

# 1 Einleitung

## 1.1 Energienutzung und Wachstum

“Allein, das Leben baut nichts auf, wozu es nicht die Steine anderswo ausbricht.”

Dieses Zitat von Robert Musil (1880-1942) aus seinem Hauptwerk *Der Mann ohne Eigenschaften* aus dem Jahr 1930,[316] kann als literarische Formulierung des *Prinzips von der Erhaltung der Energie* angesehen werden, das Max Planck (1858-1947) als ein Fundament der Naturwissenschaften ansah.[350] Dieses Prinzip folgt nach dem Noether-Theorem<sup>1</sup>, aus der Homogenität der Zeit, der *Zeittranslations-Invarianz*: [124] In einem abgeschlossenen System kann die vorhandene Energie nur umgewandelt, aber nicht erzeugt werden; das System nimmt von alleine einen Zustand maximaler Entropie an, gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik.

Das Sonnensystem ist aus unter der eigenen Schwerkraft kollabierten Resten von Supernova-Explosionen entstanden (s. Anhang A.1.1).[478] Mit der Masse bzw. Energiemenge ist die Lebensdauer der Sonne bereits festgelegt. Auf der Erde sind alle Elemente seit ihrer Entstehung vorhanden, damit auch die maximale Menge der nutzbaren Energie.

Wird das Ökosystem der Erde als Teilbereich des Universums verstanden, so ist es offen in Bezug auf arbeitsfähige Energie, die von der Sonne eingestrahlt wird.[95] Das Prinzip der Energieerhaltung scheint in der Erfahrungswelt des Menschen keine unmittelbare Auswirkungen zu haben. Für ihn scheint die Sonne “unendlich lange” ohne sich merklich zu verbrauchen und ist somit eine regenerative Energiequelle.

Alles Leben im bekannten Teil des Universums basiert auf Kohlenstoff. Das lateinische Wort für Lebewesen, *animal* (*n*), leitet sich vom griechischen Wort *άνεμος* für Wind, Lufthauch, Atem, ab. Metonymisch wird damit etwas bezeichnet, das einen Atem, einen *Lebensodem*, hat. Lebewesen haben einen Stoffwechsel, in dem hauptsächlich organische, also kohlenstoffhaltige Substanzen umgewandelt werden.[496] Mit Hilfe dieser Energie wird z.B. bei der Photosynthese das aufgenommene Kohlendioxid,  $CO_2$ , der Atmosphäre zu Kohlenstoff, *C*, *reduziert*: Elektronen werden aufgenommen. Ein Teil des reduzierten Kohlenstoffs wird im Pflanzengewebe als Energiespeicher eingebunden. Er nimmt damit teil am *Kohlenstoffkreislauf der Erde* (s. Anhang A.3), der mitverantwortlich ist, dass gemäßigte Temperaturen auf der Erde herrschen und sie sich auf ihrer Umlaufbahn noch für mindestens 500 Mio. Jahre in einer habitablen Zone befindet (s. Anhang A.2.1).[482]

Ein anderer Teil des Kohlenstoffs wird zur Energiegewinnung oxidiert. Durch diese Nutzung wird die Energie zu einer niedrigeren Form, der Wärmeenergie, abgewertet.[209]

Allgemein gilt, dass die in einer Menge Materie enthaltene Energie  $E = mc^2$  nicht vollständig in nutzbare Energie (Exergie) umgewandelt werden kann. Hierbei ist der

---

<sup>1</sup>Nach Emmy Noether (1882-1935): Jede kontinuierliche Symmetrie (Invarianz unter einer Operation) führt zu einer Erhaltungsgröße (Größe, die zeitlich konstant ist).[124, 411]

Masseverlust durch die Energienutzung  $\Delta m = \Delta E/c^2$  aufgrund des großen Proportionalitätsfaktors,  $c^2 \approx 9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2$  verschwindend gering. Der nicht nutzbare Anteil wird als Anergie an die Umgebung abgeben und als *Verlust* empfunden.[209] Die Moleküle der genutzten Materie sind danach weiterhin vollständig vorhanden, aber die Entropie hat zugenommen.[397] Erwin Schrödinger (1887-1961) prägte dafür den Ausdruck, das *Leben ernähre sich von negativer Entropie*.[408]

