



# Klimaneutral gut leben

---

*[www.klima-retten.info](http://www.klima-retten.info): [gutes Leben ohne CO2](#)*

*Statt uns in Details zu verzetteln, müssen wir mit **wirksamen CO2-Preisen** ein Instrument einführen, das sicher stellt, dass wir unsere **Reduktionsziele kosteneffizient** und mit **innovativen Lösungen** sicher einhalten.*

---

Eigentlich sagen wir, dass man sich um die konkreten Technologien oder Lebensweisen ohne CO2 gar nicht so intensiv zu kümmern braucht, wenn die Preise die ökologische Wahrheit sagen. Klimaschutz rechnet sich dann privatwirtschaftlich und auch die öffentlichen Investitionen werden in die richtige Richtung fließen, weil dann der entsprechende politische Druck da ist.

Aber uns Menschen fällt es nun einmal schwer, einfach einen Großteil der Verantwortung an Marktmechanismen abzugeben; ohne ungefähr zu wissen, wo die Reise dann hingeht. Wie sieht mein Leben in 10, 20 oder 30 Jahren aus? Deshalb sollen hier stichpunktartig **Szenarien** entworfen werden, die verdeutlichen, dass ein **gutes klimaneutrales Leben möglich** ist. Aber bitte kein Missverständnis: Hier soll nur das breite Spektrum an Technologien und Lebensstilen aufgezeigt werden. Am grünen Tisch ist eine Entscheidung über kosteneffiziente Lösungen nicht möglich. Auch fehlen in den Szenarien Tausende von heute schon bekannten technischen Möglichkeiten und erst recht natürlich die heute noch unbekanntes. Lassen wir die Details Marktmechanismen entscheiden. Aus der Geschichte wissen wir, dass funktionierende Märkte Knappheitsprobleme am besten lösen können. Der Markt versagt an vielen Stellen. Das was er kann, sollte man ihn aber auch machen lassen.

Mit einem **wirksamen CO2-Preis** werden unsere **CO2-Emissionen so sinken, wie wir uns das vornehmen. Alternativen** werden sich nachhaltig und aus **eigener Kraft durchsetzen**. Dies bedeutet jedoch nicht, dass es dann politisch nichts mehr zu entscheiden gibt. Wir müssen dann trotzdem darüber weiter streiten, wie viel Geld wir für die Bahn, den Straßenverkehr oder Radwege ausgeben. Welche Abstände wir bei Windenergieanlagen zur Wohnbebauung haben wollen. Wie lange unsere Planungs- und Genehmigungszeiträume sein dürfen. Etc. pp. Allerdings wird dieser "Streit" mit einem wirksamen CO2-Preis, der dafür sorgt, dass wir unsere Reduktionsziele auf jeden Fall einhalten, vor völlig veränderten Vorzeichen geführt werden. Das ist der entscheidende Punkt. Zur Wahrheit gehört: Kommen wir bei den anderen Randbedingungen nicht auch in die Puschen, dann muss der CO2-Preis höher als nötig steigen, damit wir unsere Ziele einhalten.

# Inhalt

1. Die Energiequellen der Zukunft .....	4
1.1 Erneuerbare Energien .....	4
1.2 Effizienzrevolution .....	4
1.3 Suffizienz .....	5
2. Stromerzeugung.....	7
2.1 Sonne .....	7
2.2 Wind.....	7
2.3 Infrastruktur für Sonne und Wind.....	8
Passende Kraftwerke .....	8
Speicher.....	8
Leitungsausbau .....	9
Zusatzkosten .....	10
2.4 Biomasse .....	10
2.5 Geothermie .....	10
2.6 Wasserkraft.....	10
2.7 CCS .....	11
2.8 Kernenergie.....	11
2.9 Steigerung des Wirkungsgrades.....	11
2.10 Intelligentes Stromnetz (smart grid).....	12
3. Gebäude.....	14
3.1 Warmwasser, Heizung .....	14
3.2 Kühlung .....	15
4. Verkehr.....	16
4.1 Überblick Technologien .....	16
4.2 Individualverkehr .....	16
4.3 Öffentlicher Personenverkehr / Fliegen .....	18
4.4 Gütertransport .....	19
5. Industrie: Energieintensive Prozesse .....	20
6. Alternative Brenn- und Ausgangsstoffe .....	22
6.1 Funktionen .....	22
6.2 Power-to-Gas (PtG) .....	22
6.3 Power-to-Liquid (PtL) .....	23
6.4 Bio-Solarzellen, künstliche Photosynthese oder Umwandlung CO <sub>2</sub> .....	24
6.5 Biogene Brenn- bzw. Kraftstoffe .....	24
7. Kunststoffe .....	26

8. Die anderen Treibhausgase.....	27
9. Negativemissionen.....	28
10. Podcasts .....	29
11. Klimaschutz, was jeder? tun kann.....	30

# 1. Die Energiequellen der Zukunft

Es gibt eigentlich nur drei wesentliche Möglichkeiten, die Emission von CO<sub>2</sub> auf nahezu null zu reduzieren:

- Einsatz erneuerbarer Energien,
- Effizienzsteigerung ('Sparen') und
- Suffizienz ('Verzicht').

Zwei weitere Möglichkeiten seien erwähnt:

- CO<sub>2</sub>-Abscheidung und - Speicherung (CCS) bei der weiteren Nutzung fossiler Brennstoffe - siehe Kapitel: 2.7
- Kernenergie - siehe Kapitel: 2.8

---

*Ein wirksamer CO<sub>2</sub>-Preis sorgt für den optimalen Mix der Möglichkeiten.*

---

## 1.1 Erneuerbare Energien

Erneuerbare Energien sind die Energieträger der Zukunft: Windenergie, solare Strahlung, Wasserkraft, Erdwärme und nachwachsende Rohstoffe als Ersatz für Kohle, Öl und Erdgas.

Es wird auch von erneuerbaren synthetischen Brennstoffen gesprochen, wenn der dazu z.B. notwendige Wasserstoff mit Strom aus erneuerbaren Quellen erzeugt wurde. Mehr dazu in Kapitel 6.

## 1.2 Effizienzrevolution

### Was ist eine Effizienzsteigerung?

Durch den Einsatz produktiverer Technologien wird der Ausstoß von Treibhausgasen bei gleichem Nutzen verringert.

### Mit höherer Effizienz CO<sub>2</sub>-Emissionen senken

Damit ist es auch möglich, den **Anteil erneuerbarer Energien** an der Stromproduktion zu **erhöhen**. Um dies zu verdeutlichen, ein Rechenbeispiel: 2017 hatten wir einen Anteil von ca. 35% erneuerbarer Energien. Senken wir den gesamten Stromverbrauch um zum Beispiel 50% und produzieren lediglich genauso viel Strom aus erneuerbaren Energien wie 2017, liegt ihr Anteil dann schon bei 70%.

Nun sagen Sie wahrscheinlich: **50% weniger Stromverbrauch sei nicht realistisch**. Da unterschätzen Sie jedoch die Findigkeit unserer Ingenieure. Ein Vergleich mit der Arbeitsproduktivität macht dies deutlich: In den letzten Jahrzehnten ist die Arbeitsproduktivität jährlich durchschnittlich um 2,6% gestiegen. Das heißt Jahr für Jahr haben wir aus der gleichen Arbeitsstunde durchschnittlich 2,6% mehr Output herausgeholt. Jetzt werden Sie sagen: **2,6% sind keine 50%**. Da unterschätzen Sie nun den Zinseszinsseffekt: Nach nur **17 Jahren** ist dies eine Gesamtsteigerung der Arbeitsproduktivität um 50%. Also unsere Ingenieure können das. Nur müssen sie in Zukunft eben auch verstärkt die Energieproduktivität steigern. Und was war eine wesentliche Triebkraft für die steigende Arbeitsproduktivität? Erfolgreiche Gewerkschaften. Preise lenken eben!

Da wir in Zukunft wahrscheinlich mehr Strom auch bei Mobilität und Wärme einsetzen, werden wir zwar wohl den Stromverbrauch nicht senken können. Trotzdem gilt: Je mehr wir die Effizienz beim Stromverbrauch erhöhen, desto schneller sinken die CO<sub>2</sub>-Emissionen.

### **Reboundeffekt**

Ohne, dass Preise die ökologische Wahrheit sagen, laufen Effizienzsteigerungen aufgrund des [Reboundeffekts](#) oft ins Leere: Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Gütern und Dienstleistungen sinken zwar; aber dieser Rückgang kann durch einen höheren Gebrauch, höhere Ansprüche oder Verlagerung des Konsums kompensiert werden. Ein Paradebeispiel ist das Auto. Den Ingenieuren ist es gelungen, den spezifischen Verbrauch der Motoren drastisch zu reduzieren. Dies wird aber kompensiert durch schwerere Fahrzeuge, mehr energiefressende Funktionen und eine höhere Fahrleistung. Die Effizienzrevolution wird also erst durch ökologische Preise in die richtige Richtung gestoßen.

Den **kostenoptimalen Mix** zwischen Ausbau der erneuerbaren Energien und Senkung des Energieverbrauchs kann am besten der Markt bestimmen, wenn Preise die ökologische Wahrheit sagen.

### 1.3 Suffizienz

[Suffizienz](#): Wir reduzieren unsere Ansprüche. Das kann man auch als *Verzicht* bezeichnen.

#### **Verzicht darf kein Tabu sein**

Die meisten Politiker suggerieren den Menschen noch, dass alles über Effizienz und Ausbau der erneuerbaren Energien regelbar ist - vielleicht sogar ohne viel Mehrkosten. Die Herausforderung ist jedoch so gewaltig, dass es ohne Suffizienz vermutlich nicht gehen wird. Arbeiten wir mit einem wirksamen CO<sub>2</sub>-Preis, können wir jedoch das Ausmaß an *Verzicht* minimieren, weil dieser die Effizienz- und Innovationspotenziale voll ausschöpft.

#### **Ist das noch Verzicht oder leben wir nur anders?**

Wichtig ist, dass wir *Verzicht* hauptsächlich im Vergleich zudem wahrnehmen, was sich Menschen in unserem Umfeld "leisten können". Wenn Lebensstile, Infrastruktur und Produkte sich geändert haben, weil Preise die ökologische Wahrheit sagen, leben wir in einem anderen Umfeld und wir nehmen Veränderungen u.U. aus diesem Grund gar nicht als *Verzicht* wahr.

