Prof. Dr. Florian Ziel
Umweltökonomik, insb. Ökonomik erneuerbarer Energien
Fakultät für Wirtschatswissenschaten
Universität Duisburg-Essen

florian.ziel@uni-due.de

25. Oktober 2022

Umweltökonomik und erneuerbare Energien

Skript 1.0

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

2 Grundlagen der Umweltökonomik **1**
2.1 Das ökologische System . . . 1
2.2 Qualitative Darstellung von Ökosystemen . . . 2
2.3 Quantitative Modelle . . . 4
2.4 Hierarchische Struktur von Ökosystemen . . . 10
2.5 Güter und Nutzen . . . 11
2.5.1 Die Edgeworth-Box . . . 13
2.5.2 Temporales Nutzenproblem. . . . 18
2.5.3 Güterrestriktionen . . . 19
2.6 Ökonomische Aspekte im Ökosystem und externe Effekte . . . 20
2.7 Nachhaltigkeit . . . 29

3 Vermeidung externer Effekte und deren Internalisierung **34**
3.1 Sensibilisierung des Konsumverhaltens . . . 34
3.2 Konsumvorgaben . . . 35
3.3 Produktionsvorgaben, Auflagen und das Haftungsrecht . . . 36
3.4 Pigou-Steuer . . . 40
3.5 Eigentumsrechte, Coase-Theorem und Zertifikate-Lösung . . . 46
3.6 Imperfekte Marktstrukturen . . . 48

4 Klima, Klimawandel und Emissions-Handel **50**
4.1 Grundlagen Klimawandel . . . 50
4.2 Der EU-Emissionshandel . . . 63

5 Erneuerbare Energien **72**
5.1 Einführung . . . 72
5.2 Grundlagen zur Bedeutung erneuerbaren Energien . . . 76
5.3 Erneuerbare Energien und Preisbildung im Strommarkt . . . 83

5.4 Erneuerbare Energien-Gesetz (EEG) und Förderinstrumente 91
5.4.1 Einführung 91
5.4.2 Förderinstrumente 93
5.4.3 Details zum Erneuerbare Energien-Gesetz 95
5.5 Wind- und Solarenergieerzeugung 100

1 Einleitung

In dieser Lehrveranstanltung wollen wir einige Grundkenntnisse zur Umweltökonomik und zu erneuerbaren Energien erwerben.

Im zweiten Kapitel werden wir die Grundbegriffe der Umweltökonomik kennenlernen bzw. wiederholen. Wir betrachten Begriffe, wie ökologische Systeme, Nachhaltigkeit, öffentliche Güter oder externe Effekte. Dabei berücksichtigen wir wichtige oekonomische Aspekte - das Marktversagen durch externe Effekte und die entsprechende (in der Regel) negative Auswirkungen auf die Umwelt. Im dritten Kapitel wollen wir die Möglichkeiten regulatorischer (bzw. politische) Eingriffe in den Markt oder das Ökosystem betrachten. Es werden Möglichkeiten analysiert, wie in bestimmten Situation externe Effekte verhindert werden können. Im vierten Kapitel betrachten wir den anthropogenen Einfluss auf das Klima bzw. den Klimawandel, im Kontext des vorherigen Kapitels. In diesem Kapitel betrachten wir auch den (europäischen) Emissionsrechtehandel (Stichwort CO_2-Zertifikate). Insgesamt kann dieses Kapitel auch als ein großes Anwendungskapitel der vorherigen betrachtet werden.

Ab dem fünften Kapitel betrachten wir die erneuerbaren Energien genauer, welche helfen können den anthropogenen Einfluss auf das Klima zu verringern - und somit auch helfen können, Umweltprobleme zu lösen.

2 Grundlagen der Umweltökonomik

Wie in jeder Wissenschaft, spielt die Beschreibung der Realität mit Hilfe von Modellen eine wichtige Rolle in der Umweltökonomie. Diese Modelle sind immer abstrakte Gebilde, die potentiell die Realität oder Teilaspekte beschreiben. Ferner, die Modelle werden nie perfekt die Realität beschreiben können und es wird immer eine gewisse Diskrepanz zwischen der Modellbeschreibung und dem was wir in der Realität betrachten, geben. Im Allgemeinen können wir sagen, dass ein Modell dann besser ist, wenn diese Diskrepanz bzw. die Abweichung zur Realität gering ist.

In den Umweltwissenschaften und insbesondere in der Umweltökonomie sind die betrachteten Sachverhalte in der Regel sehr komplex. Daher gestaltet sich in der Regel die Modellierung und die Beschreibung von umweltökonomischen Problemen als äußerst schwierig. Die meisten Modelle sind daher mit Vorsicht zu genießen. Dennoch ist die Modellierung von ökologischen und ökonomischen Problemen von hoher Relevanz, da sie zum besseren Verständnis beitragen.

2.1 Das ökologische System

Um Interaktionen in der Ökologie besser zu verstehen führen wir den Begriff des **ökologischen Systems** (auch kurz **Ökosystem**) ein. Aus der Modellierungsperspektive betrachten wir ökologische Systeme zunächst sehr allgemein und abstrakt, aber es hilft uns, die Komplexität der Problematik zu verstehen. Aus mathematischer Sicht ist ein ökologisches System nichts weiter als eine Menge von stochastischen Prozessen, die bestimmte Objekte mit ihren Eigenschaften und deren Interaktionen beschreiben. Das klingt zunächst sehr abstrakt, dennoch wollen wir es genauer verstehen, ohne tiefer in die Mathematik einzusteigen.

Ein ökologisches System beschreibt verschiedene Objekte. Diese **Objekte** charakterisieren das komplette Modell des ökologischen Systems. Nehmen wir ein erstes Beispiel:

Wir können beispielsweise ein ökologisches System betrachten, dass ein einfaches Aquarium beschreibt. Die relevanten Objekte könnten sein: Wasser, Fische, Algen, Boden. Dann hätten wir ein ökologisches System mit vier Objekten. Wir schreiben diese vier Objekte als eine Menge $\{\text{Wasser}, \text{Fische}, \text{Algen}, \text{Boden}\}$ auf. Dieses einfache Ökosystem ist in der Abbildung 1 illustriert.

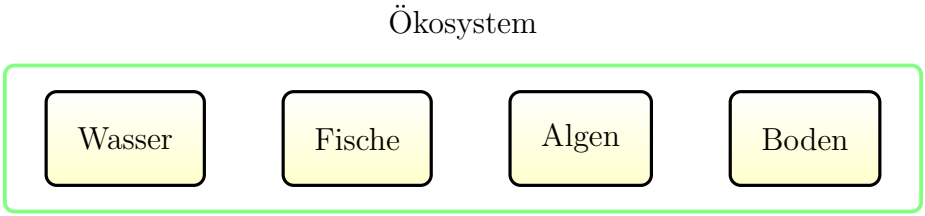


Abbildung 1: Ökologisches System Aquarium mit vier Objekten Interaktionen.

Die involvierten Objekte haben **Eigenschaften**, wie Masse, Populationsgröße, Farbe, sowie Geldwert. Im einfachsten Modellierungsfall hat jedes Objekt nur eine Eigenschaft, z.b. die Masse. Die Masse kann z.B. durch eine reelle Zahl beschrieben werden, also z.B. Aquarium $= \{\text{Wasser}, \text{Fische}, \text{Algen}, \text{Boden}\}$ mit Wasser=100kg, Fische=1kg, Algen=2kg, Boden=4kg. Damit hätten wir ein einfaches Ökosystem beschrieben.

Allerdings ist in der Regel die zeitliche Komponente in dem Aquarium-Beispiel komplett ausgeblendet. In der Modellierung wiederum, spielt die zeitliche Komponente eine wichtige Rolle, da der Zustand des (ökologischen Systems) des Aquariums sich über die Zeit hin ändert. Formal fügen wir dem Ökosystem selbst, sowie den Objekten ein Zeitindex t hinzu, der das Ökosystem zum Zeitpunkt t beschreibt. Im Aquarium Beispiel hätten wir z.B. $\text{Aquarium}_t = \{\text{Wasser}_t, \text{Fische}_t, \text{Algen}_t, \text{Boden}_t\}$. Wir könnten zum Beispiel zu einem Zeitpunkt $t = 1$ (z.B. gestern) Objekte mit den Eigenschaften Wasser_1=100kg, Fische_1=1kg, Algen_1=2kg, Boden_1=4kg und für $t = 2$ (z.B. heute) Wasser_2=100kg, Fische_2=1kg, Algen_2=1.7kg, Boden_2=3.8kg. In diesem Beispiel, hat sich die Algenmasse um 0.3kg verringert (z.B. gefressen von Fischen) und der Boden hat an 0.2kg Masse verloren (z.B. durch Nahrungsaufnahme der Algen). Der Zustand des Aquariums hat sich also offensichtlich von $t = 1$ zu $t = 2$ geändert, auch wenn die Objekte Wasser und Fisch unverändert blieben. Generell spielt die zeitliche Entwicklung von Ökosystemen eine große Rolle, um beispielsweise Ökosysteme bezüglich ihrer Nachhaltigkeit zu beurteilen.

2.2 Qualitative Darstellung von Ökosystemen

Diese Änderung kann häufig durch die **kausale Zusammenhänge** beschrieben und teilweise auch quantifiziert werden. So könnten in dem Ökosystem bspw. die Fische Algen fressen und somit die Algenmasse im Aquarium reduzieren. Wir könnten also in dem Modellrahmen die **qualitative** Aussage treffen: *Fische reduzieren den Algenbestand.* Dieser Aussage können wir entnehmen, dass Fische im Zeitpunkt t den Algenbestand im nächsten Zeitpunkt t+1 reduzieren werden. Kausale Zusammenhänge, die zwischen mindestens zwei Objekten stattfinden, bezeichen wir als eine **Interaktion**.

Ökologisches System Aquarium1:

1. *Fische fressen Algen*
2. *Algen nehmen Nährstoffe des Bodens auf*
3. *Fische bilden neuen Boden*

Eine grafische Darstellung des Ökosystems mit den entsprechenden kausalen Zusammenhängen 2. Jeder kausale Zusammenhang geht immer von (mind.) einem Objekt aus und beeinflusst (mind.) ein anderes Objekt. So fressen beispielsweise die Fische die Algen, d.h. die Interaktion zwischen Fischen und Algen geht von den Fischen aus. Daher ist in 2, die Interaktion zwischen Fischen und Algen durch ein Pfeil von Algen zu Fischen beschrieben. Dieser Pfeil beschreibt die Ausrichtung.

Es ist zu bemerken, dass die Anordnung der Objekte prinzipiell irrelevant ist. Jedoch hilft häufig eine gewisse Anordnung dem leichteren Verständnis (Bsp. Boden unten, Himmel oben, oder zentrale Objekte im Zentrum etc.).

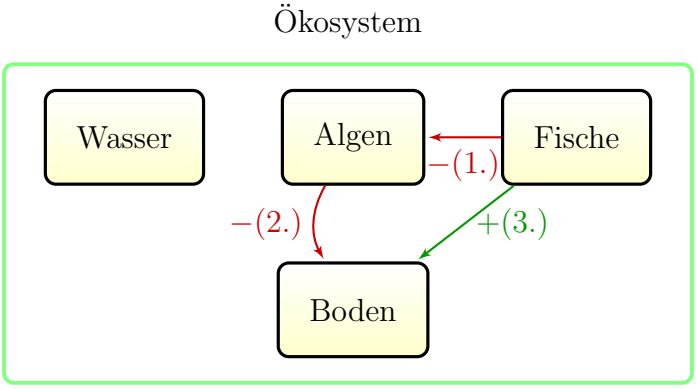


Abbildung 2: Ökologisches System Aquarium mit drei Interaktionen, rote Pfeile von A nach B symbolisiert 'A Reduziert B', grüne Pfeile von A nach B symbolisiert 'A erhöht B'.

Im Ökosystem Aquarium (2) interagiert das Wasser mit keinem anderen Objekt. Daher ist es bei der Analyse des Ökosystems irrelevant.

Bestimmte Objekte in einem Ökosystem werden Ressourcen genannt. Eine allgemein akzeptiere Definition gibt es nicht und hängt teilweise vom jeweiligen Kontext ab. In der Vorlesung betrachten wir solche Objekte im Ökosystem als **Ressource**, die von anderen Objekten verbraucht bzw. konsumiert oder genutzt werden können. Im Aquarium (2), sind das folglich die Algen (da sie von Fischen gefressen werden), sowie der Boden (da er Nahrung für Algen ist). In diesem Beispiel, sind die Fische und das Wasser keine Ressource, denn sie werden nicht verbraucht. Wichtig ist, dass Ressourcen auch abstrakte Objekte sein können. Ein klassisches, Beispiel in den Wirtschaftswissenschaften sind Humanressourcen (*en.: human resources*). Im Laufe der Vorlesung werden wir weitere abstrakte Ressourcen kennenlernen.

Wir nennen eine Ressource **regenerativ**, wenn sich ihre Menge im Zeitverlauf immer erhöht werden kann. Eine regenerative Ressource, deren Bestand sich selbständig über die Zeit erhöhen kann, nennen wir eine **natürlich regenerative** Ressource. Üblicherweise sind Lebewesen Beispiele für natürlich regenerative Ressourcen, da sie sich durch Fortpflanzung vermehren.

Wenn sich die Menge einer Ressource sich im Zeitverlauf nicht erhöhen kann, so nennen wir sie **erschöpflich**. Erschöpfliche Ressourcen, werden teilweise in der Literatur auch endliche Ressourcen genannt.

In dem Beispiel Aquarium (2) ist nur die Ressource Boden regenerativ, denn seine Menge kann sich durch die Fische erhöhen. Hierbei ist es relevant, dass die Fische selbst vorhanden sein müssen, um die Bodenmenge zu erhöhen. Allerdings ist der Boden nicht natürlich regenerativ, da er seinen Bestand nicht selbstständig erhöhen kann. Im Gegen-

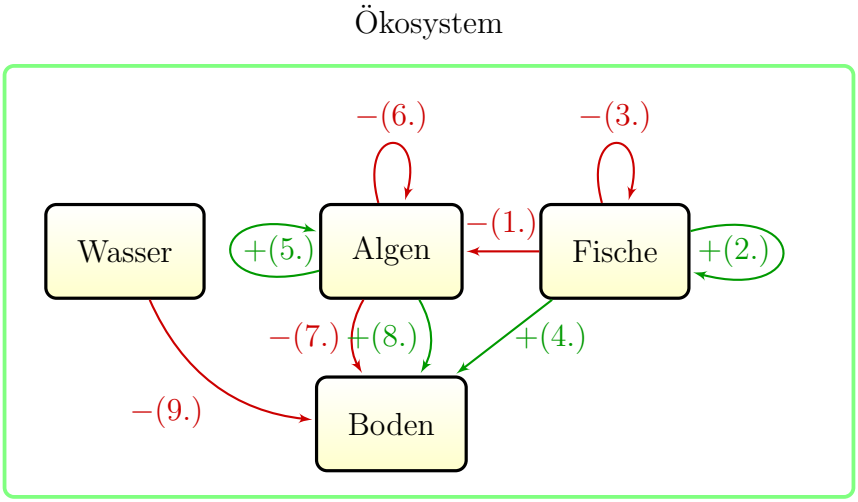


Abbildung 3: Ökologisches System Aquarium2.

satz dazu ist die Ressource Algen nicht regenerativ, denn ihr Bestand kann nicht erhöht werden, somit ist der Algenbestand endlich.

Allerdings sind die Aussagen wie *Fische wachsen und vermehren sich* oder *Fische sterben* eher qualitativer Natur. Erstere Aussage impliziert, dass sich der Fischbestand vom Zeitpunkt t zum Zeitpunkt $t+1$ erhöht, während für die zweite Aussage das Gegenteil gilt, also sich der Fischbestand vom Zeitpunk t zum Zeitpunkt $t+1$ verringert. Es ist somit unklar welche Gesamtreaktion für die Fischmenge folgt, also welcher der beiden Effekte den anderen dominiert.

Es handelt sich bei den Aussagen *Fische wachsen und vermehren sich* oder *Fische sterben* jedoch nicht um die Interaktionen, da die Objekte mit keinem anderen interagieren.

Wenn wir diese kausalen Zusammenhänge zu unserem Aquarium Modell hinzufügen erhalten wir ein komplexeres Ökosystem. Eine solche Beschreibung könnte zum Beispiel so aussehen:

1. *Fische fressen Algen*
2. *Fische wachsen und vermehren sich*
3. *Fische sterben*
4. *Fische bilden neuen Boden*
5. *Algen wachsen und vermehren sich*
6. *Algen sterben*
7. *Algen nehmen Bodennährstoffe auf*
8. *Algen bilden neuen Boden*
9. *Wasser löst Boden*

Dieses Ökosystem, welches in Abbildung 3 dargestellt ist, ist komplexer, und kann daher die Realität besser abbilden. Hier sind die Fische, die Algen und der Boden regenerative Ressourcen.

Das behandelte Modellierungskonzept bzw. Modell-Beschreibungskonzept ist als conceptual modeling bzw. conceptual model bekannt.

2.3 Quantitative Modelle

Wenn wir in einem Ökosystem beide qualitative Aussagen *Fische wachsen und vermehren sich* oder *Fische sterben* treffen, dann ist der Gesamteffekt für den Fischbestand zum Zeitpunkt $t+1$ nicht klar, da nicht bekannt ist, ob der Fischzuwachs oder Fischabgang

dominiert. Nur **quantitative Aussagen** treffen in solchen Fällen eine Aussage Demnach wäre eine quantitative Aussage z.B. der Fischbestand verdoppelt sich jede Zeitperiode oder jeder Fisch stirbt nach 2 Zeitperioden. Quantitative Aussagen können immer formalisiert werden. Die Wahl des quantitativen Modells kann erheblichen Einfluss auf das Modellverhalten haben.

Ausgehend vom obigen Aquarium- Beispiel könnte eine naive Quantifizierung 2 z.B. folgend aussehen:

1. Der Zustand der Algen wird wegen *Fische fressen Algen* von den Fischen geändert, daher
$$\text{Algen}_{t+1} = \text{Algen}_t - 0.3\text{Fische}_t$$
2. Der Boden wird durch *Algen nehmen Nährstoffe des Bodens auf* und *Fische bilden neuen Boden* beeinflusst, daher
$$\text{Boden}_{t+1} = \text{Boden}_t - 0.2\text{Algen}_t + 0.2\text{Fische}_t$$
3. Sowie die Gleichungen für Wasser und Fische:
$$\text{Wasser}_{t+1} = \text{Wasser}_t$$
$$\text{Fische}_{t+1} = \text{Fische}_t$$

Wenn das Aquarium-Beispiel $\text{Aquarium}_t = \{\text{Wasser}_t, \text{Fische}_t, \text{Algen}_t, \text{Boden}\}_t$ mit dann zum Zeitpunkt $t = 1$ z.B. Wasser_1=100kg, Fische_1=1kg, Algen_1=2kg, Boden_1=4kg hat, dann kann die Entwicklung des Ökosystems beschrieben werden. Für $t = 2$ folgt z.B. Wasser_2=100kg, Fische_2=1kg, Algen_2=1.7kg, Boden_2=3.8kg. Wenn wir weiterrechnen, erhalten wir für Fische, Algen und Boden die Entwicklung 4. Wir sehen, dass die

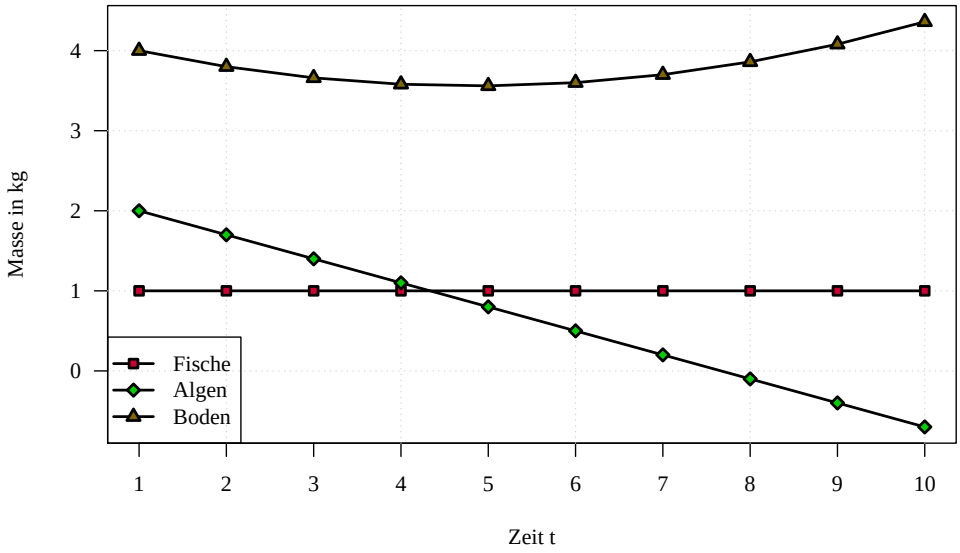


Abbildung 4: Beispiel von Ökosystem.

Fischmenge konstant über die Zeit bleibt. Ferner sehen wir, dass sich die Algenmasse kontinuierlich verringert (um 0.3kg pro Zeiteinheit). Dies führt dazu, dass ab $t = 8$ die Algenmasse im Aquarium negativ wird. Dies ist jedoch in der Realität nicht möglich, daher kann dieses Modell kein gutes Modell für die zeitliche Entwicklung von Algen in einem Aquarium sein. Wir sehen aber auch, dass sich am Anfang der zeitlichen Entwicklung (bis

$t = 5$) sich die Menge an Boden verringert, da relativ viele Algen dem Boden Nährstoffe entziehen; ab $t = 6$, kehrt sich diese Beziehung jedoch um und der Bodenbestand wächst ins unermessliche; dies ist auch unplausibel.

Es gibt häufig viele verschiedene Möglichkeiten, wie qualitative Aussagen in quantitative 'umgewandelt' werden können. Es ist ratsam, einzelne Gleichungen, die ein Ökosystem charakterisieren, immer kritisch zu hinterfragen. Die Entwicklung in 4 ist nur ein Beispiel für eine quantitatives Modell.

Komplexere Ökosysteme können ähnlich beschrieben werden. Eine Quantifizierung des komplexeren Ökosystems aus der Abbildung 3 kann beispielsweise plausiblere zeitliche Entwicklungen liefern. Eine mögliche Quantifizierung vom Ökosystem 3 könnte sich dann beispielsweise, wie in der Abbildung 5 dargestellt, entwickeln. [1] Wir sehen, dass sich

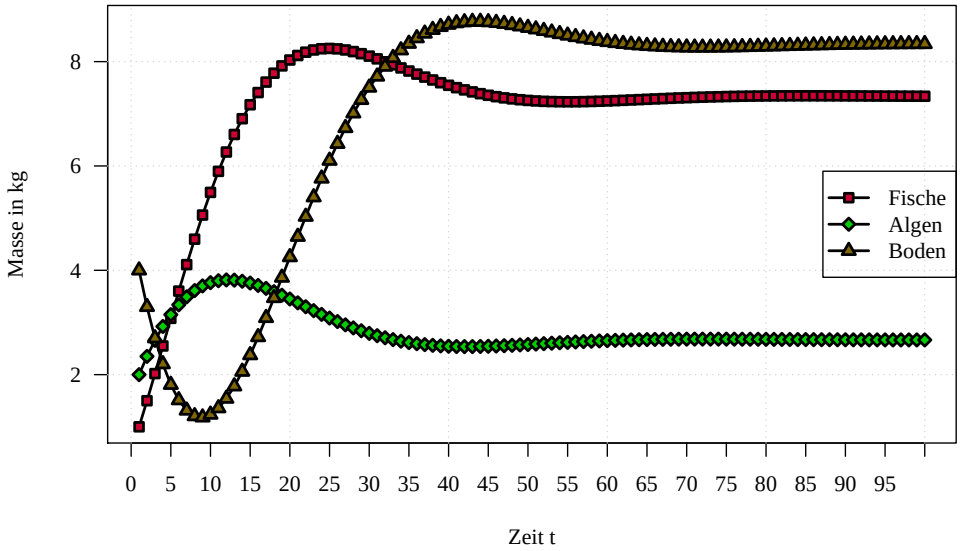


Abbildung 5: Beispielhafte Entwicklung von einem Ökosystem Aquarium für $t = 1, \ldots, 100$ für Algen, Fische und Boden.

die Fisch-, Algen- und Bodenbestand über die Zeit ändert. So gibt es Zeitabschnitte, in denen der Bestand der drei Ressourcen wächst und sinkt. Keine Ressource wird negativ, somit kann es ein plausibles Modell sein. Wenn keine der Ressourcen ins unermessliche wächst, nennen wir ein solches Ökosysten **stabil**, da es sich somit in einem Zustand des **Gleichgewichts** befindet. Falls zusätzlich keine der Ressourcen verschwindet bzw. aufgebraucht wird (d.h. mathematisch gesehen gegen null konvergiert), nennen wir ein stabiles Ökosystem **ökologisch strikt nachhaltig**, oder kurz **ökologisch nachhaltig**. Es ist leicht ersichtlich, dass 5 nicht nur ein stabiles ökologisches System ist, sondern auch ein ökologisch strikt nachhaltiges. Im Laufe der Vorlesung werden wir den Begriff der Nachhaltigkeit genauer beleuchten.

[1] Hier wurde die folgende Quantifizierung verwendet:

$$\begin{aligned}
\text{Algen}_{t+1} &= 0.5 + (1 - 0.05)\text{Algen}_t - 0.05\text{Fische}_t \\
\text{Boden}_{t+1} &= \text{Boden}_t - 0.2\text{Algen}_t + 0.2\text{Fische}_t - 0.1\frac{\text{Wasser}_t + 100\text{Boden}_t}{\text{Wasser}_t} \\
\text{Wasser}_{t+1} &= \text{Wasser}_t \\
\text{Fische}_{t+1} &= 0.2 + (1 - 0.1)\text{Fische}_t + 0.2\text{Algen}_t,
\end{aligned}$$

wobei Wasser_1=100kg, Fische_1=1kg, Algen_1=2kg, Boden_1=4kg.

Ein wichtiger Begriff für die Beurteilung der Stabilität bzw. des Gleichgewichtes eines Ökosystems ist das **Wachstum**. Dieser Begriff spielt auch in den Wirtschaftswissenschaften eine große Rolle, wenn auch in einem etwas anderem Blickwinkel. In quantitativen Modellen trifft man verschiedenste Arten des Wachstums, d.h. präzise formuliert, verschiedene mathematische Zusammenhänge, die das Wachstum charakterisieren. Die zwei klassischen Beispiele sind **lineares Wachstum** und **exponentielles Wachstum**. Wenn ein Ökosystem jedoch dauerhaft linear oder exponentiell wächst, kann es niemals stabil sein. Daher findet das Modell Konzept des **logistischen Wachstum** in der Ökologie eine große Anwendung, da es erlaubt mit relativ einfachen mathematischen Modellannahmen die relativ realistische Verhaltensweisen zu beschreiben. In der Abbildung 6 sind typische Wachstumsmuster für das lineare, exponentielle und logistische Wachstum dargestellt. Insbesondere letzteres wird in der Übung genauer behandelt.

Wenn wir beispielsweise die Masse oder die Energie eines Ökosystems modellieren, und die Gesamtmasse oder Gesamtenergie aller Objekte im ökologischen System über die Zeit konstant ist (präziser konstant sein muss), so sprechen wir von einem **geschlossenen Ökosystem** (der Begriff ist aus der Physik 'abgeschlossenes physikalisches System' abgeleitet). Wenn sich die Masse jedoch ändert (oder ändern kann), so sprechen wir von einem **offenen ökologischen System**. Bei dem Beispiel 5 handelt es sich um ein offenes Ökosystem. In geschlossenen Systemen spielen **Rohstoffkreisläufe** eine wichtige Rolle, und werden kontinuierlich in andere Rohstoffe umgewandelt. Klassische reale Beispiele sind der Wasserkreislauf und der CO_2-Kreislauf im Ökosystem Erde. Jedoch ist zu bemerken, dass nicht jedes Ökosystem mit einem Rohstoffkreislauf automatisch ein geschlossenes ökologisches System ist; die Existenz von Rohstoffkreisläufen ist jedoch eine notwendige Bedingung, damit ein geschlossenes Ökosystem ökologisch strikt nachhaltig sein kann.

Wir haben gesehen, dass in Ökosystemen die zeitliche Dimension dabei hilft, die Interaktionen zwischen den Objekten zu beschreiben. Jedoch sind in allgemeinen ökologischen Systemen die Objekte stochastischer Prozesse in der Zeit verändern können. Bisher haben wir die stochastische Komponente (bzw. Zufallskomponente) komplett vernachlässigt. Bisher haben wir nur **deterministische** Ökosysteme betrachtet, d.h. solche Systeme, die durch eine Quantifizierung inklusive Startbedingungen nur einen möglichen Entwicklungspfad aufweisen. Allgemein beschreiben wir daher $\text{Ökosystem}_t = \{X_{1,t}, X_{2,t}, \ldots, X_{N,t}\}$ für ein ökologisches System von N Objekten. Hierbei sind $X_{i,t}$ stochastische Prozesse, die Eigenschaften von Objekt i zur Zeit t beschreiben und die potentiell interagieren können.

Um ein Gefühl für den Einfluss von Unsicherheit in ökologischen Systemen zu bekommen, betrachten wir wieder das Auqariumbeispiel. Die Abbildung 7 zeigt eine mögliche Entwicklung des Ökosystems 3 mit einer stochastischen Komponente in der Quantifizierung. [2]

[2] Die stochastische Quantifizierung ist in dem Beispiel durch

$$\begin{aligned}
\text{Algen}_{t+1} &= U_{t+1} + (1-0.05)\text{Algen}_t - 0.05\text{Fische}_t \text{ mit } U_{t+1} \overset{\text{iid}}{\sim} \mathcal{U}(0,1) \\
\text{Boden}_{t+1} &= \text{Boden}_t - 0.2\text{Algen}_t + 0.2\text{Fische}_t - 0.1\frac{\text{Wasser}_t + 100\text{Boden}_t}{\text{Wasser}_t} \\
\text{Wasser}_{t+1} &= \text{Wasser}_t \\
\text{Fische}_{t+1} &= 0.2 + (1-0.1)\text{Fische}_t + 0.2\text{Algen}_t,
\end{aligned}$$

gegeben. Es ist genau das gleiche Modell wie zuvor in der Abbildung 5. Jedoch ist das Algenwachstum in jeder Periode durch eine gleichverteilte Zufallszahl zwischen 0 und 1 beschrieben, statt wie bisher immer 0.5. Als Resultat entwickelt sich das Ökosystem nicht deterministisch, denn der Bestand von Boden, Algen und Fischen entwickelt sich in Abhängigkeit von dem zufälligen Algenwachstum.

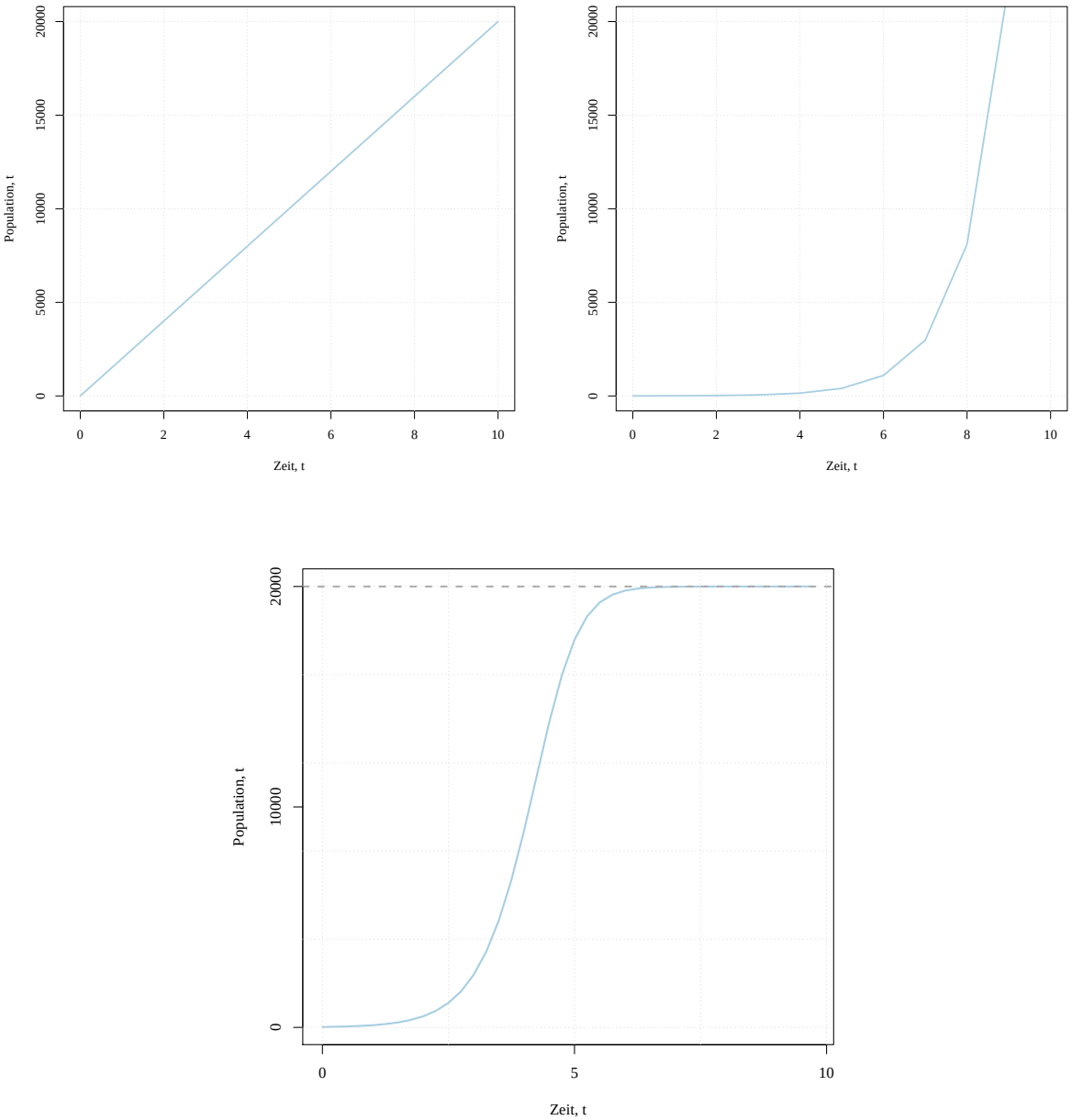


Abbildung 6: Beispiele für lineares Wachstum (oben links), exponentielles Wachstum (oben rechts) und logistisches Wachstum (unten).

Die Begriffe **stabil** und **ökologisch strikt nachhaltig** übertragen sich auf nicht-deterministische Ökosysteme. Für uns ist die genaue Definition nicht von höchster Priorität, jedoch wollen wir sie hier nennen: Ein (potentiell stochastisches) Ökosystem ist stabil, wenn Ökosystem$_t$ ein stationärer Prozess ist, bzw. $X_{i,t}$ für alle i stationär ist[3]. Es ist ökologisch strikt nachhaltig, wenn die Wahrscheinlichkeit, dass $X_{i,t}$ null wird, die Wahrscheinlichkeit 0 für alle i hat (D.h. jede Ressource wird sicher nicht null werden). Für uns ist es wichtig zu verstehen, dass das ökologische System in der Abbildung 7 stabil und sogar ökologisch strikt nachhaltig erscheint und das obwohl sich der Bestand der Ressourcen auf Grund von zufälligen Schwankungen ändert.

Wir haben gesehen, dass die formalen Zusammenhänge in der Regel immer komplexer

[3]Auf Grund von evtl. saisonalen Schwankungen reicht auch periodische Stationarität.

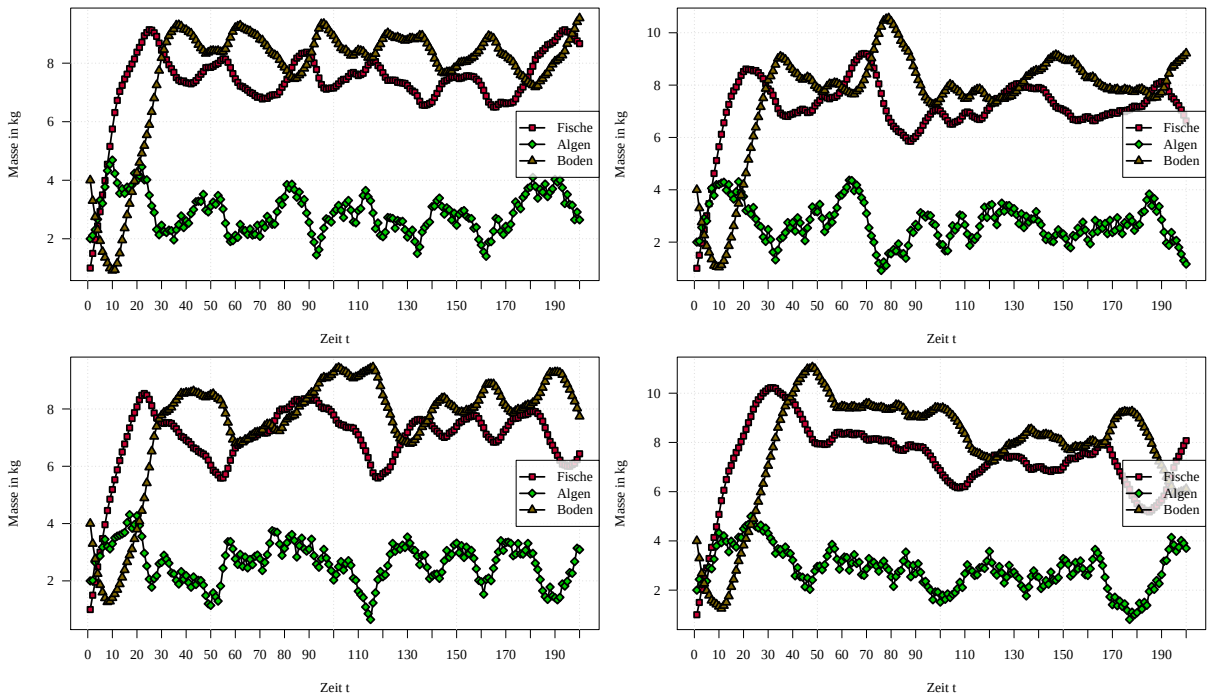


Abbildung 7: Beispiel vom Ökosystem Aquarium2 für $t = 1, \ldots, 200$ für vier unterschiedliche Realisierungen.

werden, um die Realität besser abbilden zu können. In dieser Vorlesung vertiefen wir jedoch nicht die mathematische Modellbildung von ökologischen Systemen. Wir werden jedoch spezielle Beispiele von ökologischen Systemen im Kontext der Umweltökonomik kennenlernen.

Am Abschluss des Abschnittes wollen wir ein Ökosystem betrachten, dass stärker zum Inhalt der Vorlesung passt.

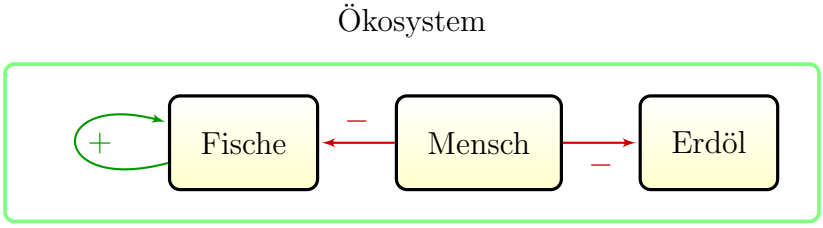


Abbildung 8: Ökologisches System mit den Objekten Mensch, Fische und Erdöl.

Hier sind Fische und Erdöl Ressourcen, da sie vom Mensch konsumiert werden. Jedoch sind nur Fische eine regenerative Ressource. Dennoch kann das Ökosystem stabil und sogar ökologisch strikt nachhaltig sein. Damit das System stabil ist, darf der Fischbestand nicht ins unendliche wachsen. Damit es ökologisch strikt nachhaltig sein kann muss der Konsum von der endliche Ressource Erdöl im langfristigen Zeitverlauf schnell genug sinken, damit das Erdöl nicht komplett verbraucht wird.

Die Realität bildet das Ökosystem natürlich nur sehr begrenzt ab, dennoch illustriert es die Probleme, die wir generell mit endlichen Ressourcen haben. Es gibt effektiv keine Möglichkeit, dass endliche Ressourcen in jedem Zeitpunkt t mit einer Mindestmenge konsumiert werden können. D.h. auf die Realität übertragen, wenn Erdöl eine endliche Ressource wäre, dann wäre es nicht möglich, dass die Menschheit für immer eine gewis-

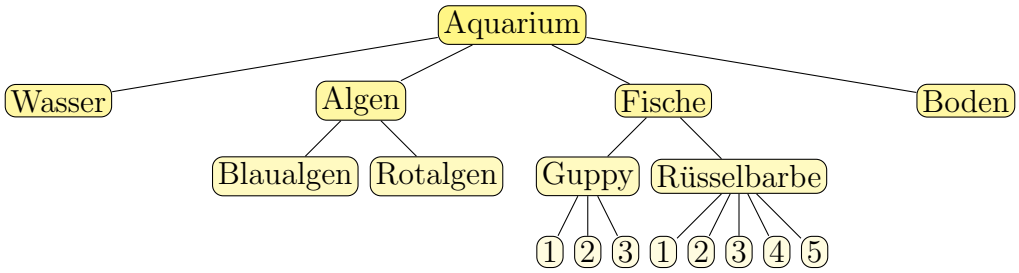


Abbildung 9: Beispielhafte hierarchische Struktur des Ökosystems Aquarium.

se Erdölmenge pro Zeiteinheit konsumiert. Natürlich gilt das nicht nur für das Beispiel Erdöl, sondern für jede endliche Ressource.

Allerdings können wir festhalten, dass Erdöl als Ressource in der Realität auch als regenerativ (im Sinne unserer Definition) betrachtet werden kann, denn wir können es mit entsprechendem Energieaufwand herstellen. Ferner entsteht Erdöl auch natürlich, jedoch ist dieser Prozess sehr, sehr langsam. Wir sehen, dass die Abgrenzung in der Realität teilweise nicht einfach ist. Die Beurteilung, ob eine Ressource regenerativ oder erschöpflich ist, hängt also immer vom gewählten Modell bzw. vom Ökosystem ab.

2.4 Hierarchische Struktur von Ökosystemen

Ökosysteme, die die Realität möglichst gut beschreiben sollen, sind in der Regel sehr komplex. Häufig stellt sich die Frage, ob Objekte in einem Ökosystem nicht zusammengefasst werden sollten, oder getrennt betrachtet werden sollten. In dem Aquarium-Beispiel könnte man Beispielsweise das Objekt Fische weiter in verschiedene Fischarten unterteilen, z.b. Guppys oder Rüsselbarbe, vorausgesetzt diese Fischarten leben im Aquarium. Objekte wie Guppys oder Rüsselbarbe könnten weiter unterteilt werden in z.B. in Männchen und Weibchen. Diese Zerlegung kann bis auf die einzelne Individuen-Ebene der Objekte durchgeführt werden. Insgesamt bildet sich **Hierarchie** der Objekte, die in der Abbildung 9 dargestellt ist. Die einzelnen Ebenen heißen auch Hierarchieebenen. Die Abbildung 9 stellt vier Hierarchieebenen dar, wobei die vierte Ebene die Individuen-Ebene ist. Die Individuen-Ebene stellt in den Umwelt- und Wirtschaftswissenschaften in der Regel die unterste Ebene dar, die betrachtet wird.

Wenn wir beispielsweise jedes Objekt auf unterster Hierarchieebenen im Ökosystem beschreiben, dann charakterisiert die Aggregation bzw. das Zusammenspiel der Objekte das gesamte Ökosystem. Dieses Vorgehen wird auch bottom-up Modellierungs-Ansatz genannt. Der bottom-up Ansatz entspricht einer Sichtweise der Mikroökonomie, bei der die einzelnen Individuen bzw. Marktteilnehmer, wie z.B. Unternehmen betrachtet werden.

Theoretisch ist ein Modell, das auf unterster Hierarchieebene definiert wird, immer allgemeiner und besser in der Lage die Realität zu beschreiben. Allerdings ist das Aufstellen und die Quantifizierung eines solchen Modells, welches die Relativität gut beschreibt, ist in der Regel äußerst schwer. Dennoch gibt es mit Hilfe moderner Simulations- und Datenverarbeitungstechniken auch in diesem Bereich immer mehr Fortschritte in der umweltökonomischen und umweltpolitischen Forschung.

Bei sehr großen ökologischen Systen (insb. den Planeten Erde oder gar das gesamte Sonnensystem) ist es jedoch in der Regel quasi unmöglich ein Modell zu erstellen, was die unterste Hierarchieebenen modelliert und die Realität gut beschreibt. Es kann jedoch ein Modell für höhere Hierarchieebene formuliert werden, dass die Realität ausreichend genau beschreibt.

Hat man ein Ökosystem für höhere Hierarchieebenen (z.B. Wasser, Algen, Fische, Boden) beschrieben, so kann man häufig mit Hilfe von (vereinfachten) Annahmen auch die Charakteristika von Objekten unterer Hierarchieebenen beschreiben. Dieser Ansatz wird dann **top-down** Ansatz genannt.

2.5 Güter und Nutzen

Wir haben bisher einige theoretische Aspekte von Ökosystemen kennengelernt. Die Objekte in Ökosystemen spielen dabei eine zentrale Rolle. Bisher haben wir jedoch alle Objekte in den Ökosystemen gleichrangig betrachtet. Wir wollen nun ein Konzept genauer kennenlernen, das den Menschen in den Mittelpunkt unserer Betrachtungen rückt. Dieses Vorgehen ist in den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften üblich, da sie generell das Handeln des Menschen in den Mittelpunkt rücken. Diese Betrachtungsweise darf aber durchaus kritisch betrachtet und hinterfragt werden. Natürlich kann man das Nutzenkonzept generell in Frage stellen, allerdings hilft es uns um überhaupt wissenschaftliche Aussagen zu treffen, die natürlich immer nur unter den Modellannahmen gelten.

In der Realität interagiert der Mensch mit den Objekten um ihn herum. In unserem Modellrahmen ist er ein Objekt, dass mit anderen interagiert. In den Wirtschaftswissenschaften, insbesondere in der Volkswirtschaftslehre, wird in der Regel ein Nutzenkonzept für die Beschreibung von Sachverhalten angewendet. Auch hier wollen wir das übertragen. So treffen wir die Annahme, dass jedes Ökosystem einen gewissen Nutzen hat. Dieser Nutzen des Ökosystems entspricht dem (gemeinsamen) Nutzen aller Menschen in dem Ökosystem und wird daher häufig auch **sozialer Nutzen** oder auch **Wohlfahrt** genannt. Wichtig ist, dass wir hier nur den direkten Nutzen der Menschen betrachten, nicht denen von anderen Individuen (z.B. Fische). So heißt es zwar nicht, dass das Wohlbefinden anderer Individuen keinen Einfluss auf den sozialen Nutzen haben, aber ihr potentieller eigener Nutzen wird hierbei nicht betrachtet. In der Ökologie werden solche Nutzenkonzepte teilweise angewendet, jedoch nicht in dieser Vorlesung.

Wir wollen zunächst genauer in das Nutzenkonzept im Ökosystemkontext erläutern. Jede Ressource mit der der Mensch interagiert (d.h. nutzt, konsumiert oder verbraucht), bezeichnen wir als **Gut**. Somit beschreiben alle Güter den Nutzen des Ökosystems. Im Folgenden nehmen wir an, dass es N Güter $\boldsymbol{G} = (G_1, \ldots, G_N)'$ im Ökosystem gibt, die den Nutzen charakterisieren.

Die Nutzenfunktion des Ökosystems, also der soziale Nutzen, ist also eine Funktion U die (potentiell) das gesamte Ökosystem zum Zeitpunkt t einen Nutzenwert zuweist, der eine reelle Zahl ist, formal $U(\boldsymbol{G})$ bzw. $\boldsymbol{G}_t$ wenn die zeitliche Abhängigkeit notiert wird.

Diese Nutzen ergibt sich aus allen Interaktionen in die der Menschen involviert ist. Dies ist in der Regel der Konsum oder Verbrauch von anderen Objekten. Jedoch kann auch der Mensch konsumiert bzw. verbraucht werden (z.B. von einem Krokodil gefressen, durch eine Krankheit beeinträchtigt, oder durch einen Autounfall getötet werden). Das Nutzenkonzept ist ein quantitatives Konzept und bedarf einer Quantifizierung des Ökosystems, auch wenn die funktionalen Zusammenhänge, die die Interaktionen beschreiben, nicht immer bekannt sein müssen.

Nehmen wir an, dass G_i das i-te Gut aus dem Gütervektor $\boldsymbol{G}$ ist. Wenn wir davon ausgehen, dass ein höherer Konsum von G_i den Nutzen erhöht, so wäre die partielle Ableitung von U, der **Grenznutzen** $\partial_i U$ positiv, formal $\partial_i U > 0$. Ferner, wird häufig **abnehmender Grenznutzen** unterstellt, d.h. der Konsum jeder zusätzlichen Einheit G_i erhöht den Nutzen immer weniger, formal durch $\partial_i \partial_i U = \partial_i^2 U < 0$ beschrieben. Mit diesen Eigenschaften können bereits teilweise Aussagen über das Ökosystem getroffen

werden, ohne dass eine explizite Funktionsannahme getroffen werden muss.

Um das alles besser einordnen zu können, betrachten wir das Ökosystembeispiel 8. Hier interagiert der Mensch mit genau zwei Objekten, mit den Fischen und dem Erdöl. Wir können also G_1 als Fisch und G_2 als Erdöl annehmen. Ein Beispiel für mögliche Nutzenfunktionen wären dann z.B. die Cobb-Douglas Nutzenfunktion:

$$U(G_1, G_2) = \alpha_0 G_1^{\alpha_1} G_2^{\alpha_2} \tag{1}$$

mit $\alpha_0 > 0$ und $0 < \alpha_i < 1$ für $i = 1, 2$. Eine andere mögliche Nutzenfunktionen wären dann z.B. die additive Polynomial-Nutzenfunktion:

$$U(G_1, G_2) = \alpha_1 G_1^{\alpha_2} + \alpha_3 G_2^{\alpha_4} \tag{2}$$

mit $\alpha_i > 0$.

Es ist klar, dass in einem solchen Ökosystem der Nutzen beliebig hoch werden könnte, wenn beliebig viel Fisch und Erdöl konsumiert werden könnte. Es gibt vor allem zwei Gründe, die dies verhindern: zum einen sind die Ressourcen G_i nur begrenzt zum Zeitpunkt t nur begrenzt verfügbar und zum anderen gibt es Konsumrestriktionen. So ist beispielsweise der Mensch nicht in der Lage beliebig viel zu konsumieren.

Wir haben oben die klassische Nutzenannahme in der Wirtschaftswissenschaft (positiver, abnehmender Grenznutzen) kennengelernt. Dieses dieses Verhalten wird als **positives Normalverhalten** für Gut G_i bezeichnet. In der Umweltökonomik haben wir jedoch viel mit diversen Gütern zu tun, bei denen es plausibel ist, dass der Nutzen aus einem erhöhtem Konsum fällt.

Darüberhinaus gibt es viele andere Möglichkeiten, wie der Zusammenhang zwischen dem Nutzen und dem Gut sein kann. Teilweise kippt auch dieses das Verhalten, wenn eine gewisse Sättigung eingetreten ist. Wir betrachten vorrangig folgende Güter-Nutzen-Relationen:

- **positives Normalverhalten in Gut** G_i:
  positiver, abnehmender Grenznutzen $\partial_i U > 0$, $\partial_i^2 U < 0$
  Beispiel: klassische Konsumgüter (z.B. Laptop)

- **negatives Normalverhalten in Gut** G_i:
  negativer, abnehmender Grenznutzen $\partial_i U < 0$, $\partial_i^2 U < 0$
  Beispiel: klassische Umweltgüter (z.B. Smog)

- **negatives Sättigungsverhalten in Gut** G_i:
  negativer, steigender Grenznutzen, $\partial_i U < 0$, $\partial_i^2 U > 0$
  Beispiel: spezielle Umweltgüter (z.B. radioaktiver Abfall)

- **Übersättigungsverhalten in Gut** G_i:
  positiver, abnehmender Grenznutzen bis $g_0 > 0$ $\partial_i U > 0$, $\partial_i^2 U < 0$; negativer, abnehmender Grenznutzen ab $g_0 > 0$ $\partial_i U < 0$, $\partial_i^2 U < 0$
  Beispiel: Überkonsumierbare Güter (z.B. Alkohol als Genussmittel)

Wenn eine Nutzenfunktion (nur) $\partial_i U < 0$ erfüllt, sprechen wir auch kurz von einem **negativen Verhalten in Gut** G_i. Natürlich gibt es weitere Kombinationen, allerdings sind hier die aufgelistet, die für uns eher relevant sind.

Die Kurve $I_U(u)$ aller Gütervektoren, die das gleiche Nutzenniveau u unter der Nutzenfunktion U haben, wird auch **Indifferenzkurve** genannt, formal wird dies wie folgt dargestellt: $I_U(u) = \{\boldsymbol{G} | U(\boldsymbol{G}) = u\}$. Es kann natürlich mehrere mögliche Gütervektoren

geben, die das gleiche Nutzenniveau u haben - d.h. aus der Sicht des sozialen Nutzens sind alle diese Gütervektoren gleichwertig. In der Ökonomie wird in der Regel versucht, dieses Nutzenniveau u zu maximieren, das heißt eine Nutzenoptimale **Allokation $\boldsymbol{G}$** zufinden. Hierzu hilft es in der Regel, sich für ein gegebenes Nutzenniveau u, die optimale Verteilung der Güter $\boldsymbol{G}$ anzuschauen. Auch in der Umweltökonomie wird diese Vorgehensweise angewendet.

2.5.1 Die Edgeworth-Box

Wir wollen dies an einem einfachen aber abstrakten 2-Güter Problem darstellen und besser verstehen. Dafür nehmen wir zunächst Güter mit positivem Normalverhalten.

Angenommen, wir haben ein Ökosystem in dem ein Angler (A) und ein Bauer (B) leben und beide Fische (G_1) und Getreide (G_2) konsumieren können. In der Abbildung 10 ist das Ökosystem mit seinen Interaktionen illustriert.

Wie die Fische und das Getreide produziert werden ist für uns in dieser Betrachtung irrelevant, daher modellieren wir dies nicht im Ökosystem.

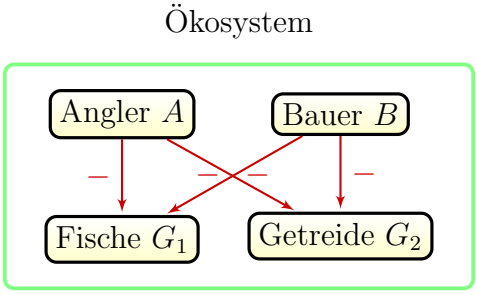


Abbildung 10: Ökologisches System mit den Objekten Angler, Bauer, Fische und Getreide.

Der Angler A und der Bauer B haben Nutzenfunktionen mit positivem Normalverhalten in beiden Gütern, z.B. die Cobb-Douglas Nutzenfunktionen $U_A(G_1, G_2) = \alpha_0 G_1^{\alpha_1} G_2^{\alpha_2}$ und $U_B(G_1, G_2) = \beta_0 G_1^{\beta_1} G_2^{\beta_2}$ oder auch eine additive polynomiale Nutzenfunktion mit $U_A(G_1, G_2) = \alpha_1 G_1^{\alpha_2} + \alpha_3 G_2^{\alpha_4}$ und $U_B(G_1, G_2) = \beta_1 G_1^{\beta_2} + \beta_3 G_2^{\beta_4}$. Der soziale Nutzen U (des Ökosystems) kombiniert nun beide Einzelnutzen miteinander[4]. Klassischerweise verwendet man schlicht die Summe $U = U_A + U_B$ oder auch das Produkt $U = U_A U_B$. Letztere aber nur, wenn sowohl U_A als auch U_B positiv sind.

Nun stellen sich im allgemeinen mehrere Fragen: Wenn wir jetzt ein soziales Nutzenniveau u erreichen wollen, wie sieht im Allgemeinen die optimale Allokation der Güter, die das Niveau u hat, aus? Und wenn wir die Güter $(G_1^{\max}, G_2^{\max})$ gegeben haben (z.B. weil der Angler $G_1^{\max}$ produziert und der Bauer $G_2^{\max}$), wie sieht dann die optimale Allokation aus und welches Nutzenniveau stellt sich ein? Unter welchen Umständen würde sich das soziale Optimum einstellen (lassen), wenn die aktuelle Allokation nicht optimal ist?

Zuerst stellen wir fest, dass beide, der Angler und der Bauer, Fische und Getreide konsumieren können und sich ihr Nutzen erhöht entsprechend ändert. D.h. aber vor allem auch, dass wir die Fische $G_{1,A}$, die der Angler konsumiert und die Fische $G_{2,B}$, die der Bauer konsumiert unterscheiden können. Das gleiche gilt natürlich auch für das Getreide. So können wir in $G_{2,A}$ und $G_{2,B}$ unterscheiden. Natürlich muss daher $G_1^{\max} \geq G_{1,A} + G_{1,B}$ und $G_2^{\max} \geq G_{2,A} + G_{2,B}$ gelten, denn beide können zusammen nicht mehr konsumieren, als insgesamt vorhanden ist. Die Teilung von G_i in in $G_{i,A}$ und $G_{i,B}$ führt eine gewisse

[4] formal jede Funktion g, die $g(x_1, y_1) \leq g(x_2, y_2)$ mit $(x_1, y_1)' \leq (x_2, y_2)'$

hierarchische Struktur ein, die Visualisierung in 10 kann zu 11 angepasst werden. Generell zeigt dieses Beispiel, dass Darstellungen von Ökosystemen variieren können.

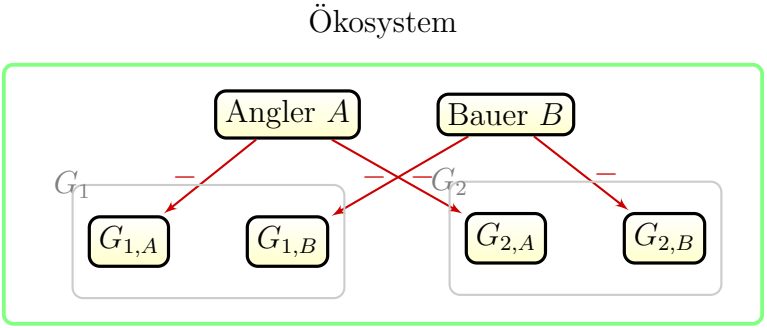


Abbildung 11: Ökologisches System mit den Objekten A, B, $G_{1,A}$, $G_{1,B}$, $G_{2,A}$ und $G_{2,B}$.

