem Pariser Übereinkommen, sondern zur privaten Treibhausgasbilanz einzelner Organisationen. Die heute geläufigen Kategorien des GHG-Protocol heissen Scope 1, 2 und 3. *Scope 1* umfasst die direkten Emissionen aus eigenen Anlagen und Fahrzeugen, *Scope 2* die indirekte Emissionen aus bezogener Energie und *Scope 3* übrige indirekte Emissionen der vor- und nachgelagerten Wertschöpfungskette.

Die Menschheit setzt, wie vorne gesagt, derzeit jährlich rund 42 Gt CO_2 frei. Hinzu kommen andere Treibhausgase im Umfang von rund 15 Gt CO_2eq, vor allem Methan, Lachgas und fluorierte Gase. Landökosysteme und Ozeane nehmen im langjährigen Mittel ungefähr die Hälfte der gesamten anthropogenen CO_2-Emissionen auf. Der übrige Teil erhöht die CO_2-Menge in der Atmosphäre im Langzeitdurchschnitt um rund 21 Gt CO_2 pro Jahr.

Die anderen Treibhausgase werden während unterschiedlichen Verweildauern auf natürliche Weise langsam abgebaut, hauptsächlich durch chemische Reaktionen, Methan innerhalb von etwa zwölf Jahren, Lachgas nach rund 110 Jahren. Nach der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) entfielen im vergangenen Jahrzehnt etwa 79% des Zuwachses der Klimabelastung auf CO_2 und 21% auf die anderen Treibhausgase.

aa) Treibhausgase in der Erdatmosphäre

Die gesamte Menge von CO_2 in der Erdatmosphäre beträgt zurzeit rund 3'340 Gt. Die anderen in der Erdatmosphäre vorhandenen Treibhausgase belasten die Atmosphäre zusammengenommen mit rund 900 Gt CO_2eq.

Der anthropogene CO_2-Ausstoss beläuft sich gegenwärtig also jährlich auf rund 1,2% der in der Atmosphäre vorhandenen Gesamtmenge CO_2, der Ausstoss anderer Treibhausgase auf 1,7% ihrer vorhandenen Gesamtmenge.

bb) Kohlenstoff in der Biomasse der Kontinente

Kohlenstoff ist auch in der der *Biomasse der Kontinente* gespeichert, d.h. in den Wäldern, der übrigen Vegetation und in den Böden. Als Grössenordnung können rund 3'000 Gt angenommen werden, was einer Menge von 11'000 Gt CO_2 entspricht und etwa das 3-Fache dessen ist, was in der Form von CO_2 in der Atmosphäre vorhanden ist.

cc) Kohlenstoff in den Ozeanen

Kohlenstoff ist auch im *Meerwasser* vorhanden. Alle Gewässer der Erde zusammen speichern etwa 38'000 Gt Kohlenstoff, was einer Menge von rund 140'000 Gt CO_2 entspricht. Die Meere speichern also etwa 40-mal mehr Kohlenstoff als in der Form der erwähnten 3'340 Gt CO_2 in der Atmosphäre vorhanden ist. Der menschliche Ausstoss beläuft sich jährlich auf etwa 0,03% der in den Meeren vorhandenen Gesamtmenge.

dd) Natürlicher Austausch ("Atmung")

Zwischen Erde und Atmosphäre bestehen *natürliche Flüsse* von Kohlenstoff in beiden Richtungen. Pflanzen und Ozeane nehmen Kohlenstoff aus der Luft auf, die Pflanzen insbesondere in Zeiten des Grünens im Frühling und Sommer, und sie setzen Kohlenstoff frei, insbesondere in Zeiten des Verrottens und Verfaulens im Herbst und Winter.

Die Ozeane nehmen Kohlenstoff in den kalten Breitengraden auf, sind dort also CO_2-Senken, und geben in warmen Breitengraden Kohlenstoff ab, sind dort CO_2-Quellen.

Die Kohlenstoffmenge, die zu verschiedenen Tages- und Jahreszeiten fliesst, wird in jeder Richtung mit etwa 200 Gt pro Jahr geschätzt. Das entspricht, multipliziert mit dem erwähnten Faktor 3,67, einer CO_2-Menge von etwa 730 Gt in jeder Richtung. Man spricht diesbezüglich bildlich auch von einer natürlichen Atmung. Durch sie wird das in der Luft vorhandene CO_2 im Laufe der Zeit mit terrestrischem und maritimem Kohlenstoff ausgetauscht.

ee) Ozeane und Kontinente als natürliche CO2-Senken

Die Meere nehmen, wie bereits gesagt, dort Kohlenstoff aus der Luft, wo die Wasseroberfläche kalt ist. Mit der seit Jahren stattfindenden Erwärmung der Meere wird ihre Fähigkeit zur

Kohlenstoffaufnahme verringert. Trotzdem wächst die Senkenleistung der Meere momentan, weil der wachsende CO_2-Gehalt der Luft den Aufnahmedruck auf das Meerwasser erhöht und eine beinahe proportional wachsende Senkenleistung der Ozeane bewirkt. Gegenwärtig beträgt die Senkenleistung der Meere etwa 12 Gt CO_2 pro Jahr.

Wegen der wachsenden CO_2-Konzentration in der Luft nehmen auch terrestrische Vegetation und Böden mehr CO_2 auf als sie natürlich abgeben, nämlich etwa 9 Gt CO_2 netto pro Jahr.

Zusammengenommen absorbieren Ozeane und terrestrische Vegetation und Böden etwa 21 Gt CO_2 und damit rund die Hälfte der Menge der anthropogenen CO_2-Emissionen. Der Rest der anthropogenen CO_2-Emisionen, nämlich ebenfalls etwa 21 Gt CO_2, bleibt in der Luft. Im Ergebnis erhöht sich die CO_2-Konzentration der Luft damit momentan jährlich um etwa 2,7 ppm.

Die anderen Treibhausgase vermindern sich durch natürlichen Abbau jährlich um etwa 10 Gt CO_2eq. Die 15 Gt CO_2eq, die von der Menschheit jährlich emittiert werden, erhöhen die Klimabelastung demgemäss um rund 5 Gt CO_2eq[10].

ff) Zusammenfassender Überblick über die Mengenverhältnisse

Die Menschheit verursacht gegenwärtig jährlich rund 42 Gt CO_2, einschliesslich der Emissionen aus Landnutzungsänderungen. Zusätzlich verursacht die Menschheit die Emission anderer Treibhausgase in der Grössenordnung von rund 15 Gt CO_2eq. CO_2 und andere Treibhausgase ergeben zusammen rund 57 Gt CO_2eq jährlich.

Von der in der Atmosphäre vorhandenen Gesamtmenge von 3'340 Gt CO_2 wird im langfristigen Durchschnitt eine Menge von etwa 21 Gt pro Jahr durch Ozeane und Landökosysteme aufgenommen, sodass die menschlichen Emissionen von 42 Gt zu einem durchschnittlichen jährlichen Zuwachs in der Atmosphäre von 21 Gt führen.

Die anderen in der Atmosphäre vorhandenen Treibhausgase werden im Umfang von etwa 10 Gt CO_2eq laufend abgebaut, sodass ihr jährlicher Zuwachs der Klimabelastung rund 5 Gt CO_2eq beträgt.

Am Belastungszuwachs waren im vergangenen Jahrzehnt CO_2 zu etwa 79%, die anderen Treibhausgase zu etwa 21% beteiligt.

Die Atmosphäre enthält gegenwärtig rund 3'340 Gt CO_2 und andere Treibhausgase von rund 900 Gt CO_2eq.

Pflanzen und Böden enthalten rund 3'000 Gt Kohlenstoff, was einer Menge von rund 11'000 Gt CO_2 und damit rund dem Dreifachen des atmosphärischen CO_2 entspricht.

Die Ozeane enthalten ungefähr 38'000 Gt Kohlenstoff, was einer Menge von rund 140'000 Gt CO_2 und damit rund dem Vierzigfachen des atmosphärischen CO_2 entspricht.

Der natürliche Austausch zwischen Atmosphäre und Erde ("Atmung") hat die Grössenordnung von jährlich 200 Gt Kohlenstoff in jeder Richtung, entsprechend ungefähr 700 Gt CO_2. Der anthropogene Nettozuwachs von 21 Gt CO_2 entspricht demnach ungefähr einem Dreissigstel der natürlichen Bruttoflüsse.

gg) Lithosphäre

Neben Luft, Meeren und Pflanzen haben auch die *Gesteine des Erdmantels*[11] während Jahrmillionen grosse Mengen von Kohlenstoff gebunden, so in den Kohle-, Erdöl- und

---

[10] Wegen der sehr unterschiedlichen Konzentrationen der anderen Treibhausgase ist die Angabe eines Durchschnittswerts in ppm nicht sinnvoll; überdies sind die Konzentrationen viel geringer als bei CO_2; bei einzelnen Gasen liegen die Grössenordnungen bei Millionstel ppm.

[11] Die Gesteine des Erdmantels werden als die Lithosphäre bezeichnet (von griechisch *lithos* = Stein).

Erdgasvorkommen, die vom Menschen heute als Brenn- und Treibstoffe ausgebeutet werden. Noch mehr Kohlenstoff ist in den Kalkgesteinen enthalten.

Nicht nur das Verbrennen von Kohle, Erdöl und Erdgas setzt CO_2 frei, sondern auch das Erhitzen von Kalkstein zur Erzeugung von gebranntem Kalk (Zementklinker). Dieser dient als Bindemittel für Beton. Beim Brennen von Kalk tritt für jedes produzierte Molekül Kalziumoxid ein Molekül des Treibhausgases CO_2 aus. Diese Freisetzung von CO_2 ist ein notwendiges Element der Zementproduktion und macht etwa 5% der weltweiten CO_2-Emissionen aus, zusammen mit den Brennstoff- und übrigen Emissionen etwa 7-8%. Als hypothetisches Land stünde der Zement-Sektor heute hinter den China und den USA etwa an der Seite von Indien.

hh) Mengenverhältnisse der Schweiz

Die Schweiz verursacht (ohne Berücksichtigung der Landnutzung und des internationalen Flug- und Schiffsverkehrs) rund 40 Mio. Tonnen CO_2eq. Davon entfallen rund 31 Mio. Tonnen auf CO_2 und 9 Mio. Tonnen auf andere Treibhausgase.

Der Konsumfussabdruck der Schweiz betrug gemäss den jüngsten verfügbaren Zahlen im Jahr 2023 rund 132 Mio. Tonnen CO_2eq. Davon entstanden rund 3/4 im Ausland und 1/4 im Inland. Pro Kopf der Bevölkerung (9,1 Mio.) waren es rund 10 Gt indirekte und rund 4 Gt direkte Emissionen.

Damit entsprechen die territorialen direkten Schweizer Emissionen etwa 0,07% bzw. 0,7 Promille der globalen Emissionen von rund 57 Gt CO_2eq. Der Konsumfussabdruck der Schweiz entspricht etwa 0,23% bzw. 2,3 Promille der globalen Emissionen.

d) Kipppunkte und Rückkopplungen

Manche Fachleute weisen hin auf mögliche Kipppunkte, d.h. auf kritische Schwellen, nach deren Überschreiten sich ein Teil des Klimasystems stark, nichtlinear und eventuell unumkehrbar verändert, und auf Rückkopplungen, die die Erwärmung beschleunigen können:

Durch *Abschmelzen des Eises an den Polkappen und in Grönland* kann sich die Lichtreflexionsfähigkeit der Erde vermindern, was die Klimaerwärmung beschleunigt; zudem würde der Meeresspiegel ansteigen.

Je wärmer die Atmosphäre ist, desto mehr *Wasserdampf* nimmt sie auf. Wasserdampf ist das wichtigste natürliche Treibhausgas. Seine Anreicherung verstärkt die durch CO_2 oder andere Einflüsse ausgelöste Erwärmung.

Die *Atlantische meridionale Umwälzzirkulation (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC)*, d.h. die Erwärmung und ein zusätzlicher Süsswassereintrag in den Nordatlantik, können das Absinken von kaltem, salzhaltigem Wasser schwächen. Ein Kollaps würde die Wärme- und Niederschlagsverteilung stark verändern: Nordwesteuropa würde sich im Vergleich zu einer Welt mit intakter AMOC deutlich abkühlen, während sich Regenzonen, Meeresspiegel und tropische Monsune verschieben könnten.

Im *Amazonas-Regenwald* schwächen Erwärmung, Dürren, Brände und Abholzung die Verdunstung und damit den vom Wald selbst erzeugten Regen. Unterhalb einer kritischen Waldfläche beziehungsweise oberhalb eines bestimmten Trockenheitsgrades könnte ein Teil des Regenwaldes in eine trockenere, offenere Vegetation übergehen. Dabei würde Kohlenstoff freigesetzt und die Biodiversität verringert. Die Schwelle hängt nicht nur vom Weltklima, sondern wesentlich von der regionalen Abholzung[12] ab.

[12] Die brasilianische Waldfläche des Amazonas-Regenwalds (einschliesslich Überschwemmungswald und Mangroven, ohne Savannen und Forstplantagen) sank von rund 3'545'000 km2 im Jahr 2015 auf rund 3'426'000 km2 im Jahr 2025, und damit um eine Fläche von rund 119'000 km2 bzw. um 3,35%; der Verlust in Quadratkilometern entspricht rund der dreifachen Fläche der Schweiz.

In den südlichen Teilen der *nordischen Nadelwälder* könnten zunehmende Hitze, Trockenheit, Waldbrände und Schädlingsbefall ein grossflächiges Waldsterben auslösen.

Beim Auftauen von *Permafrost* werden CO_2 und Methan freigesetzt, was weitere Erwärmung und weiteres Auftauen begünstigt.

Wiederholte marine Hitzewellen können Korallen im *Warmwasser-Korallenriffen* bleichen und töten. Nach einem Schwellenübergang können Riffe in einen algen- oder schwammdominierten Zustand wechseln, aus dem sie sich selbst bei besseren Bedingungen nur schwer erholen.

Westafrikanische, indische und andere *Monsunwinde* könnten sich nichtlinear verändern, wenn Land-Meer-Temperaturunterschiede, Vegetation und Aerosolbelastung bestimmte Schwellen überschreiten.

Eine dauerhafte Verschiebung zu häufigeren oder stärkeren *El-Niño*- beziehungsweise *La-Niña-Zuständen*[13] hätte weltweite Folgen für Dürren, Überschwemmungen und Landwirtschaft.

Unter Berufung auf solche Risiken machen verschiedene Fachleute unterschiedliche Zukunftsprognosen, auch Katastrophenprognosen, und fordern einen baldigen Stopp menschlicher THG-Emissionen. In Ländern mit geringen Klimaschutz-Ambitionen werden solche Forderungen als Alarmismus abgetan.

5. Emissionen nach Sektoren

Für internationale Ländervergleiche werden meist die sechs IPCC-/UNFCCC[14]-Inventarsektoren verwendet. Diese sind die amtliche Grundlage der nationalen Treibhausgasinventare. Ihre Anteile an den globalen Emissionen (CO_2 und andere Treibhausgase) sind:

1. *Energie:* 73% (Verbrennung von Kohle, Öl und Gas sowie flüchtige Emissionen aus deren Gewinnung und Verteilung. Darin: Strom- und Wärmeerzeugung, Verkehr, Industriefeuerungen, Gebäudeheizungen usw.).
2. *Industrieprozesse und Produktverwendung (IPPU):* 5% (Prozessemissionen ohne Verbrennung, z.B. Zementklinker, Kalk, Chemie, Metalle sowie fluorierte Gase aus Kühlung und Klimaanlagen).
3. *Landwirtschaft:* 12% (Methan aus Tierhaltung und Güllelagerung, Lachgas aus Böden und Dünger, teilweise Kalkung und Harnstoff).
4. *Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF):* 7% (Waldsenke bzw. Waldemissionen, Moore, Acker- und Grünland, Rodungen); dieser Sektor kann zeitweilig auch negativ sein, also netto CO_2 aufnehmen.

---

13 *El Niño* und *La Niña* sind die zwei gegensätzlichen Phasen des Klimaphänomens ENSO *(El Niño-Southern Oscillation)* im tropischen Pazifik. Sie treten unregelmässig, meist alle sieben Jahre, auf und beeinflussen das Wetter in vielen Teilen der Welt. - Bei El Niño wird das Oberflächenwasser im zentralen und östlichen tropischen Pazifik ungewöhnlich warm. Die sonst von Ost nach West wehenden Passatwinde werden schwächer. Dadurch verlagern sich Verdunstung, Wolkenbildung und tropische Starkregen weiter nach Osten. Typische Folgen sind mehr Regen an der Westküste Südamerikas, häufiger Trockenheit in Indonesien und Teilen Australiens sowie eine vorübergehende Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur. El Niño begünstigte beispielsweise den Rekord der globalen Mitteltemperatur 2024, neben der langfristigen Erwärmung. - Bei La Niña ist es umgekehrt: Das Oberflächenwasser im zentralen und östlichen tropischen Pazifik ist ungewöhnlich kühl, die Passatwinde sind stärker, und vor Peru und Ecuador steigt besonders viel kaltes Tiefenwasser auf. Starkregen und warme Meeresoberflächen verlagern sich weiter nach Westen, Richtung Indonesien und Australien. Dort steigt häufig die Wahrscheinlichkeit für sehr nasse Verhältnisse; an der Westküste Südamerikas eher für Trockenheit. Global wirkt La Niña meist leicht temperaturdämpfend, hebt aber die langfristige globale Erwärmung nicht auf. - Für Europa und die Schweiz sind die Wirkungen deutlich schwächer und weniger zuverlässig. El Niño oder La Niña bestimmen hier keinen einzelnen Winter; sie verändern höchstens statistisch die Wahrscheinlichkeit bestimmter Wetterlagen.

14 Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (Weltklimarat); United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC (Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen von 1992).

5. *Abfall:* 3% (Deponiegas, Abwasser, Abfallverbrennung soweit nicht bereits unter Energie erfasst).
6. *Sonstiges:* 0% (in vielen Ländern praktisch unbedeutend oder nicht gesondert ausgewiesen).

Total: 100%

Eine andere Aufteilung ergibt:

1. Strom- und Wärmeerzeugung: 26%
2. Verkehr: 15%
3. Landwirtschaft: 11%
4. Energieverbrauch der Industrie: 11%
5. Brennstoffförderung und -verarbeitung: 10%
6. Industrieprozesse: 9%
7. Gebäude, direkte Brennstoffe (vorwiegend Heizung): 6%
8. LULUCF: 7%
9. Abfall und Übriges: 4%

Total: 100%

In den meisten Ländern werden die bedeutenden Emissionen der *Kehrichtverbrennung* nicht separat ausgewiesen, sondern entweder dem Industriesektor zugerechnet oder mit der Entsorgung von Industrieabfällen und Sondermüll zusammengefasst. Die 29 Schweizer Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) verursachen derzeit etwa 4 Mio. t CO_2 pro Jahr. Etwa die Hälfte stammt aber aus biogenem Kohlenstoff, vor allem Papier, Holz, Lebensmittelresten und Naturfasern. Diese Hälfte wird gemäss den IPCC-Bilanzierungsrichtlinien im Schweizer Treibhausgasinventar nicht als Klimabelastung erfasst, sodass als fossile CO_2eq-Emissionen 2,1 Mio. t CO_2 pro Jahr verbleiben. Diese 2,1 Mio. t sind im Verhältnis zu den gesamten direkten Schweizer Treibhausgasemissionen von 40,1 Mio. t CO_2eq im Jahr 2024 rund 5%[15]. - Pro verbrannter Tonne Siedlungsabfall entsteht am KVA-Kamin rund 1 Tonne CO_2.

Plastik und ähnliche Kunststoffe wie *PET*, die im Wesentlichen aus Rohöl hergestellt werden, spielen in der Abfallwirtschaft eine besondere Rolle. Plastik setzt bei seiner Verbrennung, ähnlich wie Benzin und Diesel, etwa die dreifache Menge CO_2 seines Eigengewichts frei. In vielen Ländern werden die Konsumenten dazu angehalten, Plastik und andere Kunststoffe zwecks Rezyklierung auszusondern und zu speziellen Sammelstellen zu bringen. Die Rezyklierung ist aber nur für knapp die Hälfte der abgegebenen Mengen möglich. Die restlichen Mengen sind wegen Vermischung verschiedener Kunststoffe oder wegen Verschmutzung nicht wirtschaftlich rezyklierbar und werden deshalb zum Siedlungsabfall zurückgeführt und zusammen mit diesem verbrannt. Sie bilden wegen ihres hohen Kohlenstoffgehalts einen nützlichen Brennstoff, um die für die Kehrichtverbrennung erforderlichen hohen Temperaturen zu erreichen. Plastikabfall als Brennstoff ist zudem billiger als das andernfalls zuzuheizende Gas. - Die Rezyklierung von Plastik ist nicht unbegrenzt wiederholbar. In der Regel wird der gleiche Stoff nur ein- oder zweimal rezykliert, weil das Rezyklat von Mal zu Mal schlechtere Eigenschaften aufweist.[16]

Weitere Einzelbereiche sind:

---

15 Dass Kehrichtverbrennungsanlagen Strom, Fernwärme und zurückgewonnene Metalle produzieren, vermindert die Emissionen anderer Anlagen, ändert aber nichts an den direkten fossilen KVA-Emissionen.

16 Das internationale Zeichen für die Rezyklierungsfähigkeit von Materialien, drei in einem Dreieck angeordnete sich verfolgende Pfeile, ist insofern irreführend, als es den Eindruck erweckt, die gekennzeichneten Plastikgegenstände seien vollständig und unbegrenzt rezyklierbar und damit umweltneutral. Das trifft nicht zu. Aller Plastik muss, ob rezykliert oder nicht rezykliert, schlussendlich vollständig verbrannt werden, womit er die Atmosphäre ähnlich stark wie Benzin und Diesel belastet. Noch schädlicher für die Umwelt ist die Entsorgung von Plastik durch Wegwerfen in der freien Natur oder in Gewässer.

Tourismus: 8,8%. - Die jüngste umfassende globale Untersuchung schätzt für 2019 einen tourismusbezogenen Fussabdruck von 5,2 Gt CO_2eq, entsprechend 8,8% der damaligen globalen THG-Emissionen. Das ist kein eigener Inventarsektor: Enthalten sind unter anderem Flüge, Autos, Schiffe, Hotels, Verpflegung, Einkäufe und touristische Dienstleistungen.

Luft- und Seeschifffahrt: 4-5% der globalen CO_2-Emissionen. Die Nicht-CO_2-Effekte der Luftfahrt - insbesondere Kondensstreifen und Stickoxide - erhöhen ihren Beitrag zur bisherigen Erwärmung, werden aber in nationalen THG-Inventaren nicht als einheitliche CO_2eq-Position verbucht. Auf die Seeschifffahrt entfallen etwa 2-3% der globalen CO_2-Emissionen.

Militär und Kriege: 5,5% - Die meisten Länder weisen ihre diesbezüglichen Emissionen aus Gründen der Geheimhaltung nicht aus. Für die weltweiten Streitkräfte ergibt eine umfassende, aber methodisch unsichere Schätzung einen gesamten Klimafussabdruck der globalen THG-Emissionen mit einer Bandbreite von 3-7%. Darin sind die Treibstoffe für Fahrzeuge, Flugzeuge und Schiffe enthalten, ferner auch Rüstungsgüter, militärische Infrastruktur und Lieferketten. Die zusätzlichen Emissionen eigentlicher Kriege - Kampfhandlungen, Brände, Zerstörung, Fluchtbewegungen und Wiederaufbau - sind schwer abschätzbar und in der angegebenen Bandbreite von 3-7% nicht enthalten.

Öffentlicher Verkehr und Individualverkehr: Der motorisierte Personenverkehr verursacht insgesamt rund 10% der globalen THG-Emissionen. Davon entfallen auf den Individualverkehr - vor allem private Personenwagen, Motorräder sowie Zwei- und Dreiräder - rund 8% der globalen THG-Emissionen, der Rest auf den öffentlichen Verkehr. Die kollektiven Verkehrsmittel Bus und Bahn verursachen je Passagier-Kilometer etwa einen Drittel der Emissionen des Individualverkehrs.

6. Entwicklung von Weltbevölkerung, Primärenergien, Elektrifizierung und Klima-Fussabdrücken 1900-2024

Im Folgenden werden für den Zeitraum 1990-2024 die Entwicklung der Weltbevölkerung, der Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brenn- und Treibstoffe sowie aus Land- und Forstwirtschaft (LULUCF), ferner die Entwicklung des Elektrifizierungsgrads und des Strommixes gezeigt. Die Darstellung geht in Zehnjahresschritten von 1900 bis 2020. Angehängt ist das neueste Jahr mit vollständig verfügbaren Zahlen, 2024.

Die *Weltbevölkerung* hat sich im betrachteten Zeitraum von 1,6 auf 8,1 Mrd. Menschen vergrössert, d.h. sie hat sich verfünffacht. Die *Emissionen* haben sich von 8,6 auf 57 Gt CO_2eq pro Jahr versechsfacht.

Der Anteil der *Land- und Forstwirtschaft* an den globalen Emissionen ist von 67,6% auf 19,7% zurückgegangen.

Der *Elektrifizierungsgrad* hat sich von 0,1% auf 17,6% erhöht, in den ersten Jahrzehnten um wenige Zehntelsprozente, ab 1930 pro Jahrzehnt um rund 1%, ab 1950 pro Jahrzehnt um rund 2%.

Der *Strommix* bestand im Jahr 1900 aus 60% fossiler thermischer Erzeugung, überwiegend durch Dampfturbinen, und zu 40% aus Wasserkraft. In der Folge ging die Wasserkraft anteilsmässig laufend zurück, während sich der fossile Anteil erhöhte. Diese Entwicklung dauerte bis zum Aufkommen der Kernkraft im Jahr 1970. Die Kernkraft drängte den fossilen Stromanteil leicht zurück und erreichte 1990 ihren Höhepunkt. Seither nahm sie anteilsmässig (nicht in absoluten Zahlen) ab. Solar- und Windkraft kamen etwa im Jahr 2000 auf, spielten 2010 erstmals eine relevante Rolle und nahmen bis 2024 stark zu. Kernkraft und fossile Quellen nahmen im Strommix prozentual je leicht ab (nicht in absoluten Zahlen).

Die *Emissionen pro Einwohner* stiegen von 1900 bis 1970 und gingen mit dem Aufkommen der Kernkraft langsam, mit dem Aufkommen von Solar- und Windkraft etwas schneller zurück.

1900 - Weltbevölkerung 1,6 Mrd.

THG-Emissionen 8,6 Gt bzw. 5,3 t/Kopf; fossil 32,4%, LULUCF 67,6%
Elektrifizierungsgrad 0,1%; Strommix:
- Erneuerbare 41,2% (Wasser 41,2%, Solar 0,0%, Wind 0,0%)
- Kernkraft 0,0%
- fossile thermische Erzeugung 58,8%.

1910 - Weltbevölkerung 1,7 Mrd.
THG-Emissionen 10,4 Gt bzw. 5,9 t/Kopf; fossil 39,1%, LULUCF 60,9%
Elektrifizierungsgrad 0,2%; Strommix:
- Erneuerbare 39,9% (Wasser 39,9%, Solar 0,0%, Wind 0,0%)
- Kernkraft 0,0%
- fossile thermische Erzeugung 60,1%.

1920 - Weltbevölkerung 1,9 Mrd.
THG-Emissionen 11,1 Gt bzw. 5,8 t/Kopf; fossil 41,8%, LULUCF 58,2%
Elektrifizierungsgrad 0,6%; Strommix:
- Erneuerbare 44,5% (Wasser 44,5%, Solar 0,0%, Wind 0,0%)
- Kernkraft 0,0%
- fossile thermische Erzeugung 55,5%.

1930 - Weltbevölkerung 2,1 Mrd.
THG-Emissionen 12,5 Gt bzw. 6,0 t/Kopf; fossil 41,6%, LULUCF 58,4%
Elektrifizierungsgrad 1,4%; Strommix:
- Erneuerbare 42,3% (Wasser 42,2%, Solar 0,0%, Wind 0,0%)
- Kernkraft 0,0%
- fossile thermische Erzeugung 57,7%.

1940 - Weltbevölkerung 2,3 Mrd.
THG-Emissionen 14,2 Gt bzw. 6,2 t/Kopf; fossil 44,9%, LULUCF 55,1%
Elektrifizierungsgrad 2,3%; Strommix:
- Erneuerbare 37,7% (Wasser 37,6%, Solar 0,0%, Wind 0,0%)
- Kernkraft 0,0%
- fossile thermische Erzeugung 62,3%.

1950 - Weltbevölkerung 2,5 Mrd.
THG-Emissionen 17,0 Gt bzw. 6,8 t/Kopf; fossil 44,6%, LULUCF 55,4%
Elektrifizierungsgrad 3,4%; Strommix:
- Erneuerbare 35,6% (Wasser 35,5%, Solar 0,0%, Wind 0,0%)
- Kernkraft 0,0%
- fossile thermische Erzeugung 64,4%.

1960 - Weltbevölkerung 3,0 Mrd.
THG-Emissionen 22,8 Gt bzw. 7,6 t/Kopf; fossil 51,9%, LULUCF 48,1%
Elektrifizierungsgrad 5,7%; Strommix:
- Erneuerbare 29,9% (Wasser 29,8%, Solar 0,0%, Wind 0,0%)
- Kernkraft 0,1%
- fossile thermische Erzeugung 70,0%.

1970 - Weltbevölkerung 3,7 Mrd.
THG-Emissionen 28,9 Gt bzw. 7,8 t/Kopf; fossil 62,8%, LULUCF 37,2%
Elektrifizierungsgrad 7,7%; Strommix:
- Erneuerbare 23,9% (Wasser 23,7%, Solar 0,0%, Wind 0,0%)
- Kernkraft 1,6%
- fossile thermische Erzeugung 74,5%.

1980 - Weltbevölkerung 4,4 Mrd.
THG-Emissionen 33,9 Gt bzw. 7,6 t/Kopf; fossil 68,4%, LULUCF 31,6%
Elektrifizierungsgrad 9,8%; Strommix:
- Erneuerbare 21,5% (Wasser 20,9%, Solar 0,0%, Wind 0,0%)
- Kernkraft 8,6%

- fossile thermische Erzeugung 69,9%.

1990 - Weltbevölkerung 5,3 Mrd.
THG-Emissionen 37,6 Gt bzw. 7,1 t/Kopf; fossil 71,0%, LULUCF 29,0%
Elektrifizierungsgrad 11,6%; Strommix:
- Erneuerbare 19,4% (Wasser 18,1%, Solar 0,0%, Wind 0,0%)
- Kernkraft 16,8%
- fossile thermische Erzeugung 63,8%.

2000 - Weltbevölkerung 6,2 Mrd.
THG-Emissionen 40,8 Gt bzw. 6,6 t/Kopf; fossil 72,2%, LULUCF 27,8%
Elektrifizierungsgrad 12,9%; Strommix:
- Erneuerbare 18,7% (Wasser 17,2%, Solar 0,0%, Wind 0,2%)
- Kernkraft 16,6%
- fossile thermische Erzeugung 64,7%.

2010 - Weltbevölkerung 7,0 Mrd.
THG-Emissionen 49,6 Gt bzw. 7,1 t/Kopf; fossil 75,6%, LULUCF 24,4%
Elektrifizierungsgrad 14,4%; Strommix:
- Erneuerbare 19,7% (Wasser 16,1%, Solar 0,2%, Wind 1,6%)
- Kernkraft 12,8%
- fossile thermische Erzeugung 67,5%.

2020 - Weltbevölkerung 7,9 Mrd.
THG-Emissionen 50,6 Gt bzw. 6,4 t/Kopf; fossil 79,2%, LULUCF 20,8%
Elektrifizierungsgrad 16,8%; Strommix:
- Erneuerbare 28,0% (Wasser 16,3%, Solar 3,2%, Wind 6,0%)
- Kernkraft 9,9%
- fossile thermische Erzeugung 62,1%.

2024 - Weltbevölkerung 8,1 Mrd.
THG-Emissionen 54,4 Gt bzw. 6,7 t/Kopf; fossil 80,3%, LULUCF 19,7%
Elektrifizierungsgrad 17,6%; Strommix:
- Erneuerbare 31,9% (Wasser 14,3%, Solar 6,9%, Wind 8,1%)
- Kernkraft 9,0%
- fossile thermische Erzeugung 59,1%.

B. Klimapolitik

1. Aufkommen des öffentlichen Klimabewusstseins 1900-1992

Ersten Klimawarnungen aus der Wissenschaft gab es seit über hundert Jahren. Aus heutiger Rückschau erscheinen sie als wichtige Vorboten; im damaligen Umfeld wurden sie kaum zur Kenntnis genommen. Um 1900 wies der Schwede Svante Arrhenius darauf hin, dass die Verbrennung fossiler Stoffe eine globale Erwärmung verursachen werde. Ihm folgten 1938 der Engländer Guy Stewart Callendar, 1954 der Amerikaner Gilbert Plass. Weiterhin handelte es sich um die Meinungen von Aussenseitern, nicht um den wissenschaftlichen Mainstream. Noch um 1970 diskutierten Fachleute, ob statt einer Erwärmung durch zunehmendes CO_2 ein Temperaturrückgang durch zunehmenden Smog drohe. 1978 veröffentlichten die Schweizer Hans Oeschger und Urs Siegenthaler eine Studie, worin sie die künftige CO_2-Konzentration vorhersagten. 1979 prognostizierte der amerikanische National Research Council im «Charney Report», dass eine Verdopplung von CO_2 zu einer Erwärmung um drei Grad Celsius führen würde. Langsam trat die Erwärmung der Atmosphäre als Zukunftsproblem ins Bewusstsein der Menschen.

1988 gründeten die *Weltorganisation für Meteorologie* (World Meteorological Organization, WMO) und das *Umweltprogramm der Vereinten Nationen* (United Nations Environment Programme, UNEP) den *Weltklimarat* (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC). Der IPCC trug den Forschungsstand zusammen und informierte Regierungen über Ursachen, Folgen

und Handlungsmöglichkeiten. Mit der wissenschaftlichen und politischen Etablierung des Klimaproblems um 1988/89 entstand eine eigenständige internationale Klimabewegung. 1989 gründeten Umweltorganisationen aus Europa und Nordamerika das *Climate Action Network*, um ihre Arbeit bei den entstehenden UN-Klimaverhandlungen zu koordinieren. Bis heute gehören diesem Netzwerk mehr als 2'500 Organisationen in über 130 Ländern an.

Da kein Staat im Alleingang die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre wesentlich senken kann, war internationale Zusammenarbeit erforderlich, insbesondere zwischen grossen Emittenten wie den USA und der Sowjetunion. Die Welt war damals aber politisch gespalten, nämlich in den von den USA angeführten Westen und den von der Sowjetunion angeführten Ostblock. Die beiden Blöcke standen einander in einer angespannten Bedrohungshaltung gegenüber, die als *Kalter Krieg* bezeichnet wurde und umfassende politische Vereinbarungen unmöglich machte.

1989 brachen die kommunistischen Regimes in Osteuropa zusammen; 1991 löste sich die Sowjetunion auf. Der Kalte Krieg war zu Ende. Der Weg war frei für weltweite Verhandlungen. 1992 lud die Organisation der Vereinten Nationen (*United Nations*, UN) alle Mitgliedstaaten zu einer Weltklimakonferenz nach New York ein. International koordinierte Bestrebungen zum Schutz des Klimas konnten beginnen.

2. Entwicklung 1992-2025

Faktenlage am Vorabend der ersten Weltklimakonferenz von 1992

Für die Teilnehmer der Weltklimakonferenz von 1992 waren namentlich die folgenden, damals bekannten Tatsachen von Bedeutung:

Im Zeitraum 1970-1992 war der weltweite Primärenergieverbrauch von 57,2 auf 97,1 PWh[17] angestiegen.

Die Stromproduktion war von rund 5,0 auf 12,3 PWh angestiegen, pro Einwohner von 1'341 auf 2'241 kWh.

Das Verhältnis der Stromproduktion zum Endenergieverbrauch war von 8,7% auf 12,7% angestiegen.

Die Stromerzeugung nach Energiequelle hatte sich wie folgt entwickelt:

- Fossile Quellen von 3'696 TWh auf 7'808 TWh
- Wasserkraft von 1'175 TWh auf 2'208 TWh
- Kernkraft von 79 TWh auf 2'112 TWh
- Solar- und Windkraft von 0 TWh auf 5 TWh
- Andere erneuerbare[18] von 26 TWh auf 131 TWh.

Die prozentualen Anteile der Energiequellen an der Stromerzeugung waren 1992 die folgenden:

- Fossile Quellen 63,7%
- Wasserkraft 18,0%
- Kernkraft 17,2%
- Solar- und Windkraft: unter 0,1%
- Andere erneuerbare 1,1%

Die jährlichen Treibhausgasemissionen waren von 1970 bis 1992 von rund 28,9 auf rund 37,5 Gt CO_2eq angestiegen.

---

17 1 Petawattstunde (PWh) = 1'000 Terawattstunden (TWh) = 1'000'000 Gigawattstunden (GWh) = 1'000'000'000 Megawattstunden (MWh) = 1'000'000'000'000 Kilowattstunden (kWh).

18 Geothermie sowie Strom aus Holz, ferner aus landwirtschaftlichen Reststoffen, Biogas und biogenen Abfällen.

UN 1992 New York: Klimarahmenkonvention

1992 verabschiedeten die Staaten in New York die Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (*United Nations Framework Convention on Climate Change*, UNFCCC, nachstehend Rahmenkonvention). Sie steht bis heute in Kraft und bildet die Grundlage für alle späteren Klimavereinbarungen. Die 198 Vertragsparteien umfassen alle 193 UN-Mitgliedstaaten, ferner die Cookinseln und Niue, die Europäische Union (EU) als regionale Organisation, Palästina (seit 2016) und den Heiligen Stuhl (seit 2022).