#### **Glücklicher durch Klimaschutz?**

Manche preisen *Verzicht* als Selbstzweck. Das hat aber eigentlich mehr mit der Frage eines *glücklichen Lebens* zu tun als mit Klimaschutz. Dabei gibt es die interessante Variante, dass in den Raum gestellt wird: Wir wüssten einfach nicht, was uns glücklich macht. In einer CO<sub>2</sub>-freien Welt könnten wir sogar glücklicher sein als heute. Autofahren mache zum Beispiel eigentlich gar keinen Spaß und habe auch sonst keine Vorteile. Vegane Ernährung schmeckt eigentlich besser und ist auch nicht komplizierter als Mischernährung. Das mag alles so sein oder aber auch nicht. Der entscheidende Punkt ist: Wir müssen wahrscheinlich weniger Autofahren und weniger Fleisch essen, ob es uns nun glücklicher macht oder nicht.

Mit dem Glück ist es überhaupt so eine Sache: Viele berichten, wie glücklich sie sich fühlen, wenn sie in ihrem privaten Bereich etwas zum Klimaschutz beitragen. Dieses Glück speist sich jedoch zu einem großen Teil daraus, dass man sich damit abheben kann von der Masse - etwas Besonderes macht.

Bei der Dekarbonisierung geht es aber gerade darum, das Besondere zum Gewöhnlichen zu machen. Damit geht aber der Glückskick als Motivation verloren.

#### Wir sagen:

- Ohne eine erfolgreiche Begrenzung des Klimawandels wird es uns wesentlich schlechter gehen als heute. Dann werden wir wirklich haarigen *Verzicht* erleben.
- Mit einer erfolgreichen Begrenzung des Klimawandels haben wir die Chance, dass wir "glücklicher" sind als heute. Aber das ist eigentlich ein anderes Thema, weil wir Klimaneutralität auch schaffen müssen, falls wir dann "unglücklicher" sind als heute. Kurzfristig könnte es *marketingtechnisch* sinnvoll sein, die Dekarbonisierung als Glücksbringer zu verkaufen. Ob die Rechnung langfristig aufgeht, können und wollen wir hier nicht beurteilen.
- Um den Klimawandel zu begrenzen, werden wir für einiges wohl mehr Geld ausgeben und auf die eine oder andere lieb gewordene Gewohnheit *ändern* müssen. Sonst hätten wir ja kein Problem.
- Nutzen wir die richtigen Instrumente, können wir den notwendigen *Verzicht* und die *Mehrkosten* minimieren, weil die technischen Potenziale zu geringstmöglichen Kosten ausgeschöpft werden. Wenn wir viel Glück haben, ist gar kein Verzicht notwendig bzw. wir empfinden die Veränderungen gar nicht als *Verzicht*.
- Je mehr *Verzicht* nötig sein wird und je höher die *Mehrkosten* sein werden, desto wichtiger wird die soziale Ausgestaltung der Transformation. Ein wichtiger Baustein dazu ist eine Pro-Kopf-Rückverteilung der gesamten Einnahmen aus einer CO<sub>2</sub>-Bepreisung (vollständige Klimadividende).

#### Keine Privatisierung des Klimaschutzes

Die Begrenzung des Klimawandels wird immer noch viel zu oft auf der Ebene individueller Verhaltensänderungen diskutiert: "**Klimaschutz, was jeder tun kann**". Auf dieser Ebene stumpft ein Großteil der Menschen einfach ab, weil sie intuitiv mitnehmen: "Ich soll aufs Autofahren verzichten und mein Nachbar fährt munter weiter. Das mache ich nicht mit. Sollen erst mal die anderen anfangen". Oder man pickt sich eine symbolische umweltbewusste Handlung heraus, um sein Gewissen zu beruhigen und sich gut zu fühlen.

Der menschengemachte Klimawandel ist ein systemisches Problem und braucht eine **systemische Antwort**. Wir brauchen in erster Linie auf gesellschaftlicher Ebene Regeln, die zur Dekarbonisierung führen. Diese Regeln müssen wir Bürger als gerecht empfinden, damit wir sie bei Wahlen auch legitimieren.

## 2. Stromerzeugung

Ungefähr die Hälfte des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes in Industrieländern resultiert heute aus der Stromerzeugung. Zurzeit zeichnet sich zudem ab, dass individuelle Mobilität und auch zunehmend Wärme in Zukunft mehr über Strom abgedeckt wird (Sektorenkopplung). Der Anteil ist damit tendenziell steigend. Daher ist es besonders wichtig, CO<sub>2</sub>-freien Strom zu erzeugen.

### 2.1 Sonne

Das technische Potenzial der Sonneneinstrahlung ist riesig. Die jährliche Sonneneinstrahlung auf die Erde entspricht ungefähr dem 10.000-fachen des weltweiten Primärenergiebedarfs. Theoretisch reicht ein Teil der nordafrikanischen Steinwüsten (ca. die Größe Österreichs), um den weltweiten Stromverbrauch zu decken.

Für die direkte Nutzung der Sonneneinstrahlung zur Stromerzeugung stehen grundsätzlich zwei Wege zur Verfügung:

1. Photovoltaik
2. Solarthermische Anlagen

Bei solarthermischen Anlagen zur Stromerzeugung gibt es wieder zwei Möglichkeiten:

1. Über Spiegel wird die Sonneneinstrahlung auf einen Punkt in einem Turm konzentriert und dort eine Flüssigkeit zum Verdampfen gebracht.
2. Über Parabolrinnen wird ein Trägermittel erhitzt, mit dessen Hilfe wieder Dampf erzeugt wird. Dieser Dampf treibt dann wieder eine Turbine an, wie wir es auch aus den konventionellen Kraftwerken kennen.

Diese Anlagen sind natürlich besonders sinnvoll in sonnenreichen Gegenden. Von dort könnte der Strom mit Hochspannungs-Gleichstrom-Leitungen mit vertretbaren Verlusten zu uns transportiert werden. Über Elektrolyse kann mit dem Wüstenstrom auch Wasserstoff hergestellt werden, der dann in die Industrieländer über Pipelines oder mit Tankschiffen transportiert wird. Eine Wasserstoffwirtschaft könnte prinzipiell fossile Brennstoffe ersetzen.

### 2.2 Wind

Theoretisch könnten wir unseren gesamten derzeitigen Strombedarf auch durch Windenergie decken – durch Windräder auf dem Meer (Off-Shore) und auf dem Land (On-Shore). **On-Shore** Windstrom ist zurzeit an guten Standorten und mit hohen Windrädern die **kostengünstigste erneuerbare Energiequelle**.

Durch **Repowering**, also Ersatz alter Anlagen durch höhere und leistungsfähigere Windturbinen, können wir Flächen sparen.

Warum hohe Windräder? Die doppelte Windgeschwindigkeit bedeutet achtfache Energieerzeugung. Nach einer Faustregel nimmt der Ertrag je m Nabenhöhe um 1% zu.

Hier eine interessante Radiosendung vom 12.03.2020 zum Thema: [Windkraft - Windenergie im Gegenwind](#). *Die Windenergie soll zu einem zentralen Baustein der Energiewende werden. Doch der Ausbau ist ins Stocken geraten. Lässt sich Windkraft mit dem Artenschutz und dem Bedürfnis nach Ruhe in Einklang bringen?* [mp3](#)

"Not in my backyard" ist eine problematische Haltung. Für müssen wieder lernen für das Gemeinwohl auch vertretbare persönliche Einschränkungen hinnehmen zu müssen.

Neben Windrädern wären z.B. auch Flugdrachen denkbar, die in hohen Höhen den dort stetiger und stärker wehenden Wind ausbeuten können. Dabei kann der Drache entweder selbst Propeller besitzen oder durch die Zugkraft des Halteseils wird Strom erzeugt.

### 2.3 Infrastruktur für Sonne und Wind

Dunkelflaute: Wenn die Sonne nicht scheint und der Wind nicht weht ... oder zu viel Sonne scheint und zu viel Wind weht ...

Bei einem hohen Anteil von Wind- und Sonnenstrom brauchen wir eine spezifische Infrastruktur, um die Versorgungssicherheit weiter zu gewährleisten: Passende Kraftwerke, Speicher, Regelenergie und Leitungen.

#### Passende Kraftwerke

Sonne und Wind brauchen schnell regelbare Kraftwerke als Ergänzung, wie Gaskraftwerke (Erdgas und später Wasserstoff), Biogasanlagen (durch Gasspeicher ist eine Pufferung möglich) oder [virtuelle Kraftwerke](#) (auch Kombi- oder Schwammkraftwerk genannt, die (dezentrale) Erzeugungsanlagen, Speicher und abschaltbare Lasten bündeln).

Anmerkung: Gerade wenn in den kommenden Jahren viele Photovoltaikanlagen aus den garantierten Einspeisevergütungen herausfallen, könnten u.U. virtuelle Kraftwerksbetreiber attraktive Angebote machen.

#### Speicher

Für die Speicherung bzw. sinnvolle Verwendung **überschüssigen** Stroms aus erneuerbaren Energien (z.B. Windkraft in der Nacht oder Sonnenstrom am Mittag) werden folgende Möglichkeiten diskutiert:

##### Wasserstoff

Eine Möglichkeit ist über **Elektrolyse Wasserstoff** zu erzeugen und diesen zu speichern und bei Bedarf über Brennstoffzellen wieder Strom zu erzeugen.

Unter dem Begriff **Power-to-Gas** (bei Windenergie auch Windgas genannt) wird diskutiert, den Wasserstoff in das bestehende Erdgasnetz einzuspeisen. Bis zu 5% Wasserstoffanteil wären problemlos möglich. Oder man wandelt den Wasserstoff durch Reaktion mit CO<sub>2</sub> in synthetisches Methan (Methanisierung) um und könnte dieses damit ohne Begrenzung in das Erdgasnetz einspeisen. Damit könnte EE-Gas auch als Brennstoff für Gaskraftwerke, KWK-Anlagen, Heizungen oder als Treibstoff für Fahrzeuge verwendet werden. Auch ist es möglich, durch einen weiteren Prozessschritt das EE-Gas zu verflüssigen zu Methanol (**Power-to-Liquid**). Es wird wohl auch eine Infrastruktur mit Wasserstoffpipelines geben, sodass auch der Wasserstoff direkt immer mehr genutzt werden kann. S. a. Kapitel "Alternative Brennstoffe" unten.

Prof. Bernhard Rieger, Inhaber des Wacker-Lehrstuhls für Makromolekulare Chemie der TU München: „Wir können weder so viele Batterien herstellen noch so viele Pumpspeicherkraftwerke bauen, um die zukünftig zu erwartenden Differenzen zwischen Stromproduktion und Stromverbrauch auszugleichen. Der einzige Weg so große Energiemengen zu speichern, führt über die chemische Speicherung.“ ([Link](#) für mehr Informationen).

##### Power-to-Heat

Unter dem Begriff **Power-to-Heat** versteht man die Möglichkeit, mit überschüssigem Strom aus erneuerbaren Quellen Warmwasserspeicher aufzuheizen.