Da U monoton steigend in beiden Gütern ist ($\partial_1 U > 0$, $\partial_2 U > 0$), ist es immer optimal die voll sättige Menge Fische $G_1^{\max}$ und Getreide $G_2^{\max}$ zu konsumieren, denn ansonsten könnte U_A oder U_B durch den erhöhten Konsum, der noch verfügbaren Gütern das Nutzenniveau erhöhen. Somit gilt $G_1^{\max} = G_{1,A} + G_{1,B}$ und $G_2^{\max} = G_{2,A} + G_{2,B}$.

Es folgt

$$U(G_{1,A}, G_{2,A}) = U_A(G_{1,A}, G_{2,A}) + U_B(G_1^{\max} - G_{1,A}, G_2^{\max} - G_{2,A}).$$

Die optimale Allokation zu finden, heißt effektiv $G_{1,A}, G_{2,A}$ zu bestimmen, sodass $U(G_{1,A}, G_{2,A})$ maximal wird. Natürlich können wir nun versuchen mit bestimmten Optimierungsmethoden (insb. Lagrange-Ansatz, o.Ä.) das Optimum zu bestimmen. Dies wird auf Grund der allgemeinen Formulierung des Problems jedoch schnell sehr kompliziert und vermutlich scheitern. Selbst wenn wir explizite Werte für α_i und β_i festlegen, werden wir in der Regel keine explizite optimale Lösung für die Probleme finden.

Als Hilfsmittel dient hierbei die sogenannte **Edgeworth Box**. Dieses Hilfsmittel hat den Vorteil, dass es immer relativ leicht angewendet werden kann, und unabhängig von den Nutzenfunktionen, die zu Grunde liegen. Hierfür erstellen wir eine Koordinatensystem mit $G_{A,1}$ auf der x-Achse und $G_{A,2}$ auf der y-Achse. Da von A niemals mehr als $G_1^{\max}$ und $G_2^{\max}$ konsumiert werden kann, können wir das Koordinatensystem an den Stellen begrenzen und wir erhalten eine Box, die Edgeworth box. Um diese anschaulicher zu gestalten, ist die Tatsache, dass $G_i^{\max} = G_{i,A} + G_{i,B}$ gilt, von essenzieller Bedeutung. Denn gedanklich können wir auf den gegenüberliegenden Achsenabschnitten der Box die Güteranteile von $G_{B,1}$ und $G_{B,2}$ von B abbilden. Natürlich können wir jede Güterkombination $G_{A,1}$ und $G_{A,2}$ in die Edgeworth Box eintragen. Allerdings haben die Indifferenzkurven I_U, sowie I_{U_A} und I_{U_B} zu gewählten Nutzenniveaus besondere Bedeutung.

In der Abbildung 12 sehen wir Edgeworth-Boxen für $G_1^{\max} = 3$ und $G_2^{\max} = 5$ dargestellt für verschiedene Szenarien, inklusive I_U, sowie I_{U_A} und I_{U_B}. Die Indeferrenzkurven von A sind blau und jene von B sind grün dargestellt. Ferner sehen wir sog. Kontraktkurven, die wir später erläutern. In 12a sehen wir ein klassisches Bild. Hier liegt das globale Optimum bei etwa $(1.8, 2.1)'$. Die Indifferenzkurven $I_U(u)$ (gelb-rot) für verschiedene Nutzenniveaus u kreisen das Optimum ein. Dieser Fall ist ähnlich auch in 12d und 12b ersichtlich. Nur in 12c sieht die Grundstruktur etwas anders aus, hier gibt es zwei lokale Optima, in $(0, 0)$ und $(G_1^{\max}, G_2^{\max}) = (3, 5)$, wobei nur ersteres das soziale Optimum ist. Es erscheint etwas widersinnig, dass das Optimum eine Randlösung ist, bei dem ein Objekt (hier A) alles erhält. Dieses generelle Problem tritt vor allem auf, wenn

die Cobb-Douglas Nutzenfunktion (mit einer multiplikativen Grundstruktur) nachträglich additiv aggregiert wird. Es zeigt vor allem auch, dass die Wahl von Nutzenfunktionen das Ergebnis und somit die Schlüsse erheblich beeinflussen kann. Wir beachten, dass wir bei allen Szenarien U_A und U_B ein positives Normalverhalten in den Gütern haben, und somit ist allein das quantitative Design ausschlaggebend für die unterschiedliche Struktur.

Wir sehen auch, dass die Indifferenzkurven I_{U_A} und I_{U_B} auf allen Graphen in 12 die gleiche Struktur haben, I_{U_A} ist immer konvex und I_{U_B} immer konkav. Die Indifferenzkurven $I_{U_A}(u_A)$ und $I_{U_B}(u_B)$, welches zum Güterbündel $(G_1, G_2) = (G_1^{\max}, G_2^{\max})/2 = (1.5, 2.5)$ korrespondiert, also $u_A = U_A(1.5, 2.5)$ und $u_B = U_B(1.5, 2.5)$, sind farblich hervorgehoben. Die von den beiden Kurven eingegrenzte Fläche beschreibt den Bereich aller möglichen **Pareto-Verbesserungen**, d.h. alle möglichen Allokationen, die sowohl U_A und U_B (und somit auch U) nicht verringern. Alle diese Punkte wären für eine Umverteilung für beide Seiten A und B attraktiv und gegenüber der Ausgangslage zu bevorzugen.

Ferner sehen wir in 12 die **Kontraktkurve**, welche alle pareto-optimalen Lösungen enthalten. Es sind also alle Allokationen, bei denen der Nutzen U nicht erhöht werden kann ohne U_A oder U_B zu verringern. D.h. alle Lösungen, die sich unter optimalen Tauschbedingungen von alleine zwischen A und B einstellen würden. Wir beobachten darüber hinaus, dass das globale Nutzenoptimum auch immer auf der Kontraktkurve liegt, somit also auch eine pareto-optimale Lösungen darstellt. Andersherum sind die pareto-optimale Lösungen auf der Kontraktkurve im Allgemeinen natürlich nicht global nutzendoptimal. D.h. im Allgemeinen wird sich selbst unter optimalen Tauschbedingungen zwischen A und B (entspricht im wesentlichen dem freien Handeln) das globale Nutzenoptimum nicht einstellen.

Wir haben die Edgeworth-Box für Güter mit positivem Normalverhalten analysiert. Jetzt betrachten wir in der Abbildung 13 das Verhalten von Gütern, die ein anderes Verhalten aufweisen. Dabei nehmen wir additive Nutzenkombination $U = U_A + U_B$ an. Die Nutzenfunktionen U_A und U_B haben immer ein positives Normalverhalten im Gut G_1 und ein potentiell abweichendes im Gut G_2.

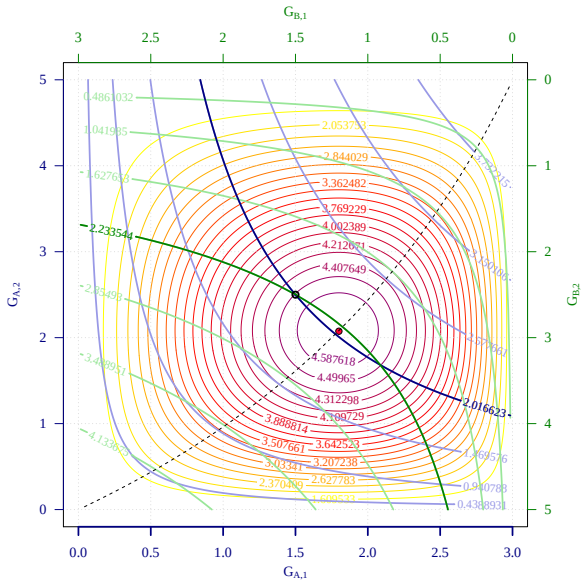
In 13a sehen wir eine Edgeworth-Box, wenn U_A ein Übersättigungsverhalten in G_2 hat und B ein positives Normalverhalten in G_2 aufweist. 13d zeigt eine Situation in dem beide Nutzenfunktionen U_A und U_B ein Übersättigungsverhalten in G_2 haben. In 13c hat U_A ein negatives Verhalten in G_2 und U_B ein positives; in 13b haben sowohl U_A als auch U_B ein negatives Verhalten in G_2.

Wir beobachten im Allgemeinen ein ähnliches Verhalten in der Abbildung 13 sowie in der Abbildung 12. So gibt es wieder ein globales Nutzenoptimum, das auf der Kontraktkurve liegt. Die Indiferrenzkurven $I_{U_A}(u)$ und $I_{U_B}(u)$ haben teilweise andere Krümmungen, trotzdem übertragen sich im Wesentlichen alle Eigenschaften von vorher.

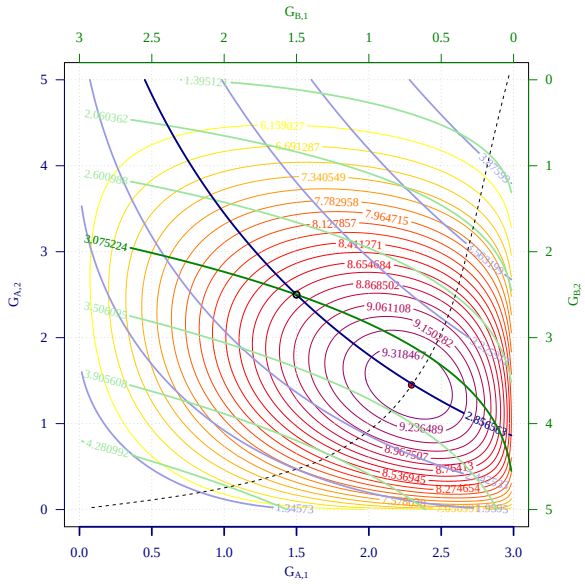
Allerdings ergeben sich teilweise Randlösungen, wie z.B. in 13c. Hier hat U_A ein negatives Verhalten in G_2, d.h. A möchte möglichst nichts von diesem Gut konsumieren. Im Gegenzug dazu hat U_B ein positives Verhalten in G_2, somit möchte er möglichst viel von diesem Gut konsumieren. Die triviale Lösung lässt natürlich B das Gut G_2 vollständig konsumieren, wie in 13c dargestellt.

In unserer Gesellschaft helfen Marktmechanismen, die Allokationen vorzunehmen, die wir eben besprochen haben. Dies beleuchten wir im kommenden Abschnitt etwas genauer.

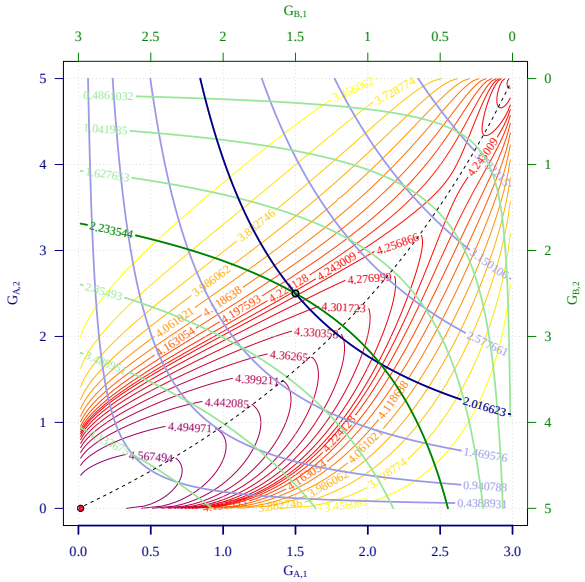
Die Edgeworth Box kann auch genutzt werden, um spieltheoretische Probleme in den Verhandlungen aufzuzeigen.



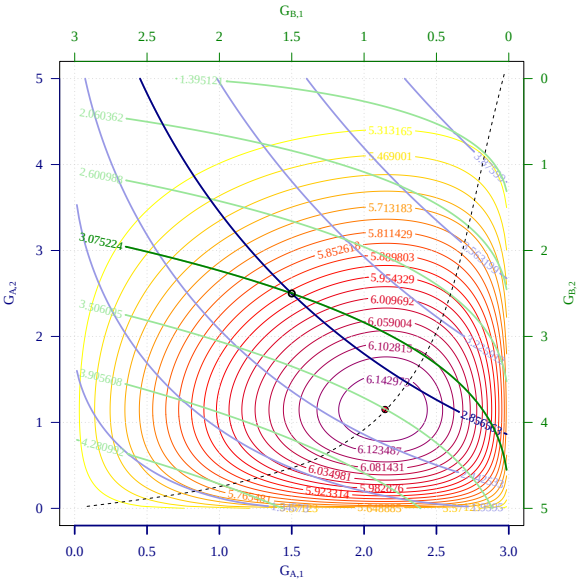
(a) $U = U_A U_B$ mit $U_A(G_1, G_2) = G_1^{0.6} G_2^{0.5}$ und $U_B(G_1, G_2) = G_1^{0.4} G_2^{0.7}$



(b) $U = U_A U_B$ mit $U_A(G_1, G_2) = G_1^{0.6} + G_2^{0.5}$ und $U_B(G_1, G_2) = G_1^{0.4} + G_2^{0.7}$

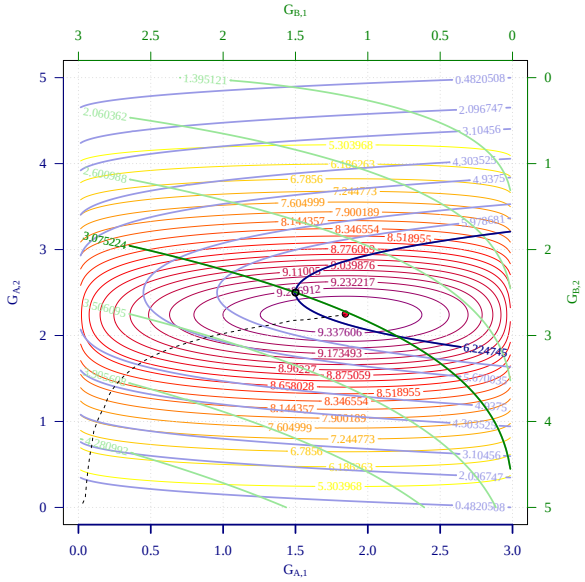


(c) $U = U_A + U_B$ mit $U_A(G_1, G_2) = G_1^{0.6} G_2^{0.5}$ und $U_B(G_1, G_2) = G_1^{0.4} G_2^{0.7}$

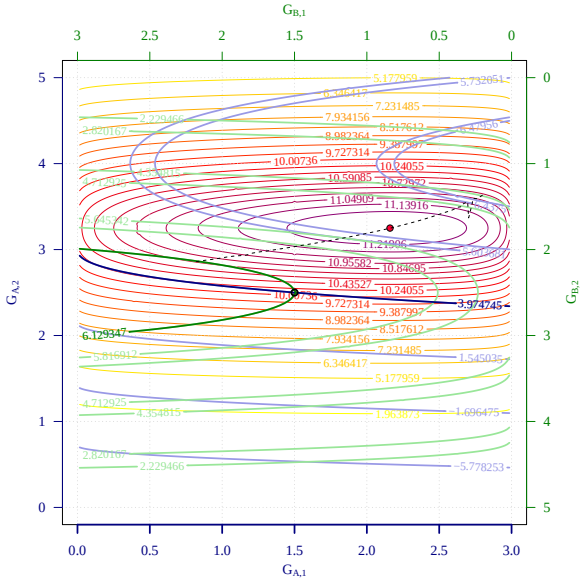


(d) $U = U_A + U_B$ mit $U_A(G_1, G_2) = G_1^{0.6} + G_2^{0.5}$ und $U_B(G_1, G_2) = G_1^{0.4} + G_2^{0.7}$

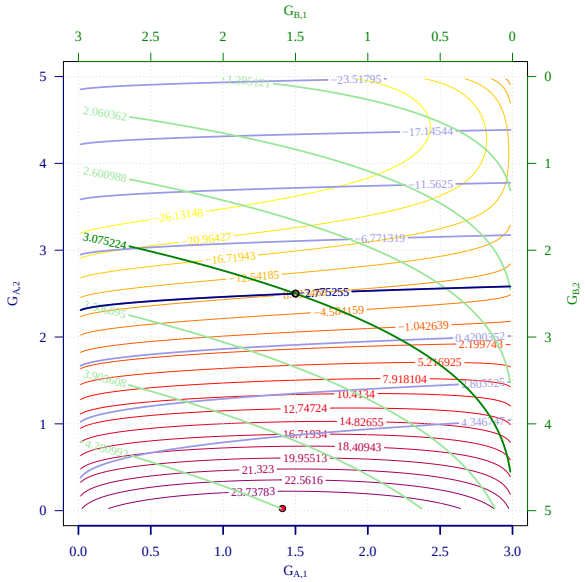
Abbildung 12: Edgeworth Boxen mit Indifferenzkurven $I_U(u)$ für gewählte u (gelb-rot) mit globalem Optimum (roter Punkt), Indifferenzkurven $I_{U_A}(u)$ für A (blau) und $I_{U_B}(u)$ für B (grün) für jeweils gewählte Nutzenniveaus u, und der Kontraktkurve (schwarz gestrichelt). für verschiedene Nutzenszenarien.



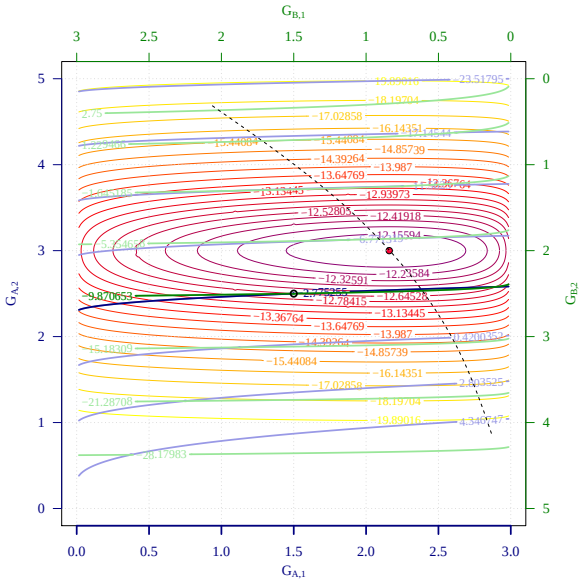
(a) $U = U_A U_B$ mit $\partial_2 U_A(g) > 0$ für $g > g_0 = 1.5$ und $\partial_2 U_A(g) < 0$ für $g > g_0 = 1.5$ und $\partial_2 U_B > 0$ (U_A Sättigung und U_B positiv in G_2)



(b) $U = U_A U_B$ mit $\partial_2 U_A(g) > 0$ für $g > g_{A,0} = 2.5$ und $\partial_2 U(g) < 0$ für $g > g_{A,0} = 2.5$ und $\partial_2 U_B(g) > 0$ für $g > g_{B,0} = 2.5$ und $\partial_2 U(g) < 0$ für $g > g_{B,0} = 2.5$ (U_A, U_B Sättigung in G_2)



(c) $U = U_A + U_B$ mit $\partial_2 U_A < 0$ und $\partial_2 U_B > 0$ (U_A negativ in G_2, U_B positiv in G_2)



(d) $U = U_A + U_B$ mit $\partial_2 U_A < 0$ und $\partial_2 U_B < 0$ (U_A, U_B negativ in G_2)

Abbildung 13: Edgeworth Boxen mit Indifferenzkurven $I_U(u)$ für gewählte u (gelb-rot) mit globalem Optimum (roter Punkt), Indifferenzkurven $I_{U_A}(u)$ für A (blau) und $I_{U_B}(u)$ für B (grün) für jeweils gewählte Nutzenniveaus u, und der Kontraktkurve (schwarz gestrichelt). für verschiedene Nutzenszenarien.

2.5.2 Temporales Nutzenproblem.

Wir haben ausführlich die Edgeworth-Box angeschaut und uns die mit Zusammenhänge zwischen den Nutzenfunktionen und den Gütern vertraut gemacht. In diesem Kapitel haben wir bereits kennengelernt, dass die zeitliche Komponente in Ökosystemen eine große Rolle spielen Kann. Daher studieren wir in diesem Abschnitt ein Beispiel, das diese Relevanz verdeutlicht. Es ist in den ersteren Kapiteln eher von untergeordneter Bedeutung, wird aber in den Kapiteln zu erneuerbaren Energien relevanter.

Dafür betrachten wir ein einfaches Ökosystem mit einem Bauer, der ein Gut G (z.B. Getreide) produziert und konsumiert. Die Nutzenfunktion U hängt nur von G ab und weißt ein positives Normalverhalten auf. Nun nehmen wir an, dass die Produktion von G über die Zeit hin schwankt, weil der Bauer zum Beispiel im Sommer mehr erntet als im Winter. Wir könnten annehmen, dass sich der Getreidevorrat im Sommer um g_S erhöht und im Winter um g_W erhöht, wobei $g_W < g_S$ ist. Es könnte Sinn ergeben für den Bauern, ein Teil der großen Getreidemenge g_S nicht im Sommer zu konsumieren, sondern im Winter. D.h. er könnte πg_S im Sommer konsumieren ($0 \leq \pi \leq 1$) und $(1-\pi)g_S$ einlagern/speichern und im Winter zusammen mit g_W zu konsumieren. Wenn man jedoch annimmt, dass bei der Lagerung nur noch ein Anteil $0 \leq \delta \leq 1$ konsumierbar bleibt, so kann der Bauer im Winter nur $\delta(1-\pi)g_S + g_W$ konsumieren.

Der gesamte Nutzen über das Jahr (mit zwei Zeiteinheiten Sommer und Winter) wäre dann bei einer additiven Zeitaggregation der Nutzen

$$U = U_S(G_S) + U_W(G_W) = U_S(\pi g_S) + U_W(\delta(1-\pi)g_S + g_W).$$

Die Frage ist nun, wie viel Getreide der Bauer einlagern sollte, also: was ist das nutzenoptimale π? Natürlich ist das nur in Spezialfällen analytisch lösbar. Ein solches Problem ist aber immer numerisch lösbar, dennoch geben wir hier ein analytisch lösbares Beispiel an:

Für $U_S(G) = U_W(G) = \sqrt{G}$ folgt (nach $\frac{\partial U}{\partial \pi} \stackrel{!}{=} 0$), dass

$$\pi^* = \min\left\{\frac{g_S(\delta g_S + g_W)}{(-g_S - \delta g_S)(-\delta g_S)}, 1\right\} = \min\left\{\frac{\delta g_S + g_W}{g_S(1+\delta)\delta}, 1\right\}$$

So ergibt sich für $g_S = 10$, $g_W = 1$ und $\delta = 0.8$ $\pi^* = 0.625$. Somit wird eine echte Lagerung vorgenommen und im Sommer nur 62.5% des Getreides konsumiert, obwohl 20% des Getreides verloren gehen. Das Nutzenniveau ist dann $U(\pi^*) = 4.5$ und echt größer als $U_S(10) + U_W(1) \approx 4.16$.

Wir müssen beachten, dass das temporale Beispiel ein sehr vereinfachtes ist. So hatten wir beispielsweise eine restriktive Annahme, dass die Nutzenfunktionen im Winter und im Sommer gleich sind, also $U_S = U_W$ gilt. Dies muss natürlich nicht gelten, denn Präferenzen könnten sich über die Zeit hin ändern.

Das Beispiel illustriert die Wichtigkeit der zeitlichen Komponente auch mit dem Bezug auf die Lagerung/Speicherung. Durch Lagerung/Speicherung und temporären Verzicht auf Konsum kann häufig der Gesamtnutzen erhöht werden, wenn starke Schwankungen in der Verfügbarkeit der Güter vorliegen. Dies spielt insbesondere in Ökosystem welche in der Energiewirtschaft wichtig sind eine Große Rolle. Es ist leicht vorstellbar, dass sich diese Bedeutung erhöht, wenn die Verfügbarkeit von Gütern zufällig ist, z.B. wegen meteorologischen Schwankungen.

Der letzte Punkt den wir hier ansprechen wollen ist der zeitliche Rahmen. In dem Beispiel hatten wir zwei zeitlich getrennte Zeitpunkte Sommer und Winter, die wir zusammenhängend optimiert haben. Im Allgemeinen kann man das auch als U_1 und U_2

bezeichnen (in unserem Beispiel $U_t = U_S$ für $t = 1$ und $U_{t+1} = U_W$ für $t = 2$). Nun könnten wir natürlich eine Analyse eines Ökosystems nicht nur über zwei Zeiteinheiten durchführen, sondern über T Zeiteinheiten, also z.B. $U_1, \ldots, U_T$ betrachten. Wir können wieder aggregierte Optimierung über die Zeit durchführen, ähnlich wie wir bereits über verschiedene Personen aggregiert haben. Meistens wird in der Literatur additiv aggregiert, d.h. der soziale Nutzen $\mathcal{U}_T$ bis zum Zeitpunkt T ist eine Summe der Einzelnutzen U_t. Auf Grund von Skalierungsproblemen wird häufig statt der blanken Summe, das arithmetische Mittel verwendet, um eine leichtere Interpretation zu ermöglichen:

$$\mathcal{U}_T = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} U_t.$$

Im obigen Beispiel wäre also $\mathcal{U}_2 = U = U_S + U_W$.

Selten, wird für positive Nutzen aber auch ein multiplikatives Konzept angewendet. Auch, dann hätten wir in der skalierten Variante

$$\mathcal{U}_T^{\text{mult}} = \left(\prod_{t=1}^{T} U_t \right)^{1/T}.$$

Die $1/T$-te Potenz (T-te Wurzel), sie dient der Skalierung und dem Erhalt von Einheiten. Natürlich beeinflusst auch hier wieder die Art der Aggregation die Eigenschaften eine Modells für ein Ökosystem.

Die Wahl von T hängt natürlich stark vom Blickpunkt auf das Problem ab. Aus theoretischer Sicht, macht es aber durchaus Sinn, hier den Grenzwert von U_T zu betrachten. D.h. vereinfacht gesagt, den durchschnittlichen Nutzen $\mathcal{U}_T$ bis zu Zeitpunkt T weit in der Zukunft zu betrachten. Daher definieren wir $\mathcal{U}_\infty = \lim_{T\to\infty} \mathcal{U}_T$ als entsprechenden Grenzwert. Für die Definition von Nachhaltigkeit wird dieses Konzept eine Rolle spielen.

2.5.3 Güterrestriktionen

Wir hatten bereits kurz erwähnt, dass es teilweise Konsumrestriktionen bei Gütern gibt. In der Literatur, werden die Güter häufig auch nach ihren **Konsumrestriktionen** klassifiziert. Die Konsumrestriktionen, gehen dabei teilweise von Eigenschaften des zu konsumierenden Gutes aus (**gutinduziert**), sowie teilweise von den Eigenschaften des Konsumenten selbst (**konsuminduziert**).

Die wohl wichtigste Konsumrestriktion findet über Preismechanismen, die wir im nächsten Abschnitt genauer betrachten. Es kann aber auch sein, dass man ein Gut nur an einem bestimmten **Ort** oder zu einer bestimmten **Zeit** konsumieren kann. So gibt es Güter, deren Verfügbarkeit stark saisonal ist, zum Beispiel im Winter anders als im Sommer. So ist in Deutschland beispielsweise, weniger saisonales Obst und Gemüse im Winter, als im Sommer verfügbar. Dafür kann im Winter besser Wintersport konsumiert werden, da es mehr Schnee in den Gebirgen gibt. Der Ort spielt natürlich auch eine wichtige Rolle. So ist in Deutschland beispielsweise das Baden im Meer nur an der Nord- und Ostsee möglich. Hier sehen wir, dass die **Transportierbarkeit** von Gütern auch eine große Rolle spielt. Es gibt einige Güter, die sind nicht transportierbar und andere, die sind unter einem gewissem Aufwand transportierbar.

Anders herum, kann es sein dass bestimmte Eigenschaften des Konsumenten ihm von Konsum des Gutes ausschließen, wie z.B. das Alter bei Kinobesuchen oder Vorsorgeuntersuchungen beim Arzt.

Jetzt wollen wir die in der Umweltökonomie üblichste Klassifikation von Konsumgütern kennenlernen. Die üblichste Klassifizierung bezieht sich auf die **Rivalität** und **Ausschließbarkeit** (**Exklusion**) von Konsumgütern. Der **Rivalitätsgrad** R und der **Exklusionsgrad** E definiert die entsprechende Einordnung. Im vereinfachten Fall gibt es nur zwei Rivalitäts- und Exklusionsgrade. Im Rivalitätsfall wären das die beiden Klassifizierungen *keine Rivalität* mit $R = 0$ und *Rivalität* $R = 1$, im Exklusionsfall enstprechend *keine Exklusion* $E = 0$ und *Exklusion* $E = 1$. Ein rivales, exklusives Gut nennen wir **privates Gut**; ein rivales, nicht exklusives Gut nennen wir **Allmendegut** (auch common pool resources); ein nicht rivales, exklusives Gut, nennen wir **Klubgut**; und ein nicht rivales, nicht exklusives Gut, nennen wir **öffentliches Gut** (auch public goods).

In Tabelle (1) sind diese mit typischen Beispielen hierzu zusammengefasst.

	keine Rivalität ($R = 0$)	Rivalität ($R = 1$)
keine Exklusion ($E = 0$)	öffentliches Gut *z.B. Luft, öffentlicher Park*	Allmendegut *z.B. volle Fußgängerzone*
Exklusion ($E = 1$)	Klubgut *z.B. UEE-Vorlesung*	privates Gut *z.B. Essen, Luxusgüter*

Tabelle 1: Übersicht von Güterklassen nach binärer Rivalitäts- und Exklusionsklassifizierung mit Beispielen.

Wie man bereits deutlich erkennen kann, spielen in der Umweltökonomik vor allem öffentliche Güter und Allgemeingüter eine große Rolle. Letztere werden teilweise auch unreine öffentliche Güter genannt. Daher beschäftigt sich die Umweltökonomik vorrangig mit dem Problem die aus der freien Verfügbarkeit (keine Rivalität) von Gütern resultieren.

2.6 Ökonomische Aspekte im Ökosystem und externe Effekte

Wir habe Ökosystem kennen gelernt und begonnen die Rolle von Ressourcen und Gütern zu analysieren. Für das Nutzenkonzept und das Bewerten von Ökosystemen sind dabei immer die Güter in ihm relevant. Wir haben allerdings noch nicht thematisiert, wie bestimmte Güterallokationen können beeinflusst werden können. Ein sehr mächtiger Allokationmechanismus in unserer Gesellschaft ist das Marktsystem, auch kurz **Markt**. In unserem Wirtschaftssystem ist dieser Marktmechanismus die Marktwirtschaft, die teilweise vom Staat reguliert wird. Hierbei sind einige Güter potentiell handelbar und es werden ihnen Marktwerte zugeordnet. Diese Güter mit einem Marktwert nennen wir **Kapitalgüter** oder auch kurz **Kapital**. Wir halten fest, dass jedes Kapital ein Gut ist, und jedes Gut eine Ressource. Diese Beziehung, die in der Abbildung 14 als Mengendiagramm dargestellt ist, gilt aber nicht umgekehrt. Es ist zu beachten, dass die Begriffe Ressource, Gut und Kapital in der Literatur nicht einheitlich verwendet werden. Daher ist bei dem Studium anderer Literatur immer die Definition der Begriffe zu prüfen.

Für Kapitalgüter ist die Zuordnung des Marktwertes elementar. Er erlaubt, dass Güter durch die Verwendung eines Tauschmittels auch zeitlich unabhängig von einander getauscht werden können. Als Tauschmittel wird üblicherweise Geld betrachtet und dies wollen wir auch in dieser Vorlesung tun. Somit kann jedem Kapitalgut ein Geldwert zugeordnet werden.

Der Markt erlaubt den Marktteilnehmern ein leichteres tauschen von Kapitalgüter, insbesondere wenn es viele Kapitalgüter, wie in der Realität gibt. Durch Markmechanismen können, wie bereits in der Edgewort- Box gesehen, sich pareto-optimale Allokationen einstellen. Dies funktioniert zwar nur unter bestimmten Voraussetzungen pareto-optimal

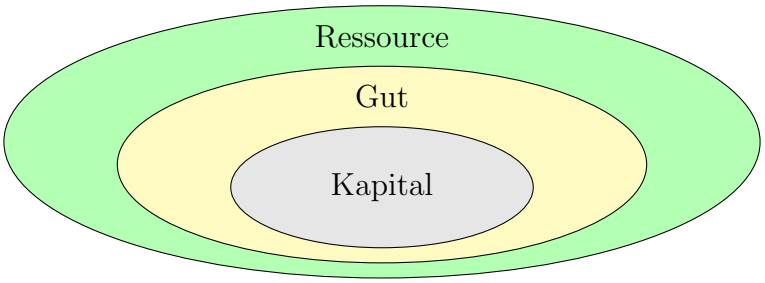


Abbildung 14: Mengendiagramm von Kapital, Gut und Ressource

(z.B. **vollkommener/perfekter Markt** [5]), dennoch erlaubt es Nutzenverbesserungen der Marktteilnehmer. Wenn im folgenden Rest des Skriptes nichts näher spezifiziert ist, gehen wir immer vom perfekten Markt aus. Wir erinnern uns, dass der perfekte Markt ein Gleichgewichtsmodell ist, insbesondere wird dabei die durchaus relevante zeitliche Komponente ignoriert und nur Eigenschaften des stabilen Gleichgewichtes bzw. des stabilen Ökosystems analysiert.

Die Marktteilnehmer sind Produzenten, die Kapitalgüter produzieren und diese am Markt verkaufen, und Konsumenten, die Kapitalgüter kaufen und konsumieren. Produzenten haben Kosten für die Produktion von Gütern, die über Kostenfunktionen C quantifiziert werden können. Entsprechend gibt es eine Grenzkostenfunktion $\partial C = A$, die der **Angebotsfunktion** entspricht. Analog, gibt es auf der Konsumentenseite eine Funktion, die die Zahlungsbereitschaft, also Zahlungsbereitschaftsfunktion W darstellt. Die entsprechende Ableitung $\partial W = N$ ist die **Nachfragefunktion**. Insbesondere die Nachfragefunktion codiert indirekt den Nutzen, den die Konsumenten aus einem Gut erwarten. In einem perfekten Markt determiniert der Schnittpunkt aus Angebot und Nachfrage, die Menge und den Preis des zu handelnden Gutes. Dieser klassischer Zusammenhang ist in (15) für eine lineare Angebots und Nachfragefunktion dargestellt. Im Allgemeinen können wir den Nutzen des Konsumenten (**Konsumentenrente**) als

$$U_K(x) = \underbrace{\int_0^x N(z)\,dz}_{\text{Reservationserlös}} - \underbrace{xp}_{\text{Konsumenten-Kosten}}$$

mit p als Preis für das Gut, und den Nutzen des Produzenten (**Produzentenrente**) als

$$U_P(x) = \underbrace{xp}_{\text{Erlös}} - \underbrace{\int_0^x A(z)\,dz}_{\text{var. prod. Kosten}}$$

darstellen. Jene Nutzen können als Fläche interpretiert werden und sind in (15) farblich hervorgehoben. Der gemeinsame Nutzen kann dann als

$$U(x) = U_K(x) + U_P(x) = \int_0^x N(z) - A(z)\,dz$$

[5] d.h. Marktteilnehmer verhalten sich rational im Sinne der Nutzenmaximierung; homogene Handelsobjekte (keine Qualitätsunterschiede); keine zeitlichen, räumlichen, sachlichen oder persönlichen Präferenzen; vollständige Markttransparenz für alle Marktteilnehmer; einheitlicher Marktpreis; unendlich schnelle Anpassungsgeschwindigkeit der Marktteilnehmer; keine Transaktionshürden (insb. keine Transaktionskosten); unendlich viele Marktteilnehmer bei Anbietern und Nachfragenden (Polypol); räumlicher und zeitlicher Punktmarkt;

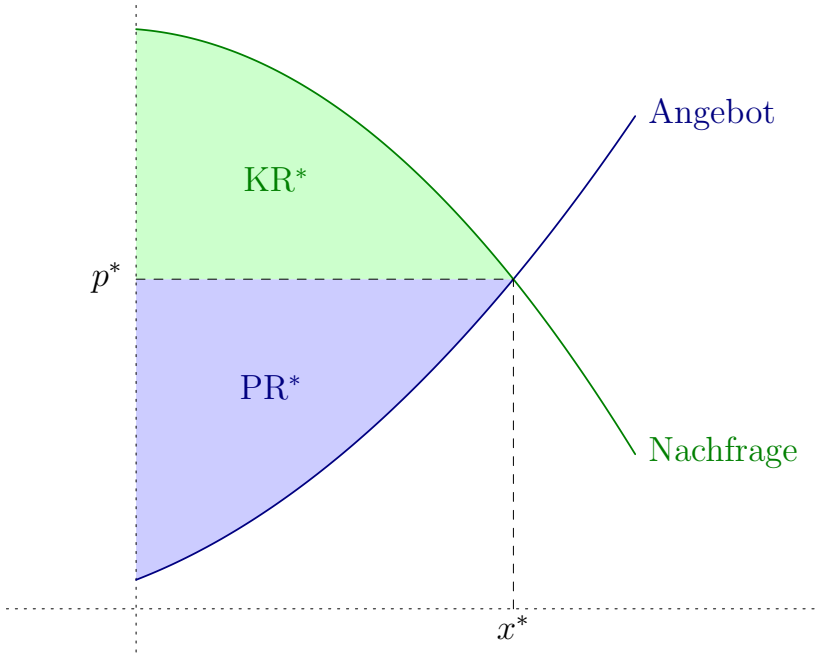


Abbildung 15: Klassisches Gleichgewichtsmodell: im perfekten Markt ergibt sich die Gleichgewichtsmenge x^* und der Gleichgewichtspreis p^* aus dem Schnittpunkt von Angebot und Nachfrage.

beschrieben werden. In einem perfekten Markt entspricht die Gleichgewichtsmenge (x^*) und der Gleichgewichtspreis (p^*) dann dem Nutzenoptimum von U. Dieses ist $U^* = \text{KR}^* + \text{PR}^*$ also die Summe aus Konsumentenrente und Produzentenrente im Gleichgewichte (KR^* und PR^*).

Es ist wichtig, dass der Markt die Allokation aller Kapitalgüter ändern kann und im perfekten Markt sich automatisch ein Pareto-Optimum bzgl. aller(!) Kapitalgüter und Marktteilnehmer einstellt. Dieser Sachverhalt ist auch als **Erstes Wohlfahrtstheorem** oder **Erster Hauptsatz der Wohlfahrtsökonomik** bekannt.

Leider, gilt es aber nur für Kapitalgüter, jedoch nicht für Güter, die kein Kapital sind (vgl. gelbe Fläche in 14). Diese Nicht-Kapitalgüter sind von der Allokation über den Markt ausgeschlossen, beeinflussen aber den Nutzen der Menschen im Ökosystem.

Diese relativ einfache Beobachtung führt zu einem der größten Problemstellungen, die in der Umweltökonomik behandelt werden, den sogenannten externen Effekten. Ein **externer Effekt** (oder auch **Externalität**) ist eine Auswirkung von ökonomischen Handlungen bzw. Entscheidungen auf Güter, die nicht (oder nicht vollständig) durch den Marktmechanismus abgebildet wird. Wir nennen daher die betroffenen Nicht-Kapitalgüter (vgl. gelbe Fläche in 14) auch **externe Güter**. Die Namensgebung erscheint plausibel, da jene Güter von dem Markt und der entsprechenden Preisbildung ausgeschlossen sind. Externe Güter sind häufig Umweltgüter und spielen daher in der Literatur der Umweltökonomik eine große Rolle. Allerdings wird der Begriff externes Gut selten verwendet.

Wir wollen nun ein einfaches umweltökonomisches Beispiel betrachten, mit einem Kapitalgut, einem externen Gut und einer Ressource. Wir nehmen an, dass es in dem Ökosystem Produzenten von Papier gibt, welches von Konsumenten konsumiert wird. Die Produzenten verbrauchen die (selbst) regenerative Ressource Wald. Sie produzieren aber auch das externe Gut Luftverschmutzung, in Abhängigkeit von der Papiermenge. Auch die Luftverschmutzung wird vom den Konsumenten konsumiert. Die zu produzierende Menge an Papier wird von einem Markt (hier vollkommenen Markt) bestimmt.

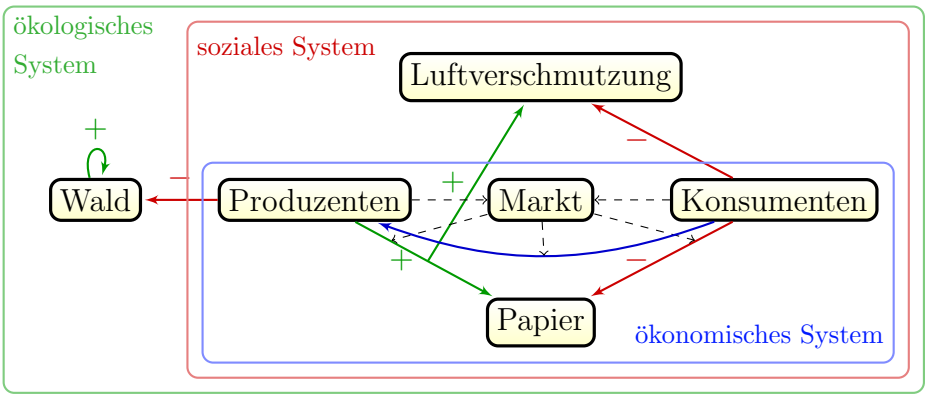


Abbildung 16: Ökologisches System.

Das Ökosystem ist in der Abbildung 16 illustrativ dargestellt. Hier können wir in Objekte im Ökosystem, im sozialen System und im ökonomischen System unterscheiden, daher ist die Trennung durch entsprechende Boxen hervorgehoben. Als wichtiges neues Element ist der Markt, ein Teil des Ökosystems dar, sogar des ökonomischen Systems. Dieser empfängt die Angebots- und Nachfrageinformationen der Produzenten und Konsumenten. Damit bestimmt der Markt die produzierte Menge an Papier, die entsprechend von den Konsumenten verbraucht wird. Er legt auch den Marktpreis für das Produkt fest. Der entsprechende Geldfluss von den Konsumenten zum Produzenten ist hier blau dargestellt. Zusätzlich sehen wir, das externe Gut Luftverschmutzung insbesondere durch den Markt beeinflusst wird, denn dieser legt die Menge an zu produzierendem Papier fest. Schließlich befindet sich der Wald als regenerative Ressource außerhalb des sozialen Systems.

Wir nehmen an, dass wir eine Nachfragefunktion N der Konsumenten nach Papier (x) und eine Angebotsfunktion A des Produzenten für Papier haben. Der Nutzen aus diesem Gut der Menge x in der Ökonomie wird somit durch

$$U_W(x) = \int_0^x N(z) - A(z)\, dz.$$

dargestellt. Neben dem Nutzen aus der Ökonomie gibt es jetzt aber auch einen Nutzen aus dem Konsum der Luftverschmutzung. Diesen **externen Nutzen** definieren wir hier mit U_E. Im klassischen umweltökonomischen Fall, wie der Luftverschmutzung ist der externe Nutzen eine monoton fallende Funktion. Daher wird in der Literatur auch häufig $-U_E = S_E$ definiert und als **externer Schaden** oder kurz **Schaden** bezeichnet. U_E oder auch S_E hängen von der Luftverschmutzung (L) ab. Diese wiederum ist aber im Allgemeinen eine Funktion, die von der produzierten Menge Papier x abhängt, somit ist $U_E(L)$ eine Funktion, die den externen Nutzen in Abhängigkeit vom Papier x darstellt. Der externe Nutzen bei einer produzierten Menge Papier ist dann $U_E(L)(x)$, oder äquivalent zu $U_E(L(x))$. Damit können wir den **externen Grenznutzen** $\partial(U_E(L))$ definieren. Vorsicht: $\partial(U_E(L)) \neq \partial U_E(L)$! Offensichtlich ist auch $\partial(U_E(L))$ gleich dem negativen **externen Grenzschaden** $-\partial(S_E(L))$.

Wenn wir den Nutzen U_W und U_E additiv aggregieren, dann erhalten wir für den

Gesamtnutzen U im Ökosystem:

$$
\begin{aligned}
U(x) &= U_W(x) + U_E(L(x)) && (3)\\
&= \int_0^x N(z) - A(z)\,dz + \int_0^x \partial(U_E(L))(z)\,dz + c && (4)\\
&= \int_0^x N(z) - A(z)\,dz + \int_0^x \partial(U_E(L))(z)\,dz + c && (5)\\
&= \int_0^x \underbrace{(N(z) + \partial(U_E(L))(z))}_{\text{soziale Nachfrage}} - A(z)\,dz + c && (6)\\
&= \int_0^x N(z) - \underbrace{(A(z) + \partial(S_E(L))(z))}_{\text{soziale Grenzkosten bzw. soziales Angebot}}\,dz + c && (7)
\end{aligned}
$$

wobei die Konstante c das Nutzenniveau verschiebt, aber keinen Einfluss auf die Optimalität hat und stellt für uns somit eine untergeordnete Bedeutung. Die letzteren beiden Zeilen zeigen eine unterschiedliche Interpretation auf: In der letzten Zeile kann $A+\partial(S_E(L))$ als Summe von Grenzkosten und Grenzschaden interpretiert werden. Daher wird $A+\partial(S_E(L))$ auch als **soziale Grenzkosten** oder als **soziales Angebot** bezeichnet. In der Interpretation entspricht das jenem Angebot, das zusätzlichen dem entstehenden externen Schaden aufkommt.

In der vorletzten Zeile können wir ähnlich $N + \partial(U_E(L))$ als Summe von Grenzzahlungsbereitschaft (Grenznutzen der Konsumenten) und externen Grenznutzen betrachten. So bezeichnen wir $N + \partial(U_E(L))$ als **soziale Nachfrage**. Das ist also jene Nachfrage, die die negativen Auswirkungen der externen Kosten antizipiert. Wir müssen dabei bedenken, dass $\partial(U_E(L))$ meist negativ ist (insb. bei Umweltgütern).

Der Schnittpunkt aus sozialen Grenzkosten und dem Grenzschaden, oder auch dem Angebot und der sozialer Nachfrage, ergibt eine nutzenoptimale Situation. Beide Situationen maximieren die Produzenten- sowie die Konsumentenrente, sodass der gemeinsame Nutzen gleich ist. Wichtig ist, dass die nutzenoptimale produzierte Menge Papier x^{opt} in den beiden Fällen gleich ist, aber der mögliche Preis p^{opt} sich unterscheidet. Wenn das externe Gut (hier Luftverschmutzung) einen negativen Nutzen aufweist, dann wird das Nutzenoptimum x^{opt} immer geringer ausfallen, als das Marktgleichgewicht x^*.

Die Abbildung 17 illustriert beide Ansichten. Oben ist die Betrachtung mit der sozialen Nachfrage, und unten die Betrachtung mit den sozialem Angebot dargestellt. Die beiden linken Graphen greifen direkt die Ausgangssituation auf, wie in der Abbildung 15, ergänzen allerdings den Nutzenverlust durch den externen Effekt und zwar dargestellt durch eine schraffierte Fläche. Der soziale Nutzen ist also der Nutzen des Marktgleichgewichts U^* (Summer aus KR^* und PR^*) plus dem Nutzen aus dem externen Effekt bzw. minus den variablen externen Schaden ES^* (= externer Schaden - c). Auf der rechten Seite in 17 ist jetzt die Situation etwas anders dargestellt. Hier betrachten wir das globale Produktions-Optimum x^{opt}, welches sich als Schnittpunkt von Angebot und sozialer Nachfrage oder auch als Schnittpunkt von sozialem Angebot und der Nachfrage ergibt. Entsprechend definieren wir die (soziale) Konsumenten- und Produzentenrente (KR^{opt}, SKR^{opt} und SPR^{opt} oder und PR^{opt}). So ergibt sich das soziale Nutzenoptimum U^{opt} als Summe von KR^{opt} und SPR^{opt} oder SKR^{opt} und PR^{opt}, es gilt also

$$U^{opt} = \text{KR}^{opt} + \text{SPR}^{opt} = \text{SKR}^{opt} + \text{PR}^{opt} = \text{KR}^{opt} + \text{PR}^{opt} + U_E^{opt} = \text{KR}^{opt} + \text{PR}^{opt} - S_E^{opt}.$$

Es ist leicht ersichtlich, dass $U^{opt} > U^*$. Der Wohlfahrtsverlust (WV) ergibt sich aus der

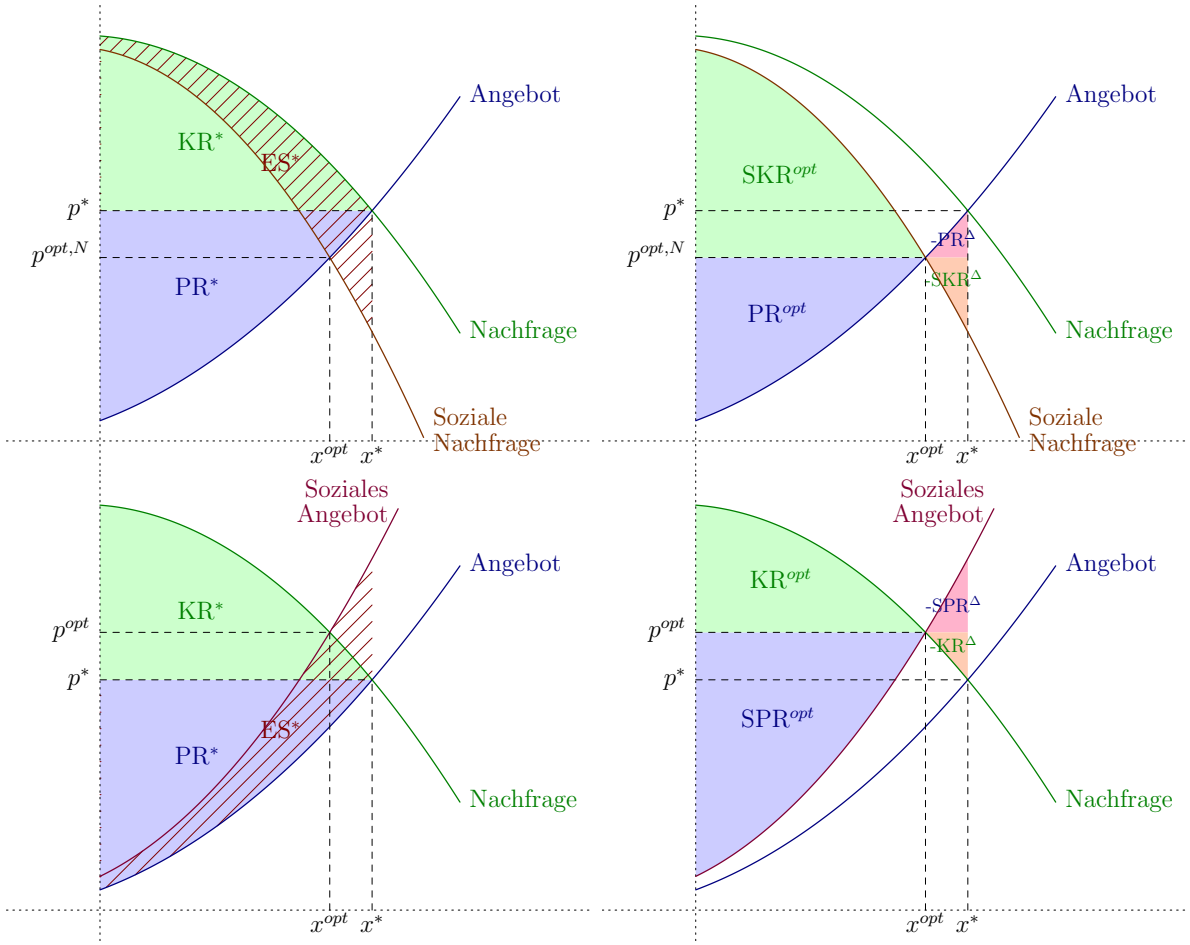


Abbildung 17: Darstellung des Problems des externen Effektes, als Schnittpunkt aus Angebot und sozialer Nachfrage (oben) sowie als Schnittpunkt aus sozialen Grenzkosten (soziales Angebot) und Nachfrage (unten).

Summe von KR$^\Delta$ und SPR$^\Delta$ oder SKR$^\Delta$ und PR$^\Delta$, mathematisch kann dieser als

$$\mathrm{WV} = \int_{x^{opt}}^{x^*} A(z) - N(z) - \partial(U_E(L))(z)\, dz$$

beschrieben werden.

Die Situation in der wir die sozialen Grenzkosten und den Grenzschaden betrachten, also die Produzenten, die für den Schaden aus dem externen Gut aufkommen würden, würde sich jedoch nicht in dem betrachteten perfekten Markt einstellen können. Denn jeder Produzent, der entsprechend den Preis p^{opt} verlangen würde (vgl. Abbildung rechts), würde direkt aus dem Markt verdrängt werden.

Die andere Situation in der die Konsumenten den Schaden antizipieren, ist theoretisch erreichbar. Wenn alle Konsumenten diesen negativen Nutzen aus einem externen Gut einpreisen, würde sich automatisch das Nutzenoptimum einstellen und x^{opt} konsumiert werden. Der Preis p^{opt} würde sogar geringer ausfallen als im Marktgleichgewicht und das Verhältnis von Konsumentenrente zu Produzentenrente verschiebt sich zu Gunsten der Konsumenten.

Diese angesprochenen Problematiken werden wir im nächsten Kapitel, wenn wir die Internalisierung von externen Effekten betrachten, genauer studieren.

Allgemein stellt sich für jedes λ

$$U(x) = U_W(x) + U_E(x) \tag{8}$$

$$= \int_0^x (N(z) + \lambda\partial(U_E(L))(z)) - (A(z) - (1-\lambda)\partial(U_E(L))(z))\, dz + c \tag{9}$$

eine nutzenoptimale Lösung ein, allerdings nur für $0 \leq \lambda \leq 1$ im inneren Kegel aus Angebot und Nachfrage. Diese Lösung kann als Mischung der beiden vorherbetrachteten Spezialfälle betrachtet werden.

Nun betrachten wir ein beispielhaftes Ökosystem mit linearer Angebots- und Nachfragefunktion:

$$N(x) = a_0 + a_1 x \quad \text{und} \quad A(x) = b_0 + b_1 x \tag{10}$$

wobei $a_0 > b_0$ und $a_1 < 0$ und $b_1 > 0$ ist. Der externe Nutzen könnte durch

$$U_E(L) = c_0 - L$$

bestimmt sein, wobei c_0 das Nutzenniveau ist, dass sich ergibt, wenn keine Luftverschmutzung vorliegt. Zusätzlich nehmen wir an, dass die Menge an produzierter Luftverschmutzung L direkt proportional von der produzierten Menge an Papier x abhängt, somit ergibt sich

$$L(x) = c_1 x$$

für $c_1 > 0$. Es folgt dann

$$U_E(x) = c_0 - c_1 x.$$

Wir haben also $\partial_x U_E(x) = -c_1$ und $\partial_L U_E(L) = -1$. Insbesondere ist hier der externe Grenznutzen oder auch der externe Grenzschaden eine Konstante. Im Vergleich dazu ist in der Abbildung 16 $\partial_x U_E(x)$ beliebig gewählt und stellt somit keine konstante Funktion dar. Die jetzige Situation ist in der Abbildung 18 dargestellt. Hier wurden die Parameter $a_0 = 4.5$, $a_1 = -0.5$, $b_0 = 1$, $b_1 = 0.6$ und $c_1 = 1$ gewählt; c_0 ist irrelevant.

Für den sozialen Nutzen U im Ökosystem erhalten wir dann:

$$U(x) = U_W(x) + U_E(x) \tag{11}$$

$$= \int_0^x N(z) - A(z)\, dz + (c_0 - c_1 x) \tag{12}$$

$$= \int_0^x a_0 + a_1 z - (b_0 + b_1 z)\, dz + c_0 - c_1 x \tag{13}$$

$$= \left[(a_0 - b_0)z + \frac{a_1 - b_1}{2} z^2\right]_0^x + c_0 - c_1 x \tag{14}$$

$$= (a_0 - b_0)x + \frac{a_1 - b_1}{2} x^2 + c_0 - c_1 x = \frac{a_1 - b_1}{2} x^2 + (a_0 - b_0 - c_1)x + c_0 \tag{15}$$

Somit folgt für den Grenznutzen

$$\partial U(x) = (a_1 - b_1)x + (a_0 - b_0 - c_1).$$

Nach dem Nullsetzen ($\partial U \stackrel{!}{=} 0$) folgt direkt

$$x^{\text{opt}} = \frac{a_0 - b_0 - c_1}{b_1 - a_1},$$

wobei der Nenner $b_1 - a_1$ immer positiv ist, da $a_1 < 0$. Ferner sehen wir, dass die Nebenbedingung wegen dem $x \geq 0$ automatisch $a_0 - b_0 - c_1 \geq 0$ ergibt. Das globale Nutzenoptimum ist somit

$$U(x^{\text{opt}}) = \frac{a_1 - b_1}{2} \cdot \frac{(a_0 - b_0 - c_1)^2}{(b_1 - a_1)^2} + (a_0 - b_0 - c_1) \cdot \frac{a_0 - b_0 - c_1}{b_1 - a_1} + c_0 \tag{16}$$

$$= -\frac{1}{2}\frac{(a_0 - b_0 - c_1)^2}{b_1 - a_1} + \frac{(a_0 - b_0 - c_1)^2}{b_1 - a_1} + c_0 \tag{17}$$

$$= \frac{1}{2}\frac{(a_0 - b_0 - c_1)^2}{b_1 - a_1} + c_0 \tag{18}$$

Allerdings ist das globale Produktionsoptimum $\frac{a_0 - b_0 - c_1}{b_1 - a_1}$ nicht gleich der Produktionsmenge x^* aus dem Marktgleichgewicht. Dies ist sofort ersichtlich, da der Parameter c_1 ein Bestandteil der optimalen Lösung ist, c_1 aber in der Ökonomie keine Rolle spielt. Das ökonomische Optimum bzw. Marktgleichgewicht erhalten wir durch das Gleichsetzen von Angebot A und Nachfrage N. So folgt aus

$$b_0 + b_1 x = a_0 + a_1 x$$

direkt, dass

$$x^* = \frac{a_0 - b_0}{b_1 - a_1}.$$

Der Vergleich mit

$$x^{\text{opt}} = \frac{a_0 - b_0 - c_1}{b_1 - a_1} = \frac{a_0 - b_0}{b_1 - a_1} - \frac{c_1}{b_1 - a_1} = x^* - \frac{c_1}{b_1 - a_1}$$

zeigt sofort, dass $x^{\text{opt}} < x^*$ da $c_1 > 0$ und $b_1 - a_1 > 0$. Das heißt im Nutzenoptimum wird weniger Papier produziert, als im Marktgleichgewicht, um einen zu starken negativen Effekt aus der Luftverschmutzung zu vermeiden. Aber da $x^* > 0$ ist, wird somit trotzdem etwas produziert und eine gewisse Umweltbelastung wird in Kauf genommen. Das Nutzenniveau von x^* ist

$$U(x^*) = \frac{a_1 - b_1}{2} \cdot \frac{(a_0 - b_0)^2}{(b_1 - a_1)^2} + (a_0 - b_0 - c_1) \cdot \frac{a_0 - b_0}{b_1 - a_1} + c_0 \tag{19}$$

$$= -\frac{1}{2} \cdot \frac{(a_0 - b_0)^2}{b_1 - a_1} + \frac{(a_0 - b_0)(a_0 - b_0 - c_1)}{b_1 - a_1} + c_0 \tag{20}$$

$$= \frac{(a_0 - b_0)((a_0 - b_0 - c_1) - \frac{1}{2}(a_0 - b_0))}{b_1 - a_1} + c_0 \tag{21}$$

$$= \frac{1}{2}\frac{(a_0 - b_0)(a_0 - b_0 - 2c_1)}{b_1 - a_1} + c_0 < \frac{1}{2}\frac{(a_0 - b_0 - c_1)^2}{b_1 - a_1} + c_0 = U(x^{\text{opt}}), \tag{22}$$

und somit kleiner als das des globalen Optimums, da $(a_0 - b_0)(a_0 - b_0 - 2c_1) < (a_0 - b_0 - c_1)^2$ gilt.[6]

Das betrachtete quantifizierte Modell, welches den externen Effekt illustriert, kann als ein Basis-Modell betrachtet werden und in verschiedenste Richtungen verallgemeinert werden. Hier wird bei der Quantifizierung vernachlässigt, dass für die Produktion von Papier Wald verbraucht wird, der nur zu einer bestimmten Menge nachwächst. Es ist allerdings möglich die Regeneration des Waldes und die Kosten der Nutzung des Waldes mit in die Betrachtung einzubeziehen.