Bei der Umwandlung von mehr als der zum Leben notwendigen Energie kann der Überschuss in die Weiterentwicklung investiert werden. Der größte Energieverbraucher des menschlichen Körpers ist das Gehirn, das rund ein Fünftel aller Energie verbraucht, bei einem Gewichtsanteil  $< 2\%$ .[423] Entwicklungsgeschichtlich konnte eine bedeutende Größenzunahme des Gehirns festgestellt werden, als es den Vorfahren der heutigen Menschen (hominini) durch Beherrschung des Feuers gelang, durch Kochen den Exergieanteil der Nahrung zu erhöhen. Durch Einsatz von Energie wurde das bessere Aufschließen der Nahrung sozusagen außerhalb des Körpers verlegt.[114]

Als Referenzwert für den menschlichen Energieverbrauch kann man den Energiebedarf pro Zeit aus Nahrungsmitteln ansehen. Er beträgt ca. 2000 kcal/Tag  $\approx 8,3 \text{ MJ/Tag} \approx 2,3 \text{ kWh/Tag}$ , oder, je nach Autor, 2500 kcal/Tag, entsprechend 10,5 kJ bzw. 2,9 kWh.[497] Im Jahr 2013 produzierte die Landwirtschaft weltweit übrigens 2786 kcal pro Person und Tag - niemand hätte Hunger leiden müssen,[263] obwohl das Agrarjahr 2012/13 das erste im Jahrzehnt war (2018/19 war das zweite), das den Bedarf nicht decken konnte.[80]

Nach obigen Annahmen *leistet* der Mensch ca. 100 bis 121 W.[22, 497] Ein ruhender Mensch erzeugt etwa 80 bis 100 W Stoffwechselwärme.[392, 497] Überschüssige Energie kann wiederum in den Aufbau von Wohlstand und Zivilisation investiert werden. Der Gesamtenergiebedarf pro Zeit eines Jägers und Sammlers war etwa dreimal so hoch, der eines sesshaften Ackerbauern schon siebenmal so hoch (0,6 kW). In Deutschland betrug der Energieverbrauch pro Kopf und Jahr im Jahr 1400  $\approx 1,2 \text{ kW}$ , im Jahr 1900  $\approx 3,6 \text{ kW}$  und 1990  $\approx 6,5 \text{ kW}$ .[497] Deutschland liegt damit im Durchschnitt der Industrieländer. Zum Vergleich verbrauchen die USA 12 bis 13 kW.[22]

Setzt man den höheren Energieverbrauch, 2500 kcal/Tag bzw. 10460 kJ/Tag, in Beziehung zum Primärenergieverbrauch in Deutschland, so ergibt sich für das Jahr 2016<sup>2</sup> 13.451 PJ bzw. 3.736 PWh. Bei 82,52 Mio. Einwohnern entspricht dies 163 GJ oder 45,3 MWh pro Einwohner und Jahr.[432, 463] Das ergibt eine mittlere Leistung von 5,12 kW. Mit dem höheren Leistungswert von 121 W für einen Menschen, ergibt sich, dass in Deutschland der 42,6-fache des physiologischen Energiebedarfs in Anspruch genommen wird.

Der Verbrauch elektrischer Energie betrug 2016 nach vorläufigen Zahlen 516 TWh.[464] Jeder Bundesbürger hat damit einen durchschnittlichen Stromverbrauch von 6,25 MWh. Das ergibt eine Leistung von 712 W, sechsmal mehr als der physiologische Bedarf.

Für diese Beispielrechnung von Beck und Bengler aus dem Jahr 2009 wurden aktuellere Zahlen verwendet. Bemerkenswert ist, dass die Autoren damals diese Zahlen nicht als Zeichen für eine Energieverschwendung sahen, sondern nur als "Verdeutlichung der Bedeutung einer gesicherten Energieversorgung für das Leben der Menschen in hoch entwickelten Industrieländern der Erde".[22]

Hier wird der Energieverbrauch einfach als energiepölitisches und gesellschaftliches Problem gesehen und der Energiewirtschaft kommt dann lediglich die Aufgabe zu, die

---

<sup>2</sup>2016 war ein Schaltjahr

bereitzustellende Energie dem steigenden Wohlstand (sprich: Verbrauch) anzupassen, idealerweise möglichst *wirtschaftlich*, also *kostengünstig*.