## Andere Speichertechnologien

Eine andere Möglichkeit sind unterirdische **Druckluftspeicher**. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt experimentiert mit **Betonspeichern**. Siemens hat mit Partnern in Hamburg einen [Vulkansteinspeicher](#) gebaut. Im andalusischen La Calahorra, wo das mit 150 Megawatt Gesamtleistung weltgrößte solarthermische Kraftwerk Andasol beheimatet ist, wird mit **Salzspeichern** gearbeitet. In Großbritannien entsteht gerade ein Speicher mit [flüssiger Luft](#).

Aber auch die altmodisch anmutenden **Pumpspeicherkraftwerke** sind eine kostengünstige Möglichkeit. Eine weitere Möglichkeit ist ein **Lageenergiespeicher** (Hubspeicherkraftwerke), dessen Grundkonzept beruht auf dem hydraulischen Anheben einer sehr großen Gesteinsmasse mit Wasserpumpen. Dabei nimmt die Gesteinsmasse potentielle Energie auf und kann diese wieder abgeben, wenn das unter Druck stehende Wasser über eine Turbine wieder abgeleitet wird. Statt Wasserpumpen können auch Kräne eingesetzt werden.

Die genannten Speicher können sich gegenseitig ergänzen, da wichtig ist, für welchen Zeitraum die Speicherung notwendig ist. Man unterscheidet grob, ob es um Primärregelung (Sekunden bis Minuten), Stunden, Tage oder Wochen handelt. Im Sekunden- und Minutenbereich können auch **Batterien** eine wichtige Rolle spielen. Heute müssen Kohlekraftwerke oft weiterlaufen, obwohl eigentlich genug EE-Strom vorhanden ist, der aber fluktuiert. Hier können große Lithium-Ionen- oder Natrium-Schwefel-Batterien helfen. Auch könnte man viele bestehende Notstrombatterien, bei zum Beispiel Telefonnetzanbietern oder auch private Batteriespeicher von Photovoltaikanlagen, zu einer virtuellen Batterie vernetzen. Auch die Batterien von Elektroautos könnten einmal einen riesigen virtuellen Speicher abgeben. Außerdem können die Batterien von E-Autos zur Bereitstellung von Regenergie ein zweites Leben bekommen.

[Super- bzw. Ultrakondensatoren](#) können die Lücke zwischen klassischen Kondensatoren und Batterien füllen.

Diese Speichertechnologien bzw. die Erzeugung von EE-Brennstoffen ist mit Umwandlungsverlusten verbunden. Dies kann sich jedoch trotzdem rechnen, wenn den fossilen Energieträgern ihre vollen ökologischen Kosten zugerechnet werden. Außerdem wird in der Regel überschüssiger EE-Strom verwendet.

Interessante Radiosendungen zum Thema:

- [IQ-Wissenschaft und Forschung.mp3](#): Wie man Sonne und Wind auf Halde legt (22.09.2016)
- [IQ-Wissenschaft und Forschung.mp3](#): Wie Strom speichern? Die große Zukunftsfrage (07.04.2020)

## Leitungsausbau

Durch den Ausbau der erneuerbaren Energien ist es notwendig, neue Leitungen zu bauen oder bestehende zu verstärken. Dies kann örtliche Verteilnetze betreffen, die noch nicht für eine entsprechende dezentrale Einspeisung ausgelegt sind und Übertragungsnetze (z.B. um Offshore-Strom von der Küste zu den großen Verbrauchern ins Ruhrgebiet und in den Süden der Republik zu bringen).

*"Not in my backyard"* ist dabei eine problematische Haltung. Wir müssen wieder lernen, für das Gemeinwohl auch vertretbare persönliche Einschränkungen hinnehmen zu müssen.

## Zusatzkosten

Die Gestehungskosten erneuerbaren Stroms liegen teilweise schon unter denen fossiler Kraftwerke. Die Betrachtung der reinen Gestehungskosten springt jedoch leider zu kurz. Gestehungskosten von z.B. 4 ct für Wind-Onshore bedeuten, dass der Anlagenbetreiber mit diesem Preis bei durchschnittlichen Betriebsstunden zurechtkommen würde.

Die Stromhändler brauchen jedoch eine gesicherte Leistung zu jedem Zeitpunkt. Daher müssen diese nicht nur die 4 ct an einen Windanlagenbetreiber bezahlen, sondern müssen zusätzlich bei Speicherbetreibern zukaufen oder den Strom von [virtuellen Kraftwerken](#) beziehen. Für den Stromhändler ergibt sich also ein Mischpreis, der immer noch höher sein kann, als wenn er seinen gesamten Strom bei einem Kohlekraftwerk einkauft, das prinzipiell immer den benötigten Strom liefern kann. Daher ist es **fraglich**, ob eine Stromerzeugung zu **100%** auf Basis **erneuerbarer Energien** sich so schnell **betriebswirtschaftlich rechnet**, sodass wir unsere Klimaziele einhalten.

Deshalb ist es wichtig, den fossilen Brennstoffen vom Grunde her ihre vollen volkswirtschaftlichen Kosten zuzurechnen - auch die Klimafolgekosten - damit die erneuerbaren Energien und die dazu notwendige Infrastruktur sich schnell durchsetzen und sich aus eigener Kraft auf dem Markt rechnen. In der Praxis bedeutet dies: Wir brauchen CO<sub>2</sub>-Preise im gesamten Dekarbonisierungsprozess in der Höhe, sodass wir jeweils unsere Reduktionsziele einhalten ([Standard-Preis-Ansatz](#)).

## 2.4 Biomasse

Auch Biomasse ist Sonnenenergie. Bei der Verbrennung von Biomasse wird zwar CO<sub>2</sub> frei; wächst die gleiche Menge Biomasse wieder nach, wird das CO<sub>2</sub> jedoch wieder gebunden.

In Deutschland lag der Anteil der Biomasse an der EE-Stromerzeugung in 2020 bei rund 20%. Der Hauptanteil stammt dabei von Biogasanlagen und Blockheizkraftwerken (BHKWs). Quelle: [hier](#).

Siehe auch "biogene Brennstoffe" im Kapitel "Alternative Brennstoffe" (s.u.).

## 2.5 Geothermie

Die Temperatur dicht unter der Erdoberfläche beträgt im Mittel etwa 10°C und nimmt zum Erdinneren hin um etwa 3°C pro 100 m Tiefe zu. Das technische Potenzial der Erdwärme umfasst ein Mehrfaches des derzeitigen Primärenergiebedarfs der Welt.

Mit dem Kalina-Verfahren kann ab Temperaturen von ca. 90°C Strom erzeugt werden. Hierzu wird die Wärme des Wassers an ein Ammoniak-Wasser-Gemisch abgegeben. Da dieses schon bei wesentlich niedrigeren Temperaturen als Wasser verdampft, kann der Prozess bereits bei niedrigen Temperaturen eingesetzt werden. Mit dem entstandenen Dampf kann genauso wie üblicherweise mit Dampfturbinen Strom erzeugt werden. Ein Vorteil der Geothermie gegenüber anderen erneuerbaren Energieträgern ist die Grundlastfähigkeit.

## 2.6 Wasserkraft

Mit Wasserkraftwerken werden knapp 16% der weltweit erzeugten elektrischen Energie erzeugt. In einigen Ländern dürfte es noch ein hohes Wachstumspotenzial für Wasserkraft geben.

In Deutschland wird ca. 5% der erzeugten elektrischen Energie aus Wasserkraft gewonnen. In Deutschland sollen die Potenziale allerdings schon sehr ausgereizt sein. Über Hochspannung-Gleichstromtrassen könnten wir jedoch aus der Produktion in anderen Ländern profitieren. Es wird auch darüber nachgedacht, mit überschüssigem Strom aus erneuerbaren Energien bei uns, Pumpspeicherkraftwerke in Skandinavien zu beliefern.

## 2.7 CCS

Technisch lässt sich bei der Verbrennung von Kohle in Kraftwerken ein Teil des entstehenden CO<sub>2</sub> abscheiden. Dieses könnte dann im Untergrund verpresst werden. Die Abscheidung und Verpressung (CCS) ist jedoch mit einem hohen Energieaufwand verbunden, sodass der Wirkungsgrad von Kohlekraftwerken um 10–15 Prozentpunkte sinkt. Das erhöht einerseits die Kosten und andererseits den Rohstoffeinsatz. Damit werden nach derzeitigem technischen Stand lediglich 70% der CO<sub>2</sub>-Emissionen am Ende vermieden.

Bei den Prozessemissionen in der Stahl-, Zement- und Kalkproduktion ist CCS eine Möglichkeit, um zu verhindern, dass CO<sub>2</sub> frei gesetzt wird. Es wird aber auch an Prozesssubstitutionen geforscht und sind teilweise technisch bereits einsetzbar.

Würde man bei der Verbrennung von Biomasse zur Stromerzeugung CCS anwenden (BECCS), wäre es damit möglich, CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre wieder zurückzuholen (s.a. Kapitel "Negativemissionen" unten).

## 2.8 Kernenergie

Kernenergie in Form der Kernspaltung ist aufgrund der Risiken beim Betrieb und der Endlagerung des radioaktiven Abfalls sehr problematisch. Dies würde noch deutlicher, wenn die Deckelung der Betriebshaftpflicht auf einen realistischen Wert angehoben würde.

Ob uns einmal die Kernfusion zur Verfügung steht, ist noch sehr unsicher und wird auf jeden Fall noch lange dauern.

## 2.9 Steigerung des Wirkungsgrades

Auch bei der Stromerzeugung selbst sind wesentliche Effizienzsteigerungen möglich, indem zum Beispiel der Wirkungsgrad erhöht wird. Moderne Steinkohlekraftwerke erreichen einen elektrischen Wirkungsgrad von 45% gegenüber 38% bei alten Kraftwerken. Einer weiteren Steigerung sind physikalisch allerdings Grenzen gesetzt. So gehen 55% der in der Steinkohle enthaltenen Energie in einem konventionellen Kohlekraftwerk als Abwärme verloren. Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK-Anlagen) erreichen dagegen Wirkungsgrade bis zu 95%, weil sie die Abwärme bei der Stromerzeugung zum Beispiel zum Heizen oder als Prozesswärme nutzen. Damit kann mit KWK-Anlagen grundsätzlich Strom und nutzbare Abwärme mit wesentlich weniger CO<sub>2</sub> produziert werden als Strom mit großen Kohlekraftwerken. Noch besser ist es natürlich, wenn als Brennstoff in KWK-Anlagen alternative Brennstoffe eingesetzt werden.