[6] $(a_0 - b_0)(a_0 - b_0 - 2c_1) = (a_0 - b_0)^2 - 2c_1(a_0 - b_0) < (a_0 - b_0)^2 - 2c_1(a_0 - b_0) + c_1^2 = (a_0 - b_0 - c_1)^2$

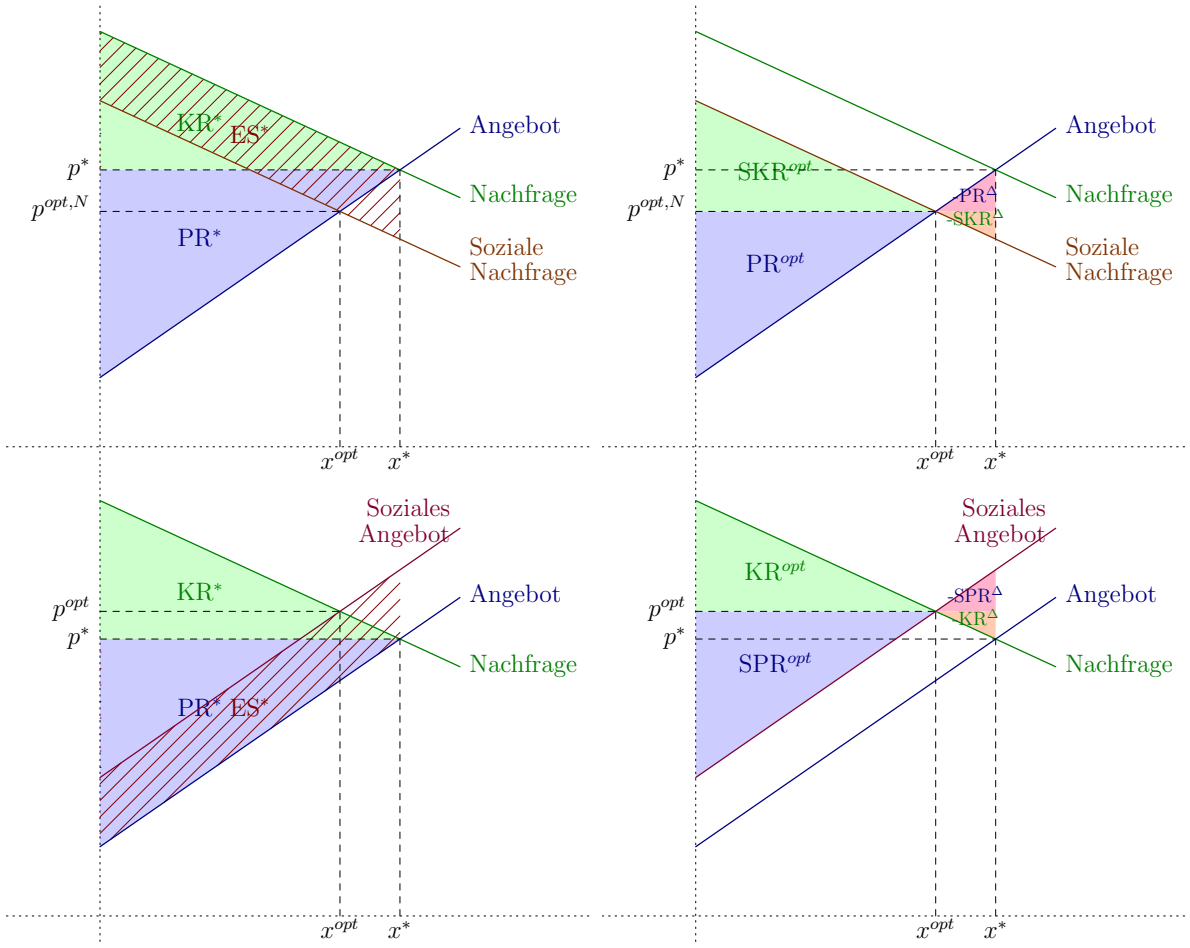


Abbildung 18: Beispiel des betrachteten Problems, als Schnittpunkt aus Angebot und sozialer Nachfrage (oben), sowie als Schnittpunkt aus sozialen Grenzkosten (soziales Angebot) und Nachfrage (unten). Hier sind $a_0 = 6$, $a_1 = -2$, $b_0 = 1$, $b_1 = 3$ und $c_1 = 1$ gewählt; c_0 ist irrelevant.

negative externe Effekte:

	Empfang Produzent	Empfang Konsument
Sender Produzent	Industrielle Gewässerverschmutzung reduziert Fischfangergebnisse	Industrielle Gewässerverschmutzung beeinträchtigt Bademöglichkeiten
Sender Konsument	Skifahrer zerstören Weideland	Zigarettenkonsum schadet Menschen durch Passivrauchen

positive externe Effekte:

	Empfang Produzent	Empfang Konsument
Sender Produzent	Talsperre zur Trickwasserversorgung schützt Ackerland vor Überflutung	Talsperre wird zum Erholungsort
Sender Konsument	Jagd begünstigt Agrarwirtschaft	gepflegter Vorgarten wird zum Blickfang

Tabelle 2: Tabelle der Sender/Empfänger Klassifikation für positive und negative externe Effekte.

Externe Effekte müssen jedoch keinen negativen Einfluss auf den Nutzen haben, denn er kann durchaus auch positiv sein. Allerdings sind in der Umweltökonomik vor allem die negativen externen Effekte von großer Relevanz. Ferner müssen externe Effekte nicht immer, wie im Beispiel von Produzenten von Gütern ausgehen, sondern können auch vom Konsumenten ausgehen, der durch seinen Konsum externe Güter beeinflusst; damit wird er streng genommen zum Produzenten des externen Gutes. Genauso muss nicht immer (nur) der Konsument von externen Effekten betroffen sein, sondern dies kann auch der Produzent sein. Prinzipiell können externe Effekte von allen Objekten im Wirtschaftssystem ausgehen und von allen Objekten im Ökosystem konsumiert werden. So können beispielsweise auch Tiere im Wald unter einer hohen Luftverschmutzung leiden, die allerdings nicht ein Teil des sozialen Systems sein müssen.

Weitere Beispiele für die möglichen Konstellation bzgl. positiven/negativen Effekten und der Sendung bzw. dem Empfang des externen Gutes von Produzent und Konsument sind in Tabelle 2 dargestellt.

2.7 Nachhaltigkeit

Nachhaltigkeit ist ein sehr kompliziertes Thema. Da es in verschiedenen Disziplinen unterschiedlich behandelt wird, gibt es auch keine einheitliche Sichtweise auf das Themenfeld. So werden in der Ökologie (sowie Biologie und Geowissenschaften) häufig andere Schwerpunkte gesetzt, als in den sozial- und wirtschaftswissenschaftlichen Disziplinen.

In den 1980er Jahren entwickelte sich eine gewisse Ansicht auf die Nachhaltigkeit in der Umweltökonomik, die als **3-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit** bekannt wurde. In Deutschland erlangte es an Popularität in der 1990er und 2000er Jahren. In dem 3-Säulen-Modell werden die Wechselwirkungen von **Ökologie**, **Soziales** und **Wirtschaft** bzw. **Ökonomie** betrachtet. Die Grundaussage dieser Betrachtung ist, dass Ökologie, Soziales und Ökonomie im Einklang mit einander betrachtet werden sollen. So kann Nachhaltigkeit in dieser Betrachtungsweise nur erreicht werden, wenn die gleichberechtigte und gleichzeitige Umsetzung von ökologischen, sozialen und ökonomischen Zielen erreicht wer-

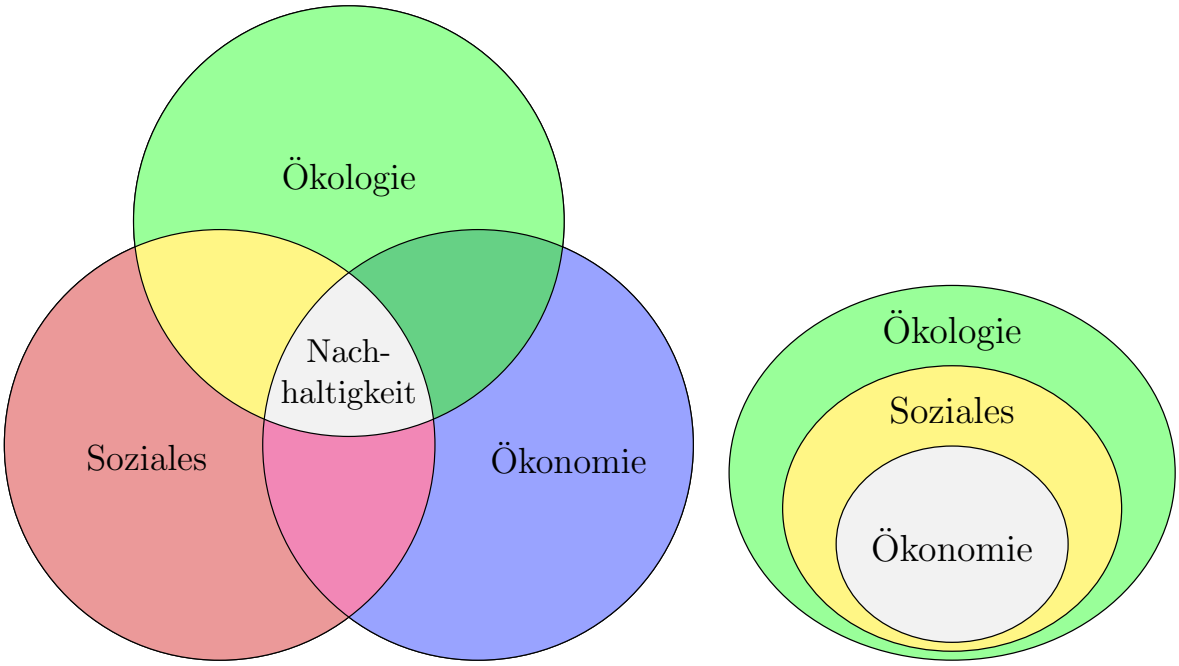


Abbildung 19: Illustration des 3-Säulen-Modells der Nachhaltigkeit als Venn-Diagramm (links) und des Vorrangmodells der Nachhaltigkeit als Mengendiagramm (rechts).

den kann. In der Abbildung 19 ist die klassische Illustration des 3-Säulen-Modells als Venn-Diagramm dargestellt.

In den letzten Jahrzehnten wuchs zunehmend die Kritik an dem 3-Säulen-Ansatz. Insbesondere wird die Gleichberechtigung von Ökologie, Soziales und Ökologie kritisiert. Dies geschieht auf Grund der Erkenntnis, dass es kein ökonomisches System ohne ein soziales System geben kann und kein soziales System ohne ökologischem System. Daraus lässt sich das **Vorrangmodell der Nachhaltigkeit** ableiten, welches in der Abbildung 19 dargestellt ist. Aus der Kernaussage, dass es keine Wirtschaft ohne Gesellschaft und keine Gesellschaft ohne Ökologie gibt, leitet sich der Vorrang für die Ökologie vor dem Sozialem, und der Vorrang des Sozialem vor der Ökonomie ab. Wir können in der Darstellung des Vorrangmodells der Nachhaltigkeit in der Abbildung 19 eine gewisse Analogie zu jener in der Abbildung 14 sehen.

Das 3-Säulen Modell der Nachhaltigkeit und Vorrangmodell der Nachhaltigkeit sind zwar vom Namen her Modelle, sie beschreiben jedoch nur qualitativ eine gewisse Vorstellung von Nachhaltigkeit. Allerdings können vor allem komplexe Sachverhalte oder Eingriffe in ein Ökosystem in der Regel nicht fundiert bzgl. ihrer Nachhaltigkeit beurteilt werden.

Wir haben bereits eine Definition für strikte ökologische Nachhaltigkeit kennengelernt, die sich in ein quantitatives Konzept einbetten lässt. Allerdings ist diese Definition sehr restriktiv. Wir wollen daher weitere Definitionen für Nachhaltigkeit kennen lernen.

Wir erinnern uns jedoch, dass ein Ökosystem **strikt ökologisch nachhaltig** ist, wenn alle Ressourcen positiv und stabil sind, d.h. insbesondere nicht null werden und nicht grenzenlos wachsen (gewisse stochastische Schwankungen sind aber erlaubt). Natürlich lässt sich diese Definition leicht auf Güter und Kapital übertragen. So ist ein Ökosystem **strikt sozial nachhaltig**, wenn alle Güter stabil und positiv sind; und ein Ökosystem heißt **strikt ökonomisch nachhaltig**, wenn alle Kapitalgüter stabil und positiv sind. Die Grundidee hinter dem strikten Nachhaltigkeitskonzept ist, dass die Sicherung der Lebens- und Produktionsgrundlagen im Sinne eines dauerhaften Erhalts des Ökosystems

(bzw. sozialen Systems oder ökonomische Systems) gewährleistet werden kann.

Die **strikten Nachhaltigkeitskonzepte** (teilweise auch starke Nachhaltikeit) sind jedoch sehr restriktiv, so darf keine einzelne Komponente (Ressource/Gut/Kapital) in einem Ökosystem über die Zeit null werden oder grenzenlos wachsen. Das Problem liegt vor allem in der ersten Bedingung, denn grenzenlos wachsen, kann effektiv kein reales ökologisches System. (Wenn ein ökologisches System grenzenlos wächst, denn das ist vor allem ein Problem in der Modellierung.) Aber einzelne Komponenten können durchaus null werden, denn es können Tiere oder Pflanzen aussterben oder bestimmte natürliche Ressourcen wie Erdöl, Kohle oder Uran vollständig verbraucht werden. Wenn auch nur eine Komponente wegfällt, dann ist das ökologische System nicht mehr strikt nachhaltig. Darüber hinaus gibt es Komponenten, die sich nur oder eher negativ auf ein Ökosystem auswirken, wie beispielsweise radioaktiver Abfall. Nach der Definition der strikten Nachhaltigkeit dürfte dieser nicht dem Ökosystem entnommen werden bzw. umgewandelt werden.

Beim genaueren studieren des strikten Nachhaltigkeitskonzepts fällt auf, dass die Hierarchie-Ebenen im Ökosystem von hoher Bedeutung sind. Ein Ökosystem, welches nur hohe Hierarchieebenen enthält, kann leichter die strikte Nachhaltigkeit erfüllen, als eines mit einer sehr niedrigen Hierarchieebenen. So hatten wir beispielsweise bereits festgestellt, dass ein Ökosystem, welches die einzelnen Individuen betrachtet, auf dieser Ebene nie strikt ökologisch nachhaltig sein kann, da diese irgendwann sterben müssen. Die sinnvolle Wahl der Hierarchieebene zur Beurteilung der Nachhaltigkeit ist natürlich diskutabel.

Neben den strikten Nachhaltigkeitskonzept gibt es auch ein **schwaches Nachhaltigkeitskonzept**. Dies kann jedoch nicht für Ressourcen, Güter und Kapital definiert werden, sondern nur für Güter und Kapital. So bezeichnen wir ein Ökosystem als **schwach ökonomisch nachhaltig**, wenn der gesamte Kapitalstock des Ökosystems, der aggregiert in einer **Wertgröße** zusammenfasst wird, über die Zeit nicht fällt. Die Aggregation $\mathcal{K}_t$ ist in der Regel die Summe aller einzelnen Kapitalwerte im Ökosystem. Analog ist ein Ökosystem **schwach sozial nachhaltig**, wenn der soziale Nutzen $\mathcal{U}_t$ des gesamten Ökosystems über die Zeit nicht fällt. Da der (gesamte) Nutzen des Ökosystems auch als Aggregation der Einzelnutzen betrachtet werden kann, unterliegen sowohl die schwache ökonomische Nachhaltigkeit als auch die schwache soziale Nachhaltigkeit einem ähnlichen Grundkonzept. So wird bei der schwachen Nachhaltigkeit immer ein Aggregat bzgl. der Beurteilung der Nachhaltigkeit herangezogen. Im schwachen Nachhaltigkeitskonzept ist es möglich, dass bestimmte Güter aus dem Ökosystem verschwinden (z.B. aussterben oder nicht mehr produziert werden), wenn das entsprechende Gut in seinem Nutzen oder Kapitalwert durch andere kompensiert wird. Problematisch für die praktische Anwendung ist jedoch die Bestimmung der Wertgröße (gesamte Kapitalstock oder soziale Nutzen) des Ökosystems. Ferner gibt es durchaus Situationen in der Realität, die der schwachen Nachhaltigkeit kurzfristig genügen können, aber kritisch betrachtet über einen längeren Zeitraum es eher nicht sind.

So könnten beispielsweise viele Kartoffelsorten von einer dominanten und effizienteren Kartoffelsorte aus dem Ökosystem verdrängt werden, sodass die betrachtete Wertgröße $\mathcal{W}_t$ (also $\mathcal{K}_t$ oder $\mathcal{U}_t$) zunächst steigt. Langfristig kann es aber sein, dass die dominante Kartoffelsorte als Monokultur einen Schaden verursacht (z.B. wenn ein Schädling diese Pflanzenart massiv angreift), sodass $\mathcal{W}_t$ zu einem Zeitpunkt in einem Ökosystem mit nur der Monokultur geringer ist, als in dem diversen Ökosystem mit mehreren Kartoffelsorten wo nur ein überschaubarer Anteil der Pflanzen unter dem Schaden leiden würde. Aber wenn die Monokultur gut funktioniert und keine Probleme bereitet, dann kann das Ökosystem auch durchaus schwach nachhaltig sein, auch wenn es nur noch eine Kar-

toffelsorte gibt und die Diversität im Ökosystem sinkt. Letzteres steht in einem klaren Widerspruch zu den Betrachtungen aus der Ökologie, wo ein Ökosystem nur nachhaltig sein kann, wenn es divers bleibt - das soziale und ökonomische Nutzenkonzept setzt dies nicht voraus. Wir sehen vor allem, dass es bei der Bewertung ist, die komplette zukünftige Entwicklung zu betrachten, was sich in der Regel als sehr schwierig erweist.

Das Konzept der schwachen Nachhaltigkeit erlaubt es, ökologische Systeme zu vergleichen, wenn wir die Wertgröße $\mathcal{W}_t$ genauer analysieren. Daher definieren wir

$$\mathcal{W}_\infty = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} \mathcal{W}_t$$

als Grenzwert der durchschnittlichen Wertgröße bis zum Zeitpunkt T. Für $\mathcal{W}_t = \mathcal{U}_t$ haben wir die Definition $\mathcal{U}_\infty$ bereits bei der Betrachtung des temporalen Nutzenproblems betrachtet. Mit $\mathcal{W}_\infty$ können wir mit dem Konzept zwei Ökosysteme direkt vergleichen. Gegeben die Ökosysteme $\mathbb{A}$ und $\mathbb{B}$, ist $\mathbb{A}$ schwach sozial nachhaltiger als $\mathbb{B}$, wenn $\mathcal{U}_\infty(\mathbb{A}) > \mathcal{U}_\infty(\mathbb{B})$ ist und schwach ökonomisch nachhaltiger, wenn $\mathcal{K}_\infty(\mathbb{A}) > \mathcal{K}_\infty(\mathbb{B})$ ist.

In dem betrachteten Beispiel des temporalen Nutzens ist das Ökosystem, in dem der Bauer das Getreide lagert, schwach sozial nachhaltiger, als jenes in dem er es nicht tut. Effektiv vergleicht das schwache Nachhaltigkeitskonzept nur den sozialen Nutzen bzw. den gesamten Kapitalstock zweier Ökosysteme für zukünftige Generationen im Ökosystem.

Das letzte Nachhaltigkeitskonzept welches wir betrachten wollen, ist das Konzept der **kritischen Nachhaltigkeit**, welches als Kompromiss aus der schwachen und strikten Nachhaltigkeit angesehen werden kann. Hierbei wird ähnlich wie im Konzept der schwachen Nachhaltigkeit eine Wertgröße $\mathcal{W}_t$ betrachtet, die nicht über die Zeit sinken darf. Aber es wird zusätzlich eine kritische Minimalausstattung für bestimmte Ressourcen (oder Güter) im Ökosystem definiert. Diese kritische Minimalausstattung enthält für die Menschen im Ökosystem kritische bzw. wichtige Ressourcen und definiert für sie Nebenbedingungen. Zum Beispiel könnte eine solche Nebenbedingung sagen, dass es im Ökosystem immer mindestens 3 Kartoffelsorten geben muss. Diese kritische Minimalausstattung soll sicherstellen, dass bestimmte negative Situationen im schwachen Nachhaltigkeitskonzept vermieden werden können.

Verwenden wir die Wertgröße $\mathcal{U}_t$ des Ökosystems, so kann es **kritisch sozial nachhaltig** sein. Verwenden wir die Wertgröße $\mathcal{K}_t$ so kann es **kritisch ökonomisch nachhaltig**. Es folgt direkt, dass jedes kritisch nachhaltige Ökosystem auch schwach nachhaltig ist.

Tabelle 3 fasst alle behandelten Nachhaltigkeitskonzepte zusammen.

	Ressourcen	Güter	Kapital
strikt	strikt ökologisch nachhaltig	strikt sozial nachhaltig	strikt ökonomisch nachhaltig
schwach	-	schwach sozial nachhaltig	schwach ökonomisch nachhaltig
kritisch	-	kritisch sozial nachhaltig	kritisch ökonomisch nachhaltig

Tabelle 3: Übersicht Nachhaltigkeitskonzepten

Die Frage, welches Nachhaltigkeitskonzept zu bevorzugen ist, ist schwer zu beantworten. Fakt ist, dass alle ökonomischen Nachhaltigkeitskonzepte jeglichen Einfluss durch externe Güter vernachlässigen (und damit jeden negativen Einfluss externer Effekte). Daher erscheinen die soziale Nutzenkonzepte nützlicher, als die ökonomischen Nutzenkonzepte,

um die Ökosysteme bzgl. ihrer Nachhaltigkeit zu beurteilen. Allerdings ist für jene Konzepte, die eine Wertgröße betrachten, die Ermittlung von $\mathcal{K}_t$ leichter, als jene von $\mathcal{U}_t$ und somit besser in der Praxis anwendbar. Wenn das schwache soziale Nachhaltigkeitskonzept eigentlich für die Bewertung ausreichend ist, kann es jedoch zu gravierenden irreparablen Schäden im Ökosystem führen, wenn es falsch angewendet wird. Insbesondere wenn $\mathcal{U}_t$ nur für einen begrenzten Zeitraum betrachtet wird.

Der Hauptkritikpunkt an dem sozialen Nachhaltigkeitskonzept ist vermutlich, dass nur der Nutzen der Menschen betrachtet wird, und potentieller Nutzen von anderen Individuen ausgeblendet wird. Nur ökologische Nachhaltigkeitskonzepte könnten dieses Problem lösen, wenn man es als eines betrachtet.

3 Vermeidung externer Effekte und deren Internalisierung

In diesem Kapitel wollen wir uns intensiv mit der Problemstellung der externen Effekte auseinander setzen. Wir haben bereits gesehen, dass externe Effekte zu negativen Auswirkungen bzgl. des sozialen Nutzens bzw. der Wohlfahrt führen können. An einem Beispiel haben wir dies quantitativ durchgespielt und gesehen, dass bei einem negativen externen Effekt die optimale Produktionsmenge des Gutes, welches den externen Effekt auslöst, vom Marktgleichgewicht x^* auf x^{opt} verringert werden sollte (d.h. $x^{\text{opt}} < x^*$), um das soziale Optimum zu erreichen. Den Eingriff des Staates in die Güterallokation mit dem Ziel, die externen Effekte zu lenken, also die negative externe Effekte vermeiden und positive zu verstärken, ist aus sozialer Sicht zu bevorzugen.

In der Abbildung 17 haben wir zwei verschiedene Sichtweisen auf den (in der Regel negativen) externen Nutzen kennengelernt. Man könnte ihn durchaus als einen externen Schaden interpretieren und den Verursacher dafür aufkommen lassen, in dem er neben den variablen Kosten für die Produktion, auch die externen Kosten trägt, d.h. seine Angebotskurve wird um den externen Grenzschaden erhöht. Diese Sichtweise mit dem Ziel, die externen Kosten als Zusatzkosten für den Verursacher in den Markt zu integrieren, wird als **Internalisierung externer Effekte**, oder auch nur kurz **Internalisierung**, bezeichnet. Wir wollen in diesem Kapitel dazu Konzepte intensiv studieren. In den nächsten zwei Abschnitten diskutieren wir jedoch kurz andere Möglichkeiten zur Vermeidung externer Effekte.

3.1 Sensibilisierung des Konsumverhaltens

Diese Sichtweise entspricht jener, der in 17 im linken Graph dargestellt ist. Wir gehen hier davon aus, dass die Konsumenten nicht nur den Nutzen aus dem Konsum von Gut x betrachten und ihre Nachfrage daraus ableiten, sondern zusätzlich die negativen Auswirkungen auf das externe Gut L antizipieren. Wenn die Konsumenten dies täten, würden wir die Nachfrage $N(x)$ nach Gut x zur sozialen Nachfrage $N(x) + \partial(U_E(L))(x)$ ändern, und das soziale Optimum würde sich automatisch einstellen. Dementsprechend müsste der Staat nur dafür sorgen, dass die Konsumenten besser verstehen, ihre soziale Nachrage besser zum Handeln anzuwenden, statt der Nachfrage nach dem produzierten Gut x. In der Abbildung 20 ist der staatliche Eingriff im Ökosystem schematisch dargestellt.

Allerdings setzt dies voraus, dass das Bewusstsein der Konsumenten für den externen Effekt gleichzeitig und im gleichen Maße einsetzt, also wäre eine homogene Anpassung des Verhaltens aller Konsumenten notwendig. In der Praxis stellt aber die Inhomogenität der Konsumenten und vor allem das damit verbundene Problem des **Trittbrettfahrers** ein Problem dar, selbst dann wenn die Konsumenten über die negativen externen Nutzenauswirkungen durch das externe Gut sich bewusst sind. Für den einzelnen Konsumenten in einer Gruppe von Konsumenten wäre es immer optimal, wenn alle anderen Konsumenten ihren Konsum in Gut x zurück fahren und es dadurch zu geringen externen Schaden durch L kommt; er selbst aber weiterhin höhere Mengen vom Gut x konsumiert, denn sein einzelner negativer Einfluss auf die Umwelt bzw. auf den externen Effekt ist vernachlässigbar. Dabei ist es wichtig, dass sich bei dem externen Gut um ein nicht exklusives (öffentliches Gut oder auch Allmendegut) handelt, dies trifft jedoch wie bereits behandelt auf so ziemlich alle relevanten Umweltgüter zu.

Dennoch, der Staat könnte versuchen durch die **Sensibilisierung des Konsumverhaltens** der Konsumenten die Nachfrage zu steuern. Dafür muss der Konsument erstens

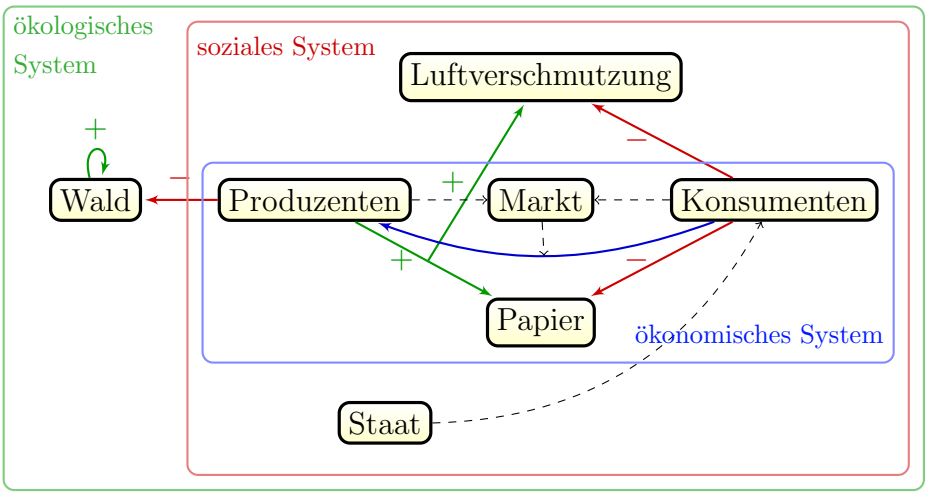


Abbildung 20: Ökologisches System mit Sensibilisierung der Konsumenten.

verstehen, dass ein solcher externer Effekt vorliegt und zweitens auch dementsprechend handeln. Der erste Punkt kann durch die Bildung und die Aufklärung erfolgen. In vielen Umweltproblemen, sind die Konsumenten bereits auf die negativen Auswirkungen bewusst, denn es gibt in vielen sozialen Systemen ein ausgeprägtes Umweltbewusstsein (environmental awareness). Jedoch verhindert das Trittbrettfahrerproblem die Umsetzung zumindest teilweise, wenn nicht gar vollständig.

3.2 Konsumvorgaben

Eine andere Möglichkeit das soziale Nutzenoptimum herzustellen, wäre direkt den Konsum von x von der Menge x^{opt} staatlich zu verordnen, also die **Konsumvorgaben** zu erteilen. Unter der Konsumvorgabe ergibt sich im Ökosystem ein direkter Eingriff in das Konsumverhalten seitens des Staates. Dieser ist in der Abbildung 21 schematisch dargestellt.

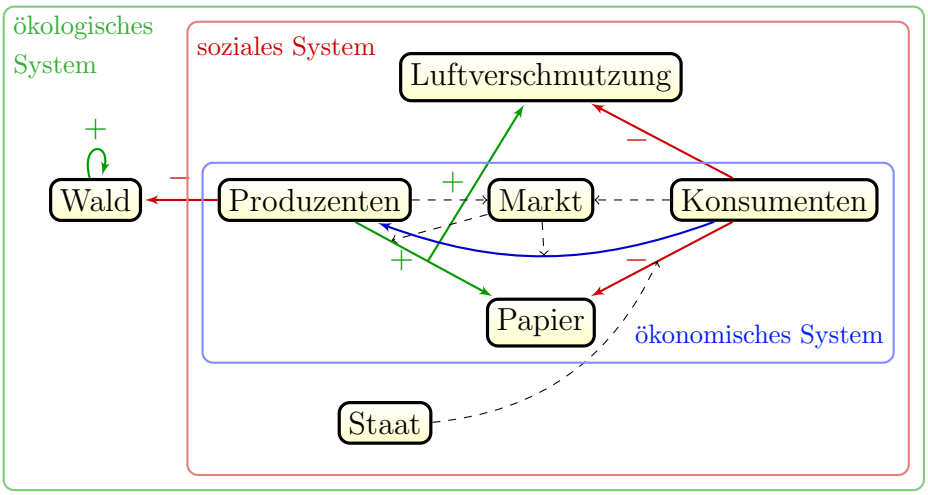


Abbildung 21: Ökologisches System mit der Konsumvorgabe von x bzw. x^{opt}

Dieser sehr drastischer Eingriff, bringt aber einige Probleme mit sich: Auch hier stellt die Inhomogenität der Konsumenten ein gewisses Problem dar, denn der individuelle Nutzen der einzelnen Konsumenten wäre unterschiedlich stark betroffen und bei den stärker

betroffenen Konsumentengruppen würde es ein großes Unbehagen auslösen. Würde man beispielsweise das konsumieren von Tabakwaren verbieten (Annahme: $x^{\text{opt}} = 0$) um die externen Effekte zu vermeiden (z.B. negative Auswirkungen auf die Gesundheit), so würden alle Nichtraucher, die keine Tabakwaren konsumieren, nicht mehr gestört werden (durch weniger Passivrauchen würden sie evtl. sogar profitieren); die betroffenen Raucher müssten jedoch einen teils großen Nutzenverlust hinnehmen und würden dies vermutlich versuchen zu verhindern (z.B. in einem demokratischen Staatssystem keine Parteien unterstützen, die dies fordern).

Darüber hinaus, muss das optimale x^{opt} dem Staat bekannt sein, was es in der Praxis häufig mindestens problematisch ist. So gibt es von staatlicher Seite aus in der Regel wenig Konsumrestriktionen für bestimmte Produkte. Wenn es regulatorische Eingriffe gibt, so gelten diese meist nur für bestimmte Konsumentengruppen, insbesondere für Kinder. So dürfen in Deutschland Personen im Alter unter 18 Jahren nicht jedes beliebiges alkoholhaltiges Getränk oder Tabakwaren erwerben. Auch das Glücksspiel ist in ähnlicher Form eingeschränkt.

Schließlich ist die Kontrolle des Konsums bzw. das Einhalten von x^{opt} für den Staat mindestens schwierig, wenn nicht gar unmöglich. So gibt es das Bestreben, sich der Kontrolle zu entziehen oder die Konsumvorgaben werden nicht eingehalten (z.B. Jugendliche Rauchen trotz des Verbotes; Höchstgeschwindigkeit im Straßenverkehr wird von Verkehrsteilnehmern überschritten). Das Konsumverhalten zu kontrollieren oder selbst zu überwachen, wird in der Regel als ein Eingriff in die Privatsphäre des Konsumenten gewertet, welches selbst wiederum einen negativen Nutzen auslösen kann. Der Konsument wird dies also möglichst vermeiden.

3.3 Produktionsvorgaben, Auflagen und das Haftungsrecht

Bei den **Produktionsvorgaben** und **Auflagen** handelt es sich um eine ähnliche Betrachtungsweise, wie bei den Konsumvorgaben. Jedoch wird jetzt die Produzenten- bzw. Verursacherseite betrachtet, daher handelt es sich um einen Internalisierungsansatz.

Im ersteren Ansatz würde der Staat den Produzenten die **Produktionsvorgabe**, die Menge des Gutes x^{opt} oder auch $\ell^{opt} = L(x^{opt})$, welches produziert wird, vorschreiben und dies würde entsprechend zum sozialen Optimum führen. Das entsprechende Ökosystem ist in 22 (Vorgabe für x^{opt}) bzw. 23 (Vorgabe für ℓ^{opt}) dargestellt. Hier sehen wir, dass der Staat direkt die Produktion beeinflusst.

In der Praxis wird das Konzept der Produktionsvorgaben auch angewendet, so werden beispielsweise Fangquoten für Fischer vergeben, die Menge an Fischen begrenzt, die aus einem Gewässerabschnitt in einer bestimmten Zeit entnommen werden dürfen. Es gibt auch teilweise komplette Verbote von externen Gütern, insbesondere für (stark) gesundheitsschädliche Güter. Ein prominentes Beispiel, ist das Verbot der Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW), die erheblich die Ozonschicht schädigen.

In der Abbildung 24 sind die zwei möglichen Markt-Gleichgewichte mit den Produktionsvorgaben dargestellt, bei denen x^{opt} vorgegeben ist. Hierbei ist links die Situation für den perfekten Markt, und rechts die Situation für das Monopol dargestellt.

Wir betrachten zunächst den ersten Fall: Von staatlicher Seite aus wird das x^{opt} vorgegeben, es ist jedoch zunächst unklar, welcher Preis sich einstellt, denn in x^{opt} schneiden sich die Angebots- und Nachfragekurve nicht. Da aber ein perfekter Wettbewerb herrscht, wird kein Unternehmen im Gleichgewicht existieren können, das einen Preis größer als die Grenzkosten $N(x^{\text{opt}})$ verlangt, da die Konsumenten sonst günstigere Anbieter wählen würden. In der Abbildung 24 (links) sehen wir diesen Zusammenhang. Als Folge ergibt

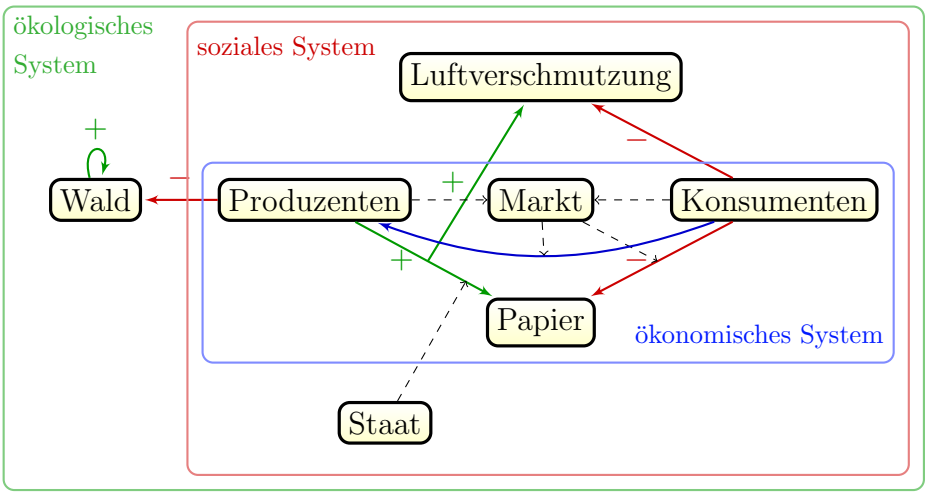


Abbildung 22: Ökologisches System mit der Produktionsvorgabe von x bzw. x^{opt}

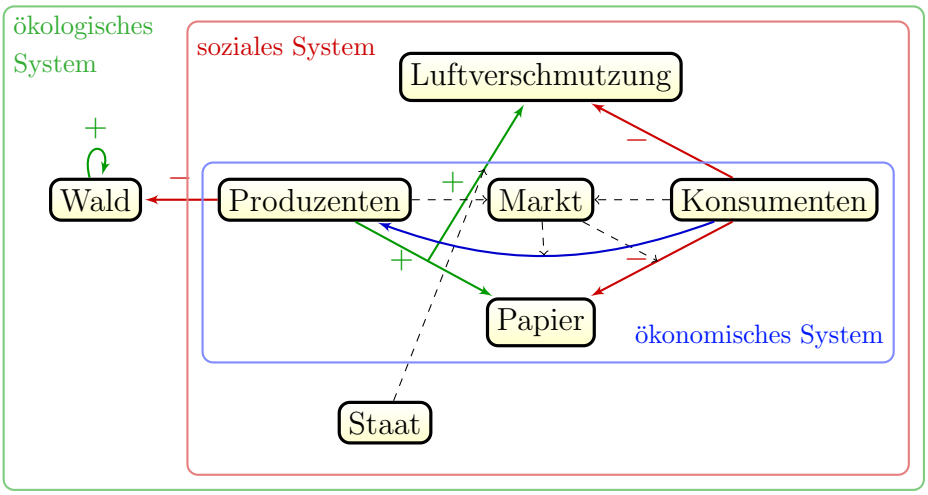


Abbildung 23: Ökologisches System mit der Produktionsvorgabe vom externen Gut ℓ bzw. ℓ^{opt}.

sich, dass $N(x^{\text{opt}}) = p^{opt,N} < p^*$ gilt. Dadurch reduziert sich die Produzentenrente von PR^* zu PR^{opt}, im Vergleich zum unregulierten Marktgleichgewicht. Die Konsumentenrente wächst jedoch potentiell (der 'Regelfall', das muss aber nicht immer so sein, insb. bei sehr elastischem Angebot). Der Nutzen im Gleichgewicht ist gleich U^{opt}. Zu bemerken ist, dass sowohl Konsumenten, als auch Produzenten gerne mehr konsumieren bzw. produzieren würden, der Staat sie aber davon abhält.

Im Monopolfall (vgl. die Abbildung 24, rechts) ist die Situation anders. Da hier keine Konkurrenz herrscht, kann der Monopolist die Preise diktieren und die Konsumenten werden die höheren Preise hinnehmen müssen, da trotz der hohen Preise ihr Grenznutzen positiv ist. Im Vergleich zur perfekten Markt-Situation verschiebt sich das Konsumentenrenten-Produzentenrenten-Verhältnis zu Gunsten der Produzenten, auf Grund der Marktmacht. Aber auch hier führt die Marktsituation zu dem optimalen Nutzen U^{opt}. Falls es im Fall des perfekten Marktes (vgl. Abbildung 24, links) zu Kartellabsprachen kommt, wird sich auch hier die Monopollösung einstellen.

Natürlich kann der Staat auch statt x^{opt} oder auch ℓ^{opt} vorgeben. Letzteres hat den Vorteil, dass sie unabhängig von L ist. Im perfekten Wettbewerb haben die Unternehmen

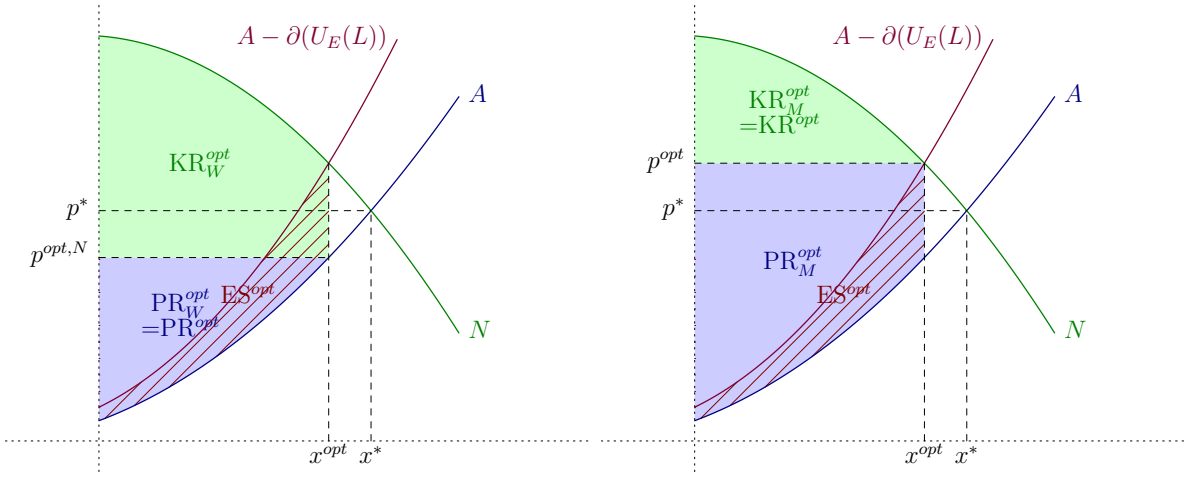


Abbildung 24: Mögliches Markt-Gleichgewicht mit der Produktionsvorgabe im perfekten Markt (links) und im Monopol (rechts)

einen Anreiz ihre Produktionskosten, also ihre Angebotskurve A zu senken, dies führt in der Praxis jedoch leider häufig zu günstigeren Produktionsmethoden, aber noch lange nicht zu einer Reduzierung des externen Effektes. Setzt man im Gegensatz das externe Gut ℓ^{opt} fest, so haben die Unternehmen den Anreiz ihren Produktionsprozess auf den Einfluss von ℓ^{opt} zu optimieren. Im positiven Fall entwickeln sie neue Methoden zu Senkung von L, um mehr vom Gut x verkaufen zu können, bei gleichbleibenden Kosten.

Wir betrachteten den staatlichen Eingriff durch die Produktionsvorgaben. Jetzt wollen wir den zweiten Fall studieren, bei dem der Staat die Produktionskosten durch die **Auflagen** beeinflusst. Der Zusammenhang im Ökosystem ist in der Abbildung 25 dargestellt. Der Staat kann auch Auflagen erteilen, die den Produktionsprozess beeinflussen und somit die Kostenstruktur der Produzenten. Solche Auflagen könnten beispielsweise den Produzenten dazu verpflichten, bestimmte (teurere) Technik zur Produktion anzuwenden. Dies würde die Produktionskosten erhöhen und damit auch die Angebotskurve. Dies führt wiederum zu einer Reduzierung von x^* und einem höheren Preis p^*. Die unter den Auflagen produzierte Menge x^{Aufl}, können die Produzenten zum Preis von $p^{\text{Aufl}} = A(x^{\text{Aufl}}) + \partial K_{\text{Aufl}}(x^{\text{Aufl}})$ im perfekten Markt verkaufen, wobei ∂K_{Aufl} die Grenz-Auflagenkosten der Produktion sind. Jedoch nur, wenn der Staat die Kostenstruktur der Produzenten und Konsumenten kennt und die Auflagen richtig wählt, kann er die optimale Produktionsmenge x^{opt} herbeiführen, d.h. dass $x^{\text{Aufl}} = x^{opt}$ gilt. Hierzu müssen die Grenzkosten der Produzenten (einschl. der Grenzauflagenkosten) gleich der Nachfrage sein, also muss $A(x^{opt}) + \partial\text{Aufl}(x^{opt}) = N(x^{opt})$ gelten. Die Auflagen werden wie bereits angedeutet, in der Regel damit verbunden, die Produktion der externen Kosten zu beeinflussen, d.h. durch die Auflagen direkt einen Einfluss auf L bzw. $L(x)$ zu nehmen, und z.B. somit eine sozial effizientere Produktion zu erwirken. Ohne diesen Effekt entspricht die Auflagenlösung im wesentlichen dem Pigou-Steuerkonzept, dass wir im nächsten Abschnitt genauer betrachten.

Die Auflagen werden auch angewendet, allerdings, haben Sie teilweise auch anderen Lenkungscharakter. Beispielsweise kann man strenge Hygiene-Auflagen im Gastronomie-Gewerbe als eine Auflage werten. Die Produktion der Dienstleistung bzw. des Essens wird durch die strenge Auflagen teurer, verringert die nachgefragte Menge, und auch den externen Schaden durch potentielle gesundheitliche Beeinträchtigung der Konsumenten, wie zum Beispiel durch Keime und Krankheiten im Essen, auf Grund von unhygienischer Zubereitung des Essens. Eine spezielle Form von Auflagen, ist das **Haftungsrecht**.

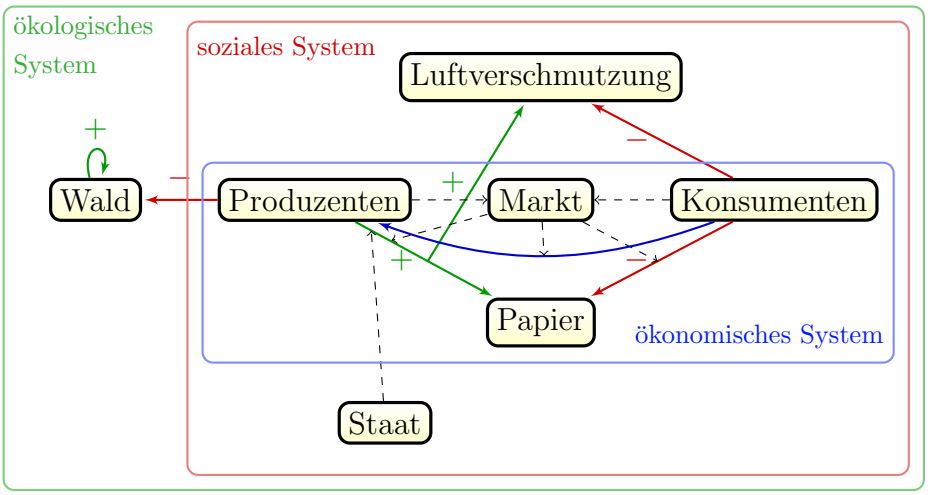


Abbildung 25: Ökologisches System mit klassischen Auflagen für die Produzenten.

Hierbei werden Produzenten dazu verpflichtet für (zukünftig) aufkommenden externen Schaden zu haften. Durch diese gesetzlich geregelte Haftung, wird indirekt in den Produktionsprozess eingegriffen und die Produktionskosten werden in der Regel erhöht. Das Haftungsrecht als Internalisierungsansatz wird in der angelsächsischen Literatur viel diskutiert. Aber auch in der Praxis in Deutschland findet es er Anwendung. So müssen Braunkohletagebaubetreiber in Deutschland zumindest teilweise für die Rekultivierung, der durch den Abbau devastierten Flächen aufkommen. In ähnlicher Form müssen Betreiber von Atomkraftwerken für die Zwischen- und Endlagerung des radioaktiven Abfalls aufkommen. Da das Haftungsrecht eine staatliche Maßnahme ist, die vor allem Zeitpunkte in der Zukunft betrifft, haben die Verursacher der externen Effekte immer eine Bestrebung ihre Haftung durch regulatorische Änderungen zu minimieren. Ferner ist der Staat (bzw. das Ökosystem) vom Problem der **Ruin-Grenze** betroffen, d.h. dass der Versucher nicht (mehr) für den Schaden aufkommen kann. Ähnliche Probleme wurden in den letzten Jahren immer wieder bzgl. der Haftung für den radioaktiven Abfall in Deutschland diskutiert. Die genannten Probleme für die Haftungen sind aber vor allem darauf zurück zu führen, dass ein externer Schaden in der Zukunft ausgeglichen werden soll, und nicht sofort abgegolten wird.

Weitere Probleme, die mit den Produktionsvorgaben und den Auflagen einhergehen, sind sehr ähnlich zu denen bei den Konsumvorgaben. Zum einen ist die Bestimmung von x^{opt} schwierig, zum anderen müsste auf Grund der Inhomogenität der Produzenten entsprechend individuell angepasst werden, was mit hohem Aufwand verbunden wäre. Ferner gibt es das Kontrollproblem, wie im Falle der Konsumvorgaben. Allerdings lassen sich Produzenten teilweise leichter kontrollieren als Konsumenten. Wenn die Auflagen eingeführt werden sollen, die die Produktionskosten beeinflussen, so ist die optimale Ausgestaltung der Auflagen für den Staat ungemein schwieriger. Denn hierbei muss er die gesamte Kostenstruktur für die Produktion berücksichtigen und die Auflagen entsprechend gestalten. Wenn er zusätzlich durch die Auflagen den externen Schaden reduzieren will, so muss er einen gewissen Einblick in die Produktionsstruktur haben (im Gastronomie-Hygiene-Beispiel, z.B. die Erkenntnis, dass eine bessere Hygiene in der Essenszubereitung Krankheitsfälle beim Konsumenten verringert).

3.4 Pigou-Steuer

In diesem Abschnitt wollen wir eine weitere marktbasierte Lösung für die Internalisierung von externen Effekten kennenlernen, die **Pigou-Steuer**. Sie kann als Spezialfall der Auflagen-Lösung betrachtet werden. Die Auflage für die Produktion des Gutes x ist dabei allerdings die Abführung einer Steuer an den Staat, insbesondere kann dadurch keine zusätzliche Lenkungswirkung (z.B. durch Forderung des Einsatzes von Produktionsmethoden, die geringeren externen Schaden verursachen) erzielt werden. Dennoch ist die Pigou-Steuer ein wichtiges Instrument in der Umweltökonomie- und politik. Vereinfacht gesagt, versucht die Pigou-Steuer den fehlenden Preis für das externe Gut zu simulieren und dadurch die externen Effekte zu internalisieren.

Wenn wir nun eine **Steuer** einführen, dann erhöht dies die Kosten für die Produktion von Papier. Daher sollte weniger Papier produziert werden, und die Luftverschmutzung würde sinken. Der Zusammenhang ist in 26 in einem Ökosystem dargestellt. Der Staat greift durch die Steuer in den Markt ein. Zusätzlich erhält er Steuereinnahmen und wird prinzipiell Bestandteil des ökonomischen Systems. Allerdings betrachten wir zunächst ein einfaches Modell, indem die Steuereinnahmen keinen Einfluss auf den sozialen Nutzen des Ökosystems haben.

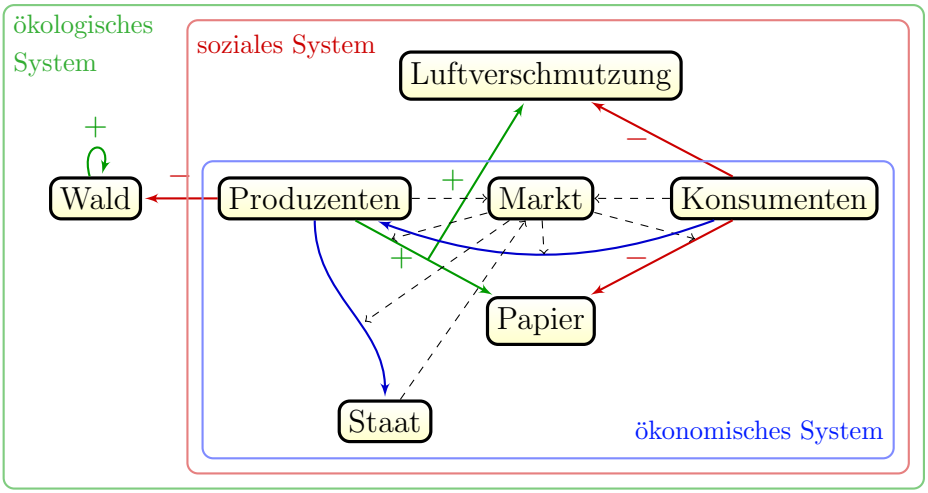


Abbildung 26: Ökologisches System mit einer Pigou-Steuer Lösung

Es gibt natürlich verschiedene Arten von Steuern. Die häufigsten angewendeten Steuerlösungen sind **Mengensteuern** (absolute Steuern, bzw. Stücksteuern) und **Wertsteuern** (relative Steuern). Erste werden in Deutschland, beispielsweise auf Strom oder auch auf verschiedene Kraftstoffe (z.b. Diesel, Benzin, etc.) angewendet. Letztere sind in Deutschland vor allem als Umsatzsteuer (ugs. Mehrwertsteuer) relevant. Im Mengensteuerkonzept wir auf eine Einheit eines Gutes eine absolute Steuer ν angewendet, die Steuerabgabe für eine Menge x ist somit νx und unabhängig vom Preis. Im Wertsteuerkonzept wird eine relative Steuer angewendet, die direkt proportional vom Preis abhängt, d.h. es wird eine Steuerabgabe von $xp\tau$ bei einem Steuersatz τ und einem Preis p pro Einheit des Gutes verlangt. Beide Konzepte lassen sich mathematisch leicht kombinieren, indem eine Steuerabgabe von $x(\nu + \tau p)$ gefordert wird. Die Grenzsteuer ist dann $\mathcal{T}_{\nu,\tau}(p) = \nu + \tau p$

Natürlich können wir durch die Wahl von $\tau = 0$ und $\nu = 0$ immer die Mengen- und Wertsteuer als Spezialfälle ableiten. In der Abbildung 27 ist die Wirkung der Pigou-Steuer graphisch dargestellt, sowie in der Abbildung 28 die beiden Spezialfälle.

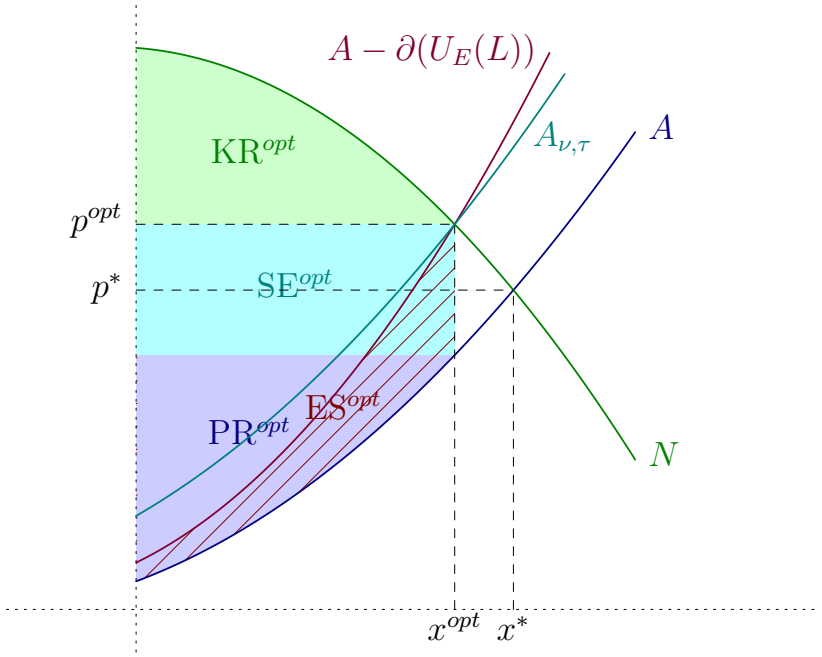


Abbildung 27: Optimale Pigou-Steuer für den gewählten Besteuerungsansatz (Mischung aus Mengen- und Wertsteuer).