Das Abkommen trug der Tatsache Rechnung, dass die Länder seit der Industrialisierung in unterschiedlichem Mass zur Klimaerwärmung beigetragen hatten und weiterhin beitrugen und unterschiedlich viel zu deren Eindämmung leisten konnten. Anfang der 1990er-Jahre lagen die THG-Emissionen vieler Industrieländer bei 10 bis 20 Tonnen CO_2-Äquivalenten pro Kopf und Jahr, in vielen Entwicklungsländern unter einer Tonne.

Die Rahmenkonvention von 1992 erfasst die Emissionen nach dem Territorialprinzip. Ziel ist, dass die Länder ihre *direkten* Emissionen reduzieren. Die indirekten Emissionen sind nicht Gegenstand der Rahmenkonvention und folglich auch nicht der späteren Vereinbarungen, die auf der Rahmenkonvention fussen. Dieses Regelungskonzept beruht auf der Annahme, dass das Klima durch keine indirekten Emissionen mehr belastet sein wird, sobald alle Länder ihre direkten Emissionen auf brutto null oder durch kompensierende Absenkungen auf netto null reduziert haben.

Die Rahmenkonvention gruppierte die Länder ursprünglich nach Entwicklungsstand und Leistungsfähigkeit in drei Kategorien. Die Kategorien überlappten sich insofern, als die zweite Kategorie eine Teilmenge der ersten war. Die Einteilung der Länder wurde festgeschrieben in Dokumenten, die dem Konventionstext als Anhänge beigefügt wurden.

Der *Anhang I* umfasste die damaligen Industrieländer sowie die sogenannten Länder im Übergang zur Marktwirtschaft, d.h. die Länder des bisherigen Ostblocks, bei denen der Kommunismus seit 1989 nicht mehr Staatsideologie war[19]. Alle Länder des Anhangs I sollten politische Massnahmen zur Begrenzung ihrer Treibhausgasemissionen ergreifen und bis zum Jahr 2000 eine Rückkehr auf das Emissionsniveau von 1990 anstreben.

Der *Anhang II* umfasste eine Teilmenge von Anhang I, nämlich die am weitesten entwickelten Länder, d.h. im Wesentlichen die damaligen OECD-Industrieländer[20]. Sie übernahmen zusätzlich Pflichten zur Finanzierung, zur Unterstützung der Berichterstattung und zur Förderung des Zugangs der Entwicklungsländer zu umweltverträglichen Technologien. Im Anhang II fehlten die Länder des früheren Ostblocks.

Die *nicht in Anhang I aufgeführten Staaten*, darunter China, das sich damals weiterhin zum Kommunismus bekannte, Indien und Brasilien, übernahmen lediglich Pflichten zur Berichterstattung und zum Erstellen von Klimaschutzprogrammen, waren aber dispensiert von der wichtigsten Obliegenheit der Anhang-I-Länder, nämlich bis zum Jahr 2000 eine Rückkehr auf das Emissionsniveau von 1990 herbeizuführen. Die Nicht-Anhang-I-Länder durften im Einklang mit dem Abkommen ihre direkten Emissionen weiterhin erhöhen. Ausserdem sollten sie von der Finanz- und Technologiehilfe der Anhang-II-Länder profitieren.

---

19 Die 40 Staaten des Anhangs I der UN-Klimarahmenkonvention sind: Australien; Belarus; Belgien; Bulgarien; Dänemark; England; Estland; Finnland; Frankreich; Deutschland; Griechenland; Island; Irland; Italien; Japan; Kanada; Kroatien; Lettland; Liechtenstein; Litauen; Luxemburg; Monaco; Niederlande; Neuseeland; Norwegen; Österreich; Polen; Portugal; Rumänien; Russische Föderation; Slowakei; Slowenien; Spanien; Schweden; Schweiz; Tschechische Republik; Türkei; Ukraine; Ungarn; USA. Zusätzlich ist die Europäische Union selbst Vertragspartei des Anhangs I.

20 24 Staaten und zusätzlich die EU als regionale Organisation (aber nicht alle EU-Staaten einzeln), nämlich, Australien, Belgien, Dänemark, Deutschland, England, Finnland, Frankreich, Griechenland, Island, Irland, Italien, Japan, Kanada, Luxemburg, Neuseeland, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien, Türkei, USA.

Für alle Länder galt die Pflicht, nationale Treibhausgasinventare und -berichte vorzulegen. Umfang, Detailgrad und Fristen waren nach Ländergruppen abgestuft. Die Inventarpflicht umfasste die Ermittlung bzw. Schätzung sowie die Veröffentlichung aller im Land jährlich freigesetzten Treibhausgase.

Die Rahmenkonvention sah die Einrichtung eines ständigen Sekretariats vor, ferner die Abhaltung wiederkehrender Konferenzen der Vertragsparteien (*Conference of the Parties*, COP). - Seit der ersten COP von 1995 finden diese Konferenzen in der Regel jährlich statt.

Die Rahmenkonvention ist ein Vertrag mit völkerrechtlich verbindlichen Pflichten der Parteien bezüglich Ermittlung ihrer Emissionen und Berichterstattung. Mit diesen Pflichten sowie mit dem Sekretariat und den jährlichen COPs schuf die Konvention dauerhafte Institutionen und Verfahren. Klimawandel und Klimaschutz wurden feste Themen der nationalen und internationalen Politik.

Bezüglich der Reduktion direkter Emissionen setzte die Konvention den Anhang-I-Ländern ein Ziel, auferlegte ihnen aber keine Pflichten.

Die Rahmenkonvention konzipierte den Klimaschutz lückenhaft. Der Dispens der Nicht-Anhang-I-Länder vom Reduktionsziel der Rückführung auf den Stand von 1990 und die grundsätzliche Ausklammerung der indirekten Emissionen aus dem Schutzkonzept erlaubte die Lieferung emissionsbelasteter Güter und Dienstleistungen in beliebigen Mengen aus Nicht-Anhang-I-Ländern - z.B. aus China - in Anhang-I-Länder - z.B. in die EU und die Schweiz. So konnten die Anhang-I-Länder im Einklang mit der Konvention ihre Fussabdrücke durch Importe aus Nicht-Anhang-I-Ländern beliebig vergrössern. Die Nicht-Anhang-I-Länder durften im Einklang mit der Rahmenkonvention sowohl ihre direkten als auch ihre indirekten Emissionen weiterhin vergrössern. Die Schutzlücke der Konvention war kein Versehen, sondern bildete ab, wozu die Länder damals bereit waren und wozu sie *nicht* bereit waren.

COP-3 1997 Kyoto: Minderungspflichten, Emissionsrechtehandel

Nachdem die Menschheit in den folgenden Jahren dem Niveau von 1990 nicht nähergekommen war, sondern sich von ihm weiter entfernt hatte, verabschiedete die COP 1997 in Kyoto eine Ausführungsvereinbarung zur Rahmenkonvention von 1992. Ihr Text wurde später "Kyoto-Protokoll" genannt. Der Kern bestand darin, dass die Industrieländer - nur sie - statt unverbindlicher Zielvorgaben fortab verbindliche Begrenzungsziele übernahmen. Bei den meisten dieser Länder lagen diese Ziele unterhalb ihrer damaligen Emissionen und bedeuteten demgemäss Reduktionsverpflichtungen. Einige wenige Industrieländer verpflichteten sich lediglich dazu, ihre künftigen Emissionen nicht über den Stand von 1990 zu erhöhen oder definierte Zuwächse ihrer Emissionen nicht zu überschreiten.

Das Protokoll wurde am 11. Dezember 1997 beschlossen, liess aber viele Einzelfragen offen. Bis zum Konsens über die konkrete Ausgestaltung und bis zur Ratifikation durch die Länder blieb ein weiter Weg zu gehen.

Die USA hatten eine *Flexibilisierung* der Pflichterfüllung verlangt als Voraussetzung dafür, dass sie einem verbindlichen Reduktionsziel zustimmen konnten. Zu diesem Zweck schlugen die USA die Schaffung von *handelbaren Emissionsrechten* vor. Ein solches System hatte sich in den USA zu Zeiten des sauren Regens mit handelbaren Schwefeldioxid-Zertifikaten bewährt. Unterstützt wurden die USA von Kanada, Australien, Neuseeland, Norwegen, der Schweiz und weiteren Staaten. Die Clinton-Regierung war nur bereit, eine zahlenmässige Reduktionsverpflichtung zu akzeptieren, wenn sie diese kostengünstig erfüllen konnte durch Handel mit Emissionsrechten anderer Industriestaaten, Finanzierung preisgünstiger Minderungen im Ausland und zeitliche Flexibilität unter Einbeziehung sämtlicher Treibhausgase und von Kohlenstoffsenken.

Die Finanzierung preisgünstiger Minderungen im Ausland sollte der Schaffung handelbarer Kompensations-Zertifikate dienen, indem die Verminderung von Emissionen in einem

Entwicklungsland - beispielsweise durch Bau einer Methan-Abscheidungsanlage für eine bestehende Mülldeponie in Afrika mit einer Verminderung der dortigen Emissionen um 100'000 Tonnen CO_2eq pro Jahr - der Geldgeberin erlaubte, in ihrem Betrieb weiterhin jährlich 100'000 Tonnen CO_2eq freizusetzen, ohne sie mit Emissionszertifikaten abgelten zu müssen.

Im Gegensatz dazu schlug Brasilien die Schaffung eines Fonds vor, der alimentiert werden sollte durch die Strafgelder der Industrieländer aus Nichterfüllung ihrer Klimaschutzverpflichtungen. Das Geld dieses Fonds sollte an die Entwicklungs- und Schwellenländer ausgeschüttet werden zur Unterstützung ihrer Klimaschutzmassnahmen.

Viele Entwicklungsländer standen dem von den USA geforderten Emissionshandel zunächst skeptisch gegenüber. Sie befürchteten, Industrieländer könnten ihre Verantwortung auf ärmere Länder verlagern, dort die billigsten Minderungen aufkaufen und ihre eigene fossile Wirtschaftsstruktur weitgehend unverändert lassen. Die Flexibilisierung wurde für die Entwicklungsländer aber akzeptabel, weil sie ihnen Investitionen, Technologie und einen Anteil der Erlöse für den Anpassungsfonds[21] versprach. Dieser Fonds war eine Abwandlung des von Brasilien vorgeschlagenen Sanktionsfonds.

Da nicht alle Anhang-I-Länder zur Übernahme bindender Klimaschutz-Verpflichtungen bereit waren, wurde der etwas kleinere Kreis der Willigen in einem neuen *Anhang B*[22] zur Rahmenkonvention zusammengefasst. Jedem Anhang-B-Land wurde - nach Ermittlung[23] seiner bisherigen Emissionen und den wirtschaftlich tragbaren Einschränkungen - Begrenzungsziele auferlegt. Dies geschah dadurch, dass jedem Land eine maximale Menge jährlicher Emissionen zugeteilt wurde, die nicht überschritten werden durfte. Die zugeteilte Menge wurde dargestellt als eine Summe von "Emissionsrechten" *(Assigned Amount Units, AAUs)*, von denen jedes einzelne die völkerrechtskonforme Emission einer Tonne CO_2eq abdeckte. Im Verhältnis zwischen der Staatengemeinschaft und den einzelnen Ländern war die Zuteilung keine Rechtsübertragung und kein Verkauf von Einheiten, sondern die Festlegung der nationalen Emissionsgrenzwerte. Hingegen konnten die Länder mit AAUs untereinander Handel treiben, indem Länder, die weniger Emissionen als die ihnen zugeteilten AAUs verursachten, überschüssige AAUs an andere Länder verkauften. Die Länder konnten in analoger Weise ihren emissionsintensiven Unternehmen begrenzte Mengen von nationalen Emissionsrechten zuteilen - kostenlos oder gegen ein Entgelt -,

---

21 Unter "Anpassung" (engl. adaptation) werden Massnahmen zur Sicherung der Lebensgrundlagen bei fortschreitender Klimaerwärmung verstanden, z.B. der Bau von Dämmen gegen Überschwemmungen oder Vorkehren zur Bewältigung von Dürreperioden. - Die Klimaanpassung war seit der Rahmenkonvention von 1992 ein grundsätzlich gleichrangiges Ziel neben dem Klimaschutz (Verminderung der TGH-Emissionen), hatte aber anfänglich ein geringeres Gewicht und wurde erst nach 2020 zu einem Ziel, das Mittel in etwa gleicher Höhe beanspruchen sollte wie der Klimaschutz.

22 Der Anhang B umfasste 37 Staaten und zusätzlich die EU als regionale Organisation, d.h. alle damaligen EU-Staaten Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, England, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Niederlande, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechien und Ungarn sowie die EU selber (diese mit einem gemeinsamen Ziel für ihre Mitgliedländer), ferner Australien, Island, Japan, Kanada, Liechtenstein, Monaco, Neuseeland, Norwegen, Russland, Schweiz und Ukraine. Für alle EU-Länder war für 2008-2012 ein Ziel von 92% der Emissionen von 1990, also eine Reduktion um 8%, festgelegt. Die EU nutzte jedoch die in Artikel 4 vorgesehene Möglichkeit, die gemeinsame Reduktion um 8% intern unterschiedlich zu verteilen. So durfte Portugal seine Emissionen erhöhen, während Deutschland und Dänemark stärker reduzierten. Von den weiteren Ländern hatten nicht alle eine Reduktionsverpflichtung: Russland, die Ukraine und Neuseeland mussten ihre Emissionen lediglich auf den Stand von 1990 begrenzen, nicht reduzieren, Norwegen durfte um 1% erhöhen, Australien um 8% und Island um 10%.

23 Die Ermittlung erfolgte indirekt aufgrund der nationalen Statistiken bezüglich des Imports fossiler Stoffe und anderer klimatisch relevanter Vorgänge.

mit denen die Unternehmen untereinander Handel treiben konnten. Für den Handel wurden Emissionshandelssysteme *(EHS, engl. Emission Trading Systems, ETS)* eingerichtet[24].

Die meisten Länder gaben die nationalen Einheiten überwiegend kostenlos ab, und zwar an jene Akteure, die besonders emissionsintensive Prozesse betrieben (im Folgenden "Betreiber"). Die kostenlose Abgabe war insofern sachgerecht, als Betreiber, die ihre Emissionen auf das zugeteilte Emissionsbudget zu begrenzen vermochten und also ihre Begrenzungs- oder Reduktionspflicht erfüllten, keine finanziellen Nachteile erleiden sollten. Nicht jede emittierte Tonne, nur die Überschreitung des zugeteilten Budgets sollte mit Kostenfolgen verbunden bzw. "bepreist" werden. Bei der Zuteilung an einzelne Betreiber konnte ein Land deren geplantes und erwünschtes unternehmerisches Wachstum berücksichtigen und einzelnen Betreibern mehr Einheiten zuteilen, als ihrem aktuellen Ausstoss entsprach.

Die Zuteilungen erfolgten für bestimmte Zeiträume, nämlich für eine erste Verpflichtungsperiode 2008-2012 und nochmals für eine zweite Periode 2013-2020 (nach 2020 wurde das Kyoto-System durch das etwas andere Modell der Pariser Konvention ersetzt).

Die Flexibilisierung der Pflichterfüllung umfasste nicht nur die Möglichkeit, fehlende Einheiten im Emissionshandel zu kaufen, sondern zudem die Möglichkeit, dass ein *Anhang-B-Land von einem anderen Anhang-B-Land* Einheiten erwarb durch gemeinsame Klimaschutzmassnahmen *("Joint Implementation", JI)* im anderen Land. So konnte beispielsweise die Schweiz als investierendes Land zusammen mit der Ukraine als Gastgeberland die Modernisierung und Effizienzsteigerung des ukrainischen Stromnetzes finanzieren und dadurch den Bedarf an ukrainischem Kohlestrom vermindern. Gemäss den dadurch eingesparten Emissionen wandelte die Ukraine die entsprechende Menge ihrer AAUs in übertragbare Verminderungseinheiten *(Emission Reduction Units, ERUs)* um und übertrug diese der Schweiz. Die Schweiz konnte solche ERUs zur Erfüllung ihrer Reduktionspflichten gegenüber der Staatengemeinschaft verwenden.

Sodann konnten *Anhang-B-Länder* auch *in Schwellen- und Entwicklungsländern*, die keine Begrenzungspflichten hatten und keine zugeteilten AAUs besassen, Verminderungseinheiten erzeugen, indem sie in solchen Ländern Massnahmen finanzierten, welche laufende Emissionen verminderten und zudem die klimatisch saubere Entwicklung *(Clean Development)* des Gastgeberlands förderten. Beispielsweise konnte die Schweiz für eine Mülldeponie in Brasilien, aus der Methan in die Luft strömte, eine Anlage finanzieren, welche das Methan neutralisierte und die laufenden Emissionen verminderte. Aus der Zusammenarbeit der Schweiz mit Brasilien, einem sogenannten *Clean Development Mechanism (CDM)*, erhielt die Schweiz für jede in Brasilien eingesparte Tonne CO_2eq eine zertifizierte Verminderungseinheit *(Certified Emission Reduction, CER)*, die sie ebenfalls an ihre Reduktionspflichten gegenüber der Staatengemeinschaft anrechnen konnte.

Die EU beurteilte diese Flexibilisierungen zunächst skeptisch. Sie wollte stärkere inländische Reduktionsmassnahmen sowie verbindlichere und höhere Reduktionsziele. Auch wollte sie verhindern, dass sich westliche Staaten praktisch vollständig durch den Kauf billiger russischer oder ukrainischer Überschusseinheiten freikaufen konnten. Denn diese beiden Länder besassen nach dem Zusammenbruch der kommunistischen Regimes aufgrund der Schrumpfung ihrer Volkswirtschaften und Emissionen damals einen Überschuss an AAUs, die sie mit Gewinn verkaufen konnten. Die EU verlangte deshalb, dass die Mechanismen nur ergänzend zu inländischen Massnahmen genutzt würden. Sie akzeptierte sie schliesslich als Teil des Kyoto-Kompromisses.

Viele Staaten wollten nicht ratifizieren, bevor alle wirtschaftlich bedeutsamen Regeln feststanden. Die Verhandlungen kamen auf der COP 6 in Den Haag im November 2000 beinahe zum Scheitern.

---

[24] Nach Einführung des Emissionsrechtehandels schwankte der Preis zunächst sehr stark, nämlich zwischen wenigen Dollars und etwa 100 Dollars. In der Schweiz liegt der durchschnittliche Preis im Jahr 2026 etwa bei 70 CHF, in der EU, mit deren EHS die Schweiz verbunden ist, etwa bei 80 Euros.

Erst die Bonner Vereinbarungen vom Juli 2001 und die Marrakesch-Abkommen vom November 2001 legten die detaillierten Regeln für Handel, JI, CDM, Register, Senken und Einhaltung fest. Zahlreiche Unterzeichner warteten mit der Ratifikation, bis die Ausführungsregeln feststanden.

Hinzu kam etwas Weiteres: Das Kyoto-Protokoll verlangte für sein Inkrafttreten kumulativ die Ratifikation durch mindestens 55 Vertragsparteien und die Ratifikation durch Anhang-I-Staaten, die zusammen mindestens 55% der CO_2-Emissionen der Anhang-I-Staaten von 1990 repräsentierten. Die USA verursachten rund 36% dieser Anhang-I-CO_2-Emissionen. Obwohl die Clinton-Regierung das Protokoll 1998 unterzeichnete, legte sie es dem Senat nicht zur Ratifikation vor. Bereits 1997 hatte der Senat mit einer Resolution erklärt, er werde kein Abkommen akzeptieren, das nicht vergleichbaren Verpflichtungen für grosse Entwicklungsländer enthalte, oder das der amerikanischen Wirtschaft erheblich schade. Präsident George W. Bush erklärte 2001 endgültig, die USA würden das Protokoll nicht ratifizieren. Der Hauptgrund für die amerikanische Weigerungshaltung war nicht fehlende Flexibilität - die USA hatten diese weitgehend erfolgreich durchgesetzt -, sondern die Belastung der Wirtschaft durch die Kyoto-Reduktionspflicht sowie das Fehlen verbindlicher Ziele für China, Indien und andere Entwicklungsländer.

Nachdem die USA ausfielen, erreichten die übrigen ratifizierenden Mitglieder der Konvention zunächst nur rund 44% statt der erforderlichen 55% zustimmender Staaten. Russland repräsentierte rund 17% und wurde damit zum Zünglein an der Waage. Russland hinterlegte seine Ratifikationsurkunde am 18. November 2004. Neunzig Tage später, am 16. Februar 2005, trat das Kyoto-Protokoll von 1997 in Kraft.

Die erste fünfjährige Verpflichtungsperiode wurde für die Jahre 2008-2012 festgesetzt. Übergeordnetes Ziel war, dass die Anhang-B-Länder in diesem Zeitraum *als Gruppe* ihre Emissionen um mindestens 5% unter das Niveau von 1990 reduzieren sollten. Die 37 Anhang-B-Länder waren zahlenmässig ein Fünftel der 195 Vertragsstaaten und verursachten damals etwa einen Fünftel der globalen Emissionen, während vier Fünftel der Emissionen von den übrigen 158 Vertragsstaaten stammten, die keine Reduktionspflichten übernahmen. Die Internationale Luft- und Seeschifffahrt unterlag nicht den nationalen Grenzwerten der Anhang-B-Länder.

So bildete sich die in der Rahmenkonvention von 1992 grundgelegte Schutzlücke auch im Kyoto-Protokoll ab: Nur ein kleiner Teil der Emittenten übernahm Reduktions- und Begrenzungspflichten. Die Pflichten betrafen nur die *direkten* Emissionen, nicht die indirekten. Der Grossteil der Emittenten übernahm überhaupt keine Begrenzungspflichten.

Bei Nichterfüllung der übernommenen Pflichten gab es zwar keine Geldbussen. Aber das betreffende Land musste sich für die folgende Periode einem strengen Aktionsplan unterwerfen, eine zusätzliche Reduktion der AAU-Zuteilung und Einschränkungen im Emissionsrechtehandel hinnehmen - Konsequenzen, welche das Prestige eines Landes beschädigen und den Nationalstolz verletzen konnten.

Von den 37 Ländern des Anhangs B erfüllten 24 ihre Pflichten für 2008-2012 real je im Inland. 12 Länder überschritten ihre Budgets, erfüllten ihre Pflichten aber dennoch nach den Kyoto-Regeln, indem sie Waldsenken[25] in die Erfüllungsrechnung einsetzten oder zusätzliche Kyoto-Einheiten kauften. Kanada, das nicht erfüllte und den Fehlbetrag auch nicht durch den Zukauf von Kyoto-

[25] Unter Waldsenke versteht man die Bindung von Kohlenstoff in Wäldern, sofern eine Vergrösserung des Waldbestands vorliegt. Wachsen die Wälder eines Landes stärker, als Kohlenstoff durch Holznutzung, Absterben und Rodung freigesetzt wird, so entsteht eine Nettosenke, d.h. ein Entzug von CO_2 aus der Atmosphäre. Diese Nettoaufnahme durfte innerhalb einer festgelegten Obergrenze auf die nationale Kyoto-Bilanz angerechnet werden. Seit 2021 erfolgt die Anrechnung nicht mehr nach den Regeln des Kyoto-Protokolls, sondern unter dem Pariser Modell: Die tatsächlichen Nettoemissionen und Nettoentnahmen des gesamten Sektors LULUCF werden in die nationalen Treibhausgasbilanzen und Emissionsbudgets für 2021-2030 einbezogen. Die frühere Obergrenze gilt nicht mehr.

Einheiten deckte[26], trat kurz vor Ablauf der Verpflichtungsperiode aus dem Kyoto-Protokoll aus. Statt Geld auszugeben oder erniedrigende Konsequenzen hinzunehmen, verliess das Land erhobenen Hauptes den Kreis der Anhang-B-Länder.

COP18 2012 Doha: Zweite Verpflichtungsperiode 2013-2020

2012 beschlossen die Vertragsstaaten in Doha eine zweite, achtjährige Verpflichtungsperiode von 2013 bis 2020 mit verstärkten Reduktionszielen. Die teilnehmenden Anhang-B-Staaten - nun auch ohne Japan, Russland und Neuseeland, die bei der zweiten Runde nicht mehr mitmachten[27] - übernahmen neue Reduktionspflichten, die zusammen mindestens 18% unter das Niveau von 1990 führen sollten. Die teilnehmenden Länder der zweiten Runde waren insgesamt noch für 15% der globalen Emissionen ursächlich. 85% der Emissionen stammten von Ländern, die nicht mitmachten.

Die Doha-Änderung trat wegen der schleppenden Ratifikation erst am 31. Dezember 2020, dem letzten Tag der Verpflichtungsperiode, in Kraft. Trotzdem wurden die eingegangenen Verpflichtungen von den teilnehmenden Ländern erfüllt, wiederum teilweise real im Inland, teilweise unter Anrechnung von Waldsenken und Zukauf von Kompensationen[28] aus dem Ausland[29].

COP21 2015 Paris: Ende der Kyoto-Verpflichtungen; stattdessen NDCs

Die Ablehnung verbindlicher Emissionsbegrenzungspflichten durch Länder, die zusammen mehr als vier Fünftel der globalen Emissionen verursachten, machte klar, dass das Konzept von Kyoto den Klimaschutz nicht voranbrachte. So wurde nach einer neuen Lösung gesucht, die alle Länder der Rahmenkonvention einbeziehen sollte. Sie wurde an der Klimakonferenz in Paris im Jahr 2015 in der Weise gefunden, dass auf verbindliche Emissionsbegrenzungspflichten verzichtet wurde und dass stattdessen möglichst alle Länder national festgelegte Beiträge zum Klimaschutz *(Nationally Determined Contributions, NDCs)* vorlegen, periodisch fortschreiben und über die Umsetzung berichten sollten. Die teilnehmenden Länder behielten die Freiheit, ihre Minderungsziele und die Pfade zu ihrer Verwirklichung eigenständig festzusetzen. Wer niedrige Ziele anmeldete oder die angemeldeten Ziele nicht erreichte, hatte keine Sanktionen zu befürchten. Verbindlich waren lediglich die administrativen Pflichten zur Vorlage und Fortschreibung von NDCs sowie einige andere Verfahrenspflichten.

Dem Pariser Abkommen traten alle UN-Mitglieder mit Ausnahme von Iran, Libyen, Jemen und den USA bei. Diese letztgenannten vier Länder blieben aber Mitglieder der Rahmenkonvention von 1992. 53 Länder, die insgesamt 25% der weltweiten Emissionen verursachen, haben ihre Emissionen seit 2015 vermindert. Die übrigen Länder haben ihren THG-Ausstoss derart erhöht, dass die weltweiten Emissionen insgesamt von Jahr zu Jahr gewachsen sind.

---

26 Kanada nannte einen Betrag von rund 14 Milliarden kanadischen Dollar, die für den Zukauf der nötigen AAUs hätte aufgebracht werden müssen. Martin Thunert, Kanada-Experte am Heidelberg Center for American Studies kommentierte am 13.12.2011, die kanadische Regierung agiere lieber "wirtschaftsfreundlich" als international solidarisch: *"Kanada ist ein Land ohne koloniale Vergangenheit. Man hat hier nicht das Gefühl, anderen Ländern etwas zu schulden."* Ein weiterer Grund war, dass auch die USA und China das Kyoto-Protokoll nicht anerkannt hatten, zugleich aber über 40 Prozent des weltweiten CO_2-Ausstosses verursachten. Gerade gegenüber der Wirtschaftsmacht USA wollte Kanada keine einseitigen Lasten schultern.

27 Bei der zweiten Runde schieden Japan, Russland, Neuseeland als Verpflichtete aus; Kanada war schon kurz vorher ausgeschieden; neu kamen Belarus, Kasachstan, Zypern und Malta dazu. Damit blieb die Gesamtzahl von 37 verpflichteten Ländern unverändert. Aber wichtige grosse Emittenten nahmen nicht mehr teil. - Die aus dem Kyoto-Protokoll ausgeschiedenen Länder blieben weiterhin Vertragsstaaten der Rahmenkonvention von 1992.

28 Zu den Kompensationen vgl. den Abschnitt "Kostenvermeidung durch Kompensationen", unten.

29 Zur zweitgenannten Gruppe, die ihre Reduktionspflichten nicht vollumfänglich im Inland erfüllten, gehörten Australien, Liechtenstein, Monaco, Norwegen und die Schweiz.

Im Pariser Modell entfiel die bisherige Einteilung der Länder mittels der Anhänge I und B in Kategorien mit und ohne Verpflichtungen. Stattdessen richtete das Übereinkommen an alle Länder den Appell, *möglichst ambitionierte* Klimaschutzziele festzusetzen und zu verwirklichen[30].

Alle Länder haben NDCs für das erste Zieljahr 2030 vorgelegt. Nach dem Pariser Modell muss jede Vertragspartei grundsätzlich alle fünf Jahre eine fortgeschriebene NDC mitteilen. Die folgende NDC-Runde mit Zieljahr 2035 sollte 2025 eingereicht werden. Bis zum August 2026 haben 150 von 194 Vertragsparteien ihre neuen Ziele eingereicht.

Auch unter dem Pariser Modell bleiben Minderungsübertragungen möglich, jedoch wurden die im Kyoto-System gebildeten Begriffe AAU, ERU und CER[31] nicht ins neue Modell übernommen. Stattdessen können Industrieländer nun in Zusammenarbeit mit anderen Ländern *international übertragene Minderungsergebnisse (Internationally Transferred Mitigation Outcomes, ITMOs)*, wiederum in der Grösse von 1 t CO_2eq, generieren, an die Erfüllung ihrer NDCs anrechnen und so die Kosten ihrer Zielerreichung senken[32].

Als übergeordnetes Ziel wurde in Paris festgelegt, dass die Erderwärmung deutlich unter 2 °C gehalten werden sollte, bezogen auf die Durchschnittstemperatur der vorindustriellen Epoche von 1850-1900. Zugleich wurden Anstrengungen zur Begrenzung auf 1,5 °C verlangt. Die weiterhin steigenden Emissionen sollten global möglichst bald ihren Höchststand erreichen (Art. 4 Ziff. 1[33]). In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts, d.h. von 2050 bis 2100, sollte ein Gleichgewicht von Emissionen und Entnahmen durch Senken (sogenannte negative Emissionen) erreicht werden. (Diese Zielsetzung ersetzte diejenige von Kyoto, wo nicht eine Begrenzung der Erderwärmung, sondern die Reduktion der Emissionen unter die Werte von 1990 vorgegeben worden war.)

Das Pariser Abkommen enthielt den Begriff "netto null" nicht wörtlich. Aber das in Artikel 4 Absatz 1 verlangte Gleichgewicht von Emissionen und Senken, das in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts erreicht werden sollte, wurde von den Beteiligten mit der Formel "Netto Null 2050" auf den Punkt gebracht. Der Begriff "Netto Null" fand Eingang in zahlreiche nationale Gesetze[34].

---

30 Klimaübereinkommen von Paris, Art. 4 Ziff. 2: "Jede Vertragspartei erarbeitet, übermittelt und behält aufeinanderfolgende national festgelegte Beiträge bei, die sie zu erreichen beabsichtigt. Die Vertragsparteien ergreifen innerstaatliche Minderungsmassnahmen, um die Ziele dieser Beiträge zu verwirklichen." - Ziff. 3: "Jeder nachfolgende national festgelegte Beitrag einer Vertragspartei wird eine Steigerung gegenüber ihrem zum fraglichen Zeitpunkt geltenden national festgelegten Beitrag darstellen und ihre *grösstmögliche Ambition* unter Berücksichtigung ihrer gemeinsamen, aber unterschiedlichen Verantwortlichkeiten und ihrer jeweiligen Fähigkeiten angesichts der unterschiedlichen nationalen Gegebenheiten ausdrücken."

31 Alte CERs durften unter bestimmten Voraussetzungen zur Erfüllung der ersten NDC verwendet werden.

32 Pariser Abkommen Art. 6 Abs. 2: "Beteiligen sich Vertragsparteien auf freiwilliger Grundlage an kooperativen Ansätzen, die die Verwendung international übertragener Minderungsergebnisse zum Erreichen der national festgelegten Beiträge beinhalten, so fördern sie die nachhaltige Entwicklung und gewährleisten die Umweltintegrität und die Transparenz, auch beim Verwaltungshandeln; sie wenden im Einklang mit den Leitlinien, die von der als Tagung der Vertragsparteien dieses Übereinkommens dienenden Konferenz der Vertragsparteien beschlossen wurden, ein verlässliches Abrechnungsverfahren an, um unter anderem die Vermeidung von Doppelzählungen zu gewährleisten."

33 Pariser Abkommen Art. 4 Ziff. 1: "Zum Erreichen des in Artikel 2 genannten langfristigen Temperaturziels *[max +1,5 / 2 Grad]* sind die Vertragsparteien bestrebt, so bald wie möglich den weltweiten Scheitelpunkt der Emissionen von Treibhausgasen zu erreichen, wobei anerkannt wird, dass der zeitliche Rahmen für das Erreichen des Scheitelpunkts bei den Vertragsparteien, die Entwicklungsländer sind, grösser sein wird, und danach rasche Reduktionen im Einklang mit den besten verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnissen herbeizuführen, um in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts ein Gleichgewicht zwischen den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus Quellen und dem Abbau solcher Gase durch Senken auf der Grundlage der Gerechtigkeit und im Rahmen der nachhaltigen Entwicklung und der Bemühungen zur Beseitigung der Armut herzustellen."

34 Die EU hat das Ziel der Klimaneutralität bis 2050 gesetzlich festgelegt mit unmittelbarer Wirkung in allen 27 Mitgliedstaaten, jedoch mit der Einschränkung, dass das EU-Ziel für die Mitgliedstaaten zusammen gilt, nicht als Netto-null-Pflicht jedes einzelnen Landes. - Mehrere EU-Staaten haben sodann darüber hinaus ein eigenes nationales Ziel gesetzlich oder in einem parlamentarischen Klima-Rechtsakt verankert: *Dänemark* Klimaneutralität

Unter dem Pariser Modell hat sich das Problem von *mangelnder Teilnahme*, wie es im Kyoto-System bestanden hatte, zu *mangelnder Ambition und Umsetzung* verschoben. Ein Grossteil der weltweiten Emissionen stammt heute aus Staaten, deren gegenwärtige Zielsetzungen und Massnahmen nicht mit einem 1,5-°C-Pfad vereinbar sind. Das trifft insbesondere zu für die drei grössten Emittenten China, USA und Indien. Das neue NDC von China kündet bis 2035 lediglich 7-10% weniger Netto-Treibhausgasemissionen an als im (noch nicht genau bezeichneten) Spitzenjahr. Die USA sind aus dem Pariser Abkommen ausgetreten und haben kein NDC vorgelegt. Indien kündet zwar bis 2035 eine um 47% geringere Emissionsintensität des BIP gegenüber 2005 und eine Steigerung der nichtfossilen Stromerzeugungskapazität auf 60% an, jedoch ohne Obergrenze für die absoluten Emissionen; diese können bei starkem Wirtschaftswachstum weiter steigen. Russland hat ein schwaches Ziel angekündigt, das, wenn es von allen Ländern implementiert würde, voraussichtlich zu einer Erwärmung um 4 Grad führen müsste. Indonesien, ebenfalls ein grosser Emittent, verursacht weiterhin stark steigende Emissionen; 2024 wies Indonesien unter den grossen Emittenten die höchste prozentuale Zunahme auf.

Zu den Nicht-Vertragsparteien gehören neben den USA weiterhin Iran, Libyen und Jemen. Unter diesen Ländern ist vor allem Iran ein gewichtiger Emittent.

EU 2019: Green Deal

Vorgeschichte: Ab etwa 2005 hatte es an verschiedenen Orten auf der Welt koordinierte globale Klima-Aktionstage gegeben. In Grossbritannien entstanden ab 2006 die *Climate Camps*, zunächst bei Kohlekraftwerken und später beim Flughafen Heathrow. Ähnliche Aktionsformen verbreiteten sich in Deutschland, Australien, Kanada, Indien und in die USA. Einen ersten global wahrgenommenen Höhepunkt bildete die COP von Kopenhagen 2009, wo schätzungsweise 100'000 Menschen demonstrierten und gleichzeitig Aktionen und Mahnwachen in mehr als 130 Ländern durchgeführt wurden. Die Forderung an die Politik lautete auf ein "faires, ehrgeiziges und verbindliches" Klimaabkommen. Die Enttäuschung über das politisch schwache Ergebnis von Kopenhagen führte danach zeitweise zu Ermüdung. In den Jahren 2011-2017 entstanden neue Protestformen, so die Keystone-XL-Proteste in den USA und Kanada, die von Universitäten ausgehende Kampagne, Kapitalanlagen aus Kohle-, Erdöl- und Gasunternehmen abzuziehen, die "Ende-Gelände"-Bewegung in Deutschland mit Besetzungen von Braunkohletagebauen, Proteste indigener Gruppen gegen Pipelines, besonders Standing Rock 2016 und Klimagerechtigkeitsbewegungen in Lateinamerika, Afrika und Asien. Beim *People's Climate March* 2014 demonstrierten in New York mehr als 300'000 Menschen; gleichzeitig fanden rund

---

spätestens 2050; *Deutschland* Treibhausgasneutralität bis 2045; *Finnland* Klimaneutralität bis 2035 und danach netto-negative Emissionen; *Frankreich* CO_2-Neutralität bis 2050; *Griechenland* Klimaneutralität bis 2050; *Ungarn* Klimaneutralität bis 2050; *Irland* klimaneutrale Wirtschaft spätestens 2050; *Luxemburg* Klimaneutralität bis 2050; *Portugal* Klimaneutralität bis 2050; *Spanien* Klimaneutralität spätestens 2050; *Schweden* netto null spätestens 2045 und danach negative Emissionen; *Slowenien* klimaneutrale und klimaresiliente Gesellschaft bis 2050. - Auch die *Schweiz* hat netto null bis 2050 gesetzlich festgeschrieben. - Ausserhalb Europas haben folgende Staaten das Ziel in einem nationalen Gesetz oder einem vergleichbar verbindlichen Rechtsakt verankert: *Chile* CO_2-Neutralität bis 2050; *Fidschi* Netto-null-Treibhausgasemissionen bis 2050; *Japan* Klimaneutralität bis 2050; *Kanada* Netto-Null-Emissionen bis spätestens 2050; *Kolumbien* Netto-null-Emissionen bis 2050; *Moldau* Netto-null-Emissionen bis 2050; *Vereinigte Arabische Emirate* Klimaneutralität bis 2050; *Neuseeland* Netto-null bis 2050 Netto-null für alle Treibhausgase ausser biogenem Methan; für dieses gilt nur ein separates Minderungsziel; *Südkorea* Kohlenstoffneutralität bis 2050; *Taiwan* Netto-null-Emissionen bis 2050; *Vanuatu* Netto-null bis 2050 gesetzlich aufgenommen. - *Nicht in dieser Liste*, sondern mit späteren Zieljahren oder undeutlich formulierten Verpflichtungen stehen insbesondere *China* (Klimaneutralität 2060), *Indien* (2070), *USA* (2050), *Norwegen* (2050), *Österreich* (2040), *Türkei* (2053), *Australien* (2050), *Brasilien* (2050), *Saudi-Arabien* (2060), *Nigeria* (2050-2070) und *Südafrika* (2050). - Die nationalen Gesetze decken fast immer nur die territorialen Treibhausgasemissionen ab; Emissionen aus importierten Gütern, internationalem Flugverkehr oder Schifffahrt werden häufig nur teilweise erfasst.