Technisch wäre es sogar möglich, aus Hunderten von kleinen KWK-Anlagen – auch Mikro-KWK-Anlagen in Kellern von Ein- und Mehrfamilienhäusern –, die dort stehen, wo auch Wärme gebraucht wird, durch Vernetzung ein virtuelles Großkraftwerk entstehen zu lassen, das zentral gesteuert wird. Damit könnten KWK-Anlagen intelligent in die Stromproduktion eingebaut werden. Insbesondere könnten sie auch Spitzenlaststrom und Regelenergie produzieren, da die kurzfristig überschüssige Wärme in vielen dezentralen Warmwasserspeichern gepuffert werden könnte.

Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerke (GuD-Kraftwerke) arbeiten heute mit Erdgas (in Zukunft wäre auch der Einsatz von Wasserstoff möglich) und erreichen aufgrund ihrer spezifischen Technologie Wirkungsgrade bis zu 58%. Zudem wird beim Verbrennen von Erdgas weniger CO<sub>2</sub> freigesetzt als bei Kohle (allerdings entweicht bei der Förderung und beim Transport Methan).

Da wir nun die Dekarbonisierung in relativ kurzer Zeit schaffen müssen, spielt die Effizienzsteigerung bei Anlagen, die fossile Brennstoffe nutzen, keine große Rolle mehr.

## 2.10 Intelligentes Stromnetz (smart grid)

Unser heutiges Stromnetz ist ziemlich dumm, weil Otto-Normal-Verbraucher, wenn er Strom aus dem Netz zieht, keine Rückmeldung erhält, wie ausgelastet das Stromnetz im Moment ist und ob gerade genug günstiger Strom vorhanden ist.

Die Netzauslastung hat aber eine enorme wirtschaftliche Bedeutung, da besonders die **Spitzenlasten hohe Kosten verursachen**. Die Netze müssen nämlich so ausgelegt sein, dass sie die Spitzenlast aushalten, auch wenn diese nur wenige Minuten am Tag erreicht wird.

Zu Spitzenzeiten müssen außerdem für nur kurze Zeit schnell Kraftwerke angeworfen werden, die den Spitzenlaststrom produzieren.

In der Vergangenheit hat es sich nur bei Großabnehmern gelohnt, laufend den Stromverbrauch zu messen (Leistungsmessung). Diese Großabnehmer können dann Geld sparen, wenn sie es vermeiden, gerade zu Spitzenzeiten ebenfalls viel Strom aus der Leitung zu ziehen. Beim Normalabnehmer wird nur einmal im Jahr der Zähler manuell abgelesen – wie viel der Einzelne an der Spitzenlast beteiligt war, blieb unbekannt. Heute sind erschwingliche Messgeräte – sogenannte smart-meter (intelligente Zähler) – verfügbar, die es ermöglichen, den Stromverbrauch kontinuierlich zu messen und die Ergebnisse sofort dem Netzbetreiber und dem Kunden verfügbar zu machen. Damit ist auch hier mehr Kostenwahrheit möglich. **Es sind Tarife möglich, die einen Anreiz bieten, in den Spitzenlastzeiten auf übermäßigen Stromverbrauch zu verzichten**. Wenn es damit gelingt, den Lastverlauf zu glätten, können wir alle sehr viel Geld sparen. Das könnte kompensierend wirken zu aus Klimaschutzgründen tendenziell steigenden Strompreisen. Steigende Strompreise sind kein Selbstzweck. Durch funktionierenden Wettbewerb und technische Innovationen kann der Anstieg der Strompreise begrenzt werden.

Aber ein intelligentes Stromnetz könnte noch viel mehr. Erneuerbare Energien wie Photovoltaik und Wind haben die unschöne Eigenschaft, dass sie nicht grundlastfähig sind. Leider richtet sich die Windstärke und die Sonneneinstrahlung nicht nach dem Strombedarf. Grundsätzlich ist das kein Problem: Es müssen eben nur genügend andere Kapazitäten bereitstehen, die einspringen können. Bei kurzfristigen Flauten müssen zum Beispiel Gasturbinenkraftwerke sogenannte Regelenergie zur Verfügung stellen, die schnell angefahren werden können. Aber das kostet natürlich. Ein intelligentes Stromnetz böte auch die Möglichkeit **Batterien der Elektroautos als Zwischenspeicher** zu nutzen (Vehicle to Grid genannt). Überall müssten Steckdosen verfügbar sein, die auch erkennen, wer angesteckt ist. Habe ich meine Einwilligung erteilt, wird in Spitzenlastzeiten Strom entnommen und ich werde dafür angemessen entlohnt. In Zeiten mit wenig Stromabnahme, aber zur Verfügung stehender Windenergie, werden die Batterien kostengünstig geladen. In Zukunft werden auch viele Photovoltaikanlagenbetreiber mit dem Auslaufen der Einspeisevergütungen vermehrt Batteriespeicher installieren. Auch diese könnten sich Betreiber von **virtuellen Kraftwerken** zunutze machen, um Speicher, abschaltbare Lasten und dezentrale Erzeugung zu bündeln.

Dieses System könnte man noch weiter denken: Im Haushalt könnten Geräte, wie der Kühlschrank oder der Backofen, durch den Netzbetreiber abgeschaltet werden, wenn für wenige Minuten eine Spitzenlast droht. Auch damit könnten die Stromerzeugungs- und -verteilungskosten gesenkt werden. Spitzenlaststrom kann schnell mal mehrere Euro pro kWh kosten. Der Durchschnittspreis für Grundlaststrom liegt dagegen bei ca. 4 ct pro kWh. Hier besteht also ein großes Kosteneinsparpotenzial und auf Regelenergiekraftwerke, die mit fossilen Brennstoffen arbeiten, könnte weitgehend verzichtet werden. Für Friedman, ein bekannter amerikanischer Journalist, vereinigen sich damit zwei gewaltige Ströme: Die Revolution der Informationstechnologie und die der Energietechnologie.

Aber damit ist die Geschichte für ein intelligentes Stromnetz noch nicht zu Ende. Über die oben schon erwähnten Hochspannungs-Gleichstromleitungen könnte ein weltweites Netz (**super-grid**) gespannt werden, für das die Sonne nicht mehr untergeht. Neun europäische Staaten planen bereits ein super-grid für die Nordsee, »North Seas Countries' Offshore Grid Initiative«. Damit sollen Windkraft und Gezeitenkraftwerke in der Nordsee mit den Puffermöglichkeiten der Wasserkraft in Norwegen verbunden werden. Natürlich könnte man dieses Netz, wenn es ökonomisch sinnvoll ist, auch mit Wüstenstrom aus Afrika verbinden.

Interessante Radiosendung des DLF vom 20.11.19 zum Thema: [Interkontinentale Stromleitungen - Neue Wege für die globale Energiewende - mp3](#).

## 3. Gebäude

### 3.1 Warmwasser, Heizung

---

*Dämmen – erneuerbare Energien – effiziente Technik - Suffizienz (z.B. Wohnfläche verringern)*

► *wirksamer CO2-Preis sorgt für den optimalen Mix*

---

Rund 40% der Endenergie und etwa ein Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland werden für Warmwasser und Raumwärme verbraucht. Welche technischen Möglichkeiten der Dekarbonisierung gibt es?

Auch in unseren Breiten lässt sich der **Warmwasserbedarf** im Sommer und in der Übergangszeit aus technischer Sicht problemlos zu 100% durch **Sonnenkollektoren** (thermische Solarenergie) decken. Bei guter Dämmung und Flächenheizung (Fuß- oder Wandheizung) können bei einer größer dimensionierten Kollektorfläche und Warmwasserspeicher sogar zusätzlich bis zu 40% der **Heizenergie** geliefert werden.

Gibt es die Möglichkeit für eine große Kollektorfläche (60 - 80 qm für ein Einfamilienhaus) und einem **großen Wasserspeicher** (gut 35.000 Liter), einem [Latentwärmespeicher](#) oder eines **thermochemischen Wärmespeichers** kann die Sonne auch zu 100% das Heizen übernehmen. Wikipedia: "Der Vorteil von [thermochemischen Wärmespeichern](#) gegenüber konventionellen Wärmespeichern in Form eines Wassertanks liegt in ihrer höheren Speicherdichte von 200 bis 300 kWh/m<sup>3</sup> gegenüber nur etwa 60 kWh/m<sup>3</sup> bei Wasser. Außerdem kann die Energie über Jahre verlustfrei gespeichert werden." [Hier](#) ein Bericht des DLF zu diesem Thema.

Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von **Biomasse** (z.B.: Pellets, Hackschnitzel, Biogas oder Rapsöl) oder **synthetischer Brennstoffe** (siehe unten: alternative Brennstoffe). Allein aufgrund mangelnder Kapazitäten bei den Handwerken, könnte der Einsatz synthetischer Brennstoffe auch im Gebäudebereich notwendig werden.

Immer wichtiger wird das Heizen mit **Strom** mithilfe einer **Wärmepumpe**, die durch den umgekehrten Kühleffekt aus Umgebungswärme (z.B. Erdkollektoren, Erdsonden, Grundwasser, Umgebungsluft, Warmwasserspeicher) nutzbare Wärme für Heizungen macht. In der Vergangenheit wurden Wärmepumpen nur bei Flächenheizungen aufgrund der geringeren Vorlauftemperatur empfohlen. Moderne Wärmepumpen können aber auch mit Heizkörpern in Bestandsgebäuden zum Einsatz kommen. [Hier](#) ein Podcast vom Bayerischen Rundfunk zum Thema Wärmepumpe. Außerdem sollte natürlich der Strom aus erneuerbaren Quellen stammen, damit wirklich ein Vorteil für die Umwelt entsteht. Ein wirksamer CO<sub>2</sub>-Preis regelt das ... . Will man "eigenen" Strom für die Wärmepumpe nutzen, kann es sinnvoll sein, selbsterzeugten Fotovoltaikstrom in einer Batterie zu speichern. Denkbar ist auch die Speicherung über Wasserstoff (Rückverwandlung zu Strom mit einer Brennstoffzelle). Es gibt auch Hybrid-Lösungen, bei denen die Leistungsspitzen mit Erdgas bzw. mit biogenen oder synthetischen Brennstoffen abgefahren werden.

**Fernwärmenetze** können die Lösung der Wahl sein und können auch an vielen Orten mit Wärme aus **Tiefengeothermie** betrieben werden ([hier](#) ein Radiobeitrag zu den Potenzialen; [mp3](#)).

Auf die Spitze treiben es **Passivhäuser** und Nullenergiehäuser. Die Grundprinzipien eines Passivhauses sind eine extrem gute Dämmung der Gebäudehülle, Dreifach-Wärmeschutz-Verglasung, Luftdichtigkeit des Hauses und ein Lüftungssystem, das mindestens  $\frac{3}{4}$  der Energie aus der Abluft wieder zurückgewinnt.