Eine Eigenschaft fossiler Energieträger ist ihre hohe und konstante Energiedichte. Eine Steigerung der Energieerzeugung ist mit proportional gesteigertem Umsatz verbunden. Weiterer Fortschritt ist dann nur über Effektivitätssteigerungen möglich. Frühe Innovationen waren die *Delegation* von Arbeitsleistungen an Tiere, später an Maschinen oder die Entwicklung hierarchischer Gesellschaftsstrukturen, in denen die Herrschaften den erarbeiteten Energieüberschuss nutzen konnten.[99]

Praktisch die ganze Menschheitsgeschichte hindurch gab es nur stationäre, also nichtwachsende Ökonomien,[99] solange man auf nachwachsende Rohstoffe angewiesen war. Mit Nutzung der fossilen organischen Energieträger, die im Wesentlichen aus photosynthetisch erzeugten Kohlenwasserstoffen bestehen,[392] konnte ab dem 18. Jahrhundert deutlich mehr Energie für das Wachstum von Wohlstand eingesetzt werden. Die menschliche Gesellschaft hat sich seitdem auf Wachstum ausgerichtet, was zivilisationsgeschichtlich ein Sonderfall darstellt.[99]

Die Bewahrung des aktuell erreichten Wohlstandes ist allerdings nicht das Primärziel der Wachstumsgesellschaft. Allgemein steigen die Ansprüche. Der Satz *Unseren Kindern soll es später einmal besser gehen*, die sog. *bescheidene europäische Version des amerikanischen Traums*,[132] ist einerseits Antrieb zum Fortschritt, “veredelt aber auch die Gier nach mehr” durch die vermeintliche Selbstlosigkeit und “weicht das Wachstum mit höheren Zwecken”. [456] Die führenden Vertreter der Nationalökonomie des beginnenden Industriezeitalters wie Adam Smith (1723-1790), David Ricardo (1772-1823) oder John Stuart Mill (1806-1873) gingen keineswegs von einer zwingenden Verknüpfung von Marktwirtschaft und Wachstum aus.[99] Selbst noch der sog. *Vater der sozialen Marktwirtschaft*, Ludwig Erhard (1897-1977), lehnte Wirtschaftswachstum als vorrangiges politisches Ziel ab. Seit Karl Schiller (1911-1994) im Jahr 1967 (erste Wirtschaftskrise in Deutschland seit Beginn des “Wirtschaftswunders”) das *Gesetz zur Förderung der Stabilität und des Wachstums der Wirtschaft* formulierte, ist Wachstum praktisch *staatlich verordnet*. [401] Es wird als zwingend notwendig für den Erhalt der Industriegesellschaft und damit des Wohlstandes empfunden. Mit Wachstum ist die Vorstellung verbreitet “alle profitierten vom wachsenden Kuchen.” [401] Man befindet sich also in einer hedonistischen Treitmühle: “Wenn etwas gut ist, dann ist mehr davon besser” [40]. Der bisher erreichte Wohlstand wird nur noch als *normal*, als *Standard* empfunden.[99] “Es scheint ein Naturgesetz geworden zu sein, dass in den Konsumgesellschaften der wohlhabenden Ländern *alles für jeden zu jeder Zeit* verfügbar sein muss.” [168]

Im Zweifelsfall bemisst sich der Fortschritt über einen sinkenden Preis, der meist sehr viel geringer ist, als die tatsächlichen Kosten, die häufig der Allgemeinheit bzw. vor allem der Natur aufgelastet werden, bei der man von einer unendlichen Aufnahmefähigkeit für die “Umwandlungsprodukte” einer konsumorientierten Lebensweise auszugehen scheint.[99, 114, 444] Dies führt zu einem weiteren Problem, dem *Erfolg der Zivilisation*: Das Wachstum durch immer mehr bereitgestellte Energie führt sehr häufig zu einer meist irreversiblen Schädigung der natürlichen Umwelt. Dies wird in der Regel nicht als gravierendes Problem gesehen: Was Menschen innerhalb Ihrer Lebensspanne erfahren, betrachten sie als Normalität. Umweltforscher bezeichnen dies als *Shifting Baseline Syndrome*: Selbst dramatische Änderungen werden so kaum wahrgenommen, wenn sie außerhalb der eigenen Erfahrungswelt oder Lebenszeit liegen.[131]