2'000 Veranstaltungen in etwa 150 Ländern statt. Diese Bewegung bereitete gesellschaftlich den Boden für das Pariser Abkommen von 2015.

Während des aussergewöhnlich heissen und trockenen europäischen Sommers 2018 begann die damals 15-jährige Greta Thunberg vor dem schwedischen Parlament ihren "Schulstreik für das Klima". Daraus entstand innerhalb weniger Monate die weltweite Bewegung *Fridays for Future*. Die Gründe für die rasche Ausbreitung des Protests lagen in der einfachen und überall nachahmbaren Protestform des Schulstreiks, ferner in der internationalen Vernetzung durch die sozialen Medien, in der symbolischen Wirkung der jugendlichen Greta Thunberg, welche die Erwachsene wegen ihrer Untätigkeit zur Verantwortung zog, schliesslich in der zeitliche Nähe zu anstehenden europäischen und nationalen Wahlen. Hinzu kam ein alarmierender IPCC-Sonderbericht vom Oktober 2018. Im September 2019 erreichte die Bewegung ihren Höhepunkt. Man sprach von einer "grünen Welle". Innerhalb einer Woche gab es ungefähr 6'000 Veranstaltungen in 185 Ländern mit zusammen geschätzt 7,6 Millionen Teilnehmern. Es war die bis dahin grösste koordinierte Klimamobilisierung. In Deutschland gab es Demonstrationen in Hunderten Städten. In der Schweiz demonstrierten am 28. September 2019 etwa 75'000 Menschen in Bern. Bei der Europawahl 2019 erhielt die deutsche Partei der Grünen 20,5 Prozent, fast doppelt so viel wie 2014. In der Schweiz erreichten bei den Nationalratswahlen die Grünen 13,2 Prozent, ein Plus von 6,1 Prozentpunkten, die Grünliberalen 7,8 Prozent, ein Plus von 3,2 Prozentpunkten. Zusammen entfiel in beiden Ländern somit etwa ein Fünftel der Stimmen auf ausdrücklich grüne Parteien. Auch medial war 2019 ein Ausnahmejahr: In den vom *Media and Climate Change Observatory* beobachteten Zeitungen nahm die Klimaberichterstattung gegenüber 2018 um 73 Prozent zu.

Die EU-Politik folgte diesen Bewegungen. 2007-2009 hatte die EU die "*20-20-20-Ziele"* für das Jahr 2020 beschlossen (20% weniger Treibhausgasemissionen, 20% erneuerbare Energien, 20% höhere Energieeffizienz). 2014 hatte sie für 2030 ein Reduktionsziel von mindestens 40 Prozent weniger Emissionen als 1990 beschlossen. Im Rahmen der COP 2015 in Paris unterstützte die EU die langfristige Ausrichtung auf deutlich unter 2 °C beziehungsweise 1,5 °C. 2018 legte die Kommission mit *"A Clean Planet for All"* erstmals eine Strategie für Klimaneutralität bis 2050 vor. Nach dem Europaratswahlen von 2019 und den Wahlerfolgen grüner Parteien rief das Europäische Parlament am 28. November 2019 den "Klima- und Umweltnotstand" aus, worauf die Kommission unter Ursula von der Leyen am 11. Dezember 2019, den Europäischen *Green Deal* vorstellte.

Der Green Deal war ein Aktionsprogramm, das einen Umbau der EU-Wirtschaft vorsah, insbesondere die Verlagerung Energieproduktion von fossilen auf erneuerbare Energien, mit dem Ziel der Reduktion der direkten Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55% (bezogen auf 1990), bis 2040 um 90% und ab 2050 um 100% (Klimaneutralität). Gegenüber dem 2014 beschlossenen Reduktionsziel von 40% bis 2030 zeigten die im Green Deal vorgesehenen 55% den Willen zur Beschleunigung.

Der Green Deal von 2019 wurde durch das Europäische Klimagesetz und das Paket "Fit for 55" konkretisiert und verschärft.

Seit April 2026 gelten unionsrechtlich bis 2030 mindestens -55% Netto-Treibhausgasemissionen gegenüber 1990, ferner bis 2040: mindestens -90% netto, bis 2050 Klimaneutralität bzw. Netto-null und danach: negative Nettoemissionen.

Zum Vergleich: Die aktuellen Reduktionsziele der Schweiz lauten bis 2030 -50%, bis 2040 -75[35], bis 2050 netto null und anschliessend negative Emissionen; der beabsichtigte Pfad der Schweiz ist

[35] Gemäss dem derzeit laufenden NDC 2021-2030 will die Schweiz ihre Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 50% gegenüber 1990 vermindern und über den gesamten Zeitraum 2021-2030 durchschnittlich mindestens 35% unter dem Niveau von 1990 bleiben, und zwar hauptsächlich durch Massnahmen in der Schweiz, teilweise aber auch durch im Ausland erzielte und nach Art. 6 des Pariser Abkommens übertragene Minderungen

bis zu den Jahren 2030 und 2040 also flacher als derjenige der EU, im letzten Jahrzehnt bis 2050 steiler; ein weiterer Unterschied liegt darin, dass die Schweiz Kompensationen mit Auslandsverminderungen in momentan unbegrenztem Umfang zulässt; eine Begrenzung soll erst durch das kommende CO_2-Gesetz eingeführt werden.

In der EU haben solche Kompensationen eine eigene Geschichte: Nachdem die EU sie unter dem Kyoto-System zunächst ebenfalls genutzt hatte, verwarf sie die Kompensationen 2021, da sie den angestrebten Umbau der Wirtschaft innerhalb der EU bremsten und unter dem Verdacht der Wirkungslosigkeit standen, insbesondere wegen missbräuchlicher Doppelzählungen und mangelnder Zusätzlichkeit[36].

Mit dem Klimagesetz von 2026 öffnete die EU die Tür für Auslandkompensationen erneut: Von der für 2040 angestrebten Reduktion um 90% dürfen ab 2036 5 Prozentpunkte durch Kompensationen erfüllt werden. Grund für die Kehrtwendung waren Bedenken wegen hoher Kostenbelastungen gewisser Industriezweige und die Gefahr von deren Abwanderung ins Ausland. Die Kompensationen aus dem Ausland sollen als Notventil dienen, falls die Reduktion im Inland zu teuer wird.

Die globale Wirkung des europäischen Green Deals ist gering. Die EU-Länder waren 2019 für 7% der weltweiten Emissionen ursächlich, im Jahr 2026 für 5,9%.

COP26 2021 Glasgow: Climate Pact

Auf der COP26 in Glasgow wurden 2021 wesentliche noch offene Teile des Pariser Regelwerks beschlossen. Seit 2021 werden keine neuen AAUs mehr ausgegeben. Aber die einzelnen Staaten und die EU können aufgrund ihres eigenen Rechts weiterhin Emissionshandelssysteme mit national ausgegebenen Emissionsberechtigungen betreiben. Sie bestimmen grundsätzlich deren Anwendungsbereiche und Gesamtmengen; der Markt bestimmt im Regelfall den Preis. Internationale Anrechnungen zwischen Staaten richten sich fortab nach Artikel 6 des Pariser Abkommens (vgl. vorn, Fussnote 36).

Glasgow legte zudem einen gemeinsamen Zeitrahmen nahe: 2025 sollten NDCs mit einem Enddatum 2035, 2030 solche mit einem Enddatum 2040 und danach alle fünf Jahre entsprechend fortgeschriebene Beiträge eingereicht werden.

COP28 2023 Dubai: Erste globale Bestandesaufnahme

Art. 14 des Pariser Abkommens sieht alle fünf Jahre eine globale Bestandesaufnahme *(Global Stocktake)* vor. Beurteilt wird dabei der kollektive Fortschritt bei der Emissionsverminderung und Klimaanpassung sowie bei der Finanzierung und Unterstützung. Die Zielerfüllung einzelner Staaten wird nicht benotet.

Die erste Bestandesaufnahme begann 2021 und wurde im Dezember 2023 auf der COP28 in Dubai abgeschlossen. Es ergab sich, dass zwar Fortschritte erzielt worden waren, die Vertragsparteien insgesamt aber nicht auf Kurs waren.

(ITMOs). - Das 2025 hinterlegte neue NDC für 2031-2035 sieht eine Senkung der Treibhausgasemissionen bis 2035 um mindestens 65% gegenüber 1990 vor. Der Entwurf zum revidierten CO_2-Gesetz, der im Herbst 2026 ins Parlament geht, sieht für 2040 75% vor. Bis 2050 will die Schweiz netto null erreichen. Weiterhin soll ein Teil der Reduktionen durch die Anrechnung ausländischer ITMOs erreicht werden können, jedoch in Zukunft weniger als die bisher zugelassenen 30%.

36 Kompensationsprojekte müssen von den Regierungen des finanzierenden Landes und des Gastlands genehmigt und ihre Klimaschutz-Wirkung von einer anerkannten Zertifizierungsstelle bestätigt werden. Voraussetzung für die Genehmigung ist, dass der Geldgeber ein Projekt finanziert, das im Gastland *zusätzlich* zu jenen Massnahmen hinzutritt, die vom Gastland ohne ausländische Hilfe ohnehin getroffen werden (Additionalitätsprinzip).

Widerstände gegen den Ausstieg aus fossilen Energien

Seit Beginn der COPs leisteten insbesondere Saudi-Arabien und weitere OPEC-Staaten Widerstand gegen Beschlüsse, die fossile Energieträger oder ihre Exporterlöse direkt beschränken wollten. Der ausdrücklich auf Kohle, Öl und Gas bezogene Ausstiegsstreit wurde an der COP26 (2021) sichtbar. Erstmals stand fossile Energie selbst im Entwurf zum zentralen Beschlusstext mit dem Wortlaut *"phase-down of unabated coal power"*. In letzter Minute wurde aus dem verlangten *phase-out* der Kohle ein schwächeres *phase-down*. Indien verlangte die Abschwächung; China unterstützte sie. Andere Kohle- und fossilorientierte Staaten trugen zur zurückhaltenden Linie bei. Öl und Gas wurden weiterhin nicht als Ausstiegsgegenstände genannt.

Der an der COP30 im November 2025 in Belém von über 80 Staaten verlangte Fahrplan für den Übergang weg von Kohle, Öl und Gas kam nicht in den zentralen Beschluss. Besonders Saudi-Arabien, Russland sowie grosse Verbraucher wie Indien und China widersetzten sich einer konkreten Roadmap.

Der Ausstieg aus den fossilen Energien ist seit COP28 (2023) der zentrale Konflikt der Verhandlungen.

3. Internationale Luft- und Seeschifffahrt

Die internationale Luft- und Seeschifffahrt ist bis heute von einschneidenden Klimaschutzbelastungen verschont geblieben. Das kommerzielle Interesse der Leistungserbringer an ungeschmälerten Umsätzen und Gewinnen, das Interesse der Konsumenten an kostengünstigen Transportleistungen und die zum Teil gleichgerichteten Interessen der Politik haben dazu geführt, dass dieser Sektor schon im Kyoto-Protokoll von 1997 ausgespart und an zwei UN-Sonderorganisationen delegiert wurde, nämlich an die Internationale Zivilluftfahrt-Organisation *(International Civil Aviation Organization, ICAO)* und die Internationale Seeschifffahrts-Organisation *(International Maritime Organization, IMO).* Diese Organisationen bieten in ihren Konferenzen Plattformen, auf denen sich die Mitgliedstaaten über Klimaschutzmassnahmen einigen sollen. Abgesehen von wenigen besonders ambitionierten Ländern - Neuseeland, Norwegen -, die bereits ab 2010 erste Massnahmen trafen, wurden bindende Vorschriften überwiegend bis nach 2020 aufgeschoben. Immerhin gelten seit 2016 für Reedereien Verpflichtungen, ihre Schiffe energieeffizient und klimaschonend auszurüsten.

Sowohl in der Luftfahrt wie in der Seeschifffahrt werden zwei Wege nebeneinander beschritten und bereits ansatzweise umgesetzt, nämlich (1.) eine CO_2-Bepreisung der Treibstoffe und (2.) Verpflichtungen der Treibstofflieferanten, Mindestquoten von Bio-Treibstoffen beizumischen (bislang nur wenige Prozente; grössere Quantitäten von Bio-Flugtreibstoffen sind auf dem Markt nicht verfügbar).

Die CO_2-Bepreisung der Flugtreibstoffe hat sich bis heute erst in der EU und in einigen anderen Ländern durchgesetzt. Für Flüge, die vollständig dem Recht der EU unterstehen, müssen die CO_2-Emissionen (nur diese, nicht auch die weiteren Umweltbelastungen des Flugverkehrs) durch Emissionsrechtzertifikate abgegolten werden. Das verteuert das getankte Kerosin um etwa einen Fünftel. Die in der EU geltenden Beimischpflichten erhöhen die Treibstoffkosten um wenige zusätzliche Prozente im unteren einstelligen Bereich.

In vielen anderen Ländern gilt ein System der Kompensation von CO_2-Emissionen *(Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA).* Es verpflichtet die Fluggesellschaften, einen Teil ihrer Emissionen durch Kompensationszertifikate abzugelten. - Da nur ein Teil der Emissionen abzugelten ist und Kompensationszertifikate zu niedrigen Preisen beschafft werden können, belasten die CORSIA-Auflagen das Flug-Kerosin ausserhalb der EU nur mit wenigen Cent pro Liter.

Im *Schiffsverkehr* sind die Vorschriften noch milder. Die EU verpflichtet ihre Reeder, die Treibhausgasintensität der verwendeten Energie gegenüber dem Referenzwert von 2020 zu senken, vorerst um 2%, ab 2030 um 6%. Die Pflicht kann durch Beimischung von Bio-Treibstoffen oder auf andere Weise erfüllt werden. Die IMO arbeitet an einem globalen Treibstoffstandard mit finanziellen Ausgleichspflichten. Weltweit besteht aber bislang keine einheitliche Emissionsrechtsabgabe oder Bio-Beimischpflicht. Das politische Gewicht der Länder, die sich dagegen wehren, ist gross.

4. Länder mit sinkenden und mit steigenden Emissionen (2015-2025)

53 Länder, die gemeinsam 25% der weltweiten Emissionen verursachen[37], haben ihre Emissionen seit 2015 vermindert. Die übrigen Länder, die gemeinsam 75% der weltweiten Emissionen verursachen[38], haben ihren THG-Ausstoss derart erhöht, dass die weltweiten Emissionen insgesamt von Jahr zu Jahr wachsen.

Die Zahlen zeigen ein mengenmässiges Übergewicht und einen steilen Emissionszuwachs der Länder der zweiten Gruppe und ein geringeres mengenmässiges Gewicht und eine flachere Abwärtsbewegung der Länder der ersten Gruppe.

Die USA weisen trotz ihrer in jüngster Zeit auf Bundesebene deklarierten Geringschätzung des Klimaschutzes leicht sinkende Emissionen aus. Für die längere Zukunft zeigen die meisten Prognosen für die USA eine weiterhin abnehmende Entwicklung, allerdings nicht mit Zielrichtung netto null 2050. - Zu den klimaambitionierten Spitzenreitern mit Verminderungen in der Grössenordnung von -25% gehören Deutschland, England und die Niederlande. Die stark rückläufigen Zahlen der Ukraine und Venezuelas dürften die Folge von wirtschaftlicher Schrumpfung, nicht von Klimaschutzanstrengungen sein.

5. Aktuelle Situation (2026)

Gemäss dem vom *UN Environment Programme (UNEP)* am 21.10.2026 vorgestellten *Emissions Gap Report 2026* ergibt sich bei Fortschreibung der bis heute getroffenen Massnahmen eine Erwärmung von 2,8 °C bis zum Jahr 2100, bei vollständiger Erfüllung der angemeldeten NDCs von 2,6 °C. Die Projektionen fallen ungünstiger aus als 2025, unter anderem wegen des US-Rückzugs aus dem Pariser Abkommen und wegen revidierter historischer Emissionsschätzungen.

So setzt sich die in der Rahmenkonvention und im Kyoto-System vorhandene Schutzlücke auch im Pariser Modell fort: Von den drei grössten Emittenten China (rund 30% der weltweiten Emissionen), USA (rund 11%) und Indien (rund 8%) haben China und Indien keine Reduktionsziele mit absoluten Emissions-Obergrenzen hinterlegt, sondern beanspruchen ausdrücklich ein Emissionswachstum auch in der Zukunft. Die USA haben überhaupt keine NDCs hinterlegt.

---

[37] Estland -45,5%, Äquatorialguinea -43,0%, Libanon -42,0%, Ukraine -37,8%, Venezuela -36,4%, Niederlande -28,0%, England -26,7%, Bulgarien -25,6%, Deutschland -25,4%, Tschechien -24,8%, Portugal -22,8%, Trinidad und Tobago -22,5%, Kuba -22,1%, Luxemburg -21,8%, Griechenland -21,8%, Finnland -21,2%, Dänemark -20,7%, Japan -19,7%, Albanien -18,7%, Frankreich -18,1%, Spanien -17,0%, Angola -16,3%, Belgien -15,2%, Norwegen -14,5%, Italien -14,4%, Österreich -13,7%, Schweiz -13,1%, Litauen -12,9%, Timor-Leste -12,3%, Irland -12,0%, Island -11,5%, Slowakei -11,2%, Polen -10,2%, Schweden -10,0%, Neuseeland -9,7%, Kap Verde -9,6%, Rumänien -9,3%, Seychellen -8,7%, Ungarn -8,6%, Botswana -8,3%, Slowenien -8,2%, Gambia -8,1%, Samoa -7,8%, Israel -7,5%, USA -7,1%, Nordmazedonien -7,0%, Lettland -6,7%, Suriname -6,5%, Südkorea -6,5%, Belarus -5,5%, Myanmar -5,2%, Südafrika -2,6%, Australien -1,5%.

[38] Darunter Indonesien +55,2%, Nordkorea +53,6%, Kambodscha +41,7%, Philippinen +39,8%, Indien +32,0%, Türkei +24,5%, Bangladesch +24,4%, Pakistan +24,2%, China +20,1%, Russland +14,5%.

Die hinterlegten Ziele betreffen weiterhin nur die *direkten* Emissionen, nicht die indirekten. Kein einziges Land ist bis heute erkennbar auf einem Pfad, der, wenn er weltweit befolgt würde, zur Begrenzung der Klimaerwärmung bei +1,5 Grad führen würde[39].

6. Finanzströme von Industrie- zu Schwellen- und Entwicklungsländern

Art. 4 der Rahmenkonvention von 1992 sah die Bereitstellung finanzieller Mittel seitens der entwickelten Staaten an die Nicht-Anhang-I-Staaten vor.

Die COP15 von 2009 in Kopenhagen konkretisierte dieses Ziel, indem sie beschloss, dass die Industrieländer den Nicht-Anhang-I-Ländern jährlich mindestens 100 Mrd. USD für Klimaschutzmassnahmen zur Verfügung stellen sollten. Das Jahresziel wurde erstmals 2022 erreicht. Für die Jahre 2013-2024 beliefen sich diese Leistungen im Durchschnitt auf 1'031 Mrd. USD, gesamthaft für alle zwölf Jahre auf 1,03 Billionen USD. Der Betrag bestand zu einem grossen Teil aus Darlehen, nicht aus Schenkungen. Er umfasste auch private Investitionen.

Die COP29 von 2024 in Baku beschloss ein neues globales Klimafinanzierungsziel: Bis 2035 sollen zugunsten der Entwicklungsländer jährlich mindestens 300 Mrd. USD für Klimaschutz und Anpassung mobilisiert werden; die Industrieländer sollen dabei die Führung übernehmen, d.h. die Finanzierungslast tragen. Das neue Ziel ersetzte das 100-Mrd.-Ziel von Kopenhagen. Daneben (nicht zusätzlich) wurde eine weitergehende Mobilisierungsabsicht aus öffentlichen und privaten Quellen von 1,3 Bio. USD formuliert.

Im Januar 2025 stellten die USA ihre auf Bundesebene zugesagten Klimaschutz- und Anpassungszahlungen ein.

Die COP30 in Belém vom November 2025 beschloss, dass die Staaten darauf hinwirken sollten, die internationale Anpassungsfinanzierung bis 2035 mindestens zu verdreifachen. Das Ziel war kein neuer, zusätzlich zum Klimaschutz bereitgestellter Fonds, sondern sollte innerhalb des an der COP29 vereinbarten Gesamtziels von mindestens 300 Mrd. USD jährlich erreicht werden.

Zum jährlichen 300-Mrd.-Ziel tragen vorwiegend die EU als Organisation sowie die EU-Länder Deutschland, Frankreich, Niederlande, Schweden und Dänemark, ferner England, Kanada und Japan bei. Norwegen leistet rund 2 Mrd., die Schweiz rund 1 Mrd. Ein Grossteil der Gelder fliesst nicht direkt von den Geber- zu den Empfängerländern, sondern in multilaterale Fonds[40], deren Mittel von Entwicklungsbanken[41] verwaltet werden.

---

39 Im *Climate Change Performance Index 2026* mit der Rangliste der Länder gemäss ihren Klimaschutzmassnahmen bleiben die Plätze 1 bis 3 ausdrücklich leer, weil kein Land eine insgesamt "sehr gute" Leistung erreicht. Der Index berücksichtigt Emissionen, erneuerbare Energien, Energieverbrauch und Politik.

40 Die wichtigsten sind der *Green Climate Fund (GCF)*, gegründet 2010 anlässlich der COP16 in Cancún, mit Sekretariat in Südkorea; es ist der grösste speziell klimatische UNFCCC-Fonds: Emissionsminderung und Anpassung, mit besonderem Augenmerk auf besonders verwundbare Staaten; er finanziert Zuschüsse, Kredite, Garantien und Beteiligungen; seine Beitragsmittel beliefen sich Ende 2025 auf 21,9 Mrd. USD; *Global Environment Facility Trust Fund (GEF)* seit 1991 als Pilot, 1994 dauerhaft errichtet; Sekretariat in Washington, D.C.; es handelt sich um einen Umweltfonds mit Bereichen Biodiversität, Klima, Land, Chemikalien u.a.; er ist neben dem GCF Teil des formellen Finanzmechanismus der Klimarahmenkonvention. Klima ist nur ein Teil seines Geschäfts. 2025 verfügte er über kumulierte Mittel von rund 26 Mrd. USD; *Climate Investment Funds (CIF): Clean Technology Fund (CTF) und Strategic Climate Fund (SCF)*, seit 2008, alle drei Fonds mit Verwaltungsstelle bei der Weltbank in Washington, D.C.; *Adaptation Fund (AF)*, 2001 durch Kyoto-Protokoll-Staaten beschlossen, seit 2010 operativ; Sekretariat beim GEF in Washington, D.C.: konkrete Anpassungsprojekte und -programme in Entwicklungsländern; Einnahmen aus Zertifikatsverkäufen und Spenden, etwa 2,3 Mrd. USD (Ende 2025); *Least Developed Countries Fund (LDCF)*, gegründet 2001 durch die COP-7 in Marrakesch; der Sitz befindet sich beim GEF-Sekretariat, Washington, D.C.; dieser Fonds befasst sich ausschliesslich mit den am wenigsten entwickelten Ländern. Er Finanziert vor allem Klima-Anpassung, insbesondere nationale Anpassungspläne (NAPs) und deren Umsetzung; 2,2 Mrd. USD bar eingegangen; Zusagen/unterzeichnete Beiträge 2,3 Mrd. USD (Sept. 2025); *Special Climate Change Fund (SCCF)* 2001, gegründet durch die COP-7 in Marrakesch; der Sitz befindet sich beim GEF-

Die *Schweiz* strebt mit ihrer Finanzhilfe an Entwicklungsländer ein Gleichgewicht zwischen Emissionsminderung und Anpassung an. Für Emissionsminderungen hat sie in den 11 Jahren von 2015-2025 in wachsenden Beträgen insgesamt 6,7 Mrd. CHF ausgegeben. Die Ausgaben für Anpassungen werden nicht unter diesem Titel konsistent ausgewiesen, dürften aber eine ähnliche Grössenordnung erreichen. Es handelt sich um die Zahlungen an den Adaptation Fund, bilaterale DEZA-/SECO-Projekte (Wasser- und Bewässerungsmanagement, klimaangepasste Landwirtschaft, Schutz vor Naturgefahren, Frühwarnsysteme, resilientere Städte und Infrastruktur sowie Beratung) und Zahlungen an die Entwicklungsbanken: Weltbank/IDA, Afrikanische und Asiatische Entwicklungsbank usw. Ein Teil der allgemeinen Schweizer Beiträge wird nach OECD-Koeffizienten als Klima-, darunter Anpassungsfinanzierung angerechnet. Das Geld ist dabei nicht für einzelne Schweizer Projekte reserviert.

Die USA, China, Russland und Iran sowie das militärisch hochgerüstete Nordkorea tragen nur wenig oder überhaupt nichts bei. Diese Staaten finanzieren stattdessen hohe Militär- und Kriegsausgaben und verfolgen teilweise hegemoniale Politiken.

II. Zusammenhänge

A. Klimakennwerte von Primär- und Sekundärenergien

1. Begriffe

Primärenergien heissen Energien in ihrer natürlich vorkommenden, nicht technisch umgewandelten Form. Dazu zählen Kohle, Erdöl, Erdgas, Uran, Holz und andere Biomasse, Wasserkraft, Wind, Sonnenstrahlung, Erdwärme sowie die Energie der Gezeiten.

Sekundärenergien heissen Energieträger, die durch technische Umwandlung von Primärenergie entstehen. Dazu zählen elektrischer Strom, Benzin, Diesel, Heizöl, Kerosin, Fernwärme, Koks, Wasserstoff und synthetische Treibstoffe. Bei Solar- und Windenergie sind Sonnenstrahlung und Wind die Primärenergien, der daraus gewonnene Strom die Sekundärenergie.

2. Fossile Primärenergien

Kohle, Erdöl und Erdgas belasten als Energiequellen das Klima, sind aber Primärenergien, die mit verhältnismässig geringen Anlageinvestitionen eine nicht-fluktuierende, jederzeit verfügbare Energie liefern. Förderung und Vertrieb dieser Primärenergien sind in der Regel gewinnbringend. Sie machen jene Länder und Unternehmungen reich, die über die entsprechenden Vorkommen

---

Sekretariat, Washington, D.C.; der Fonds befasst sich mit Anpassungsmassnahmen in Entwicklungsländern, ferner mit Technologietransfer; anders als der LDCF ist er nicht auf die ärmsten Länder beschränkt; er besitzt etwa 445 Mio. USD; Zusagen/unterzeichnete Beiträge 493 Mio. USD (Sept. 2025); *Fund for Responding to Loss and Damage (FRLD)*, 2022, gegründet durch die COP27 in Scharm el-Scheich; seit 2023 tätig; das Sekretariat befindet sich vorläufig bei der Weltbank in Washington, D.C.; der Fonds befasst sich mit der Hilfe für besonders verletzliche Entwicklungsländer; er verfügte Ende 2025 über 414 Mio. USD und über Zusagen und unterzeichnete Beiträge von 822 Mio. USD. - Daneben bestehen zahlreiche kleinere oder thematisch engere multilaterale Finanzierungsinstrumente - etwa Fonds für Wälder, Korallenriffe, Risikoversicherungen.

41 Die zehn wichtigsten multilateralen Entwicklungsbanken sind: Weltbankgruppe (WBG), Afrikanische Entwicklungsbank (AfDB), Asiatische Entwicklungsbank (ADB), Asiatische Infrastruktur-Investitionsbank (AIIB), Interamerikanische Entwicklungsbankgruppe (IDB Group), Europäische Bank für Wiederaufbau und Entwicklung (EBRD), Europäische Investitionsbank (EIB), Islamische Entwicklungsbank (IsDB), Neue Entwicklungsbank (NDB, BRICS-Bank) und Entwicklungsbank des Europarats (CEB). Diese zehn Banken befolgen gemeinsame Regeln zur Erfassung von Klimafinanzierung und veröffentlichen einen gemeinsamen Jahresbericht. Im Jahr 2024 sagten sie in Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen zusammen etwa 85 Mrd. USD Klimafinanzierung zu. Davon entfielen etwa 41 Mrd. USD auf die Weltbankgruppe, 12 Mrd. auf die ADB, 8 Mrd. auf die EBRD, 6 Mrd. auf die IDB-Gruppe, 6 Mrd. auf die AfDB und 5 Mrd. auf die AIIB.

verfügen. Aus den Gewinnen lassen sich ohne staatliche Hilfe die Vertriebskanäle zu den Verbrauchern finanzieren. Der Vertrieb von Kohle und Erdöl ist auch über grosse Distanzen und schwache Infrastrukturen möglich. Der Vertrieb von Erdgas erfordert grosse Investitionen und komplexe Strukturen.

In Entwicklungsländern, die für ihre Entwicklung auf viel und kostengünstige Energie angewiesen sind, und zwar auf Energie, die auch beim Vorhandensein schwacher Infrastrukturen nutzbar ist, breitet sich deshalb die Energieversorgung mit Kohle und Erdöl rascher aus als die Elektrifizierung. Denn Strom setzt den Bau kapitalintensiver Kraftwerke und Stromnetze voraus. Kohle und Erdöl kann über fast jedes bereits bestehende Strassennetz zu den Verbrauchern gebracht werden.

Die Elektrifizierung begann historisch mit Wasserkraftwerken, wo geeignete Wasserläufe vorhanden sind. Das ist auch der typische Gang in Entwicklungsländern. Nach der Wasserkraft ist die Stromerzeugung aus fossilen Primärenergien die nächstliegende Option. Erst in einer fortgeschrittenen Phase der wirtschaftlichen Entwicklung und ausgebauter Infrastruktur kommen zusätzlich die Kernenergie sowie Solar- und Windkraft in Betracht, die letztgenannten in erster Linie zwecks Ersparnis von Brennstoffkosten, nicht zwecks Klimaschutz.

Als Primärenergien zur Stromversorgung liefern Kohle, Erdöl und Erdgas wertvolle Bandenergie, d.h. Strom, der dauerhaft verfügbar ist. Erdgas liefert zudem die überaus wertvolle Ausgleichsenergie, die in Stromnetzen gebraucht wird, um Netzschwankungen auszugleichen und tages- und jahreszeitliche Bedarfsspitzen zu decken. Denn Gaskraftwerke können mit wenig Verschleiss kurzfristig an- und abgeschaltet werden. Kohle-, Öl- und Kernkraftwerke sind weniger flexibel.

Im Wirtschaftlichkeitsvergleich bleiben die fossilen Primärenergien gegenüber Wind-, Solar- und anderen erneuerbaren Energien bis auf Weiteres unschlagbar und damit in vielen Weltgegenden auch langfristig dominant. Ihre Förderung und ihr Verbrauch sind trotz der UN-Klimavereinbarungen Jahr für Jahr wachsend. Zwischen 2015 und 2025 nahm die Nennleistung der in Betrieb befindlichen Kohlekraftwerke um über 320 GW zu. Die Nennleistung der Gaskraftwerke steigerte sich von 2020[42] bis 2025 um etwa 230 GW.

Auch hochentwickelte Volkswirtschaften bleiben langfristig insbesondere vom Erdöl abhängig. In vielen Prozessen wird Erdöl als Heiz- und Treibstoff verwendet, so in Fahrzeugen und Maschinen der Land- und Forstwirtschaft, in Bergbau, Verarbeitung von Bodenschätzen, Bauwesen, Transport schwerer Güter, Handelsschifffahrt, Luftfahrt, Militär und Notfalldiensten. Zahlreiche Produkte enthalten Erdölderivate als Bestandteile, so Zement, Beton, Asphalt, Stahl, Plastik, Klebstoffe, Isoliermittel, Autopneus u.a. - Preislich konkurrenzfähige Alternativen sind kaum vorhanden.

Steinkohle

Weltweit liefert Steinkohle derzeit etwa einen Viertel der gesamten Energie. Seit 1990 stieg der Verbrauch um ungefähr 120%, d.h. er hat sich mehr als verdoppelt, hauptsächlich wegen der kontinuierlichen Steigerung in China und Indien. In der EU sank er um rund 73%, in Deutschland um ungefähr 70-75% und in der Schweiz um rund 95%, womit die Steinkohle in der Schweiz energetisch fast bedeutungslos geworden ist. China, Indien und Indonesien erzeugen und verbrauchen zusammen drei Viertel der Weltproduktion[43]. In der EU und Deutschland liefert Steinkohle noch rund 6-7% der Energie, in der Schweiz nur wenige Zehntelprozent.

---

42 Für den Zeitraum von 2015 bis 2020 fehlen verlässliche Nettozahlen.

43 Im Zeitraum 2015-2025 gingen global Kohlekraftwerke mit einer gesamten Nennleistung von 650,5 GW neu in Betrieb, wovon 360,7 GW allein in China. 327,2 GW wurden global stillgelegt. Die weltweit installierte Kohlekraftwerksleistung nahm somit netto um 323,3 GW zu. 2025 allein wurden 97,4 GW neu in Betrieb genommen - der zweithöchste Jahreswert nach 2015. China verantwortet rund 112% des weltweiten Nettozuwachses im erwähnten Zeitraum. Indien und Indonesien sind die nächstgrössten Ausbau-Länder. Die übrige Welt zusammen hat Kohlekraft reduziert.

2023 wurden weltweit rund 8,09 Milliarden Tonnen Steinkohle gefördert. In dieser Zahl enthalten sind Kraftwerkskohle, Anthrazit und Kokskohle, nicht jedoch Braunkohle. Bei Fortschreibung dieser Fördermenge dürften die weltweit bekannten Reserven, die mit heutigen Techniken gefördert werden können, in etwa 100 Jahren erschöpft sein.

Etwa 60% der Steinkohle wird verstromt. Der restliche Verbrauch erfolgt zu 15% in der Eisen- und Stahlindustrie, 8% in der Zement- und Baustoffindustrie, 7% in der Kohlechemie und Kohlevergasung, 7% in der übrigen Industrie zur Erzeugung von Wärme und Dampf, schliesslich zu 5% in Haushalten, Gewerbe und Fernwärmeanlagen.

Steinkohlekraftwerke können ihre Leistung im laufenden Betrieb innerhalb weniger Minuten deutlich verändern. Sie sind aber wesentlich träger als Wasser- und Gasturbinenkraftwerke. Grosse Nachteile entstehen bei sehr niedriger Teillast sowie beim vollständigen Stillstand und Wiederanfahren.

Steinkohle belastet das Klima sehr stark. Bei vollständiger Verbrennung entstehen je Tonne Steinkohle ungefähr 2,5 Tonnen CO_2. Je erzeugte Kilowattstunde Strom verursacht Steinkohle etwas weniger CO_2 als Braunkohle, aber deutlich mehr als Erdgas. Steinkohle dürfte unmittelbar oder mittelbar für etwas mehr als einen Drittel der weltweiten energiebedingten Emissionen kausal sein. Zusammen mit Braunkohle ist Kohle der grösste einzelne Verursacher energiebedingter CO_2-Emissionen.

Ein grosser Teil der weltweiten Steinkohleförderung und des Handels ist privatwirtschaftlich profitabel. Tiefe Untertagebergwerke sind dagegen häufig nur mit staatlicher Hilfe lebensfähig oder bereits geschlossen worden.

Braunkohle

Braunkohle deckte 2023 weltweit etwa 1% des Endenergieverbrauchs. Braunkohle wird überwiegend zur Erzeugung von Strom verwendet. Der unmittelbare Verbrauch durch Haushalte und Industrie ist gering. In der EU stammen ca. 7% des Stroms aus Braunkohle, in Deutschland 15%. In der Schweiz spielt Braunkohle kaum eine Rolle. Braunkohle enthält viel Wasser und besitzt einen deutlich geringeren Heizwert als Steinkohle. Sie wird deshalb kaum über weite Entfernungen transportiert, sondern überwiegend unmittelbar neben den Tagebauen in Kraftwerken für die Stromerzeugung verbrannt. Die wichtigsten Förderländer sind China, Indonesien und Deutschland. Die weltweit bekannten Reserven, die mit heutigen Techniken gefördert werden können, dürften für mehr als 300 Jahre ausreichen.