Auch manche **Altbauten** kann man zu einem Nullenergie- oder sogar Passivhaus machen. Bei denkmalgeschützten Gebäuden kann eine Innen- statt Außendämmung infrage kommen. Altbauten, bei denen aus verschiedenen Gründen eine signifikante Energieeinsparung oder solare Versorgung nicht möglich ist bzw. sich nicht rechnet, ist der Einsatz von **Biomasse** zum Beispiel in Verbindung mit Mini- bzw. Mikro-BHKWs, der Einsatz von **synthetischen Brennstoffen (Power-to-X)** oder Heizen mit Strom aus erneuerbaren Quellen (wenn möglich mit Wärmepumpe s.o.) möglich.

Mit einem Mikro-Blockheizkraftwerk (Kraft-Wärme-Kopplung) im Keller auf der Basis von Biomasse kann man auch zu einem effektiven Stromproduzenten werden. Insbesondere wenn, wie zuvor beschrieben, viele Mikro-Blockheizkraftwerke zu einem **virtuellen Kraftwerk** vernetzt werden. Vielleicht ist es aber auch sinnvoller, auf etwas größere Anlagen und **Nah- bzw. Fernwärme** zu setzen. Lassen wir es den richtig regulierten Markt entscheiden.

Heizungen: Überblick Technologien				Siehe unten Kapitel „Alternative Brennstoffe“	
Energiequelle	(EE)-Strom	Sonne	Geothermie; Erdwärme	Biogene Brennstoffe	Synthetische Brennstoffe
Hybrid-Lösungen					
Heizung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wärmepumpe</li> <li>(Nacht)speicherheizung</li> <li>Elektrische Heizkörper</li> </ul>	Thermische Solaranlage	Wärmepumpe mit Erdwärmekollektor oder Erdwärmesonde	<ul style="list-style-type: none"> <li>Heizung für Festbrennstoffe               <ul style="list-style-type: none"> <li>Pellets</li> <li>Hackschnitzel</li> </ul> </li> <li>Biogene Gas- und Flüssigbrennstoffe</li> </ul>	
Eigenschaften	Wärmepumpe u.U. nicht für alle Gebäude geeignet. Speicherheizungen und elektrische Heizkörper haben hohen Stromverbrauch.	Heizungsunterstützung und mit saisonalem Speicher auch als Hauptheizung nutzbar.	Tiefengeothermie hat bei der Fernwärme ein großes Potenzial.	Bei Festbrennstoffen u.U. Probleme mit Feinstaub. Bei biogenen Gas- und Flüssigbrennstoffen der 1. Generation u.U. Problematik Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion.	Heute noch teuer, aber Einsatz u.U. notwendig für bestimmte Gebäude und mangels entsprechender Handwerkerkapazitäten bei der Dekarbonisierung des Gebäudebestandes.

1 - Überblick Technologien Heizung

### 3.2 Kühlung

Welche technischen Möglichkeiten gibt es bei der Klimatisierung?

Allein durch eine konsequente Außenbeschattung der Fenster und einen nächtlichen Luftaustausch nachts, kann in vielen Fällen auf eine Klimaanlage völlig verzichtet werden. Es wird auch an Fenstern geforscht, die sich auf Knopfdruck tönen und damit weniger Sonne hereinlassen.

Eine andere Lösung sind Luft-Erdwärmetauscher. Sie machen es sich zunutze, dass die Erde sich im Sommer viel weniger erwärmt als die Luft. Der Luft-Erdwärmetauscher holt über ein in der Erde vergrabenes Rohrnetz durch die Erde gekühlte Luft in die Räume. Im Winter funktioniert es andersherum. Die Luft aus dem Rohrnetz aus der Erde ist vorgewärmt.

Wärmepumpen können im Sommer auch als Klimaanlage genutzt werden. Dies könnte besonders sinnvoll sein, wenn die entstehende Wärme in einem saisonalen Speicher fließt (s.o.).

Möglich ist auch das umweltfreundliche [Kühlen und Heizen mit Grundwasserspeicher](#).

## 4. Verkehr

Ungefähr 20% der CO<sub>2</sub>-Emissionen stammen in Industrieländern aus dem Verkehrsbereich. Meistens denkt man dabei gleich an das geliebte Auto. Aber es geht auch um den CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Brummis, des Luftverkehrs, von Schiffen und natürlich auch des öffentlichen Verkehrs. Auch Züge und Busse fahren nicht ohne Energie.

*Weniger Verkehr – Verlagerung – effizientere Fahrzeuge - erneuerbare Energien*

► *wirksamer CO<sub>2</sub>-Preis sorgt für den optimalen Mix*

### 4.1 Überblick Technologien

Antrieb	Hybrid					
	Elektroantrieb			Verbrennungsmotor		
Energie-„quelle“	Stromnetz: Oberleitungen, Stromschienen	Batterie	Brennstoffzelle (Wasserstoff)	Power-to-Gas (Wasserstoff, Methan)	Power-to-Liquid (Methanol)	Biogene Treibstoffe
Eigen-schaften	Hohe Infrastrukturkosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geringe Energiedichte bzw. Gewicht begrenzt die Reichweite.</li> <li>Mit steigender Transportlast verschlechtert sich das Verhältnis von Gewicht der Batterie zur Transportlast.</li> </ul>	Relativ hohe Kosten der Herstellung aufgrund von Umwandlungsverlusten. Deshalb werden diese Alternativen ohne einen wirksamen CO <sub>2</sub> -Preis oder ein Ablaufdatum für fossile Brennstoffe mit hoher Wahrscheinlichkeit sich nicht eigenständig auf dem Markt durchsetzen.			Erste Generation: Teller/Tank- Problematik
Infra-struktur	Bei LKWs staatliche Entscheidung notwendig: Oberleitungen auf Autobahnen oder alternative Treibstoffe.	Das oft zitierte „Henne-Ei-Problem“ bei der Tankinfrastruktur ist ein Mythos. Wenn wir als Gesellschaft über einen wirksamen CO <sub>2</sub> -Preis oder ein Ablaufdatum für fossile Brennstoffe die Richtung vorgeben, wird der Markt auch passende Tankstellensysteme auf die Beine stellen.			Bestehende Tankinfrastruktur könnte verwendet werden.	
wahrscheinliche / mögliche Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bahnen</li> <li>LKWs auf Autobahnen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>PKWs</li> <li>Busse</li> <li>Kleinlastwagen</li> <li>Lufttaxis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Schifffahrt</li> <li>Luftfahrt</li> <li>LKWs</li> <li>PKWs</li> <li>Busse</li> </ul>			

### 4.2 Individualverkehr

Auch bei der **individuellen Mobilität** müssen die Preise für Fahrzeuge und Treibstoffe die Folgekosten des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes signalisieren. Dabei kann am Schluss herauskommen, dass wir auf das Autofahren trotzdem fast nicht verzichten (wollen), weil es uns eben einen hohen Nutzen stiftet. Dann müssen wir in anderen Bereichen umso mehr CO<sub>2</sub> einsparen bzw. mehr dafür ausgeben, dass Mobilität mit Null-CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden ist.

Neben weniger Verkehr bringt auch **Verkehrsverlagerung** eine Menge CO<sub>2</sub>-Einsparung. So verursacht eine **Bahnfernreise** nur 1/3 der Emissionen bzw. des Energieverbrauchs gegenüber der Fahrt mit einem PKW. Nicht zu vergessen ist das **Fahrrad**. Mit dem E-Bike können wir ohne verschwitzt zu sein am Arbeitsplatz ankommen oder auch größere Lasten ohne große Anstrengung transportieren. Aber auch bei der Verkehrsverlagerung gilt: Sie wird erst im erforderlichen Ausmaß stattfinden, wenn CO<sub>2</sub> eingepreist ist.

Der **Bedarf an individueller Mobilität** ist kein Naturgesetz; insbesondere wenn sich Strukturen ändern. Es wird zum Beispiel wieder mehr Einkaufsmöglichkeiten in der Nähe geben und der öffentliche Personenverkehr wird attraktiver sein, weil es sich einfach rechnet. Der Einkaufsmarkt auf der grünen Wiese wird sich gegenüber dem Einkaufen in der Innenstadt dagegen vielleicht



weniger rechnen, weil er schlechter an den öffentlichen Personennahverkehr angebunden werden kann.

Neben weniger Verkehr und Verkehrsverlagerung liegt die dritte Einsparquelle von Treibhausgasen in effizienteren Fahrzeugen mit alternativen Antriebstechnologien bzw. alternativen Treibstoffen (s.u.).

Die Effizienzpotenziale der normalen Diesel- und Benzinmotoren sind demgegenüber schon sehr weit ausgereizt. Fortschritte in diesem Bereich wurden in der Vergangenheit zudem durch Leistungs- und Komfortzuwächse, die sich nicht zuletzt beim Gewicht ausgewirkt haben, aufgezehrt ([Reboundeffekt](#)). Der erste Golf wog 800 kg; der Golf VI 1.300 kg. Das Politik-Magazin »Kontraste« hatte einmal einen Golf III TDI-Turbodiesel gegen den Golf V TDI-BlueMotion antreten lassen. Das ernüchternde Ergebnis: Golf III 6,43 l und der Golf V 6,63 l auf 100 km. Auch unsere Komfort- und Spaßansprüche an das Autofahren müssen auf den ökonomischen Prüfstand: Sind wir wirklich bereit, den vollen Preis dafür zu zahlen?

Welche Antriebskonzepte gibt es, die CO<sub>2</sub> einsparen oder vermeiden?

### **Elektroantriebe**

Der Strom kann dabei aus einer **Batterie** oder einer **Brennstoffzelle** stammen. Für das Klima ist es dann entscheidend, dass der Strom bzw. der Wasserstoff für die Brennstoffzelle aus erneuerbaren Quellen kommt. Batterien bieten zudem die Chance, diese als Pufferspeicher in einem intelligenten Stromnetz zu nutzen (s.o.).

Zwei Prinzipien führen beim Elektroantrieb zur Energieeinsparung:

1. Elektromotoren können insbesondere beim Beschleunigen die Energie effizienter auf die Straße bringen. Dies liegt u.a. daran, dass sie kein Getriebe brauchen.
2. Beim Bremsen wird aus einem Elektromotor ein Generator, der einen Teil der Bremsenergie zurückgewinnt und damit die Batterien auflädt. Auch Fahrzeuge mit Brennstoffzelle haben zumindest eine "Transaktionsbatterie".

Insbesondere im Stadtverkehr sind Einsparungen bis zu 40% möglich.

### **Hybrid**

Beim **Hybrid** (Kombination von Verbrennungs- und Elektroantrieb) kann folgender Effekt hinzutreten: Wird der Verbrennungsmotor nur zum Aufladen der Batterie genutzt, kann er mit seiner energetisch optimalen Drehzahl arbeiten. Der Verbrennungsmotor kann in Hybridautos aber auch noch direkt für den Antrieb verwendet werden in unterschiedlichen Varianten.