Um diese Graphen besser im Kontext der Wirkung der Pigou-Steuer zu verstehen, betrachten wir wieder das Modell mit einer linearen Nachfrage- und Angebotsfunktion

$$N(x) = a_0 + a_1 x \quad \text{und} \quad A(x) = b_0 + b_1 x \tag{23}$$

wobei $a_0 > b_0$ und $a_1 < 0$ und $b_1 > 0$, dem ökonomischen Nutzen

$$U_W(x) = \int_0^x N(z) - A(z)\, dz.$$

und dem Nutzen aus Luftverschmutzung

$$U_E(L) = c_0 - L$$

mit $L(x) = c_1 x$ für $c_1 > 0$.

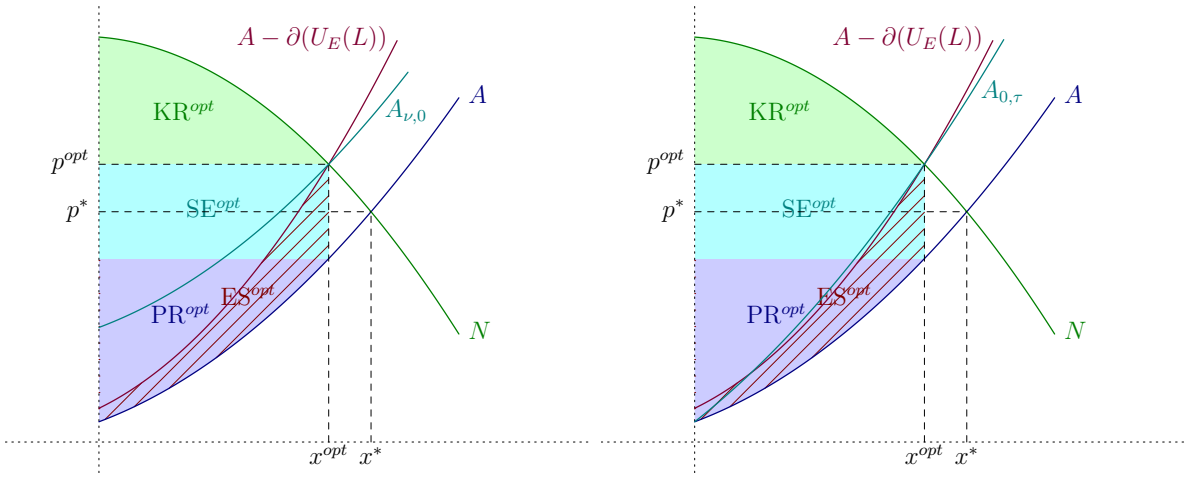


Abbildung 28: Optimale Pigou-Steuer für die Spezialfälle der Mengen- und Wertsteuer.

$$U(x) = U_W(x) + U_E(x) = \frac{a_1 - b_1}{2}x^2 + (a_0 - b_0 - c_1)x + c_0 \tag{24}$$

hat das globale Optimum $x^{\text{opt}} = \frac{a_0 - b_0 - c_1}{b_1 - a_1}$.

Die variablen Kosten der Produzenten sind somit $\int_0^x b_0 + b_1 z\, dz + x(\nu + \tau p)$ und die Grenzkosten (bzw. die Angebotsfunktion einschl. der Steuerabgabe) sind dann die Summe aus der Angebotsfunktion und der Grenzsteuer: $A_{\nu,\tau}(x,p) = A(x) + \mathcal{T}_{\nu,\tau}(p) = b_0 + b_1 x + \nu + \tau p$. Der Marktgleichgewichtspreis $p^*_{\nu,\tau}$ und die Gleichgewichtsmenge $x^*_{\nu,\tau}$ ergeben sich aus dem Schnittpunkt von $A_{\nu,\tau}(x,p)$ und $N(x)$. Jener ist wegen $b_0 + b_1 x + \nu + \tau p = a_0 + a_1 x$ dann $x^*_{\nu,\tau} = \frac{a_0 - b_0 - \nu - \tau p^*_{\nu,\tau}}{b_1 - a_1}$.

Mit $N(x^*_{\nu,\tau}) = p^*_{\nu,\tau} = a_0 + a_1 \frac{a_0 - b_0 - \nu - \tau p^*_{\nu,\tau}}{b_1 - a_1}$ folgt

$$\begin{aligned} p^*_{\nu,\tau} &= \frac{a_0 + a_1 \frac{a_0 - b_0 - \nu}{b_1 - a_1}}{1 + \frac{a_1}{b_1 - a_1}\tau} \\ &= \frac{a_0(b_1 - a_1) + a_1(a_0 - b_0 - \nu)}{b_1 - a_1 + a_1\tau} \\ &= \frac{a_0 b_1 - b_0 a_1 - a_1 \nu}{b_1 - a_1 + a_1 \tau} \end{aligned} \tag{25}$$

und somit

$$\begin{aligned} x^*_{\nu,\tau} &= \frac{a_0 - b_0 - \nu - \tau p^*_{\nu,\tau}}{b_1 - a_1} \\ &= \frac{a_0 - b_0 - \nu - \tau \frac{a_0 b_1 - b_0 a_1 - a_1 \nu}{b_1 - a_1 + a_1 \tau}}{b_1 - a_1} \\ &= \frac{a_0 - b_0 - \nu - \frac{\tau}{b_1 - a_1 + a_1 \tau}(a_0 b_1 - b_0 a_1 - a_1 \nu)}{b_1 - a_1} \qquad (26) \\ &= x^* + \frac{-\nu - \frac{\tau}{b_1 - a_1 + a_1 \tau}(a_0 b_1 - b_0 a_1 - a_1 \nu)}{b_1 - a_1} \qquad (27) \end{aligned}$$

als optimale Lösung für die Menge $x^*_{\nu,\tau}$ unter einer kombinierten Mengen- und Wertsteuer. Wir erhalten die Spezialfälle der reinen Mengensteuer mit der optimalen Menge

$$\begin{aligned} x^*_{\nu,0} &= \frac{a_0 - b_0 - \nu}{b_1 - a_1} \qquad (28) \\ &= x^* - \frac{\nu}{b_1 - a_1} \qquad (29) \end{aligned}$$

und dem optimalen Preis

$$\begin{aligned} p^*_{\nu,0} &= a_0 + a_1 \frac{a_0 - b_0 - \nu}{b_1 - a_1} \qquad (30) \\ &= a_0 + a_1 x^* - \frac{a_1 \nu}{b_1 - a_1} \qquad (31) \\ &= p^* - \frac{a_1 \nu}{b_1 - a_1} \qquad (32) \\ &= A(x^*) - \frac{a_1 \nu}{b_1 - a_1} \qquad (33) \end{aligned}$$

Analog erhalten wir für die Wertsteuer die optimale Menge

$$\begin{aligned} x^*_{0,\tau} &= \frac{a_0 - b_0 - \frac{\tau}{b_1 - a_1 + a_1\tau}(a_0 b_1 - b_0 a_1)}{b_1 - a_1} \\ &= \frac{a_0 - b_0}{b_1 - a_1} - \frac{a_0 b_1 - b_0 a_1}{b_1 - a_1}\frac{\tau}{b_1 - a_1 + a_1\tau} && (34) \\ &= x^* - \frac{a_0 b_1 - b_0 a_1}{b_1 - a_1}\frac{\tau}{b_1 - a_1 + a_1\tau} && (35) \end{aligned}$$

und dem Preis

$$\begin{aligned} p^*_{0,\tau} &= \frac{a_0 b_1 - b_0 a_1}{b_1 - a_1 + a_1\tau} && (36) \\ &= \frac{a_0 b_1 - b_0 a_1}{b_1 - a_1}\frac{b_1 - a_1}{b_1 - a_1 + a_1\tau} && (37) \\ &= \left(a_0 + a_1\frac{a_0 - b_0}{b_1 - a_1}\right)\frac{1}{1 + \frac{a_1}{b_1 - a_1}\tau} && (38) \\ &= p^*\frac{1}{1 + \frac{a_1}{b_1 - a_1}\tau} && (39) \\ &= A(x^*)\frac{1}{1 + \frac{a_1}{b_1 - a_1}\tau} && (40) \end{aligned}$$

Wir sehen, dass für die Mengensteuer die Angebotskurve im Optimum verschoben wird und für die Wertsteuer die Angebotskurve im Optimum skaliert wird.

Nun kommen wir zurück zum Problem der externen Kosten, bzw. dem globalen Nutzenoptimum. Im Nutzenoptimum wissen wir, dass $x^{\text{opt}} = \frac{a_0 - b_0 - c_1}{b_1 - a_1} \overset{!}{=} x^*_{\nu,\tau}$ gelten muss. Daher müssen ν und τ folgend gewählt werden:

$$\begin{aligned} \frac{a_0 - b_0 - c_1}{b_1 - a_1} &= \frac{a_0 - b_0 - \nu - \frac{\tau}{b_1 - a_1 + a_1\tau}(a_0 b_1 - b_0 a_1 - a_1\nu)}{b_1 - a_1} && (41) \\ \Leftrightarrow c_1 &= \nu + \frac{\tau}{b_1 - a_1 + a_1\tau}(a_0 b_1 - b_0 a_1 - a_1\nu) && (42) \end{aligned}$$

Letztere Gleichung können wir nun nach ν und τ auflösen und erhalten

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{c_1 - \frac{\tau}{b_1 - a_1 + a_1\tau}(a_0 b_1 - b_0 a_1)}{1 - \frac{a_1\tau}{b_1 - a_1 + a_1\tau}} && (43) \\ \tau &= \frac{(b_1 - a_1)\frac{c_1 - \nu}{a_0 b_1 - b_0 a_1 - a_1\nu}}{a_1\frac{c_1 - \nu}{a_0 b_1 - b_0 a_1 - a_1\nu} + 1} && (44) \end{aligned}$$

Wir sehen, dass ν linear vom c_1 dem Schadenskoeffizienten der Luftverschmutzung abhängt. Im Gegensatz dazu, hängt τ gebrochen rational von c_1 ab.

Für eine reine Mengensteuer müssen wir den Steuerparameter $\nu = c_1$ wählen (Erinnerung: $c_1 > 0$), und für eine reine Wertsteuer

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{(b_1 - a_1)\frac{c_1}{a_0 b_1 - b_0 a_1}}{a_1\frac{c_1}{a_0 b_1 - b_0 a_1} + 1} && (45) \\ &= \frac{(a_1 - b_1)c_1}{a_1 b_0 - b_1 a_0 - a_1 c_1}. && (46) \end{aligned}$$

Wenn der Staat τ und ν festlegen wollen würde, dann hätte er Spielraum bei der Gestaltung der Pigou-Steuer und könnte eine nahezu beliebige Nebenbedingung erfüllen. Je nach Ausgestaltung könnte der Staat zusätzlich lenkend eingreifen und auch andere Nebenbedingungen erfüllen. Wenn es beispielsweise einen Verwaltungsaufwand für das Erheben einer solchen Steuer gäbe, wäre es sinnvoll, jene Lösung zu wählen, die den geringsten Aufwand hat.

Wir haben optimale Lösungen für die Steuersätze der Pigou-Steuer in dem betrachteten Ökosystem gefunden, doch, wie verhält es sich mit dem Nutzen des Ökosystems? Wenn wir annehmen, dass der Nutzen im Ökosystem der gleiche wäre, wie zuvor, d.h. $U = U_W + U_E$, dann würde sich natürlich das gleiche Nutzenoptimum und x^{opt} einstellen, wie es im vorherigen Kapitel diskutiert wurde. Allerdings ist diese Betrachtungsweise etwas naiv, denn durch den staatlichen Eingriff, wird insbesondere der Nutzen aus dem ökonomischen System U_W verändert. Für den Konsumenten allerdings bleibt die Konsumentenrente unverändert bei $U_K(x,p) = \int_0^x N(z)\,dz - xp$. Für den Produzenten ändert sich jedoch die Rente, wenn beachtet wird, dass eine Steuerabgabe geleistet werden muss. So wäre dann $U_P(x,p) = xp - \int_0^x A_{\nu,\tau}(z)\,dz = xp - \int_0^x A(z) + \nu + \tau p\,dz = xp - (\nu + \tau p)x - \int_0^x A(z)d\,z = x((1-\tau)p - \nu) - \int_0^x A(z)\,dz$. Insbesondere sehen, wir, dass $x((1-\tau)p - \nu) \geq \int_0^x A(z)\,dz$ gelten muss, damit die Konsumentenrente nicht negativ wird. D.h. die Einnahmen der Produzenten abzüglich der Steuerabgaben, dürfen die variablen Kosten nicht übersteigen. Die Steuerabgaben verringern also zusätzlich den Nutzen der Produzenten. Allerdings erhält der Staat die Steuereinnahmen in Höhe von $(\nu + \tau p)x$ und kann mit ihnen wirtschaften, sowie den Konsumenten oder Produzenten staatlichen Konsum ermöglichen, bzw. den Konsumenten oder Produzenten die Steuereinnahmen wieder ausschütten (evtl. auch umverteilt). In der Abbildung 26 müssten je nach Art des Umgangs mit den Steuereinnahmen, Pfeile ergänzt werden. Würde der Staat mit den Steuereinnahmen z.B. einen öffentlichen Park pflegen, so könnten die Konsumenten ihn entsprechend konsumieren. Ähnlich könnte der Staat aber auch die Infrastruktur für den Produzenten bereitstellen (z.B. bessere Zufahrtsstraßen zum Produktionsgelände). Alternativ zur Bereitstellung von konsumierbaren Gütern, könnte der Staat die Steuereinnahmen auch direkt wieder an die Konsumenten oder Produzenten ausschütten.

Wenn wir davon ausgehen, dass der Nutzen aus den Steuereinnahmen genau ihrer Höhe entspricht, dann wäre dieser $U_T(x) = (\nu + \tau p)x$. Der Gesamtnutzen im Wirtschaftssystem ist dann also die Summe aus der Konsumentenrente, Produzentenrente und der Staatsrente:

$$U_W(x,p) = U_K(x,p) + U_P(x,p) + U_T(x,p). \tag{47}$$

$$= \underbrace{\int_0^x N(z)\,dz - xp}_{U_K(x,p)} + \underbrace{xp - (\nu + \tau p)x - \int_0^x A(z)d\,z}_{U_P(x,p)} + \underbrace{(\nu + \tau p)x}_{U_T(x,p)} \tag{48}$$

$$= \int_0^x N(z) - A(z)\,dz \tag{49}$$

Somit ist der Nutzen der gleiche, wie im klassischen Fall ohne die Besteuerung. Also ist x^{opt} das globale Nutzenoptimum für den Besteuerungsfall.

Natürlich kann die Annahme, dass der Nutzen aus den Steuereinnahmen genau ihrer Höhe entspricht, hinterfragt werden. Die Tatsache, dass der Staat beispielsweise die Infrastruktur alleine zum Eintreiben und Verwalten der Steuer bereitstellen muss, spricht eher dagegen. Andererseits, kann der Staat durch gezielte Umverteilung auch zusätzliche Nutzengewinne erzielen. Die kombinierte effiziente Nutzung wird auch als **doppelte Dividen-**

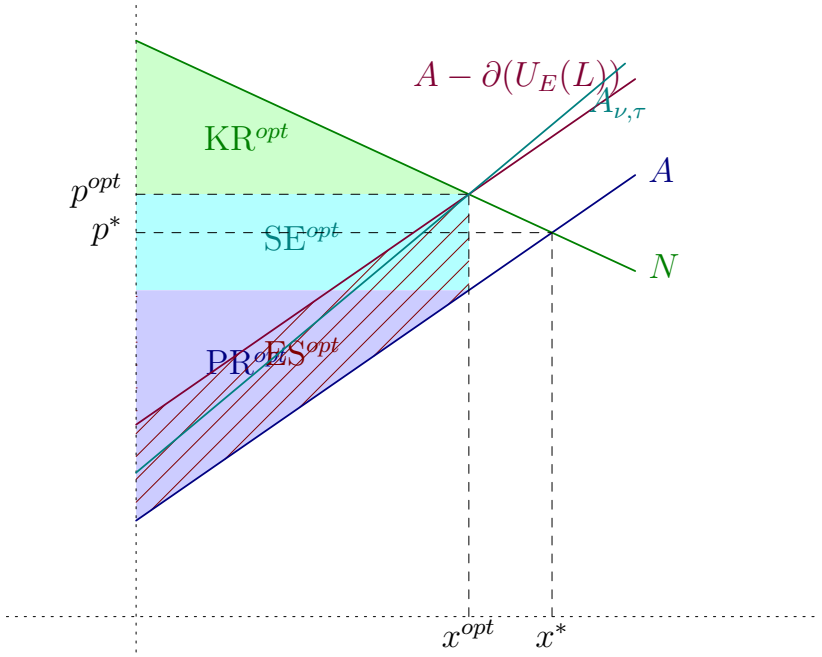


Abbildung 29: Optimale Pigou-Steuer im betrachteten Beispiel. Hier sind $a_0 = 6$, $a_1 = -2$, $b_0 = 1$, $b_1 = 3$ und $c_1 = 1$ gewählt; c_0 ist irrelevant.

Gut	Besteuerung
Strom	ν=2,05 ct/kWh
Benzin	ν=65 ct/Liter
Diesel	ν=47 ct/Liter
Heizöl	ν gleich 6,1 bzw. 7,6 ct/Liter (abhängig von Schwefelgehalt)
Gas	ν= 0,55 ct/kWh
Zigaretten	ν= 9,82 ct, τ=21,69% (+ Mindeststeuersatz)
Branntwein	ν=13,03 EUR/Liter reinem Alkohol (Regelsteuersatz)
Kaffee	ν=2,19 bis 4,78 EUR/kg (Röstkaffee bis löslicher Kaffee)

Tabelle 4: Steuersätze auf ausgewählte Kapitalgüter in Deutschland (Stand: Anfang 2017)

de (revenue recycling) bezeichnet. Es gibt verschiedene Ansätze, wie die Steuereinnahmen effizient(er) genutzt werden können, z.b. durch diverse Arbeitsmarkt-Instrumente.

Der gesamte Zusammenhang ist in der Abbildung 29 dargestellt, sowie in der Abbildung 30 für die Spezialfälle der reinen Mengen- und Wertsteuer.

In der Einleitung hatten wir erwähnt, dass die Pigou-Steuer versucht den fehlenden Preis für das externe Gut zu simulieren und dadurch die externen Effekte zu internalisieren. Anhand von den Abbildungen 27 und 28 können wir jedoch sehen, dass dies so nicht ganz korrekt ist. Die Angebotskurve inklusive der Pigou-Steuer $A_{\nu,\tau}$ entspricht nur im Optimum dem sozialen Angebot $A - \partial(U(L))$ (Angebot+Grenzschaden), der Verlauf der Steuerkurve in den anderen Punkten ist nicht relevant. Allerdings sehen wir durch 29 und 30, dass im Falle der Mengensteuer beide Kurven übereinstimmen. Allgemein können wir festhalten, dass jedes lineare Grenzangebot durch eine Pigou-Steuer, beschrieben als Mischung von Mengen- und Wertsteuer, sich perfekt abbilden lässt; der korrekte Preis wird also in jedem Punkt richtig 'simuliert'. D.h. wenn sich z.B. die Nachfrage ändert, muss der Steuersatz nicht angepasst werden, was im allgemeinen Fall durchaus möglich sein kann.

Zu bedenken ist, dass die Steuern in Deutschland neben der produktspezifischen Steuer

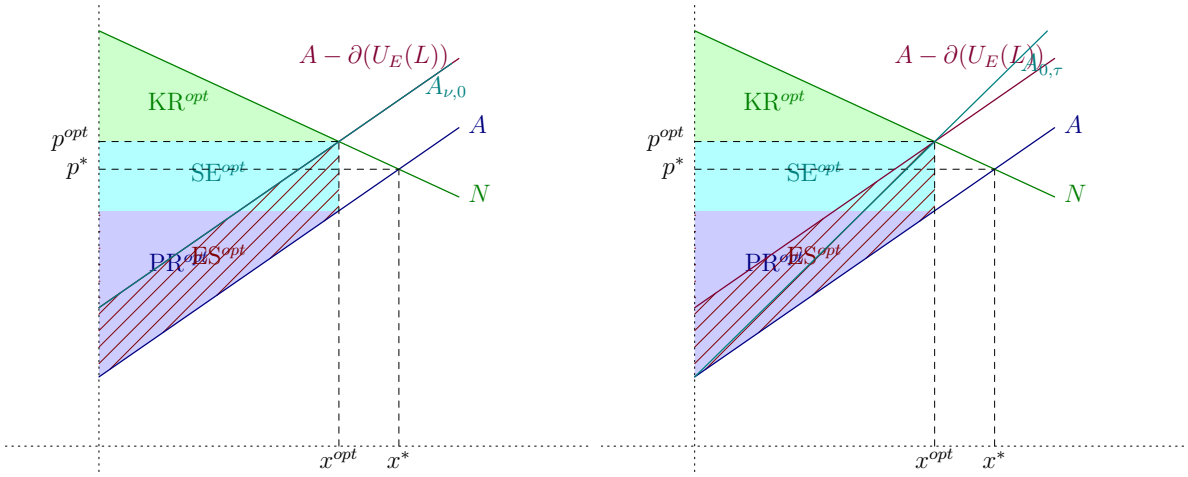


Abbildung 30: Optimale Pigou-Steuer im betrachteten Beispiel für die Spezialfälle der Mengen- und Wertsteuer. Hier sind $a_0 = 6$, $a_1 = -2$, $b_0 = 1$, $b_1 = 3$ und $c_1 = 1$ gewählt; c_0 ist irrelevant.

in der Tabelle 4 auch die Mehrwertsteuer ergänzt werden muss. Insbesondere deshalb muss für alle Güter mit $\nu \neq 0$ der Ansatz mit kombinierter Mengen- und Wertsteuer betrachtet werden. Wenn der Mehrwertsteuersatz (z.Z. 19%) als extern gegeben angenommen wird muss bei Gütern wie Strom oder Benzin τ entsprechend gewählt werden[7]. Generell ist zu bemerken, dass die Motivation dieser Steuern in der Praxis nicht (ausschließlich) die Vermeidung von externen Kosten ist. Allerdings wurde beispielsweise erstere im Rahmen der **Ökosteuerreform** eingeführt, was eine gewisse ökologische Grundintention im Sinne der Pigou-Steuer nahelegt.

3.5 Eigentumsrechte, Coase-Theorem und Zertifikate-Lösung

Eine andere Variante zur möglichen Internationalisierung von externen Effekten ist basiert auf der Vergabe von Eigentumsrechten an dem externen Gut. Dies ist insbesondere für nicht-exklusive Güter (öffentliche Güter und Allmendegüter) relevant. Der Staat vergibt die **Eigentumsrechte** an den im Markt agierende Individuen (z.B. Produzenten und Konsumenten). Diese können dann mit diesem Gut handeln. Der Staat macht, vereinfacht gesagt, aus dem externen Gut (welches kein Kapital war) ein Kapitalgut, das gehandelt werden kann. Durch die Vergabe von Eigentumsrechten, die handelbar sind, integriert er das externe Gut in den Markt. Das Kapitalgut wird nun gehandelt und unter bestimmten Bedingungen, die im **Coase-Theorem** formuliert sind, stellt sich automatisch eine pareto-optimale Allokation ein. Diese Bedingungen sind:

- **Vollständige Information**:
  Alle Marktteilnehmer kennen den Effekt der Externalität.
- **Keine Transaktions-/Verhandlungskosten**:
  Es gibt keine zusätzlichen Kosten, die eine Reallokation beeinflussen.
- **Eigentumsrechte**:
  Die Marktteilnehmer besitzen das externe Gut und haben vollständige Verfügungsrechte, insbesondere können sie damit handeln.

[7] Die Parametrisierung ist zu beachten!

Die ersten beiden Punkte, sind keine Besonderheit, denn sie werden auch im perfekten Markt angenommen. Besonders ist allerdings, dass es keine Aussagen über die Anzahl der Marktteilnehmer gemacht werden. So kann beispielsweise auch die Produzenten- oder Konsumentenseite von nur einem Marktteilnehmer vertreten werden, so stellt sich insb. auch im Monopol ein Pareto-Optimum ein. Der Kern ist, wie bereits angesprochen, der dritte Punkt, die Eigentumsrechte.

Treten die Produzenten und Konsumenten in die Verhandlungen, dann bestimmen maßgeblich die externen Effekte, bzw. die Zahlungsbereitschaft der Konsumenten zur Vermeidung der externen Kosten, den Verhandlungsausgang. Wenn die Produzenten $\ell > L(x^{opt})$ von 'externen' Gut besitzen, so werden Sie bereit sein, die Menge ℓ so lange an die Konsumenten zu verkaufen, bis sie genau $\ell^{opt} = L(x^{opt})$ besitzen. Denn der die Konsumenten wären so lange bereit das 'externe' Gut zu kaufen, solange der externe Grenzschaden von ℓ größer ist als der Grenznutzen aus dem Konsum von $x_\ell = L^{-1}(\ell)$, der $N(x_\ell) - p$ ist, wobei der Preis p sich als $A(x_\ell)$ ergibt. Das Optimum x_ℓ stellt sich folglich ein, wenn $\partial(U_E(L))(x_\ell) = N(x_\ell) - A(x_\ell)$ gilt. Also wenn die externen Grenzkosten gleich der Differenz aus Angebots- und Nachfragekurve sind. Wir bemerken, dass diese optimale Lösung genau jener entspricht, die wir auch vorher betrachtet hatten und bereits als $x^{opt} = x_\ell$ bezeichneten. In vollständiger Konkurrenz wird sich der Marktpreis von $A(x^{opt})$ ergeben und somit die gleiche Konsumenten- und Produzentenrentenstruktur wie in der Abbildung 24 (links) ergeben. Falls es sich bei der Produzentenseite um ein Monopol handelt, so wird die Produzentenseite bei der Preisbildung die Marktmacht nutzen können und es könnte sich $N(x^{opt})$ als Marktpreis einstellen (Abbildung 24 (rechts)). Es sind aber auch höhere Preise möglich, wenn die Produzentenrente für kleinere Produktionsmengen optimiert wird. [8]

Zu beachten ist, dass auch bei den positiven externen Effekten, die Vergabe von Eigentumsrechten theoretisch auch funktioniert.

Der Vorteil der Vergabe von Eigentumsrechten ist, dass der Staat keine Kenntnis über die Angebots- und Nachfragestruktur benötigt, denn durch den Marktmechanismus, stellt sich automatisch ein Pareto-Optimum ein. Allerdings muss der Staat Eigentumrechte für das externe Gut vergeben. Das setzt voraus, dass das Gut endlich ist. Für Allmendegüter, wie zum Beispiel einem See, ist dies relativ leicht umsetzbar. Die Fläche des Sees oder die Uferabschnitte können unterteilt und an die Marktteilnehmer vergeben werden. Jedoch gibt es auch relevante Umweltgüter (Luft bzw. Luftverschmutzung) bei denen die Abgrenzung schwieriger ist. Ein prominentes Beispiel ist der CO_2-Emissions-**Zertifikate-Handel**. Hier wird das Eigentumsrecht an CO_2-Emissionen (nach einer ersten Vergabe) gehandelt. In der EU ist Emissionsrechtehandel ein wichtiges Element der Umweltpolitik. Wir behandeln dies ausführlicher im nächsten Kapitel, und zwar als ein wichtiges Anwendungsbeispiel.

In der Abbildung 31 ist ein mögliches Ökosystem mit einem Zertifikate-Handel dargestellt. Wir sehen, dass die Luftverschmutzung in dem Sinne selbst gar nicht internalisiert wird, und ein Teil des ökonomischen Systems wird. Stattdessen kreiert der Staat die Eigentumsrechte (bzw. hier die Zertifikate), welche die Luftverschmutzung festlegen sollen.

Kritikpunkte sind vor allem die schwierige Umsetzbarkeit und die generelle Vergabe der Eigentumsrechte. Allgemein wird bei der Vergabe in zwei wichtige Prinzipien unterschieden. Diese sind die Zuteilung durch die Regierung (grandfathering), sowie die Versteigerung (auctioning).

Ferner kann gezeigt werden, dass unter den Transaktionskosten die Allokation in der

[8] Im Produktionsvorgabe-Fall ist dies nicht möglich, da die Produktion vorgegeben wird und auch nicht vom Monopol unterschritten werden darf.

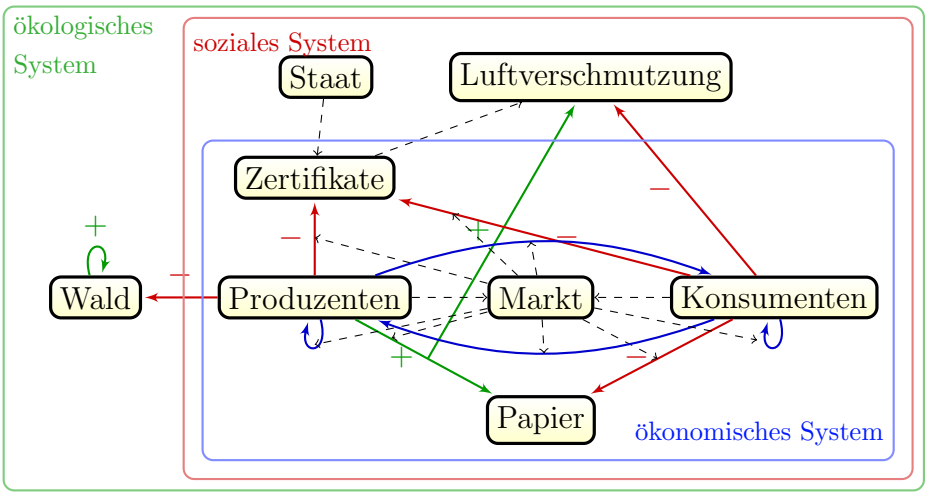


Abbildung 31: Ökologisches System mit Eigentumsrechten (hier Zertifikaten) im vollkommenen Wettbewerb.

Regel vom Optimum abweicht.

3.6 Imperfekte Marktstrukturen

Die Möglichkeit zur Internalisierung von externen Effekten, die wir besprechen, ist die gezielte Herstellung von imperfekten Märkten. Wir erinnern uns, dass wir im Regelfall, die zu produzierende Menge des Gutes x von x^* auf x^{opt} reduzieren wollen. Ferner wissen wir, aus der Mikroökonomie, dass **oligopolistische** oder im Spezialfall **monopolisitische Marktstrukturen** dafür sorgen, dass die Produzenten auf Grund der Marktmarkt die Produktionsmenge reduzieren können, um ihre Produzentenrente zu maximieren. Die Tatsache, dass die Produktion verringert wird, kann im Sinne der Reduzierung des externen Schadens genutzt werden.

Angenommen, es würde sich im Extremfall des Monopols ein Preis x^M einstellen. Wenn $x^M \leq x^{opt}$, so kann durch eine gezielte Einführung eines Oligopols (i.d.R. reicht ein Duopol) aus, um ein soziales Optimum herbei zu führen. Falls $x^M > x^{opt}$, so kann das Optimum durch die Einführung einer Monopol-Struktur nicht herbei geführt werden, allerdings würde das sich einstellende Marktgleichgewicht im Monopolfall dichter am globalen Optimum liegen, als im perfekten Wettbewerb, es würde sich also eine soziale Nutzenverbesserung einstellen. In der Abbildung 32 finden wir den staatlichen Eingriff in das Ökosystem schematisch dargestellt.

Dieser staatliche Eingriff wird aber häufig, als nicht erstrebenswert betrachtet, vor allem da die staatliche Lenkung der Marktmarkt in der Regel schwierig ist, zudem kann keine optimale Lösung für $x^M < x^{opt}$ erreicht werden. Zudem wird die hohe Produzentenrente im Monopol als Problem gewertet.

In der Praxis wird die Variante in der Regel nicht angewendet (zumindest aus umweltökonomischen Gesichtspunkten). Zwar gibt es viele Märkte mit oligopolistischen Marktstrukturen (z.B. der deutsche Bahnverkehr), allerdings sind diese häufig natürliche Monopole, welche auf Grund hoher Fixkosten entstehen (z.B. durch hohe Kosten für Schienen) und nicht zur Vermeidung externer Effekte bestehen.

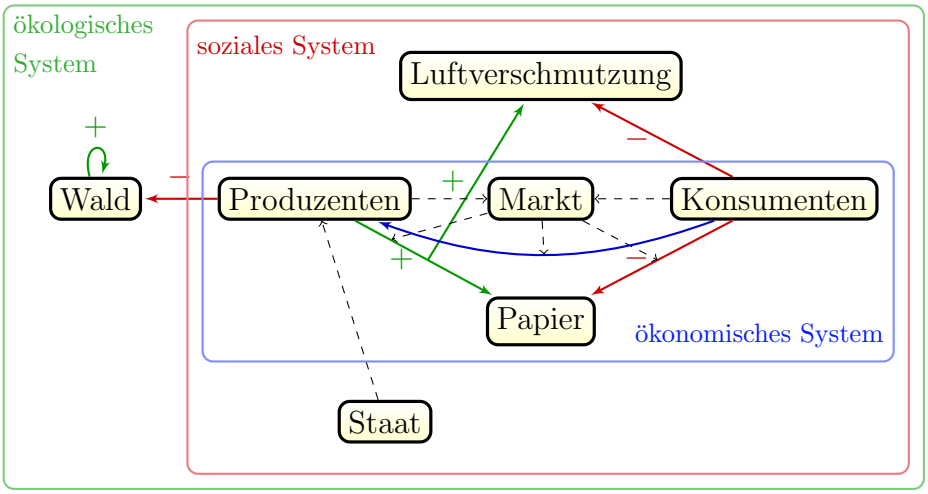


Abbildung 32: Ökologisches System mit Oligopol-Lösung

4 Klima, Klimawandel und Emissions-Handel

Der Klimawandel wird in dem gesellschaftlichen Diskurs häufig als eines der größten Probleme des 21. Jahrhunderts betrachtet, die die Menschheit zu lösen hat. In diesem Kapitel wollen wir zunächst die Grundlagen studieren und im Anschluss Lösungsmöglichkeiten vor allem aus der umweltökonomischen Perspektive diskutieren.

4.1 Grundlagen Klimawandel

Als **Klimawandel** wird die Veränderung des Klimas auf unserer Erde bezeichnet, unabhängig davon, wie dieser Wandel zustande kommt. Die Ursache für einen Klimawandel kann sowohl anthropogener Natur, als auch nicht anthropogener sein.

Fakt ist, dass viele Einflussfaktoren das Klima, also die meteorologischen Vorgänge in der Erdatmosphäre beeinflussen. Allerdings wird das Klima nur nicht von der Erdatmosphäre geprägt, sondern durch ein Wechselspiel der **Lithosphäre**, **Hydrosphäre** und **Atmosphäre**, sowie dem Einfluss von Himmelskörpern (insb. **Sonne** unseres Sonnensystems) beeinflusst. Verschiedene strukturelle Änderungen in dem Wechselspiel, z.B. durch die Änderung der Sonnenaktivität, große Vulkanausbrüche, Meteoriteneinschlag oder Polumkehr, können Änderungen im Klima hervorrufen.

Die Sonne ist ein thermonuklearer Himmelskörper, dessen freigesetzte Energie die Erde bestrahlt und damit vor allem die Meteorologie auf der Erde beeinflusst. Dabei ist es für uns wichtig zu wissen, dass die eintreffende Strahlung teilweise reflektiert wird und teilweise von der Erdoberfläche und der Erdatmosphäre absorbiert. Zusätzlich strahlt die Erde selbst Energie ab. Je nach Zusammensetzung der Gase in der Erdatmosphäre ändert sich ihr Absorptions- und Reflektionsverhalten, was ein wichtiger Wirkungsmechanismus des **atmosphärischen Treibhauseffektes** ist. Dieser wird verstärkt, d.h. die Temperatur im 'Treibhaus' Erde erhöht sich, wenn sich bestimmte **Treibhausgase** in der Atmosphäre befinden. Die wichtigsten Treibhausgase sind **Wasserdampf** (H_2O), **Kohlenstoffdioxid** (CO_2), **Methan** (CH_4), **Ozon** (O_3), Distickstoffoxid bzw. Lachgas (NO_2), teilhalogenierte **Fluorkohlenwasserstoffe** (H-FKW/HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC) und Schwefelhexafluorid (SF_6). Einige dieser Gase werden als direkte Treibhausgase (wie H_2O, CO_2, CH_4 und O_3) bezeichnet, weil ihre direkte Präsenz in der Atmosphäre den Treibhauseffekt der Erde verstärkt; andere werden als indirekte Treibhausgase bezeichnet, da die Präsenz des Gases in der Atmosphäre den Anteil der direkten Treibhausgase (insb. O_3) beeinflusst. So reduziert beispielsweise NO_2 oder Fluorkohlenwasserstoffe den Ozonanteil in der Atmosphäre.

Die genauen Anteile dieser Gase in der Atmosphäre schwanken, abhängig von Ort und Zeit. Ferner haben die genannten Gase einen unterschiedlich großen Einfluss auf den Treibhauseffekt, der Einfluss wird auch als **Treibhauspotential**, **CO_2-Äquivalent** oder **Global warming potential** (GWP) bezeichnet. Dieser Wert gibt an, wie stark ein Teilchen über einen bestimmten Zeitraum zum Treibhauseffekt beiträgt, relativ zum Treibhausgas CO_2. Der betrachtete Zeitraum beträgt üblicherweise 100 Jahre, teilweise aber auch 20 Jahre und 500 Jahre. So beträgt zum Beispiel das CO_2-Äquivalent für Methan bei einem Zeitraum von 100 Jahren (GWP_{100}) 21 nach dem Kyoto-Protokoll. Also sorgt ein Kilogramm Methan in 100 Jahren für einen 21-mal so starken Treibhauseffekt, wie ein Kilogramm CO_2. In der Tabelle 5 sind mehrere GWP-Werte für ausgewählte Treibhausgase gelistet. Ferner zeigt die Tabelle die **Verweilzeit** für diese Gase. Es ist jene mittlere Zeit, die ein die Atmosphaere gebrachtes Teilchen (ver)bleibt. Die Verweilzeit kann jedoch nicht von jedem Treibhausgas genau ermittelt werden, insbesondere für CO_2

ist der Zusammenhang wegen des komplexen Kohlenstoff-Kreislaufes komplizierter.

Treibhausgas	Formel	GWP_{100}	GWP^*_{20}	GWP^*_{100}	Verweilzeit
Kohlenstoffdioxid	CO_2	1	1	1	-
Methan	CH_4	21	84	28	12
Distickstoffoxid (Lachgas)	N_2O	310	264	265	121
1,1,1,2-Tetrafluorethan	$C_2H_2F_4$	1000	3710	1300	134
Schwefelhexafluorid	SF_6	23900	17500	23500	3200

Tabelle 5: Treibhausgase mit CO_2-Äquivalent (GWP_{100} nach Kyoto Protokoll; GWP^*_{20}, GWP^*_{500} und Verweilzeit nach IPCC AR5).

Es ist klar, dass der GWP-Wert und die Verweildauer einen Einfluss auf das Klima haben. Je größer der jeweilige Wert, desto größer der Effekt des Gases über einen langen Zeitraum. Darüber hinaus spielt natürlich die Konzentration der einzelnen Stoffe eine wichtige Rolle beim Gesamteffekt des Treibhauseffektes. Beispielsweise hat CO_2 einen relativ großen Anteil am Treibhauseffekt, obwohl sein GWP-Wert gering ist; es gibt jedoch relativ viel CO_2 in der Atmosphäre.

In der Tabelle 6 sind die wichtigsten Treibhausgase und ihr geschätzter Anteil am Treibhausgaseffekt gelistet. Wir sehen, dass CO_2 nach H_2O den zweitgrößten Einfluss als Treibhausgas hat, gefolgt von Methan und Ozon.

Treibhausgas	Formel	Konzentration in der Atmosphäre (in ppm)	Anteil am Treibhauseffekt
Wasserdampf (inkl. Wolken)	H_2O	10000-50000	36-72% (klares Wetter ca. 60%)
Kohlenstoffdioxid	CO_2	ca. 400	9-26%
Methan	CH_4	ca. 1,8	4-9%
Ozon	O_3	ca. 2-8	3-7%

Tabelle 6: Schätzungen des relativen Anteil am Treibhauseffekt wichtiger Treibhausgase.

Im Fokus der gesellschaftlichen Debatte über den Klimawandel steht der anthropogene Einfluss des Menschen auf den Klimawandel. Dabei wird häufig der Schwerpunkt auf CO_2 gelegt, da es einen relativ großen Anteil hat. Die Geschichte der CO_2 Konzentrationsentwicklung ist in der Abbildung 33 dargestellt.

Wir sehen, dass sich in den letzten ca. 800 000 Jahren die CO_2-Konzentration immer wieder geänderte hatte. Zwischen 800.000 v.Chr. und 1900 n.Chr wäre die CO_2 Konzentration immer zwischen 170ppm und 300ppm. Seit ca. 1900 ist die Konzentration über 300ppm und seit ca. 2015 über 400ppm. Bei den Messungen fällt vor allem auf, dass der Anstieg der CO_2 in den letzten Jahrzehnten so schnell war, wie noch nie zuvor. Der zeitliche Verlauf legt daher nahe, dass der Mensch einen erheblichen Anteil an dem Anstieg an der CO_2-Konzentration hat.

CO_2 entsteht bei der aeroben Atmung von Lebewesen, wie Tieren und Pilzen. Allerdings entsteht es vor allem bei vielen modernen, mit der Industrialisierung verbundenen Produktionsprozessen, wie bei der Verbrennung fossiler Energieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas) oder auch Biomasse (Wald-/ Brandrodung), oder der Zementproduktion. Die Zeitliche Entwicklung der erzeugten CO_2-Emissionen verschiedener Ländern wird in der Abbildung 34 präsentiert. Aus der Abbildung wird es ersichtlich, dass die Länder im Laufe der Geschichte dazu neigten, zunehmend mehr Kohlenstoffdioxid zu emittieren.

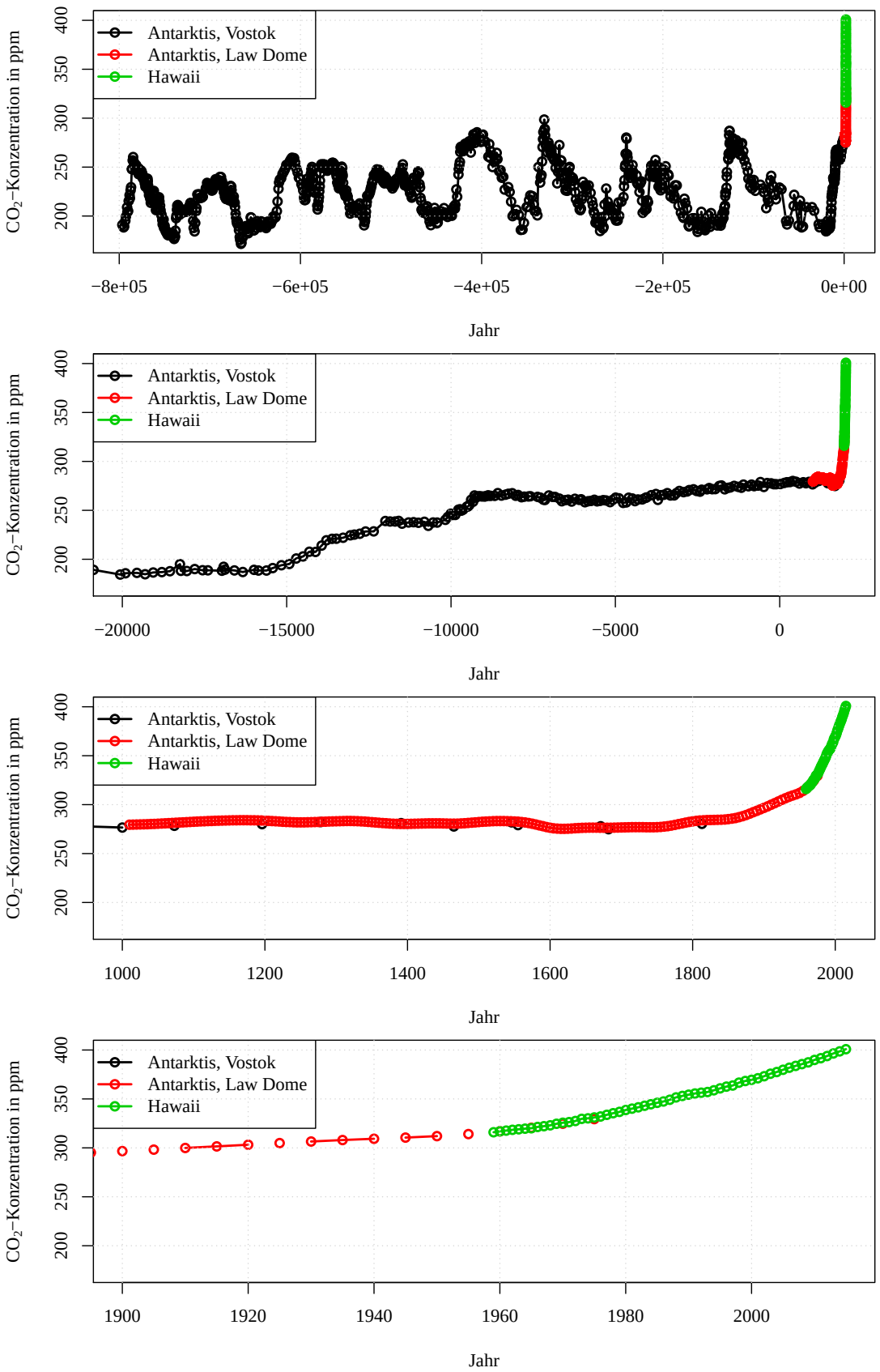


Abbildung 33: Zeitliche Entwicklung der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre (Jahr in v.Chr bzw. n.Chr.).

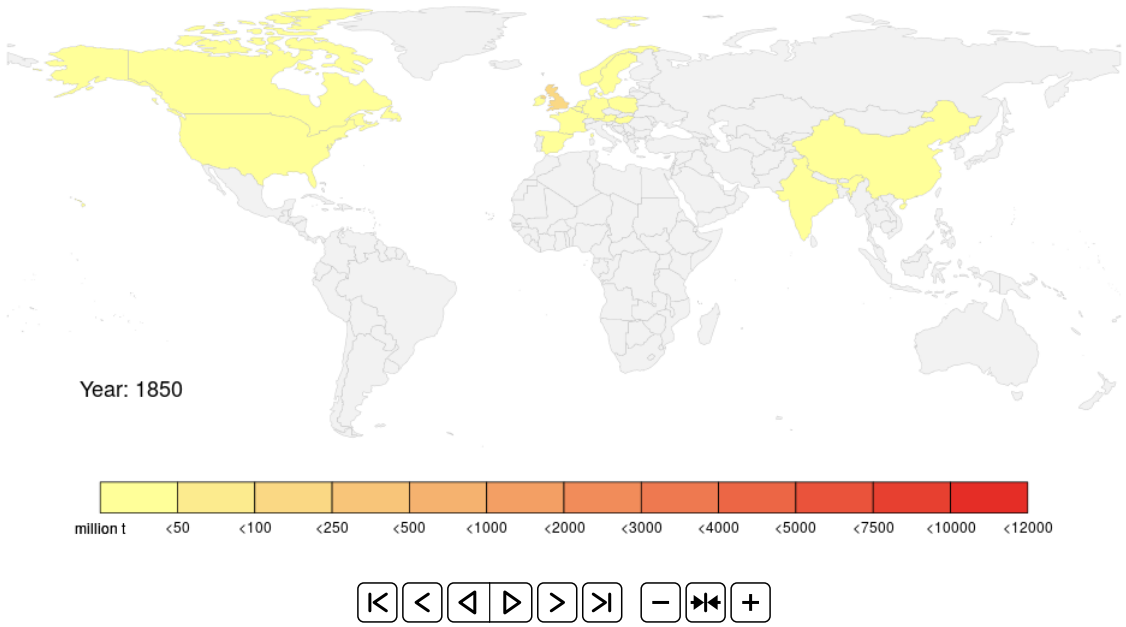


Abbildung 34: Jährliche Kohlenstoffdioxidemissionen (CO_2) verschiedener Länder, dargestellt in Tonnen pro Jahr. (Grau = fehlende Daten)

In der Abbildung 35 ist die zeitliche Entwicklung der CO_2-Emissionen durch die Verbrennung von fossiler Energieträger der letzten zwei Jahrhunderte dargestellt, so wurde bsp. im Jahr 2014 35.9 Gt CO_2 emittiert.

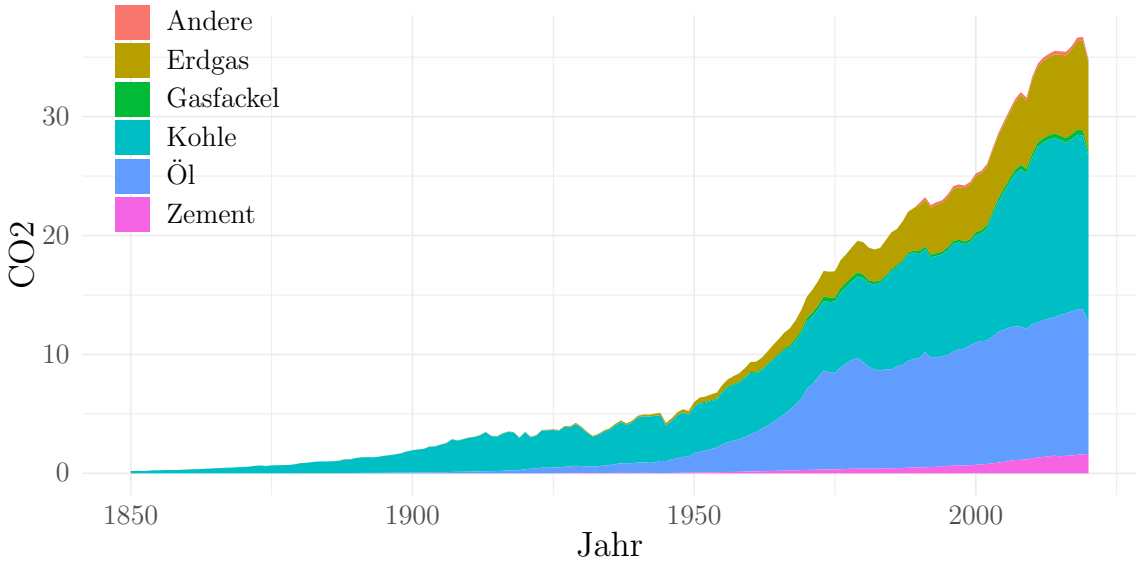


Abbildung 35: Zeitliche Entwicklung der anthropogenen Kohlenstoffemissionen von fossilen Brennstoffen in Milliarden Tonnen

In der Abbildung 36 ist die zeitliche Entwicklung der letzten Jahrzehnte für weitere Treibhausgase dargestellt. Für Lachgas, sieht der zeitliche Verlauf der Konzentration ähnlich aus, wie der von CO_2 in der Abbildung 33; auch hier liegt der anthropogene Einfluss nahe. Dennoch, auch für das dritt-wichtigste Treibhausgas Methan, ist hier ein Anstieg zu beobachten. Der Mensch erzeugt Methan jedoch nicht nur bei industriellen Prozessen, wie der Erdgas- und Erdölproduktion, dem Steinkohlenbergbau (Grubengas),

dem Betrieb von Kläranlagen und Mülldeponien; sondern es entsteht auch im hohen Maße beim Reisanbau und bei der Viehzucht, insb. der Rinderzucht. Es entsteht aber auch natürlich in Feuchtgebieten (Sümpfe) und beim Zerfall von Methanhydrat (vor allem durch das Abschmelzen von großen Eismengen bzw. Gletschern).

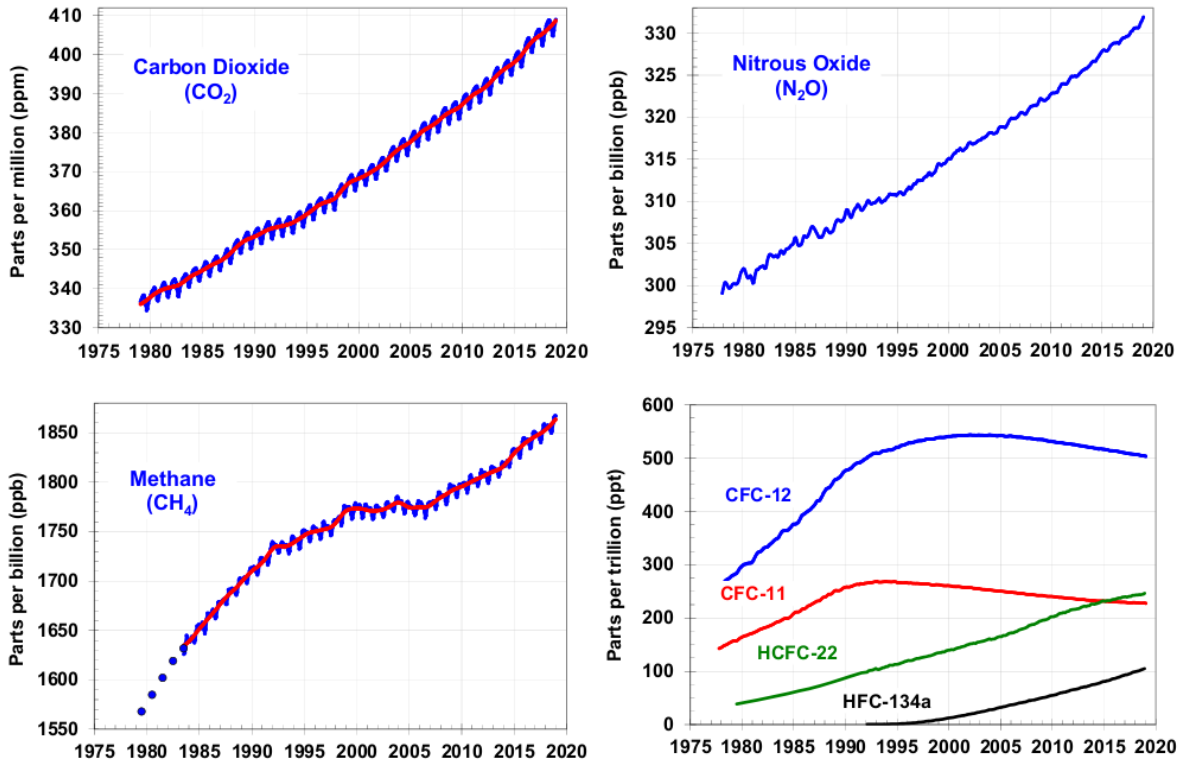


Abbildung 36: Zeitliche Entwicklung der Treibhausgas-Konzentration in der Atmosphäre (Quelle: NOAA).

Wir haben gesehen, dass H_2O das wichtigste Treibhausgas ist, allerdings beeinflusst der Mensch den H_2O Anteil in der Atmosphäre nahezu nicht auf dem direkten Wege. Die Menschheit ist jedoch, wie bereits erläutert für einen gewissen Anteil anderer Treibhausgase verantwortlich, dies ist insbesondere der CO_2. Es ist für etwa dreiviertel des **anthropogenen Anteils am Treibhauseffekt** verantwortlich. Die Anteilswerte der drei wichtigsten anthropogenen Treibhausgase sind in der Tabelle 7 dargestellt. Wir sehen, dass nach CO_2 Methan für etwa ein siebtel der anthropogenen Emission verantwortlich ist und etwa 6% für Lachgas. Alle anderen Treibhausgase haben den vorherigen Zahlen nach, zusammen zur Zeit nur einen Anteil von ca. 2% am anthropogenen Treibhauseffekt. Allerdings sind die Werte in 7 nur Schätzungen, je nach Studie bzw. wissenschaftlichen Methodik variieren die Anteilswerte teils erheblich, insbesondere was den Anteil der Treibhausgase mit hohem GWP_{100} (wie den FCKWs) betrifft. So gibt es Studien, die für diese Gruppe einen Anteilswert von bis zu 14% ausweisen. Unabhängig von den Studien sind sich alle Wissenschaftler einig, dass CO_2 mit Abstand den größten Anteil am anthropogenen Treibhauseffekt hat, gefolgt von Methan.

Wir haben gesehen, dass bei der menschlichen Klimabilanz vor allem CO_2 wichtig ist, daher wird es als Referenzgas im gesellschaftlichen Diskurs verwendet und das Treibhauspotential (GWP) wird beispielsweise relativ zu CO_2 betrachtet und auch als CO_2-Äquivalent bezeichnet. Wir haben auch beobachtet, dass die Produktion von CO_2 über die letzten Jahrzehnte stark gestiegen ist, doch wie ist die Auswirkung auf das Klima?

Treibhausgas	Formel	Antropogener Anteil am Treibhauseffekt (in GWP_{100})
Kohlenstoffdioxid	CO_2	ca. 76%
Methan	CH_4	ca.14%
Lachgas	NO_2	ca. 6%

Tabelle 7: Quelle: IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): Climate Change 2014

Wir betrachten dazu die Abbildung 37 in der der geschätzte Temperaturverlauf (globale mittlere Erdtemperatur) auf der Erde dargestellt ist. Wir sehen, dass es Millionen

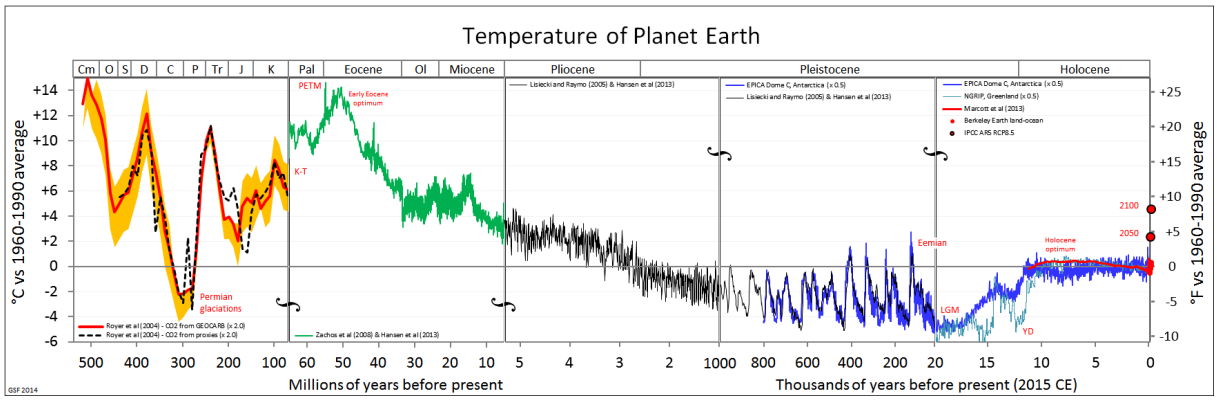


Abbildung 37: Zeitliche Entwicklung der Temperatur auf der Erde.

von Jahren auf der Erde auch deutlich wärmer war als in den letzten 10000 Jahren. Ferner, entnehmen wir dem Graph eine Temperatur-Entwicklung von vor 1Mio. Jahren bis heute, dass der Verlauf jenen aus Abbildung 33 entspricht. In den letzten 10000 Jahren war die Temperatur auf der Erde vergleichsweise stabil. Allerdings sagen verschiedenste Studien ein klares Ansteigen des globalen mittleren Erdtemperatur voraus, vgl. Abbildung 38. Sie variieren alle in ihrem Anstieg bis 2100. Allerdings ist der Anstieg immer über $2°C$ über dem Niveau vom Jahr 2000. Hier ist anzumerken, dass es einen geringen Anteil von Klimatologen gibt (ca. 3%), die einen solchen Temperaturanstieg nicht prognostizieren; in dieser Vorlesung gehen wir jedoch im Weiteren davon aus, dass es zu einem Temperaturanstieg, durch die anthropogene Treibhausgasemission und dem damit verbundenen Treibhauseffekt, kommt.