Braunkohle gehört zu den klimaschädlichsten Energieträgern überhaupt. Je erzeugter Kilowattstunde verursacht sie mehr Treibhausgase als Steinkohle, Erdöl oder Erdgas. Im Vergleich liegen die typischen Emissionsmengen - über den Lebenszyklus der Anlagen berechnet, einschliesslich Förderung, Transport und Kraftwerksbau - ungefähr bei:

Braunkohle	1000-1200 g CO_2eq/kWh
Steinkohle	750-1000 g CO_2eq/kWh
Modernes GuD-Kraftwerk[44]	350-500 g CO_2eq/kWh
Photovoltaik	20-50 g CO_2eq/kWh
Wasserkraft	5-30 g CO_2eq/kWh
Windkraft	8-20 g CO_2eq/kWh
Kernenergie	5-20 g CO_2eq/kWh

[44] Ein GuD-Kraftwerk, d.h. ein Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk, ist eine Anlage, die mit dem gleichen Gas *zwei* Turbinen mit Stromgeneratoren betreibt, nämlich die eine mittels der Gasverbrennung und die andere mit dem Wasserdampf, der aus der Abwärme der Gasverbrennung gewonnen wird; der Wirkungsgrad blosser Gasturbinen liegt bei etwa 30% der im Gas enthaltenen Energie, derjenige von GuD-Kombikraftwerken bei etwa 60%.

Eine Kilowattstunde Braunkohlestrom belastet das Klima ungefähr dreimal so stark wie Gasstrom, 20- bis 50-mal so stark wie Solarstrom und 50- bis über 100-mal so stark wie Wind- oder Atomstrom.

Mit Braunkohle kann ohne Staatshilfe kostengünstiger Strom produziert und privatwirtschaftlicher Gewinn erzielt werden, wenn mächtige Flöze dicht an der Oberfläche liegen, der Tagebau und das Kraftwerk kontinuierlich betrieben werden und zwischen Abbaustätte und Kraftwerk keine grossen Distanzen liegen.

Erdöl

Erdöl deckte 2024 weltweit etwa einen Drittel des Endenergieverbrauchs, in der EU 38%, in Deutschland 36% und in der Schweiz 46%. Der grösste Teil des geförderten Erdöls wird nicht verstromt, sondern im Verkehr und in der Industrie verbraucht. Weltweit stammen ungefähr 2-3% des Stroms aus Erdöl. Von 1990 bis 2025 stieg der Erdölverbrauch weltweit insgesamt um rund 56%, während er in der EU um rund 11%, in Deutschland um rund 24% und in der Schweiz um rund 31% gesunken ist.

Die wichtigsten Förderländer sind USA, Russland und Saudi-Arabien. Die weltweit bekannten Reserven, die mit heutigen Techniken gefördert werden können, dürften in 40-50 Jahren erschöpft sein.

Der Verbrauch von Erdöl belastet das Klima stark. Durch die Verbrennung von Erdöl entstehen weltweit ungefähr 12 Milliarden Tonnen CO_2 pro Jahr. Das entspricht rund einem Drittel der energiebedingten CO_2-Emissionen und einem Viertel aller menschlich verursachten Treibhausgasemissionen, wenn LULUCF und die anderen Treibhausgase einbezogen werden. Erdöl ist damit nach Kohle die zweitgrösste einzelne Ursache der weltweiten CO_2-Emissionen.

Zur Erinnerung: Am globalen Endenergieverbrauch sind die aktuellen Anteile von

Erdöl	31,4%
Braun- und Steinkohle	25,9%
Erdgas	23,5%
Holz und andere Biomasse	7,0%
Kernkraft	4,8%
Wasserkraft	2,5%
Solarenergie	1,6%
Windenergie	1,5%
andere erneuerbare Energien	1,6%
Total	100,0% (Werte 2025).

Bei der Verbrennung von 1 Liter Erdöl (als Benzin, Diesel, Heizöl oder Kerosin) mit einem Gewicht von ca. 0,75 kg werden ca. 2,5 kg CO_2 freigesetzt.

Erdgas

Erdgas wird in Tiefkühlbehältnissen in flüssiger Form bei -162 Grad Celsius gelagert *(Liquified Natural Gas, LNG)* und auf dem Seeweg transportiert. Bei der Verflüssigung gehen knappe 10% der Energie verloren. Der Transport über Land erfolgt überwiegend in Pipelines ohne Kühlung in gasförmigem Zustand, über grosse Distanzen komprimiert unter hohem Druck von rund 80 bar, für die lokale Verteilung und bis zu den Haushaltungen unter geringerem Druck.

Weltweit deckt Erdgas derzeit einen knappen Viertel des gesamten Endenergieverbrauchs. Seit 1990 hat sich der Erdgasverbrauch ungefähr verdoppelt. In der EU, in Deutschland und in der Schweiz ist er bis 2010 gestiegen und seither zurückgegangen. Etwa 40% des vermarkteten Erdgases werden verstromt, 60% anders genutzt, nämlich für industrielle Prozesswärme,

Gebäudeheizungen, Warmwasser, Kochen, chemische Produkte und Dünger. Am weltweiten Strommix hat Erdgas einen Anteil von rund 23%.

Die Erdgasförderung ist stark konzentriert. Die drei wichtigsten Produzenten sind die USA mit etwa 26%, Russland mit 15% und Iran mit 7%. Zusammen mit China (6%) und Kanada (5%) fördern die fünf wichtigsten Länder rund 60% der Weltproduktion. Die weltweit bekannten Reserven, die mit heutigen Techniken gefördert werden können, dürften für noch etwa 50 Jahre ausreichen.

Bei der Stromerzeugung eignen sich Gaskraftwerke in besonderer Weise zur Lieferung von Ausgleichsenergie. Aber gerade die energieeffizientesten Gas- und Dampfturbinenkraftwerke (GuD-Kraftwerke) mit einem Wirkungsgrad bis zu 60% sind nur für mehrstündigen Ausgleich geeignet, während andere Kraftwerktypen, die sich für häufige und minutenschnelle Leistungsänderungen eignen, Wirkungsgrade von nur 40% haben.

Bei einer angenommenen Kraftwerk-Effizienz von 40% belastet Erdgas das Klima erheblich, wenn auch nur halb so stark wie Steinkohle, nämlich mit etwa 2,5 kg CO_2 pro kg Erdgas oder 500 g CO_2 pro erzeugte kWh Strom.

Erdgasförderung und -vertrieb können privatwirtschaftlich sehr profitabel sein und benötigen grundsätzlich keine Staatshilfe. Jedoch ist der Bau von Pipelines wegen der erforderlichen Landenteignungen ohne staatliche Beihilfe nicht möglich.

3. Nicht-fossile Primärenergien

Holz und andere Biomasse

Begriffliches und Funktionsweise

Biomasse (von griechisch "bios" = Leben) ist die gesamte organische Substanz, die durch Pflanzen, Tiere und Menschen erzeugt wird oder bei deren Absterben anfällt. Im Zusammenhang mit der Energieerzeugung meint der Begriff *organische Materialien pflanzlichen und tierischen Ursprungs, die zur Energieerzeugung (Strom, Wärme, Treibstoff) genutzt werden können.*[45]

Holz hat den grössten Anteil an der energetisch verwendeten Biomasse. Weitere Stoffe sind geerntete Energiepflanzen (z.B. Mais, Raps), landwirtschaftliche Reststoffe (Stroh, Gülle[46]) sowie Bioabfälle aus Haushalten und aus der Lebensmittelindustrie.

Da Biomasse aus nachwachsenden Organismen gewonnen wird, gilt die daraus gewonnene Energie als *erneuerbare* Energie.

Wird totes Holz nicht genutzt, dann *verrottet* es. Dabei wird der im Holz gebundene Kohlenstoff durch Verbindung mit dem in der Luft vorhandenen Sauerstoff zu CO_2. Die Verrottung ungenutzten Holzes bringt etwa gleich viel CO_2 in die Atmosphäre wie die Holzverbrennung, sodass die Holzverbrennung - im Vergleich mit der natürlichen Verrottung - nicht als Klimabelastung betrachtet werden kann. Die Verbrennung beschleunigt jedoch die Belastung kurzfristig.

Anders ist es, wenn Holz (und andere Biomasse) in Mooren ohne Sauerstoffzufuhr verrottet. Dann kann es sich zu Torf wandeln, ohne den gebundenen Kohlenstoff in die Atmosphäre abzugeben.

---

45 *Energetisch* meint Biomasse vorwiegend tote trockene Materie, in *biologischen* Zusammenhängen hingegen lebende und meist wasserhaltige Materie. In der vorliegenden Darstellung wird der Begriff in seiner energetischen Bedeutung verwendet.

46 Der Unterschied von Gülle und Jauche ist der folgende: Gülle ist ein flüssig bis breiiges Gemisch aus Kot, Urin und meist etwas Einstreu oder Wasser aus dem Stall. Jauche ist vor allem der flüssige Anteil: überwiegend Urin, Sickerwasser und verdünnte Flüssigkeiten, mit wenig oder keinem Kot. In der Alltagssprache werden die Wörter zuweilen gleich verwendet. Landwirtschaftlich ist die Unterscheidung aber sinnvoll: Gülle enthält deutlich mehr organische Substanz und Phosphor; Jauche ist dünnflüssiger und enthält vor allem rasch wirksamen Stickstoff und Kalium.

Quantitatives

Holz deckt weltweit etwa 4% und zusammen mit anderen Bioenergiequellen etwa knapp 6% des Endenergieverbrauchs, in der EU rund 8%, in Deutschland und in der Schweiz je knapp 6%. Der höhere Anteil in der EU resultiert aus der starken Holznutzung in Nord- und Osteuropa.

Energie aus Holz wird hauptsächlich durch Verbrennung, daneben durch Vergasung und chemische Umwandlung gewonnen. Das Ergebnis kann Wärme, Strom, Treibstoff oder eine Kombination daraus sein.

Von den heutigen *Bioenergiequellen* ist Holz mit einem Anteil von etwa 55% die wichtigste. Andere Quellen sind Holzkohle, Schwarzlauge[47] und sonstige Holzreste mit ca. 5-10%, Ernterückstände und anderes Pflanzenmaterial ca. 17-18%, Flüssige Biotreibstoffe ca. 11%, Bagasse[48], tierische Abfälle, Biogas und anderes ca. 8-10% (Angaben von 2023).

In der *EU* deckte Bioenergie 2023 insgesamt rund 59% des erneuerbaren Energieverbrauchs (Wasser-, Solar-, Wind- und Bioenergie), wobei Holz die wichtigste Bioenergiequelle war.

In der *Schweiz* wurden 2024 rund 12 TWh Holzenergie gewonnen, was knapp 6% des gesamten Endenergieverbrauchs entsprach. Bezogen nur auf die Brennstoffe für Wärmezwecke lag der Holzanteil bei rund 15%.

Waldfläche und Waldschutz

Weltweit beträgt der Waldanteil an der Bodenfläche knapp 31%. Die grössten Waldanteile befinden sind im hohen Norden. Dort erstreckt sich ein Nadelwaldgürtel in der Taiga von Skandinavien über Russland bis zum Pazifik sowie durch Alaska und Kanada. Grosse Flächen gibt es auch in den tropischen Regenwaldgebieten nahe dem Äquator. Das grösste einzelne Gebiet ist das Amazonasbecken in Südamerika, überwiegend in Brasilien, von dort ausgreifend nach Peru, Kolumbien, Bolivien, Venezuela, Guyana, Surinam und Französisch-Guayana.

Die globale Waldfläche ist seit 1990 netto um ungefähr 200 Millionen Hektaren kleiner geworden - eine Menge von etwa 5% der gesamten globalen Waldfläche. Die grössten Nettoverluste gab es in Südamerika und Afrika, vor allem durch Umwandlung von Wald in Weideland, Soja-, Palmöl- und andere Landwirtschaftsflächen. In einzelnen Ländern (USA, China, Indien, EU, Schweiz) sind die Waldflächen zwar etwas grösser geworden, aber ohne den globalen Verlust auszugleichen und mancherorts mit einem Verlust an Waldqualität durch Ersetzung alter kohlestoffreicher Wälder durch kurzlebige Monokultur-Plantagen.

Länderweise unterschiedliche Bedeutung der Biomasse

Holz ist, wie gesagt, der wichtigste Bioenergieträger, und zwar wegen seiner traditionellen Nutzung zum Kochen und Heizen insbesondere in Entwicklungs- und Schwellenländern. Bei der Stromerzeugung spielen hingegen landwirtschaftliche Rückstände, Biogas und biogene Abfälle eine grössere Rolle als Holz.

In *den Entwicklungs- und Schwellenländern* ("Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen") - ohne China - deckte Biomasse etwa 15-20% des Endenergieverbrauchs. In den ärmsten Ländern Afrikas erreichte sie 50-80%. Rund 70-80% der dortigen Biomassenutzung entfallen auf Brennholz und daraus erzeugte Holzkohle.

---

47 Schwarzlauge ist eine dunkle, energiereiche Flüssigkeit, die als Nebenprodukt bei der Herstellung von Zellstoff aus Holz entsteht. Der Zellstoff wird anschliessend vor allem zu Papier und Karton verarbeitet.

48 Bagasse ist der faserige Pflanzenrest, der nach dem Auspressen von Zuckerrohr übrigbleibt. Aus einer Tonne Zuckerrohr entstehen etwa 250-300 kg Bagasse und 700-750 kg zuckerhaltiger Saft und Wasser.

In der *EU* deckt Bioenergie 10-12% des Bruttoendenergieverbrauchs. Bioenergie liefert damit weiterhin mehr Endenergie als Wind- oder Solarenergie, weil Bioenergie neben Strom auch und vor allem Wärme und Treibstoffe liefert.

Holzhandel

Im internationalen Energieholzhandel haben Pellets einen grösseren Anteil als gewöhnliches Brennholz. Die wichtigsten Pelletproduzenten sind USA, Deutschland, Vietnam, Kanada und Russland. Weltweit wurden 2023 rund 47 Millionen Tonnen Holzpellets erzeugt; mehr als die Hälfte davon wurde international gehandelt. Europa stellte davon etwa 51%, Nordamerika 28% und der asiatisch-pazifische Raum 18% her.

Pellets (engl. "Bällchen") sind runde Stäbchen von ca. 3 cm Länge. Zu ihrer Herstellung werden Holzreste, insbesondere Sägemehl, gereinigt, zerkleinert und getrocknet, zu feinem Holzmehl gemahlen und unter hohem Druck durch eine Matrize gepresst, wodurch das Mehl zu den zylindrischen Pellets verdichtet wird. Durch die dabei entstehende Wärme werden die holzeigenen Harze zum natürlichen Bindemittel, weshalb meist keine zusätzlichen Bindemittel benötigt werden. Bei der Herstellung wird eine Energiemenge von 2,7% des Heizwerts der Pellets verbraucht.

Nur zur Stromerzeugung geeignete nicht-fossile Primärenergien:

Wasserkraft

Quantitatives

Global lieferte Wasserkraft 2024 rund 15% der Stromerzeugung. Davon stammten etwa zwei Drittel aus konventionellen, d.h. durch natürliche Zuflüsse gespiesenen, Speicherseen (im Gegensatz zu Pumpspeicherseen).

In der EU entfielen 2024 rund 5,6% der Stromerzeugung auf konventionelle Speicherwasserkraft aus Stauseen und 8,1% auf Laufwasserkraft aus Flüssen.

Deutschland hat einen sehr niedrigen Speicherwasseranteil rund 0,5% der Stromerzeugung, die Schweiz einen sehr hohen von rund 31%.

Laufwasserstrom

Die Produktion von Laufwasserstrom hängt vom Vorhandensein geeigneter Wasserläufe ab. In der Weltrangliste steht China mit 600 TWh an der Spitze, gefolgt von Brasilien (220 TWh) und USA (130 TWh). Österreich steht mit 35 TWh vor Deutschland (20 TWh) und der Schweiz (19 TWh).

Da Laufwasserstrom meist durch das Aufstauen öffentlicher Gewässer gewonnen wird, liegt die Produktion entweder in der Hand des Staates oder staatlich konzessionierter Privatunternehmen.

Die Menge des produzierten Stroms ist insofern nicht steuerbar, als Laufwasserkraftwerke optimalerweise stets die volle daherkommende Wassermenge nutzen. Diese Menge schwankt saisonal. In Mitteleuropa produzieren Flusskraftwerke im Sommer meist mehr Strom als im Winter. Bei Niedrigwasser ist die Produktion gering. Aber auch Hochwasser kann die Produktion vermindern, wenn ein Teil des Wassers ungenutzt an den Turbinen vorbeigeleitet werden muss und wenn der Flusspegel steigt und die Fallhöhe des nutzbaren Wasserstroms reduziert. Laufwasserstrom ist aus diesen Gründen nicht geeignet als Ausgleichsenergie für Solar- und Windenergie.

Laufwasserstrom gilt als erneuerbare Energie. Die Stromgewinnung belastet das Klima nur geringfügig, über den Lebenszyklus der Anlagen gerechnet mit etwa 10 Gramm CO_2 pro kWh. Auch die Kosten sind, sobald die Anlagen abgeschrieben sind, gering. Laufwasserkraftwerke haben

lange Lebensdauern von 60 bis zu 100 Jahren. Da der Strom zu Marktpreisen verkauft wird, sind Laufwasserkraftwerke für ihre Betreiber oft sehr profitabel.

Speicherwasserstrom

Begriffliches

Konventioneller Speicherwasserstrom entsteht aus natürlichen Zuflüssen, die in Stauseen zurückgehalten und nach Bedarf zur Stromproduktion turbiniert werden.

Strom aus Pumpspeicherseen (Pumpspeicherwasserkraft) gehört nicht dazu, weil solcher Strom nicht aus natürlicher Primärenergie stammt, sondern weil das hochgepumpte Wasser unter Einsatz von Strom gespeichert wird.

Manche Stauseen, die durch natürliche Zuflüsse gespiesen werden, sind zusätzlich mit Pumpanlagen ausgerüstet, die Wasser hochpumpen können.

Produktionsländer

Weltweit enthalten die gefüllten Speicher der konventionellen Wasserkraft zusammen ungefähr 1500 TWh = 1,5 Billionen kWh. Das entspricht ungefähr dem globalen Stromverbrauch während 18 Tagen. Diese Zeitdauer ist allerdings eine theoretische Zahl; denn Stauseen werden nicht in einem Zug vollständig gefüllt und anschliessend vollständig entleert, sondern sie werden gleichmässig mit neuem Wasser gespiesen und geben in ungleichmässigen Mengen Wasser ab gemäss dem wechselnden Bedarf der Stromnetze. Die theoretische Umschlagshäufigkeit der Speicherinhalte beträgt weltweit etwa 2,1-mal pro Jahr, bei den Stauseen in der Schweiz 2,5-mal.

Die grössten Reservoirs befinden sich in Brasilien (bis zu 300 TWh), China (300 TWh), Kanada (250 TWh), Russland (200 TWh), USA (150 TWh) und Norwegen (87 TWh). Die Schweiz verfügt, fast gleich wie Österreich, über eine Kapazität von knapp 9 TWh, also nur etwa über einen Zehntel der norwegischen Kapazität.

Von 1990 bis 2024 hat sich die Produktion von Speicherwasserstrom weltweit etwa verdoppelt. Der Zuwachs erfolgte vor allem in China, Brasilien, Kanada, Südostasien, in Teilen Afrikas und Südamerikas. Im Gebiet der EU war der Zuwachs gering, nämlich von 125 auf 137 TWh, in Deutschland von 1,5 auf 1,9 TWh. In der Schweiz vermehrte sich die Produktion um einen Drittel von 20 auf 29 TWh.

Stromerzeugung

Da Speicherwasserkraft meist durch das Aufstauen öffentlicher Gewässer gewonnen wird, liegt die Produktion entweder in der Hand des Staates oder staatlich konzessionierter Privatunernehmen.

Die Stromproduktion aus Speicherstauseen lässt sich schnell erhöhen und vermindern. Moderne Speicherkraftwerke können innerhalb weniger Minuten auf veränderten Strombedarf reagieren. Dabei entstehen im normalen Regelbetrieb nur geringe Effizienzverluste. Speicherwasserkraft gehört zu den flexibelsten Formen der Stromerzeugung und ist in besonderem Masse geeignet als Ausgleichsenergie für Solar- und Windenergie.

Klimabelastung

Strom aus Speicherwasserkraft gilt als erneuerbare Energie. Er belastet das Klima wenig. Über den gesamten Lebenszyklus liegt der weltweite Mittelwert bei rund 23 Gramm CO_2-Äquivalenten pro kWh. Damit verursacht Speicherwasserstrom typischerweise etwa 95-97% weniger Treibhausgase als Strom aus Kohle oder Erdgas.

Profitabilität

Der laufende Betrieb bestehender Speicherwasserkraftwerke ist meist profitabel. Neubau und grundlegende Erneuerung brauchen oft Staatshilfe oder langfristig garantierte Einnahmen.

Pumpspeicherwasserstrom

Begriffliches

Ein Pumpspeicherkraftwerk verbraucht Strom, wenn das Wasser hochgepumpt wird, und erzeugt später Strom, wenn das Wasser wieder abgelassen wird. Es gibt dabei etwa 75-85% des Pumpstroms zurück, produziert also keinen Strom aus Primärenergie, sondern verschiebt die Nutzung von Strom aus Zeiten des Überangebots auf Zeiten des Unterangebots, und dies mit einem Verlust von etwa 20% der anfänglichen Energie. Zum Ansaugen des hochzupumpenden Wassers sind Wasserrückhaltebecken, Flüsse oder Seen unterhalb der Staumauer erforderlich. Je nach Höhendifferenz zwischen Stausee und Turbine ist die energetische Kapazität des Pumpspeichers unterschiedlich. Bei einer Höhendifferenz von 1000 Metern wird mit einem Kubikmeter Wasser die zehnfache Strommenge erzeugt wie bei einer Höhendifferenz von 100 Metern. Aus diesem Grund ist die energetische Kapazität, nicht das Wasservolumen von Pumpspeicherseen die relevante Vergleichsgrösse.

Die besondere Bedeutung von Pumpspeicherkraftwerken liegt in ihrer kostengünstigen und energieeffizienten Speicherleistung bei zeitweiligen Stromüberschüssen und in der Bereithaltung kurzfristig verfügbarer Ausgleichsenergie bei Mangellagen, und damit in ihrem Beitrag zur Netzstabilität.

Quantitatives

Weltweit erzeugten Pumpspeicherkraftwerke 2024 rund 161 TWh Strom und damit etwa 3,5% der weltweiten Wasserkrafterzeugung bzw. 0,5% der weltweiten Stromproduktion.

Ihre gesamte elektrische Speicherfähigkeit lag bei rund 10 TWh. Daraus ergeben sich rechnerisch ungefähr 15 bis 18 Vollentladungen der Speicherseen pro Jahr; dies bedeutet jedoch nicht, dass die Speicher jemals vollständig gefüllt oder entleert werden; vielmehr schwanken die Pegelstände meist saisonal - überlagert von kürzerfristigen Schwankungen - in Mittelbereichen zwischen 100% und 0%.

Norwegen verfügt über Pumpspeicherkapazitäten von etwa 1,3 GW Leistung und ungefähr 5 TWh Speicherinhalt, verteilt auf zehn Anlagen, nutzt sie angesichts der reichlich fliessenden natürlichen Gewässer aber kaum.

Länder mit Pumpspeicherkraftwerken

Heute erzeugt China mit 54 TWh rund 36% des weltweiten Pumpspeicherstroms, China und die USA zusammen gut die Hälfte. Deutschland erzeugt 5,4 TWh. Die Schweiz steht mit 3,8 TWh in der Länderrangliste an 10. Stelle, unmittelbar hinter Österreich (3,9 TWh).

Klimabelastung

Pumpspeicherung ist im Lebenszyklusvergleich eine der emissionsärmsten Energiespeichertechniken. Zu den Emissionen aus Bau und Unterhalt der Anlagen, die angesichts der Lebensdauer von 80 und mehr Jahren eine geringe Rolle pro gelieferte kWh spielen, kommen die bei der Produktion des Pumpstroms entstandenen Emissionen hinzu.

Profitabilität

Bei angenommenen Pumpstromkosten von 10 Rappen pro kWh und Kraftwerkkosten von 3 Rappen sind die Gestehungskosten von Pumpspeicherstrom 13 Rappen. Da der Strom zu Zeiten von

Überangeboten und niedrigen Marktpreisen hochgepumpt und zu Zeiten mangelnden Angebots und entsprechend hoher Marktpreise verkauft wird, können Pumpspeicherkraftwerke sehr profitabel sein. Neben dem reinen Stromverkauf verdienen die Betreiber von Pumpspeichern auch Geld für Reserveleistung, Frequenzhaltung und Netzstabilisierung. Bezahlt wird teilweise schon die blosse Bereitschaft, innerhalb von Minuten Strom zu liefern, auch wenn kein Strom abgerufen wird. In Knappheitszeiten ist diese Flexibilität oft wertvoller als die erzeugte Kilowattstunde.

Vorbemerkung zu Solar- und Windenergie

Da die Produzenten von Wind- und Solarstrom die Lieferung bestimmter Strommengen nur kurzfristig garantieren können und da ihre Lieferbereitschaft oft mit Zeiten des Überangebots und niedriger oder sogar negativer Spot-Preise zusammenfällt, können sie am Strommarkt nur bestehen, wenn der Staat regulierend eingreift und zwei Dinge sicherstellt, nämlich erstens, dass diese Produzenten den Strom zu den Zeiten ihrer Lieferbereitschaft vorrangig ins Netz einspeisen können und, zweitens, dass sie dafür kostendeckend entschädigt werden. Mit anderen Worten: Der Staat muss dafür sorgen, dass Kraftwerke, welche die Grundversorgung gewährleisten, ihre Einspeisungen ins Netz zeitweilig in dem Masse drosseln, in dem Wind- und Solarstrom verfügbar ist, und er muss den Produzenten von Wind- und Solarstrom kostendeckende Einspeisevergütungen (KEV) zusichern, und dies auch für Zeiten, in denen der Spot-Preis des Stroms negativ ist. Beides verursacht Kosten. Solar- und Windenergie können, soweit sie zur Alimentierung öffentlicher Stromnetze dienen, nicht ohne Staatshilfe bestehen und können sich demgemäss nur in Ländern ausbreiten, in denen ein politischer Wille dazu vorhanden ist.

Solarenergie

Begriffliches

Solar- und Windenergie fallen je nach Sonnenstrahlung und Windaufkommen in grösseren und kleineren Mengen an und werden deshalb fluktuierende erneuerbare Energien (engl. *Variable Renewable Energies, VRE*) genannt. Zur Abgrenzung gegenüber der seit über 100 Jahren genutzten Wasserkraft und der seit Jahrtausenden genutzten Biokraft aus Holzverbrennung werden sie als "*neue* erneuerbare Energien" bezeichnet.

Technisches

Solarstrom wird weltweit überwiegend mit Silizium-Photovoltaik produziert. Photovoltaikzellen wandeln Licht in Gleichstrom um. Ein Wechselrichter macht daraus netzgeeigneten Wechselstrom. Solarmodule werden teils in grossen Solarparks auf ungenutzten Freiflächen oder dezentral in kleinen Anlagen auf Gebäuden montiert. Weltweit werden etwa 60% des Solarstroms in Solarparks und 40% dezentral produziert. In der EU sind die Verhältnisse andere, nämlich 40% in Solarparks und 60% dezentral. In Deutschland sind es 30% und 70%, in der Schweiz 3% und 97%. Der Sonderfall Schweiz mit der überwiegend dezentralen Aufstellung von Solarpanels dürfte einerseits auf die intensive Landnutzung und die fehlenden Freiflächen zurückzuführen sein, andererseits auf den Wohlstand und den guten Willen vieler Privatpersonen und Unternehmer, für den Klimaschutz Geld auszugeben, auch wenn sich die Installation einer Solaranlage auf dem eigenen Dach und einer teuren Batterie im Keller im Kostenvergleich mit dem Strom ab Netz finanziell meist nicht lohnt. In den Schweizer Alpen gäbe es zwar viele für Solarparks geeignete Freiflächen; aber Bau und Unterhalt sind an abgelegenen Höhenstandorten teuer. Auch ist der Landschaftsschutz und die Erhaltung unverbauter Alpenlandschaften einem Teil der Bevölkerung wichtiger als die Gewinnung zusätzlichen Solarstroms.

Quantitatives

Solarstrom ist seit 1990 von einer Nischenenergie zu einer bedeutenden Stromquelle geworden. Der Ausbau erfolgt schnell. Er betrug in der Schweiz von 2024 zu 2025 33%. 2025 entfiel mehr als die

Hälfte des weltweiten Zuwachses auf China. Solarstrom erreichte 2025 knapp 9% der weltweiten Stromerzeugung, die ihrerseits etwa 20% des weltweiten Energieverbrauchs ausmachte. Damit deckte Solarstrom 2025 knapp 2% des weltweiten Endenergieverbrauchs ab. In der EU machte Solarstrom 2025 13% des Strommixes aus, in Deutschland 15%, in der Schweiz 13,7% (8 TWh bei einem schweizerischen Stromendverbrauch von 58 TWh).

Solarstrom wird weltweit zu einem kleinen Teil - knapp 15% - an den dezentralen Produktionsorten direkt verbraucht, um den Eigenbedarf der Betreiber zu decken, und zu gut 85% in öffentliche Stromnetze eingespeist. In der Schweiz werden etwa 30% direkt vor Ort verbraucht und etwa 70% ins Netz eingespeist.

Für die Einspeisung ins Netz erhält der Betreiber einer privaten Solaranlage von seinem Elektrizitätswerk in der Regel Geld, die sogenannte Einspeisevergütung. Diese ist meist kleiner als der Preis in der umgekehrten Richtung, d.h. als der Strompreis ab Netz, weil beim Netzstrom meist etwas mehr als die Hälfte des Preises für Netzkosten und Steuern bezahlt wird, wogegen der privat erzeugte Solarstrom ohne solche Zuschläge ans Elektrizitätswerk verkauft wird. Für den privaten Betreiber einer Solaranlage ist demzufolge der Eigenverbrauch lohnender als die Einspeisung ins Netz. Mit dem Eigenverbrauch spart der Betreiber teuren Netzstrom. Für die Einspeisung erhält er nur den halben Netzpreis oder weniger.

Da in Ländern mit hohem Solarstromanteil während der sommerlichen Mittagsstunden oft Produktionsüberschüsse entstehen, müssen diese entweder gespeichert und für einen späteren Verbrauch aufgespart oder sie müssen vermieden werden. Die Vermeidung erfolgt so, dass die Solaranlagen bei Überlastung des Netzes automatisch abschalten und keinen Strom erzeugen. Wie viel Solarstrom dadurch verloren geht, lässt sich kaum messen. Es ist anzunehmen, dass in der Schweiz mit einem Solaranteil von derzeit etwa 14% am gesamten Stromverbrauch etwa ein Zehntel der solaren Produktionskapazität zwischengespeichert wird und ein etwas grösserer Anteil durch zeitweiliges Abschalten der Anlagen verloren geht.

Solaranlagen sind täglich zwischen Sonnenaufgang und -untergang produktiv, je nach Sonnenstand mehr oder weniger. Bei Bewölkung und nachts wird kein Solarstrom erzeugt. In der Schweiz werden im Sommerhalbjahr von April bis September etwa *drei Viertel*, im Winterhalbjahr von Oktober bis März *ein Viertel* des gesamten Solarstroms produziert. Eine Anlage mit 1 kW Höchstleistung (= 1 kWp, "p" von Englisch "peak" = Spitzenleistung) produziert in der Schweiz im Jahr durchschnittlich 1000 kWh. Angesichts der 8760 Stunden, die das Jahr dauert, deckt diese Solaranlage mit ihrer maximalen Kapazität rechnerisch also 1000/8760 = *11,42%* eines konstanten Jahresverbrauchs ab, d.h. sie hat einen *Kapazitätsfaktor von 11,42%*; die restlichen *88,58%* deckt sie nicht ab. Innerhalb der Bandbreite zwischen maximaler und minimaler Solar-Nennleistung - im Beispiel zwischen 1 kWp und Null - muss die in den restlichen Zeiten fehlende Solarproduktion durch Strom aus anderen Quellen wettgemacht werden, damit ein kontinuierlicher Verbrauch von 1 kW gewährleistet ist.

Der Kapazitätsfaktor von Solaranlagen ist je nach geografischer Lage und typischen Bewölkungsverhältnissen unterschiedlich. Während er im schweizerischen Mittelland, wie gesagt, 11,42% ist, ist er beispielsweise in Südeuropa 17%, in Südskandinavien 10%

Gebiete, deren Solarstromquote am Strommix grösser ist als der jährliche Kapazitätsfaktor sämtlicher installierten Solaranlagen, besitzen eine solare Nennkapazität, die zu Spitzenzeiten Überschüsse produziert, sofern nicht Solaranlagen abgeschaltet, Ausgleichskraftwerke zurückgefahren, Strom exportiert oder die Nachfrage gesteuert werden kann.

Im Jahr 2025 betrug der Anteil der Solarenergie an der gesamten Stromerzeugung in Deutschland rund 17,9%, in China 11,1%, in der EU 13,1% und in der Schweiz 11,8%. Die entsprechenden Kapazitätsfaktoren der installierten PV-Flotten lagen ungefähr bei 9-10% in Deutschland, 12,8% in China, 12,4% in der EU und 10,3% in der Schweiz. Damit lag der Solarstromanteil in Deutschland,

der EU und der Schweiz über dem jeweiligen Kapazitätsfaktor, woraus sich ein erhebliches Potenzial für zeitweilige Überschüsse ergab. In China lag der Solarstromanteil unterhalb des Kapazitätsfaktors. Tatsächlich wurden in Deutschland 2025 im Rahmen des Netzengpassmanagements rund 2,7 TWh potenzieller Solarstrom abgeregelt. In der Schweiz wird weder die abgeregelte PV-Strommenge noch die Zahl der Tage mit PV-Abregelungen landesweit ausgewiesen.

In allen Gebieten müssen für die Nächte ohne Solarproduktion Stromspeicher oder zusätzliche Produktionsanlagen für die Lieferung von Ausgleichsenergie bereitstehen - bei einer maximalen Solarkapazität von 1000 kW also Speicher oder zusätzliche Produktionskapazitäten von nochmals 1000 kWh. Die beiden einander im Wechsel ergänzenden Produktionsstrassen von Solar- und Ausgleichsenergie bedeuten eine *Verdoppelung* der Produktionskapazitäten und erfordern den Aufbau und Unterhalt von zwei Produktionsstrukturen, von denen keine ihre maximale Lieferkapazität dauerhaft zum Tragen bringt. Werden Solarstrom-Tagesüberschüsse mittels Batterien für die Nacht nutzbar gemacht, so entsteht mit den Batterien eine dritte Struktur, die ebenfalls finanziert und unterhalten werden muss. Denn der Einsatz von Batterien für die Verschiebung von Tagesstrom in die Nacht macht die Bereitstellung von Ausgleichskraftwerken für längere Dunkelflauten nicht entbehrlich. Solche Ausgleichskraftwerke müssen jederzeit mit der vollen Kapazität der Solaranlagen bereitstehen, und sie müssen finanziert und unterhalten werden.

Trotz der Kosten, die aus dem Parallelbetrieb mehrerer, je nur teilweise ausgelasteter Strukturen entstehen, kann die Ergänzung einer fossilen Stromproduktion durch Solarstrom wirtschaftlich sinnvoll sein, indem Solarstrom während der solaren Lieferzeiten die Kosten des fossilen Brennstoffs einspart und die energetische Unabhängigkeit stärkt. Der Grenznutzen wird bei einer Vermehrung der solaren Spitzenkapazitäten über den momentanen Bedarf an Netzstrom hinaus kleiner. Je weiter die installierte Nennleistung der Solaranlagen den maximalen Leistungsbedarf eines Netzes übersteigt, desto geringer ist der finanzielle und klimaschützende Grenznutzen eines weiteren Solar-Ausbaus.

Stehen Speicherwasserkraftwerke zur Verfügung, deren Zuflüsse keine ganzjährige Vollauslastung ermöglichen - was bei den meisten Speicherwasserkraftwerken der Fall ist -, so ist das Alternieren von Solar- und Speicherwasserstrom eine win-/win-Situation; im Idealfall können beide Strukturen ihre Kapazitäten im gegenseitigen Wechsel voll zum Tragen bringen. Muss die Ausgleichsenergie für Dunkelzeiten hingegen fossil erzeugt werden, so dürfte ein Anteil von etwa 30% Solarstrom am Strommix die obere Grenze sein, bis zu der die Brennstoffersparnis die Kosten der parallelen Doppelstruktur aufwiegt. Wird der Solaranteil über diese Schwelle hinaus erhöht, so wird die Stromproduktion teurer. Vgl. dazu unten, Abschnitt "Entwicklung 1900-2024".

Klimabelastung

Solarstrom belastet das Klima vergleichsweise wenig, aber nicht überhaupt nicht. Während des Betriebs entstehen praktisch keine direkten Treibhausgasemissionen. Der grösste Teil fällt bei Herstellung, Transport und Installation der Anlage an. Über den gesamten Lebenszyklus verursacht heutiger Photovoltaikstrom im Vergleich zu anderen Stromquellen typischerweise ungefähr:

Stromquelle / Lebenszyklus-Emissionen	
Photovoltaik, moderne Anlagen	10-45 g CO_2eq/kWh
Windkraft	8-25 g CO_2eq/kWh
Erdgasstrom	400-650 g CO_2eq/kWh
Kohlestrom	800-1100 g CO_2eq/kWh

Kosten

Die Vollkosten von Solarstrom für öffentliche Stromnetze ergeben sich aus den Anlage- und Unterhaltskosten der Solar-Installationen über deren gesamte Betriebsdauer einerseits, aus den Kosten für eingesetzte Speicher und aus den Kostenbeiträgen an die Produktionsanlagen von Ausgleichsenergie, die ganzjährig bereitstehen müssen, jedoch während der solaren Produktionszeiten nicht ihre vollen Kapazitäten auslasten können.