Nur ein kleiner Teil der Weltbevölkerung kann es sich leisten, verschwenderisch mit der

Energie umzugehen. Dabei wird Raubbau an den natürlichen Ressourcen betrieben. Dieser wird nach der traditionellen Wirtschaftslehre als *Gewinn* gewertet, da Naturzerstörung derzeit nichts kostet.[99, 165] Beispielsweise bleibt der gesellschaftliche Nutzen von Wäldern, die  $CO_2$  absorbieren und die Biodiversität erhalten, im Brutto-Inlands-Produkt unberücksichtigt.[165]

Die Karbonisierung der Biomasse, also die Steigerung des Kohlenstoffanteils durch Verdichtung und chemische Umwandlung, dauert unter normalen Bedingungen 2 bis 65 Mio. Jahre (siehe Anhang B.), ist also nicht regenerativ im menschlichen Zivilisationshorizont.[392] Die moderne Gesellschaft verfeuert pro Jahr das geologische Bildungsäquivalent von etwa 5 Mio. Jahren für Erdöl, 3 Mio. Jahre für Erdgas und 10.000 Jahre für Kohle.[392]

Der größere Teil der Bevölkerung muss, nach Thomas Malthus (1766-1834), jetzt schon "einsehen", dass der „Tisch eben nicht für alle gedeckt ist“. Colin Campbell bezeichnet die moderne Landwirtschaft als *Umwandlung von Öl in Nahrung*. [138] Im Jahr 2050 wird es voraussichtlich neun Milliarden Menschen geben.[241] Viele Länder sehen einen Nachholbedarf in der Industrialisierung.[226, 392] Das bedeutet in einer auf Wachstum ausgerichteten Industriegesellschaft steigenden Energieverbrauch.[401]

Schon 1972 sah eine im Auftrag des Club of Rome erstellte Studie die *Grenzen des Wachstums*. [297]

Unter den Bedingungen eines beständigen Wirtschaftswachstums  
ist es unmöglich, die Ökosphäre absolut zu entlasten.  
Nico Paech

## 1.2 $CO_2$ -Budget und Dekarbonisierung

Neben den lokalen Umweltzerstörungen aufgrund des Wachstums, ist die gravierendste, weil globale Veränderung der Umweltbedingungen, die Anreicherung von Kohlendioxid in der Umwelt, als Abfallprodukt der Nutzung organischer fossiler Energieträger. Dieses Kohlendioxid gelangt zusätzlich zu den natürlichen Mengen an Treibhausgasen (s. Anhang A.2.2) in die Atmosphäre und verursacht einen anthropogenen Klimawandel, der sich mehrheitlich negativ auf die Lebenssituation der Lebewesen des Planeten auswirkt (s. Kap. 3.2).

Es ist erdgeschichtlich eindeutig eine Korrelation zwischen der globalen Mitteltemperatur und der Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre nachgewiesen.[351, 392] Der Kohlenstoff, der über sehr lange Zeiträume der Biosphäre entzogen war, wird ihr durch die übermäßige Nutzung fossiler kohlenstoffhaltiger Energieträger durch den Menschen, sozusagen schlagartig, wieder zugeführt.[99, 392] Klimaskeptiker verweisen gerne auf frühere Erdzeitalter, als der  $CO_2$ -Gehalt deutlich höher lag und das Leben trotzdem prosperierte. Die negativen Auswirkungen ergeben sich daher auch nicht so sehr durch die absolute Menge des Kohlendioxids in der Umwelt, sondern durch die Geschwindigkeit des Konzentrations- und damit Temperaturanstiegs, der erdgeschichtlich einmalig ist. Hieran können sich die Lebewesen nicht so schnell anpassen. Schon moderatere Anstiegsraten der Konzentration von Treibhausgasen haben in vergangenen Zeitaltern mehrfach zu Massenaussterben geführt (s. Anhang B.1.2). Speziell die Gattung Mensch hat sich in ihrer Entwicklungsgeschichte nie mit höheren Werten der  $CO_2$ -Konzentration auseinandersetzen

müssen (s. Anhang B.2.1).[44] Die negativen Auswirkungen des Anstiegs der globalen Mitteltemperatur ergeben sich vor allem durch die Häufung lokaler Extremwetterlagen (s. Kapitel 3.2.2).