Es ist ersichtlich, dass wenn die CO_2-Emission (aber auch andere Treibhausgase) durch den Menschen stetig steigt, so wird durch den Treibhauseffekt die Temperatur auf der Erde immer weiter ansteigen, was die Stabilität des Ökosystems Erde bedroht. Daher stellt sich die Frage, wie wir als Menschen handeln müssen, um die globale Erderwärmung auf einem bestimmten Niveau zu stoppen. Genauer gefragt, auf welches Niveau muss der Mensch die CO_2-Emission reduzieren, damit sich die Erdtemperatur auf welchem Niveau stabilisiert? Auf Grund des monotonen Zusammenhangs ist es klar, dass die Treibhausgasemission stärker reduziert werden muss, wenn eine Stabilisierung der Temperatur bei einem zusätzlichen Anstieg um $X°C$ gegenüber einem Referenzniveau, statt bei $Y°C$ mit $X < Y$ erreicht werden soll. In der Abbildung 38 sind Schätzungen für den Temperaturanstieg einer bestimmten CO_2 Emission bis 2100 gegeben; Erinnerung: das aktuelle CO_2-Emissionskonzentration in der Atmosphäre beträgt ca. 400ppm. Es ist jedoch zu beachten, dass die Modelle generell eine hohe Unsicherheit haben. Dennoch sehen wir, dass es eher unwahrscheinlich ist, dass die Temperatur um $1.5°C$ ansteigt, wenn im Jahr

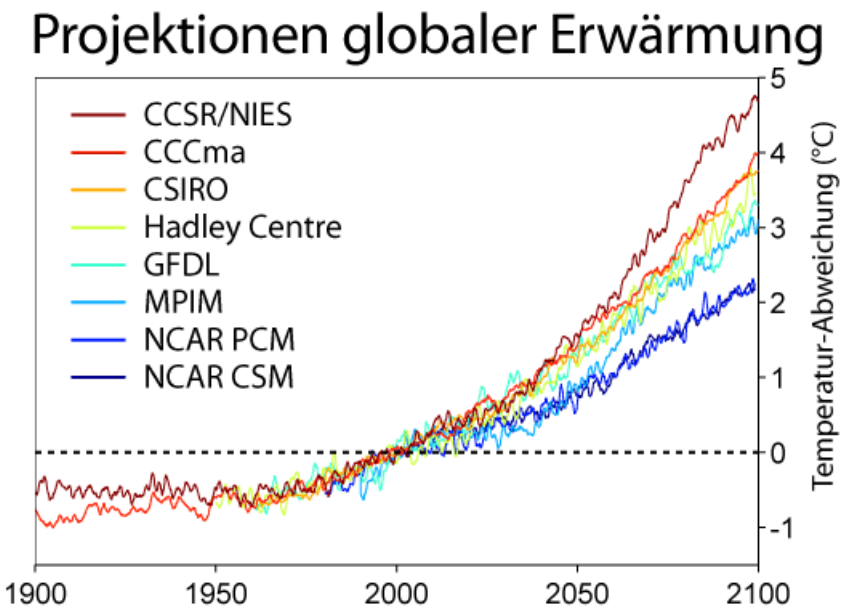


Abbildung 38: Zeitliche Entwicklung der Temperatur auf der Erde und verschiedene Temperatur-Projektionen für bis 2100.

2100 der CO_2-Anteil über 450ppm sein wird. Andererseits, um eine realistische Chance auf einen Temperatur-Anstieg von $2°C$ zu haben, müssten demnach der CO_2-Anteil auf maximal 500ppm sein. Aber selbst wenn ein solches Ziel erreicht wird, ist es durchaus auch wahrscheinlich, dass die Temperatur um $2°C$ oder $4°C$ steigt. Unabhängig davon bei

CO_2-eq Concentrations in 2100 (ppm CO_2-eq) [f] Category label (conc. range)	Subcategories	Relative position of the RCPs [d]	Change in CO_2-eq emissions compared to 2010 (in %) [c]		Likelihood of staying below a specific temperature level over the 21st century (relative to 1850–1900) [d, e]			
			2050	2100	1.5°C	2°C	3°C	4°C
<430	Only a limited number of individual model studies have explored levels below 430 ppm CO_2-eq [i]							
450 (430 to 480)	Total range [a, g]	RCP2.6	–72 to –41	–118 to –78	*More unlikely than likely*	*Likely*	*Likely*	*Likely*
500 (480 to 530)	No overshoot of 530 ppm CO_2-eq		–57 to –42	–107 to –73	*Unlikely*	*More likely than not*		
	Overshoot of 530 ppm CO_2-eq		–55 to –25	–114 to –90		*About as likely as not*		
550 (530 to 580)	No overshoot of 580 ppm CO_2-eq		–47 to –19	–81 to –59		*More unlikely than likely* [i]		
	Overshoot of 580 ppm CO_2-eq		–16 to 7	–183 to –86				
(580 to 650)	Total range	RCP4.5	–38 to 24	–134 to –50				
(650 to 720)	Total range		–11 to 17	–54 to –21		*Unlikely*	*More likely than not*	
(720 to 1000) [b]	Total range	RCP6.0	18 to 54	–7 to 72	*Unlikely* [h]		*More unlikely than likely*	
>1000 [b]	Total range	RCP8.5	52 to 95	74 to 178		*Unlikely* [h]	*Unlikely*	*More unlikely than likely*

Abbildung 39: Darstellung der Auswirkung der globalen Erwärmung. Quelle: IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): Climate Change 2014

welcher Temperatur eine Stabilisierung erreicht wird, trägt die Erhöhung der Temperatur

selbst zu meteorologischen Konsequenzen bei, wie das Abtauen der Polkappen, Ausbreitung von Wüsten, Abreißen bzw. Änderung von Meeresströmungen und die Zunahme von extremen Wetterereignissen (Stürme, Fluten, etc.) mit entsprechenden ökologischen, gesellschaftlichen und ökonomischen Folgen.

In dem gesellschaftlichen und politischen Diskurs spielt das **Zwei-Grad-Ziel** ($2°C$-Ziel) eine wichtige Rolle. Denn es besagt, dass bis 2100 die mittlere globale Erdtemperatur um maximal $2°C$ steigen darf, im Vergleich zu dem Niveau von ca. 1850-1900. Ferner ist dabei zu bedenken, bereits jetzt (2016) die durchschnittliche Temperatur um ca. $1,2°C$ angestiegen ist, also nur noch ca. $0,8°C$ dann zulässig wäre. Dennoch hat sich die Europäische Union (EU) 1996 das Zwei-Grad-Ziel als Leitlinie in der Klima- und Umweltpolitik gesetzt.

Im Jahr 2015 unterzeichneten 195 Mitgliedstaaten der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) das **Übereinkommen von Paris** (auch Paris Agreement), welches als Klimaabkommen ein Nachfolgeabkommen zum Kyoto-Protokoll darstellt. Dieses Abkommen sieht vor, dass alle Mitgliedsstaaten das Zwei-Grad-Ziel erreichen wollen. Im Übereinkommen von Paris heißt es im Artikel 2:

1. *This Agreement, in enhancing the implementation of the Convention, including its objective, aims to strengthen the global response to the threat of climate change, in the context of sustainable development and efforts to eradicate poverty, including by:*

   a) *Holding the increase in the global average temperature to well below* $2°C$ *above pre-industrial levels and to pursue efforts to limit the temperature increase to* $1.5°C$ *above pre-industrial levels, recognizing that this would significantly reduce the risks and impacts of climate change;*

   b) *Increasing the ability to adapt to the adverse impacts of climate change and foster climate resilience and low greenhouse gas emissions development, in a manner that does not threaten food production;*

   c) *Making finance flows consistent with a pathway towards low greenhouse gas emissions and climate- resilient development.*

2. *This Agreement will be implemented to reflect equity and the principle of common but differentiated responsibilities and respective capabilities, in the light of different national circumstances.*

Insbesondere sehen wir, dass die Staatengemeinschaft sogar noch ambitionierte Ziele für die Reduktion der Temperatur und damit der Treibhausgas-Emission hat.

Das Abkommen konnte am 4. November 2016 in Kraft treten, nachdem 55 Staaten, die mindestens 55 % der Emissionen verursachen, das Abkommen ratifiziert hatten. Unter den Unterzeichnerstaaten befanden sich mit China (20.09%)[9] und die USA (17.89%). Diese sind die zwei größten Emittenten unter den Unterzeichnern. Die größten Emittenten, die bisher [Stand: Okt.2021] das Abkommen zwar unterzeichneten aber noch nicht ratifiziert haben sind der Iran (1.30%), der Iraq (0.2%) und bedeutend kleinere Emittenten wie der Yeme (0.07%).

Zur Zeit haben Staaten, die für ca. 98% der Treibhausgas-Emissionen verantwortlich sind, das Abkommen ratifiziert. Allerdings kündigte die USA Mitte 2017 ihren Rücktritt zum Jahr 2020 aus dem Abkommen an. Unter der Präsidentschaft von Joe Biden wurde allerdings im Januar 2021 der wiedereintritt in das Pariser Abkommen beschlossen.

[9] Prozentsätze nach dem Annex des Pariser Übereinkommens

Bedenken bzw. Kritik am Pariser Übereinkommen wird vorrangig in die Richtung geäußert, dass es keine bzw. ungenügende bindende Zwangsmaßnahmen für Staaten gibt, die bestimmte klimapolitische Ziele nicht erreicht haben. Darüber hinaus, argumentieren einige Kritiker, dass die gesetzten Ziele nicht ehrgeizig genug seien; weshalb z.B. Nicaragua nicht dem Abkommen beitrat.

Aktuell werden knapp 38 Giga-Tonnen CO_2 pro Jahr produziert. Bbei einer Weltbevölkerung von 7.5 Milliarden, entspricht das einer Pro-Kopf Produktion von ca. 5.0 Tonnen CO_2 pro Kopf[10]. In der Abbildung 40 sind die CO_2-Emissionen mit ihrem Bruttoinlandsprodukt (BIP) als einfaches Wohlfahrtsmaß verschiedener relevanter Länder dargestellt, in absoluten und in pro Kopf Größen. Es fällt ein klar linearer Zusammenhang zwischen der Wirtschaftsleistung und der CO_2-Emission auf. Wenn das aktuelle Niveau von ca. 5 Tonnen CO_2 pro Kopf als Richtmaß genommen wird, kann die Abbildung in jene Länder unterteilt werden, die pro Kopf mehr als der Durchschnitt emittieren und jene mit geringerer Produktion. Wenn wir das auf diesem Emissions-Niveau mittlere Einkommen fixieren (16000USD/Kopf), so können wir die Abbildung in vier Quadranten unterteilen, die reichen Länder mit großer CO_2-Emission (oben-rechts), die armen Länder mit großer Emission (oben-links), die armen Länder mit geringer Emission (unten-links) und die reichen Länder mit geringer Emission. Es liegt nahe, dass Länder es anstreben, möglichst eindeutig im Quadranten unten rechts zu sein. Länder die dort auffallen sind vor allem Equatorial Guinea (QY) und Schweden (SE). Besonders negativ fallen Länder wir Quatar (QA), Trinidad and Tobago (TT), Turkmenistan (TM) und die Ukraine (UA) auf, mit einer hohen pro Kopf Emission bei gegebenem BIP.

Die Abbildung 41 zeigt die Treibhausgasemission in Deutschland in den letzten Jahren, sowie die Ziele der Bundesregierung.

Es ist ersichtlich, dass Deutschland in den letzten 25 Jahren die Treibhausgasemissionen kontinuierlich gesenkt hat, seit 2009 jedoch nur marginal. Falls Deutschland in ähnlicher Geschwindigkeit in den nächsten Jahren die Reduzierung der Emissionen fortsetzt, wird das Emissionsziel der Bundesregierung für 2020 voraussichtlich nicht erreicht.

Wenn wir den anthropogenen CO_2-Anteil in der Atmosphäre als externes Gut auffassen, dann können verschiedene Instrumente der Umweltökonomik angewendet werden, um regulatorisch die produzierte CO_2-Menge zu beeinflussen. Wenn wir ferner davon ausgehen, dass keine Gefahr besteht, dass die globale CO_2-Emission zu gering ausfällt, dann sind alle Maßnahmen zu begrüßen, die dafür sorgen, dass die CO_2-Emission gesenkt wird. Aus gesellschaftlicher Sicht sind jedoch Lösungen zu bevorzugen, die dabei die Wohlfahrt nicht reduzieren. Wenn wir das BIP/Kopf als Wohlfahrtsmaß eines Landes nehmen, so würde dies bedeuten, dass die CO_2-Emissionen bei mindestens gleichbleibender Wohlfahrt sinken sollen. Die ist prinzipiell möglich. In Deutschland beispielsweise hat sich die CO_2-Emission in den letzten 25 Jahren verringert (vgl. Abb. 41), bei (leicht) steigendem BIP/Kopf. Kritiker wenden jedoch ein, dass sich die globale Klimabilanz nicht verbessert hat. Denn die Produktionsprozesse, die viel Emissionen hervorrufen, würden nicht mehr in der Menge in Deutschland stattfinden, sondern in einem anderen Land und die entsprechenden Güter würden dennoch konsumiert werden. Tatsächlich werden sich im internationalen Handel eingebetteten Emissionen in Abbildung 42 dargestellt. Diese Abbildung stellt den Anteil der importierten oder exportierten CO_2-Emissionen verschiedener Länder relativ zum BIP dieser Länder. Es folgt daraus, dass die Länder, die im Rot dargestellt sind, net-Importeurs der Emissionen sind. Die im Blau dargestellten Länder sind wiederum net-Exporteurs der Emissionen. Zum Beispiel, wenn ein Land mit dem

[10] Die 5.0t CO_2 pro Kopf umfassen nur die weltweiten CO_2-Emissionen, denn die gesamte Treibhausgasemission beträgt ca. 7.0t CO_2-Äquivalent (in GWP_{100})

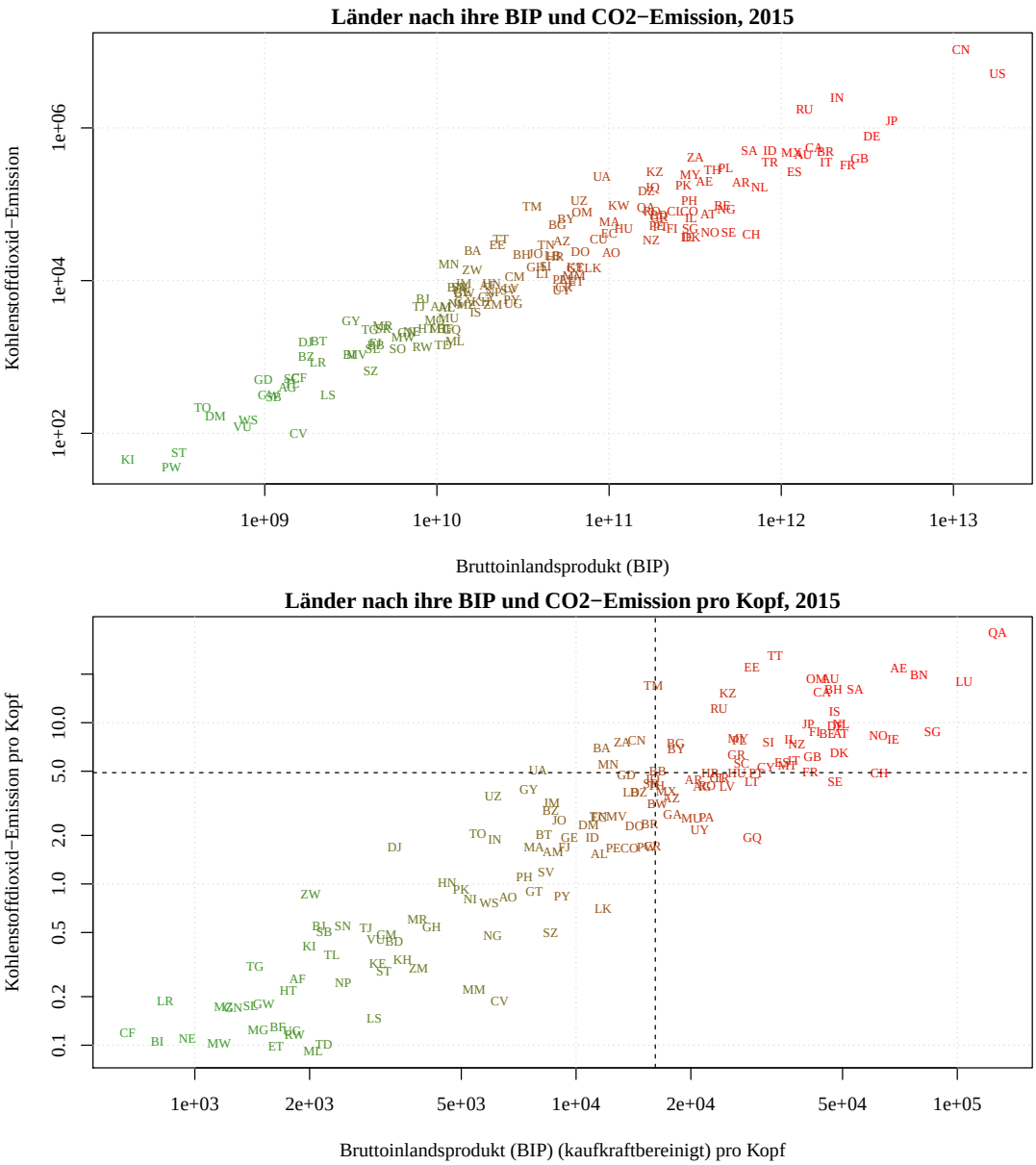


Abbildung 40: CO_2-Emission und BIP (in USD) verschiedener Länder in absoluten Werten und pro Kopf im Jahr 2015. (Abkürzungen nach ISO 3166-1)

Wert von 100% verbunden ist, importiert dieses Land das Äquivalent von 100% seines BIP in der Form von CO_2-Emissionen. Daher werden z.B. Russland, China und Indien im Blau dargestellt, weil diese Länder tendenziell umweltunfreundliche Güter intern produzieren und ins Ausland verkaufen.

Um gezielt politisch lenken zu können, muss jedoch immer die CO_2-Emission des relevanten Objektes regelmäßig gemessen werden. Dieses **Monitoring** ist vor allem Notwendig, um den Fortschritt zu messen; selbst wenn wir es als gegeben betrachten, dass CO_2 gesenkt werden muss. Natürlich muss diese Messung, nicht nur für CO_2 passieren, sondern für alle relevanten Treibhausgase.

Wenn wir ein Objekt (z.B. ein Land, ein Haushalt, ein Unternehmen, ein Produkt) betrachten, und ihm eine Treibhausgas-Emission als CO_2-Äquivalent (in der Regel als GWP_{100}) pro Zeiteinheit zuordnen. Dieser Wert auch als **CO_2-Bilanz**, **Treibhausgas-Bilanz**, **Klimabilanz** oder **CO_2-Fingerabdruck** des Objektes bezeichnet. Hierbei ist zu beachten, dass die CO_2-Bilanz alle Treibhausgase umfasst, nicht nur die CO_2-Emissionen.

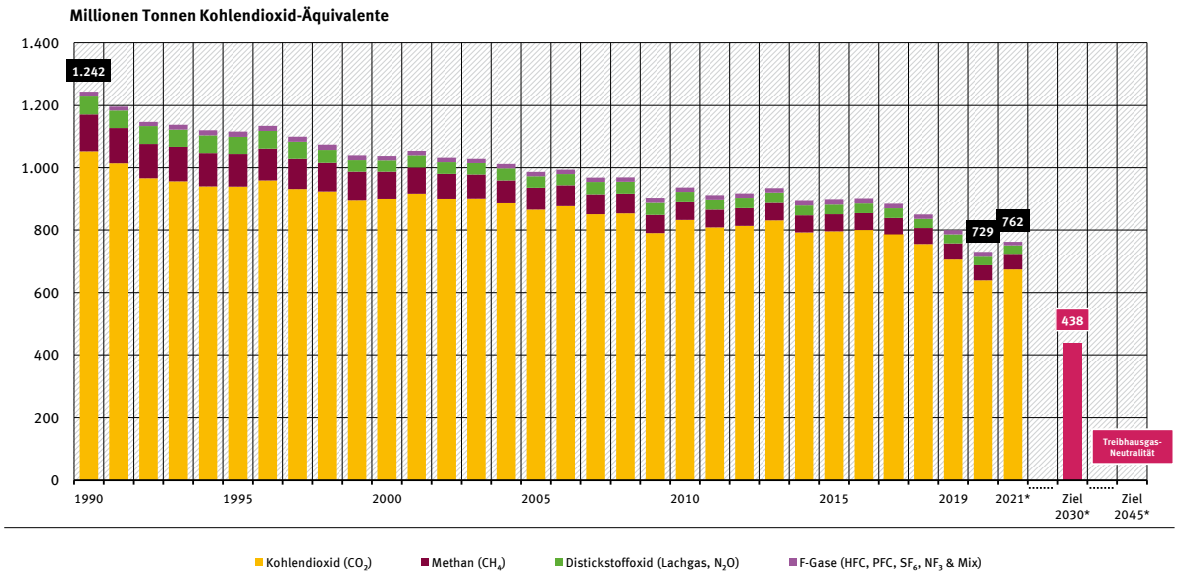


Abbildung 41: Zeitliche Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Gasen; Quelle: Umweltbundesamt

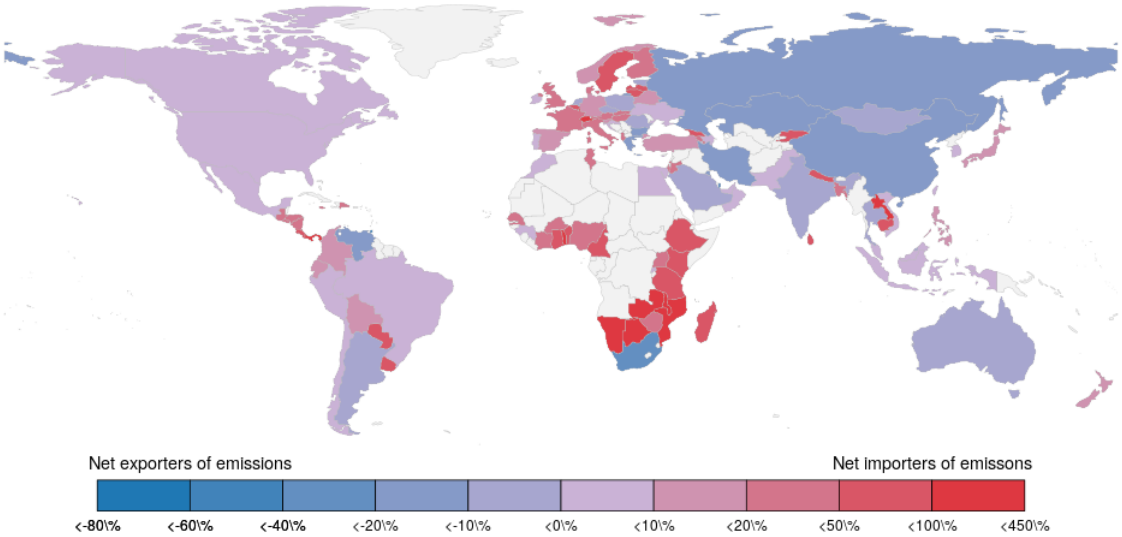


Abbildung 42: Die im internationalen Handel eingebetteten CO_2-Emissionen. Die Abbildung stellt den Anteil der importierten oder exportierten CO_2-Emissionen verschiedener Länder relativ zum BIP dieser Länder (2016) dar.

Die CO_2-Bilanz eines Objektes umfasst daher jegliche **Treibhausgasemission und Treibhausgasabsorption**, die direkt oder indirekt hervorgerufen werden. Für Produkte und Dienstleistungen wird häufig die Zeiteinheit auf die ganze Lebensdauer bezogen und soll den kompletten **Produktzyklus** umfassen. Dieser beinhaltet die Emissionen, die zur:

1. Herstellung bzw. Gewinnung und dem Transport von Vorprodukten bzw. Ausgangsrohstoffen verwendet wird,
2. Produktion und Verteilung bzw. Distribution des Produktes,
3. Nutzung des Produktes,

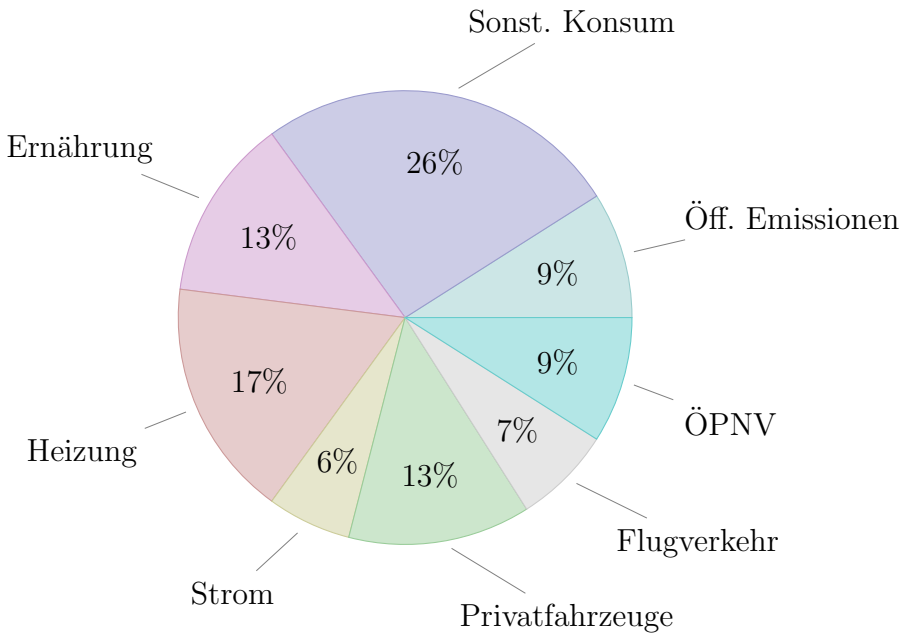


Abbildung 43: Aufteilung der durchschnittlichen pro Kopf Emissionen (als CO_2-Äquivalent) in Deutschland, Gesamt: ca. 11t CO_2-Äquivalent.

4. Entsorgung, Aufbereitung oder Wiederverwertung.

Die genaue Bestimmung von CO_2-Bilanzen von den Produkten ist häufig schwierig und umstritten. Die Organisation für internationale Standards (ISO) hat jedoch eine internationale Norm (ISO 14067) zur Bilanzierung von CO_2-Emissionen von den Produkten veröffentlicht.

Die weltweite Treibhausgasemission pro Kopf beträgt ca. 7.0t CO_2-Äquivalent (ca. 5t CO_2 und $2t$ restliche), die durchschnittliche pro Kopf Emission in Deutschland beträgt ca. 11.0t[11]. Als verträgliche Quote wird ein Wert von **ca. 2.5t CO_2-Äquivalent** angesehen, also ca. 23% des aktuellen Niveaus - welches auch etwa der Zielsetzung der Bundesregierung für das Jahr 2050 entspricht, vgl. 41. In der Abbildung 43 ist die durchschnittliche deutsche pro Kopf Emission für verschiedene Teilbereiche dargestellt. Wir sehen, dass bereits die Anteile für Heizung und Strom etwa 2.5t CO_2 ausmachen. In 43 fällt zusätzlich auf, dass der Flugverkehr einen großen Anteil an der Höhe der CO_2-Emission hat. In der Tat, ist Fliegen mit einer hohen CO_2-Bilanz verbunden. So ist der pro Kopf -Verbrauchs eines(!) Hin- und Rückfluges von Berlin nach New York ca. 2.5t CO_2-Äquivalent[12], was genau der Zielsetzung entspricht.

Wie im vorherigen Kapitel diskutiert, gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Emissionen von Treibhausgasen, insb. CO_2, zu reduzieren. Eine in der Wissenschaft populäre Lösung ist, die Implementierung einer Pigou-Steuer auf Emissionen, die sogenannte **CO_2-Steuer** (auch CO_2-Abgabe). Verschiedenste Steuerkonzepte unterscheiden sich teilweise jedoch erheblich in ihrem Design. So gibt es Konzepte, die versuchen alle Produkte entsprechend ihrer CO_2-Bilanz zu besteuern, was theoretisch optimal wäre. Allerdings ist die Umsetzung in der Praxis äußerst schwierig. Es gibt aber auch Ansätze, die nur bestimmte Produkte bzw. Emissionsquellen besteuern. So ist beispielsweise eine CO_2-Steuer auf fossile Brennstoffe (wie Öl, Gas, Steinkohle und Braunkohle) leichter umzusetzen. Dennoch ist dieser Besteuerungsansatz wenig umgesetzt worden.

[11] Quelle: KlimAktiv
[12] Quelle: myclimate.org

Es gibt jedoch in der Praxis Beispiele für die Umsetzung einer solchen Steuer. So führte beispielsweise 2012 Australien eine CO_2-Steuer auf die Verbrennung fossiler Brennstoffe ein, schaffte sie aber 2014 wieder ab, nach einem Regierungswechsel. In Deutschland werden fossile Energieträger zwar teilweise auch zusätzlich besteuert, vgl. die Tabelle 4, allerdings hängt die Steuerhöhe nicht von der CO_2-Bilanz der Energieträger ab; und ist somit zwar eine Pigou-Steuer mit ähnlicher Lenkungswirkung, aber keine **CO_2-Steuer**.

Die EU beschloss im Rahmen der Umsetzung des Kyoto-Protokolls mehrere Maßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen-Emissionen von sechs verschiedenen Treibhausgasen. Die EU hat ein gemeinsames Reduktionsziel, wendet jedoch das sogenannte **burden sharing** an, sodass nicht alle Mitgliedsstaaten die Emissionen prozentual gleich reduzieren müssen, sondern dieses von Land zu Land varriiert. Deutschland beispielsweise verpflichtete sich die Treibhausgasemissionen um 21% bis Emissions-Mittel der Jahre 2008 bis 2012 im Vergleich zum Emissionslevel 1990 zu reduzieren. Dieses Ziel wurde auch mit einer Reduzierung von gut 24% übererfüllt, vgl. auch 41. Bei künftigen Emissionszielen (z.B. 40% Reduktion bis 2020 gegenüber 1990, vgl. 41) erscheint eine derartige Übererfüllung, gegeben dem aktuellen Reduktionspfad, jedoch sehr unwahrscheinlich.

Aktuell hat die **EU** das Ziel die Treibhausgasemissionen effizient zu reduzieren, dabei setz Sie sich als eigenes Ziel eine **20%-ige Reduktion** der Emissionen **bis 2020**, eine **40%-ige Reduktion bis 2030** gegenüber dem Niveau von 1990.

Als wohl wichtigste Maßnahme zur Regulierung des Treibhausgasemissionen wurde in der EU im Jahr 2005 ein CO_2-Zertifikate Handelssystem eingeführt, dieses wollen wir im nächsten Abschnitt genauer betrachten.

4.2 Der EU-Emissionshandel

Zur möglichst effizienten Reduzierung der Treibhausgasemissionen wählte die EU einen Ansatz nach Coase. Durch die Schaffung eines eigentumsrechtlichen Ordnungsrahmens von staatlicher Seite sollen die externen Effekte der Treibhausgasemission internalisiert werden. Ein genereller Vorteil von dem Internalisierungsansatz nach Coase sollte sein, dass der Markt den optimalen Preis für die Nutzungsrechte ermittelt und kein permanenter staatlicher Eingriff notwendig sei. Wir werden am Beispiel des europäischen Emissionshandels jedoch sehen, dass dies nicht automatisch gut erfüllt ist.

Der **EU-Emissionshandel** (European Union Emissions Trading System, EU ETS) wurde mit der EU-Richtlinie 2003/87/EG vom Europäischen Parlament sowie dem Rat der EU beschlossen und trat am 1. Januar 2005 in Kraft. Die EU-Richtlinie muss entsprechend von den Mitgliedstaaten der EU umgesetzt werden. Dies geschah in Deutschland durch das Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG) im Jahr 2004. Jedoch nehmen am europäischen Emissionshandel nicht nur die EU-Länder teil, sondern alle Länder des Europäischen Wirtschaftsraum, also z.Z. die EU plus Norwegen, Island und Lichtenstein.

Die grundsätzliche Implementierung folgt dem **cap-and-trade** Ansatz. Das Handelssystem beruht darauf, dass die Betreiber von Treibhausgas emittierenden Anlagen für jede Tonne emittierten CO_2 (bzw. Menge eines anderes Treibhausgases als CO_2-Äquivalent) ein **Zertifikat** erwerben müssen. Dieses Zertifikat ist frei handelbar ('trade') und (zeitlich) unbegrenzt gültig. Es gibt jedoch nur eine begrenze Menge ('cap') an neuen Zertifikaten pro Zeiteinheit, die von der EU vorgegeben werden. Entsprechend soll ein ökonomischer Anreiz entstehen, die Treibhausgas-Emissionen zu senken, genau dort wo es am effizientesten möglich ist. Das Zertifikat des Europäischen Emissionshandels wird auch Emissionsberechtigung, bzw. European Union Allowance, kurz **EUA**, genannt.

In der EU gibt es seit der Einführung insgesamt vier verschiedene Phasen bzw. Handelsperioden, in denen sich der Implementierungsmechanismus teilweise änderte bzw. ändert. Diese vier Phasen umfassen die Jahre:

- Phase I: 2005 bis 2007
- Phase II: 2008 bis 2012
- Phase III: 2013 bis 2020
- Phase IV: 2021 bis 2030
- *Phase V: 2031 bis 2040*

Eine Voraussetzung zur Implementierung ist die Erfassung der Emissionen der einzelnen Anlagen, die CO_2 oder andere Treibhausgase emittieren. Zur Zeit werden etwa 11'000 Einzelanlagen erfasst, die insgesamt für ca. 45% der Treibhausgas-Emissionen in dem europäischen Wirtschaftsraum zuständig sind. Von der Erfassung der Emissionen sind seit Beginn des Emissionshandels folgende Anlagen betroffen:

- thermische Kraftwerke (Kohle, Gas, Öl) mit mind. 20MW installierter Leistung
- Industrieanlagen der Eisen- und Stahlverhüttung
- Kokereien, Raffinerien und Cracker
- Industrieanlagen zur Zement- und Kalkherstellung
- Anlagen der Glas-, Keramik- und Ziegelindustrie

- Anlagen der Papier- und Zelluloseproduktion

sowie seit Phase III (2013) auch

- Anlagen der chemischen Industrie
- Anlagen der Metallindustrie (nicht nur Metall)
- Anlagen der Mineralverarbeitendenindustrie (nicht nur Zement, Kalk, Glas, Keramik und Ziegel)
- Sonstige Verbrennungsanlagen

Ferner nimmt seit 2012 (also noch in Phase II) auch der Flugverkehr am Emissionshandel teil. Hierfür führte die EU ein extra Kontingent an Luftverkehr-Zertifikaten (EU Aviation Allowances, EUAA) ein, die jedoch auch eine Tonne CO_2-Äquivalent repräsentieren. An dieser Stelle ist anzumerken, dass generell in Phase I und II nur CO_2-Emissionen gemessen wurden, jedoch seit Phase III auch andere Treibhausgase (nämlich N_2O in der Chemie-Industrie und perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW) aus der Aluminiumherstellung) berücksichtigt wurden. Während der Phase IV wird zusätzlich der Schiff- bzw. Seeverkehr mit in den einbezogen. Die Umsetzung soll schrittweise bis 2026 vollzogen sein. Weithin gibt es derzeit Überlegungen den Verkehrs- und Wohnsektor mit den den Emissionshandel einzubeziehen, evtl. wird aber auch zunächst ein seperater Markt für die Sektoren geschaffen.

Emissionszertifikate werden von den am Emissionshandel teilnehmenden Staaten ausgegeben. In Deutschland wurde die **Deutsche Emissionshandelsstell**e des Umweltbundesamtes mit der **Ausgabe von Zertifikaten und** der **Überwachung** der Emissionen der einzelnen Anlagen beauftragt. Die Zuteilung der Zertifikate wurde in Deutschland durch das **Zuteilungsgesetz (ZuG** für Phase I und II geregelt. Es regelt die Zuteilung und Ausgabe von Emissionsberechtigungen (EUA) an die Betreiber von emittierenden Anlagen, die vom Emissionshandel nach dem TEHG erfasst sind. Darüber hinaus regelte es die nationalen Ziele für die Treibhausgasemissionen, die durch den **Nationalen Allokationsplan** (kurz NAP, NAP I für Phase I, NAP II für Phase II) geregelt wurden. Die wichtigsten Eckdaten dieser Zuteilung sind in der Tabelle 8 gelistet. Wir sehen, dass die Anzahl der erfassten Anlagen effektiv stabil blieb und sich die Zuteilungsmenge von ca. 500 Mio. t CO_2 auf ca. 460 Mio. t CO_2 um ca. 8% reduzierte. Im NAP I wurde als wesentliches Zuteilungssystem das **grandfathering** verwendet, wobei die Zuteilung auf Basis historischer Emissionen erfolgt. Das Ziel war hierbei, möglichst geringe Eingriffe in bestehende Eigentumsverhältnisse zu haben, und die Auswirkungen des Emissionsrechtehandels auf das wirtschaftliche System gering zu halten. Im NAP II wurde das Zuteilungsverfahren auf Basis des **Benchmarking** angewendet. Hierbei erfolgte die Zuteilung proportional zu Benchmarks auf Basis der besten verfügbaren Technologien. Dabei wird zum Beispiel der Quotient aus der Emissionsmenge und Outputmenge bzw. Kapazität als Effizienzkriterium interpretiert. Hierbei sollten vor allem effiziente Anlagen bevorzugt werden. Wichtig ist zu bemerken, dass sowohl in NAP I, als auch NAP II die Zertifikate in Deutschland gratis verteilt wurden. Dieses 'Gratis-Prinzip' wurde von vielen Mitgliedsstaaten angewendet, auch wenn einige (z.B. Dänemark oder UK) die Zertifikate zu einem geringen Anteil auch versteigerten.

Wenn ein Anlagenbetreiber nicht ausreichend CO_2-Zertifikate vorliegen hat, entsprechend seiner CO_2-Emission, so werden Sanktionen fällig. In Phase I beträgt diese Sanktion 40EUR pro Tonne CO_2, wurde aber seit Phase II auf 100EUR pro Tonne CO_2 erhöht.

Phase	Zuteilungsmenge (Mio. t)	Betroffene Anlagen
I (2005-2007)	499	1.849
II (2008-2012)	456,1	1.850

Tabelle 8: Zuteilungsregeln im Rahmen des NAP I und II bzw. ZuG 2007 und Zug 2012für Deutschland.

Ferner gibt es für Anlagenbetreiber die Möglichkeit, sich durch die Durchführung von Projekten im Ausland, welche Emissionen reduzieren, sich auf die eigene Klimabilanz gutschreiben zu lassen. Diese Projekte sind sogenannte flexible Mechanismen im Rahmen des Kyoto-Protokolls und betriffeb die Clean-Development-Mechanism (CDM) und Joint Implementation (JI).

Seit der Phase III gibt es EU-weite einheitliche Regeln zur Ausgabe von Emissionsberechtigungen, sowie zur Festlegung der Emissionsmengen. Insbesondere gibt es aber keine nationalen Obergrenzen, wie in den Phasen I und II, sondern eine gemeinsame EU-weite Obergrenze (cap). Diese Emissionsobergrenze wurde für 2013 mit ca. 2,1 Mrd. Zertifikaten festgelegt (exakt 2'084'301'856). Während der Phase III wird die Obergrenze jährlich um 1,74% (exakt 38'264'246 Zertifikate) verringert. Durch den linearen Reduzierungsfaktor soll ein entsprechender Emissionsreduktionspfad vorgegeben werden. Somit sind im Jahr 2020 die Emissionen der einbezogenen Anlagen 21% geringer sein, als das Niveau der entsprechenden Anlagen im Jahr 2005. Abbildung 44 fasst die Entwicklung der Zertifikatemengen im Zeitablauf zusammen.

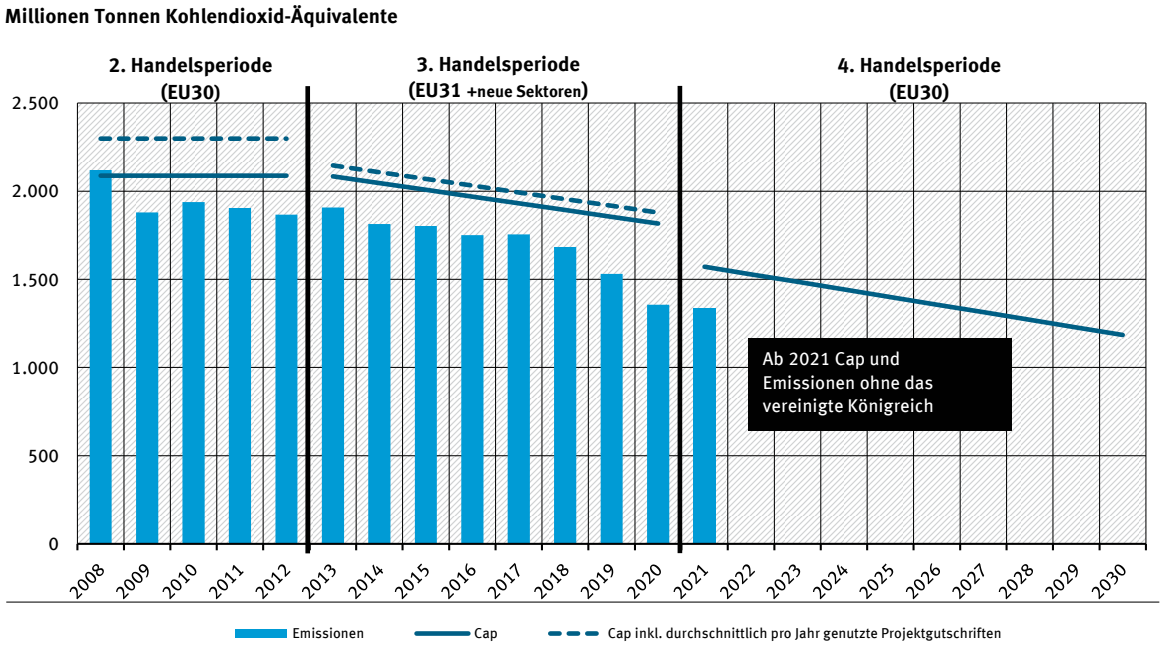


Abbildung 44: Zeitliche Entwicklung der Menge Zertifikatemenge, Quelle: Umweltbundesamt

Seit 2021 begann die Phase IV, durch den Brexit und den entsprechenden Folgeverträgen ist jetzt das Vereinigte Königreich Großbritannien und Nordirland nicht mehr am Emissionshandel beteiligt, sondern nur noch die EU-Mitgliedstaaten sowie die Schweiz, Lichtenstein, Island und Norwegen. Die Europäische Kommission schlug im Jahr 2015 vor, die Obergrenze ab 2021 jährlich um 2,2% herabzusetzen, um die Klimaziele für 2030 zu erreichen. Im Gegensatz dazu hielt zu dem Zeipunkt das deutsche Umweltbundesamt eine

jährliche Reduzierung von 2,6% für notwendig, um die Klimaziele der EU zu erreichen. Dennoch wurde der 2,2% Vorschlag wurde nun in Phase IV entsprechend umgesetzt. Im Juli 2021 wurde von der EU-Kommission der Vorschlag gemacht (Fit-for-55-Paket), die Absekung zeitweise auf 4,2% zu erhöhen um die Klimaschutzziele der EU zu erreichen.

Die kostenlose Zuteilung von Zertifikaten ist reduziert worden, und die **Auktionierung** (auctioning) wurde stattdessen als Standard-Verteilungsmethode etabliert. Die europäische Auktionsplattform für CO_2-Zertifikate ist nach einer entsprechenchen Ausschreibung die European Energy Exchange (EEX) in Leipzig geworden, und wickelt die Versteigerung für alle teilnehmenden Länder ab. Allerdings sind alle Mitgliedstaaten berechtigt eigene Auktionsplattformen zur bestellen und nicht die gemeinsame Plattform zu nutzen. Sie können also von Ihrem opt-out Gebrauch machen. Dies tun im Moment die Mitgliedstaaten Deutschland, Polen und das Vereinigte Königreich. Letzteres versteigert die Zertifikate auf der Londoner Terminbörse ICE Futures Europe (ICE). Deutschland und Polen versteigern ihre Zertifikate auch zusätzlich bei der EEX. Dies hat zur Folge, dass es regelmäßige Auktionen für das europäische, das deutsche und das polnische Marktgebiet an einer Börse, der EEX, gibt.

Generell findet der Handel mit Emissionszertifikation in einem rein elektronischen System statt und erfolgt vorrangig über Börsen, aber auch über Markler oder over the counter (OTC). Zur Einschätzung der Anteile, ist in der Abbildung 45 die Entwicklung des Handelsvolumen dargestellt.

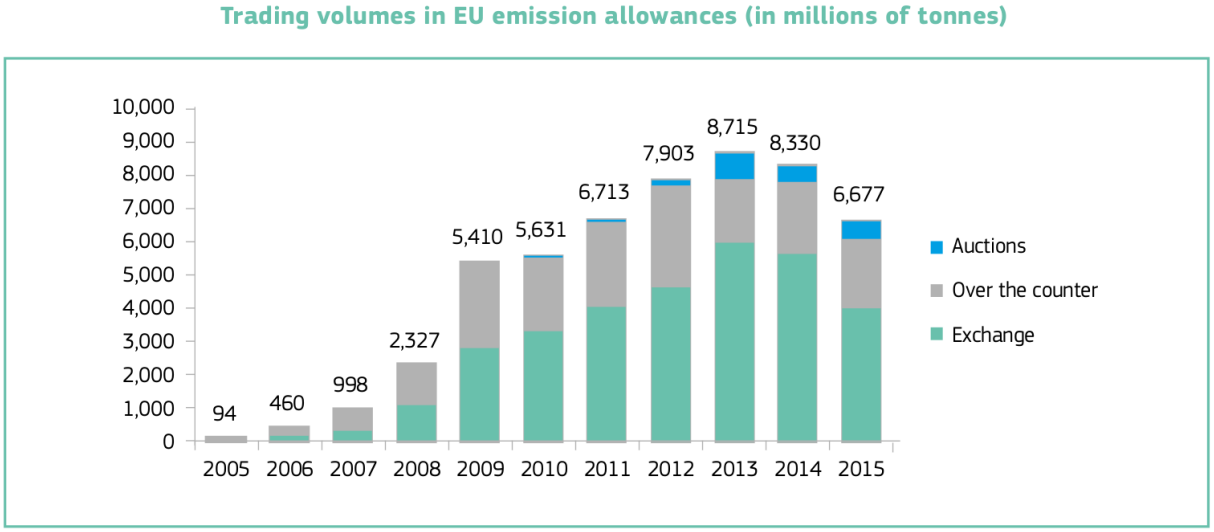


Abbildung 45: Zeitliche Entwicklung des Handelsvolumens mit CO_2-Zertifikaten, Quelle: europa.eu

Wir sehen deutlich, dass erst seit Phase III (ab 2013) ein spürbarer Anteil des Handelsvolumen auf Auktionen zurück geht. Seit Phase III werden ca. 40% bis 50% der EUA über Auktionen versteigert. In der Abbildung 45 wirkt der Anteil geringer, da viele Zertifikate mehrmals gehandelt werden. Die nicht-versteigerten Zertifikate werden nach wie vor von den Mitgliedstaaten vergeben. Hierbei wird vorrangig in der Vergabe an die Fertigungsindustrie und die Vergabe an den Energiesektor (insb. Stromsektor) unterschieden. Die Fertigungsindustrie erhielt zu Beginn von Phase III ca. 80% der Zertifikate kostenlos zugeteilt, wobei dieser Prozentsatz kontinuierlich bis auf 30% zum Jahr 2020 abgesenkt wird; Auch in der Phase IV sollen nach Beschluss der EU-Staats- und Regierungschefs noch einige Zertifikate für die Fertigungsindustrie kostenlos vergeben werden, ab 2027 sollen jedoch alle Zertifikate per auctioning vergeben werden. Im Energiesektor hingegen

müssen alle Zertifikate gekauft werden, jedoch gibt es hier auch Ausnahmen, nämlich dann, wenn in bestimmten Ländern (Bulgarien, Zypern, Tschechische Republik, Estland, Ungarn, Litauen, Polen und Rumänien) der Stromsektor modernisiert wird.

Für den Luftverkehr ist die Obergrenze mit ca. 210 Millionen Zertifikate pro Jahr für die gesamte Phase III konstant gelassen worden[13]. Im Luftverkehr werden allerdings noch 82% der Zertifikate gratis mittels Benchmarking zugeteilt und nur 15% auktioniert. Die verbleibenden 3% werden als Sonderreserve für die Unternehmen zurückgehalten, die besonders schnell wachsen oder Unternehmen, die neu auf den Markt dringen.

Wir haben bereits festgehalten, dass im europäischen Emissionshandels Obergrenzen für die Emissionen jeden Jahres gibt. Diese Obergrenzen wirken allerdings nur über die entsprechenden Handelsperioden bzw. Phasen. So kann insgesamt ein Ausgleich über eine Handelsperiode stattfinden, d.h. in einem Jahr werden auch mehr als vorgesehen emittiert, wenn dies durch ein anderes Jahr der gleichen Handelsperiode ausgeglichen wird. Das Übertragen von nicht eingesetzter Zertifikate von einem Jahr ins nächste (auch als **banking** bezeichnet), ist innerhalb einer Handelsperiode immer möglich. Seit der Phase II ist dies auch beim Übergang von einer Handelsperiode zur nächsten möglich. Umgekehrt ist die vorgezogene Nutzung von Emissionsberechtigungen aus dem folgendem Jahr (auch als **borrowing** bezeichnet) nur innerhalb einer Handelsperiode möglich. Dieses banking-borrowing-Schema ist in der Abbildung 46 dargestellt. Für den Übergang von Phase III zu Phase IV ist derzeit keine Änderung bzgl. des Bankings geplant. Auf Grund des möglichen

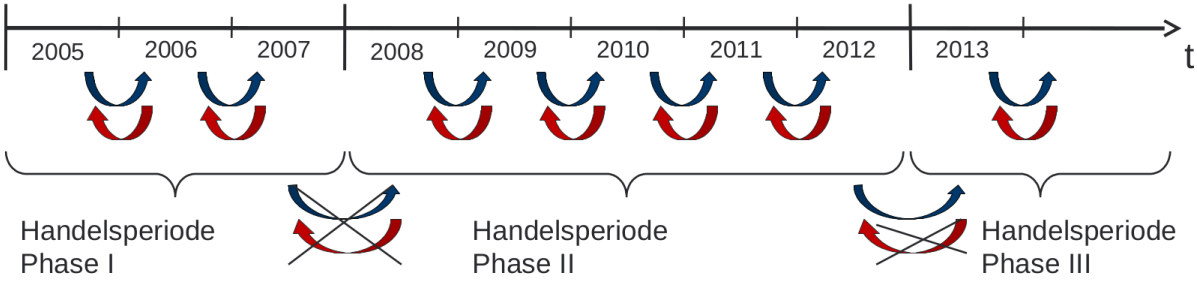


Abbildung 46: Darstellung der Handelsperioden und der Übertragbarkeit von Emissionszertifikaten

Ausgleichs innerhalb einer Handelsperiode, ist eigentlich nicht die jährliche Menge vorhandenen CO_2-Zertifikaten relevant, sondern nur jede für die entsprechende Handelsperiode plus evtl. jenen, die durch das banking aus der Vorperiode übernommenen wurden.

Wir haben uns nun viel mit der Ausgestaltung des Emissionshandels beschäftigt. Nun wollen wir einmal die historische Entwicklung der Preise für CO_2-Emissionszertifikate (kurz CO_2-Preis) betrachten. In der Abbildung 47 ist der CO_2-Preis für die erste Handelsperiode dargestellt. Wir sehen, dass der Handel im März 2015 mit einem Spot-Preis von ca. 11EUR/EUA startete, dann tendenziell stieg und im April 2006 bei knapp 30EUR/EUA lag. Es folgte jedoch eine klarer Preisverfall, wobei im Frühjahr 2007 der CO_2-Preis bei etwa 1EUR lag. Ab Sommer 2007 lag der Spot-Preis bei de facto 0EUR/EUA, ein europäisches CO_2-Zertifikat für die erste Handelsperiode war daher de facto wertlos.

Insgesamt kann gesagt werden, dass in Periode I sehr komplexe Zuteilungsregeln für die Zertifikate angewendet wurden, da jeder Nationalstaat eigene Regeln anwendete. Somit gab es eine hohe Unsicherheit über die Menge an Zertifikaten im Handelsraum. Hinzu kam das spieltheoretische Dilemma, dass die einzelnen Mitgliedstaaten einen Einreiz hatten,

[13]Im Jahr 2014 gab es eine geringe Erhöhung, da Kroatien im Zuge des EU-Beitritts in den Emissionshandel aufgenommen wurde

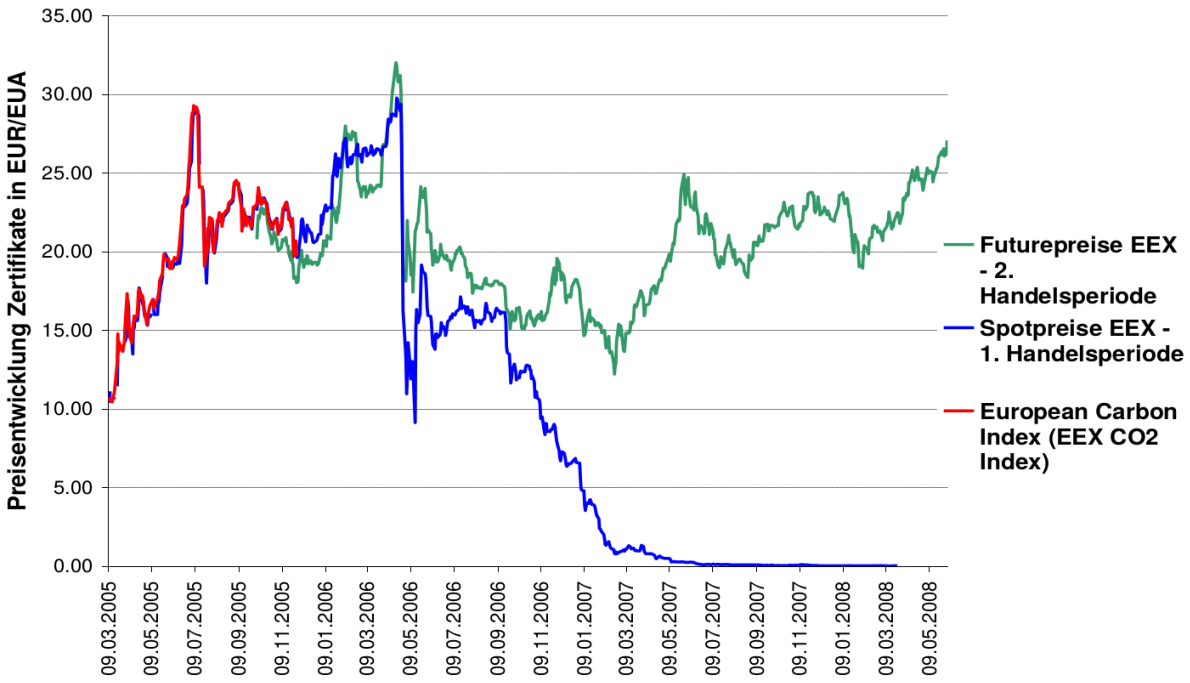


Abbildung 47: CO_2-Preis in Phase I bzw. der ersten Handelsperiode.

die eigene Industrie zu fördern (und ökonomisch zu entlasten). Als absehbar bzw. bekannt wurde, dass eine Überausstattung von CO_2-Zertifikaten vorlag, setzte der Preisverfall ein. Es stellte sich ein Preis von 0EUR/EUA ein, da die Menge an ausgegeben Zertifikaten schlicht zu groß war. Die Menge an ausgestoßenem CO_2 hätte sich auch ohne den Emissionshandel eingestellt, und es gab keinen ökonomischen Anreiz die CO_2-Emission zu reduzieren. Auch die Tatsache, dass es kein Banking von der Handelsperiode I zu II gab, vgl. in Abbildung 47, trug dazu bei, dass der Preis auf 0EUR/MWh fiel.

Mit der Phase II wurden einige Probleme des Emissionshandels behoben. So wurde die Menge an ausgegebenen Zertifikaten reduziert und eine national bindende Obergrenze eingeführt, wodurch eine Überallokation vermieden werden konnte. Zusätzlich wurden die Zertifikate teilweise auktioniert (nicht aber in Deutschland), die Zuteilung fand mittels Benchmarking statt und das Banking in die nächste Handelsperiode wurde erlaubt. Die Maßnahmen halfen insofern, dass der CO_2-Preis seit dem nie wieder de facto 0EUR/EUA betrug. Aus der Abbildung 47 können wir entnehmen, dass der Future-Preis für CO_2-Zertifikate für die Handelsperiode II durchweg auf einem Niveau größer als 12EUR/EUA notiert wurde.