### **Verbrenner mit alternativen Treibstoffen**

Elektromotoren bringen zwar gegenüber Verbrennungsmotoren einen höheren Wirkungsgrad auf die Straße, aber die Verluste bei der Stromproduktion und -verteilung und das Gewicht der Batterien müssen in eine Gesamtbetrachtung einfließen. Nur nebenbei: Sagen die Preise die ökologische Wahrheit, nimmt der Markt diese Gesamtbetrachtung automatisch vor – lassen wir das bitte nicht nur Bürokraten und Politiker machen. Es kann auch sein, dass uns Verbrennungsmotoren betrieben mit synthetischen Treibstoffen zumindest in Teilbereichen erhalten bleiben.

Im Moment haben Batterie-Elektroautos (BEV) aufgrund der (noch) schweren Batterien ein Reichweitennachteil gegenüber konventionellen Fahrzeuge oder Hybridlösungen. Aber erstens wird daran fieberhaft gearbeitet und zweitens wer hat gesagt, dass wir ein Anrecht auf eine bestimmte Reichweite haben? Vielleicht fährt man in Zukunft lange Strecken grundsätzlich mit öffentlichen Verkehrsmitteln und ein kleines leichtes Auto braucht man nur noch für die kurze Strecke zum Park-and-Ride-Parkplatz, der mit Ladesäulen ausgestattet ist. Neben der Weiterentwicklung der Batterien können die folgenden zwei Technologien das Reichweitenproblem entschärfen: (1) [Range Extender](#) (2) Zusätzlich zum festverbauten Akku gibt es die Möglichkeit einen kleineren Akku bei einer Tankstelle auszutauschen. Dieser Wechselakku müsste für alle Pkws standardisiert sein und vielleicht eine Reichweite von knapp 40 km abdecken, sodass man im Notfall auf jeden Fall von einer Autobahntankstelle zur nächsten kommt.

Vielleicht wird individuelle Mobilität in Zukunft auch billiger oder zumindest der höhere Anschaffungspreis wird kompensiert, weil wir Autos teilen. Heute stehen unsere Autos die meiste Zeit nur rum. Steigt die Auslastung, sinkt der Preis pro Kilometer. Nachbarschaftsauto, Car-Sharing, Internetportale, Mobilitäts-Apps, autonomes Fahren etc. Die Möglichkeiten sind vielfältig. Außerdem hätten wir immer das Auto, das wir gerade brauchen. Einen kleinen Stadtflyer, eine Limousine für den Italienurlaub mit der ganzen Familie usw. Damit das Teilen aber tatsächlich zu CO<sub>2</sub>-Reduktionen führt, muss CO<sub>2</sub> einen wirksamen Preis bekommen. Sonst kann der Schuss auch nach hinten losgehen, wie jüngste Untersuchungen zeigen: Viele nutzen Car-Sharing statt den ÖPNV.

Mit dem **autonomen Fahren** könnte eine Entwicklung eintreten, dass wir in der Regel kein eigenes Auto mehr besitzen wollen. Damit könnte der Effekt haben, dass wir 80 - 90% weniger Fahrzeuge brauchen (mit gewaltigen Folgen für die deutsche Automobilindustrie). Damit würden auch die Emissionen bei der Produktion der Fahrzeuge wegfallen und in den Städten bräuchten wir viel weniger oder vielleicht auch gar keinen Parkraum mehr.

Für die, die gerne Informationen hören, [hier](#) ein interessanter Übersichtsbeitrag von Bayern 2 IQ-Wissenschaft und Forschung: **Autos der Zukunft** (leider wird in dem Beitrag der wichtigste Schlüssel für die technologie- und lebensstiloffene Dekarbonisierung der Mobilität, ein wirksamer CO<sub>2</sub>-Preis, nicht erwähnt; **Ingenieure und Ökonomen müssen mehr miteinander reden**).

#### 4.3 Öffentlicher Personenverkehr / Fliegen

Auch im öffentlichen Personenverkehr (ÖPV) sind Einsparungen möglich und nötig. Bremsenergie kann beim Schienenverkehr konsequent wieder ins Netz eingespeist werden. Das Gewicht der Fahrzeuge kann optimiert werden. Alternative Antriebe und Treibstoffe können auch hier eingesetzt werden. Vielleicht wird man auch auf Höchstgeschwindigkeitszüge verzichten, weil sie sich aufgrund des höheren Energieverbrauchs nicht mehr rechnen. Heute brauchen wir sie, damit die Schiene konkurrenzfähig ist zum Flugzeug. Wenn auch der Kerosinpreis die ökologische Wahrheit sagt, ist dies vielleicht nicht mehr nötig. Dabei schlummern natürlich auch beim Fliegen gewaltige Einsparpotenziale: Das technische Einsparpotenzial von Flugzeugturbinen wird auf gut 30% geschätzt. Wenn weniger geflogen wird, entfallen Warteschleifen über den Flughäfen. Größere Flugzeuge wie der A380 brauchen auf Langstrecken weniger Treibstoff pro Fluggast. Beim derzeitigen Kostengefüge hat sich der Betrieb jedoch nicht gerechnet, sodass die Produktion eingestellt wurde. Mittelfristig werden wir beim Fliegen auf alternative Treibstoffe (s.u.) umsteigen.

Im ländlichen Raum könnten app-gesteuerte Rufbussysteme, die von Tür zu Tür fahren, eine Revolution herbeiführen.

Vielleicht basiert der öffentliche Personennahverkehr eines Tages auf autonom fahrenden kleinen Fahrzeugen. Dann ist die Unterscheidung zwischen ÖPNV und Individualverkehr nicht mehr sinnvoll.

#### 4.4 Gütertransport

Die Transportleistung gemessen in Tonnenkilometern ist in den letzten zehn Jahren um rund ein Drittel gewachsen – Tendenz weiter steigend. Der Straßenverkehr hat einen Anteil von 70% an dieser Transportleistung, die Eisenbahnen übernehmen gut 16% und die Binnenschifffahrt rund 12%. Laut einem Gutachten für das Bundesverkehrsministerium sollen sich die Tonnenkilometer bis 2050 noch einmal verdoppeln!

Ursache für diesen Anstieg ist das allgemeine Wirtschaftswachstum mit immer weiter zunehmender **internationaler Arbeitsteilung**, ebenso die Tendenz zur **Just-in-time-Produktion** und das **Outsourcing**. Die Zunahme des Güterverkehrs ist dabei jedoch kein Naturgesetz. Wenn die Preise die ökologische Wahrheit sagen, wird manche Outsourcingentscheidung nochmals durchkalkuliert. Manche internationale Arbeitsteilung rechnet sich nur, weil die Klimafolgekosten nicht in die Kalkulation einfließen. Viele wundern sich, dass es sich rechnet, bayerische Milch nach Italien zu verfrachten, dort Mozzarella daraus zu machen und dann über den Brenner wieder zurück nach Bayern zu karren. Das sollte man nicht von Anfang an verdammen – vielleicht ist das sogar sinnvoll. Beurteilen kann man das jedenfalls erst, wenn alle Folgekosten im betriebswirtschaftlichen Kalkül auftauchen.

Interessantes im Schiffsverkehr: Es werden Flugdrachen und moderne Segel für Hochseeschiffe getestet, die eine Treibstoffeinsparung bis zu 35% bringen können. Auch reine Segler mit innovativer Technik und Werkstoffen sind möglich - insbesondere bei unverderblicher Ware, die Routen mit passenden Winden nutzen können. Daneben können ebenso Routen mit optimaler Meeresströmung zu Kraftstoffeinsparungen führen. Das wird aber sicher erst Realität, wenn es sich aufgrund ökologischer Preise rechnet, den Zeitverlust in Kauf zu nehmen.

Für Gütertransporte, die weiterhin volkswirtschaftlich sinnvoll sind, muss die Effizienz der Fahrzeuge weiter erhöht werden und die Energie muss aus erneuerbaren Quellen stammen (EE-Strom, Power-to-Gas (Wasserstoff oder Methan), Power-to-Liquid (Methanol) oder nachwachsende Rohstoffe; s.a. alternative Kraftstoffe unten). Wobei beim Schwergüterverkehr bei batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen sich Grenzen ergeben, weil das Gewicht der notwendigen Batterien mit Zunahme des zu bewegenden Gewichts zum Problem wird. Eine Lösung könnten bei LKWs auch E-Highways sein, die u.a. Siemens erforscht. Dabei würde die gute alte Oberleitung auf Autobahnen zum Zuge kommen. Die LKWs hätten einen Hybridantrieb, sodass sie auch abseits der Autobahnen fahren können.

## 5. Industrie: Energieintensive Prozesse

Auf folgende Branchen entfielen im Jahr 2007 ein Anteil von rund 70% des industriellen Endenergieverbrauchs: Grundstoffchemie, Eisen- und Stahlerzeugung, Nichteisen-Metalle und -gießereien, Papiergewerbe, Verarbeitung von Steinen und Erden, Glas und Keramik und das Ernährungsgewerbe.

Ansatzpunkte für die Reduzierung von Treibhausgasen:

- Geringerer Verbrauch der Produkte
- Höhere Rückgewinnungsquoten
- Prozessinnovationen
- Prozesssubstitution
- Einsatz der bestverfügbaren Technologie
- Optimierte Betriebsführung
- Abwärmerückgewinnung (es gibt Schätzungen, dass bis zu 20% des industriellen Energieverbrauchs gespart werden könnten - hier eine interessante [Radiosendung](#) vom DLF am 1.11.19 - [mp3](#); [hier](#) ein Beispiel für "Wärme auf Rädern")
- Einsatz Strom aus erneuerbaren Energien am besten an Standorten, wo dieser regional in einem ausreichenden Maße vorhanden ist.
- Einsatz von alternativen Brennstoffen (s.u.) statt fossiler Brennstoffe
- Einsatz von Sekundärrohstoffen

Beispiele:

- Papierherstellung: Innovative Trocknungsverfahren und Optimierung der Wärmenutzung.
- Metallerzeugung: Optimierter Abwärmenutzung, sowie endabmessungsnahes Gießen und Optimierung der Energieflüsse im gesamten Hüttengasverbund inklusive Gichtgasrückführung.
- Aluminiumerzeugung: Nutzung von Supraleitung für die Erwärmung von Aluminiumblöcken zur Weiterverarbeitung; dauerhafte Kathoden bei der Primäraluminiumelektrolyse.
- Recycling von Stahl mit dem Elektrischen Lichtbogenofen ist ein Verfahren, energieeffizienter Stahl zu produzieren.
- Grundstoffchemie: Neue effizientere Anlagen für die Ammoniakherstellung sowie eine Optimierung der Ethylenproduktion, die eine Nutzung derzeit abgefackelter Reststoffe sowie eine ausgebaute Wärmerückgewinnung einschließt.