Ferner ist es möglich, dass durch eine fortschreitende Klimaerwärmung jenseits eines gewissen Kipp-Punktes durch nichtlineare Prozesse innerhalb weniger Jahrzehnte großskalige und irreversible Veränderungen im Klimasystem ausgelöst werden können. Dies kann sogar zu einem kompletten Außer-Tritt-Geraten des Klimasystems führen, was substanzielle Auswirkungen auf die Lebensgrundlagen eines Großteils der Lebewesen haben kann.[393]

Es wird vermutet, dass dieser Kipp-Punkt noch nicht erreicht ist, wenn man den Anstieg der globalen Temperatur auf weniger als 2°C, besser noch 1,5°C, im Verhältnis zur vorindustriellen Zeit begrenzt. Allerdings ist seit Beginn der Nutzung fossiler Energien ein Temperaturanstieg von 1,0°C schon eingetreten, s. Abb. 1.1, sodass nur noch wenig Spielraum besteht.[393]

Man nimmt an, dass sich eine menschliche Zivilisation nur aufgrund des vergleichsweise gleichmäßigen Klimas seit Ende der letzten Eiszeit ausbilden konnte.[404]

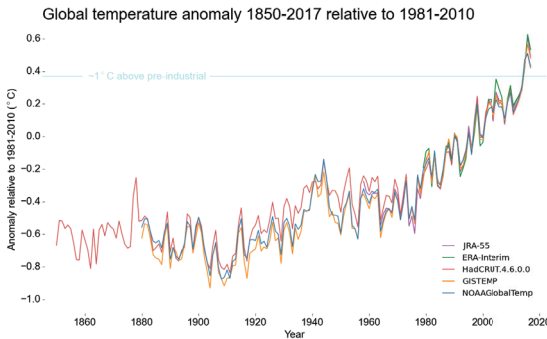


Abb. 1.1: Verlauf der Wetteranomalien 1850 bis 2017, verschiedene Reanalysen.[500]

Ein Paradigmenwechsel im Umweltbewusstsein einer breiteren Öffentlichkeit vollzog sich allerdings eher schleichend, beginnend mit den Ölkrisen der 70er Jahre und dem Waldsterben durch sauren Regen in den 80er Jahren. Veröffentlichungen zum Thema Energieverbrauch und regenerative Energien gaben trotzdem früher häufig die Endlichkeit der Reichweiten fossiler Energieressourcen als Grund an, die Energieversorgung nachhaltig umzugestalten, obwohl nur Öl und Erdgas binnen einer Generation zur Neige gehen.[392]

Im 1980 erschienen Buch *Energie-Wende* spielte das Kohlendioxid nur eine untergeordnete Rolle (s. Kap. 4.2.1).[243] Mittlerweile hat aber ein Umdenken eingesetzt: Das Problem der Endlichkeit der organischen fossilen Energieträger ist nur noch zweitrangig, wichtiger ist das Problem "ihrer exzessiven Nutzung".[392] Im Jahr 2007 wurde *Klimakatastrophe* Wort des Jahres.[139] Hans Joachim Schellnhuber formulierte 2015 treffend: "Das sich das historische Projekt Globale Hochzivilisation gegenwärtig immer tiefer in eine gefährliche Sackgasse hineinmanövriert, hat mit den galoppierenden Veränderungen der

Umweltbedingungen zu tun, die die Menschheit selbst zu verantworten hat, nicht so sehr mit der Endlichkeit der natürlichen Vorräte.“[392]