Kritiker bemängelten aber vor allem, die erhaltenden länderspezifische Regelungen (für Deutschland über NAP II geregelt), die umfangreichen Freizuteilungen (in Deutschland 100% gratis) und den niedrigen CO_2-Preis wegen geringer Minderungsziele. In 48 sehen wir die CO_2-Preise für die Phasen I bis III und können erkennen, dass der CO_2-Preis im letzten Handelsjahr für die Phase II immer zwischen 10EUR/EUA und 5EUR/EUA lag. Als Ursache wird hierfür häufig die Finanz- und Wirtschaftskrise in diesem Zeitraum gesehen, so reduzierten sich 2009 die CO_2-Emission in der EU um 11%, was vorrangig auf die Krise zurückzuführen ist.

Mit der Phase III wurden weitere Probleme behoben, was größten teils auch bereits angesprochen wurde. Insbesondere wurden weitere Anlagen in die Berechnung einbezogen, und europaweite einheitliche Regeln zur Ausgabe von Zertifikaten angewendet, und das auctioning als Kernvergabe angewendet. In der Abbildung 48 sieht man allerdings, dass

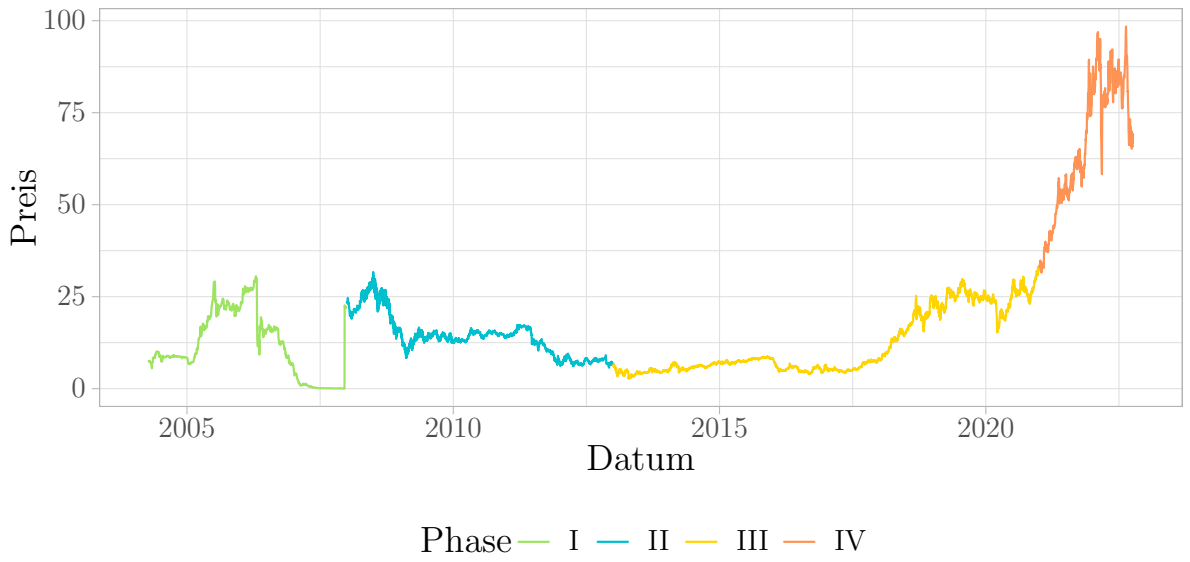


Abbildung 48: CO_2-Preis in Phasen I - IV

der CO_2-Preis trotz der Änderungen und der linearen Reduktion der Zertifikate um 1,74% eher stabil zwischen 10EUR/EUA und 4EUR/EUA schwankte und noch schwankt. Die jährliche Reduktion hat jedoch auf Grund des Banking und des Borrowings keinen direkten Effekt auf die Preisbildung, hierfür ist vorrangig die Gesamtmenge an CO_2-Zertifikaten für die gesamte Handelsperiode relevant.

Als ein Grund für den geringen Preis wird ein (großer) Überschuss an CO_2-Zertifikaten gesehen. So gab es insbesondere in den Jahren 2009 bis 2012 ein großes Überschuss an Zertifikaten, die allerdings durch das Banking jedes Jahr 'übernommen' werden. Dieses Überangebot entstand zum einen wegen der Finanz- und Wirtschaftskrise und zum anderen durch internationalen Emissionsgutschriften im Rahmen von CDM und JI. Im Jahr 2012 gab es bereits einen Überschuss von ca. 80% der Emissionszertifikate (ca. 2Mrd. Zertifikate 2012, 2.1 Mrd. Zertifikate 2013), vgl. Abbildung 49. Um dem Preis zu stabilisieren, müsse, so Kritiker, dieser Überschuss abgebaut werden. Im Januar 2014 wurde von der EU daher als kurzfristige Maßnahme ein **Backloading** beschlossen, dass sofort 900 Mio Zertifikate vom Markt nimmt (400Mio 2014, 300Mio 2015, 200Mio 2016), um sie 2019 dem Markt wieder regelmäßig per Auktion zuzuführen. In der Abbildung 48 sehen wir jedoch, dass dies nur im geringen Maße funktionierte. Daher beschloss die EU etwa ein Jahr später die 900Mio Zertifikate dauerhaft aus dem Markt zu nehmen und in eine Reserve zu überführen, der **Marktstabilitätsreserve**. Zusätzlich zu den 900Mio Zertifikaten wurden alle bis 2020 nicht verwendeten Zertifikate der Reserve zugeführt wurden. Die Markstabilitätsreserve definiert einen Korridor von 400 bis 833 Mio. Zertifikaten, die im Umlauf sein sollen. Falls mehr oder weniger Zertifikate im Umlauf sein sollten, greift die EU in den Zertifikate-Handel ein. Wird der Korridor unterschritten, so werden Zertifikate hinzugefügt, wird er überschritten, so werden Zertifikate entfernt (jährlich 24% der Zertifikate bis 2023, ab dann 12%).

Mit der Phase IV soll, neben der erhöhten Reduktion der CO_2-Emissionsobergrenze (um geplant 2,2%), eine automatische Marktstabilitätsreserve (äutomatic set-aside"reserve mechanism) eingeführt werden.

Dennoch, insbesondere von der Wissenschaft wird weiterhin häufig kritisiert, dass die Menge der ausgegebenen CO_2-Zertifikate zu hoch sei (bzw. der CO_2-Preis zu niedrig sei), um eine spürbar-lenkende Wirkung haben zu können. Insbesondere auf dem Energiesektor

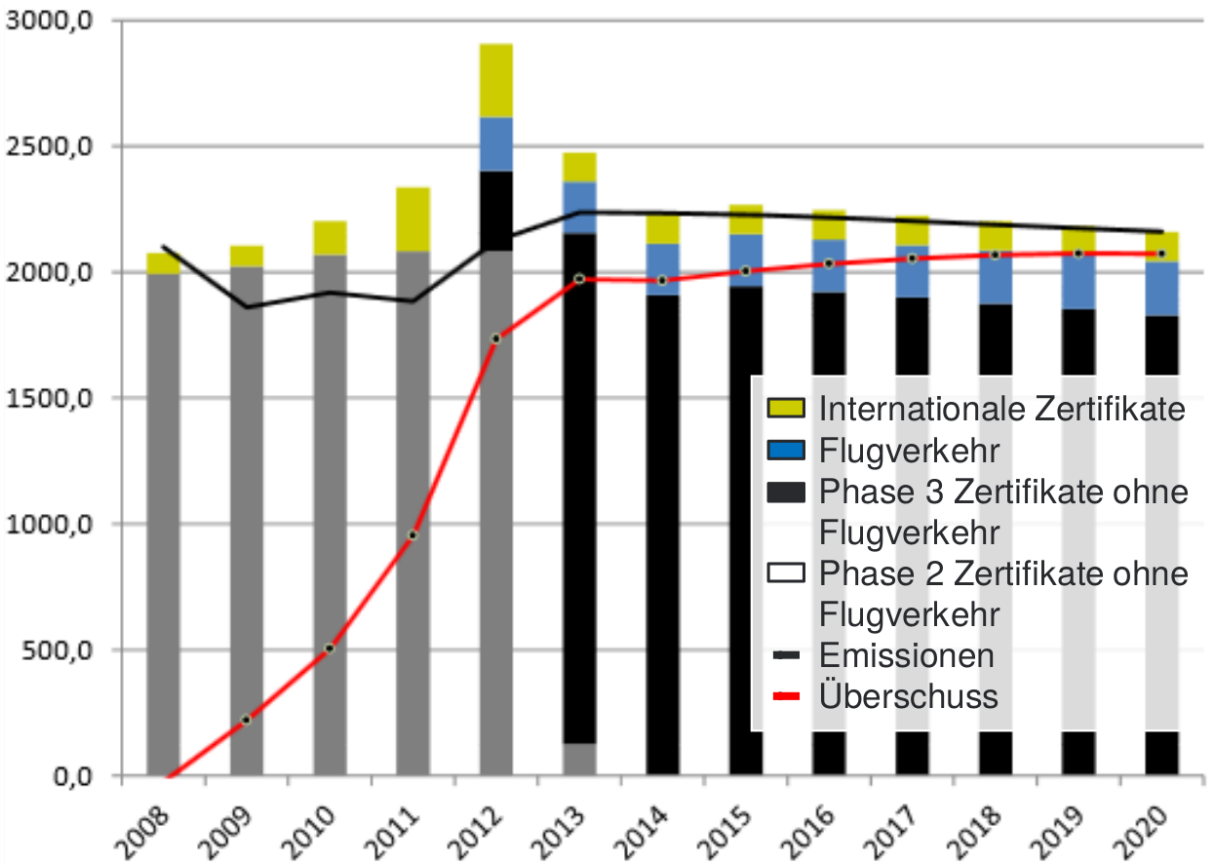


Abbildung 49: CO_2-Emissionen und Zertifikat-Volumina; Quelle SWD(2021).

führt ein geringer CO_2 zu keinem nennenswerten Effekt bei der Stromerzeugung.

Dennoch kann grundsätzlich der CO_2-Zertifikate-Handel als effektives Instrument betrachtet werden, da das politisch vorgegebene Ziel der Emissionen für die einbezogenen Anlagen erreicht wird. Innerhalb dieses Rahmens kann der CO_2-Handel auch als statisch effizientes Instrument betrachtet werden.

Ein genereller Kritikpunkt ist allerdings, dass der EU-Emissionshandel mit hohem administrativem Aufwand verbunden ist (Kontrolle aller Anlagen, Durchführung des Handels, hoher Aufwand für beteiligte Anlagenbetreiber).

Ein wichtiger Aspekt und zugleich auch ein Kritikpunkt ist, dass nur große Emittenten, die insgesamt nur ca. 40%-50% der Emissionen ausmachen, vom Emissionshandel erfasst sind. Die übrige Industrie, der übrige Verkehr, sowie das Gewerbe und die Haushalte sind nicht in den Handel mit einbezogen. Verschiedene Experten fordern insbesondere die Emissionspflicht im Gebäude- und Transportsektor.

Ferner nehmen nur die EWR-Mitgliedstaaten (EU + EFTA ohne Schweiz) teil. Dadurch erhöhen sich die Kosten für die betroffenen Anlagen in diesen Ländern und die Effizienz verringert sich. In einem geschlossenem Wirtschaftssystem wäre dies kein Problem, so allerdings besteht ein ökonomischer Anreiz, die Produktion in ein Land zu verlagern, welches nicht am EU-Emissionshandel teilnimmt. Dies führt zu dem Problem der **pollution haven hypothesis**, dass die umweltschädliche bzw. emissionsintensive Produktion nur in nicht teilnehmende Länder verlagert wird. Wenn in dem angesprochenen Land die umweltpolitischen Regularien, sowie die technischen Standards aus der umweltpolitischen Perspektive nicht besser als jene im EWR sind, so wird dies immer zu einer Verschlechterung der globalen CO_2-Bilanz führen, da zusätzlich beim Transport der Güter CO_2

entsteht.[14] Wenn die Umwelt-Standards niedriger als in dem EWR sind, dann werden die globalen Emissionen sogar deutlich gesteigert.

Vor diesem Hintergrund wird häufig eine Verbindung des EU ETS mit anderen Handelssystemen gefordert. In der EU ist eine solche Kooperation durch das linking auch vorgesehen. Zur Zeit verhandelt die EU allerdings nur mit der Schweiz über eine Verknüpfung der Emissionshandelssysteme. Auf der anderen Seite wird häufig gefordert, die Anrechenbarkeit von internationalen Emissionsgutschriften im Rahmen von CDM und JI nicht mehr zuzulassen, da diese schwer kontrollierbar bzgl. der Effektivität seien.

Weiterhin wird häufig kritisiert, dass die vorgegebene Obergrenze an Zertifikaten nicht flexibel ist, und z.B. Wirtschaftskrisen den Preis einbrechen lassen. Hier werden häufig flexiblere Lösungen gefordert, entweder über schnellere politische Eingriffe oder über die Bindung an Indexes, die unvermeidbare Abhängigkeiten zur Treibhausgasemission aufweisen, wie BIP(-Wachtum), Bevölkerungsentwicklung oder Temperatur-Indexes. Allerdings haben fixe Obergrenzen den Vorteil, dass Sie den Anlagenbetreibern bzw. den Zertifikate-Händlern eine höhere Planungssicherheit geben.

Schließlich werden zu Förderung der dynamischen Effizienz häufig eine Verlängerung der Handelsperioden gefordert, um den Investoren eine bessere Planungssicherheit zu ermöglichen.

[14] Unter der Annahme, dass die Transportkosten innerhalb der EU vernachlässigbar sind.

5 Erneuerbare Energien

5.1 Einführung

In diesem Kapitel werden wir uns intensiv mit erneuerbaren Energien beschäftigen. Wir haben gesehen, dass der Energie-Sektor einen großen Anteil an der Treibhausgasemission hat, vgl. auch Abbildung 50.

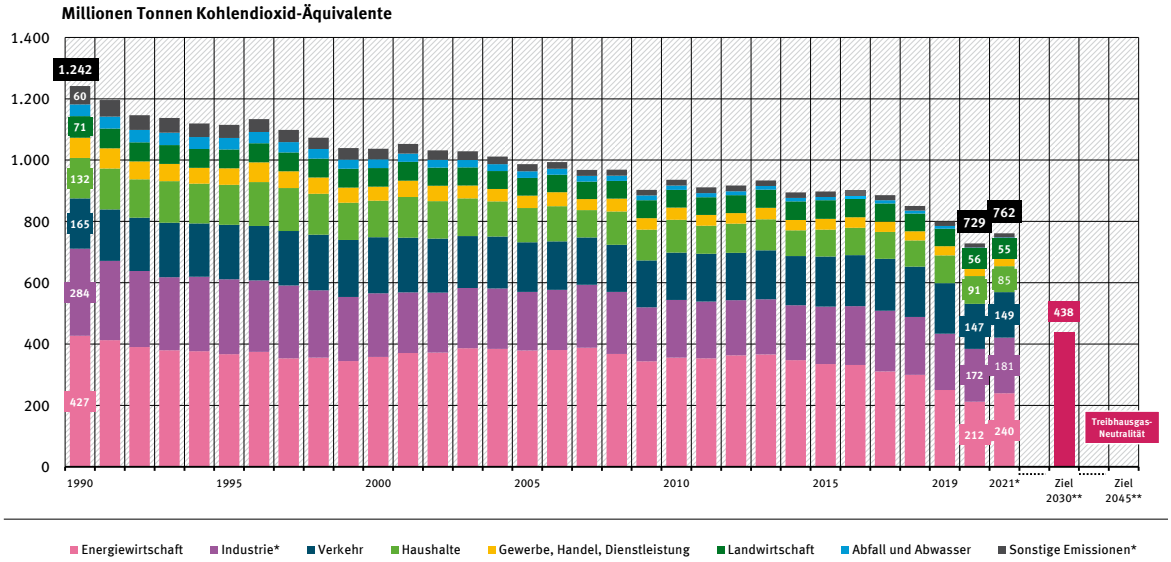


Abbildung 50: Zeitliche Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren und Emissionsziele (Stand Januar 2022); Quelle: Umweltbundesamt

Um die erneuerbaren Energien richtig einordnen zu können, behandeln wir kurz den Themenkomplex Energie bzw. die Energiewirtschaft.

Auch, wenn es aus physikalischer Sicht nicht ganz exakt ist, betrachten wir als **Energie** die Fähigkeit eines Objektes (physikalische) Arbeit zu verrichten oder Wärme abzugeben. Die SI-Einheit der Energie ist Joule ($1J = 1\frac{kg \cdot m^2}{s^2}$), welches $1/3600Wh \approx 0.0002778$ (Wattstunden) entspricht (also $1Wh = 3600J$). Als **Leistung** bezeichnen wir die Arbeit (oder Wärme), die in einer bestimmten Zeiteinheit verrichtet (oder abgegeben) wird. Hier ist die SI-Einheit $1W$ (Watt), also die Arbeit, die in einer Sekunde verrichtet wird. In abgeschlossenen Systemen bleibt die gesamte Energie immer konstant, allerdings betrachten wir meist keine abgeschlossene Systeme. Das Verhältnis zwischen abgegebener Energie eines System und der zugeführter Energie eines System heißt **Nutzungsgrad**. Ähnlich heißt das Verhältnis zwischen abgegebener Leistung eines System und der zugeführten Leistung eines System **Wirkungsgrad**.

Generell können wir Energie ist ein Gut betrachten. In unserer Gesellschaft spielt Energie eine wichtige Rolle, denn alle unsere täglichen Aktivitäten erfordern die Nutzung von Energie. So benötigen wir Energie beispielsweise, um Räumlichkeiten zu beheizen und beleuchten, oder um elektronische Geräte zu benutzen.

Wir bezeichnen die Ressourcen, die Energie enthalten und freigesetzt werden können als **Energieressourcen**, (auch **Energieträgern**).

Energieressourcen können nach der Art der Verfügbarkeit unterteilt werden, wir unterscheiden in **geologische Energieressourcen** (auch **Bestandsressourcen**), deren Bestand sich nur sehr langsam natürlich erhöhen kann (i.d.R. Millionen Jahre) und **rezente Energieressourcen**, deren Bestand sich in kürzerer Zeit (i.d.R. bis zu 100 Jahre)

natürlich erhöhen kann. Letztere entspricht natürlich regenerative Ressource auch der Bbetrachtungsweise in der Umweltökonomik. Wir bezeichnen daher alle rezente Energieressourcen auch als **erneuerbare Energien**.

Als **fossile Energieträger** bezeichnen wir jene Primärenergieträger, bei denen geologische Energieressourcen biologischen Ursprungs umgewandelt werden. Dies sind in unserem Kontext, vor allem Erdöl, Steinkohle, Braunkohle und Erdgas. Auch Torf wird in der Regel, als fossiler Energieträger betrachtet, obwohl seine Regenerationszeit nur wenige Tausend Jahre beträgt. Es gibt jedoch auch **mineralische Energieträger**, bei der geologische Energieressourcen, wie Uran, umgewandelt werden, die in der Energiewirtschaft eine Rolle spielen. Wir bezeichnen fossile und mineralische Energieträger auch als **konventionelle Energieträger**.

In der Literatur zu Energieressourcen wird teilweise eine Unterteilung in Energievorräte und Energiequellen genutzt, welche wir auch anwenden wollen. **Energievorräte** sind dabei jene Energieressourcen, bei denen der Zeitpunkt der Umwandlung/Umformung vom Menschen bestimmt werden kann; man kann sie daher auch als materielle Energiespeicher auffassen. Alle geologischen Energieressourcen sind Energievorräte. Jedoch sind auch einige rezente Energieressourcen Energievorräte, wie Biomasse (Holz, Mais, etc.) oder Wasser in Form eines Speichers (Speichersee). Jene Energieressourcen, bei denen der Zeitpunkt der Umwandlung/Umformung nicht direkt frei gewählt werden kann, bezeichnen wir als **Energiequellen**. Dies sind immer rezente Energiequellen. Klassische Beispiele sind solare Strahlung, Wind, Wellen, Wasser als Laufwasser (Flüsse), Meeresströmungen, Geothermie (Erdwärme) und Gezeiten, die wir noch genauer betrachten werden. Achtung, teilweise wird in der Literatur auch der Begriff Energiequelle gleichbedeutend mit unserer eingeführten Definition für Energieressource verwendet. Eine Übersicht zur Einteilung der Energieressourcen ist in der Abbildung 9 dargestellt.

Energieressourcen		
geol. Energieressourcen	rezente Energieressourcen	
Energiervorräte		Energiequellen
konv. Energien	Erneuerbare Energien	
Kohle	Biomasse	solare Strahlung
Erdgas	Wasser als Speicher	Wasser als Fluss
Erdöl		Wind
Uran		Wellen
(Torf)		Meeresströmungen
		Geothermie
		Gezeiten

Tabelle 9: Übersicht einer klassischen Einteilung von Energieressourcen mit Beispielen (weiß hinterlegt).

In der Energiewirtschaft bezeichnen wir die Energie, die in Energieressourcen (Energieträgern) enthalten ist, d.h. noch keiner Umwandlung/Umformung unterworfen wurden, als **Primärenergie**. Die Entwicklung des globalen Primärenergieverbrauchs wird in der Abbildung 51 dargestellt. Aus der Abbildung wird es ersichtlich, dass der Anteil erneuerbarer Energien im globalen Primärenergieverbrauchs relativ gering ist. Außerdem stellt Biomasse die weltweit meist verwendete rezente Energieressource dar. In der Abbildung 52 ist der Primärenergieverbrauch von Deutschland grafisch dargestellt, er war 2018 ca. 3600TWh bzw. 12963 PJ. Wir sehen, dass Mineralöl ca. ein Drittel des Primärenergieverbrauchs ausmacht. Insgesamt wird z.Z. ca. 80% des Primärenergiebedarfs von fossilen Energieträgern

gedeckt. Während nur etwa ein Achtel des Primärenergiebedarfs von Erneuerbaren Energien abgedeckt wird.

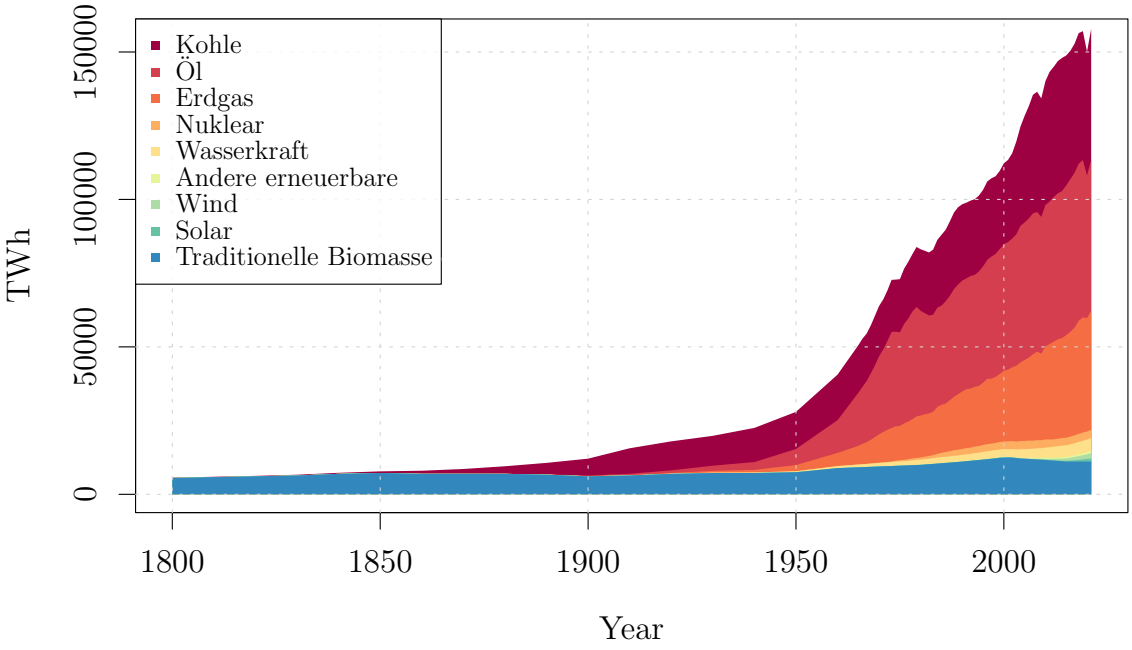


Abbildung 51: Der globale Primärenergieverbrauch

Als **Endenergie** bezeichnen wir die Energie, die vom Letztverbraucher bezogen wird, vermindert um den nicht-energetischen Verbrauch und die Umwandlungsverluste und den Eigenbedarf bei der Strom- und Gaserzeugung beim Endverbraucher. In 53 sehen wir den Endenergieverbrauch Deutschland, der ca. 2500TWh bzw. 9100 PJ beträgt. Wir sehen, dass ca. **20% des Endenergieverbrauchs** auf **Strom** zurück geht, die restliche Energie wird vorrangig als Wärme oder als mechanische Energie (vorallem im Transportbereich) genutzt. Im Vergleich zu der Abbildung 52 fällt auf, dass vor allem der Anteil von Braunkohle und Kernenergie massiv zurückgegangen ist. Dies liegt vor allem daran, dass jene Energieressourcen vorrangig zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Ähnlich verhält es sich bei der Steinkohle und den Erneuerbaren Energien, die zum Großteil zur Stromerzeugung genutzt werden.

In der Abbildung 54 ist die **Bruttostromerzeugung** Deutschlands dargestellt, sie ist ca. 648.3 TWh bzw. 2330 PJ. Zu beachten ist, dass dies mehr als die 20% des Energieverbrauchs ist (ca. 516TWh bzw. 1860 PJ), da Deutschland Stromexporteur ist und es Leitungsverluste gibt. Bei der Stromerzeugung sehen wir, dass der fossile Energieträger nur gut 50% der Energieerzeugung ausmachen, während Erneuerbare Energien ca. 30% der Bruttostromerzeugung gewährleisten. Daher werden Erneuerbare Energien häufig im Kontext der Stromerzeugung betrachtet.

In der Tabelle 10 sind die wichtigsten Auswirkungen der relevanten Energieressourcen bei der Energiezeugung vereinfacht schematisch zusammengefasst. Wir sehen, dass die konventionellen Energieträger maßgeblich zu einer schlechten CO_2-Bilanz beitragen. Da unsere Energie zu einem großen Anteil aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen erzeugt wird, stehen diese Kraftwerke im Mittelpunkt bei Klima-Betrachtungen. Ferner

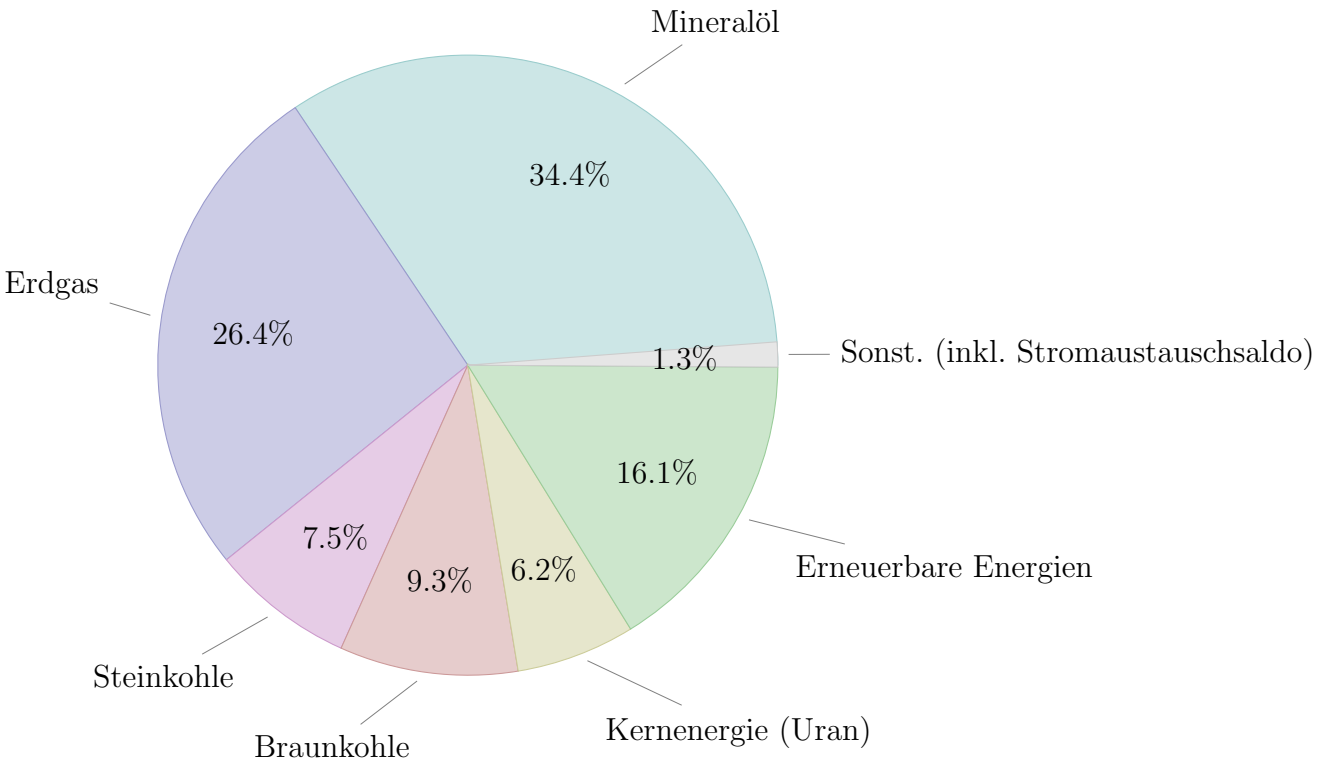


Abbildung 52: Struktur des Primärenergieverbrauchs in Deutschland 2021 gesamt 3600 TWh (=12963 PJ); Quelle: AG-Energiebilanzen

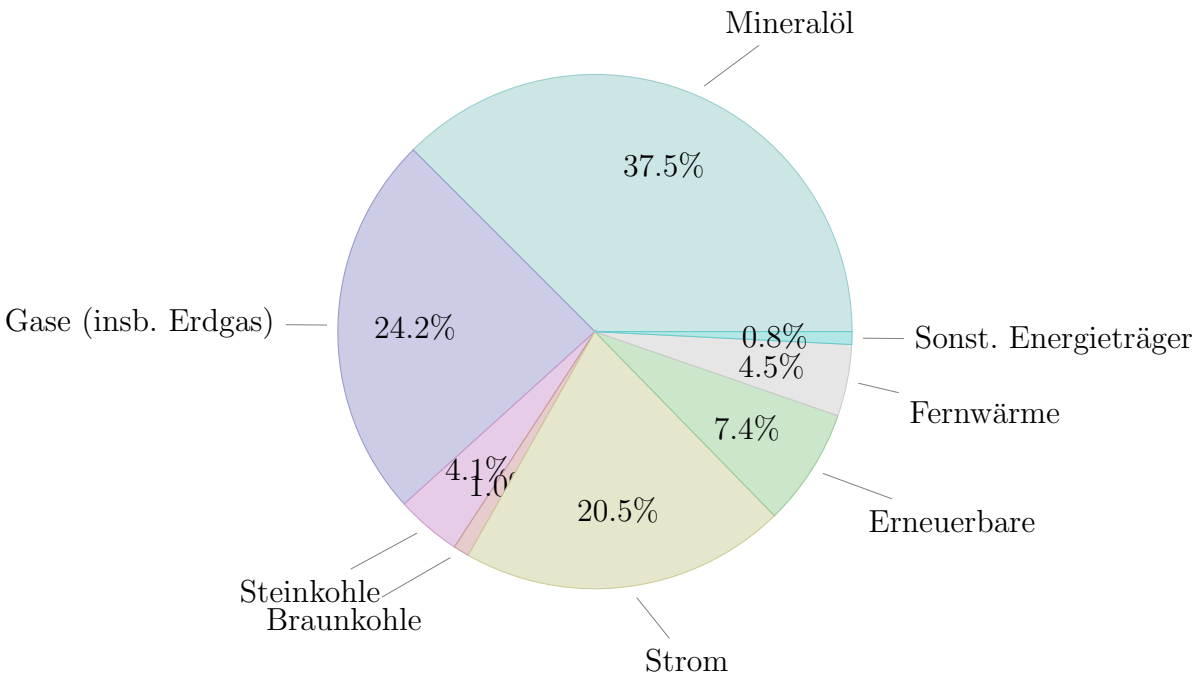


Abbildung 53: Struktur des Endenergieverbrauchs in Deutschland 2018 gesamt 2498 TWh (=8996 PJ); Quelle: AG-Energiebilanzen

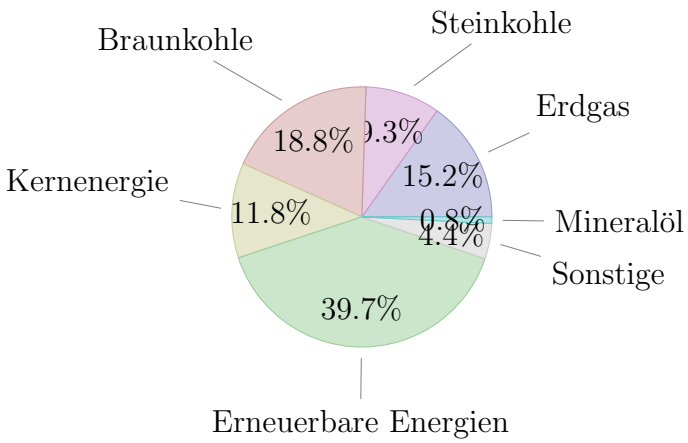


Abbildung 54: Struktur der Bruttostromerzeugung in Deutschland 2021 gesamt 582,9 TWh (=2098 PJ), Quelle: destatis

sehen wir, dass auch die fossilen Energieträger zur Luftverschmutzung (SO_2, NO_x, CO, VOC, Staub) beitragen, wobei die Bilanz von Erdgas ähnlich wie bei der CO_2-Betrachtung besser ausfällt. Die Kernenergie (Uran) hat als einzige negative Auswirkung das Problem der Erzeugung von radioaktivem Abfall. Nach aktuellem Beschluss der deutschen Bundesregierung steigt Deutschland bis zum Jahr 2022 aus der Energieerzeugung durch Kernspaltung aus. Schließlich können wir Tabelle 10 entnehmen, dass die Erneuerbaren Energien als einzige negative Auswirkung auf die Umwelt einen vergleichsweise großen Flächenbedarf hat. Die direkte Auswirkung hängt jedoch auch stark von der betrachteten Erneuerbaren Energie ab.

Energieträger	CO_2	SO_2	NO_x,CO,VOC	Staub	Radioaktiv	Flächenbedarf
Kohle	+++	x	x	x	(x)	(x)
Erdöl	++	x	x	x		(x)
Erdgas	+		x			(x)
Uran					x	(x)
Erneuerbare						x

Tabelle 10: Übersicht zur Auswirkungen von Energieressourcen.

Auf Grund der gelisteten Vorteile von erneuerbaren Energien bzgl. der Umweltauswirkung, insb. die geringe Treibhausgas-Emission spielen weltweit erneuerbare Energien bei der Energieerzeugung eine immer bedeutendere Rolle. Daher wollen wir uns in diesem Kapitel intensiv mit erneuerbaren Energien im Kontext der Umweltökonomik beschäftigen.

5.2 Grundlagen zur Bedeutung erneuerbaren Energien

In diesem Kapitel möchten wir uns intensiver mit den Grundlagen erneuerbarer Energien beschäftigen. Wir erinnern uns, dass wir alle rezenten Energieressourcen unter erneuerbare Energien verstehen. Wir hatten auch bereits einige Beispiele genannt, die Einteilung ist jedoch nicht eindeutig und hängt von der Wahl der Hierarchieebene ab. Dieser Zusammenhang ist in der Abbildung 55 verdeutlicht. Weiterhin können wir der Abbildung entnehmen, dass wir aus erneuerbaren Energieressourcen vorrangig in drei Energiearten umwandeln können, der elektrischen Energie, der Wärmeenergie und der chemischen Energie; wobei jedoch der elektrischen Energie und der Wärmeenergie eine höhere Bedeutung

zugemessen wird.

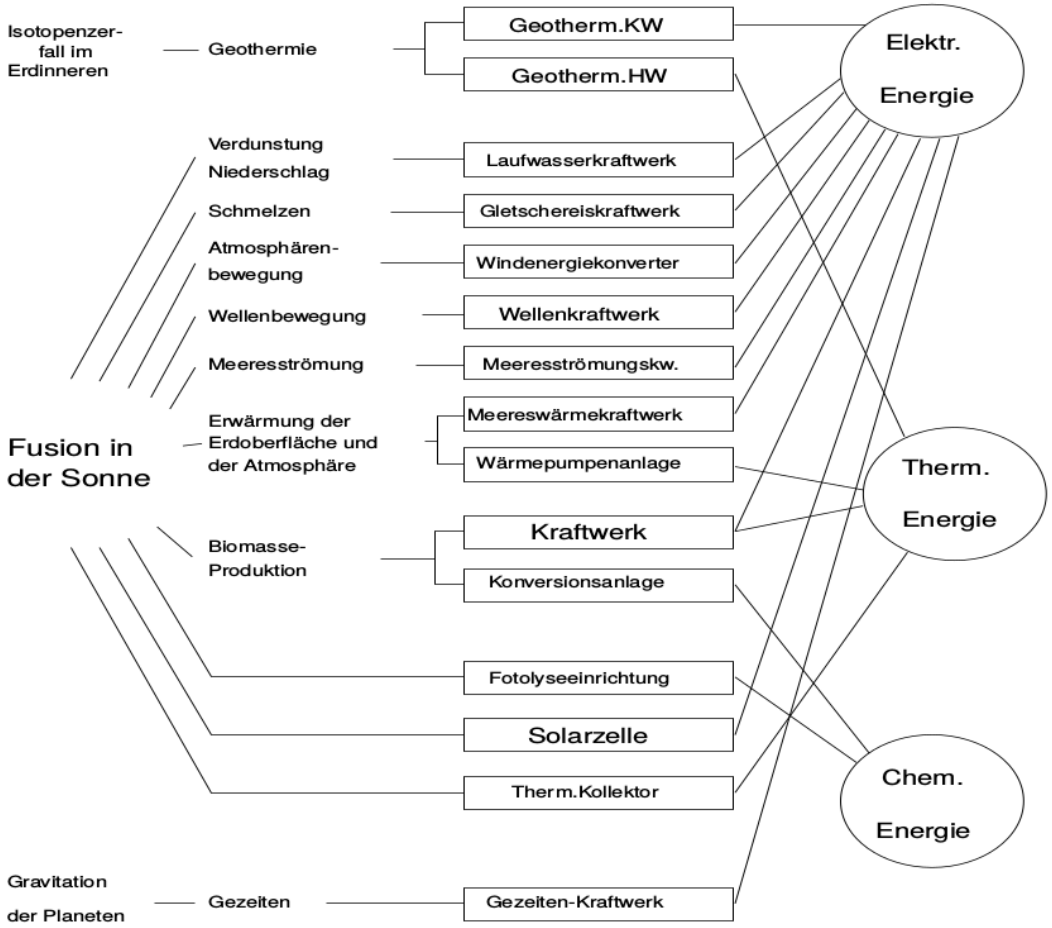


Abbildung 55: Quelle von rezenten Energieressourcen mit Nutzungsmöglichkeiten.

Wir sehen in der Abbildung 55, dass die erneuerbare Energieerzeugung auf drei energieerzeugende Ursachen zurückgeführt werden kann. Dies ist der **Isotopenzerfall im Erdinneren**, die **Kernfusion in der Sonne** und **Gravitation großer Himmelsobjekte** (Sonne, Planeten und Monde). Ersteres führt bereits genannten Geothermie, die sowohl thermische als auch elektrisch genutzt werden kann, letztes führt zu den Gezeiten, die zu elektrischer Energie umgewandelt werden kann. Alle anderen nutzbaren Erneuerbaren Energien gehen auf die durch die Fusion in der Sonne freigesetzte Energie zurück. Die solare Strahlung der Sonne kann direkt genutzt werden (Solarzelle/Photovoltaik; Fotolyse; Solarthermie) oder durch andere von der Sonnenstrahlung angetriebene Energiequellen (wie Lauf- und Schmelzwasser, oder (athmospärischer) Wind) oder angereicherte Bestandsquellen (wie Biomasse).

Wir hatten bereits uns vereinfacht die Umweltauswirkungen von verschiedenen Energieressourcen angeschaut (vgl. Tab. 10). Allerdings war die Darstellung stark vereinfacht. De facto können die Umweltauswirkungen auch quantifiziert werden. In der Abbildung 56 sind die Umweltkosten, aufgeschlüsselt in Treibhausgasemissions- und Luftschadstoffkosten, verschiedener Energieressourcen dargestellt. Wir sehen, dass es innerhalb der erneuerbaren Energien teil große Unterschiede in der Umweltbilanz gibt. So haben Wasserkraft und Windenergie eine sehr gute Umweltbilanz, während die Bilanz von Photovoltaik und Biomasse merklich schlechter ausfällt. Bei der Photovoltaik geht dies vorrangig auf die Herstellung der von Photovoltaikmodulen zurück. Die Umweltbilanz könnte sich durch verbesserte Recycling-Methoden verbessert werden. Deutlich schlechter ist jedoch noch die

Biomasse, was vorrangig auf die Herstellung der biogenen Brennstoffe zurück geht, aber auch die Verbrennung selbst sorgt für Luftverschmutzung. Dennoch ist die Umweltbilanz von der Biomasse noch besser, als die des ökologischsten konventionellen Energieträger, dem Erdgas.

Umweltkosten der Stromerzeugung

Stromerzeugung durch	Luftschadstoffe	Treibhausgase (195€ /t $CO_{2\,äq}$)	Treibhausgase (680€ /t $CO_{2\,äq}$)	Umweltkosten gesamt (195€/t $CO_{2\,äq}$)	Umweltkosten gesamt (680€/t $CO_{2\,äq}$)
	Eurocent$_{2020}$ pro Kilowattstunde$_{elektrisch}$				
Fossile Energien					
Braunkohle	2,05	20,65	71,56	22,70	73,61
Steinkohle	1,68	18,82	66,91	20,50	68,59
Erdgas	0,87	8,51	29,48	9,38	30,34
Öl	5,18	16,56	57,41	21,74	62,60
Erneuerbare Energien					
Wasserkraft	0,06	0,26	0,91	0,33	0,97
Windenergie*	0,11	0,20	4,67	0,30	0,79
Photovoltaik	0,43	1,35	16,77	1,78	5,09
Biomasse**	3,94	4,84	7,71	8,78	20,71

* Nach Erzeugungsanteilen gewichteter Durchschnittswert aus onshore und offshore Windenergie;
** Nach Erzeugungsanteilen gewichteter Durchschnittswert für Biomasse gasförmig, flüssig und fest

Quelle: Umweltbundesamt 2020, Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze

Abbildung 56: Umweltkosten verschiedener Energieträger an der Stromerzeugung, Quelle: Umweltbundesamt

Ein genereller Vorteil der erneuerbaren Energien ist neben der insgesamt positiven Umweltbilanz, dass de facto unerschöpfliche Energiemengen zur Verfügung stehen. So haben die Erneuerbaren Energien ein sehr großes theoretisches Potential zur Energieerzeugung. Dieses Potential ist über 10000mal größer als der weltweite Primärenergiebedarf der gesamten Welt. Selbst auf die Fläche der Bundesrepublik Deutschland wird etwa 80mal mehr Energie eingestrahlt, als jährlich verbraucht wird. Allerdings ist der technisch nutzbare Anteil wesentlich geringer.

Erneuerbare Energien haben natürlich auch Nachteile gegenüber konventionellen Energieträgern. Generell haben erneuerbare Energien tendenziell deutlich **geringere Energie- und Leistungsdichten** als geologische Energieressourcen. Allerdings ist Energiedichte von trockenem Holz jedoch mit der von Braunkohle vergleichbar. Ferner haben Erneuerbare Energien als einen Ihrer größten Nachteile einen eher **hohen Flächen- und Materialbedarf**. Letzterer spiegelt sich häufig in vergleichsweise hohen Kosten wieder. Schließlich sind erneuerbare Energien im Vergleich zu konventionellen Energien deutlich **höheren Schwankungen in der Verfügbarkeit** ausgesetzt, insbesondere bei Solarenergie und Windenergie ist dies von großer Bedeutung. Daher gibt es die Notwendigkeit, erneuerbare Energien immer im **Verbund mit der Nutzung von anderen Energievorräten** (in der Regel konventionelle Energieträger) **oder Speichereinrichtungen** zu nutzen, um die fehlende Zeitkongruenz zwischen Energieangebot und Energienachfrage auszugleichen. Bei einer Zielsetzung des vollständigen Ausstiegs aus der konventionellen Energieerzeugung, ist klar, dass ein solches System neben den Erneuerbaren Energien einen gewissen Speicherbedarf hat, insbesondere wenn vorwiegend auf eine Energieerzeugung durch Energiequellen gesetzt wird.

Wir hatten bereits gesehen, das ca. ein Achtel des Primärenergieverbrauchs auf Erneuerbare Energien zurück geht. In der Abbildung 57 ist die Entwicklung des Primärenergieverbrauchs der letzten Jahren dargestellt. Generell beobachten wir, dass der Energieverbrauch aus Erneuerbaren Energien in den letzten Jahren stetig gestiegen ist. Wir sehen, dass zur Zeit der Hauptteil (über 50%) des erneuerbaren Primärenergieverbrauchs auf die Biomasse zurückgeht. Weiterhin sehen wir, dass Windenergie, Solarenergie, Wasserkraft, Geothermie sowie Siedlungsmüll die weiteren rele-

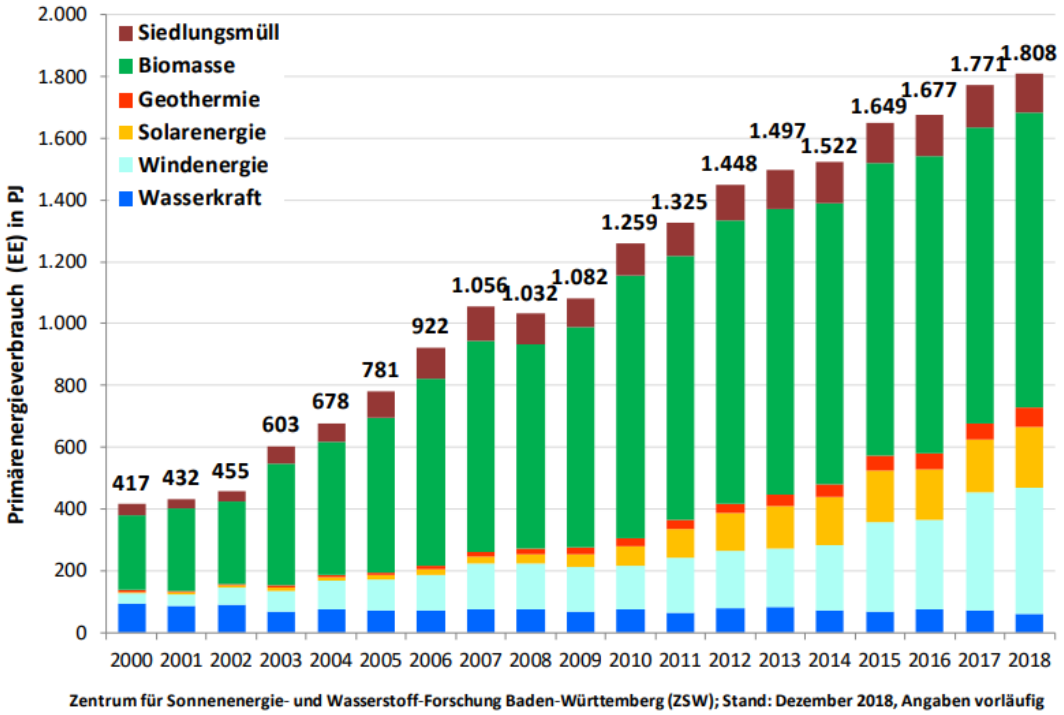
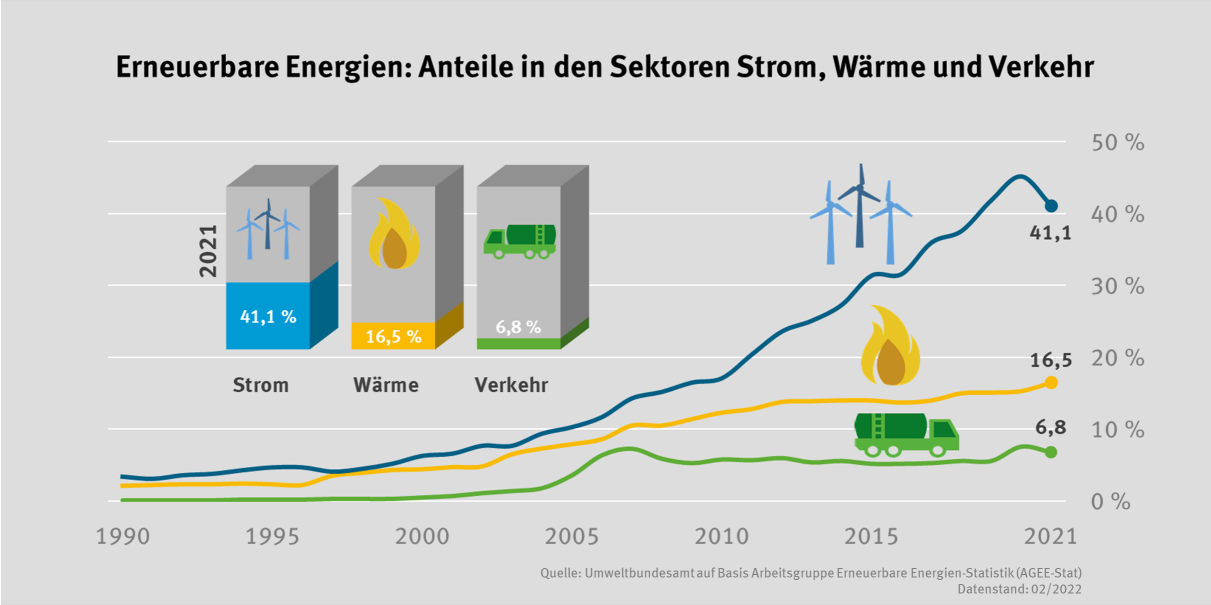


Abbildung 57: Eneuerbare Energien im Primärenergieverbrauch. (Quelle: AG-Energiebilanzen)

vanten Erneuerbaren Energien in Deutschland sind. Bei letzterem werden jedoch nur die biogenen Anteile im Siedlungsmüll betrachtet. Abbildung 57 können wir entnehmen, dass die Wasserkraft eine sehr stabile Rolle in Deutschland einnimmt und in den letzten Jahren keinen erhöhten Anteil an der Energieerzeugung hat. Im Gegensatz dazu können wir sehen, dass vor allem Wind- und Solarenergie, aber auch Geothermie, in ihrer Bedeutung gewachsen sind.

In der Abbildung 58 sehen wir die Erneuerbaren Energien aufgeschlüsselt nach Endenergieverbrauch für 2018, und zeitliche Entwicklung in einzelnen Sektoren (Verkehr, Wärme, Strom). Wir sehen, dass die Wind- und Wasserenergie ausschließlich zur Stromerzeugung genutzt werden, während die anderen relevanten Energieträger einen Beitrag zur Strom- und Wärmeproduktion haben, sowie direkt als Endenergie verwendet werden. Allerdings trägt die Solarenergie überwiegend zur Stromerzeugung bei, während die Geothermie dort nur einen marginalen Anteil (hier nicht dargestellten) hat. Insgesamt, entnehmen wir der Grafik, dass die Biomasse als wichtigste erneuerbare Energie vorrangig einen Beitrag zu Wärmebereitstellung liefert. Insbesondere sehen wir, dass im Jahr 2018 die Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien zu ca. 50% auf die Stromerzeugung zurück geht, zu 40% auf die Wärmeerzeugung und zu 10% auf den Transportsektor. Letzteres wird ausschließlich durch den biogenen Anteil an Mineralölkraftstoffen gedeckt, aber auch im Wärme Bereich geht ca. 88% der erzeugten Energie auf die Biomasse zurück. Bezüglich der Stromerzeugung sehen, wir, dass hier die Windenergie die dominante erneuerbare Energie ist, gefolgt von der Biomasse, der Solarenergie und der Wasserkraft. Wenn wir uns die zeitliche Entwicklung anschauen, sehen wir, dass vor allem im Stromsektor die erneuerbaren Energien an Bedeutung gewonnen haben. Im Verkehrssektor stagniert die Bedeutung seit ca. 2008, bzw. ist sogar leicht rückläufig. Im Wärmesektor gibt es im Gegensatz dazu jedoch ein sich abschwächendes Wachstum.

In Abbildung 59 die zeitliche Entwicklung im Wärmesektor der Erneuerbaren Ener-



Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieträgern (2021)

Gesamtenergiebereitstellung: 467,3 Terawattstunden [TWh]

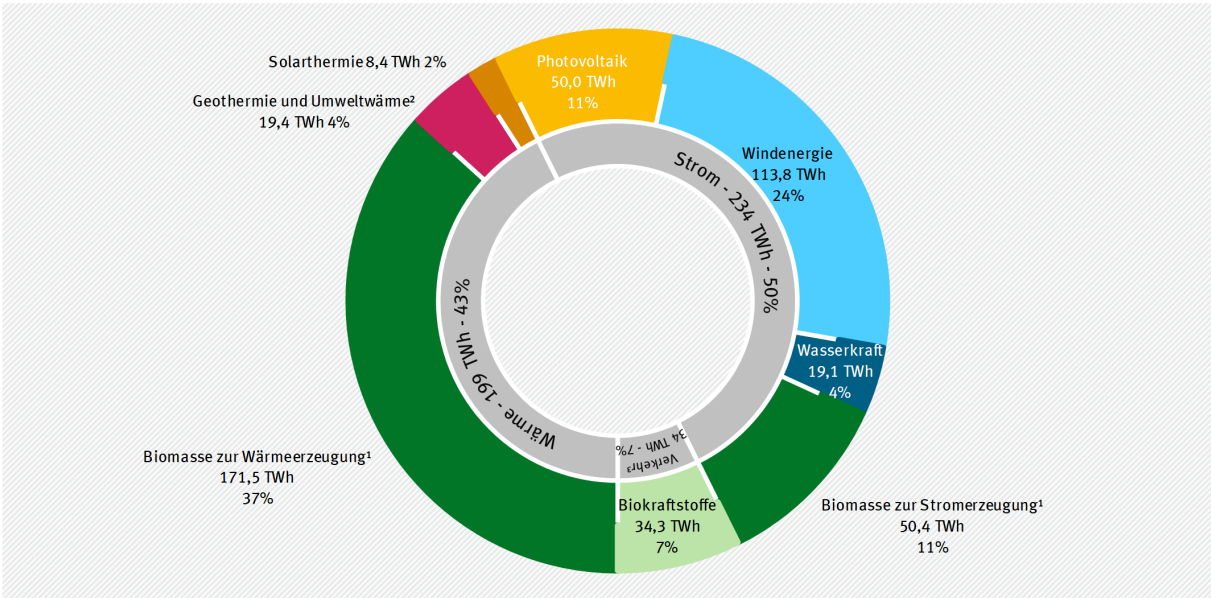


Abbildung 58: Eneuerbare Energien im Endenergieverbrauch und Verwendungsbereich, Quelle: Umweltbundesamt

gien nochmals genauer aufgeschlüsselt. Wir sehen dort, dass die Solarthermie und die Geothermie ein stetiges Wachstum in den letzten Jahren aufweisen, auch wenn das absolute Niveau noch vergleichsweise gering ausfällt. Einen ähnlichen Verlauf sehen wir bei den gasförmigen Biomasse. Bei der dominierenden festen Biomasse schwankt seit 2010 die Wärmeerzeugung um die 120TWh pro Jahr. Vorallem in der Solar- und Geothermie wird großes Potential zum Ausbau gesehen.

Wir wollen uns nun etwas genauer die Entwicklung des Kraftwerkportfolios zur Stromerzeugung in Deutschland anschauen, vgl. Abbildung 62. Wr sehen, dass am Anfang dieses Jahrtausends die installierte Kapazität zur Stromerzeugung vorrangig aus fossilen Energieträgern besteht, insbesondere Braunkohle, Steinkohle und Erdgas. Weiterhin se-

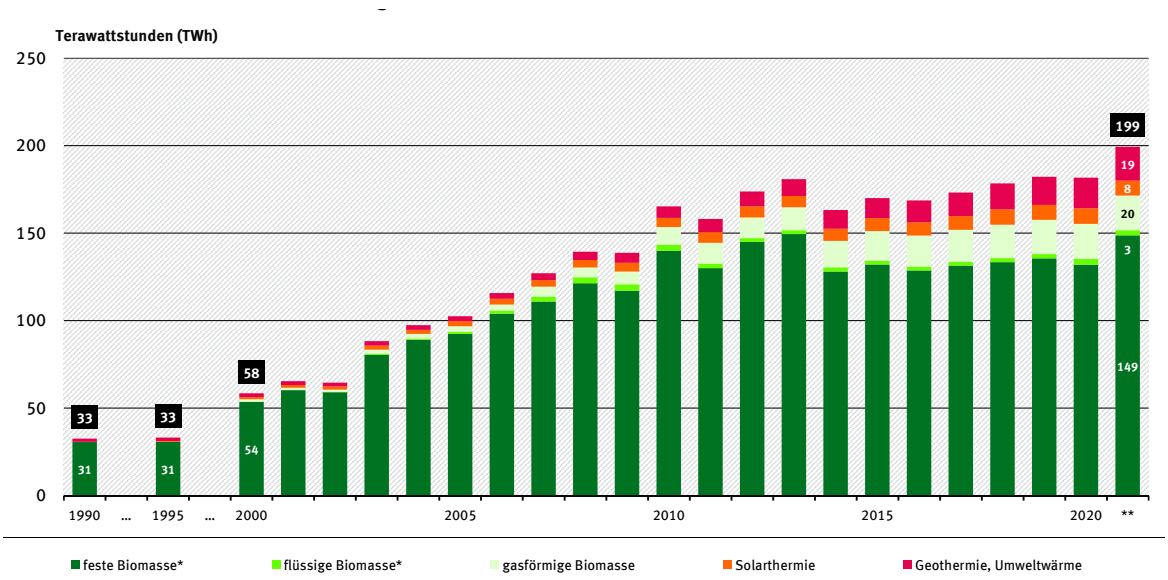


Abbildung 59: Entwicklung Erneuerbarer Energien in der Wärmebereitstellung, Quelle: Umweltbundesamt

hen wir, dass 2002 die installierte Leistung für Nuklearenergie über 20GW betrug, sich im Laufe der letzten Jahre im Zuge des Atomausstiegs, kontinuierlich verringerte. Insbesondere 2011 gingen im Zuge der Nuklearkatastrophe von Fukushima (Japan) über 8GW installierte Leitung vom Netz. Da wir bereits wissen, dass Wasserkraft überwiegen zu Stromerzeugung eingesetzt wird, können wir neben Abbildung 62 auch aus Abbildung 57 ableiten, dass die installierte Leistung zur Erzeugung von Wasserkraft über die letzten Jahre stabil ist. Die drei erneuerbaren Energien, Wind, Solar und Biomasse, haben in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Zur Zeit geht etwa die Hälfte der installierte Kapazität zur Stromerzeugung auf Wind- und Solarenergie zurück. Wie bereits angesprochen, sind vor allem Wind- und Solarenergie erneuerbare Energieträger, deren Energieerzeugung stark fluktuiert. Insbesondere die produzierte Menge an Strom liegt in der Regel deutlich unter der installierten Kapazität. So waren beispielsweise im Jahr 2016 knapp 50GW Windleistung (onshore und offshore) installiert, aber nur 78.6 TWh Strom in diesem Jahr produziert. Da 50GW$\times$8760[15] = 438TWh die theoretische erzeugbare Leistung gewesen wäre, wenn alle Windturbinen das ganze Jahr über die installierte Kapazität produziert hätten, wurde 78.6TWh/438TWh nur etwa 17.8% der tatsächlich installierten Leistung auch produziert. Für die Solarenergie war in dem gleichen Zeitraum die entsprechende Quote noch geringer. Außerdem zeigt Abbildung 61, dass der Netto-Zubau an onshore Windenergie im Jahr 2019 sein Maximum annahm. Die Erhöhung der Menge der Photovoltaikanlagen lässt sich wiederum dadurch erklären, dass die Kosten für die neuen Solarmodule stetig sinken. Die Tendenz der sinkenden Kosten lässt sich mit dem sogenannten Swanson's Gesetz beschreiben, das sich in der Abbildung 60 darstellen lässt. Dem Gesetz zufolge fallen die Kosten für PV-Module auf 20% per jede Verdopplung der installierten Photovoltaikkapazitäten.