Private Inhaber von Solaranlagen, die die Anlagekosten in ihren Büchern abgeschrieben haben und ihren Eigenbedarf tagsüber aus der eigenen Solaranlage decken, sind geneigt, ihren Solarstrom als kostenlos zu empfinden. Das ist ungenau. Beziehen solche Betreiber in den Nächten und im Winter Strom aus dem Netz, so müssen sie richtigerweise dem Lieferanten des Netzstroms für die ununterbrochene Bereithaltung des Netzstroms eine Entschädigung bezahlen, die zum Solarstrompreis dazuzurechnen ist. Verlangt der öffentliche Stromlieferant von privaten Solarstrombetreibern keine Bereitschaftsentschädigung, so liegt darin eine Subventionierung des privat erzeugten und genutzten Solarstroms.

Windenergie

Technisches

Windmühlen sind der Menschheit seit Jahrhunderten bekannt. Erst in neuerer Zeit wird Wind auch zur Elektrizitätserzeugung genutzt. Ab 1990 ist die Windstromproduktion weltweit von praktisch null zu einer bedeutenden Stromquelle gewachsen. Am stärksten war der Ausbau in Deutschland, wo mit Subventionen von über 300 Mrd. Euros in den letzten 20 Jahren riesige Wind- und Solaranlagen aufgebaut wurden. Die Schweiz liegt trotz wachsender Zahlen weit unter dem weltweiten Durchschnitt.

Der heute dominierende Windturbinentyp ist die dreiblättrige Horizontalachsenanlage. Turbinen auf dem Festland sind weniger teuer als solche auf Meeresböden ("Offshore"-Anlagen). Windturbinen über der glatten Meeresoberfläche liefern jedoch gleichmässiger Strom.

Da der Wind auf dem Land in 200 bis 300 Metern Höhe kräftiger und konstanter weht als in Bodennähe und da die Stromproduktion mit der dritten Potenz der Windstärke wächst, sind kleine bodennahe Turbinen relativ ineffizient. Die dezentrale private Windkraftgewinnung ist deshalb, im Gegensatz zum Solarstrom, nicht verbreitet. Moderne Anlagen haben Achsenhöhen der Turbinen von etwa 150 Metern über dem Boden und Rotorblätter von etwa 100 Metern Länge, womit die Rotorblätter 250 Meter in die Höhe reichen. Eine moderne Turbine hat eine Spitzenleistung von etwa 5-6 MWp, was leistungsmässig einer Solarpanelfläche von 25'000 m2 oder einem Panelquadrat von etwa 160 m Seitenlänge entspricht.

Eine Turbine samt Fundament besteht aus etwa 3000 Tonnen Material, vorwiegend Beton und Stahl, bei Permanentmagnetgeneratoren bis zu 1 Tonne seltene Erden. Sie kostet vollständig gebaut in Deutschland etwa 12 Mio. Euro, wobei dort wegen der grossen Stückzahlen Mengenrabatte eine Rolle spielen. In der Schweiz muss man geringer Stückzahlen oder Einzelanfertigungen für eine neue Windturbine mit Kosten bis zu 20 Mio. Franken gerechnet werden.

Quantitatives

Windstrom deckte 2024 etwa 8,2% des weltweiten Stromverbrauchs, 17% des EU-Verbrauchs, 27% des deutschen und 0,22% des schweizerischen. Da Strom weltweit 20% des Gesamtenergieverbrauchs deckt, lauten die Prozentzahlen des Windstroms, bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch, weltweit 1,4%, EU 4,7%, Deutschland 4,7% und Schweiz 0,06%.

Windstrom wird, gleich wie Solarstrom, in unregelmässigen Mengen produziert. Die täglichen anfallenden Mengen sind je nach Genauigkeit der Wetterdienste kurzfristig prognostizierbar, aber nicht plan- und steuerbar. Um den laufenden Strombedarf zu decken, müssen steuerbare

Ausgleichsenergien bereitgestellt werden oder es müssen mit Wind- und Solarkraft Überschüsse produziert und für den späteren Verbrauch gespeichert werden. Zu den Produktionskosten kommen in diesem Fall die Speicherkosten dazu.

Der Marktwert des Windstroms ist fast doppelt so hoch wie derjenige des Solarstroms, weil Windstrom auch nachts und im Winter produziert wird. Im Winter sind die Strompreise in der Regel höher.

Da bei der Ausbreitung von Anlagen in Abständen von Hunderten von Kilometern fast immer irgendwo Wind weht und da Offshore- und küstennahe Anlagen verhältnismässig wenig Leistungseinbrüche haben, können geografisch begünstigte Länder den Strombedarf zu mehr als 50%, theoretisch zu fast 100% mit Windkraft decken. Der Anteil der Erzeugung erneuerbaren Stroms steigt ausserdem, wenn Wind- und Solarkraft kombiniert eingesetzt werden und ihre beidseitigen Defizite zeitweilig ausgleichen. Allerdings lassen sich die Kapazitätsfaktoren von Wind- und Solaranlagen nicht addieren, weil beide Anlagetypen gemeinsam öfter nicht-nutzbare Überschüsse produzieren als jeder allein. Der Kapazitätsfaktor der Solarkraft in Süddeutschland von ca. 11% und von Windkraft von ca. 22% beträgt gemeinsam als leistungsgewichteter Mittelwert nicht 33%, sondern 15%. Anders gesagt decken Solar- und Windanlagen mit Spitzenwerten von je 1 MWp gemeinsam nur 15% eines konstanten Jahresbedarfs von 2 MWh. Sollen höhere Anteile des jährlichen Strombedarfs mit Solar- und Windanlagen gedeckt werden, so bedingt die Erhöhung der erneuerbaren Leistung den Aufbau so zahlreicher Anlagen, dass diese wiederkehrend grosse Überschüsse produzieren bzw. abgeschaltet werden müssen. Beim Fehlen von Speichern bleiben die Überschüsse ungenutzt. Sodann muss zusätzlich zu den Kapazitäten der Wind- und Solaranlagen für die Versorgungssicherheit die maximale benötigte Leistung jederzeit auch aus anderen Quellen bereitstehen. Eine solche Vervielfachung der Produktionskapazitäten über den durchschnittlichen Verbrauch hinaus macht den Strom teuer.

Die relative Bedeutungslosigkeit der Windkraft in der Schweiz hat ihren Grund im Wesentlichen darin, dass die Schweiz dicht besiedelt ist und dass eine Mehrheit der Bevölkerung die Ausbreitung von Windparks auf den windbegünstigten Höhenzügen und in der Nähe von Siedlungen ablehnt. Der lokale Landschaftsschutz liegt der ansässigen Bevölkerung offenbar mehr am Herzen als der globale Klimaschutz. Landschaftsschutz wird als Realität in der Gegenwart wahrgenommen, Netto Null als Phantom in der Zukunft. Die Stiftung Franz Weber bekämpft jedes Windturbinenprojekt in der Schweiz mit allen zur Verfügung stehenden rechtlichen Mitteln. Die Firma Axpo, die grösste Schweizer Stromproduzentin, versucht mit Werbekampagnen Sympathie für die Windkraft zu gewinnen.

Klimabelastung

Windstrom belastet das Klima sehr wenig. Während des Betriebs entstehen praktisch keine direkten Treibhausgasemissionen. Die Emissionen fallen überwiegend bei Herstellung, Bau, Wartung und Rückbau der Anlagen an. Über die Lebensdauer der Anlagen von ca. 30 Jahren entsteht pro kWh eine Belastung von 8-20 g CO_2eq/kWh, d.h. etwa halb so viel wie bei Solarstrom.

Profitabilität

Der Bau und Betrieb von Windkraftanlagen kann privatwirtschaftlich profitabel sein, erfordert aber grosse Investitionen und das Zusammenwirken mit lokalen Grundeigentümern, Behörden und Netzbetreibern.

Verwendung von Biomasse für Treibstoff

Quantitatives

Global machten flüssige Biotreibstoffe 2023 mengenmässig rund 5,6% des Treibstoffverbrauchs im Verkehr aus.

Problematik

Gegen die Nutzung von Ackerflächen für die Herstellung von Biotreibstoffen für Autos, insbesondere von Ethanol, wurde der Protest-Slogan *"Food not fuel"* formuliert. Die USA, Brasilien und Indonesien sind die Länder mit den grössten agrarisch produzierten Treibstoffmengen. In den USA werden jährlich rund 40% der Maisernte an Ethanolfabriken geliefert. In Brasilien fahren Benzin-Fahrzeuge mit etwa 27% Ethanolbeimischung, bei Flex-Fuel-Fahrzeugen mit fast reinem Ethanol. Ethanol wird dort vorwiegend aus Zuckerrohr hergestellt. Indonesien verwendet einen erheblichen Teil seiner Palmölproduktion für die gesetzlich vorgeschriebene Dieselbeimischung. Damit verringert sich die verfügbare Menge von Palmöl für Lebensmittel und den Export; die Ausweitung der Palmölplantagen verdrängt Wälder und Torfböden.

Die landwirtschaftliche Produktion von Treibstoff für Verbrennerfahrzeuge ist vergleichsweise ineffizient, indem die gleiche Bodenfläche bei Bestückung mit einem Solarpark zehn- bis fünfzigmal mehr Fahrkilometer für Elektrofahrzeuge liefert. Allerdings ist der Vergleich insofern theoretisch, als Ethanol - gleich wie fossile Treibstoffe - fast kostenlos gespeichert und ohne zeitliche Einschränkungen jederzeit über bestehende Tankstellennetze an die Verbraucher geliefert werden kann, wogegen Solarstrom für den motorisierten Strassenverkehr nur brauchbar ist, wenn er durch aufwendige Zwischenspeicherung jederzeit lieferbar gemacht wird und wenn zusätzlich zu den vorhandenen Tankstellennetzen Netze von Elektro-Ladestellen aufgebaut werden.

Klimabelastung

Beim Einsatz von Bioheiz- und -treibstoffen werden wesentlich geringere Mengen von CO_2 freigesetzt als beim Einsatz fossiler Treibstoffe. Deshalb fördern klima-ambitionierte Länder Bioenergie durch Subventionen, gesetzliche Mindestvorschriften für erneuerbare Energie, CO_2-Bepreisung fossiler Brennstoffe, Förderprogramme für Biogas, Biomethan und erneuerbare Wärme, Beimischungs- und Treibhausgasminderungsquoten für den Flugverkehr und andere Massnahmen. Ein erheblicher Teil der Bioenergieproduktion wäre ohne staatliche Eingriffe nicht rentabel. Das gilt besonders für Biogasstrom, Biodiesel, erneuerbaren Diesel und Flugbiotreibstoff. Das politische Ziel, den gesamten Flugverkehr dereinst auf Biokerosin umzustellen, ist angesichts des gegenüber fossilem Kerosin nicht konkurrenzfähigen Preises wohl eine unrealistische Zukunftshoffnung.

Kernkraft

Begriffliches und Funktionsweise

Ein Kernkraftwerk (auch Atomkraftwerk oder AKW genannt) produziert Strom durch einen Vorgang, bei dem sich Atomkerne des Metalls Uran-235 spalten und dadurch Wärme erzeugen. Mit der Wärme wird Wasserdampf erzeugt, der mit hohem Druck durch eine Turbine geleitet wird. Die Turbine treibt einen Stromgenerator an. Der aus der Turbine austretende Dampf wird gekühlt, zu Wasser verflüssigt und erneut mit Reaktorwärme zu Dampf erhitzt, um ein weiteres Mal die Turbine anzutreiben. Das Wasser, das in diesem Kreislauf zu Kühlung des Turbinen-Abdampfs gebraucht wird, gelangt in einem separaten Kreislauf in den Sockel des Kühlturms und wird dort durch aufsteigende Umgebungsluft abgekühlt. Die aufsteigende Umgebungsluft wird feucht und bildet über dem Kühlturm eine Nebelwolke.

Diesem Ablauf entspricht der typische Aufbau konventioneller AKWs mit einer gasdichten Kuppel aus Stahlbeton über dem Reaktor, einem kastenartigen Maschinenhaus für die Turbinen und Stromgeneratoren und dem taillierten Kühlturm.

Die Kernspaltung im Reaktor erfolgt mit Brennstäben von etwa 4 Metern Länge und 1 Zentimeter Dicke. Die Brennstäbe sind mit Pellets in ähnlicher Form und Grösse wie Holzpellets angefüllt, in denen spaltbares Uran in keramischer Masse eingegossen ist. Solange neue Brennstäbe je getrennt voneinander gelagert werden, bleiben die sporadisch aus zerfallenden Uran-Atomen austretenden

Neutronen wirkungslos. Werden mehrere Brennstäbe nahe zusammengebracht, so treffen austretende Neutronen auf Urankerne in benachbarten Brennstäben, spalten diese Kerne, worauf dort wiederum Neutronen ausgesendet werden. Damit beginnt die atomare Kettenreaktion und die Wärmeerzeugung. Die Kettenreaktion wird im Reaktor dadurch kontrolliert, dass Steuerstäbe, die mit Wasser, Blei oder Graphit gefüllt sind und die herumfliegenden Neutronen absorbieren, zwischen die Brennstäbe geschoben werden. Wenn alle Steuerstäbe in voller Länge zwischen die Brennstäbe geschoben sind, hört die Kettenreaktion auf.

In den eingesetzten Brennstäben bilden sich durch die erfolgten Kettenreaktionen neue Stoffe - Zerfallsprodukte wie z.B. Cäsium-137 und Strontium-90 -, die ihrerseits hochradioaktiv sind und Wärme erzeugen. Der radioaktive Zerfall dieser Stoffe läuft auch nach Abschalten des Reaktors weiter und erzeugt noch während Jahren, nur langsam abklingend, Nachzerfallswärme. Werden die Brennstäbe nach Abschalten des Reaktors ungekühlt stehen gelassen - etwa, weil wegen Stromausfalls kein Kühlwasser mehr in den Reaktor gelangt, wie dies bei den AKW-Unfällen in Tschernobyl und Fukushima geschehen ist - dann erhitzen sich die Brennstäbe und schmelzen. Die nach unten fliessende Kernschmelze erhitzt sich weiter und kann Explosionen von Wasserstoff, Wasserdampf und anderen Stoffen auslösen und - wie in Tschernobyl - das Reaktorgebäude sprengen. Solche Explosionen sind keine Nuklearexplosionen wie in einer Atombombe. Aber sie schleudern radioaktiv kontaminierte Stoffe in die Umwelt, die dadurch weiträumig verseucht und während Jahrzehnten unbewohnbar werden kann.

Brennstäbe, die nicht mehr wirtschaftlich im Reaktor eingesetzt werden können, brauchen deshalb noch während Jahren Wasserkühlung. Diese erfolgt in einer aktiv betreuten Zwischenlagerung. Die alten Brennstäbe können erst nach etwa zehn Jahren ohne Betreuung an sicheren Orten endgelagert werden. Auch dort muss gewährleistet sein, dass sie ihre weiterdauernde Heizkraft an die Umgebung abgeben können, ohne dass dadurch Grundwasser verseucht wird. Hierin liegt die Schwierigkeit der Endlagerung des Atommülls aus Kernkraftwerken.

Von der in den Brennstäben enthaltenen nuklearen Energie wird im AKW nur etwa 0,1% in elektrische Energie umgewandelt. Der Rest bleibt als Masse der Spaltprodukte sowie der Neutronen und anderer Teilchen erhalten. Von der gewonnenen Energie wird etwa ein Drittel in nutzbarem Strom umgewandelt. Zwei Drittel werden als Abwärme durch den Kühlturm oder durch Flusskühlung in die Umwelt abgegeben.

Flussgekühlte AKWs müssen bei hohen Sommertemperaturen abgeschaltet werden, wenn die Flüsse warm sind und durch die zusätzliche Aufnahme von AKW-Abwärme gesetzlich bestimmte Temperaturgrenzen überschreiten würden. Das kann zu Produktionslücken im Sommer führen, die in der Regel mit Kohle und Gas wettgemacht werden. Solarstrom kann, auch wo er im Sommer reichlich fliesst, zur Deckung solcher Defizite von AKW-Strom nur während der solar-produktiven Tageszeit beitragen.

Nur wenige AKWs nutzen ihre Restwärme, vorwiegend durch Belieferung von Fernwärmenetzen. Von der gesamten Restwärme aller AKWs weltweit wird nur etwa 0,1% in dieser Weise produktiv verwendet. Der Rest verpufft ungenutzt. Der Grund liegt darin, dass die meisten AKWs aus Sicherheitsgründen weit entfernt von den Agglomerationen und grossen Wärmeabnehmern stehen. Fernwärmeleitungen über grosse Distanzen sind teuer; Wärme lässt sich zudem viel schlechter und verlustreicher transportieren als Strom.

Von den vier laufenden AKWs in der Schweiz nutzen nur zwei ihre Abwärme. Seit 1984 liefern Beznau 1 und 2 Wärme an die *REFUNA Regionale Fernwärme Unteres Aaretal*. Die AKWs Gösgen und Leibstand nutzen ihre Abwärme nicht. Gösgen liefert an nahe Industrieunternehmen Prozessdampf, nicht Abdampf.

Quantitatives

Die Anteile der Kernkraft an den Primärenergien und am Strom waren 2024 die folgenden:

Gebiet	*Anteil an Primärenergien*	*Anteil an Stromerzeugung*
Welt	5,2%	9,0%
USA	9,8%	17,8%
China	3,1%	4,5%
EU	13,6%	23,2%
Deutschland	0,0%	0,0%
Schweiz	25,8%	28,4%

Entwicklung

Der Ausbau der kommerziellen Kernenergie begann 1965. Bis 1985 vermehrte sich die weltweite Leistung von ungefähr 6 GW auf 246 GW. Ab 1985 verlangsamte sich der Zuwachs und erreichte 1995 mit rund 350 GW ein Plateau. Neubauten glichen fortab vor allem Stilllegungen älterer Anlagen aus. Seit 2015 gibt es wieder einen leichten Anstieg, fast ganz wegen des Ausbaus in China, daneben in Indien, Russland, Südkorea und in den Vereinigten Arabischen Emiraten. China allein verdoppelte seine Kernkraftproduktion im Zeitraum 2015-2024 von 26,8 GW auf 55,3 GW. (Zum Vergleich: Die vier schweizerischen AKWs liefern zusammen knapp 3 GW, nämlich Beznau 1 und 2 je 365 MW, Gösgen 1010 MW und Leibstadt 1220 MW).

Wie sehr der Unfall von Tschernobyl (1986) den Ausbau international gebremst hat, ist schwer zu beurteilen. Der Unfall von Fukushima (2011) hat zur Abschaltung der AKWs in Deutschland und zu einem Neubauverbot in der Schweiz geführt.

Uranreserven und politische Abhängigkeiten

Etwa 96% der weltweiten, zu heutigen Kosten abbaubaren Uranvorkommen befinden sich in den zehn Ländern Australien (28%), Kasachstan (14%), Kanada (10%), Namibia (8%), Russland (8%), Niger (6%), Südafrika (5%), China (5%), Brasilien (3%) und in der Mongolei (2%).

Australien besitzt somit mehr als einen Viertel der bekannten wirtschaftlich gewinnbaren Uranressourcen. Australien ist aber nicht der grösste Förderer. Kasachstan ist seit Jahren der mit Abstand wichtigste Produzent, weil dort Uran besonders kostengünstig gewonnen werden kann. Namibia und Niger sind für die Versorgung Europas ebenfalls wichtige Herkunftsländer.

Bei angenommenen Förderkosten von 130 USD pro kg Uran betragen die weltweit identifizierten Ressourcen rund 5,9 Mio. Tonnen Uran, was beim derzeitigen Verbrauch von etwa 70'000 Tonnen pro Jahr für etwa 85 Jahre ausreicht. Diese Zahl ist keine feste geologische Obergrenze. Steigt der Uranpreis oder verbessert sich die Fördertechnik, so werden weitere, heute noch zu teure Vorkommen wirtschaftlich gewinnbar.

Stromerzeugung

Ein Kernkraftwerk kann seine Stromproduktion insofern steuern, als es nicht ständig exakt dieselbe Leistung liefern muss. Es kann sich saisonal wechselnden Bedürfnissen anpassen. Moderne Anlagen können sich sogar täglichen Bedarfsschwankungen anpassen. Wegen der hohen Bau- und Fixkosten ist aber der konstante Volllastbetrieb wirtschaftlich am günstigsten und auch die Regel. Abschaltungen wegen Revisionsarbeiten und Brennelementwechseln erfolgen oft in den Frühlings- und Sommermonaten, wenn der Netzstrombedarf am geringsten ist.

Klimabelastung und andere Risiken

Kernkraft setzt im Betrieb praktisch kein CO_2 frei. Über den gesamten Lebenszyklus - vom Uranabbau bis zum Rückbau der Anlagen und zur Endlagerung des Atommülls - liegt die Klimabelastung typischerweise bei 5-20 g CO_2eq je erzeugter kWh Strom.

Trotz der geringen Klimabelastung lehnen Teile der Bevölkerung einzelner westeuropäischer Länder die Kernkraft ab. Kernkraft wird von manchen Menschen nicht als gewöhnliche Energiequelle mit Vor- und Nachteilen beurteilt, sondern als Technologie mit Eigenschaften, die grundsätzlich nicht akzeptabel sind - seltene Grossunfälle, sehr langlebige gefährliche Abfälle und Nähe der Technologie zu einer militärisch menschheitsbedrohenden Waffentechnik. Sobald eines dieser Merkmale als moralische Ausschlussbedingung empfunden wird, haben Hinweise auf die Klimagünstigkeit und statistisch geringe Unfallwahrscheinlichkeit keine Überzeugungswirkung. Hinzu kommt, dass Radioaktivität unsichtbar ist, die davon betroffenen Menschen in heimtückischer Weise an inneren Blutungen und Organversagen zu Tode bringt und deshalb als etwas Unheimliches wahrgenommen wird, gegen das sich der Einzelne nicht schützen kann. In der Schweiz, Deutschland und Österreich gehört die Ablehnung der Kernkraft seit Jahrzehnten zum Selbstverständnis bestimmter gesellschaftlicher Gruppen und hat den Charakter eines ideologischen Dogmas angenommen.

Für die Schweiz ist die Ablehnung auch ohne ideologische Befangenheit nachvollziehbar. Die beiden grössten bisherigen AKW-Havarien in Tschernobyl und Fukushima haben Landstriche im Umkreis von ca. 100 km rund um die beschädigten Anlagen langfristig unbewohnbar gemacht. Trotz modernster Sicherungsvorkehren sind die heutigen AKWs nicht gegen solche Havarien gefeit, insbesondere wenn die Möglichkeit von Bombardierungen und Sabotageakten in die Risikobeurteilung einbezogen wird. Aus Sicherheitsgründen ist deshalb der Neubau von AKWs traditioneller Bauart nur in unbesiedelten Gebieten verantwortbar. Aus dem gleichen Grund stehen die meisten AKWs im Ausland weitab von den Siedlungszentren. Ob nukleare Kleinkraftwerke in Zukunft mit geringeren Risiken betrieben werden können, ist eine heute noch offene Frage.

Profitabilität und Konkurrenzfähigkeit

Der Weiterbetrieb bestehender AKWs gehört zu den kostengünstigsten Produktionsformen von klimaschonendem und bedarfsgerecht verfügbarem Strom.

Der Neubau eines Kernkraftwerks ist kapitalintensiv und nur über lange Zeiträume rentabilisierbar. In heutigen westlichen Einzelprojekten ist der Strom aus neu gebauten AKWs häufig teurer als Strom aus neuen Solar- und Windanlagen pro erzeugter kWh. Allerdings hat Kernkraft als verlässliche Bandenergie für die Versorgungssicherheit einen höheren Wert pro kWh als Solar- und Windstrom, deren Produktion durch Speicher und Ausgleichsenergien zur bedarfsgerechten Verfügbarkeit aufgewertet werden muss.

4. Sekundärenergien

Überblick

Als Sekundärenergien werden, wie bereits erwähnt, Energieträger bezeichnet, die durch technische Umwandlung von Primärenergie entstehen. Dazu gehören in der Reihenfolge ihrer Bedeutung:

- *Strom* aus Kohle, Erdgas, Uran, Wasserkraft, Wind, Sonne u.a.
- *Diesel/Gasöl und Heizöl* aus Rohöl
- *Benzin* aus Rohöl
- *Flüssiggas* aus Erdgas
- *Flugtreibstoff* aus Rohöl
- *Schweröl* aus Rohöl
- *Koks* aus Kohle

- *Fernwärme* aus Abwärme und Verbrennung von Holz, Gas, Kohle
- *Biotreibstoffe* aus Biomasse durch Vergärung
- *Wasserstoff* durch Elektrolyse aus Strom und Wasser oder aus Erdgas
- *Biogas/Biomethan* aus Ölen, Fetten und Reststoffen
- *synthetische Energieträger* (Ethanol, E-Methanol, E-Kerosin, synthetisches Methan) aus Zucker-, Stärke- oder Zellulosebiomasse und anderen Quellen

Von diesen Sekundärenergien ist der *Feststoff* Koks einfach und kostengünstig transport- und lagerfähig. Das Gleiche gilt von den *Flüssigkeiten* Benzin, Diesel, Heizöl, E-Methanol, E-Kerosin, synthetisches Methan und Ethanol. Sie sind in Behältnissen und Pipelines ohne Überdruck und Kühlung transport- und lagerfähig.

Der Umgang mit *Wasserstoff* ist aufwendig. Wasserstoff wird in zwei unterschiedlichen Zuständen gelagert und transportiert, nämlich entweder (a) *gasförmig* unter hohem Druck bei Umgebungstemperatur oder (b) in *flüssiger Form* unter grosser Kälte (-253 Grad) bei Umgebungsdruck.

Benzin, Diesel, Heizöl und Koks sind fossilen Ursprungs und nicht erneuerbar. Ihr Verbrauch belastet das Klima. Die übrigen Sekundärenergien können aus erneuerbaren Primärenergien erzeugt werden.

Beim Fehlen staatlicher Lenkungsmassnahmen sind die erneuerbar erzeugten Sekundärenergien durchwegs teurer als die fossil erzeugten und mit diesen marktwirtschaftlich nicht konkurrenzfähig. Anderes gilt lediglich für Solarstrom, sofern er mit Speicherwasserkraft alterniert oder von Betreibern erzeugt wird, die ihren Verbrauch zeitlich an die Verfügbarkeit des Solarstroms anpassen können.

Folgende Besonderheiten sind erwähnenswert:

Strom

Elektrischer Strom ist die gerichtete Bewegung elektrischer Ladungen, in Metallleitungen meist von Elektronen. Strom fliesst beim Vorhandensein elektrischer Spannung. Spannung ist ein Unterschied des elektrischen Potenzials zwischen zwei Punkten, vergleichbar mit dem Druckunterschied in einer Wasserleitung. Bei der Übertragung elektrischer Energie bewegen sich Elektronen in einer Metallleitung nur langsam; bei Wechselstrom schwingen sie überwiegend nur hin und her. Die elektrische Energie und die Änderung des elektrischen Feldes breiten sich dagegen entlang der Leitung sehr rasch aus, nämlich beinahe mit Lichtgeschwindigkeit, d.h. etwa 300'000 km pro Sekunde. Deshalb kann Strom Energie praktisch verzugslos über grosse Distanzen übertragen.

Begriffliches: Die Spannung wird in Volt (V) angegeben, die elektrische Stromstärke in Ampere (A). Die Leistung, also die pro Zeit umgesetzte Energie, wird in Watt (W) angegeben. Elektrische Arbeit bzw. Energie wird in Wattstunden (Wh) oder häufiger Kilowattstunden (kWh) angegeben. Eine Kilowattstunde ist die Energie, die bei einer Leistung von 1 Kilowatt während einer Stunde umgesetzt wird.

1'000 Watt = 1 Kilowatt (kW)
1'000 Kilowatt = 1 Megawatt (MW)
1'000 Megawatt = 1 Gigawatt (GW)
1'000 Gigawatt = 1 Terawatt (TW)
1'000 Terawatt = 1 Petawatt (PW).

Ein Kraftwerk, das ununterbrochen 1 GW Strom leistet, erzeugt während eines Jahres 8'760 GWh oder 8,76 TWh.

Strom wird industriell überwiegend in Generatoren erzeugt. Dort entsteht der Strom, indem ein Stromleiter in einem Magnetfeld bewegt wird, etwa durch eine Wasserturbine, eine Dampfturbine,

einen Verbrennungsmotor oder eine Windturbine. Photovoltaikzellen erzeugen Gleichstrom unmittelbar aus Licht. Auch Brennstoffzellen, Reibung und andere Vorgänge können elektrische Energie erzeugen, spielen für die Stromversorgung aber kaum eine Rolle.

Strom gelangt von den Produzenten über Stromnetze zu den Verbrauchern. Die meisten Stromnetze arbeiten mit Wechselstrom. In Europa wechselt die Richtung von Spannung und Strom 50-mal pro Sekunde; die Wechselstromfrequenz wird in *Hertz* angegeben, beträgt in Europa also 50 Hertz. Die Besonderheit des Wechselstroms ist, dass sich seine Spannung mit Transformatoren einfach erhöhen und senken lässt.

Für die Übertragung grosser Leistungen gilt: Je höher die Spannung, desto kleiner ist bei gleicher Leistung die Stromstärke und desto geringer sind die Leitungsverluste. Aus diesem Grund wird Strom über grosse Strecken in Hochspannungsleitungen übertragen.

Die Energieverluste bei der Übertragung von Strom sind gering. Auch die Übertragungskosten für Betrieb, Steuerung, Messung und Netzausbau sind vergleichsweise gering. Hingegen ist die Lagerung teuer. Strom als solcher kann nicht gelagert werden. Zur Aufbewahrung der im Strom enthaltenen Energie muss der Strom in andere Energieformen umgewandelt werden, z.B. in Lageenergie von hochgepumptem Wasser, in chemische Energie von Batterien oder in Wasserstoff. Bei jeder solchen Umwandlung und Rückumwandlung geht Energie verloren.

Strom ist ein Schlüssel zur emissionsarmen Wirtschaft, wenn er aus Wasserkraft, Windkraft, Solarenergie, Kernenergie, Geothermie oder Biomasse gewonnen wird. Wird Strom aus fossilen Brennstoffen erzeugt, so trägt er zur emissionsarmen Wirtschaft nichts bei.

Am Ort des Stromverbrauchs entstehen keine Treibhausgasemissionen. Hingegen verursacht die Stromerzeugung meist grössere oder kleinere Emissionen, bei Wasser-, Atom-, Solar- und Windstrom nur in Form der Emissionen beim Bau, Unterhalt und Rückbau der Anlagen, bei fossiler Produktion zusätzlich durch die Verbrennung von Kohle, Erdöl oder Erdgas.

Zur Versorgung eines Landes sind Stromnetze mit mehreren Spannungsebenen erforderlich. In der Schweiz bildet das von Swissgrid betriebene Höchstspannungsnetz die oberste Netzebene. Es transportiert elektrische Energie über grosse Entfernungen, verbindet grosse Kraftwerke, Pumpspeicherwerke, wichtige Umspannwerke und die Nachbarländer und arbeitet vor allem mit 380'000 und 220'000 Volt. Darunter liegen die Hochspannungsnetze der regionalen Netzbetreiber, meist mit Spannungen von etwa 50'000 bis 150'000 Volt; sie verteilen den Strom über Regionen und zu grossen Verbrauchern. Es folgen die regionalen und lokalen Verteilnetze mit Mittelspannungen, häufig etwa 16'000 oder 20'000 Volt, und schliesslich die Niederspannung von 400/230 Volt: 400 Volt zwischen zwei Aussenleitern und 230 Volt zwischen den Aussenleitern und Verbrauchern. Von Ebene zu Ebene ändern Transformatoren die Spannung und im Gegenzug die Stromstärke.

Für ein Wechselstromnetz müssen zwei Bedingungen dauernd eingehalten werden. Erstens muss die Einspeisung von Wirkleistung im Ganzen nahezu genau dem Verbrauch entsprechen; sonst ändert sich die Frequenz. Zweitens muss die Spannung innerhalb zulässiger Grenzen bleiben; dafür sind unter anderem Blindleistung, Transformatorstufen und Spannungsregelanlagen wichtig. Swissgrid, die Betreiberin des schweizerischen Stromnetzes, hält die Frequenz bei 50 Hertz durch Regelenergie und den laufenden Ausgleich von Produktion und Verbrauch stabil[49].

---

[49] Beispiel: Wenn ein Kraftwerk plötzlich ausfällt, fehlen beispielsweise 500 MW. Die Verbraucher entnehmen aber weiterhin gleich viel Strom. Die Regelung erfolgt in mehreren Stufen, zunächst durch Mobilisierung der *Momentanreserve*: In den ersten Sekundenbruchteilen werden die rotierenden Massen der laufenden Kraftwerks-Generatoren etwas gebremst, wodurch Bewegungsenergie abgegeben und zusätzlicher Strom gewonnen wird. Das bremst die Frequenzänderung, beseitigt aber den Leistungsfehler nicht. Es folgen drei weitere Stufen, nämlich (a) die *Primärregelung:* Innerhalb weniger Sekunden messen Kraftwerke, Batterien oder andere geeignete Anlagen die Frequenzabweichung automatisch. Fällt sie leicht unter 50 Hz, so erhöhen sie ihre Leistung; steigt sie darüber,

Die fluktuierende Einspeisung von Solar- und Windstrom ins Netz erhöht die Komplexität der Stromversorgung und schafft einen zusätzlichen Bedarf an Netzausbau und Flexibilität. Die Flexibilität kann durch Speicher, regelbare Kraftwerke sowie Stromimport und -export erreicht werden. Stromnetze selber können keine Energie speichern. Auch die Steuerung des Verbrauchs ist möglich, etwa durch das vom Stromlieferanten geregelte An- und Abschalten von Warmwasserspeichern in den Haushaltungen oder durch eine entsprechende Tarifgestaltung, etwa durch das Angebot von billigem Nacht- und teurem Tagstrom. In demokratischen Ländern sind der Verbrauchssteuerung engere Grenzen gesetzt als in Diktaturen, die ihre Bevölkerung straff im Griff haben und deren Stromkonsum umfassend reglementieren können.

Die Herstellung von Strom kostet je nach Produktionsart zwischen etwa 5 und 30 US-Cent. Zu den Produktionskosten, d.h. Anlagekosten der Kraftwerke und gegebenenfalls Brennstoffkosten, kommen anteilige Netz- und Messkosten hinzu. Die meisten Länder belasten den Strom überdies mit Steuern und Abgaben, oder sie subventionieren den Strom. Wird Strom zu niedrigen Preisen an die Verbraucher abgegeben, so stärkt dies die Wirtschaft und die Wohlfahrt der Bevölkerung. Hohe Strompreise schwächen die Wirtschaft und schmälern die Wohlfahrt.

2024/2025 waren die Endpreise für grosse stromintensive Industriebetriebe je kWh einschliesslich Energie, Übertragungs- und Netzkosten, nicht rückforderbarer Abgaben und gegebenenfalls Entlastungen, in einer Rangfolge von günstig zu teuer (a) mit Preisen unter 10 US-Cent: USA; Indien; China; Norwegen; (b) mit Preisen über 10 US-Cent: Australien und Neuseeland; übriges Südostasien; Lateinamerika und Karibik; Frankreich; Afrika; EU; Österreich; Schweiz; Deutschland; Japan; Italien.

Es ist vielleicht kein Zufall, dass die drei grössten THG-Emittenten ihre Volkswirtschaften mit dem billigsten Strom versorgen, wogegen unter den Ländern mit teurem Strom vor allem solche mit hohen Klimaschutzambitionen figurieren. Klimaschutz kostet. Da ein grosser Teil der globalen Emissionen durch die Energieversorgung verursacht wird, belasten die diesbezüglichen Kosten des Klimaschutzes die Energiepreise, soweit die Kosten nicht vom Staat getragen werden.

Benzin und Diesel

Benzin und Diesel sind bei Umgebungstemperatur flüssig. Im Gegensatz zu Diesel verdunstet Benzin schnell und bildet mit Luft leicht entzündliche Gemische. Offen ausgegossenes Benzin ist explosionsgefährlich, Diesel nicht.

Benzin und Diesel werden aus Rohöl hergestellt.

Die wichtigste Verwendung von Benzin ist der Antrieb von Personenwagen und Kleinmotoren aller Art. Diesel ist effizienter in Motoren, die schwere Last über lange Zeit gleichmässig bewegen müssen, also für LKWs, Traktoren, Schiffe. Der Benzinmotor ist leichter, und er ist einfacher zu bauen als der Dieselmotor. Der Benzinmotor beschleunigt schneller als der Dieselmotor.

Ein Liter Benzin enthält rund 8,5 bis 9 kWh Heizwert, ein Liter Diesel rund 9,8 bis 10 kWh. Diesel hat bei der Verbrennung zudem einen etwas besseren Wirkungsgrad. Damit fährt ein Fahrzeug mit eine Tankfüllung Diesel 25-40% weiter als mit der gleichen Tankfüllung Benzin.

---

so vermindern sie diese. Diese Reaktion erfolgt dezentral im europäischen Verbundnetz und stoppt den Frequenzabfall. (b) *Sekundärregelung:* Danach weist der Netzbetreiber - in der Schweiz Swissgrid - automatisch bestimmten Anlagen eine genauere Leistungsänderung zu. Sie soll die Frequenz wieder auf genau 50 Hertz bringen und den vereinbarten Austauschsaldo der Schweiz mit dem Ausland wiederherstellen. Dies geschieht typischerweise innerhalb von Minuten. (c) *Tertiärregelung:* Hält die Abweichung an, etwa bei einem längeren Kraftwerksausfall oder einer falschen Windprognose, so ruft Swissgrid weitere reservierte Leistung ab: zusätzliche Wasserkraft, Batteriespeicher, Lastreduktionen oder andere verfügbare Anlagen. Damit werden die raschen Reserven wieder frei für einen nächsten Störfall.