Bei der Stahl- und Zementherstellung entsteht CO<sub>2</sub> auch durch chemische Reaktionen. Es gibt Möglichkeiten, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß dabei weiter zu reduzieren. Es könnte aber auch sein, dass die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (CCS) eine sinnvolle Option ist. Als substanzielle Prozesssubstitutionen käme laut oben genannter Studie bei der Zementherstellung [celimente](#) infrage und bei der Stahlherstellung z.B. die Direktreduktion (dazu eine [Radiosendung](#) "Europas Stahl soll grün werden" des DLF vom 04.03.2020 - [mp3](#)).

Wenn Preise die ökologische Wahrheit sagen, werden sich die kostengünstigeren Optionen durchsetzen. Bei sehr langfristigen Investitionen wie z.B. in der Stahlproduktion, kann es sinnvoll sein, dass der Staat Unternehmen z.B. durch [Differenzverträge](#) / **Klimaverträge** Unterstützungen gewährt solange global noch keine ähnlichen Wettbewerbsbedingungen (Level-Playing-Field) vorhanden sind.

*Teilweise Zitate aus der Untersuchung des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung 2013: [Energieverbrauch und CO2-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente](#).*

## 6. Alternative Brenn- und Ausgangsstoffe

Alternative: Kraftstoffe - Treibstoffe - Brennstoffe - Reduktionsmittel - Ausgangsstoffe

### 6.1 Funktionen

Alternative Brenn- und Ausgangsstoffe können folgende Funktionen haben:

1. Speicherung von EE-Strom (Power-to-X)
2. Bereitstellung von Wärme und Prozessenergie
3. Kraftstoff in der Mobilität (Power-to-X; Radiosendung Bayern 2 (22.04.2021): Grüne Kraftstoffe - Heilsbringer für Verbrennungsmotoren? [mp3](#))
4. Alternative Ausgangsstoffe in der Chemie (Power-to-Chem) und für Kunststoffe
5. Umwandlung von CO<sub>2</sub>
6. Wasserstoff kann zusätzlich folgende Funktionen haben:
  - a. Alternatives Reduktionsmittel bei der Stahlerzeugung (Direktreduktion)
  - b. Stoffliche Nutzung (Power-to-Chem; Ammoniak, Chemikalien)

### 6.2 Power-to-Gas (PtG)

**Power-to-Gas (PtG); synthetische gasförmige Kraft- bzw. Brennstoffe; strombasierte Brennstoffe**

#### ► Wasserstoff

Schon in den 80er Jahren galt **Wasserstoff** als die Zukunft. Die Konzepte sind relativ ausgereift. Fossile Brennstoffe waren aber einfach betriebswirtschaftlich zu billig, sodass ich eine Wasserstoffwirtschaft bisher nicht durchsetzen konnte.

Bei Mobilität gibt es zwei Grundkonzepte:

1. Wasserstoff wird direkt in einem Verbrennungsmotor eingesetzt oder
2. für Elektroantriebe wird mithilfe von Brennstoffzellen aus Wasserstoff Elektrizität hergestellt.

Die Speicherung des Wasserstoffs im Fahrzeug ist eine etwas aufwändige Angelegenheit: Kommt Wasserstoff mit Luft in Verbindung, kann er sich selbst entzünden; aufgrund seiner niedrigen volumenbezogenen Energiedichte, muss er unter hohem Druck gespeichert werden; aufgrund seiner geringen Molekülgröße diffundiert Wasserstoff relativ gut durch verschiedene Materialien. Technisch sind diese Probleme jedoch gelöst. Sie verursachen jedoch Kosten und bewirken ein relativ hohes Gewicht des Tanks.

Eine kleine **Wasserstoff-Farbenlehre** ([BMBF](#))

- Grüner Wasserstoff: Erzeugung über Elektrolyse unter Verwendung von (überschüssigen) EE-Strom.
- Grauer Wasserstoff wird direkt aus fossilen Brennstoffen erzeugt.
- Als "blau" bezeichnet man Wasserstoff, der zwar auch aus fossilen Brennstoffen hergestellt wurde, wobei das entstehende CO<sub>2</sub> abgeschieden und z.B. geologisch gespeichert wird (CCS).

- Als türkiser Wasserstoff wird gesprochen bei der Anwendung der [Methanpyrolyse](#), wobei anstelle von CO<sub>2</sub> fester Kohlenstoff entsteht.
- Bei rotem Wasserstoff stammt der Strom aus Atomkraftwerken.

Interessante Sendungen zum Thema Wasserstoff:

- [DLF](#) 12.06.2020: Wasserstoffstrategie der Bundesregierung: [mp3](#)
- [Bayern 2](#) 12.11.2020: Wasserstoff statt Erdöl. Hält der saubere Energieträger, was er verspricht?: [mp3](#)
- Bayerisches Fernsehen 14.11.2020: [Energiewende mit grünem Wasserstoff](#)

Im Radiobeitrag vom 12.11.20 ist davon die Rede, dass für Wasserstoff als Treibstoff ein **CO<sub>2</sub>-Preis** bei **illusorischen 300 €** liegen müsste, damit sich Wasserstoff rechnen. Wir haben uns das Ziel der Klimaneutralität bis spätestens 2045 gesetzt. Da ist es fahrlässig davon zu sprechen, dass bestimmte CO<sub>2</sub>-Preise *illusorisch* seien. Wir brauchen einen möglichst breiten gesellschaftlichen Konsens darüber, dass wir in den nächsten Jahrzehnten den CO<sub>2</sub>-Preis akzeptieren, der notwendig ist, um unseren politisch entschiedenen Emissionspfad einzuhalten. Ob der CO<sub>2</sub>-Preis dann 2045 bei über 500 € liegen muss oder ob durch technischen Fortschritt und/oder durch die Reduzierung unserer Ansprüche ein geringerer CO<sub>2</sub>-Preis ausreicht, das wird sich dann zeigen. Über einen wirksamen CO<sub>2</sub>-Preis könnte auch der Markt kosteneffizient mitentscheiden, wo bei Mobilität Batterien und wo synthetische Treibstoffe die Zukunft sind. Die rein physikalische Betrachtung der beträchtlichen Umwandlungsverluste bei Einsatz von Wasserstoff in der Mobilität, springt dagegen zu kurz. Entscheidend ist, was die Menschen für bestimmte Zwecke an Geld ausgeben wollen.

Wenn man 300 € für illusorisch hält, dann muss man konsequenter Weise auch das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 für illusorisch erklären. Denn wenn wir das gleiche Ziel im Wesentlichen mit anderen Instrumenten erreichen wollen, dann ist der indirekte CO<sub>2</sub>-Preis aufgrund der Ineffizienz anderer Instrumente noch höher.

#### ► Methan (Methanisierung, Synthesegas)

Durch die Reaktion von Wasserstoff mit CO<sub>2</sub>, kann synthetisches Methan (entspricht Erdgas) erzeugt werden, das als Treibstoff für Fahrzeuge dienen kann. Entweder als CNG (Compressed Natural Gas) oder insbesondere im Schwerlastverkehr auch LNG (Liquefied Natural Gas - auch Flüssiggas genannt). Wobei das "N" in CNG und LNG dann eigentlich nicht mehr passt, wenn der Ausgangsstoff eben Wasserstoff und nicht Erdgas ist. Das CO<sub>2</sub> kann z.B. mithilfe von Filtern direkt aus der Luft gewonnen werden.

### 6.3 Power-to-Liquid (PtL)

#### **Power-to-Liquid (PtL); power fuels, E-fuels, synthetische flüssige Brenn- bzw. Kraftstoffe, strombasierte Brennstoffe**

Nach Verflüssigung kann man aus Methan auch Methanol (allgemein: synthetische Mineralöle) herstellen, das direkt zu Kraftstoffen insbesondere für Flugzeuge, LKWs und Schiffe weiter verarbeitet werden kann. Die bisherigen Betankungssysteme könnten weiter verwendet werden. Neben dem Weg über Wasserstoff (Elektrolyse) stehen auch biotechnische Methoden zur Herstellung von Synthesegas zur Verfügung, um flüssige EE-Treibstoffe herzustellen.

## 6.4 Bio-Solarzellen, künstliche Photosynthese oder Umwandlung CO<sub>2</sub>

Es wird auch daran gearbeitet, dass [Bio-Solarzellen](#) direkt mithilfe von Bakterien Wasserstoff bzw. Energieträger auf Kohlenstoffbasis produzieren. [Hier](#) eine interessante Sendung vom Deutschlandfunk, die eine gute Übersicht gibt.

Ein anderer Weg ist die [Photosynthese künstlich](#) nachzuahmen.

Ein weiterer Weg ist die [Umwandlung von CO<sub>2</sub> mittels Katalysatoren](#).

## 6.5 Biogene Brenn- bzw. Kraftstoffe

Der Vorteil biogener Brennstoffe ist, dass bei deren Verbrennung nur so viel CO<sub>2</sub> frei wird, wie vorher beim Wachstum gebunden wurde. Vorschnell wird manchmal behauptet, biogene Treibstoffe seien deshalb CO<sub>2</sub>-neutral. Das gilt aber nur, wenn erstens die gleiche Menge Biomasse auch wieder nachwächst bzw. vorher nicht der Urwald gerodet wurde und zweitens bei der Herstellung kein CO<sub>2</sub> entsteht. Wenn der Bauer mit seinem Dieseltraktor übers Feld fährt, ist es mit der CO<sub>2</sub>-Neutralität schon dahin. Auch Kunstdünger wird sehr energieintensiv hergestellt. Außerdem wird auch bei der Verarbeitung der Biomasse zu Treibstoffen Energie verbraucht, die nicht CO<sub>2</sub>-neutral sein muss. Die gesamte Ökobilanz ist also entscheidend. Bevor wir es vergessen zu erwähnen: Der Markt macht die beste Ökobilanz, wenn ihm die richtigen Signale gegeben werden. Ökobilanzen am grünen Tisch, greifen meist zu kurz. Verschweigen wollen wir aber auch nicht, dass mit der Einpreisung von Treibhausgasen die Preise nur in Bezug auf Klimaschutz die ökologische Wahrheit sagen. Der verstärkte und intensive Anbau von Energiepflanzen kann jedoch andere negative ökologische Folgen haben, wie Erosion (Maisanbau in Hanglagen) oder Artensterben durch Monokulturen und/oder durch Pestizid- und Herbizideinsatz. Gibt es hier Probleme muss der Staat eingreifen – durchaus auch mit Auflagen. Dies ist übrigens kein originäres Problem von marktbasierter Instrumenten. Auch die Subventionierung von Biogas hat zu einem verstärkten Anbau von Energiepflanzen (Vermaisung der Landschaft) geführt. Als biogene Treibstoffe werden Kraftstoffe bezeichnet, die aus Biomasse hergestellt werden. Man unterscheidet zwischen folgenden Treibstoffen:

Rohstoff	1. Generation			2. Generation	
	Bio-ethanol	Bio-diesel	Bio-gas	Bio-ethanol aus Zellulose	Synthe-tischer Treibstoff (BtL)
Stärke- und zuckerhaltige Pflanzen (Zuckerrohr, Rüben, Getreide, Kartoffeln, Mais)	■		○	○	○
Ölhaltige Pflanzen (Raps, Sonnenblumen, Palmöl, Brechnuss, Algen), tierische Fette		■	○		○
Feuchte Biomasse (vor allem Gülle und Mist, organische Abfälle)			■		○
Zellulosehaltige Biomasse (Holz, Stroh, Gras,, versch. Pflanzenreste)				■	■

Quadrat - besonders geeignet / Kreis - geeignet

Biogene Treibstoffe der 1. Generation haben die technologische Marktreife erreicht und werden heute bereits im Verkehr eingesetzt. Biogene Treibstoffe der 2. Generation sind noch weitgehend in der Phase von Forschung und Entwicklung.