Zusätzlich ist in der Abbildung 62 auch der Stromaustauschsaldo (Import-Saldo) dargestellt, da Deutschland mit bestimmten Nachbarn Strom austauscht. Jene sind die Niederlande, Frankreich, Schweiz, Österreich, Tschechien, Polen, Schweden und Dänemark. Wir sehen, dass Deutschland ein negatives Import-Saldo hat, das bedeutet, dass Deutschland mehr Strom exportiert als importiert. In den letzten Jahren ist dieses Saldo ten-

[15]Streng genommen war 2016 ein Schaltjahr mit 8760+24=8784 Stunden

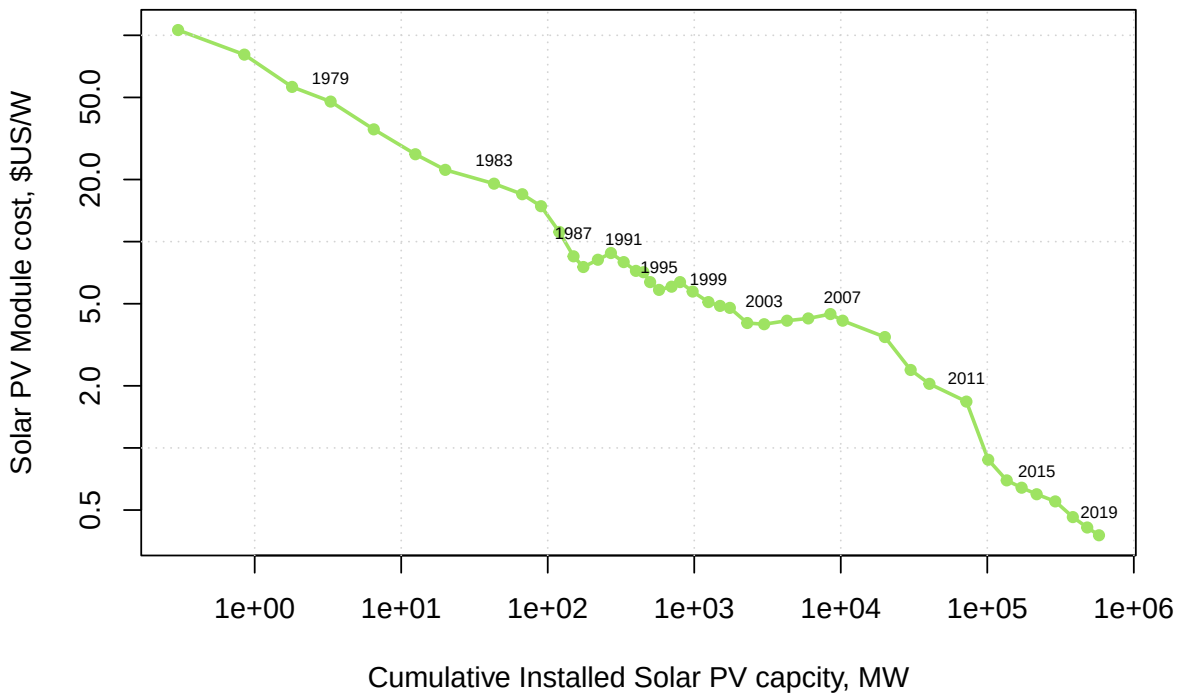


Abbildung 60: Swanson's Gesetz für Photovoltaikmodule.

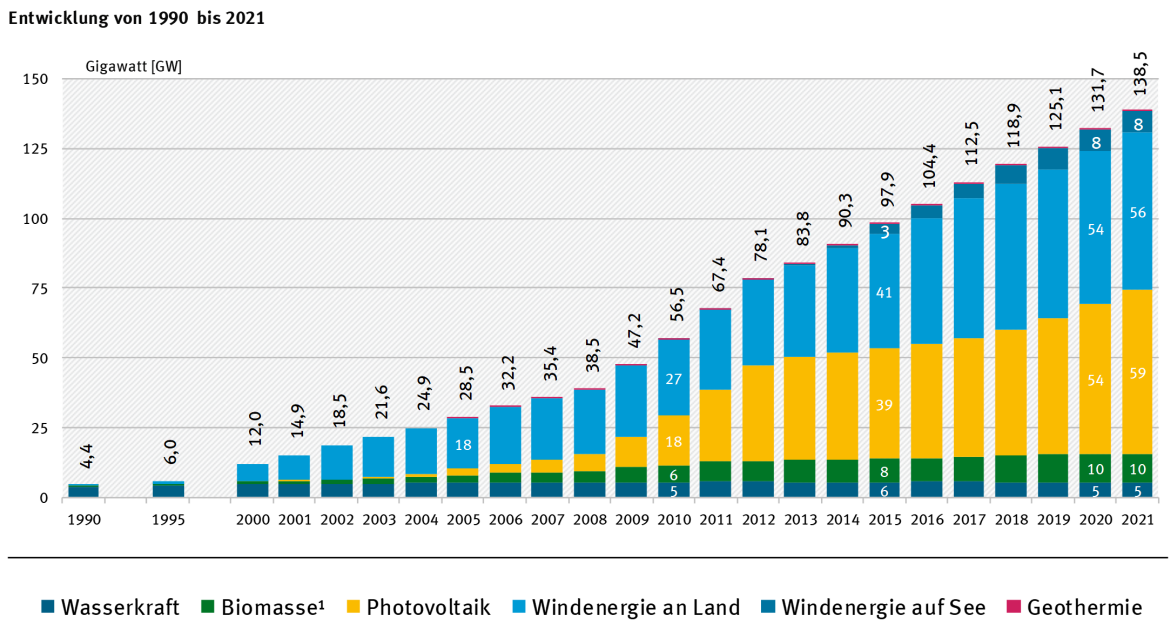


Abbildung 61: Entwicklung der installierten Kapazitäten zur erneuerbaren Stromerzeugung in Deutschland 1990-2021, Quelle: Umweltbundesamt

denziell gestiegen, und erreichte 2016 ein bisheriges Maximum von gut 50 TWh, was gut 9% der gesamten Stromerzeugung ausmacht. Dies und Leitungsverluste sind auch der überwiegende Grund dafür, dass der Anteil der erneuerbaren Energien bei der Brutto-

stromerzeugung in Deutschland in der Regel größer ist, als jener beim Bruttostromverbrauch 54.

5.3 Erneuerbare Energien und Preisbildung im Strommarkt

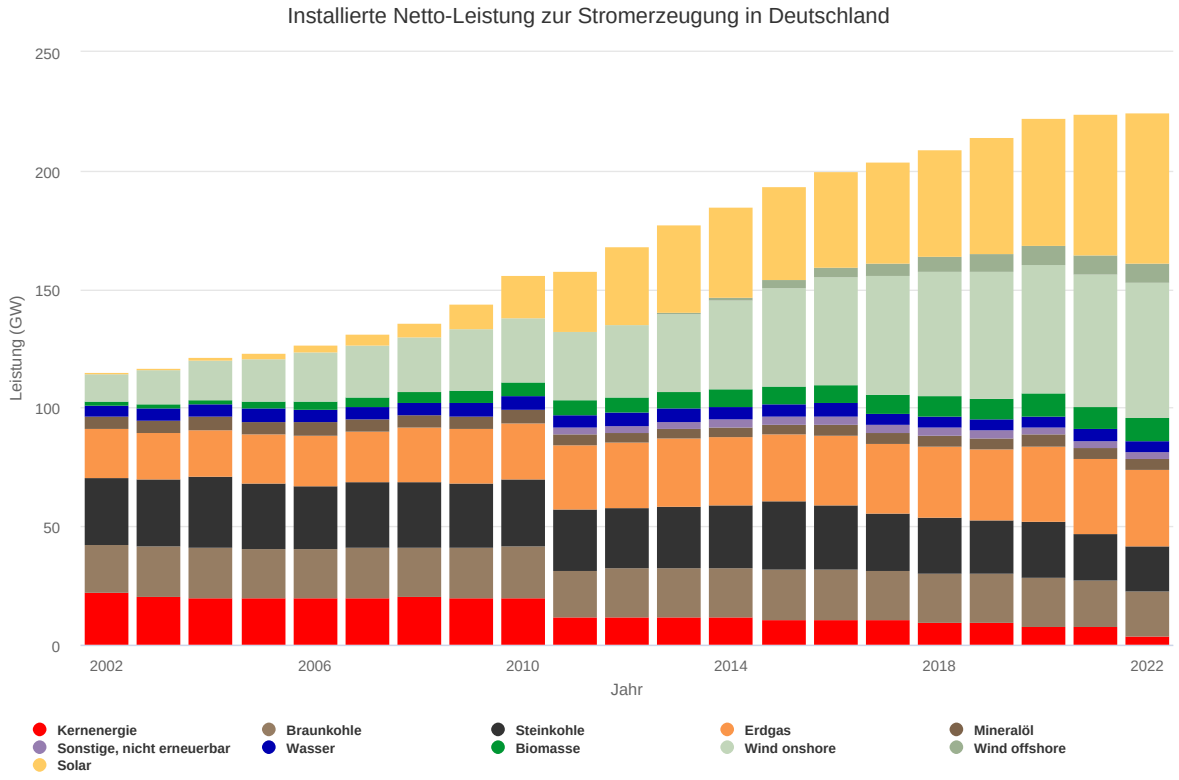
In diesem Abschnitt wollen wir uns mit der Auswirkung des Ausbaus von Erneuerbaren Energien auf den Strommarkt beschäftigen.

Der Ausbau erneuerbarer Energien wird in Deutschland vor allem durch das Erneuerbare Energien Gesetz gefördert. Dieses subventioniert vereinfacht gesagt erneuerbare Energien. Wir wollen es später genauer studieren. An dieser Stelle wollen wir jedoch darauf hinweisen, dass Erneuerbare Energien einen **Einspeisevorrang** haben, d.h. grundsätzlich sind im Falle einer Überkapazität konventionelle Kraftwerke vor Erneuerbare Energien-Kraftwerke abzuschalten.

In Europa wird Strom als ein Gut auf Strommärkten gehandelt. Hierbei nimmt der **day-ahead Markt** (häufig auch vereinfacht Spot-Markt) eine zentrale Rolle ein. So gibt es jeden Tag um 12:00 Uhr ME(S)Z eine Auktion, auf dem der Strom in Stundenkontrakten für den Folgetag für einen gewissen Marktgebiet ausgehandelt wird. Alle Marktteilnehmer auf der Angebots und Nachfrageseite geben dabei Gebote ab, die charakterisieren, wie viel Strom Sie zu welcher Stunde des Tages für welchen Preis bereit sind zu kaufen bzw. zu verkaufen. Ein spezieller Markträumungsalgorithmus bestimmt nun den wohlfahrtsmaximierenden Strompreis (maximale Konsumenten+Produzentenrente) der Angebots- und Nachfragekurven, die aus Aggregation der Gebote hervorgehen. Bei der Auktion wird das **uniform pricing** angewendet, d.h. alle Bieter, die einen Zuschlag bekommen, zahlen bzw. erhalten den gleichen Preis für eine MWh Strom. Das genannte Prinzip ist in der Abbildung 64 dargestellt. Nach der Auktion stehen jeden Tag zur Mittagszeit die 24 stündlichen Strompreise für den Folgetag fest[16]. Diese Strompreise und die entsprechend gehandelten Volumina geben allen Beteiligten (Käufer, Verkäufer und Netzbetreiber) gewisse Handlungssicherheit. So werden beispielsweise nach der Auktion um 12:00 die Fahrpläne der konventionellen Kraftwerksbetreiber den Netzbetreibern gemeldet. Das für uns vorrangig relevante Marktgebiet DE+AT+LU umfasst zur Zeit jedoch nicht nur Deutschland, sondern auch Österreich und Luxemburg. Das bedeutet, dass es in diesen drei Ländern die physikalische Erfüllung (die Stromlieferung) gewährleistet wird, bzw. gewährleistet werden muss. Dies stellt eine wichtige Grundvoraussetzung dar, dass der Strom ohne Probleme innerhalb des Marktgebietes transportiert werden kann. Der wichtigste Marktplatz für das Marktgebiet DE+AT+LU ist die EPEX (European Energy Exchange).

Es gibt aber auch nachgelagerte **kurzfristige Strommärkte** (Intrad-day-Märkte und Regelleistungsmärkte), bei denen kann der Strom noch bis wenige Minuten oder gar Sekunden vor Lieferung gehandelt werden. Diese Märkte sind vor allem dafür da, um Änderungen in der erwarteten Stromproduktion (z.B. Kraftwerksausfall, geänderte Wind- und Solarprognosen) oder Änderung im erwarteten Stromverbrauch auszugleichen. Neben den kurzfristigen Märkten gibt es aber auch **langfristige Strommärkte**, auf denen Derivate, insb. Futures gehandelt werden. Diese Handelsprodukte geben in der Regel einen Barausgleich (financial settlement). Hier wird der Basiswert (underlying) basierend auf die day-ahead Strompreise ermittelt, daher wird jener Markt häufig auch als Spot-Markt bezeichnet und dem kommt eine besondere Bedeutung zu. Darüber hinaus ist der day-ahead Markt ein europäisch gekoppelter Markt. Das heißt, es werden nicht nur alle Kaufs- und Angebotsgebote innerhalb des Marktgebietes DE+AT+LU einbezogen, sondern auch

[16] Falls es sich um einen Schalttag handelt 23 bzw. 25 Stunden.



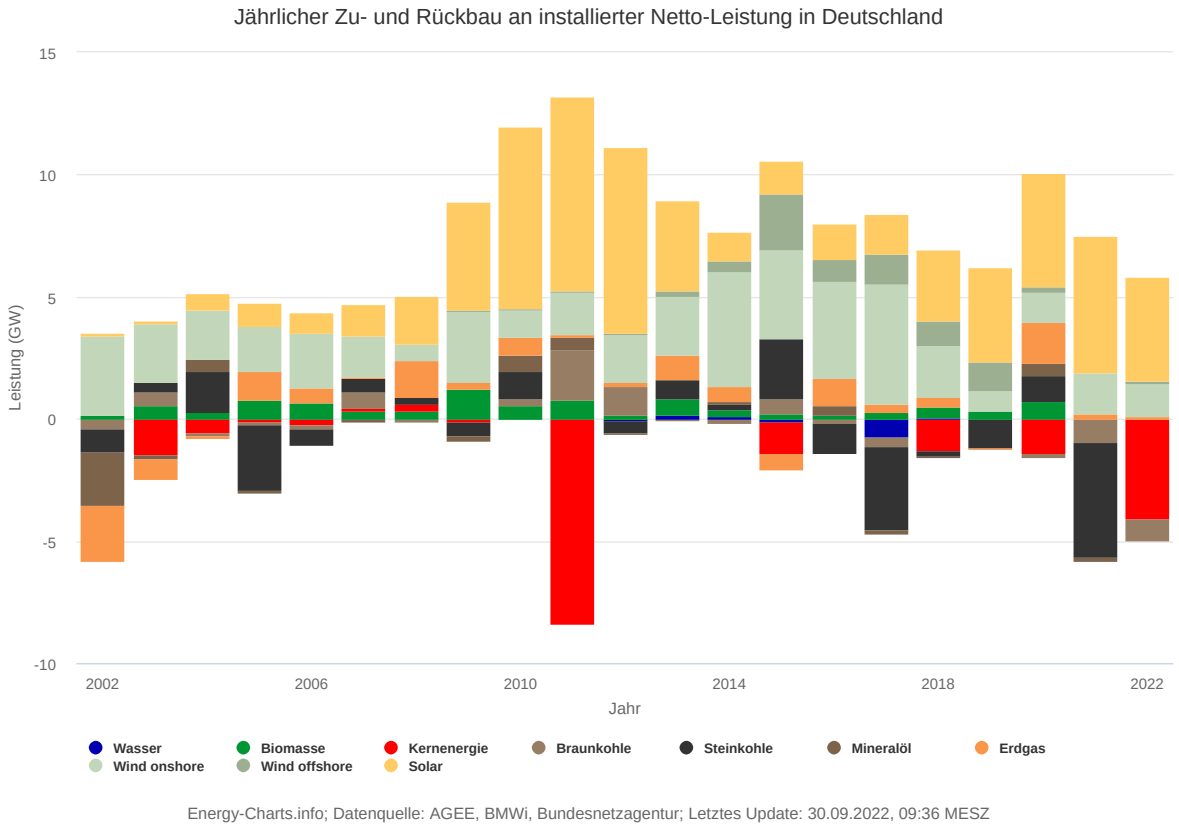


Abbildung 62: Entwicklung der installierten Kapazität zur Stromerzeugung in Deutschland

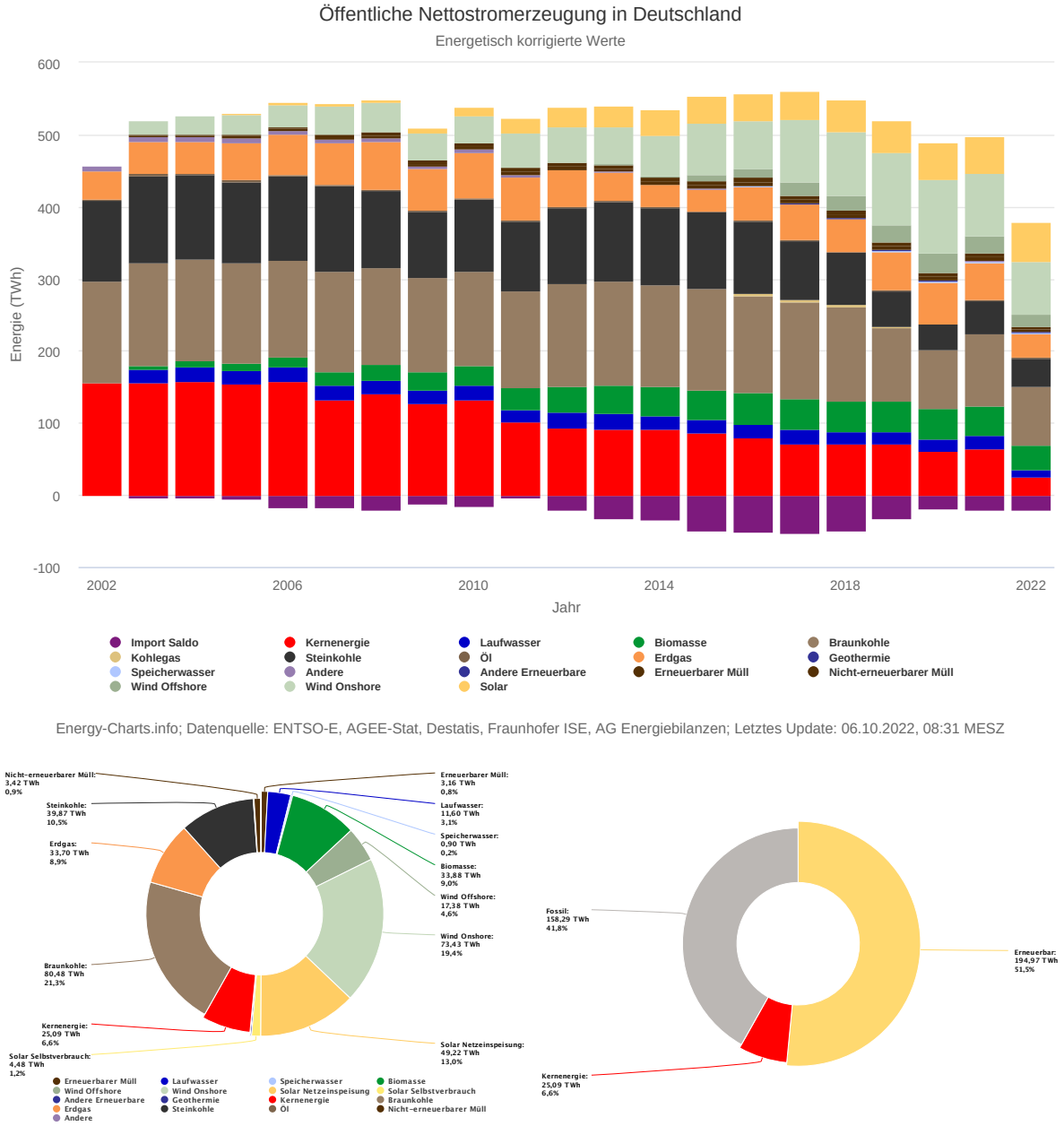


Abbildung 63: Entwicklung der **Nettostromerzeugung** in Deutschland

Gebote aus bestimmten europäischen Nachbarländern, sowie Marktgebietsüberschreitende Leitungskapazitäten in den Markträumungsalgorithmus mit ein. Ferner ist der day-ahead-Markt auch für die Wirtschaft und Gesellschaft von hoher Relevanz, da bestimmte regulatorisch relevante Größen im Erneuerbaren Energiengesetz, wie die EEG-Umlage basierend auf dem day-ahead Spot-Preises, berechnet werden.

Wenn wir die Auswirkung von Erneuerbaren Energien betrachten, benötigen wir ein Strompreis-Modell. Ein einfaches Modell, welches die Auswirkungen gut verdeutlichen kann, ist das **Supply-Stack-Modell** (auch **Merit-Order-Modell**), welches in Abbildung 65 bereits illustriert ist. Hierbei wird der gesamte verfügbare Kraftwerkspark in dem Marktgebiet betrachtet und jedem **Kraftwerk** eine **verfügbare Kapazität und Grenzkosten** zugeordnet. Alle diese Kraftwerkskapazitäten werden nun nach Ihren Grenzkosten geordnet, anschließend aggregiert und bilden dann den Supply-Stack bzw. die Merit-Order-Kurve. Bei einer gegebenen Nachfragefunktion (im einfachsten Fall die unelasti-

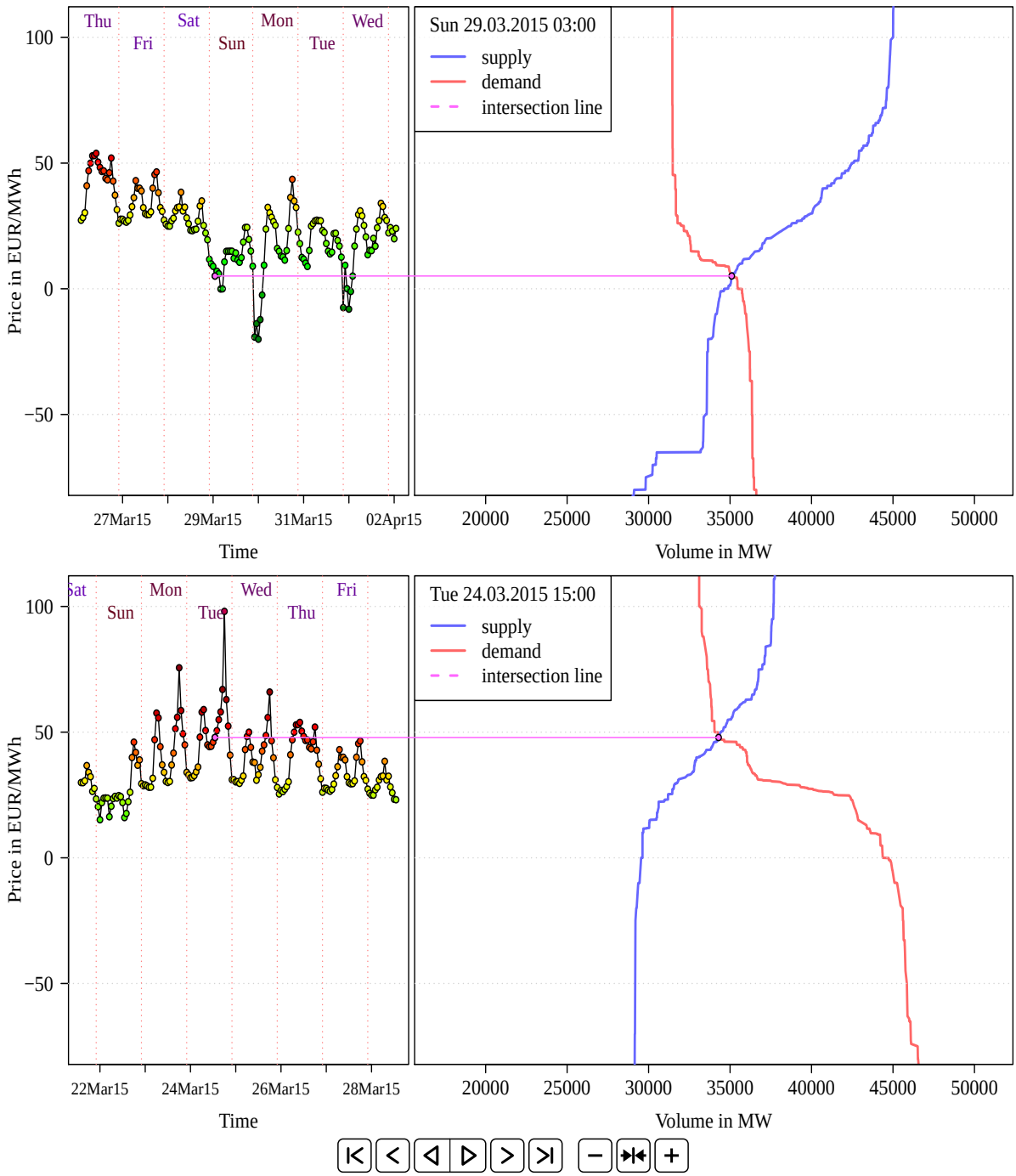


Abbildung 64: EPEX day-ahead Strompreise für eine Ausgewählte Zeitspanne mit Markträumgs-Preis und Volumen sowie Angebots-/Verkaufs- und Nachfrage-/Kaufs-Kurven.

sche Nachfrage), ist der Strompreis des Merit-Order-Modells nun der Schnittpunkt aus der Nachfragekurve und dem Supply-Stack. Folglich kann der Supply-Stack direkt als Nachfragefunktion interpretiert werden.

In der Abbildung 65a sehen wir exemplarisch ein Beispiel, das etwa der Situation in Deutschland entspricht. Hierbei fällt auf, dass für alle erneuerbaren Energien Grenzkosten von 0EUR/MWh angenommen wurden, da man davon ausgehen kann, dass die wahren Grenzkosten nahezu null sind. Ferner sehen wir, dass allen konventionellen Kraftwerken positive Grenzkosten zugeordnet wurden. Diese hängen natürlich insbesondere von den Kosten für die Brennstoffe, aber auch vom CO_2-Preis ab. Als einfache Formel zur Bestim-

mung der Grenzkosten $\partial \text{Kosten}_{konv.}$ konventioneller Kraftwerke wird in der Regel

$$\partial \text{Kosten}_{konv.} = \frac{\text{Brennstoffkosten}}{\text{Wirkungsgrad}} + CO_2\text{Preis}\frac{\text{spez.}CO_2\text{Emissionsfaktor}}{\text{Wirkungsgrad}} + \text{var. Betriebskosten.} \tag{50}$$

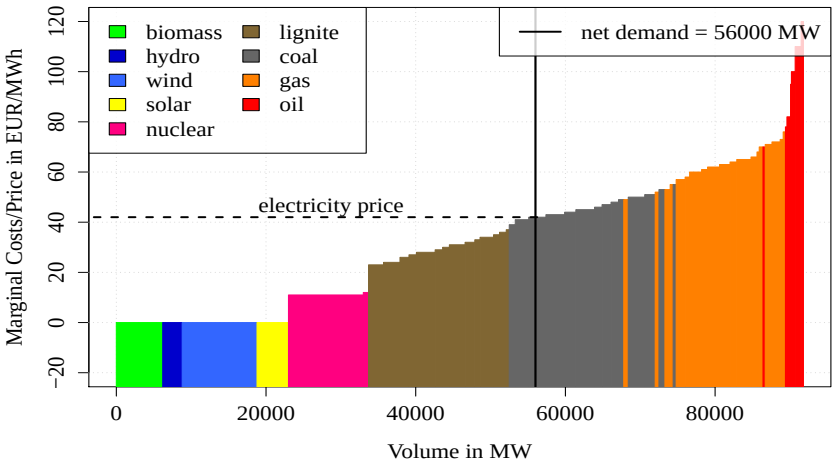
bestimmt, wobei die eingehenden Größen in der Regel tabellarisiert bzw. für Kraftwerksgruppen bekannt sind bzw. relativ gut geschätzt werden können.

Bei üblichen Marktsituationen der letzten Jahre, kann man davon ausgehen, dass tendenziell die Grenzkosten von Kernkraftwerken geringer sind als jene von Braunkohlekraftwerken, jene geringer sind, als die von Steinkohle, jene geringer sind als die von Kraftwerken, die Gase verbrennen (insb. Erdgas) und jene sind wiederum geringer als die von Ölkraftwerken. Es ist ersichtlich, dass sich bei steigender Nachfrage der Strompreis erhöht und bei sinkender Nachfrage der Strompreis sinkt.

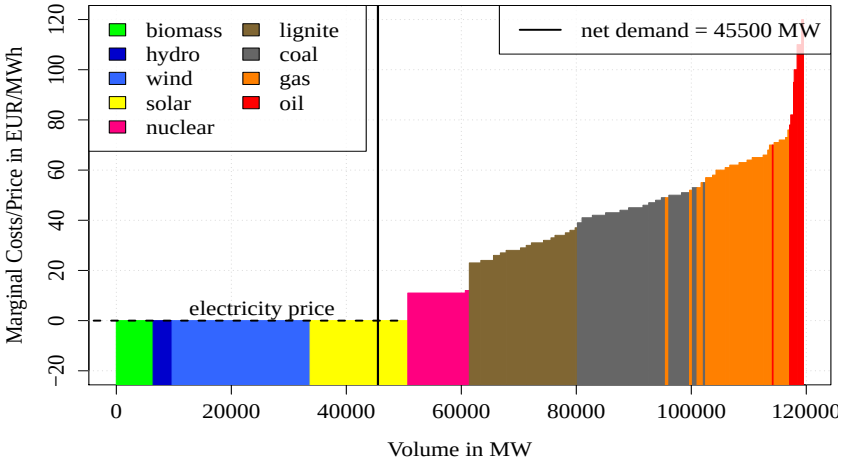
Nun schwankt jedoch nicht nur die Nachfrage nach Strom über die Zeit, sondern vor allem auch die Einspeisung von Wind- und Solarenergie, die von den meteorologischen Bedingungen abhängt. Wenn nun sehr viel Wind- und Solarstrom eingespeist wird, wird der Supply-Stack nach rechts verschoben. Dies führt wiederum zu einer Reduzierung des Strompreises, bei konstanter Nachfrage. Dieser preisreduzierende Effekt wirkt auch als **Merit-Order-Effekt** bezeichnet. Wenn neben einer hohen erneuerbaren Energieeinspeisung auch eine vergleichsweise geringe Nachfrage nach Strom vorliegt, dann kann der Strompreis im dem Supply-Stack-Modell bis auf den Wert 0 EUR/MWh fallen, vgl. Abbildung 65b. In der Praxis treten jedoch sogar negative Preise auf, vgl. Abbildung 64. Dies hat vor allem mit der Ausgestaltung des erneuerbaren Energie-Gesetzes zu tun. Vereinfacht gesagt, hat die Erzeugung aus erneuerbaren Energien Einspeisevorrang, selbst wenn ein Überangebot vorliegt. Dies führt dazu, dass konventionelle Kraftwerksbetreiber auch bereit Geld dafür zu zahlen, dass Ihnen vorübergehend Strom abgenommen wird, damit sie es vermeiden können, das Kraftwerk abzuschalten, was mit hohen Kosten verbunden ist. Natürlich kann auch die entgegengesetzte Situation eintreten, dass nahezu kein Strom aus Wind- und Solarenergie eingespeist wird und zusätzlich die Nachfrage nach Strom sehr hoch ist, vgl. Abbildung 65c. In diesem Fall wird der Strompreis in der Regel sehr hoch ausfallen. Auf der üblichen nichtlinearen Struktur der Merit-Order-Kurve für hohe Stromnachfragen, treten so teilweise sehr hohe Strompreise ein, was zu sogenannten **Preisspitzen** führt.

Wenn in einem solchen Marktsystem kontinuierlich erneuerbare Energien zugebaut werden, hat dies natürlich Auswirkungen auf den Strommarkt. Generell führt, wegen des Merit- Order Effektes die erhöhte Verfügbarkeit von Strom mit Grenzkosten nahe 0 EUR/MWh dazu, dass der durchschnittliche Strompreis bei gleichem verfügbarem Kraftwerkspark im Marktgebiet sinkt. Somit sinkt auch der Gewinn der konventionellen Kraftwerksbetreiber, was langfristig wiederum dazu führt, dass Kraftwerke aus dem Markt verdrängt werden, da ihr Betrieb aus betriebswirtschaftlicher Sicht nicht rentabel ist. Allerdings sind die Energiemärkte in Europa stark reguliert, sodass diese marktwirtschaftlich konsequente Folgerung nicht zwangsweise eintreten muss. Zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit kann Kraftwerken das Einstellen des Betriebes untersagt werden. Andersherum lenkt der Staat auch die Abschaltung von Kraftwerken überwiegend aus gesellschaftlichen und ökologischen Beweggründen, wie Beispielsweise durch den Atomausstieg oder den Kohleausstig.

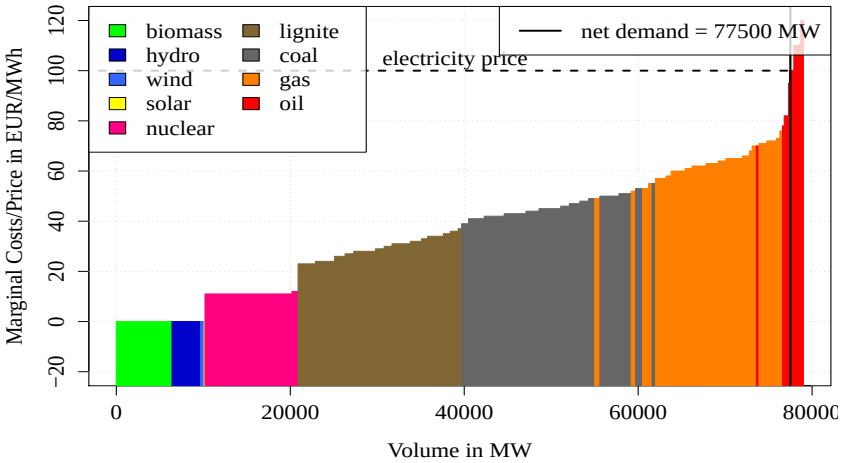
Wenn jedoch ein konventionelles Kraftwerk aus dem Markt gedrängt wird, so es ist nicht automatisch ersichtlich, welches Kraftwerk dies sein wird. Dies hängt stark von dem Nachfrageverlauf, dem Kraftwerksportfolio und der zeitlichen Abhängigkeit von der Wind- und Solar-Einspeisung ab. Generell kann man aber davon ausgehen, dass die verbleibende



(a) Supply-Stack Modell in einer normalen Situation mit moderater Nachfrage und Erzeugung erneuerbarer Energien.



(b) Supply-Stack Modell mit geringer Nachfrage und hoher Erzeugung erneuerbarer Energien.



(c) Supply-Stack Modell mit hoher Nachfrage und geringer Erzeugung erneuerbarer Energien.

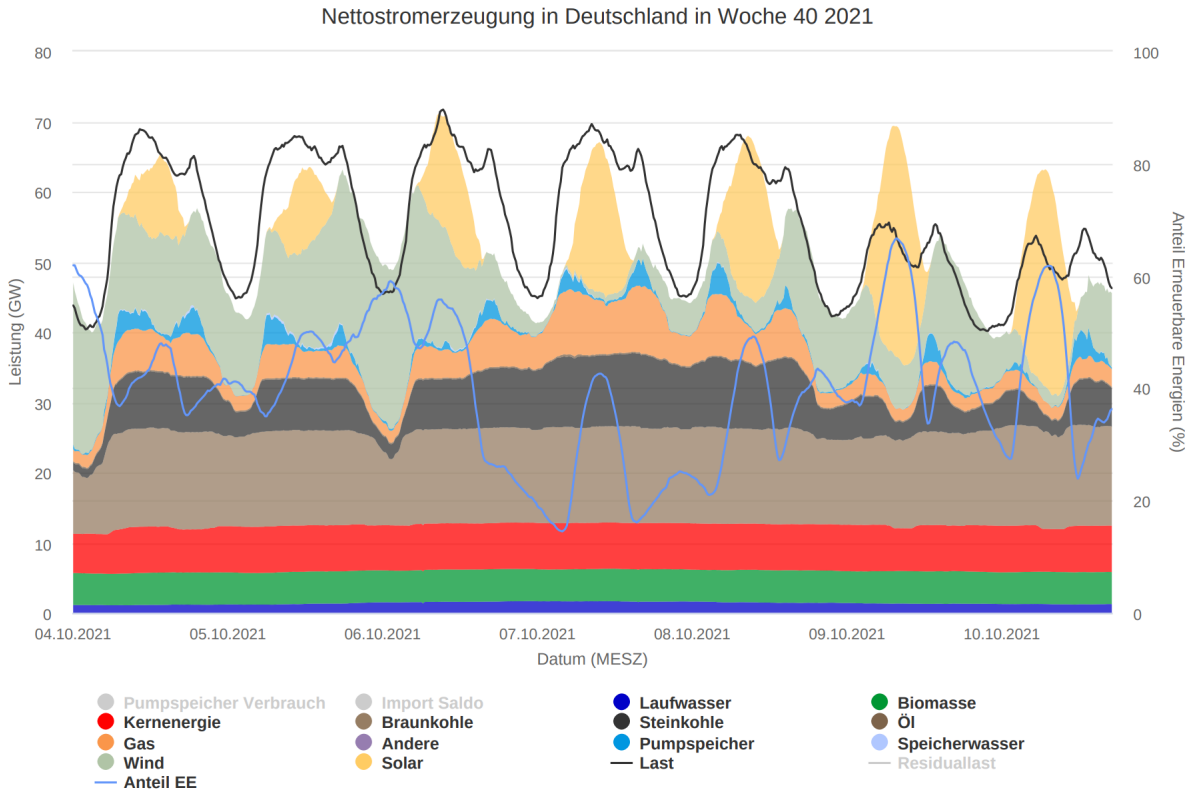
Abbildung 65: Supply-Stack-Modell für drei Situation die etwa der Markt-Situation in Deutschland (2017) entsprechen.

konventionelle Merit-Order steiler wird. Der Strompreis wird somit bei gleichbleibenden Nachfragemuster tendenziell volatiler werden, da insbesondere häufiger sehr kleine oder gar negative Werte auftreten, aber weiterhin auch sehr hohe Strompreise. Somit erhöht mittelfristig zusätzlich installierte Kapazität von Wind- und Solarenergie die Volatilität

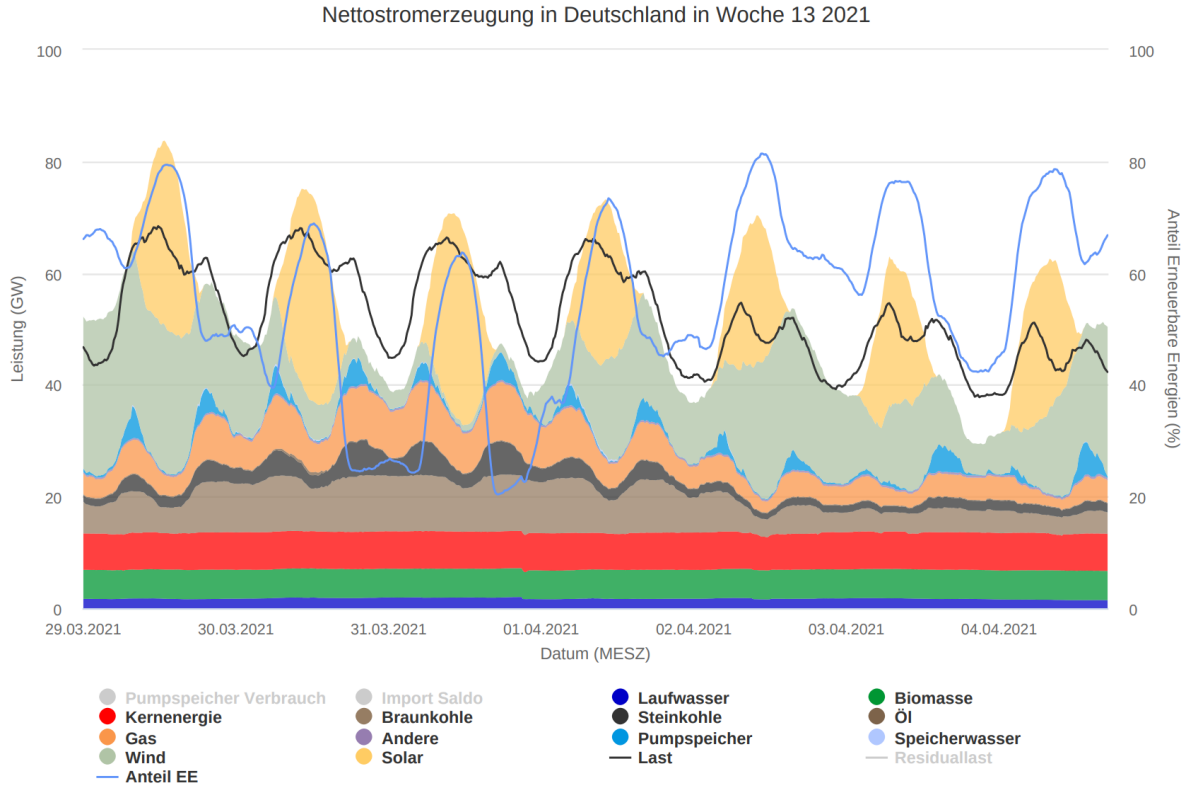
und damit die Unsicherheit am Strommarkt; zumindest solange keine Speichertechnologien im hinreichend großen Umfang in den Markt drängen.

Das der Merit-Order-Effekt nicht relativ komplex ist, wir auch in Abbildung 66 illustriert. Es werden hier zwei Kalendarwochen aus dem Jahr 2021 gezeigt. Die Kraftwerksparkstruktur hat sich während dieses Zeitraumen kaum geändert, wohl aber die Merit-Order; und führen damit zu entsprechenden Änderungen in dem Supply-Stack-Modell. Die Situation in Kalendarwoche 40 (vgl. Abbildung 66a) entspricht von der Merit-Order-Struktur jener in Abbildung 65, inbesondere gilt die grobe Reihenfolge: Braunkohle $<$ Steinkohle $<$ Erdgas. D.h. zunächst verdrängt erneuerbare Energie das Erdgaskraftwerke, dann Steinkohle und dann die Braunkohle. In Kalendarwoche 13 (vgl. Abbildung 66b) hingegen wurde zuerst überwiegend Steinkohle verdrängt und danach überwiegend erst das Erdgas. Es kam zu einem sogenannten **fuel-switch** durch hohe CO_2e- bzw. EUA-Preise, bei ca. 40 EUR/tCO_2e, war die Stromproduktion mittels Gaskraftwerken überwiegend günstiger als die durch Steinkohle. Allerdings sollte angemerkt werden, dass in Kalendarwoche 41 der EUA-Preis bei ca. 60 EUR/tCO_2e lag, also höher als in Kalendarwoche 13. Jedoch ist in diesem Zeitraum der Erdgaspreis sehr stark gestiegen, dass dadurch die Erdgasverstromung wieder teurer war als die Steinkohleverstromung.

Da der Strom aber nicht nur im deutschen Marktgebiet gehandelt wird, sondern auch importiert und exportiert wird, führt dies zu einer Reduzierung der Volatilität der Strompreise in dem Marktgebiet mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Strom. Auf Grund des gewählten Designs der Strommarktkopplung ist der Strompreis in zwei benachbarten Marktgebieten sogar gleich, wenn es keine Übertragungsengpässe zwischen diesen Regionen gibt.



(a) Kalenderwoche 40



(b) Kalendarwoche 13

Abbildung 66: Stromproduktion in Deutschland für verschiedene Kalendarwochen.

5.4 Erneuerbare Energien-Gesetz (EEG) und Förderinstrumente

5.4.1 Einführung

In diesem Abschnitt wollen wir die Instrumente zur Förderung erneuerbarer Energien und das **Erneuerbare Energien-Gesetz (EEG)** genauer betrachten. Das EEG ist das maßgebliche energiepolitische Gesetz, dass zum Gelingen der **Energiewende** beitragen soll, d.h. dem Ausstieg aus der konventionellen Energiegewinnung hin zur Energiegewinnung aus Erneuerbaren Energien fördern soll. Das EEG wurde immer wieder reformiert. Ddie aktuellste Fassung ist von 2017 und wird kurz als EEG 2017 bezeichnet. Das EEG ging aus dem **Stromeinspeisungsgesetz** (StromEinspG, auch kurz StrEG) hervor und wurde erstmalig im Jahr 2000 eingeführt. Die generelle zeitliche Entwicklung ist in der Abbildung 67 dargestellt. Zur richtigen zeitlichen Einordnung wollen wir hervorheben, dass bereits im Stromeinspeisungsgesetz von 1991 erneuerbare Energien (Wasser, Wind, Sonnenenergie, Deponiegas, Klärgas, Biomasse) gefördert wurden.

Abbildung 67: Entwicklung und Reform des Erneuerbare Energien-Gesetz (EEG) im Zeitverlauf.

Einführend wollen wir wiederholend die generellen Ziele der Energiewende hervorheben. Ein wesentlicher Aspekt ist die **langfristige Knappheit konventioneller** (fossiler und nuklearer) **Energieträger**. Aber auch der Klimaschutz (Reduktion der Treibhausgasemissionen) und die Reduzierung weiterer externer Effekte (z.B. Reduzierung von Luftschadstoffbelastung) sind wichtige Gründe.

Im EEG 2017 ist in §1 Abs. 1 dies festgehalten:

EEG2017 §1(1) *Zweck dieses Gesetzes ist es, insbesondere im Interesse des Klima- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen, die volkswirtschaftlichen Kosten der Energieversorgung auch durch die Einbeziehung langfristiger externer Effekte zu verringern, fossile Energieressourcen zu schonen und die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien zu fördern.*

Die genannten Ziele stellen eher **globale Probleme** dar (insb. die Knappheit konventioneller Energieträger und der Klimawandel). Daher sind im Allgemeinen **globale politische Instrumente zu bevorzugen** da sie am effizientesten sind. Die Umsetzung globaler Klima- und Energiepolitik ist jedoch sehr schwierig. Wobei die Umsetzung von nationalen (oder europäischen) politischen Initiativen eher angemessen erscheint. Ferner können nationale politische Initiativen als Wegbereiter bzw. Vorreiter für globalere politische Instrumente sein.

Für die Wahl der Instrumente zur Förderung erneuerbarer Energien sind vor allem zwei Fragen relevant:

- Welche Ziele will ein Land bei der Förderung Erneuerbarer Energien erreichen?
- Wie können diese Ziele bestmöglich erreicht werden?

Wir haben bereits gesehen, dass sich Deutschland, aber auch die EU insgesamt, bestimmte Ziele zur Einführung Erneuerbarer Energien setzt. Im EEG 2017 sind im §1 Abs. 2 und 3 diese Ziele im Gesetz verankert:

EEG2017 §1(2) *Ziel dieses Gesetzes ist es, den Anteil des aus erneuerbaren Energien erzeugten Stroms am Bruttostromverbrauch zu steigern auf*

1. *40 bis 45 Prozent bis zum Jahr 2025,*
2. *55 bis 60 Prozent bis zum Jahr 2035 und*
3. *mindestens 80 Prozent bis zum Jahr 2050.*

Dieser Ausbau soll stetig, kosteneffizient und netzverträglich erfolgen.

EEG2017 §1(3) *Das Ziel nach Absatz 2 Satz 1 dient auch dazu, den Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Bruttoendenergieverbrauch bis zum Jahr 2020 auf mindestens 18 Prozent zu erhöhen.*

Es werden also Ziele für den Anteil erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung, sowie am Bruttoendenergieverbrauch in Deutschland gemacht.

Die Ziele werden regelmäßig von der Regierung angepasst, bzw. aktualisiert. Im EEG 2014 war §1 Abs. 2 beispielsweise:

EEG2014 §1(2) *Um den Zweck des Absatzes 1 zu erreichen, verfolgt dieses Gesetz das Ziel, den Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung mindestens auf*

1. *35 Prozent spätestens bis zum Jahr 2020,*
2. *50 Prozent spätestens bis zum Jahr 2030*
3. *65 Prozent spätestens bis zum Jahr 2040 und*
4. *80 Prozent spätestens bis zum Jahr 2050.*

und diese Strommengen in das Elektrizitätsversorgungssystem zu integrieren.

Neben den Zielen ist natürlich die Fragestellung, wie diese Ziele erreicht werden können von hoher Bedeutung. Wir haben bereits in den vorherigen Kapiteln allgemeine umweltökonomisch Regulierungsinstrumente kennengelernt, die teilweise auch auf die Förderung des Ausbaus der erneuerbaren Energien anwendbar sind.

Zur Beurteilung der Güte verschiedener Instrumente werden dabei üblicherweise vier pragmatische Kriterien angewendet:

a) Effektivität/Treffsicherheit (Zielerreichung)

b) Statische Effizienz (Kosteneffizienz)

c) Dynamische Effizienz (Innovationsanreize)

d) Praktikabilität (Vereinbarkeit mit dem marktwirtschaftlichen Ordnungsrahmen, Umsetzbarkeit)

5.4.2 Förderinstrumente

In der Wissenschaft und Praxis werden vor allem vier verschiedene grundlegende Modelle zur Förderung erneuerbarer Energien diskutiert. Diese sind **feste Einspeisevergütung**, **Quoten- und Quotenhandelsmodelle**, **Ausschreibungsmodelle** und **Bonusmodelle**. Einige davon sind in bestimmten Formen im EEG umgesetzt worden bzw. werden immer noch umgesetzt. Um die Instrumente besser im Kontext des EEG und möglicher zukünftiger Reformen zu verstehen, wollen wir sie zunächst allgemein betrachten.

Feste Einspeisevergütung Die feste Einspeisevergütung ist eine staatlich festgelegte Vergütung von Strom und wird teilweise kurz nur als Einspeisevergütung bezeichnet. Der Strom wird in der Regel aus erneuerbaren Energien erzeugt. Nur in Verbindung mit den Anschluss- und Abnahmeverpflichtungen entfaltet eine feste Einspeisevergütung ihre volle Wirkung. Generell hängt die Erreichung eines Mengenziels stark von dem Umfang der finanziellen Förderung ab. Eine Differenzierung nach bestimmten Kriterien, wie der Technologie, Standorten oder dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme von geförderten Anlagen ist möglich. Die feste Einspeisevergütung wird in Deutschland im EEG als ein Förderinstrument angewendet, aber auch in anderen Ländern wie Frankreich, Spanien und Österreich. Dies zeigt, dass es relativ leicht umsetzbar ist. In der EU wird immer wieder diskutiert, ob eine feste Einspeisevergütung den Tatbestand der Beihilfe erfüllt. Dies hatte der Europäischer Gerichtshof in einem Grundsatzurteil verneint, allerdings gilt dieses Urteil unter Experten als sehr umstritten.

Die feste Einspeisevergütung ist auch durch Risikominderung für die Investoren als effektives Instrument anzusehen, da kein Preisrisiko auf der Absatzseite für Investoren vorliegt. Diese Effektivität geht jedoch mit eingeschränkter Effizienz einher. So verhindern die administrierte festgesetzten Preise den Preiswettbewerb zwischen den Anbietern für erneuerbarer Energien. Allerdings kann dies zu einem intensiven Wettbewerb zwischen den Anlagenbauern führen. Dies induziert eine Entwicklungs- und Kostensenkungsdynamik, davon profitieren aber zunächst nur die Kapitalgeber. Die ökonomische Effizienz zur Erreichung von Umwelt- und Klimaschutzzielen ist eher fraglich, da sich die Vergütungssätze im Allgemeinen nicht nur an die vermiedenen Emissionen orientieren. Durch die Degression von Vergütungssätzen kann versucht werden, die dynamische Effizienz zu erreichen, jedoch ist es für den Staat oder auch der Wissenschaft in der Regel schwierig, die Kostensenkungspotenziale richtig zu prognostizieren.

Ferner werden durch die feste Einspeisevergütung vorrangig die fluktuierenden erneuerbaren Energien (Wind und Solar) gefördert. Dies führt in Konsequenz dazu, dass die damit einhergehenden Probleme bzgl. der Netzstabilität gelöst werden müssen. Die entsprechenden Kosten müssen folglich vom Staat oder den Netzbetreibern getragen werden.

Quoten- und Quotenhandelsmodelle Ein Quoten- und Quotenhandelsmodell

Bei einem Quotenmodell setzt der Staat eine Quote für erneuerbaren Energien fest, die von den Energieversorgern produziert werden muss. Zur Überprüfung der Einhaltung der Verpflichtungen werden dann für erneuerbar - erzeugten Strom Zertifikate vergeben, die von den Energieversorgern untereinander gehandelt werden können. Es handelt sich somit um eine Zertifikate-Lösung. Die Vergabe einer Quote für regenerativ erzeugten Strom bedeutet, die Schaffung eines geschützten Zweitmarktes

für Strom und dies stellt einen erheblichen Eingriff in den wettbewerblichen marktwirtschaftlichen Ordnungsrahmen dar. Innerhalb der EU wurde ein nationales Quotenmodell bisher nicht umgesetzt, auch weil die Vereinbarkeit mit dem EU-Recht unklar ist. So ist die Vereinbarkeit mit den europäischen Beihilfevorschriften, sowie eine mögliche Verletzung vom Art. 28 EG-Vertrag (Ausländische Anbieter dürfen nicht diskriminiert werden) zu prüfen. Für eine EU-weite Umsetzung wären die rechtlichen Hürden geringer.

Da vom Staat ein Mengenziel vorgegeben wird, besteht bei ausreichend hoch angesetzten Vertragsstrafen (Pönalen) kein Anreiz für ein Unternehmen, die Quote nicht zu erfüllen. Der sich einstellende Zertifikatspreis für erneuerbaren Strom wird wegen der vollkommen unelastischen Nachfrage aufgrund der Mengenvorgabe vom Grenzanbieter bestimmt. Alle anderen Anbieter mit niedrigeren Kosten können Mitnahmegewinne realisieren und die Produzentenrente abschöpfen. Dies gilt insbesondere, wenn bereits existierende Anlagen zur Quotenerfüllung herangezogen werden.

Insgesamt wird das staatlich vorgegebene Mengenziel relativ gut erreicht. Die meisten Techniken zur erneuerbaren Stromerzeugung sind aber teils erheblichen Schwankungen unterworfen, womit jährlich vorgegebene Mengenziele nur eher schwer exakt realisiert werden können, da sie insbesondere von den meteorologischen Bedingungen abhängen. Ferner ist ein Quotenmodell nur bedingt geeignet, um die quantitative Klimaschutzziele (Treibhausgasemissionen) zu erreichen, da es schwer prognostiziert werden kann, welche konventionellen Kraftwerke durch die erneuerbaren Energien vom Markt verdrängt werden. Eine spezielle Förderung bestimmter erneuerbarer Technologien ist nur unter erheblicher Verkomplizierung des Modells möglich.

Ausschreibungsmodelle Im Ausschreibungsmodell wird eine bestimmte Menge an Strom aus erneuerbarer Energie ausgeschrieben, wobei die Gewinner der Ausschreibung eine befristete Abnahmegarantie für den erzeugten Strom erhalten. In der Regel gibt es eine ausschreibende Behörde, die die Angebote bzgl. einer Ausschreibung annimmt und diese auf deren technische, rechtliche und wirtschaftliche Machbarkeit der in der Ausschreibung vorgegebenen Kriterien prüft. Diejenigen Angeboten, welche dieser Kriterien erfüllen und die niedrigsten Preisangebote als wichtigsten Bietparameter aufweisen, erhalten einen Zuschlag.

Ein klarer Vorteil des Ausschreibungsmodells ist die direkte Umsetzung einer Wettbewerbslösung, welches zu einem effizienten und effektiven Fördermodell führt.

Ähnlich wie beim Quotenmodell wird ein Mengenziel direkt vom Staat vorgegeben, das auch technologiespezifisch gesteuert werden kann. Die Mengenziele können also relativ gut erreicht werden; wenn die angesprochenen meteorologisch bedingten Schwankungen ausgeklammert werden.