Benzin und Diesel sind einfach lager- und transportfähig, nämlich bei Umgebungsdruck und -temperatur. Im Fahrzeug genügt dank der hohen Energiedichte von Benzin und Diesel ein vergleichsweise kleiner Tank. Das Betanken dauert wenige Minuten. Zur Versorgung einer Gegend mit Benzin und Diesel genügt ein Netz von Tanklagern und Tankstellen. Solche Netze sind in den meisten Ländern, auch in Entwicklungsländern, vorhanden.

Die Herstellungskosten beider Treibstoffe bestehen vor allem aus den Kosten des Rohöls, der Raffination, des Transports, der Lagerhaltung und des Tankstellenbetriebs. Der Rohölpreis ist ein internationaler Marktpreis. Er schwankt stark. Aus dem gleichen Rohöl werden in den Raffinerien neben Benzin und Diesel meist auch andere Produkte hergestellt, Kerosin, Naphtha[50], Heizöl und Bitumen[51].

Die Verbraucherpreise für Benzin und Diesel unterscheiden sich zwischen den Ländern vor allem wegen der unterschiedlichen Steuern, Abgaben, Preisregulierungen und Subventionen. In den stark subventionierenden Erdölstaaten Venezuela, Iran und Libyen liegen die Preise unter 5 US-Cent je Liter, in USA, Kanada, China und anderen um 1,20 USD, in den EU-Ländern um 2 USD, in der Schweiz zurzeit über 2 USD und in Norwegen über 3 USD.

Für Erdölproduzenten, Raffinerien und den Treibstoffhandel kann Benzin auch ohne staatliche Hilfe sehr rentabel sein.

Bei der Verbrennung entstehen je Liter Benzin rund 2,3 kg CO_2, je Liter Diesel rund 2,65 kg CO_2. Wegen der grösseren Effizienz ist Diesel bei gleicher Fahrweise trotzdem etwas weniger klimabelastend als Benzin. Bei Diesel entstehen zusätzliche Schadstoffe, deren Freisetzung jedoch mit Partikelfiltern und Katalysatoren fast vollständig verhindert werden kann.

Kerosin

Kerosin ist ein Flugtreibstoff zur Verbrennung in Düsenmotoren (nicht Kolbenmotoren), in der Zusammensetzung ähnlich wie Heizöl und Diesel, aber besonders kältebeständig. Es muss auch bei -40 Grad Celsius, d.h. bei Flügen in grosser Höhe, flüssig bleiben. Es belastet das Klima je Liter mit 2,5 kg CO_2. Der Preis liegt in der gleichen Grössenordnung wie die Preise für Benzin und Diesel. Jedoch belasten manche Staaten zur Förderung des Flugverkehrs Kerosin weder mit Steuern noch mit CO_2-Abgaben, im Gegensatz zu den Treibstoffen für den Strassenverkehr.

Wasserstoff

Technisches

Wasserstoff (chemisches Zeichen H_2) ist bei Umgebungstemperatur ein leichtes Gas. Er wird in der Industrie mit verschiedenen Anwendungen gebraucht, so bei der Herstellung von Ammoniak für Stickstoffdünger, Methanol und anderen Chemikalien, in Erdölraffinerien sowie in einzelnen metallurgischen Prozessen.

Wasserstoff kommt auf der Erde nicht frei vor. Er muss aus Wasser, Erdgas, Kohle, Biomasse oder anderen wasserstoffhaltigen Stoffen gewonnen werden. Heute wird der weitaus grösste Teil aus Erdgas hergestellt; dabei entstehen CO_2-Emissionen. In Ländern mit viel Kohle, insbesondere in China, wird Wasserstoff teilweise aus Kohle erzeugt, mit noch höheren Emissionen. Bei der

---

50 Naphtha (auch: Naphta) ist ein leichtes, leicht entzündliches, flüssiges Gemisch aus Erdöl oder Erdgas. Der Begriff bezeichnet keine einzige, genau definierte Substanz. Die wichtigste Verwendung ist als Rohstoff der Petrochemie. Daneben kann Naphtha als Benzinkomponente, Lösungsmittel oder - besonders in Ländern mit wenig Erdgas - als Brennstoff eingesetzt werden. Seine Verbrennung setzt CO_2 frei, pro Energieeinheit in der gleichen Grössenordnung wie Benzin und Diesel.

51 Bitumen ist ein dunkelbraun-schwarzer, schwerer, zähflüssiger, bei Umgebungstemperatur fester Stoff, der ungenau oft Teer genannt wird. Bitumen wird hauptsächlich verwendet als Bindemittel im Asphalt für Strassen, Plätze und Flugpisten, zur Abdichtung von Dächern, Kellern, Brücken und Wasserbauten.

Elektrolyse wird Wasser mit Strom in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Der Elektrolyseur benötigt heute meist etwa 50 bis 55 kWh Strom je Kilogramm Wasserstoff. Wird dieser Strom aus Wasserkraft, Kernenergie, Wind- oder Solarenergie gewonnen, kann der Wasserstoff emissionsarm sein; bei Strom aus Kohle oder Erdgas ist er es nicht.

Bei der Elektrolyse von Wasser, an die im Zusammenhang mit dem Klimaschutz in erster Linie gedacht wird, entstehen aus 10 kg Wasser (H_2O) in einem elektrischen Prozess etwa 1 kg Wasserstoff (H) und 9 kg Sauerstoff (O). Der Wasserstoff fällt als sehr leichtes Gas an. Für Aufbewahrung, Transport und Nutzung wird das Gas entweder unter hohem Druck (350 oder 700 bar) komprimiert oder bei grosser Kälte (-253 Grad Celsius) verflüssigt.

Verwendbarkeit von Wasserstoff als Sekundärenergie

Wasserstoff kann als Energiespeicher und Energieträger dienen, was allerdings im Vergleich zu anderen Methoden technisch aufwendig und teuer ist. Wasserstoff ist bei normalem Druck ein sehr leichtes Gas: Ein Kilogramm nimmt bei Raumtemperatur und 1 bar rund 11 m3 ein. Daher wird gasförmiger Wasserstoff für Lagerung und Transport verflüssigt oder als Gas verdichtet. In *Flüssigform* braucht Wasserstoff eine extreme Kühlung auf -253 Grad Celsius und kälter und muss in gut isolierten Kältetanks aufbewahrt werden. Der *gasförmige* Wasserstoff wird in mehrschaligen Druckbehältnissen unter einem Druck von 200-700 bar aufbewahrt (1 bar = ca. 1 kg / cm2).

Wasserstoff ist ein flüchtiger Stoff. Er kann die Molekularstrukturen anderer Stoffe durchdringen. In Flüssigform verdampft er leicht, insbesondere wenn Wärme eindringt. Selbst gute Tanks können die fortlaufende Verdampfung nicht verhindern. Der verdampfte Wasserstoff ist wieder Gas und vermischt sich mit der Umgebungsluft. In einem breiten Mischbereich ist Wasserstoff leicht entzündlich und explosionsgefährlich.

Auch gasförmiger Wasserstoff entweicht durch kleinste Lecks an Dichtungen, Ventilen oder Schweissnähten - besonders unter hohem Druck.

Zusätzlich zu den Schwierigkeiten bei Transport und Aufbewahrung von Wasserstoff ist seine Nutzung als Energieträger mit hohen Energieverlusten verbunden. Von 1 kWh Strom gehen bei Umwandlung in Wasserstoff und Rückumwandlung in Motorenkraft etwa 75% der Anfangsenergie verloren. Zum Vergleich: Bei direkter Übertragung von 1 kWh Strom in ein batteriegetriebenes E-Auto gehen etwa 40% verloren.

Ein weiterer Nachteil bei der Nutzung von Wasserstoff als Fahrzeugtreibstoff ist die geringe Energiedichte pro Tankvolumen. Bei 700 bar Tankdruck enthält gasförmiger Wasserstoff etwa 1/7 der Energie von Diesel, bei 350 bar 1/12. Selbst flüssiger Wasserstoff erreicht nur etwa 1/4 der volumetrischen Energiedichte von Diesel. Um Diesel-Reichweiten fahren zu können, brauchen wasserstoffgetriebene Fahrzeuge demzufolge entsprechend grössere Tanks, die wegen des erforderlichen Drucks zudem schwerer sind als Benzin- und Dieseltanks. Bei Schiffen und Lastwagen mögen Grösse und Gewicht der Tanks vernachlässigbar sein. Bei Personenwagen und Flugzeugen sind sie es nicht.

Die Flüchtigkeit des Wasserstoffs, die hohen Transport- und Lagerkosten, die grossen Energieverluste bei seiner Verwendung als Sekundärenergieträger und die geringe Energiedichte pro Tankvolumen sind naturgesetzlicher Art. Sie lassen sich durch keinen technologischen Fortschritt überwinden. Daraus folgt, dass Wasserstoff als Energieträger im kommerziellen Land-, See- und Flugverkehr kaum eine Zukunft hat. Auch wenn die Elektrolyse mit scheinbar kostenlosem Strom aus Überschüssen von Solar- und Windkraft betrieben wird, sodass der Verlust von 75% der Anfangsenergie keine Rolle spielt - für manche Wasserstoff-Befürworter ist dies die

stillschweigende Voraussetzung -, stehen die hohen Transport- und Lagerkosten sowie die geringe volumetrische Energiedichte einer breiten kommerziellen Anwendung im Weg[52].

Für die Speicherung grösserer Wasserstoffmengen gelten Salzkavernen als besonders geeignet. Gegenwärtig gibt es weltweit vier solche Speicher: Teesside in Grossbritannien sowie Clemens Dome, Moss Bluff und Spindletop an der US-Golfküste. Sie dienen industriellen Wasserstoffnetzen, nicht der saisonalen Speicherung von Solar- und Windstrom. Eine grossdimensionierte stationäre Wasserstoffspeicherung zur regelmässigen Aufnahme und saisonalen Rückverstromung von Solar- und Windstromüberschüssen ist nirgends auf der Welt in Betrieb.

China betreibt eine staatlich unterstützte Forschung und Pilotierung von "grünem" Wasserstoff aus überschüssigem Wind- und Solarstrom. Ziel für 2025 waren bereits 100'000-200'000 Tonnen erneuerbar erzeugter Wasserstoff pro Jahr. China nutzt diesen Wasserstoff vorwiegend für industrielle Anwendungen, nicht als Energiespeicher zwecks späterer Rückverstromung, weil dies beim geringen Wirkungsgrad zu verlustreich und zu teuer ist. Für den täglichen Ausgleich von Solar- und Windschwankungen baut China steuerbare fossile Kraftwerke, Pumpspeicher, Batterien und Netze aus.

Bei den heute in Betrieb befindlichen LKWs mit Wasserstoffantrieb wird der Wasserstoff gasförmig in Druckbehältern eingesetzt. Auch für eine Speicherung in Salzkavernen ist nur die gasförmige Aufbewahrung denkbar, nicht die tiefgekühlte Flüssigform. Als Treibstoff für Schiffe ist verflüssigter Wasserstoff möglich. Denkt man an einen Flugzeugtreibstoff, so müsste der Wasserstoff flüssig mitgeführt werden, da er als Gas zu wenig Energiedichte hat.

Die Produktion von Wasserstoff für industrielle Zwecke aus Erdgas oder Kohle ist ohne staatliche Förderung profitabel und wird seit Jahrzehnten praktiziert. Emissionsarmer Wasserstoff aus Elektrolyse ist teurer als die konventionelle Herstellung und ohne staatliche Förderung nicht selbsttragend.

Ethanol

Ethanol (Ethylalkohol, bei pflanzlicher Herstellung "Biomethanol", chemisches Zeichen C_2H_5OH) ist als reiner Stoff eine farblose, leicht entzündliche Flüssigkeit. Als Treibstoff wird Ethanol entweder wasserarm ("anhydrous", meist mindestens 99,5%) Benzin beigemischt oder, mit etwas Wasser, als wasserhaltiger Treibstoff ("hydrous") in dafür geeigneten Fahrzeugen verwendet. Der Heizwert beträgt rund zwei Drittel desjenigen von Benzin; für die gleiche Fahrstrecke benötigt ein Fahrzeug mit reinem Ethanol ungefähr 40-50% mehr Tankvolumen als mit Benzin. Bei der Verbrennung entstehen pro Liter etwa 1,9 kg CO_2. Dieses CO_2 ist jedoch bei Biomethanol zuvor aus der Luft aufgenommen worden, sodass der Verbrauch weitgehend klimaneutral ist.

Fast alles heutige Treibstoffethanol wird biologisch hergestellt. Die wichtigsten Rohstoffe sind Zuckerrohr und Zuckerrüben, Mais, Weizen, andere Getreidearten, Maniok sowie Melasse, ein Nebenprodukt der Zuckerherstellung. Brasilien erzeugt Ethanol überwiegend aus Zuckerrohr; die USA überwiegend aus Mais; Europa vor allem aus Getreide und Zuckerrüben; Indien aus Zuckerrohr, Melasse und zunehmend Getreide.

---

52 Das von Rolf Huber und seiner Energy H2 AG zusammen mit COOP Schweiz und anderen Firmen im Jahr 2016 lancierte Projekt einer Flotte von wasserstoffgetriebenen Lastwagen war in einer ersten Phase auf ca. 50 Lastwagen ausgelegt und sollte in einer zweiten Phase unter Einbezug weiterer Firmen auf 1600 erweitert werden. Die erste Phase wurde ab 2020 verwirklicht. Auf die zweite Phase wurde aus wirtschaftlichen Gründen mittlerweile verzichtet. Der Strom für die Elektrolyse stammt vom Laufwasserkraftwerk Gösgen, nicht aus Solar- und Windstromüberschüssen. - Eine landesweite Ausbreitung von Wasserstoff-Mobilität würde dem Stromnetz anderweitig dringend benötigte erneuerbare Bandenergie entziehen und, angesichts des schwachen Wirkungsgrads, vergeuden.

Ethanol kann bezüglich Lagerung und Transport ähnlich gehandhabt werden wie Benzin und Diesel, stellt aber höhere Anforderungen an die Infrastruktur, weil es gewisse Kunststoffe und Metalle angreift.

Herstellung und Vertrieb von Treibstoffethanol können ausnahmsweise profitabel sein, namentlich bei günstigen Marktbedingungen in den grossen Erzeugerländern Brasilien und USA. In Europa und in vielen kleineren Erzeugerländern hätte Treibstoffethanol ohne gesetzliche Beimischungspflichten, Treibhausgasquoten oder vergleichbare staatliche Unterstützung keinen Markt.

Methanol

Methanol (auch Methylalkohol oder historisch Holzgeist genannt) ist der chemisch einfachste Alkohol. Methanol ist bei Raumtemperatur eine farblose, leicht flüchtige und leicht entzündliche Flüssigkeit, die äusserlich Ethanol ähnlichsieht. Methanol wird bei normaler Umgebungstemperatur als Flüssigkeit gelagert - ähnlich wie Benzin, Diesel oder Heizöl. Es braucht weder hohen Druck noch tiefe Temperaturen.

Methanol ist stark giftig. Schon relativ kleine Mengen können zu Erblindung, schweren Organschäden oder zum Tod führen. Auch Dämpfe und Hautkontakt können gesundheitsschädlich sein.

Methanol wird meist aus Erdgas hergestellt, seltener aus Kohle, ferner durch Vergasung von Biomasse ("Biomethanol"), schliesslich aus Stromüberschüssen auf dem Umweg über "grünen" Wasserstoff ("E-Methanol" oder "grünes Methanol").

Die wichtigste heutige Verwendung ist in der chemischen Industrie. Daneben ist Methanol ein leicht speicherbarer Flüssigtreibstoff.

E-Methanol ist wegen der grossen Energieverluste bei der Umwandlung von Strom in Wasserstoff und von Wasserstoff in Methanol wesentlich teurer als fossiles Methanol und viel teurer als fossile Treibstoffe. Ein Liter Methanol enthält ungefähr halb so viel Energie wie ein Liter Benzin. Ein methanolgetriebenes Fahrzeug benötigt daher für dieselbe nutzbare Energie den doppelten Tankraum. Methanol kann fossile Treibstoffe deshalb am ehesten in Schiffen und schweren Lastwagen ersetzen.

Nachhaltige Flugtreibstoffe

Manche Länder schreiben vor, dass Flugzeuge, die von ihren Flughäfen starten, dem fossilen Kerosin bestimmte Quoten von nachhaltigem Flugtreibstoff *(Sustainable Aviation Fuels, SAF)* beimischen. Als SAF gilt nicht ein bestimmter einzelner Stoff, sondern ein technisch zugelassener Flugtreibstoff, der aus bestimmten nichtfossilen oder emissionsärmeren Ausgangsstoffen hergestellt wird und vorgeschriebene Nachhaltigkeitskriterien erfüllt. In der heutigen Luftfahrt wird SAF überwiegend aus verarbeitetem Altspeiseöl und tierischen Fetten gewonnen. In der EU lag der durchschnittliche Preis für SAF im Jahr 2025 bei rund 1'925 Euro je Tonne, gegenüber rund 640 Euro je Tonne für Kerosin. Der Preis war damit im Durchschnitt etwa der dreifache des Kerosinpreises.

Das sehr teure E-Kerosin aus grünem Wasserstoff spielt mengenmässig kaum eine Rolle.

B. Speicherung von Energie

1. Begriffliches

Stauseen und Pumpspeicherstauseen dienen seit dem 19. Jahrhundert der Anpassung der Stromproduktion an die täglichen und saisonalen Schwankungen des Verbrauchs. Mit dem

Aufkommen von Solar- und Windkraft, die den Strom nicht zeitlich bedarfsgerecht produzieren, hat die Speicherung von Überschüssen für späteren Verbrauch eine zusätzliche Bedeutung erhalten.

2. Überblick

Bezüglich *kurzfristig abrufbarer Leistung* sind Pumpspeicherkraftwerke die wichtigste Gruppe. Ihre weltweite Energiekapazität beträgt ca. 9 TWh. Die zweitwichtigste Gruppe bilden die stationären Batteriespeicher mit einer Kapazität von ca. 0,7 TWh (E-Autobatterien nicht eingerechnet). Weitere Speichertypen mit wesentlich kleineren Kapazitäten sind Druckluftspeicher, Wärme- und Flüssigluftspeicher, Schwungradspeicher und Wasserstoffspeicher.

Bezüglich der *jährlichen Stromabgabe* bzw. *Leistung* stehen die Pumpspeicherkraftwerke mit 150-165 TWh/Jahr ebenfalls an der Spitze. Die stationären Batteriespeicher erreichen wegen ihrer viel häufigeren Ladezyklen aber eine ähnliche Leistungs-Grössenordnung, nämlich ungefähr 90-150 TWh/Jahr.

3. Quantitatives

a) Speicherwasserkraftwerke

In der EU setzten die Speicherwasserkraftwerke den Inhalt ihrer Stauseen etwa 2-mal jährlich um (vergleichbar zwei Ladezyklen einer Batterie), in der Schweiz 2,5-mal.

Der verhältnismässig geringen Wassermenge, die bei der Speicherwasserkraft umgesetzt wird, stehen die im Durchschnitt grösseren Höhendifferenzen zwischen Stauseen und Turbinen gegenüber. Ein Kubikmeter Wasser aus einem Alpenstausee erzeugt bei 1000 Metern Gefälle gleich viel Strom wie 100 Kubikmeter eines Flusskraftwerks bei 10 Metern Gefälle.

Der Strombedarf im Winterhalbjahr (Oktober bis März) überstieg 2025 den Sommerbedarf (April bis September) in der EU um 80,2 TWh (21,3%), in Deutschland um 7,9 TWh (11,5%) und in der Schweiz um 2,56 TWh (27,2%). Werden diese Mengen den Kapazitäten der Stauseen gegenübergestellt, so ergibt sich, dass die Speicherwasserkraftwerke eine Produktionsverschiebung vom Sommer- ins Winterhalbjahr in der Schweiz in einem begrenzten Umfang leisten können, nicht aber in der EU oder in Deutschland.

Je gezielter Speicherstauseen dazu verwendet werden, den *saisonalen* Mehrbedarf im Winter zu decken, desto weniger können sie die *täglichen* Solarstromdefizite im Sommer ausgleichen. Denn für den saisonalen Ausgleich müssen die Stauseen zu Beginn des Winters gefüllt sein, dürfen also nicht durch den täglichen Solarausgleich im Sommer konsumiert werden.

b) Pumpspeicherwasserkraftwerke

In den meisten Gebieten der Welt reichen auch Pumpspeicher nicht aus, um die vollen täglichen Schwankungen von Solar- und Windstrom auszugleichen. Ende 2025 waren weltweit rund 2'392 GW Solar- und 1'291 GW Windleistung installiert, aber nur rund 200 GW Pumpspeicherleistung (Pump- bzw. Turbinenleistung).

Die weltweit kurzfristig nutzbare Pumpspeicherkapazität liegt bei ungefähr 2 TWh. Bei 200 GW Turbinenleistung und Volllastbetrieb wären die Seen also in 10 Stunden leer. Die sehr viel grösseren Speicherwerte Norwegens und der Schweiz stammen überwiegend aus natürlichem Wasserzufluss und sind daher für die Speicherung überschüssigen Solar- und Windstroms kaum nutzbar.

Die Solarproduktion jeder Hemisphäre kann zu Spitzenzeiten deutlich über 1'500 GW liegen. Selbst wenn ein grosser Teil unmittelbar verbraucht wird, verbleibt bei hoher Solarproduktion häufig ein Überschuss, der die Pumpenleistung zu den Pumpspeicherseen um ein Mehrfaches übersteigt.

Das wichtigste Hindernis ist deshalb nicht das Beckenvolumen, sondern die begrenzte Pump- und Turbinenleistung der Pumpspeicheranlagen. Nur Norwegen und - mit Einschränkungen - die Schweiz besitzen im Verhältnis zu ihrer eigenen Wind- und Solarproduktion genügend flexible Wasserkraft.

Die Schweiz ist für heutige inländische Schwankungen verhältnismässig gut gerüstet. Sie besitzt etwa 3,5-4 GW Pumpenleistung. Während sechs sonnigen Mittagsstunden könnte die schweizerischen Pumpspeicherseen theoretisch 21-24 GWh Strom aufnehmen. Das liegt ungefähr in der Grössenordnung der heute innerhalb eines durchschnittlichen Sommertages zu verschiebenden schweizerischen Solarenergie. An aussergewöhnlich sonnigen Tagen können die PV-Spitzen jedoch höher sein als die Pumpenleistung. Sollten gleichzeitig grosse Überschüsse aus Deutschland, Frankreich oder Italien aufgenommen werden, reichen die schweizerischen Pumpen und grenzüberschreitenden Leitungen nicht aus.

Daraus ergibt sich: Pumpspeicher sind wertvoll für stündliche Lastverschiebung, Abendspitzen und Netzregelung, aber sie sind in den grossen Stromsystemen und global zu schwach, um die naturgegebenen Spitzenleistungen der Wind- und Solarkraftwerke zu verstetigen. Die Ausnahme bilden wasserreiche Systeme wie Norwegen und teilweise die Schweiz. Dort beruht die grosse Flexibilität aber vor allem darauf, dass bei Wind- und Solarüberschüssen die Produktion aus Stauseen mit natürlich zufliessendem Wasser zurückgehalten wird. Das ist energetisch günstiger als das Hochpumpen von Wasser in Pumpspeicherseen.

c) Batterien

Über 90% der weltweit installierten Batteriekapazität entfällt auf Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LFP) und auf andere Lithium-Ionen-Typen. Sie haben einen Strom-Strom-Wirkungsgrad von 83-90% (zum Vergleich: bei Pumpspeicherkraftwerken werden 75-80% des Pumpstroms beim Ablassen des Wassers zurückgewonnen).

Grosse, unmittelbar netzgekoppelte Batterien (*Utility-scale* Batterien) dienen überwiegend der Netzstabilität, d.h. dem sekundenschnellen Ausgleich von Produktions- und Nachfragedifferenzen, nicht der längerfristigen Speicherung von Solar- und Windstrom. Bezogen auf einen vollen Tagesverbrauch sind die bestehenden Batteriekapazitäten entsprechend klein, nämlich (Zahlen von 2024)

global	0,6%	= ca. 8 Minuten eines Tagesverbrauchs
China	1,2%	= ca. 17 Minuten
EU	0,34%	= ca. 5 Minuten
Deutschland	0,29%	= ca. 4 Minuten
Schweiz	0,079%	= ca. 1,1 Minuten.

Die Kapazität der Batterien in E-Pkws ist grösser, nämlich

global	3,3%	= ca. 0,76 Stunden (47 Minuten)
China	5,3%	= ca. 1,27 Stunden
EU	6,0%	= ca. 1,44 Stunden
Deutschland	8,7%	= ca. 2,1 Stunden
Schweiz	9,5%	= ca. 2,3 Stunden.

Die Kapazitäten der E-Autos sind für die Netzbetreiber nur zu einem kleinen Teil verfügbar. Um dem Netz zu dienen, müssten die Fahrzeuge ans Netz angeschlossen sein und Ladevorgänge in beiden Richtungen, sogenanntes bidirektonales Laden, unterstützen, genügend Ladezustand oberhalb ihrer Mobilitätsreserve besitzen und vom Netz her steuerbar sein.

Die Verschiebung von Sommerstrom ins Winterhalbjahr mittels Batterien ist nicht möglich. In der Schweiz wäre der winterliche Mehrbedarf über 300-mal grösser als die nominelle Speicherkapazität

aller zugelassenen E-Autos. Es müssten zusätzlich sehr grosse Batterien eingesetzt werden, die ihrerseits nur mit einem einzigen jährlichen Ladezyklus produktiv wären. Dies würde den kWh-Preis auf Hunderte von Franken anheben. Nicht nur preislich, auch bezüglich der Umweltbelastung wären solche Batterien ungünstig. Die bei ihrer Herstellung verursachten Umweltschäden würden - bezogen auf einen jährlich einmaligen Ladezyklus - die Umwelt um ein Vielfaches stärker belasten als die gleiche Menge fossil erzeugten Stroms.

4. Klimabelastung und andere Risiken durch Batterien

Batterien sind nicht umweltneutral. Die bedeutendsten Belastungen entstehen bei ihrer Herstellung durch Bergbau und Eingriffe in Wasser, Landschaft und Biodiversität, Energieverbrauch und Emissionen der Rohstoffraffination, energie- und chemikalienintensive Zellfertigung. Hinzu kommen Brand- und Gefahrstoffrisiken sowie Energie- und Chemikalieneinsatz bei der Rezyklierung.

Bei häufig genutzten Batterien können sich diese Belastungen auf viele Ladezyklen verteilen. Für E-Autos bleibt die Lebenszyklus-Klimabilanz nach IEA-Berechnungen im globalen Mittel deshalb trotz der Batterie etwa 50% günstiger als bei vergleichbaren Verbrennern. Für selten genutzte saisonale Netzbatterien ist die Umweltbilanz dagegen ebenso ungünstig wie die Wirtschaftlichkeit.

5. Batterieproduktion: Rohstoffreserven und politische Abhängigkeiten

Bei modernen Lithium-Ionen-Batterien hängt die Welt heute in teilweise kritischem Umfang von China ab. Das gilt besonders für Elektroautos und stationäre Stromspeicher. Es bedeutet aber nicht, dass die Herstellung von Batterien ohne chinesische Rohstoffvorkommen grundsätzlich unmöglich wäre. Chinas stärkste Stellung liegt nicht im Bergbau, sondern in der Aufbereitung der Rohstoffe und industriellen Herstellung.

Langfristig liesse sich die Abhängigkeit zwar beseitigen, kurzfristig aber nicht. Lithium, Nickel, Kobalt, Graphit, Eisen und Phosphat sind ausserhalb Chinas durchaus vorhanden. Nötig wären aber - ausserhalb Chinas - neue Bergwerke, Raffinerien und chemische Aufbereitungsanlagen, Produktion von Anoden und Kathoden, Batteriemaschinen und eigenes Verfahrenswissen sowie Zellfabriken mit hohen und gleichbleibenden Produktionsausbeuten.

Der Aufbau einer vollständigen Lieferkette würde fünf bis zehn Jahre oder länger dauern und wäre zunächst wesentlich teurer als der Bezug aus China. Europas Problem ist nicht nur ein Mangel an Fabriken, sondern der Kostennachteil: Nach IEA-Angaben lagen die europäischen Herstellungskosten zuletzt ungefähr 50% über den chinesischen.

6. Profitabilität und Konkurrenzfähigkeit von Batterien

Manche Länder verfügen über grosse Batteriespeicher (*Battery Energy Storage Systems*, abgekürzt BESS) zur Netzstabilisierung. Neue BESS werden laufend zugebaut. Die Kosten solcher Anlagen je kWh Speicherkapazität werden mit 200-300 USD angegeben. Sofern eine Anlage ihre Leistung durch die rasche Abfolge von Energieaufnahme und -abgabe häufig erbringen kann, sind die Kosten pro abgegebene kWh gering. Wenn die Betreiber der Anlagen mit dem Netzbetreibern Verträge abschliessen, die zwischen Aufnahme und Abgabe des Stroms eine hinlängliche Marge vorsehen, kann der Betrieb der Anlagen privatwirtschaftlich profitabel sein. Für die Verschiebung grösserer Mengen von Überschussstrom aus Solar- und Windkraftanlagen von der Mittags- in die Abendzeit sind solche Batterien aber zu klein, erst recht für eine Verschiebung vom Sommer in den Winter.

C. Absenkung von Treibhausgasen

1. Absenkung von CO_2

Die Absenkung von CO_2 ist ein notwendiges Element jedes Netto-Null-Narrativs, denn Netto Null heisst: Emissionen werden entweder an Punktquellen abgeschieden und endgelagert oder, wo dies nicht möglich ist, durch Abscheidung gleicher Mengen aus der freien Atmosphäre wettgemacht.

2. CCS

Als CCS (*Carbon Capture and Storage*, Abscheidung und Speicherung von CO_2) bezeichnet man die Abscheidung von CO_2 an einer Punktquelle, z.B. in einem Kamin, und die anschliessende langfristige Speicherung. Bezüglich der Speicherung wird vor allem an die Injektion in geeignete Gesteinsschichten tief unter dem Erd- oder Meeresboden gedacht (geologische Endlagerung, *sub surface storage*).

Während die Abscheidung an Punktquellen und Wiederverwendung in industriellen Prozessen verbreitet angewendet wird, gibt es die geologische Endlagerung nur in Projekten mit geschlossenen Teilnehmerkreisen; eine Endlagerung von CO_2 in klimarelevanten Mengen zu öffentlich bekannten Marktpreisen gibt es nicht.

3. CCU und CCUS

Als CCU *(Carbon Capture and Utilization)* werden die Abscheidung an einer Punktquelle, der Transport und die anschliessende Nutzung von Kohlenstoffverbindungen, meist in Form von Kohlendioxid (CO_2) oder Kohlenmonoxid (CO), bezeichnet, bei denen der Kohlenstoff einem weiteren Nutzungszyklus zugeführt wird.

Gewisse Zementhersteller scheiden CO_2 ab und verwenden es in Produkten oder Produktionsprozessen. Abgeschiedenes CO_2 wird auch für Lebensmittel, Getränke, Gewächshäuser und chemische Produkte verwendet.

CCU kann wirtschaftlich selbsttragend sein, sofern die Abscheidung wenig kostet. Dies ist der Fall bei der Ethanol-, Ammoniak- oder Erdgasaufbereitung, wo fast reines CO_2 anfällt. Teuer und nicht selbsttragend ist die Abscheidung und Wiederverwendung von CO_2 in Betrieben, in denen CO_2 in geringerer Konzentration freigesetzt wird wie beispielsweise in fossilen Kraftwerken, in der Stahlindustrie und in Kehrichtverbrennungsanlagen.

Bei der erweiterten Erdölförderung *(Enhanced Oil Recovery, EOR)* wird CO_2 in Erdöllagerstätten eingepresst bzw. injiziert, um die Viskosität des gelagerten Rohöls zu verbessern und die Ausbeute zu vergrössern. Sofern bei diesem Verfahren sichergestellt wird, dass das injizierte CO_2 definitiv geologisch gespeichert bleibt, spricht man von CCUS (*Carbon Capture, Utilization and Storage*; Abscheidung, Nutzung und Speicherung von CO_2).

Während die Einpressung von CO_2 zwecks erweiterter Ölförderung verbreitet angewendet wird, hat die geologische Endlagerung des eingepressten CO_2 keine verbreitete Anwendung; eine Endlagerung von CO_2 in klimarelevanten Mengen gibt es nicht.

4. DACCS

Als DACCS *(Direct Air Carbon Capture and Storage)* wird die direkte CO_2-Abscheidung aus der Luft und anschliessende Speicherung bezeichnet. Die Abscheidung geschieht durch das Ansaugen von Umgebungsluft und Durchpumpen durch chemische Filter, die das vorhandene CO_2 binden. Bezüglich der Speicherung wird wie bei CCS an die Injektion in geeignete Gesteinsschichten tief unter dem Erd- oder Meeresboden gedacht *(sub surface storage)*. Da die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre 0,04% beträgt, muss zur Gewinnung einer Tonne CO_2 im DACCS-Verfahren etwa die

250-fache Menge Luft gefiltert werden wie im CCS-Verfahren bei einer Kehrichtverbrennungsanlage mit etwa 10-prozentiger CO_2-Konzentration.

Sowohl die direkte CO_2-Abscheidung aus der Luft wie auch die geologische Endlagerung wird nur in Projekten mit geschlossenen Teilnehmerkreisen angewendet; eine Endlagerung von CO_2 in klimarelevanten Mengen zu öffentlich bekannten Marktpreisen gibt es nicht.

5. BECCS

Mit BECCS (*Bioenergy with Carbon Capture and Storage*) bezeichnet man die Gewinnung von Bioenergie durch die Verbrennung pflanzlicher Stoffe, insbesondere von Holz, mit anschliessender Abscheidung des Verbrennungs-CO_2 aus der Abluft, und die Endlagerung des abgeschiedenen CO_2. Es handelt sich um ein Absenkungsverfahren, das die hohen Abscheidungskosten des DACCS-Verfahrens vermeidet, indem statt der Ausfilterung grosser Luftmassen in chemischen Filtern das natürliche Wachstum von Wäldern genutzt wird. - Bezüglich der geologischen Endlagerung ist zwischen BECCS und CCS kein Unterschied; eine Endlagerung von CO_2 in klimarelevanten Mengen zu öffentlich bekannten Marktpreisen gibt es nicht.

6. Anwendung der Verfahren

Bis heute fehlen verbindliche öffentliche Angebote von Endlagerstättenbetreibern für die Entgegennahme und definitive geologische Speicherung von ausländischem CO_2. Die operativ tätigen Endlagerungsbetriebe haben Projektcharakter oder arbeiten für einen geschlossenen Kreis von Beteiligten. Vollkosten werden nirgends bekanntgegeben.

7. Andere Absenkungsmethoden

Andere Methoden der CO_2-Entsorgung *(Carbon Dioxide Removal, CDR)*, wozu namentlich die Einlagerung in Biochar/Pflanzenkohle und die Biomasseeinlagerung gehören, werden wegen ihrer geringen Bedeutung hier nicht dargestellt.

8. Keine Absenkung anderer Treibhausgase

Das Netto-Null-Ziel erfordert nicht nur die Absenkung von CO_2, sondern auch die Absenkung der anderen Treibhausgase. Deren Beitrag macht am durchschnittlichen jährlichen Wachstum der anthropogenen Klimabelastung rund 21% aus, neben einer CO_2-Klimawirkung von 79%. Im Rahmen einer Netto-Null-Zielsetzung können die anderen Treibhausgase nicht ignoriert werden.

Ihre Konzentration in der Atmosphäre ist jedoch geringer als diejenige von CO_2[53], und zwar um einen Faktor 200 (Methan), 1000 (Lachgas) und durchschnittlich 100'000 (einzelne F-Gase), sodass die Abscheidung dieser Gase aus der Luft nicht ernsthaft in Betracht fällt. Stattdessen sieht man die Lösung des Problems in der Vermeidung der Emissionen an der Quelle. Soweit die Vermeidung nicht möglich ist, wird daran gedacht, im Umfang der emittierten CO_2-Äquivalente zusätzliches CO_2 abzuscheiden.

D. Klimaschutz im Spannungsfeld zwischen Fremd- und Eigennutzen

Was jemand für den Klimaschutz tut, kommt fast ausschliesslich der ganzen Menschheit zugut und ist damit fast ausschliesslich fremdnützig. 2024 wurden in der Schweiz rund 40 Mio. Tonnen CO_2eq direkt ausgestossen, was bezogen auf die rund 57 Mrd. der ganzen Menschheit 0,07% darstellt.

---

53 Die Konzentrationen sind:
CO_2: 0,0428%;
Methan: 0,0002%;
Lachgas: 0,000034%;
F-Gase: 0,00000002% (durchschnittlicher Wert aller F-Gase).

Übersetzt man diese Menge in eine monetäre Relation, so kommen von 100 Franken, die aus schweizerischen Mitteln für die Verminderung der schweizerischen direkten Emissionen aufgewendet werden, 99 Franken und 93 Rappen dem Ausland und 7 Rappen der Schweiz zugut. Dies kann zur Meinung führen, Klimaschutz sei eine Benefizveranstaltung, für die es nicht lohnt, sich anzustrengen, insbesondere solange grössere Länder ihre grösseren Schadensanteile vergrössern.