Für die Herstellung von Bioethanol und Biodiesel der 1. Generation werden vorwiegend Rohstoffe verwendet, die auf fruchtbaren, ackerbaufähigen Böden angebaut werden. Es kann eine Konkurrenzsituation mit der Herstellung von Nahrungsmitteln entstehen. Biogas kann aus Reststoffen aus der landwirtschaftlichen Produktion oder aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden. Werden Reststoffe aus der Landwirtschaft (z. B. Gülle und Mist bzw. Hofdünger) und biogene Abfälle aus Haushalten oder Gewerbe verwendet, besteht keine Konkurrenzsituation



zur Nahrungsmittelproduktion. Werden keine Reststoffe verwendet ist der Einsatz von biogenen Treibstoffen der 1. Generation wohl nur möglich, wenn wir gleichzeitig unseren Fleischkonsum senken.

Biogene Treibstoffe der 2. Generation sollen primär aus Reststoffen aus der land- und forstwirtschaftlichen Produktion oder Algen hergestellt werden, damit es nicht zur Konkurrenz um Rohstoffe (Teller oder Tank) kommt. Bioethanol aus Zellulose kann aus Holz, Stroh oder Gras gewonnen werden. Für die Produktion von synthetischen Treibstoffen (BtL) lassen sich praktisch alle Biomassefraktionen verwenden. Die Umweltbilanz der neuen Treibstoffe ist dann vermutlich günstiger als jene der 1. Generation, mit Ausnahme von Biogas aus Reststoffen, welches heute bereits gut abschneidet.

## 7. Kunststoffe

Werden fossile Brennstoffe (vor allem Erdöl) zur Produktion von Kunststoffen herangezogen, wird der enthaltene Kohlenstoff früher oder später als CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre abgegeben. Besonders schnell geschieht dies in der Müllverbrennung. Gelangt Kunststoff in die Umwelt, macht uns Mikroplastik große Probleme. Dabei gibt es zu fossilen Brennstoffen in der Kunststoffherstellung Alternativen, die auch durch einen kontinuierlich steigenden CO<sub>2</sub>-Preis ökonomisch attraktiver werden können. Daneben befördert die CO<sub>2</sub>-Bepreisung fossiler Brennstoffe bei der Verwendung zur Kunststoffherstellung auch das Recycling und deren sparsame Verwendung.

[Hier](#) eine Radiosendung von Bayern 2 'IQ - Wissenschaft und Forschung: Chemikalien aus Stroh und Holz - Auf dem Weg zur Rohstoffwende' vom 13.02.18 mit einem sehr guten Überblick. [Hier](#) die Sendung als mp3.

## 8. Die anderen Treibhausgase

Wir haben meist vereinfachend nur das CO<sub>2</sub> betrachtet, welches durch Nutzung fossiler Brennstoffe in die Atmosphäre gelangt. Diese CO<sub>2</sub>-Emissionen machen gut 55% des durch den Menschen verursachten (anthropogenen) Treibhauseffekts aus. Weitere gut 10%-Punkte entstehen durch die Verringerung der Biomasse zum Beispiel durch Regenwaldrodung (Landnutzungsänderung). Rund 5%-Punkte stammen aus der Herstellung von Zement. Ca. 3%-Punkte verursachen [brennende Kohleflöze](#).

Knapp 25%-Punkte tragen Methan und Lachgas bei und knapp 2%-Punkte sogenannte F-Gase wie die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW).

Aufgrund der [Budgeteigenschaft von CO<sub>2</sub>](#) ist bei diesem Treibhausgas eine Reduktion der Emissionen besonders dringend, da einmal emittiertes CO<sub>2</sub> unsere Erde für sehr lange Zeit aufheizt. Darüber dürfen aber natürlich die anderen Treibhausgase nicht vergessen werden.

Wo entstehen Methan und Lachgas?

**Methan** entsteht überall dort, wo organisches Material unter anaeroben (ohne Sauerstoff) Bedingungen abgebaut wird. Natürlicherweise geschieht das vor allem in Feuchtgebieten (Sumpfgas), aber auch im Verdauungstrakt von **Wiederkäuern** (vor allem Kühe). Außerdem entweicht Methan bei der Förderung und Verteilung von Erdöl und insbesondere Erdgas, im Bergbau und bei der anaeroben Verrottung von organischen Abfällen, Papier und Pappe in Mülldeponien.

Aus landwirtschaftlichen Quellen stammen knapp  $\frac{2}{3}$  der Gesamtemissionen an Methan. Insbesondere schlägt hier der wachsende Viehbestand (zunehmender Fleisch- und Kuhmilchkonsum) und der zunehmende Nassreisenanbau zu Buche.

**Lachgas** entsteht natürlicherweise durch mikrobiologische Umsetzungen von **Stickstoffverbindungen** in Böden und Gewässern. Dieser Prozess wird durch die Stickstoffdüngung der Böden stark erhöht. Darüber hinaus wird Lachgas auch bei der Verbrennung pflanzlicher Biomasse (Brandrodung in den Tropen) und fossiler Energieträger freigesetzt.

Der **Fleischkonsum** würde bereits durch einen Preis für CO<sub>2</sub> teurer, da die Fleischproduktion mit einem höheren Energieverbrauch verbunden ist als die Produktion von Getreide und Gemüse. Um den Methanausstoß von Wiederkäuern in den Griff zu bekommen, könnte man über eine gesonderte Methanabgabe nachdenken. Allerdings ist diese schwierig zu bemessen, da die Menge an Methan von vielen Einflussfaktoren abhängt. Wenn man die Ernährung einer größeren Weltbevölkerung und den Schutz unseres Grundwassers vor Nitrat miteinbezieht, wäre bei der Fleischproduktion vielleicht ein sinnvoller Grundsatz: "feed no food". Also grundsätzlich kein Futter verwenden, das wir nicht direkt als Nahrung verwenden können.

Neben der direkten Verringerung von Treibhausgasen durch einen geringeren Konsum an Fleisch und Milchprodukten, würden dadurch sehr **große Flächen frei**, die dafür genutzt werden könnten, um z.B. durch Aufforstungen gerade in der Wachstumsphase viel CO<sub>2</sub> zu binden.

[Hier](#) ein Podcast von Bayer 2 vom 04.02.22 mit dem Titel "Rettet Vegetarismus den Planeten?".

Auch die **Stickstoffdüngung** würde bereits durch einen Preis für CO<sub>2</sub> teurer, da die Kunstdüngerherstellung mit einem hohen Energieverbrauch verbunden ist. Aber auch hier könnte man über eine gesonderte Stickstoffabgabe nachdenken.

## 9. Negativemissionen

Folgende Möglichkeiten gibt es, um CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zurückzuholen:

- **Geologische Speicherung** von CO<sub>2</sub>,
  - das bei der Verbrennung von Biomasse abgeschieden wird (BECCS)
  - das mithilfe von Filtern direkt aus der Luft zurückgeholt wird - DAC ([quarks](#) vom 27.03.2019)
- Auch über die **Erhöhung** der globalen **Biomasse** durch Aufforstung, Ackerland zu Grünland, mehr Humusbildung etc. kann CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zurückgeholt werden.

**Fleischkonsum:** Neben der direkten Verringerung von Treibhausgasen durch einen geringeren Konsum an Fleisch und Milchprodukten, würden dadurch sehr große Flächen frei, die auch dafür genutzt werden könnten, um z.B. durch Aufforstungen gerade in der Wachstumsphase viel CO<sub>2</sub> zu binden.

Die Kosten der geologischen Speicherung sind aus heutiger Sicht hoch. Bei Aufforstungen ist die Dauerhaftigkeit unsicher.

Festzuhalten ist, für die Kompensation nicht vermeidbarer CO<sub>2</sub>-Emissionen und anderer Treibhausgase (vor allem Methan und Lachgas aus der Landwirtschaft) brauchen wir negative CO<sub>2</sub>-Emissionen, um Treibhausgasneutralität zu erreichen.

Auf darüber hinausgehende netto negative CO<sub>2</sub>-Emissionen in der fernen Zukunft zur Kompensation von heutigen positiven CO<sub>2</sub>-Emissionen, um ein Paris-kompatibles CO<sub>2</sub>-Budget dennoch einzuhalten, sollten wir uns nur bedingt verlassen.

Eine interessante Radiosendung vom 19.11.2019 zu diesem Thema:

[Einfach wegräumen? Wie Treibhausgase aus der Atmosphäre verschwinden sollen \(mp3\)](#).

[ARD Mediathek 2020](#): Es klingt so einfach: CO<sub>2</sub> wieder nachträglich aus der Atmosphäre holen und möglichst dauerhaft speichern. Kann das wirklich klappen und uns bei der größten Challenge der Menschheitsgeschichte helfen?

## 10. Podcasts

Podcasts von "Forschung aktuell" (Deutschlandfunk) und "IQ - Aus Wissenschaft und Forschung" (Bayern 2) siehe [hier](#).

## 11. Klimaschutz, was jeder? tun kann

Es gibt Tausende von Ansatzpunkten, um die Emission von Treibhausgasen zu verringern und auch zu vermeiden.

[Hier](#) eine Auswahl von Ansatzpunkten ([hier](#) können Sie das Papier als PDF herunterladen).

Dabei zeigen wir auch auf, wie diese Möglichkeiten tatsächlich Realität werden können: Entscheidend ist die politische Rahmensetzung und nicht das individuelle Handeln.