Für eine Umsetzung eines Ausschreibungsmodells ist es besonders wichtig notwendige Förderparameter vorab festzulegen. Dies sind vorrangig:

- Zulassungsvoraussetzungen für Bieter und Projekte
- Vorlaufzeit zw. Zuschlag und Inbetriebnahme
- Ausschreibung von Leistung oder Energiemengen
- Limitierung der Förderung
- Frequenz der Auktionierung
- Vertragskonditionen: Pflichten und Vertragsstrafen (Pönale)

– Auktionsform und Gebotsregeln

Denn je nach Ausgestaltung des Ausschreibungsmodell werden bestimmte Technologien bevorzugt; Technologieneutralität ist nur schwer herzustellen.

Auktionen für erneuerbare Energie-Anlagen wurden bereits in verschiedenen europäischen Ländern, wie Frankreich, Niederlande, England, Schottland, Wales, Irland, Dänemark und Deutschland umgesetzt. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass die Details des Auktionsdesigns über den Erfolg entscheiden können.

Bonusmodelle Bei dem Bonusmodell handelt es sich um ein preisorientiertes Vergütungsmodell. Hierbei wird nicht eine feste Vergütung unabhängig vom aktuellen Marktpreis (wie bei der festen Einspeisevergütung) gewährt, sondern die Anlagen zur Stromerzeugung aus Erneuerbaren nehmen am allgemeinen Markt teil. Zusätzlich zu den am Markt erzielten Erlös wird eine Zusatzvergütung (Bonus) erhalten, um die höheren Stromgestehungskosten auszugleichen.

Bei dem Bonus handelt es sich um einen administrativ festgelegten Preis, der die Ausbaugeschwindigkeit steuern kann. Vorgegebene Mengenziele werden jedoch ähnlich wie bei der festen Einspeisevergütung schwer erreicht, da sich der Ausbau nur schwer steuern lässt. Ein Vorteil des Bonusmodells ist jedoch die gleichzeitige Teilnahme der erneuerbaren Energien am allgemeinen Spotmarkt, was einen Anreiz zur marktorientierten Produktion gibt. Das Modell kombiniert direkt die Marktintegration mit staatlich administrierten Preisen, so sind die Anlagenbetreiber einem gewissen aber nicht vollem Marktpreisrisiko ausgesetzt.

Praktische Erfahrungen mit dem Bonusmodell gibt es wenig, es wird aber beispielsweise in Dänemark angewendet. Auch in Deutschland gibt es die Möglichkeit Strom aus erneuerbaren Energien abzusetzen.

Neben den genannten vier Förderinstrumenten, gibt es natürlich weitere Optionen und Hybride. So gibt es beispielsweise Instrumente, die sich an der Nachfrageseite orientierten, wie Angebote für 'Grünen Strom' (Strom aus erneuerbaren Energien).

5.4.3 Details zum Erneuerbare Energien-Gesetz

Das Erneuerbare Energien-Gesetz (EEG) trat zum 01.04.2000 (vgl. Abb. 67). Es regelt die Abnahme und die Vergütung von Strom aus erneuerbaren Energien. So gibt es eine Abnahmeverpflichtung für die Netzbetreiber, also jene Versorgungsunternehmen, die Netze für die allgemeine Stromversorgung betreiben. Weiterhin gibt es einen Einspeisevorrang für Erneuerbare Energien und eine deutschlandweite Umlage über alle Endkunden, die vom Stromverbrauch abhängt. Über das EEG werden Wasserkraft, Windkraft, Geothermie, Grubengas, Solarenergie und Biomasse gefördert.

Mit dem EEG 2000 wurde in Deutschland auf das Fördermodell der festen Einspeisevergütung gesetzt und stellt bis heute eine wichtige Komponente im EEG dar. Die Vergütungssätze des EEG 2000 variierten stark abhängig von der Technologie, sie betrugen:

- Strom aus Windenergie zwischen 6,19 und 9,10 Cent/kWh
- Strom aus Photovoltaikanlagen mind. 50,6 Cent/kWh
- Wasserkraft mind. 7,67 Cent/kWh

Zeitraum	<30 kWp	<100 kWp	<1 MWp	≥1 MWp	Freifläche	Konversionsfläche
2005	54,53	51,87	51,30	51,30	43,42	-
2006	51,80	49,28	48,74	48,74	40,60	-
2007	49,21	46,82	46,30	46,30	37,96	-
2008	46,75	44,48	43,99	43,99	35,49	-
2009	43,01	40,91	39,58	33,00	31,94	-
01.01.'10 - 30.06.'10	39,14	37,23	35,23	29,37	28,43	28,43
01.07.'10 - 31.09.'10	34,05	32,39	30,65	25,55	25,02	26,15
01.10.'10 - 31.12.'10	33,03	31,42	29,73	24,79	24,26	25,37
01.01.'11 - 31.12.'11	28,74	27,33	25,86	21,56	21,11	22,07
01.01.'12 - 30.06.'12*	24,43	23,23	21,98	18,33	17,94	18,76
01.07.'12 - 30.09.'12*	20,76	19,75	18,68	15,58	15,25	15,95

Tabelle 11: EEG Förderungen für Solaranlagen. (*=Übergangsregelungen)

- Biomasse zwischen 8,70 und 10,23 Cent/kWh
- Geothermie zwischen 7,16 und 8,95 Cent/kWh

Die Vergütungssätze für neu in Betrieb gehende Anlagen für Windkraft, Sonnenenergie und Biomasse wurden seit 2002 jährlich per Degression gesenkt. Die Degressionsraten lagen bei 1,5% für Windkraft, 5% für Solarenergie und 1% für Biomasse. Im Laufe der Jahre wurden die Fördersätze (insbesondere die Degressionsraten) immer wieder angepasst, um den Ausbau der Erneuerbaren Energien zu beschleunigen oder auch zu bremsen.

Beispielhaft sind in der Tabelle 11 die Einspeisevergütungen für Solaranlagen für 2005-2012 dargestellt. Wir sehen, dass seit 2010 die Förderungen regelmäßiger angepasst wurden, was auf den relativ stark gestiegen Ausbau an Photovoltaik zurückzuführen ist. Seit 2012 werden für Solarenergie monatliche Degressionsraten angewendet, das vom vergangen Zubau (insb. letztes Jahr) abhängt, um den Ausbau besser zu steuern.

In der Abbildung 68 ist der Zubau an Photovoltaikanlagen (siehe auch Abbildung 62) sowie der jährlicher Elektrizitätspreis (Front-Year Future), CO_2-Preis und EZB-Leitzinssatz für 2007 bis 2013 dargestellt. Wir sehen die Auswirkungen der Finanzkrise im Jahr 2008 und 2009. So ist insbesondere der EZB-Leitzinssatz innerhalb von kurzer Zeit drastisch gesunken. Als Folge suchten die Investoren Alternativen und investierten stärker in die Solaranlagen in Deutschland, um von der relativ hohen und sicheren Renditen zu profitieren. Der überwiegende Anteil der bisher in Deutschland installierten Photovoltaikanlagen geht auf den in der Abbildung 68 dargestellten Zeitraum zurück. Da Solarenergie jedoch, erhielt eine in absoluten Zahlen ausgedrückt relativ hohe Förderung, und somit erhöhten sich die Kosten und entsprechend die EEG-Umlage stark, weswegen die Politik Anpassungen vornahm. Seit 2014 liegen auf Grund der geringen Fördersätze die Zubauraten für Photovoltaik unter den Zielen der Bundesregierung. Im Rahmen des EEG 2014 wurde als (deutsches) Pilotprojekt das Ausschreibungsmodell für Photovoltaik-Freiflächenanlagen angewendet. Die erste Ausschreibungsrunde für 150 MWp endete am 15. April 2015, war mehrfach überzeichnet und wurde generell als Erfolg gewertet. Mit dem EEG 2017 wurde das Ausschreibungsmodell zum Standardinstrument in der Förderung von Windkraftanlagen, größeren Solaranlagen und der Biomasse gemacht.

Für die Windenergie ist mit dem EEG 2017 ein Ausschreibungsvolumen von jährlich 2,8GW für 2017 bis 2019 festgelegt worden, ab 2020 soll sich die Kapazität auf jährlich 2,9GW erhöhen. Für Windenergieanlagen gibt es pro Jahr 3 bis 4 Ausschreibungen, die im EEG 2017 §28(1) fixiert sind. Für 2018 und 2019 werden beispielsweise am 1. Februar, 1. Mai, 1. August und 1. Oktober jeweils 700 MW zu installierender Leistung auktioniert.

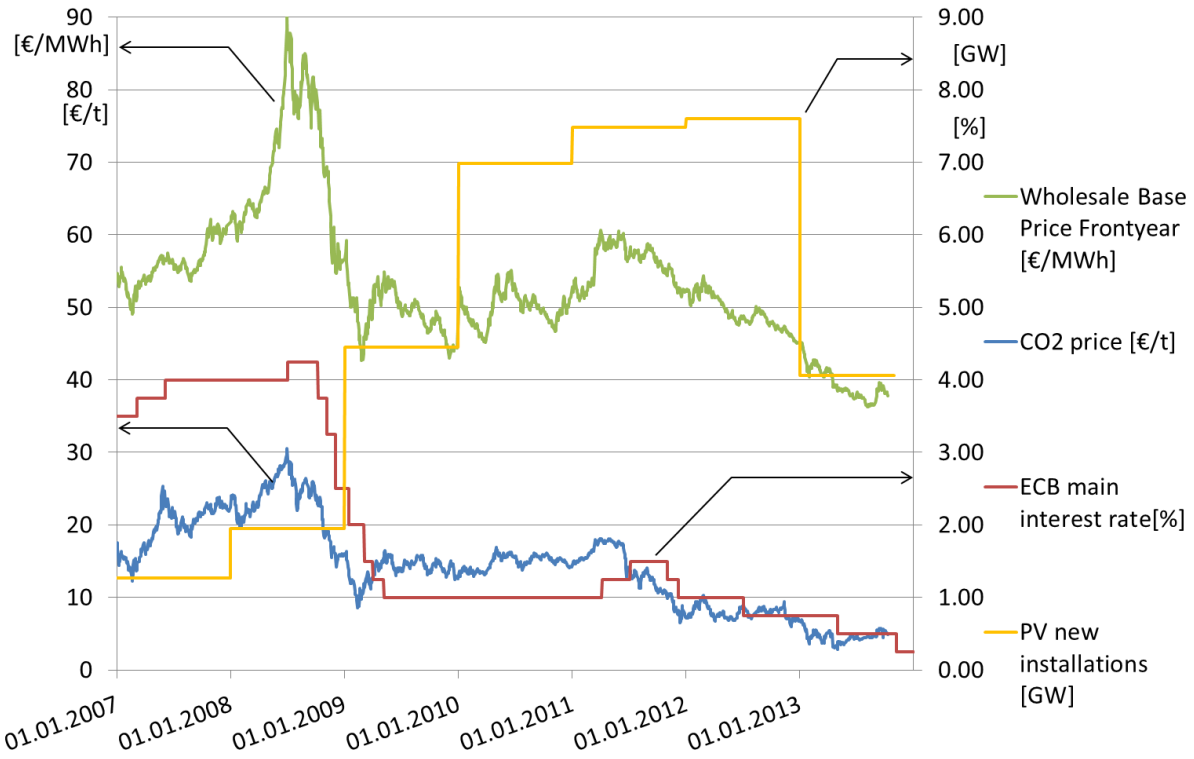


Abbildung 68: Entwicklung des Zubau an Photovoltaik, sowie jährlicher Elektrizitätspreis, CO_2-Preis und EZB-Leitzinssatz.

Abbildung 69 stellt die Ergebnisse der Auschreibungen für on-shore Windanlagen dar. Mit Hinsicht auf die Abbildung kann man schlussfolgern, dass die Zuschlagswerte während der ersten drei Auktionen stetig gesunken sind. Dies kann durch die Tatsache erklärt werden, dass die eingereichten Gebotsmengen in diesen drei Auktionen relativ groß sind. Die Zuschlagswerte etablieren sich aber im Laufe der Zeit auf dem Niveau von 6.20 ct/KWh. Seit Ende 2018 sind die Windenergieauktionen deutlich unterzeichnet, was darauf hinweißt dass der Windenergieausbau seitdem spürbar hinter den Zielen zurück bleibt. Ursachen dafür sind vorrangig, dass keine geeigneten Flächen für den Bau von Windenergieanlagen gefunden werden. Ferner sind die ausgeschrieben Mengen in den Jahren 2018 und 2019 deutlich kleiner, als diese im Jahr 2017. Die in der Abbildung 61 dargestellte Tendenz weist darauf hin, dass der Zubau neuer onshore Windenergieanlagen während der Jahre 2018 - 2021 relativ gering war.

Für Solaranlagen ist das ausgeschriebene Volumen mit jährlich 600 MW zu installierenden Leistung deutlich geringer, als für Windenergieanlagen. Allerdings gibt es für Solarenergie weiterhin die Förderungsmöglichkeit über die Einspeisevergütung, falls die Gesamtkapazität der Anlage unter 750kWh liegt. In der Abbildung 70 sind die Kenndaten der Ausschreibungsergebnisse für die Solarenergie dargestellt. Wir können sehen, dass sich der durchschnittliche Zuschlagswert während der Jahre 2017 und 2018 von 6,58ct/kWh auf unter 4.5 ct/kWh reduziert hat. Dies spricht dafür, dass effizient die Kosten reduziert wurden. Die Tatsache, dass in dem Zeitraum 2017 das Gebotsvolumina anstieg, spricht ferner dafür, dass der Wettbewerb in dem Zeitraum zugenommen hat. Zusätzlich waren alle Auktionen bisher klar überzeichnet.

Für Die Biomasse werden für 2017 bis 2019 jeweils jährlich 150MW zu installierende Leistung ausgeschrieben. Man kann sehen, dass die ausgeschrieben Volumina für die Biomasse kleiner sind, als die Volumina für die Wind- und Solarausschreibungen. Die Er-

gebnisse dieser Auktionen werden in die Abbildung 71 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass die Auktionen deutlich unterzeichnet waren; weswegen die Ausbauziele bei der Biomasse klar hinter den Zielvorgaben der Bundesregierung zurück bleiben.

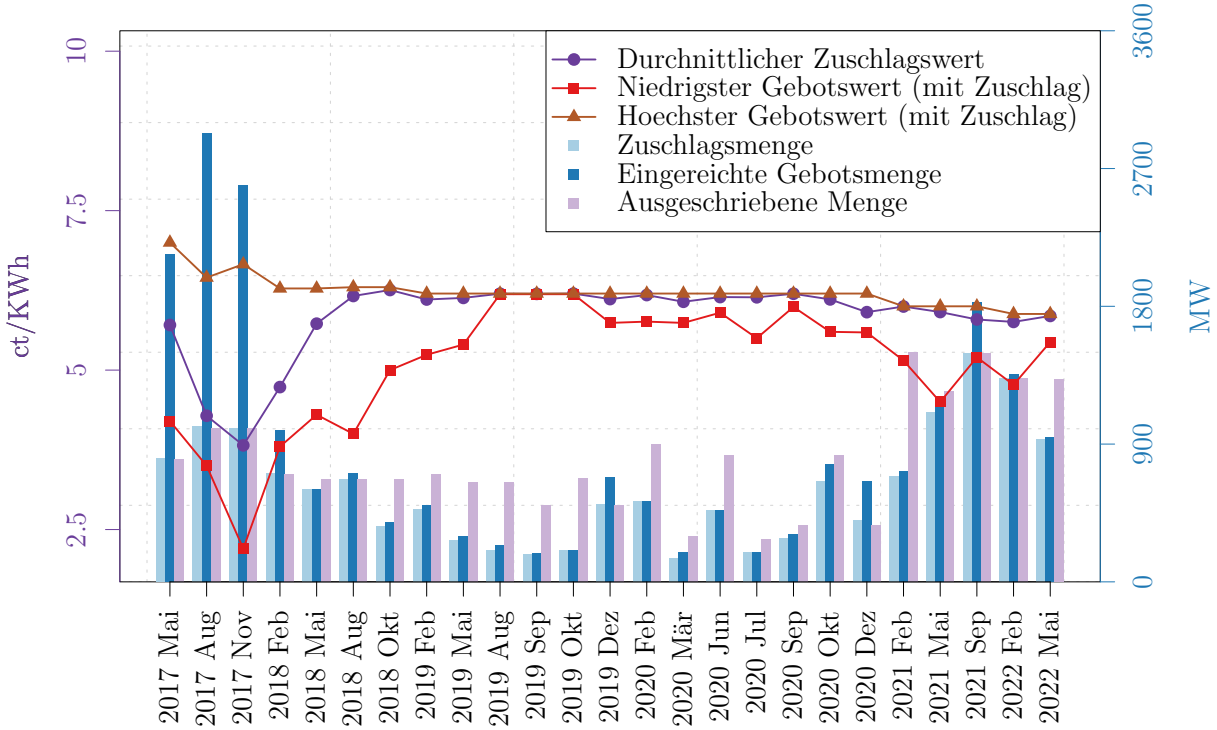


Abbildung 69: Ergebnisse der Ausschreibungen für onshore Windanlagen (2017-2021).

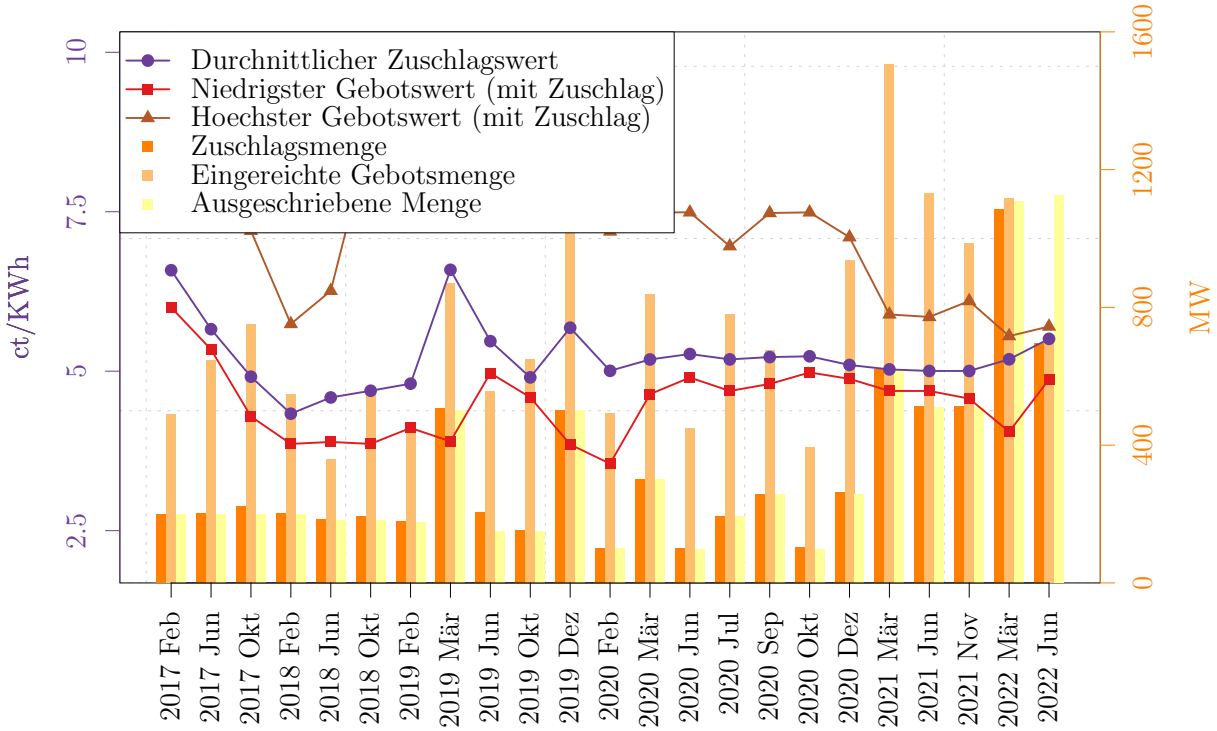


Abbildung 70: Ergebnisse der Ausschreibungen für Solaranlagen mit der Leistung größer, als 750 MW (2017-2021).

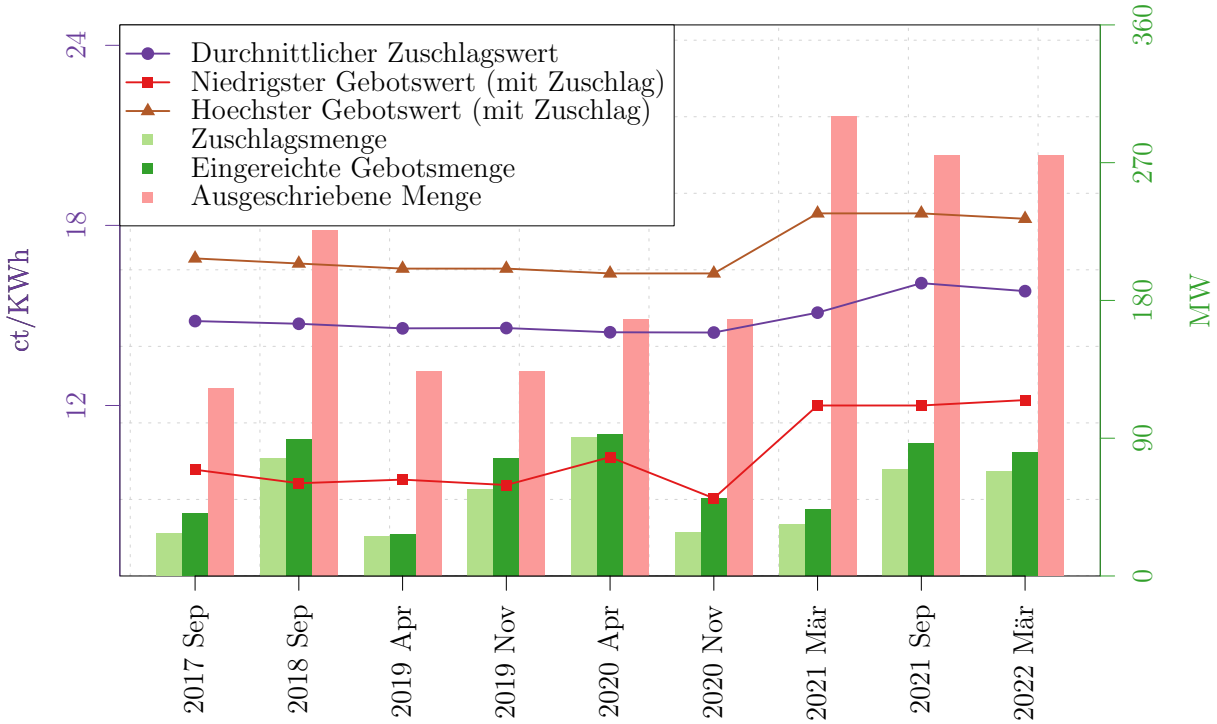


Abbildung 71: Ergebnisse der Ausschreibungen für Biomasseanlagen (2017-2021).

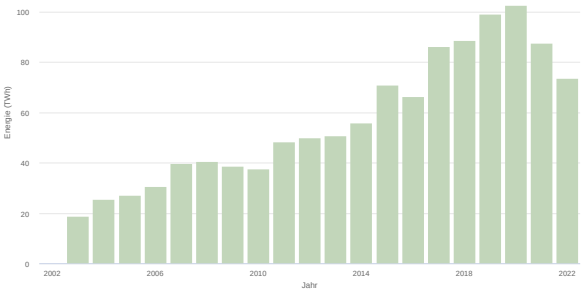
5.5 Wind- und Solarenergieerzeugung

In diesem Abschnitt wollen wir uns detaillierter mit der Wind- und Solarenergieerzeugung beschäftigen, also jenen Erneuerbaren Energien, die zukünftig einen Großteil an der Energieversorgung decken sollen.

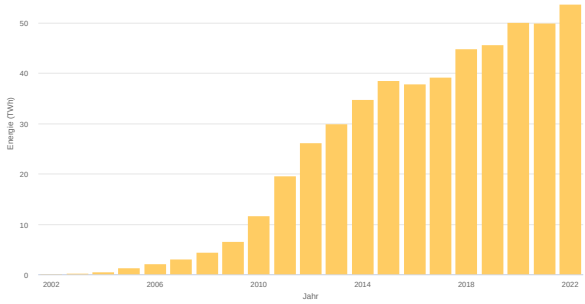
Dabei werden wir vor allem auf die Eigenschaften bzgl. der Unsicherheit in der Energieproduktion schauen, da die Erzeugung von Wind- und Solarenergie stark von den meteorologischen Bedingungen abhängt. Da sich die meteorologischen Bedingungen ständig ändern, ändert sich auch die Einspeisung von Wind- und Solarenergie ständig. In der Abbildung 72 ist die Wind- und Solarenergieeinspeisung der letzten Jahre mit einer jährlichen, monatlichen und täglichen Auflösung bzw. Frequenz dargestellt. Auf Grund des kontinuierlichen Zubaus an installierter Kapazität für Wind- und Solarenergie (vgl. Abb. 62) ist klar, dass auch die Produktion steigt. Jedoch sehen wir in der Abbildung 72a, dass beispielsweise, 2016 weniger Windenergie produziert wurde, als 2015. Dies ist der Fall, obwohl die Kapazität in den beiden Jahren um über 5 GW (vgl. Abb. 62) ausgebaut wurde. Andersherum wurde 2017 ca. 25% mehr Windstrom erzeugt als 2016, die installierte Kapazität stieg jedoch nicht in dem Maße. Bei der Solarenergie (vgl. Abb. 72b) sind ähnliche Effekte zu beobachten, jedoch wurde hier in den letzten vier Jahren nur wenig Photovoltaik zugebaut. Insgesamt ist die Einspeisung von Solarstrom über das gesamte Jahr zuverlässiger, d.h. weniger volatil, als die Windenergie.

In den Abbildungen 72c und 72c sehen wir die Einspeisung mit einer monatlichen Auflösung. Wir sehen bestimmte Regelmäßigkeiten bei den Änderungen, diese sind vor allem periodischer Struktur mit einer **jährlichen Periodizität**. In der Solareinspeisung können wir klar erkennen, dass im Sommer wesentlich mehr Solarenergie eingespeist wird, als im Winter. Beispielsweise wurde im Januar und Dezember bisher immer jeweils weniger als 1 TWh Solarstromproduziert, während in den Sommermonaten der letzten Jahre immer mehr als 5 TWh (also über 400% mehr) Solarstrom erzeugt wird. Vor dem Hintergrund, dass in Deutschland im Sommer tendenziell weniger Strom verbraucht wird als im Winter, ist dies keine systemdienstliche Eigenschaft. In einem Energiesystem, welches überwiegend auf die Solarenergie in Deutschland setzt, müsste folglich riesige Speicherkapazitäten erschlossen werden, die Solarstrom aus den sonnenreichen Monaten für die sonnenarmen Monate speichern können; oder alternativ eine sehr große Überkapazität an Solaranlagen erschlossen werden, sodass auch im Winter der Bedarf gedeckt werden kann. Allerdings, sind beide Varianten sehr unwirtschaftlich. Bei der Windenergie sieht die Situation etwas systemfreundlicher aus. So gibt es in den Wintermonaten tendenziell mehr Windenergieeinspeisung, als in den Sommermonaten. Allerdings ist auch die Volatilität (bzw. die Schwankung) in der Einspeisung höher, als in den Sommermonaten. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die Stromnachfrage in Deutschland nicht so stark schwankt, wie die Windenergieeinspeisung. Somit wäre bei einem Energiesystem, welches nur auf Windenergie setzt, ein Engpass im Sommer zu erwarten. Folglich ist es sinnvoll aus der einfachen Überlegungen bzgl. der jährlichen Schwankungen in der Stromerzeugung und Nachfrage Wind- und Solarenergie zu kombinieren. Allerdings, sollte aus den erwähnten Gründen die Windenergie den Hauptanteil decken. Zu beachten ist, dass wir hier bisher die Kosten ausklammern.

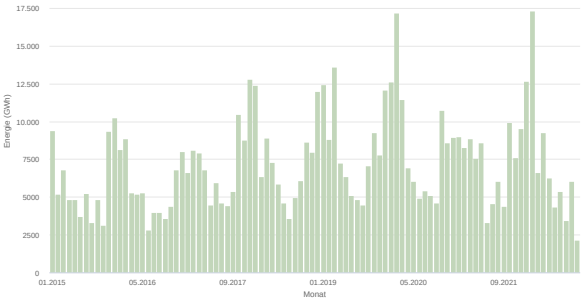
Zuletzt schauen wir in der Abbildung 72 auf die Graphen 72e und 72f. Wir sehen die tägliche Einspeisung von Wind und Solarenergie. Wir erkennen, dass es Tage im Jahr gibt, an denen nur ein sehr kleiner Teil an Wind- und Solarenergie ins Netz eingespeist wird. Für ein Energiesystem, welches überwiegend auf Wind- und Solarenergie setzt, ist dies eine kritische Situation; insbesondere dann, wenn eine solche Situation mehrere Tage in Folge auftritt. Bei einer meteorologischen Situation, bei der mehrere Tage in Folge eine nur sehr



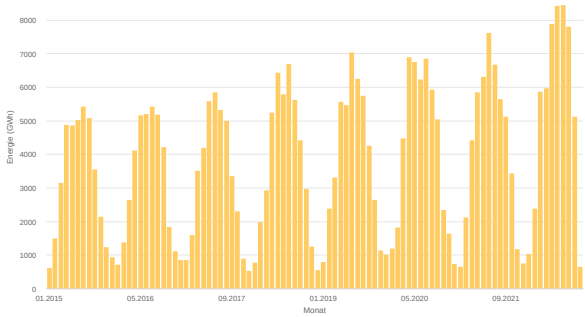
(a) Einspeisung von Windenergie: Jährlich



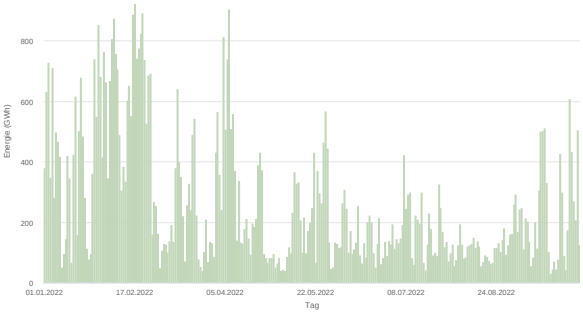
(b) Einspeisung von Solarenergie: Jährlich



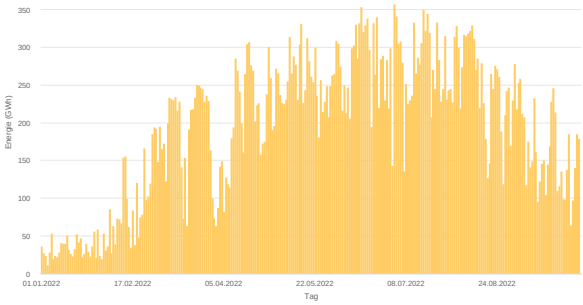
(c) Einspeisung von Windenergie: Monatlich



(d) Einspeisung von Solarenergie: Monatlich



(e) Einspeisung von Windenergie: Täglich (2019)



(f) Einspeisung von Solarenergie: Täglich (2019)

Abbildung 72: Produktion von Wind- und Solarenergie mit unterschiedlicher Zeitlicher Auflösung, Quelle: Energy-Charts

geringe Menge an Wind- und Solarenergie produziert werden kann, spricht man von einer **Dunkelflaute**. Der Begriff ist allerdings nicht scharf definiert. In Deutschland geht man davon aus, dass Dunkelflauten durchaus ca. 14 Tage andauern können. Ein Energiesystem muss also für diesen Zeitraum die Versorgungssicherheit durch entsprechendes Backup (Speicher, Backup-Kraftwerke, Importe) sicherstellen können.

In der Abbildung 73 ist die Stromproduktion in Deutschland für den Januar 2017 dargestellt. Wir sehen, dass es in der ersten Januarhälfte zwei stürmische Phasen gab, an denen sehr viel Windenergie produziert wurde, und der Börsenstrompreis teilweise negative Preise annahm. Jedoch war vom 16.Januar bis zum 25.Januar nur sehr wenig Energie aus Wind- und Solar produziert worden, so gab es eine 10-tägige Dunkelflaute. Entsprechend viele Spitzenlastkraftwerke (insb. Gaskraftwerke) waren an der Stromversorgung beteiligt. Der Day-ahead-Strompreis war in diesem Zeitraum teilweise sehr hoch, in den Peak-Stunden teils kontinuierlich über 100 EUR/MWh. In der Literatur wird teilweise auch der spezielle Begriff der kalten Dunkelflaute verwendet. Hierbei geht es um die Tage mit sehr niedriger Wind- und Solarenergieproduktion, die zusätzlich sehr kalt

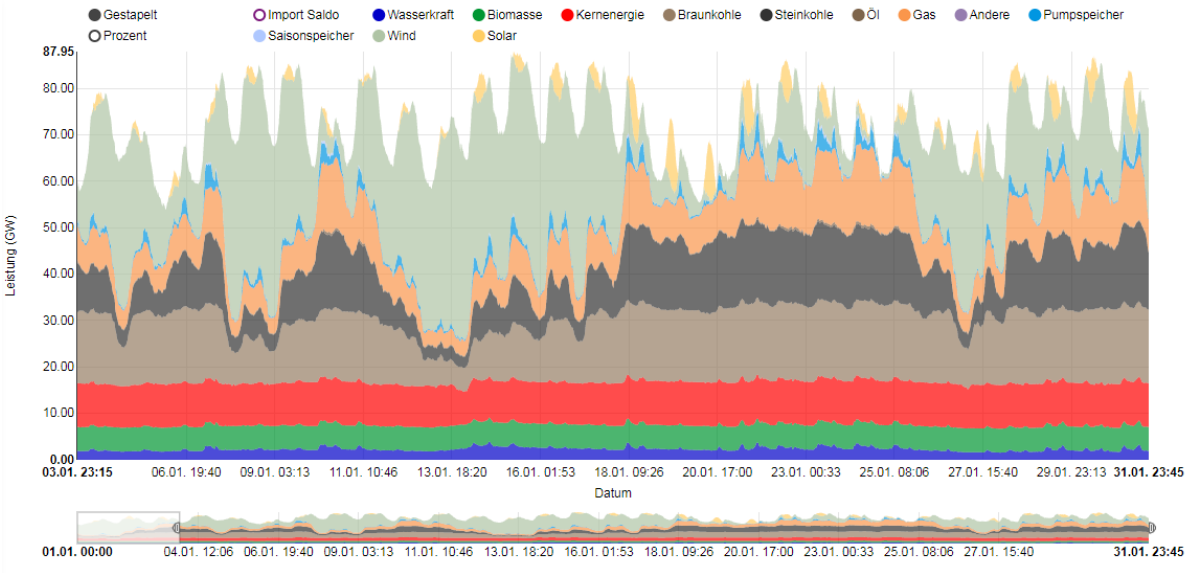


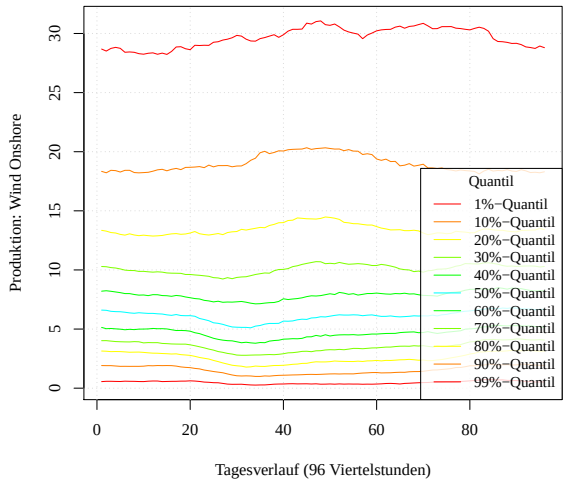
Abbildung 73: Stromproduktion nach Energieträgern in Deutschland im Januar 2019

sind. Letzteres führt in Mitteleuropa zu einem steigenden Stromverbrauch, weswegen jene Situationen als noch kritischer betrachtet werden. Allerdings treten Dunkelflauten in Deutschland generell in den kalten Monaten auf, in denen es wenig Solarstromeinspeisung gibt.

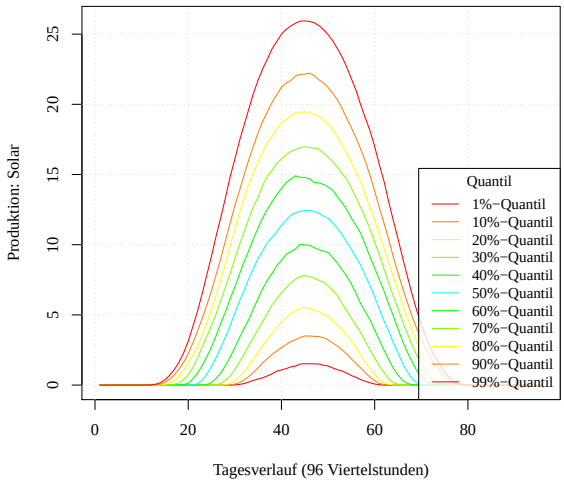
Wir haben bereits ein erstes Gefühl für die saisonale Schwankung der Wind- und Solarenergieeinspeisung bekommen. Nun wollen wir uns detaillierter die **täglichen Einspeiseprofile** anschauen. Jene sind in der Abbildung 74 für die 1%-, 10%-, 20%-, ..., 90%-, 99%-Quantile dargestellt. Zuerst betrachten wir das Solarprofil, 74b. Wir sehen deutlich, dass nachts kein Solarstrom eingespeist wird. Tags über wird jedoch relativ viel Strom in das Netz eingespeist. Zwischen 10 und 13 Uhr wurde im betrachteten Zeitraum im Median (50%-Quantil) bereits mehr als 10GW eingespeist, welches über dem Median der Windsromeinspeisung liegt. Da wir tagsüber tendenziell mehr Strom verbrauchen als nachts, ist ein gewisser Anteil an Solarenergie durchaus dem Energiesystem als dienlich anzusehen, mit Bezug auf dass tägliche Profil. Allerdings gilt das nur für jenen Anteil der genutzt wird, um die täglichen Lastspitzen abzudecken. Bei der Solarenergie wirken sich allerdings auch die jährlichen Saisonalitäten auf das tägliche Profil aus. Wir sprechen von einer Interaktion zwischen den Saisonalitäten. So ändert sich das tägliche Einspeiseprofil im Laufe des Jahres, vor allem weil sich der Sonnenaufgang und Sonnenuntergang verschieben. In den Sommermonaten Juni und Juli (vgl. Abb. 74f) werden zur Mittagszeit mit 99%-tiger Wahrscheinlichkeit über 9 GW eingespeist, während in den Wintermonaten Dezember und Januar nur 0.5GW sind. Das Solareinspeiseprofil hängt aber nicht nur von der Jahreszeit ab, sondern auch von der geographischen Position. Je weiter nördlich die Anlage aufgestellt ist, desto stärker sind die jährlichen Schwankungen. Zusätzlich gibt es einen gewisse Ost-Westverschiebung bei den Anlagen, denn in Ostdeutschland an der Grenze zu Polen geht Sonne ca. 30 Minuten früher auf und unter als auf dem gleichen Breitengrad an der Westgrenze zu den BeNeLux-Staaten. Natürlich sind auf europäischer Ebene die genannten europäischen Schwankungen noch größer.

Für die Windenergie können wir keine klaren täglichen Profile erkennen. Im Sommer ist jedoch ein gewisses Abschwächen der Einspeisung morgens und Abends um den Sonnenaufgang und Sonnenuntergang zu beobachten. Allerdings kann man feststellen, dass die Saisonalität einer einzelnen Windturbine stark von Standort, also auch der Nabenhöhe

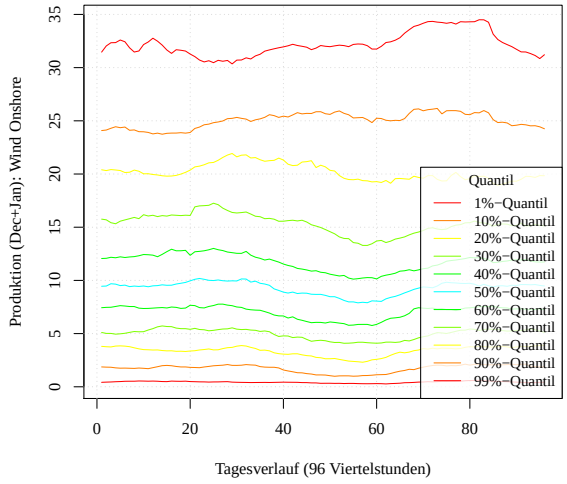
der Windkraftanlage abhängt.



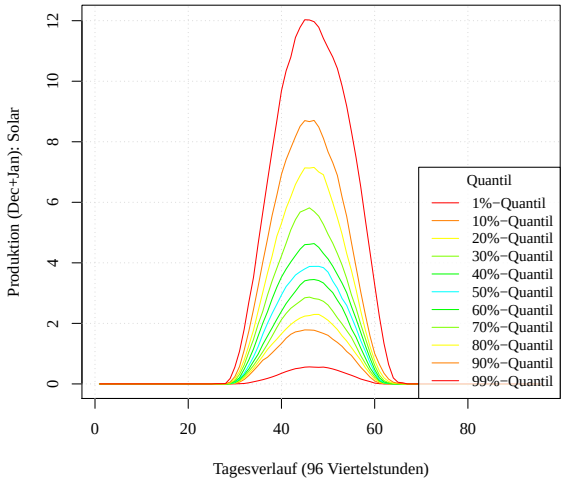
(a) Durchschnittliches Windeinspeiseprofil



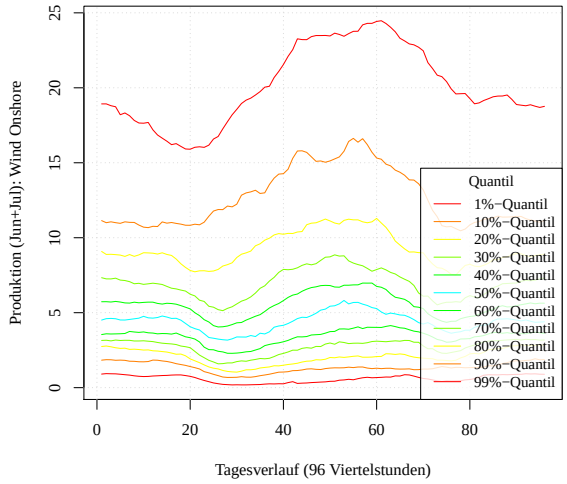
(b) Durchschnittliches Solareinspeiseprofil



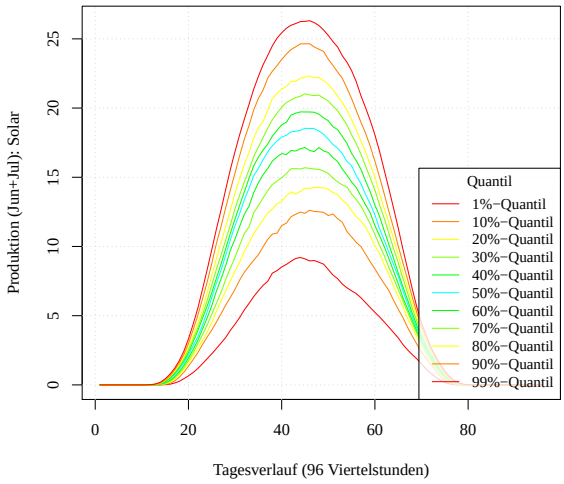
(c) Windeinspeiseprofil für Dezember und Januar



(d) Solareinspeiseprofil für Dezember und Januar



(e) Windeinspeiseprofil für Juni und Juli



(f) Solareinspeiseprofil für Juni und Juli

Abbildung 74: Tägliche Einspeiseprofile in GW von Onshore-Wind- und Solarenergie im Zeitraum von Dezember 2014 bis Januar 2018 für verschiedene Quantile.

Wir haben einige saisonale Charakteristika von der Wind- und Solarenergie kennengelernt. Wenn wir in einem Energiesystem jedoch beide Komponenten betrachten, ist es auch wichtig auf die statistischen Zusammenhänge zu achten. In der Abbildung 75 ist ein Scatterplot mit der Wind- und Solarstromeinspeisung dargestellt. Wir beobachten, dass es Zeitpunkte gibt, in denen in der Summe nahezu kein Strom aus Wind- oder Solarenergie ins Netz eingespeist wird. Andererseits gibt es Zeitpunkte in denen knapp 50 GW in das Netz eingespeist wurden. Diese Spitzen treten vor allem dann auf, wenn Wind und Solarenergie ins Netz eingespeist wird. Insgesamt haben die (viertelstündliche) Wind- und Solarenergieeinspeisung eine empirische Korrelation von -0.16. Diese negative Korrelation ist positiv für die Systemdienlichkeit, denn es gilt, vereinfacht gesagt, dass wenn keine Sonne scheint, dann ist es tendenziell windig.

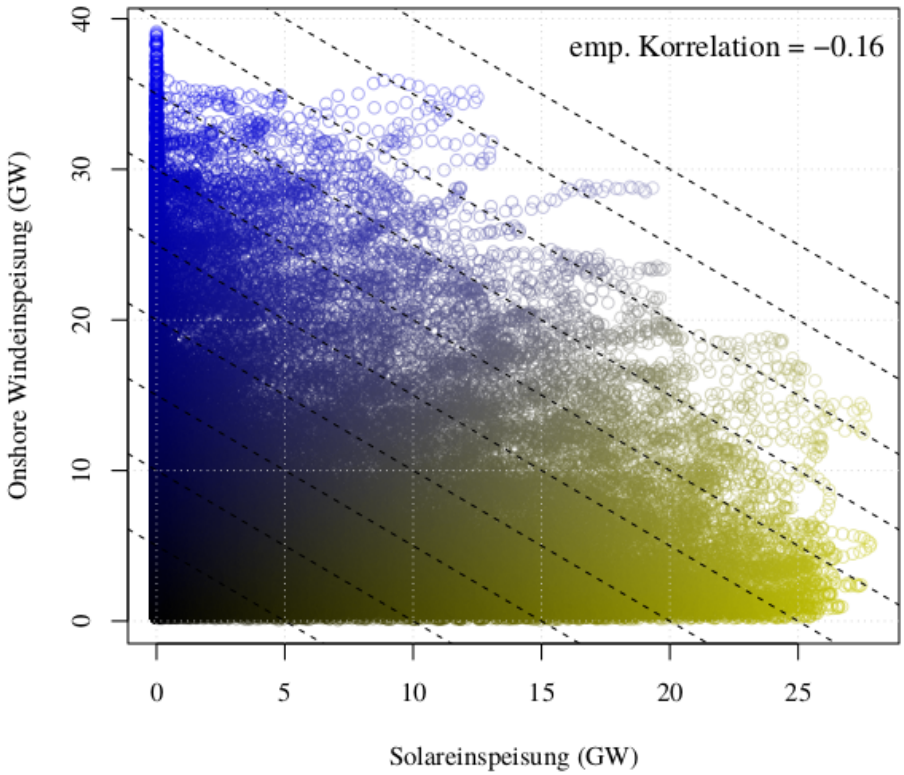
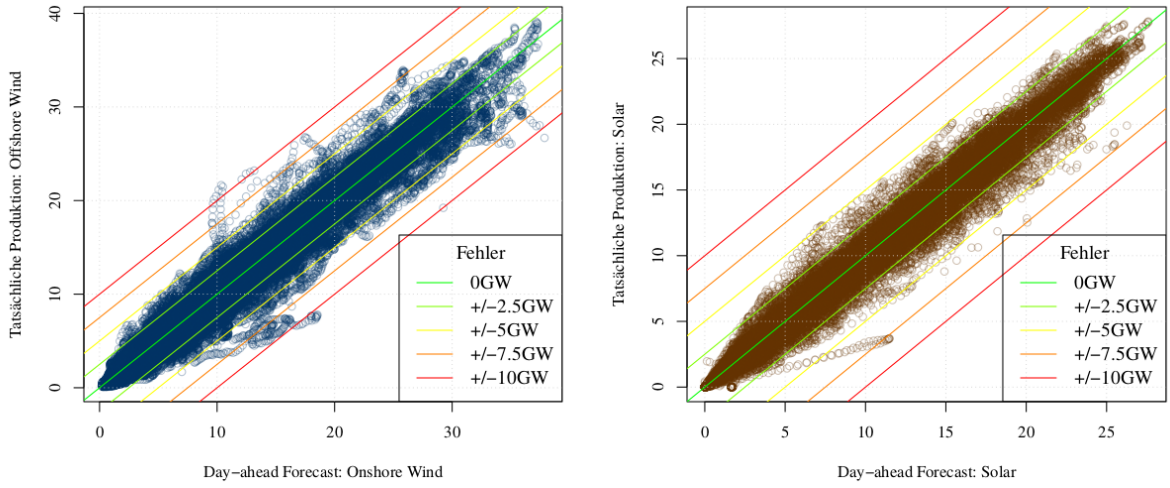


Abbildung 75: Stromproduktion von Onshore Windenergie und Solarenergie im Zeitraum von Dezember 2014 bis Januar 2018

Wir haben uns viele Charakteristika über die schwankende Einspeisung von Wind- und Solarenergie gemacht. Im Energiesystem muss mit diesen Schwankungen umgegangen werden. Ein wesentliches Instrument zur Planung der Produzenten und Konsumenten von Strom ist der bereits behandelte day-ahead Markt. Da dort der Strom jeden Tag um 12:00 ME(S)Z für den Folgetag gehandelt wird, müssen die Marktteilnehmer die Einspeisung von Wind- und Solarenergie möglichst gut antizipieren, bzw. prognostizieren. Hierfür sind die sogenannten Day-ahead-Prognosen von hoher Relevanz. Für Vermarkter von Wind- und Solarstrom ist vor allem die Prognose von der Einspeisung der eigenen Anlagen von Relevanz. Auf Grund des Merit-Order-Effektes, spielt jedoch die Einspeisung von Wind- und Solarenergie für die gesamte Gebotszone (DE+AT) eine wichtige Rolle. In Deutschland sind die Übertragungsnetzbetreiber, welche einen großen Anteil des mit einer festen Einspeisevergütung geförderten Wind- und Solarstrom vermarkten, gesetzlich verpflichtet, ihre Prognosen (und folglich auch ihre Gebote) zu veröffentlichen.

Neben den Day-Ahead Prognosen werden auch die tatsächliche Wind- und Solarproduktion veröffentlicht. Diese Prognosen werden wir nun genauer betrachteten. Dabei merken wir an, dass davon auszugehen ist, dass andere Marktteilnehmer über ähnlich genaue Prognosen für ihr tägliches Risikomanagement besitzen.

In der Abbildung 76 sehen wir zwei Scatterplots, in denen die Day-ahead-Prognose dem tatsächlichen Wert gegenübergestellt ist. Wir sehen, dass meistens die Prognose sowohl für die Wind- als auch die Solarenergie relativ gut ist. In der Regel ist die Abweichung kleiner als 5 GW. Bei der Windenergie ist der Prognosefehler (definiert als tatsächliche minus prognostizierte Einspeisung) tendenziell am größten, teils über 10 GW; allerdings wird auch deutlich mehr Wind- als Solarenergie eingespeist. Während bei der Windenergie große Prognosefehler sowohl durch Überschätzen, als auch durch Unterschätzen der tatsächlichen Einspeisung entstehen, ergibt sich bei der Solarenergie ein anderes Bild. Hier treten die größeren Prognosefehler (¿ 5GW) nur durch Überschätzen der tatsächlichen Einspeisung auf, d.h. es wurde mehr Solarstrom prognostiziert, als produziert. Solche Fehleinschätzungen haben natürlich auch auf dem Strommarkt, insbesondere dem Intraday-Markt Konsequenzen und werden in der Übung detaillierter studiert. Generell müssen wegen den Fehleinschätzungen Backup Kapazitäten einspringen, d.h. hinreichend flexible Kraftwerke, Speicher oder Importe zur Verfügung stehen und genutzt werden. Durch den zunehmenden Ausbau von Wind- und Solarenergie wird der Prognosefehler generell größer werden, es sei denn die Prognosen werden besser oder die räumliche Diversität der Anlagen nimmt zu.

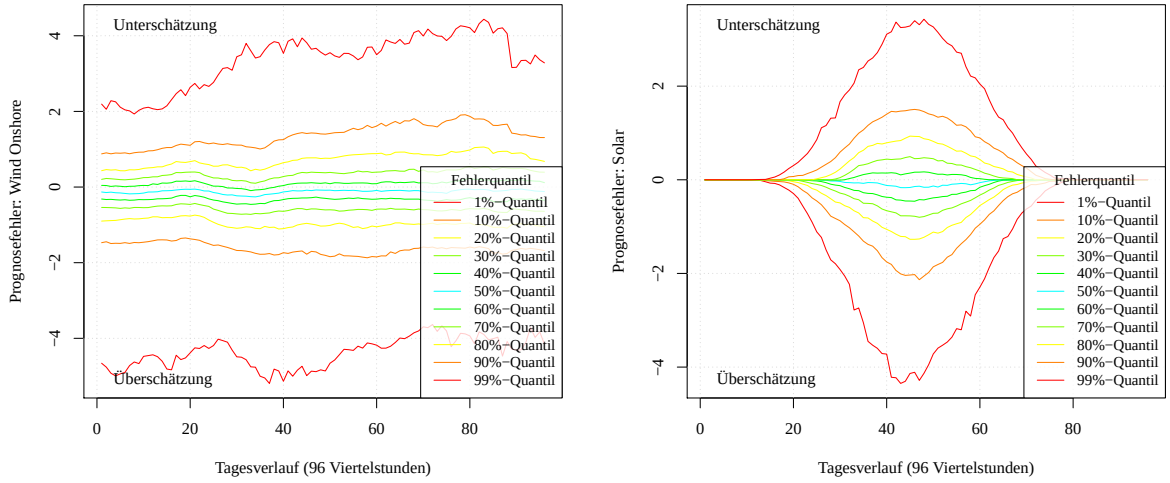


(a) Wind (b) Solar

Abbildung 76: Scatterplot der Day-ahead-Prognose von Onshore Wind- und Solarenergie sowie der tatsächlich realisieten Einspeisung in GW im Zeitraum von Dezember 2014 bis Januar 2018 mit absoluten Fehlerbändern.

Für die Wind- und Solarenergieeinspeisung, betrachteten wir ausführlich das tägliche Einspeiseprofil. Ähnlich können wir nun die täglichen Fehlerprognoseprofile der Abbildung 77 studieren. Für den Solarprognosefehler (vgl. Abb. 77b) sehen wir wieder, dass nachts kein Prognosefehler vorliegt. Im Gegensatz dazu ist der Prognosefehler zur Mittagszeit am größten. Wir sehen auch, dass die Solarproduktion eher systematisch leicht überschätzt wird. So liegt insbesondere auch der Median relativ deutlich im negativen Bereich. Bei dem Windprognosefehler (vgl. Abb. 77a) sieht bzgl. der systematischen Überschätzung ähnlich aus. Der Median des Prognosefehlers liegt in dem betrachteten Zeitraum zu jeder Viertelstunde des Tages im negativen Bereich. Allerdings, lässt sich auch hier ähnlich, wie

bei den Einspeiseprofilen für Windenergie kein eindeutiges und klares tägliches Muster zeichnen.



(a) Wind (b) Solar

Abbildung 77: Tägliches Profil des Day-ahead-Prognosefehlers von Onshore Wind- und Solarenergie im Zeitraum von Dezember 2014 bis Januar 2018 mit absoluten Fehlerbändern.

Zum Abschluss wollen wir die Beziehung zwischen dem Wind- und Solarprognosefehler betrachten, vgl. Abbildung 78. Dort sehen wir, dass die entsprechende Korrelation mit 0.03 sehr nahe der 0 ist und somit nur sehr schwach positiv. Somit sind die Fehler nahezu unkorrelliert. Das bedeutet, anders als bei der Wind- und Solareinspeisung, dass der statistische Zusammenhang nicht unbedingt systemdienlich ist. D.h. wenn es einen positiven Windprognosefehler gibt, dann ist ein positiver Solarprognosefehler in etwa so wahrscheinlich wie ein negativer.

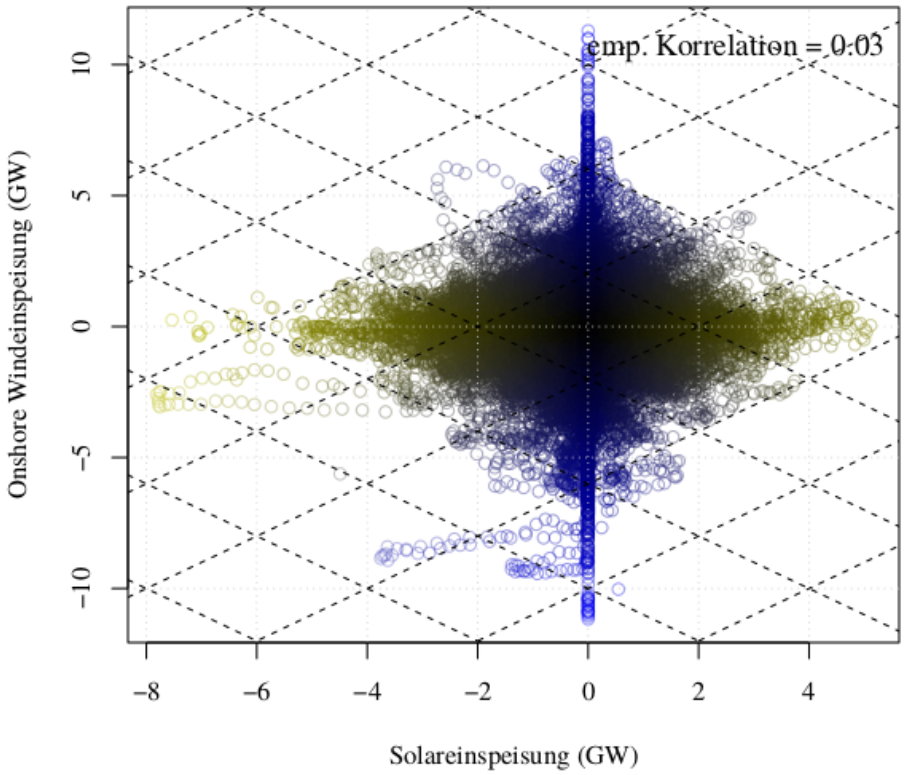


Abbildung 78: Prognosefehler von Onshore Windenergie und Solarenergie im Zeitraum von Dezember 2014 bis Januar 2018