Ein solcher Standpunkt wäre verfehlt. Auch wenn die Schweiz als Land und jeder Einwohner als Individuum das Weltklima nicht retten, so handeln sie richtig, wenn sie einen Beitrag leisten an die Verlangsamung des verhängnisvollen Prozesses.

E. Klimaschutz im Spannungsfeld zwischen Verursachern und Opfern

Der Klimawandel wird seit der Klimarahmenkonvention von 1992 im internationalen Kontext auf das wirtschaftliche Gebaren der Industrienationen zurückgeführt. Die Entwicklungs- und Schwellenländer sehen sich als die Opfer. Die Klimarahmenkonvention bezeichnete das Streben nach "Gerechtigkeit" und "unterschiedliche Verantwortlichkeiten der Länder" als Grundlagen des internationalen Klimaschutzes. Das Pariser Abkommens von 2015 übernahm die Sichtweise, indem es die angestrebte Erwärmungsbegrenzung nicht an eine Temperatur- oder Jahreszahl, sondern an das *"vorindustrielle Niveau"* anknüpfte, d.h. auf die Zeit, bevor die Industrienationen mit der industriellen Freisetzung von Treibhausgasen begannen.

Innerhalb der klimaschutz-ambitionierten demokratischen Länder wurde der Klimaschutz innenpolitisch frühzeitig als ein vorwiegend "linkes" Anliegen verortet, nämlich als Schutz der einfachen Bevölkerung vor dem klimaschädlichen Profitstreben der Industrie und ihrer Eigentümer.

Damit hat der Klimaschutz seine Bedeutung als gemeinsame Aufgabe aller Völker und Menschen verloren. Er ist zu etwas geworden, was die grosse Mehrheit der Unterprivilegierten einfordert von der kleinen Gruppe der Privilegierten. Eingefordert wird Gerechtigkeit bzw. "Klimagerechtigkeit".

Der Links-Rechts-Gegensatz behindert in demokratischen Ländern die Lenkung des Konsums. Lenkungsabgaben, die den Konsum klimaschädlicher Güter durch deren Verteuerung eindämmen könnten, sind nicht mehrheitsfähig, weil sie die wirtschaftlich Schwachen härter treffen als die Wohlhabenden. Besonders sensibel sind die Treibstoffpreise an den Tankstellen. Politiker, die deren Erhöhung zum Zwecke des Klimaschutzes befürworten sollten, müssten um ihre Wiederwahl bangen. Aus den gleichen Gründen ist die Verteuerung des Flugverkehrs in einer Grössenordnung, die eine Lenkungswirkung hätte, ein politisches Tabu; alle politischen Bemühungen, den Klimaschaden des Flugverkehrs zu begrenzen, kreisen um zaghafte Methoden, welche den Handschuh waschen sollen, ohne ihn nass zu machen: geringfügige Beimischung von Bio-Treibstoffen zum klimaschädlichen Kerosin und geringfügige Verteuerungen der Betriebskosten durch einen sanften Klimazertifikatszwang. Verbale Bekenntnisse zur künftigen Kräftigung solcher Lenkungsinstrumente - Erhöhung der Bio-Beimisch- und Zertifikatsquoten in kommenden Jahren - sind, auch wenn sie heute in Konventionen und Gesetzen festgeschrieben werden, blosse Gewissensberuhigung. Da die Politik heute nicht den Mut hat, klimaschädliche Güter für die Konsumenten teuer zu machen, wird sie den Mut auch in Zukunft nicht aufbringen, sondern die deklarierten Zukunftsziele zu gegebener Zeit nach unten revidieren. Gesetze lassen sich ändern.

F. "Netto Null 2050"

1. Entstehung der Formel "Netto Null"

Im ***Uno-Rahmenabkommen von 1992*** hatten sich die Beteiligten ein gemeinsames Ziel gesetzt, nämlich die *Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen auf einem Niveau, auf dem die gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird*. Das Ziel war abstrakt. Ebenso abstrakt war die Antwort auf die Frage, was fortab zu tun sei: Die Länder sollten *auf der Grundlage*

der Gerechtigkeit und entsprechend ihren gemeinsamen, aber unterschiedlichen Verantwortlichkeiten und ihren jeweiligen Fähigkeiten das Klimasystem zum Wohl heutiger und künftiger Generationen schützen.

Im ***Kyoto-Protokoll von 1997*** wurde das Ziel noch abstrakter gefasst - *"um eine nachhaltige Entwicklung zu fördern ..."*. Konkret und verbindlich waren hingegen die Begrenzungs- und Reduktionspflichten der Anhang-I-Länder.

Als der Klimaschutz global nicht vorankam mit Verpflichtungen, denen sich nur eine Minderheit relativ geringfügig emittierender Länder unterzogen, wurde in Paris 2015 ein dritter Anlauf genommen, der wieder alle Staaten einbeziehen, aber auf verbindliche Verpflichtungen verzichten sollte. Nun wurde unter Berufung auf wissenschaftliche Erkenntnisse eine Temperaturlimite vorgegeben: *Der weitere Anstieg der Erdtemperatur müsse unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau gehalten und wenn möglich auf 1,5 °C begrenzt werden.* Daraus wurde ein gemeinsames Handlungsziel für sämtliche Länder abgeleitet, nämlich *in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts ein Gleichgewicht zwischen den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus Quellen und dem Abbau solcher Gase durch Senken herzustellen.* Dieses Ziel wurde später mit der Formel "Netto Null 2050" auf den Punkt gebracht und, wie vorne erwähnt, von vielen Ländern in Gesetzen verankert.

"Netto Null" war eine ideale Formel, um sämtliche Länder auf ein gemeinsames Ziel auszurichten, ohne konkrete Beitragspflichten für einzelne Länder festzulegen und damit Konflikte auszulösen zur Frage, wer wie viel beizutragen hatte. Um solche Konflikte grundsätzlich zu vermeiden, sollte die Festlegung der Beiträge den Ländern überlassen bleiben und freiwillig sein.

"2050" war ein ideales Datum, weil es die globale Klimadisziplin mit ihren grossen Belastungen und Einschränkungen in eine ferne Zukunft verschob und für die unmittelbar bevorstehenden Jahre nichts weiter verlangte, als dass sich die Länder mit Messungen, Berichten, Planungen und Abklärungen beschäftigten.

2. Globale und territoriale Bedeutung

"Netto Null" als *globales* Ziel meint eine Differenzrechnung in dem Sinne, dass innerhalb eines Zeitraums die "positiven", in die Atmosphäre freigesetzten Emissionen durch eine gleiche Menge von Treibhausgas-*Entnahmen* aus der Atmosphäre ("negative" Emissionen) wettgemacht werden. Als negative Emission gilt insbesondere die dauerhafte Endlagerung von atmosphärischem CO_2 in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Speichern sowie ihre chemische Bindung in dauerhaften Produkten.

Sofern alle Länder ihre positiven Emissionen durch Entnahmen wettmachen, hat jedes Land einzeln und die Menschheit insgesamt eine Emissionsbilanz von netto null.

Neben dieser globalen Bedeutung hat "Netto Null" noch eine zweite, *territoriale* Bedeutung: Ein Territorium, z.B. ein Land, erreicht "netto null", wenn die innerhalb des Territoriums verursachten *direkten* positiven Emissionen wettgemacht werden durch Entnahmen aus der Atmosphäre und/oder durch andere Massnahmen wie z.B. anrechenbaren Kompensationen aufgrund der Finanzierung von Klimaschutzprojekten im In- und Ausland.

In der territorialen Netto-Null-Rechnung werden die indirekten Emissionen aus der Nettoberechnung des Territoriums ausgeklammert.[54]

---

[54] Einzelne Länder erfassen die indirekten Emissionen statistisch, ohne sie jedoch in ihre Netto-Null-Bilanzen einzurechnen.

3. Innerer Widerspruch des territorialen Begriffs

Da nie alle Treibhausgasemissionen vermieden werden können, könnte die Menschheit Klimaneutralität global nur erreichen, wenn die unvermeidbaren Emissionen durch Absenkungen wettgemacht würden, d.h. wenn die Differenz von positiven und negativen Emissionen zu null ausgeglichen würde. Dies entspricht der arithmetischen Logik und wurde als Ziel schon in der Klimarahmenkonvention von 1992 anvisiert.

Die Vertragsstaaten haben sich von der arithmetischen Logik der globalen Netto-Null-Berechnung jedoch entfernt, als sie bei der COP-3 in Kyoto auf Drängen der USA und anderer Länder ein *Territorialprinzip* einführten, indem sie

a) die Klimaschutzverpflichtungen der Anhang-I-Länder auf die Begrenzung der *innerhalb der nationalen Territorien* verursachten direkten Emissionen einschränkten,

b) für die Erreichung der nationalen Begrenzungsziele den Erwerb und die *Anrechnung* von Emissionsrechten und Kompensationsgutschriften *aus dem Ausland* zuliessen und

c) die durch den Konsum verursachten indirekten Emissionen *im Ausland* ausklammerten, d.h. *nicht an die direkten Emissionen im Inland anrechneten*.

Aus diesen Berechnungsregeln entstand der territoriale Begriff der Formel "Netto Null". Er krankt an inneren Widersprüchen: Die positiven Emissionen werden vollständig und ausschliesslich am *Ort der Entstehung* erfasst. Hingegen können negative Emissionen über Landesgrenzen hinweg gehandelt und in den Treibhausgasbilanzen von Territorien angerechnet werden, in denen sie *nicht* entstanden sind. Anders gesagt: Beim grenzüberschreitenden Handel werden negative Emissionen am *Ort der Finanzierung* erfasst, d.h. jenem Akteur und jenem Territorium zugerechnet, von wo die Finanzierung der betreffenden Klimaschutzmassnahme stammt.

Daraus folgt: Wenn ein Land ausserhalb seines Territoriums Klimaschutzmassnahmen finanziert, die zu negativen Emissionen führen, darf es sich diese an seine inländischen Direktemissionen anrechnen. Mit 100 positiven Emissionseinheiten im Inland und der Finanzierung von ebenso vielen negativen im Ausland erreicht das Land netto null Direktemissionen.

Durch die Zulassung des grenzüberschreitenden Handels mit negativen Emissionen und die Ausklammerung der indirekten Emissionen in den territorialen Bilanzen entsteht eine *Ungleichbehandlung der Finanzierung auswärtiger Emissionen*: Finanziert ein Territorium *negative* Emissionen in einem anderen Territorium, so darf es sich diese in seiner Emissionsbuchhaltung gutschreiben. Finanziert es *positive* Emissionen in einem anderen Territorium, indem es von dort emissionsbelastete Güter importiert, so muss es sich diese ausländischen Emissionen in seiner Emissionsbilanz nicht anrechnen lassen.

Die Mechanismen der territorialen Netto-Null-Formel ermöglichen es den grossen Emittenten - sofern sie netto null erreichen wollen -, sich teure Begrenzungsmassnahmen im Inland zu ersparen, indem sie ihre direkten Emissionen durch billige Verminderungszertifikate aus dem Ausland kompensieren, und dies im Rahmen einer Praxis, bei der Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit vieler Auslandsprojekte fragwürdig sind.

Oder kürzer gesagt: Die territoriale Formel erlaubt es den staatlichen und privatwirtschaftlichen Akteuren, sich um den Klimaschutz zu drücken, sobald er teuer wird.

Diese Konsequenz ist nicht die Folge eines Missverständnisses, sondern sie ist von den Ländern, die den grenzüberschreitenden Emissionsrechte- und Kompensationshandel in das UN-Regelwerk hineinbrachten, so gewollt. Sie bildet die ambivalente Haltung vieler Akteure und Privatpersonen ab, die das Klima zwar schützen, aber keine schmerzhaften Opfer bringen wollen.

4. Weg zu Netto Null

Der Weg zu Netto Null erfordert staatliche Massnahmen. Zwei Kategorien können unterschieden werden:

Die *erste Kategorie der relativ schmerzlosen, mancherorts real umgesetzten Massnahmen* umfasst die Förderung von Solar- und Windstrom, von emissionsdämmenden Gebäudesanierungen und von Fernwärme, staatliche Lenkungsmassnahmen gegenüber Energiewirtschaft und Industrie, insbesondere durch eine geringfügige und durch Kompensationsmöglichkeiten gemilderte CO_2-Bepreisung der Emissionen, geringe Bio-Beimischpflichten für See- und Luftverkehr, Förderung des Fussgänger- und Fahrradverkehrs, in die Zukunft aufgeschobene Verbote fossiler Heizungen und fossil angetriebener Fahrzeuge - und anderes.

Die *zweite Kategorie der schmerzhaften, theoretisch denkbaren, aber in keinem Land umgesetzten Massnahmen* umfasst (a) zu Lasten der Staaten die Organisation und branchenweise Durchsetzung des CCS-Verfahrens, d.h. der CO_2-Abscheidung aller an Punktquellen fassbaren Emissionen (von fossilen Kraftwerken, Zementindustrie, Kehrichtverbrennung u.a.) sowie die Finanzierung des DACCS-Verfahrens zum Ausgleich der nicht vermeidbaren direkten Emissionen, ferner (b) zu Lasten der Bevölkerung eine Verteuerung der Treibstoffe für den Motorfahrzeug- und Luftverkehr durch Lenkungsabgaben in einer Höhe, die den Konsum auf unvermeidbare Fahrten reduziert, d.h. etwa durch Verzehnfachung der Treibstoffpreise; hohe Besteuerung privater Motorfahrzeuge gemäss ihrer Klimabelastung pro Fahrkilometer; Verbot beheizbarer Zweitwohnungen; Rationierung des Erstwohnungs-Wohnraums durch Zuteilung von z.B. 40 Quadratmetern Wohnfläche für die erste, zusätzlichen 15 Quadratmetern für jede weitere Bewohnerin einer Wohnung, verbunden mit der Verpflichtung der Besitzer grösserer Wohnungen, Mieter aufzunehmen, bis die Flächenquoten erfüllt sind; Verbot der Beheizung von Wohnräumen über z.B. 19 Grad im Winter, der Kühlung unter z.B. 28 Grad im Sommer; Verbot beheizbarer privater Swimmingpools; zentrale Steuerung des Stromkonsums nach Massgabe des verfügbaren Stroms aus nicht-fossilen Quellen; CO_2-Bepreisung von Lebensmitteln und anderen Konsumgütern in einer Höhe, die einen klimaschonenden Konsum der Bevölkerung bewirkt. - Entstehende Härten müssten und könnten durch Ausnahmeregelungen aufgefangen werden. Bei der Lenkung des Konsums durch hohe Preise müssten staatliche Zuschüsse die einkommensschwachen Personen vor Benachteiligungen schützen.

Die erste Kategorie der relativ schmerzlosen Massnahmen kennzeichnet den von klimaschutz-ambitionierten Ländern eingeschlagenen Weg. Darauf können sie ihren Fussabdruck um schätzungsweise 20-30% reduzieren. Länder mit geringen Ambitionen kommen weniger weit. Um den Fussabdruck um 80-90% zu reduzieren, wären Massnahmen der zweiten Kategorie erforderlich. Sie kommen auch für Ambitionierte nicht in Frage.

Auch Länder, die Netto Null in ihren Gesetzen verankert haben, beschränken sich auf Massnahmen der ersten Kategorie.

Die geringe Bereitschaft der Menschheit, zugunsten des Klimas Opfer zu erbringen, zeigt sich exemplarisch an der Luftfahrt, welche etwa 2% der globalen THG-Emissionen und zusätzliche andere Klimabelastungen in ähnlicher Grössenordnung verursacht. Diese Belastungen könnten innert kürzester Frist halbiert werden durch eine Drosselung des Flugverkehrs. Die Drosselung wäre möglich mit substanziellen Lenkungsabgaben auf dem Kerosin und einer entsprechenden Verteuerung der Flugpreise. Die Staaten müssten keine finanziellen Lasten schultern. Möglich wäre dies aber nur auf der Grundlage internationaler Solidarität. Da sie fehlt, ist es nicht einmal in klima-ambitionierten Ländern möglich, Flugtreibstoffe mit Abgaben zu belasten, wie sie für Treibstoffe für den Strassenverkehr üblich sind. Flugtreibstoff ist in fast allen Ländern steuerfrei. Zwar tasten sich die Länder in den ICAO-Konferenzen zaghaft an Klimaabgaben der Luftfahrt heran und zeigen Absichten, die Abgaben in Zukunft zu erhöhen. Davon ist aber nicht viel zu halten. Wenn die

Drosselung des Flugverkehrs zum Schutz des Klimas für die Menschheit heute nicht zumutbar ist, dann wird sie es auch in zehn und zwanzig Jahren nicht sein.

Von einer Menschheit, die heute nicht fähig ist, den klimaschädlichen Flugverkehr einzudämmen - was kostenlos möglich wäre -, ist auch nicht zu erwarten, dass sie künftig die teure Absenkung unvermeidbarer Restemissionen auf sich nimmt. Absenkungs-Alleingänge klimaambitionierter Länder sind ebenfalls nicht zu erwarten. Sie würden dem Klima wenig nützen und den betreffenden Ländern klar schaden.

Daraus folgt: Treibhausgase werden auch in Zukunft ohne absehbares zeitliches Ende freigesetzt werden. Die Atmosphäre wird sich weiterhin erwärmen. Die Erreichung des globalen Netto-Null-Ziels ist nicht zu gewärtigen, weder im Jahr 2050 noch danach.

Staaten, die das Ziel-Datum vorziehen - z.B. auf 2035 oder 2040 - bringen zum Ausdruck, dass sie mehr Gewissensberuhigung anstreben, als sie aus dem Zieljahr 2050 schöpfen können, und dass sie Massnahmen der ersten Kategorie beschleunigen, mehr Subventionen rechtfertigen und sich in Vorreiterrollen gefallen möchten - immer jedoch sorgfältig unterhalb den politischen und privaten Schmerzgrenzen bleibend, d.h. unter Verzicht auf Massnahmen der zweiten Kategorie.

4. Schlechte psychologische Wirkung

Die Forme. "Netto Null" schwächt den Klimaschutz, indem sie den Eindruck erweckt, mit netto null Direktemissionen eines Territoriums hätten dessen Einwohner ihre Klimaschutzpflichten erfüllt. "Netto null Direktemissionen" fördert eine Klimaleichtfertigkeit, welche die indirekten Emissionen und den Fussabdruck verdrängt und die diesbezügliche Verantwortung negiert.

Für *Länder* bietet "Netto Null" die erwünschte Möglichkeit, sich mittels Verlagerung von Emissionen ins Ausland und Beschaffung billiger Kompensations-Zertifikate aus dem Ausland als musterhaft darzustellen, ohne ihre Industrie schwer zu belasten und ohne am Komfort des gewohnten Konsums Abstriche zu machen, d.h. ohne den Fussabdruck wesentlich zu reduzieren.

Privatpersonen erhalten durch die Netto-null-Politik ihres Landes die Gewissensberuhigung, dass die in der Gegenwart verursachten Emissionen durch die künftige Wende rückgängig gemacht werden. Auch der Begriff der Energie*wende*[55] schürt diese Hoffnung.

Privatpersonen erhalten zudem die Gewissensberuhigung, dass *der Staat* die künftige Trendwende *gewährleistet*, und dass die Individuen demzufolge aus der persönlichen Verantwortung in der Gegenwart entlassen sind und bis auf Weiteres ihr Klimagebaren nicht zu ändern brauchen, soweit der Staat ihnen keine konkreten Pflichten auferlegt.

Wo die Produzenten von Waren und Dienstleistungen behaupten, zu netto null *unterwegs* zu sein, erhalten die Konsumenten die Gewissensberuhigung, dass ihr gegenwärtiges Konsumverhalten nur *vorläufig* schädlich ist.

---

55 "Energiewende" ist ein ideologisch aufgeladener Begriff, der in Deutschland neben der Umstellung von fossilen auf erneuerbare Energien meist auch die Verringerung der Abhängigkeit von Energieimporten, energetische Versorgungssicherheit und den Ausstieg aus der Kernenergie umfasst. Der Begriff meint damit auch anderes als den Klimaschutz und - durch Festschreibung des Atomausstiegs - auch ein politisches Ziel, das dem Klimaschutz zuwiderläuft. In der vorliegenden Darstellung werden die Begriffe Klimaschutz, Unabhängigkeit von Energieimporten, energetische Versorgungssicherheit und Atomausstieg auseinandergehalten und das Wort "Energiewende" vermieden. Gleich wie die Formel "Netto Null 2050" weckt "Energiewende" die Erwartungshaltung, eine Wende stehe bevor und dispensiere von aktuellen Einschränkungen. Der entsprechende englische Begriff "energy transition" ist demgegenüber eine offene Sachbezeichnung, die nicht zwingend auch den Atomausstieg umfasst und keine Wende suggeriert.

5. Inszenierte Irreführung

Bildung einer gewinnstrebigen Klimagilde

Seit der Etablierung des Klimaschutzes als politisches Traktandum haben sich Politiker, Umweltämter, Forscher, Wissenschaftler und Medienschaffende aus vielen Ländern zu einer Art von Klimagilde zusammengefunden, d.h. zu einer grenzüberschreitenden Glaubensgemeinschaft, die sich seit der Pariser Konferenz von 2015 dem Dogma von der Erreichbarkeit von "Netto Null 2050" verschreibt. Innerhalb der Gemeinschaft sind Zweifel an der Erreichbarkeit des Ziels ebenso tabu wie in einer militärischen Truppe Zweifel am Sieg.

Die Klimagilde hat in der öffentlichen Publizistik einen grossen Sprechanteil. Viele Akteure profitieren persönlich, indem sie politische Mandate, Beamtungen, Forschungsgelder oder Subventionen beziehen für Tätigkeiten und Projekte, die "netto null 2050" ermöglichen oder die Machbarkeit der Zielerreichung glaubhaft machen sollen. Wo grüne Politik Gelder für Klimaforschung und Klimaprojekte fliessen lässt, gilt für die Empfänger - Institute, Experten, Projektbeteiligte - das alte Sprichwort *"Wes Brot ich ess', des Lied ich sing'."* Die Gilde ist zugleich eine Interessensgemeinschaft, deren Exponenten einander argumentativ stützen und bestätigen.

Entlang den Routen des Kompensationenhandels haben sich Institutionen etabliert, die mit der Findung, Entwicklung, Zertifizierung und Vermittlung von Kompensationsprojekten Geld verdienen. In Deutschland ist in den vergangenen zwei Jahrzehnten rund um die hochsubventionierte Solar- und Windkraft eine lukrative Industrie aus Anlagenbau, Beratung, Finanzierung und Vertrieb entstanden, die mehr als 400'000 Menschen beschäftigt. Sie propagiert den unbegrenzten Ausbau von Solar- und Windkraft als sicheren Weg zu Netto Null.

Damit ist Netto Null zu einem Geschäft geworden, dessen Grundlage das Dogma ist, die Energiewende sei möglich und erschwinglich. Je klarer sich das Dogma von der Realität entfernt, desto grösser wird der Druck, Glaubhaftigkeit künstlich zu schaffen, bis hin zur eigentlichen Irreführung der Öffentlichkeit.

Irreführung der Öffentlichkeit

Mit der Werbebotschaft *"Wir sind unterwegs zu Netto Null"* versprechen Politik, staatliche Stellen und Unternehmen die Rettung des Planeten und geben Geld aus für werbewirksame Inszenierungen, die den Glauben an den angeblich erreichbaren Emissions-Stopp stützen sollen. Die Konsumenten, an welche die Botschaften gerichtet sind, fühlen sich aus der Verantwortung entlassen. Folgende Beispiele seien genannt:

Seit 1996 betreibt die *Firma Northern Lights JV DA* in *Norwegen* die Endlagerung von CO_2 im Untergrund der Nordsee. Es handelt sich um ein Gemeinschaftsunternehmen der Ölfirmen Shell und Total Energies und der vom norwegischen Staat kontrollierten Firma Equinor ASA. Das geologisch gespeicherte CO_2 stammt überwiegend von der Firma Brevik CCS, einer norwegischen Tochtergesellschaft des deutschen Zementkonzerns Heidelberg Materials AG. Alle Beteiligten, Ölfirmen, Zementhersteller und der norwegische Staat als Exporteur von Erdöl und Erdgas, sind grosse THG-Emittenten bzw. Verkäufer von fossilen Primärenergien. In dieser Eigenschaft haben sie ein gemeinsames Interesse, die Weltöffentlichkeit glauben zu machen, dass die Endlagerung von CO_2 erschwinglich sei und dass die genannten Akteure das Ziel im Kleinen bereits erreicht hätten. Bis zur Marktreife fehle nur noch die Skalierung.

Den Beweis bleiben die Akteure schuldig. Es gibt keine öffentlichen, transparenten Entsorgungsangebote und keine Preislisten für eine umfangreiche und langfristige Endlagerung von abgeschiedenen CO_2. Wer sich mit Northern Lights einlässt, muss eine Geheimhaltungsverpflichtung unterschreiben und sich alsdann in Geduld üben. Denn die erste Northern-Lights-Endlagerungsphase ist, wie es heisst, bereits vollständig ausgebucht.

Auch gibt es keine Zertifizierung von unabhängigen Stellen, dass das abgespeicherte CO_2 nicht entweicht und sich mit dem Nordseewasser verbindet. Entweicht es, so ist der Nachweis ebenso schwierig wie der gegenteilige, dass es nicht entweicht. Greenpeace hat im Mai 2025 die kritische Studie eines Geochemikers vorgelegt und von einer Mogelpackung gesprochen mit dem Fazit, CCS sei ein teures Luftschloss, mit dem Gaskonzerne das fossile Zeitalter künstlich verlängern.

In Island betreibt die Firma *Climeworks AG* die Endlagerung von CO_2 in vulkanischen Basaltgesteinen. Climeworks wurde 2009 als ETH-Zürich-Spin-off gegründet. Durch die isländische Firma *Carbfix hf.* lässt sie auf deren Anlagen *Orca* und *Mammoth* aus der Atmosphäre entnommenes CO_2 endlagern.

Die Kosten (Kapital- und Betriebskosten von Orca und Mammoth, Strom- und Wärmeverbrauch je tatsächlich netto entfernter Tonne, Aufteilung der Kosten auf Sorbent-Ersatz, Reparaturen, Personal und Abschreibung) werden nicht veröffentlicht, sodass sich nicht abschätzen lässt, wie hoch der Preis ohne Forschungsförderung, Investorenkapital und die vor Ort kostengünstig verfügbare Geothermie wäre. Bezüglich Energieeffizienz, Nennleistung und Skalierungsversprechen sowie zur Schicksalsfrage des dauerhaften Verbleibs des CO_2 im Basaltgestein fehlt eine öffentliche, anlagenbezogene und unabhängig reproduzierbare Prüfung.

Als Nennleistungen der Anlagen werden für Orca 4'000 und für Mammoth 36'000 t CO_2 pro Jahr angegeben. Die Anlagen sind nur in geringem Umfang ausgelastet, sodass ihre Erweiterung und die Skalierung des Verfahrens bis auf Weiteres nicht zu erwarten ist. Seit Beginn der Kreditierungsperioden in den Jahren 2023 und 2024 bis zum Juli 2026 wurden knapp 3000 CORCs *(Carbon Removal Certificates)* ausgegeben, was einer Auslastung von etwa 4% der behaupteten Nennleistung entspricht. Die geringe Auslastung dürfte sich mit dem fehlenden Interesse potentieller Kunden erklären. Die CORC-Zertifikate sind angesichts der finanziell und energetisch aufwendigen Reinigung der Erdatmosphäre vermutlich wesentlich teurer als Zertifikate aus anderen Kompensationsprojekten.

Die *Swiss International Airlines (Swiss)* finanzieren ein kleines Startup-Unternehmen, das sich mit der Entwicklung von "grünem" Flugzeugtreibstoff befasst, womit Swiss angeblich unterwegs ist zum emissionsfreien Flugverkehr. Die Botschaft an die Konsumenten lautet: Sie können mit gutem Klimagewissen Swiss-Flüge buchen. Swiss kümmert sich um das Klima.

Der *Verband der Betreiber der Schweizerischen Abfallverwertungsanlagen VBSA* finanziert die Pilotanlage Linth zur CO_2-Abscheidung und geologischen Endlagerung aus Kehrichtverbrennungs-Abluft und sieht sich damit unterwegs zur emissionsfreien Kehrichtverbrennung. Wo und zu welchen Kosten abgeschiedenes CO_2 endgelagert werden kann, wissen die Projektverantwortlichen bis heute nicht.

Weitere Beispiele für ein angebliches Unterwesg-Sein zu Netto Null sind: *Swisscom:* bis 2035; für die gesamte Unternehmensgruppe und ihre Wertschöpfungskette, einschliesslich Lieferanten und Nutzung der verkauften Produkte; *Maersk, Schifffahrt und Logistik:* bis 2040; für eigene Tätigkeiten und die Wertschöpfungskette. Dafür sollen die Emissionen gegenüber 2022 in Scope 1 und 2 um 96%, in Scope 3 um 90% sinken; *Nestlé:* spätestens 2050; das Ziel umfasst direkte und indirekte Treibhausgasemissionen entlang der Wertschöpfungskette, insbesondere auch aus der landwirtschaftlichen Erzeugung der Rohstoffe; *Siemens:* bis 2050; Netto-Null entlang der Wertschöpfungskette. Als Zwischenziel sollen die Emissionen des eigenen Betriebs und des Energiebezugs bis 2030 gegenüber 2019 um 90% sinken; *BMW Group:* spätestens 2050; über die gesamte Wertschöpfungskette, also einschliesslich Lieferketten und Nutzung der Fahrzeuge; *Holcim Schweiz:* bis 2050; der Baustoff- und Zementhersteller nennt dieses Ziel in seiner Nachhaltigkeitsstrategie; *Microsoft* geht mit ihrer Ankündigung noch darüber hinaus: Das Unternehmen will bis 2030 «carbon negative» werden, also nach eigener Zielsetzung mehr CO_2 aus der Atmosphäre entfernen, als es emittiert.

All diese politischen und kommerziellen Netto-Null-Ankündigungen auf zukünftige Jahre kosten am Anfang wenig Geld und können, wenn die Sache teuer wird, nach unten korrigiert oder fallen gelassen werden. In der Schweiz müssen klimabezogene Angaben zwar durch "objektive und überprüfbare Grundlagen" belegbar sein[56], was fast immer die Behauptung ausschliesst, klimaneutral zu produzieren, nicht aber die Behauptung, Klimaneutralität in der Zukunft anzustreben.

Werbung für "nachhaltige" Geldanlage an Wertschriftenbörsen

Manche börsenkotierten Unternehmen treiben bei Kunden und Anlegern Werbung mit positiven ESG-Ratings[57]. Für Anleger ist der Kauf von "nachhaltigen"[58] Aktien und Fondsanteilen jedoch mehr Gewissensberuhigung als Klimaschutz. Es ist ein Waschen der Hände in Unschuld: Der Anleger möchte nichts zu tun haben mit klimaschädlichen Unternehmen. Dass solche Aktien und Fondsanteile eine höhere Rendite abwerfen als Titel ohne ESG-Label, ist jedoch nicht zu vermuten, da die ESG-Richtlinien manche Produktionsprozesse verteuern und die Unternehmen in der Wahl der Lieferketten einschränken. Auch ist nicht erwiesen, dass die Abstinenz klimabesorgter Anleger von Titeln ohne ESG-Label dem Klima etwas nützt. Vielmehr ist anzunehmen, dass jederzeit genügend Geld vorhanden ist, welches ausschliesslich nach Renditegesichtspunkten angelegt wird.

"Grüner Strom", "Ökostrom"

Manche Konsumenten bezahlen für Ökostrom einen Aufpreis im irrtümlichen Glauben, dass sie als Gegenleistung aus ihrer Steckdose einen Strom von besonderer Reinheit erhalten. Der Irrtum beruhigt ihr Gewissen. Wäre ihnen bewusst, dass ihr Netzstrom der gleiche ist, wie derjenige, den sie auch ohne Aufpreis erhielten, so wären sie enttäuscht, ja würden sich verschaukelt fühlen.

"Grüner Strom" und "Ökostrom" sind Bezeichnungen auf Stromrechnungen für Strom*mengen*, nachdem sich der Lieferant von einem Solar-, Wind- oder Wasserkraftwerk einen Herkunftsnachweis (HKN) für den Einkauf einer gleichen Menge aus erneuerbaren Quellen beschafft hat. Die Herkunftsnachweise beziehen sich fast immer auf Strommengen, die zu anderen Zeiten ins Netz eingespeist wurden, als zu den Zeiten des fakturierten Stromverbrauchs. Nach geltendem schweizerischem Recht kann der Lieferant Solarstrom an einem Sommertag einkaufen und die gleiche Menge Netzstrom mit hohem fossilem Anteil in einer Winternacht als Ökostrom verkaufen (ab 2027 nur noch mit Zeitverschiebungen innerhalb eines Kalenderquartals).

Die Bezeichnungen "grüner Strom" und "Ökostrom" sind irreführend. Im üblichen Sprachsinn bezeichnen Eigenschaftswörter eine Eigenschaft der Sache, hier des Stroms. Da alle Verbraucher, die ihren Strom vom gleichen Netz beziehen, bezüglich der Anteile von erneuerbarer und nicht erneuerbarer Einspeisung den gleichen Standardstrom beziehen, erwecken die Eigenschaftsbezeichnungen "grün" und "Öko" bei unkundigen Laien den falschen Eindruck, einen Strom von besonderer physikalischer Reinheit zu beziehen. Wer in dieser Meinung einen Aufpreis für das Stromlabel "grün" oder "Öko" bezahlt, wird getäuscht. Bei korrekter Aufklärung müsste der

---

56 Bundesgesetz gegen den unlauteren Wettbewerb (UWG) vom 19. Dezember 1986 (Stand am 1. Januar 2025), Art. 3 Abs. 1 Bst. x: "Unlauter handelt insbesondere, wer ... Angaben über sich, seine Waren, Werke oder Leistungen in Bezug auf die verursachte Klimabelastung macht, die nicht durch objektive und überprüfbare Grundlagen belegt werden können."

57 ESG ist die Abkürzung für *Environment, Social, Governance* (Umwelt, Soziales, Unternehmensführung). Es gibt verschiedene ESG-Bewertungen *(Ratings)* für Unternehmen und deren börsenkotierte Aktien, aber kein allgemein verbindliches «ESG-Gütesiegel». Rating-Anbieter sind private Institutionen wie z.B. MSCI, Inrate und ISS ESG.

58 Das Wort "nachhaltig" *(engl. sustainable)* meint im allgemeinen Sprachgebrauch *dauerhaft*, in ökologischen Zusammenhängen hingegen eine Entwicklung, welche *die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne die Fähigkeit künftiger Generationen zu beeinträchtigen, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen* (so die Definition der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen von 1987). - Wegen der Doppeldeutigkeit des Wortes wird es in der vorliegenden Arbeit nicht verwendet.

Lieferant, wenn er für "grünen" oder "Öko"-Strom Rechnung stellt, offenlegen, dass der Öko-Aufpreis nicht eine besondere physikalische Qualität des Stroms abgilt, sondern ökologischen Zwecken zugutekommt[59].

6. Kostenvermeidung durch Kompensationen

Die Beschaffung Kompensationszertifikaten aus dem Ausland dient den Geldgebern in Industrieländern dazu, die Kosten für den Ausgleich ihrer Klimabilanzen gering zu halten. Gefragt sind Projekte im Ausland, die anrechenbare Zertifikate zu geringem Preis generieren[60]. Dass manche Kompensationsprojekte einen *geringen, nicht dauerhaften, hypothetischen* oder *fiktiven* Klimanutzen bewirken, ist für die Geldgeber grundsätzlich ohne Bedeutung.

Aus dem Zweck des Kompensationswesens - Beschaffung von Zertifikaten zum kostengünstigen Ausgleich von Klimabilanzen - ergeben sich starke Anreize zu mangelhafter Zertifizierung und Kontrolle. Missbräuche sind nicht zu vermeiden[61].

Dem Kompensationswesen haftet ein Hauch von kolonialer Ausbeutung an: Die reduktionspflichtigen Industrieländer sichern sich die Weiterführung ihrer wirtschaftlich profitablen, aber klimabelastenden Industrien, indem sie die Erfüllung ihrer Klimaschutzpflichten in die Entwicklungsländer auslagern. Denn mit dem Schutz von Regenwäldern und dem Anlegen von Mooren ist kein Geld zu verdienen.

Der Dispens von eigenen Emissionsverminderungen durch die Finanzierung von Klimaschutzmassnahmen in Entwicklungsländern führt zu einer misslichen Koppelung von Klimaschutz und Entwicklungshilfe. Wenn die Kompensationsinteressen der Geberländer die Auswahl der Projekte bestimmen, sind falsche Entwicklungsprioritäten zwangsläufig.

---

59 Auch das schweizerische Bundesamt für Energie (BFE) bemüht sich, unkundige Laien in ihrem Irrtum zu bestärken, indem es die Stromkennzeichnungen mittels Herkunftsnachweisen folgendermassen erläutert: *"Die Endverbraucher erhalten mit der Kennzeichnung die Möglichkeit, den an sie gelieferten Strom nach qualitativen Kriterien zu bewerten"* und *"Das HKN-System ermöglicht, den ökologischen Mehrwert der Stoffe sichtbar zu machen"*. In unverständlicher Abstraktheit wird von der einfachen Tatsache abgelenkt, dass der an die Verbraucher gelieferte Strom die gleiche Qualität hat wie der Strom, der aus den Steckdosen aller Verbraucher im gleichen Netz kommt, und dass der Aufpreis nichts zu tun hat mit einem ökologischen Mehrwert von "Stoffen". Strafrechtlich ist die Sache kaum relevant, immerhin hart an der Grenze der Gehilfenschaft zum Betrug. - Vgl. die zitierten Sätze auf der Webseite *"Herkunftsnachweise und Stromkennzeichnung"* des Bundesamts für Energie (BFE), abrufbar unter *www.bfe.admin.ch/de/stromkennzeichnung*.

60 Der Preisunterschied wird an folgendem Beispiel deutlich: Die *Stiftung Klimaschutz und* CO_2*-Kompensation KliK*, die im Auftrag der schweizerischen Treibstoffimporteure deren gesetzlich verlangte Kompensationsbescheinigungen beschafft, nannte im November 2025 als durchschnittliche Preise für Inlandbescheinigungen 123 CHF und für Auslandbescheinigungen (ITMO) 30 CHF. Die Preise spiegeln die Tatsache wider, dass Emissionsvermeidungen in der Schweiz im Durchschnitt viermal teurer sind als in Entwicklungsländern.

61 Eine 2016 für die Europäische Kommission erstellte Studie kam zum Schluss, dass bei 85% der untersuchten *Clean-Development-Mechanism*-Projekte nur eine geringe Wahrscheinlichkeit bestand, dass die angerechneten Minderungen zusätzlich und nicht überschätzt waren. Nur bei 2% der Projekte - entsprechend 7% des potenziellen Angebots an Gutschriften für 2013-2020 - wurde diese Wahrscheinlichkeit als hoch beurteilt. Besonders bei Wind- und Wasserkraftprojekten in China und Indien war die Additionalität häufig zweifelhaft, weil der Ausbau vielfach bereits politisch oder wirtschaftlich vorangetrieben wurde. - Vgl. auch den Bericht der deutschen Tagesschau des ZDF vom 4.05.2025, 15:53, *https://www.tagesschau.de/wirtschaft/bioenergie-klimaneutralitat-100.html*, Von Ekkehard Muntschick, mdr: "In den vergangenen Monaten wurde durch gemeinsame Recherchen von ZDF frontal und Deutscher Welle bekannt, dass zahlreiche "Upstream Emission Reduction" ("UER")-Klimaschutzprojekte in China, die eigentlich Treibhausgase reduzieren sollten, mit gefälschten Zertifikaten versehen wurden. Die angeblich umweltfreundlichen Anlagen in China waren entweder zu alt oder existierten überhaupt nicht. Die Folge: Eine Flut von ungültigen Zertifikaten, die im Rahmen des europäischen Emissionshandels (EU ETS) gehandelt werden, gelangte auf den Markt und drückte deren Preise massiv nach unten. Und es wurden Millionen Tonnen an CO_2-Einsparungen bestätigt, die nie stattgefunden haben."

G. Schwierigkeit geologischer Absenkungen

1. Vorbemerkung

"Netto null" als globales Ziel meint, wie vorn ausgeführt, eine Differenzrechnung in dem Sinne, dass innerhalb eines Zeitraums die "positiven", in die Atmosphäre freigesetzten Emissionen durch eine gleiche Menge von Treibhausgas-Entnahmen aus der Atmosphäre ("negative Emissionen") wettgemacht werden.

Wie viele Gigatonnen bei einem Vollausbau des Klimaschutzes ab 2050 mit dem CCS-Verfahren vermieden werden müssen und wie viele Gigatonnen als unvermeidbare Restemissionen mit dem DACCS-Verfahren abzusenken sein würden, ist schwer abschätzbar. Optimistische Szenarien der IEA rechnen mit jährlich 3,7 Gt CCS- und 1 Gt DACCS-Bedarf, die weniger optimistischen des IPCC mit bis zu 16 Gt DACCS-Bedarf. Alle Szenarien gehen von der Annahme aus, dass die grossen Emittenten USA, China und Indien die internationalen Anstrengungen solidarisch mittragen.

Dass sich diese Annahme erfüllt, ist aus heutiger Sicht wenig wahrscheinlich.

2. Nicht nachgewiesene Machbarkeit, voraussehbare Unerschwinglichkeit

Die Methoden und Kosten der CO_2-Abscheidung einschliesslich Trocknung und Verdichtung auf Transportqualität sind bekannt. Bei grossen CO_2-Prozessströmen mit CO_2 Konzentrationen über 90% - z.B. bei Erdgasaufbereitung, Ammoniakproduktion und Bioethanol-Gärung - ist die Abscheidung zu Kosten von etwa 15-35 USD je Tonne CO_2 etabliert. Bei verdünnten Rauchgasen aus Zementwerken, Stahl- und Kraftwerken mit Konzentrationen um 10% liegen die Kosten bei etwa 50-120 USD/t, bei Kehrichtverbrennungs- und Klärschlammanlagen mit hohem Verschmutzungsgrad darüber. Die Machbarkeitsstudie der *Entsorgung und Recycling Zürich (ERZ)* von 2022 hatte für die Abscheidung und Verflüssigung Kosten von CHF 210-290 pro Tonne CO_2 budgetiert. Entsprechend dieser Kostenskala sind für die Abscheidung aus der freien Atmosphäre (mit einer CO_2-Konzentration von 0,04%) im DACCS-Verfahren Kosten anzunehmen, welche die CCS-Abscheidung aus Punktquellen um ein Mehrhundertfaches übersteigen: Tausende USD pro Tonne.

Abschätzbar sind auch die Transportkosten von CO_2 in Pipelines, nämlich etwa 1 US-Cent pro Tonnenkilometer (t-km) bzw. 10 USD pro Tonne für 1000 km in einer grossen, voll ausgelasteten Überlandstammleitung, für kleine Zubringerleitungen teurer und für Offshore-Leitungen etwa das Doppelte der genannten Beträge. Als grobe Schätzung können für einen Pipelinetransport von der Quelle über 1000 km bis zur Offshore-Endlagerstätte etwa 20-30 USD angenommen werden.

Für Abscheidung und Pipelinetransport bis zu einer Offshore-Endlagerstätte fallen im CCS-Verfahren demgemäss Kosten von etwa 100-200 USD an, im DACCS-Verfahren Hunderte bis Tausende USD.

Für die geologische Endlagerung[62] gibt es bis heute keine Marktpreise. Die laufenden Aktivitäten haben durchwegs den Charakter von Vorzeigeprojekten[63], wobei alle Preise bilateral ausgehandelt

---

62 Sie umfasst geologische Erkundung, seismische Messungen und Genehmigung, Erschliessungs- und Injektionsbohrungen, Bohrlochköpfe und Injektionsanlagen, Annahmeprüfung und Messung des angelieferten CO_2, gegebenenfalls Druckanpassung, Zwischenpufferung und Weiterleitung vom Terminal zur Injektionsbohrung, Einspeisung in den Speicherhorizont, Druckmanagement, gegebenenfalls zusätzliche Injektions- oder Soleförderbohrungen, Messung, Überwachung und Verifizierung der CO_2-Ausbreitungsfahne, Druck, Bohrungen und möglicher Migration, Verschluss der Bohrungen, Nachsorge und - je nach Rechtsordnung - finanzielle Sicherheit für langfristige Haftung.

63 Für *norwegische Nordsee-Speicher*, vor allem Northern Lights (Aurora-Reservoir) haben zwei Firmen aus *Schweden* Verträge, nämlich Stockholm Exergi über bis zu 0,9 Mio. t biogenes CO_2 pro Jahr, während 15 Jahren ab 2028, sowie Öresundskraft aus Helsingborg über bis zu 0,2 Mio. t/Jahr, vorgesehen ab Ende 2029. Aus

und geheim gehalten werden. Lieferketten, bei denen grosse Mengen von CO_2 über Landesgrenzen hinweg zur Endlagerung in ein anderes Land gebracht werden, sind bis heute nirgends operativ. Publizierte Kostenschätzungen nennen Endlagerkosten von 10-30 USD pro Tonne. Sie können nicht als Massstab dienen, solange die Akteure die Preise konsequent geheim halten.

Zu bedenken ist: Wird abgeschiedenes CO_2 zur geologischen Endlagerung in ein anderes Land gebracht, so hat dieses - abgesehen von kleindimensionierten Vorzeigeprojekten in einer Anfangsphase - keinen Anlass, den Prozess zu subventionieren. Die Betreiber von Endlagerstätten im Ausland werden Vollkosten zuzüglich einer Gewinnmarge in Rechnung stellen, welche der faktischen Monopolstellung entspricht und auch das Opfer abgilt, das die Betreiber und ihre Länder durch die Übernahme fremder Laststoffe auf sich nehmen. Denn gegen die inländische terrestrische Abspeicherung von CO_2 wehrt sich die ansässige Bevölkerung wohl überall mit ähnlicher Heftigkeit wie gegen die Endlagerung von Atommüll[64].

Rechnet man beim CCS-Verfahren zu den Abscheidungs- und Transportkosten von insgesamt 200-300 USD Endlagerungskosten in einer ähnlichen Grössenordnung dazu, so resultiert ein Betrag, der den aktuellen Emissionszertifikatepreis von etwa 100 USD pro Tonne weit übersteigt. Ein Absenkungspreis von 500 USD und mehr müsste die Volkswirtschaften von Ländern, die sich die CO_2-Entsorgung zum Ziel setzen sollten, schwer belasten und ihre internationale Konkurrenzfähigkeit schwächen. Umso weniger wird ein solcher Preis von Ländern mit geringeren finanziellen Mitteln bezahlt, erst recht nicht von Ländern, die dem Klimaschutz eine niedrige Priorität geben.

Neben den finanziellen Hürden fällt der grosse energetische Aufwand erschwerend in Betracht. Damit CCS und DACCS einen Sinn haben, müssen alle Schritte überwiegend mit erneuerbarer Energie betrieben werden. Dazu wären Wasser-, Solar- und Windkraftwerke und erneuerbare Ausgleichsenergie in grossem Umfang erforderlich, die es heute nicht gibt und die demzufolge zusätzlich aufgebaut, finanziert und unterhalten werden müssten.[65]

Dänemark exportiert Örsted CO_2 aus den Biomasse-Heizkraftwerken Avedöre und Asnaes/Kalundborg rund 0,43 Mio. t biogenes CO_2 pro Jahr in den norwegischen Teil der Nordsee, ab 2027. Aus den *Niederlanden* liefert Yara aus der Ammoniakfabrik in Sluiskil vertraglich bis zu 0,8 Mio. t/Jahr an Northern Lights. Northern Lights speichert CO_2 aus *Norwegen* selbst: aus der Zementfabrik Heidelberg Materials in Brevik und aus der Kehrichtverbrennung Hafslund Celsio in Oslo. Für diese beiden norwegischen Quellen sind insgesamt 0,8 Mio. t/Jahr reserviert. Seit 2025 erfolgt dort die Injektion; im laufenden Anfangsbetrieb wurden etwa 1'000 t/Tag genannt, also rund 0,37 Mio. t/Jahr, falls dieses Tempo ganzjährig erreicht würde. Aus *Finnland* gibt es keinen öffentlich bekannten verbindlichen Liefervertrag mit einer bestimmten dänischen oder norwegischen Lagerstätte. Vantaan Energia plant jedoch, aus der Kehrichtverwertung in Vantaa insgesamt etwa 0,66 Mio. t CO_2/Jahr abzuscheiden und nach Verflüssigung über Helsinki per Schiff in dänische oder norwegische Nordsee-Speicher zu bringen. Die Inbetriebnahme ist frühestens um 2030, nach aktueller Planung spätestens 2032 vorgesehen. In *dänischen Nordsee-Speichern* ist wichtigste laufende Projekt Greensand von INEOS, Harbour Energy und dem dänischen Staatsfonds Nordsöfonden. Seine erste kommerzielle Stufe kann bis zu 0,4 Mio. t/Jahr aufnehmen; später werden 4-8 Mio. t/Jahr angestrebt. Tatsächlich demonstriert wurde in Dänemark bereits 2023 der Transport einer kleinen Pilotmenge von INEOS Oxide in Antwerpen (Belgien) zum erschöpften Ölfeld Nini West. Eine regelmässige Jahresmenge wurde dafür nicht veröffentlicht.

64 Es gibt starke Gründe, bei schweizerischen Onshore-Speichern mit erheblichem lokalem Widerstand zu rechnen - besonders dann, wenn das Projekt als Entsorgung fremder Industrieabfälle wahrgenommen wird. Empirische Beispiele gibt es bereits: Onshore-CCS-Projekte in Deutschland und den Niederlanden wurden wegen lokaler Opposition aufgegeben.

65 Die im Auftrag des BAFU durch BAK Economics AG, Basel, in Zusammenarbeit mit dena Deutsche Energieagentur, Berlin, im Jahr 2023 erstellte Studie *«Carbon Capture & Storage (CCS): Kostenschätzung für ein CCS-System für die Schweiz bis 2050»*, ging vom Vorhandensein kostengünstiger erneuerbarer Energie für den gesamten Absenkungspfad aus, ferner von der Annahme eines kostengünstigen Pipeline-Transports und von einem sehr geringen ausländischen Endlagerungspreis. Die Studie stützte sich bezüglich des Endlagerungspreises auf einen Bericht von 2011 der *zeroemissionplatform.eu*, wo für Offshore-Endlagerung in erschöpften Öl- und Gasförderfeldern ein Preis von 9,9 Euros pro Tonne CO_2 angenommen wurde (S. 27). Die BAK-Studie erwähnte auch eine neure Publikation der Danish Enery Agency von 2021, die Kosten von 20-40 Euros schätzte, dispensierte

Hinzu kommt der Umstand, dass CO_2 nur etwa vier Fünftel der Klimabelastung verursacht. Der letzte Fünftel stammt von den anderen Treibhausgasen, deren Abscheidung wegen ihrer geringeren Konzentrationen in der Atmosphäre nochmals viel teurer wäre oder überhaupt unmöglich ist. Sollen zur Erreichung des Netto-Null-Ziels zusätzliche CO_2-Mengen mit dem DACCS-Verfahren aus der freien Atmosphäre abgeschieden und entsorgt werden, so müsste dies die Erreichung von netto null zusätzlich verteuern.

Die genannten Kosten der CO_2-Absenkung sind mindestens für das CCS-Verfahren in ihren Grössenordnungen überblickbar: einige 100 USD pro Tonne. Das ist teuer. Allzu teuer. Aus der Sicht von Ländern, die Zugang zu aufnahmefähigen Meeresböden haben, wozu in Europa alle Anrainerstaaten der Nord- und Ostsee gehören, ergibt sich, dass mit der Endlagerung von CO_2 kein Geschäft zu machen ist. Würden Unternehmen solcher Länder die Entgegennahme und Endlagerung von CO_2 zu Preisen anbieten, welche die Vollkosten und eine Gewinnspanne der Betreiber abdecken, so gäbe es keine Nachfrage.

Folglich gibt es auch kein Angebot.

3. Fehlendes Eigeninteresse

Etwas Weiteres fällt in Betracht. Für die Abscheidung und Absenkung von CO_2 fehlen privatwirtschaftliche Anreize. Wer aus seinen Kaminen CO_2 abscheidet und in tiefen Gesteinsschichten endlagern lässt, erhält als Gegenleistung keinen Mehrwert, auch keine bessere Luftqualität in der eigenen Umgebung, sondern hat nur Kosten. Der Mehrwert kommt der ganzen Menschheit zugut. Wer nicht von Klimaschutzambitionen besessen ist geradezu im Geld schwimmt, möchte wohl kein Geld für CCS ausgeben. Solange kein rechtlicher Zwang besteht, tut es kaum jemand. Eine CCS-Kette müsste deshalb, gleich wie die Kehrichtverbrennung, als *Service public* aufgezogen und im Wesentlichen aus öffentlichen Mitteln finanziert werden.

Erst recht gilt dies für DACCS. Während sich ein Betreiber von CCS gemäss dem umweltrechtlichen Verursacherprinzip in der Pflicht fühlen mag, seine *eigenen* Emissionen unschädlich zu machen, entlastet DACCS die Atmosphäre von *fremden* Emissionen, nämlich von solchen der ganzen Menschheit. Aus der Sicht eines einzelnen Landes ist nicht begründbar, Steuergelder auszugeben, um die Atmosphäre von einigen Megatonnen CO_2 zu entlasten, während andere Länder weiterhin rücksichtlos Gigatonnen freisetzen.

Aus all diesen Gründen sind die CCS- und DACCS-Verfahren jener Kategorie von besonders schmerzhaften Klimaschutzmassnahmen zuzuordnen, die für die Erreichung von Netto Null zwar unumgänglich sind, die aber in keinem Land in klimarelevantem Umfang betrieben werden. Damit entsteht der Eindruck, dass alles Explorieren und alle Suche nach billigen Absenkungslösungen blosse Vorwände sind, um das kollektive Nichtstun zu rechtfertigen und den Tag der Wahrheit hinauszuzögern, der Wahrheit nämlich, dass die hohen Kosten der CCS-Absenkung aus physikalischen und kommerziellen Gründen durch keine technologische Innovation weggezaubert werden können und dass die CO_2-Absenkung angesichts ihres hohen Preises politisch untragbar ist.

---

sich aber von einer kritischen Hinterfragung dieser divergierenden Unterlagen mit der pauschalen Schlussfolgerung, die Endlagerungskosten hätten jedenfalls nur *"einen insgesamt geringen Effekt auf die Gesamtkosten"* von CCS. Aufgrund dieser Annahmen gelang es, die Gesamtkosten von CCS in der Schweiz für jährlich 7 Mio. t CO_2 im Zeitraum 2028-2050 auf ca. 100 CHF pro Tonne CO_2 und damit etwa auf das Niveau des CO_2-Zertifikatspreises von 2023 herunterzurechnen. Bezüglich des Endlagerungspreises glich die Studie dem Angebot eines Reiseveranstalters, der die Kosten der Bahnfahrten gemäss akademischen Schätzungen angibt und ausser Acht lässt, dass keine Züge fahren.

III. Perspektiven

A. Wie geht es weiter?

Aus dem Gesagten ergibt sich die Unwahrscheinlichkeit, dass die Menschheit künftig das Ziel von netto null Emissionen erreicht. Das Einzige, was klimaambitionierte Länder und klimabesorgte Menschen tun können, sind Massnahmen, die einen Beitrag zur *Verlangsamung* der Klimaerwärmung leisten. Solche Beiträge sind sinnvoll, auch wenn sie das Klima nicht retten.

B. Konsequenzen

Zusätzlich zum staatlich geförderten Klimaschutz kann jede Privatperson im Rahmen ihrer Möglichkeiten das Ihrige zum Klimaschutz beitragen, und zwar *hier und jetzt* sowie *in den kommenden Tagen und Jahren, ohne zeitliche Begrenzung*.

Der individuelle Beitrag umfasst die Begrenzung der *direkten* Emissionen, vor allem durch Raumheizung und -kühlung, ferner die Mobilität. Er umfasst zudem die Begrenzung der *indirekten* Emissionen durch Zurückhaltung beim Konsum emissionsbelasteter Güter und Dienstleistungen.

C. Ideen für klimagerechtes Handeln

1. Einbezug des Konsums

Fast jeder Konsum belastet das Klima. Nahrung, Kleidung, Wohnung, Arbeit und Freizeit erfordern den Gebrauch und Verbrauch von Dingen, deren Herstellung Treibhausgase freisetzt. Ein Teil der Emissionen lässt sich durch Veränderung der Herstellungsprozesse vermeiden, ein Teil nicht. Die Konsumenten haben auf die Herstellungsprozesse kaum einen Einfluss.

Fast alle Ideen zu einem klimafreundlichen Konsum offenbaren den Zielkonflikt: Konsumverzicht vernichtet Arbeitsplätze. Verzicht auf klimabelastende Produkte bedroht die Lebensgrundlagen der Hersteller.

Die Lösung liegt in einem Kompromiss. Einschränkungen des Konsums sind angebracht und verkraftbar bezüglich besonders schwer belasteter Güter und Dienstleistungen. Der moderne Mensch ist aber nicht verpflichtet und in der Regel auch nicht bereit, Konsum und Komfort drastisch einzuschränken.

2. Behörden

Auch Politiker und Behörden in demokratischen Ländern befinden sich in einem Zielkonflikt. Die Bevölkerung schätzt Fördergelder und Gewissensberuhigung, nicht jedoch preistreibende Lenkungsabgaben, amtliche Schwarzmalerei und bevormundende Ermahnungen. Politiker machen sich unbeliebt, wenn sie Massnahmen verantworten, die die Bevölkerung belasten, und wenn sie Dinge predigen, die die Bevölkerung nicht hören will. Die hier aufgezeigten Handlungsmöglichkeiten sind deshalb als Gedankenspiele zu verstehen, was Politiker und Behörden tun könnten, wenn ihnen der Klimaschutz wichtiger wäre als die Wählergunst.

Behörden können den Klimaschutz voranbringen, indem sie das *Klimagewissen* der Bevölkerung nicht beruhigen und einschläfern, sondern wecken und wachhalten. Durch regelmässige, nicht übersehbare Klimakommunikation können sie der Bevölkerung bewusst machen, wo und in welchem Umfang Privatpersonen Emissionen direkt und indirekt verursachen und wie sie diese begrenzen können.

Dazu gehört vorweg die Information, dass der Staat *"netto null" nicht gewährleisten kann* und dass es deshalb auch auf die Anstrengungen der Privaten ankommt, heute, morgen und künftig.

Zur Klimakommunikation gehört die Vermittlung der *Sinnhaftigkeit* solcher Anstrengungen. Es braucht eine leicht fassliche und überzeugende Antwort auf die naheliegenden Fragen von Konsumenten *"Warum soll ich mich einschränken, wenn andere es nicht tun und ein Vielfaches von meinen Emissionen in die Luft lassen? Warum soll ich mich einschränken, wenn der Klimawandel ohnehin nicht zu verhindern ist?"* - Die Antwort könnte lauten: *Jede vermiedene und verhinderte Emission bremst den Klimawandel, zwar nur minim und unmerklich, aber immerhin. Deshalb handelt gut und richtig, wer Emissionen mindestens dort vermeidet und verhindert, wo es mit geringem Aufwand und geringen Einschränkungen möglich ist.*

Durch geeignete Vorschriften kann der Staat veranlassen, dass die Konsumenten auf die Emissionen periodisch hingewiesen werden: Die *Strom-, Gas- und Fernwärmelieferanten* können verpflichtet werden, bei der Rechnungsstellung neben den Wärmeeinheiten auch die entsprechenden CO_2-Äquivalente auszuweisen.

Kehrichtverbrennungsanstalten können verpflichtet werden, ihren Nutzern periodisch die Menge der freigesetzten Treibhausgase insgesamt und je Kilogramm Haushaltkehricht mitzuteilen, und dies nicht nur im kleingedruckten Teil von Jahresberichten, sondern in einfach verständlichen Kundeninformationen für jeden Haushalt - verbunden mit der Ermahnung, die Abfallmengen klein zu halten.

Flugscham kann geweckt und wachgehalten werden durch periodische öffentliche Kommunikation der Emissionen pro Passagierkilometer, verbunden mit der leichtfasslichen Information *"Fliegen schadet dem Klima"*. Nach dem Vorbild der Anti-Raucher-Kampagne - "Rauchen schadet der Gesundheit" - die den Tabakkonsum nachweislich gedämpft hat, dürfte auch eine Anti-Flugreisen-Kampagne Wirkung zeitigen.[66]

Lebensmittelgeschäfte können verpflichtet werden, in den Läden auf den Konsumfussabdruck besonders klimabelastender Waren hinzuweisen: Rind- und Lammfleisch sowie alle mit Luftfracht importierten Produkte.

Stromlieferanten können verpflichtet werden, den Bezügern von Ökostrom auf den Stromrechnungen den durchschnittlichen Produktionsmix des Netzstroms bekanntzugeben und offenzulegen, welchen Zwecken der für den Ökostrom bezahlte Aufpreis zugutekommt - verbunden mit der Ermahnung, den Stromkonsum gering zu halten.

Öffentliche Aufrufe, *Gebrauchsgegenstände, Geräte und Fahrzeuge so lange zu nutzen*, bis sie nicht mehr reparabel sind, könnten bezüglich Computer ergänzt werden durch Hinweise auf Softwareprodukte, die nicht durch unnötige Erweiterungs-Updates den vorzeitigen Ersatz von Hardware wegen funktionaler Obsoleszenz erzwingen[67].

Bei *öffentlichen Bauvorhaben* kann verlangt werden, dass den Entscheidungsträgern zusätzlich zum Finanzbudget stets auch ein *Emissionsbudget* vorgelegt wird, und dass über Budgetabweichungen während der Bauarbeiten periodisch berichtet wird. Die Entscheidungsträger müssen in die Lage

---

66 In der Schweiz wurde die Revision des CO_2-Gesetzes, die eine Flugticketabgabe von 30-120 CHF einführen wollte, vom Stimmvolk am 13.06.2021 abgelehnt. Das Parlament hat daraufhin am 15.03.2024 eine mildere Revision verabschiedet, die auf die Flugticketabgabe verzichtet und stattdessen eine milde Bio-Beimischpflicht zum Flugtreibstoff sowie die Offenlegung der Flugemissionen in Flugangeboten verlangt. Keine dieser Massnahmen bringt das sozialethische Unwerturteil gegenüber verzichtbaren privaten Flügen so zum Ausdruck, wie es die öffentliche behördliche Mahnung "Fliegen schadet dem Klima" täte.

67 Beispielsweise langlebige Linux-Systeme, freie Anwendungssoftware und speziell ausgewiesene Langzeitversionen. - Die EU beginnt, Gegensteuer zu geben. Die Richtlinie 2024/825 gegen unlautere Geschäftspraktiken erfasst unter anderem ausdrücklich: das Verschweigen, dass ein Softwareupdate die Funktion eines Gerätes negativ beeinflusst; die Darstellung eines Updates als notwendig, obwohl es lediglich zusätzliche Funktionen bringt; irreführende Angaben über Lebensdauer oder Reparierbarkeit; bestimmte andere Geschäftspraktiken, die eine vorzeitige Ersetzung fördern. Die Richtlinie gilt seit ab 27. September 2026. Die Schweiz ist noch nicht so weit.

versetzt werden, Projekte nicht nur aus finanziellen, sondern auch aus Gründen des Klimaschutzes zu kürzen oder zu streichen.

Öffentlicher Verkehr: Der Klimaschutz verlangt nicht, dass möglichst viel öffentlicher Verkehr stattfindet, sondern dass *möglichst wenig motorisierter Verkehr* stattfindet und dass er, soweit er nicht vermeidbar ist, zu einem möglichst hohen Anteil durch klimagünstige öffentliche Transportmittel abgedeckt wird. Öffentliche Verkehrsunternehmen können demgemäss veranlasst werden, durch ihre Tarifgestaltung die Nutzergewohnheiten so zu steuern, dass das Verkehrsaufkommen in Grenzen gehalten wird. Nach dem Vorbild der Fluggesellschaften können die Preise zu Stosszeiten angehoben, zu Flautezeiten reduziert werden. Klimaschädlich sind General- und Streckenabonnemente, die beliebig viele Fahrten zu einem pauschalen Festpreis erlauben; denn sie schaffen einen Anreiz, den bezahlten Preis auszunützen und möglichst viel zu fahren. Jede einzelne Fahrt sollte Geld kosten. Klimaschädlich sind auch Vergünstigungen für Pendler; denn die Tarife sollen einen Anreiz schaffen, Arbeits- und Wohnort nahe beieinander zu wählen. Insgesamt sollen die Tarife so niedrig sein, dass sie Automobilisten einen Anreiz geben, auf den öffentlichen Verkehr umzusteigen.

3. Privatpersonen

Privatpersonen gestalten ihr Leben am ehesten dann klimagerecht, wenn sie sich der Grössenordnung ihrer direkt und indirekt verursachten Emissionen bewusst sind. Ausgangspunkt ist der Fussabdruck. Er ist in der Schweiz mit jährlich rund 14 Tonnen CO_2eq im internationalen Vergleich besonders hoch. Das EU-Mittel liegt bei 10 Tonnen. In Anlehnung an eine BAFU-Sensitivitätsrechnung kann folgende geschätzte Zusammensetzung des Fussabdrucks einer durchschnittlichen Privatperson in der Schweiz als Orientierungshilfe dienen:

- Wohnen (Heizung, Warmwasser, Strom, Möbel, Geräte) 25% (=3,5 t CO_2)
- Mobilität (Auto, Flüge, öV) 20% (=2,8 t CO_2)
- Ernährung: 15% (=2,1 t CO_2)
- Kleidung, Gesundheit, Freizeit: 40% (=5,6 t CO_2)

Total 100% (=14 t)

Wer sich bemüht, Einsparungen zu erzielen, hat bezüglich des *Wohnens* die grösste Wirkung bei der *Beschränkung seines Wohnraums*. Hausbesitzer, deren Familien sich verkleinert haben, dienen dem Klima, wenn sie ihre Häuser vermieten oder verkaufen und in kleinere Wohnungen umziehen.

Wesentliche Einsparungen sind auch zu erzielen bei der *Heizung*. Sie macht etwa zwei Drittel aller Wohn-Emissionen aus. Wärmedämmung des Gebäudes und klimaeffiziente Temperaturregelung können bedeutende Einsparungen bewirken, sind aber bei Altbauten oft nicht machbar. Auch liegen sie ausserhalb des Einflussbereichs von Mietern und werden durch Mieterschutzgesetze zuweilen verhindert, indem die Eigentümer die Renovationskosten nicht rentabilisieren können. Sind bauliche Massnahmen nicht möglich, so können Emissionen immerhin durch Verminderung der Raumtemperatur eingespart werden[68].

Bei der *Mobilität* gilt (in runden Durchschnittszahlen): Fahrten im *Privatauto* setzen pro Liter Treibstoff etwa 2,5 kg CO_2eq frei. Fahrten in *öffentlichen Verkehrsmitteln* verursachen auch bei geringer Auslastung der Züge und Busse nur einen Drittel oder weniger je Passagierkilometer. *Flüge* verursachen bei Kurzstrecken je 1000 Passagierkilometer (Economy) 150 kg CO_2, bei langen Strecken 100 kg, und zusätzliche Klimabelastungen in etwa gleichem Umfang durch die Erwärmungswirkung von Stickoxiden, Wasserdampf, Russpartikeln und langlebigen Kondensstreifen-Zirren. Wer einen Flug der 1. Klasse bucht, verursacht wegen der geringeren

[68] Bei einer Verminderung um 1 Grad und einer Differenz zur Aussentemperatur von 10 Grad wird 1/10 der Heizenergie und der Emissionen eingespart, bei einer Differenz von 15 Grad 1/15, über den ganzen Winter gerechnet also etwa 0,3-0,4 t. (In Mehrpersonenhaushalten sind die Heizkosten pro Kopf geringer).

Passagierdichte je etwa das Vierfache, in Private Jets ein weiteres Vielfaches der genannten Emissionen.

Ferienkreuzfahrten verursachen auf grossen Schiffen ca. 200 kg CO_2eq pro Tag und Passagier, auf kleinen Schiffen mehr.

Luftfracht verursacht pro Kilogramm transportiertes Gewicht und 1000 km Strecke etwa 1 kg CO_2 und die gleiche Menge CO_2eq durch die erwähnten zusätzlichen Klimabelastungen.

Bei der *Ernährung* gilt: *Früchte, Gemüse und Kartoffeln* haben pro Kilogramm Ware Fussabdrücke von rund 1/2 kg CO_2eq und weniger. Das trifft auch zu für Importware, wenn sie mit Schiff- und Landtransport ankommt. Bei *Luftfracht*, z.B. bei Beeren, Spargeln und Frischfleisch aus Übersee, kommen zu den Produktions-Emissionen diejenigen des Transports dazu, also für 1 kg frische Beeren aus Peru (8000 km Lufttransport in die Schweiz) 1/2 kg Produktionsemissionen und 8 kg Transportemissionen.

Kohlenhydrate wie Brot, Mehl, Zucker aus Zuckerrüben haben durchschnittlich Fussabdrücke von etwa 1 kg CO_2eq pro Kilogramm Ware, Eierteigwaren 2 kg, Zucker aus Zuckerrohr 3 kg.

Die *tierischen Proteine* haben grössere Fussabdrücke: *Eier, Fisch* und *Geflügel* etwa 5 kg CO_2eq pro kg Ware, *Schweinefleisch* 10 kg, *Lammfleisch* 20 kg und *Rindfleisch* 50 kg (die Zahlen sind Mittelwerte grosser Bandbreiten, weil die Emissionen je nach Produktionsweise stark variieren). Lamm und Rind verursachen hohe Emissionen wegen der Freisetzung von Methan beim Wiederkäuen.

Unter den *Getränken* ist Leitungswasser praktisch emissionsfrei. Die verschiedenen *Mineralwässer* liegen unter 0,1 kg pro Liter; sie sind zusätzlich mit den (meist unbedeutenden) Fussabdrücken der Behältnisse belastet. *Fruchtsäfte* und *Filterkaffee* liegen bei ca. 0,5 kg pro Liter, *Kuhmilch* und *Bier* je etwa bei 1 kg pro Liter, *Kakao als Milchgetränk* bei 1,5 kg pro Liter, *Wein* bei 2 kg. - Entsprechend dem verhältnismässig hohen Fussabdruck von Kuhmilch haben auch die weiteren Milchprodukte hohe Fussabdrücke (Joghurt 2 kg, Hartkäse 6 kg CO_2eq pro Kilogramm Ware).

Tiefkühlprodukte sind mit zusätzlichen Treibhausgasemissionen belastet; ein einheitlicher Zuschlag pro Kilogramm Lebensmittel lässt sich nicht angeben. Entscheidend sind die Dauer der Lagerung, die Effizienz der Kühlanlagen und der verwendete Strom. 0,5 kg CO_2eq oder weniger pro Kilogramm Ware im Lebensmittelgeschäft mag als Orientierung dienen. Die zusätzliche Belastung durch den eigenen Tiefkühler lässt sich anhand seines Stromverbrauchs abschätzen.[69]

Für die *Kleidung* gilt (als Mittelwerte grosser Bandbreiten, je pro Kilogramm Ware): *Kunststoffgewebe* 10 kg, *Leder* 30 kg, *Wollgewebe* 40 kg CO_2eq.

Zum klimafreundlichen Verhalten gehört die möglichst *lange Nutzung* von Kleidern, Fahrzeugen und Geräten und ein entsprechend seltener Ersatz durch neue Produkte. Die Herstellung neuer Geräte setzt etwa folgende Mengen von CO_2eq frei (Mittelwerte von grossen Bandbreiten):

- Smartphone: 50 kg
- Tablet: 90 kg
- Laptop: 200 kg
- grosser Fernseher oder PC: 400 kg
- Lithium-Ionen-Akku: 100 kg je kWh Kapazität
- Verbrenner-PKW: 10 t
- E-PKW einschliesslich Akku: 12 t

---

69 Als Rechenbeispiel: Eine Tiefkühltruhe, die jährlich 200 kWh verbraucht und durchschnittlich mit 40 kg Lebensmitteln gefüllt ist, verbraucht pro kg während eines Monats 0,42 kWh Strom; bei reinem Erdgas-Strom entspricht dies rund 200 g CO_2eq, bei einem günstigeren Strommix weniger.

Wer sein *Verbrenner-Auto* durch ein E-Auto ersetzt, hilft dem Klima nur, wenn eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sind. Dazu gehört, dass der Produktionsmix seines Ladestroms überwiegend aus erneuerbaren Primärenergien besteht, ferner dass das Altfahrzeug nicht mehr reparierbar ist und dass die Fahrgewohnheiten eine Nutzung des E-Fahrzeugs während mehr als 100'000 km erwarten lassen. Sind Verbrenner-PKWs nicht schrottreif, so werden sie in der Regel in Entwicklungsländer exportiert[70]. Dort werden meist die Filter ausgebaut und die Fahrzeuge als klimabelastende Dreckschleudern bis zur Schrottreife weitergefahren.

Für Menschen, die nicht in asketischer Entsagung leben und dennoch ihren Fussabdruck gering halten möchten, reduziert sich die Verhaltensmaxime auf eine bescheidene Inanspruchnahme von Wohnraum, niedrige Heizwärme im Winter, Zurückhaltung bei Flugreisen, Zurückhaltung bei Ferienkreuzfahrten und Autofahrten zu privaten Zwecken, Masshalten beim Konsum von Rind- und Lammfleisch, Verzicht auf lufttransportierte Lebensmittel - und schliesslich: langjährige Treue zu reparierbaren funktionsfähigen Geräten und Fahrzeugen.

D. Fazit

Der Klimaschutz ist von drei Seiten her behindert: Die Industrie erträgt nur Belastungen, die ihre internationale Konkurrenzfähigkeit nicht schwächen; der private Konsum erträgt nur geringfügige Einschränkungen, die den gewohnten Lebensstandard nicht beeinträchtigen; die Staaten ertragen finanzielle Belastungen nur im Rahmen ihrer anderweitigen politischen Prioritäten, was die teure Absenkung von CO_2 in grossen Mengen ausschliesst. So ist denn die globale Klimaneutralität vorbehältlich eines technischen Wunders oder einer humanitären Katastrophe bis auf Weiteres nicht zu erhoffen.

Was den ambitionierten Ländern und den klimabesorgten Privatpersonen verbleibt, ist, wie schon gesagt, Energie sparen und den Konsum einschränken: auf klimabelastende Tätigkeiten, Güter und Dienstleistungen verzichten, so weit die individuelle Opferbereitschaft reicht, hier und jetzt, Tag für Tag und Jahr für Jahr, ohne auf eine rettende Wende der Klimaentwicklung zu warten. Wenn die Wende eines Tages kommt, dann umso besser. Aber bis auf Weiteres darf darauf nicht vertraut werden.

---

70 Aus der EU werden jährlich über 300'000 Verbrenner-Gebrauchtwagen nach Afrika exportiert. Auch viele Gebrauchtwagen aus der Schweiz gelangen vermutlich nach Afrika und werden dort jahrelang weitergefahren. Jedoch fehlt eine amtliche Statistik. Klimaschützende Exportverbote für Gebrauchtwagen scheinen weder in der EU noch in der Schweiz politisch tragbar zu sein.