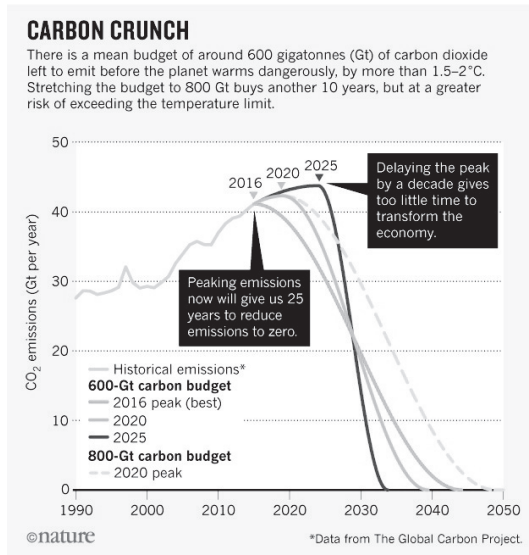


Abb. 1.2: Darstellung von möglichen  $CO_2$ -Reduktionen mit der Möglichkeit, das  $2^\circ C$ -Ziel zu erreichen, abhängig vom Startjahr. 1050 Mrd. Tonnen dürfen maximal erreicht werden. Bis 2017 gab es schon Emissionen von 600 Gt. Für eine Dekarbonisierung bis 2050 (mit dann 800 Gt) hätte die Emissionswende 2017 erreicht werden müssen.[117, 367]

Aus der Korrelation von globaler Mitteltemperatur und Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre kann man eine Gesamtmenge an Kohlenstoff abschätzen, die zum Einhalten des  $2^\circ C$ -Ziels nicht überschritten werden darf bzw. sollte, s. Abb. 1.2.[117] Es muss schnellstens damit begonnen werden, die gesamte Weltwirtschaft wirksam zu *dekarbonisieren*, um bei weiter wachsender Weltbevölkerung diesen Wert nicht zu überschreiten.

Diese *Dekarbonisierung* wurde im Juni 2015 beim G7-Gipfel in Elmau als einzig sinnvolle Perspektive identifiziert.[392] Sie sollte bis zum Ende des 21. Jahrhunderts geschafft werden. Diesem Zeitraum als mögliche Handlungsoption wird von Seiten der Wissenschaft widersprochen. Forscher halten bei konsequenter Umsetzung eine Dekarbonisierung bis 2050 für machbar.[202, 226] Robert Schlögl, vom Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion, schlägt deshalb anstatt Dekarbonisierung “Defossilierung” als präziseren Terminus vor.[48] Diese Sichtweise birgt die Gefahr, dass man damit nachwachsenden Rohstoffen, unabhängig von ihrer tatsächlichen Umweltverträglichkeit, eine Art Freibrief zur ungehemmten Energieausbeutung ausstellt.

Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, WBGU, bezeichnete 2014 den Klimaschutz als eine *condicio sine qua non* (notwendige Bedingung) für nachhaltige Entwicklung.[393]

Für heute erwachsene Menschen scheint ein Jahr 2100, in dem bei Verfehlung der Klimaziele äußerst starke Umweltauswirkungen zu spüren sein dürften, weit entfernt zu liegen. Allerdings haben die im Jahr 2018 geborenen Kinder eine durchschnittliche Lebenserwartung<sup>3</sup> von 78,8 Jahren (männlich) bzw. 83,8 Jahren (weiblich), bei linearer Interpolation, s. Abb. 1.3.[471]

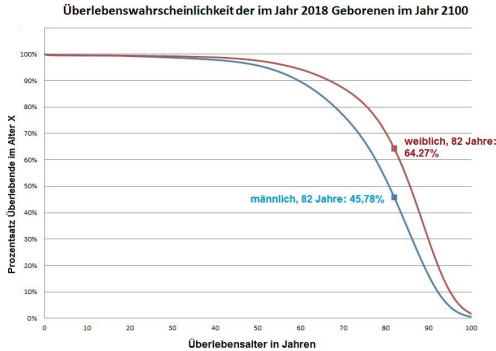


Abb. 1.3: Überlebenswahrscheinlichkeit der im Jahr 2018 geborenen Kinder für die nächsten 100 Jahre.[Eigene Darstellung mit Daten aus [431]]

Somit werden mit 45,8% der dann 82-jährigen Männer und 64,3% der Frauen nicht unerhebliche Anteile der 2018 geborenen Kinder das Jahr 2100 erleben.

Im Oktober 2018 veröffentlichte der *Weltklimarat*, IPCC, einen Zwischenbericht, wonach nur noch “drastische Maßnahmen” hülften, das 1,5°C-Ziel zu erreichen.[287, 407, 452]

Eine interdisziplinäre Studie von Mathematikern, Soziologen und Ökologen konnte zeigen, dass der Aufstieg und Kollaps von Zivilisationen immer wiederkehrende Prozesse sind. Als Beispiele wurden das römische Reich (509 v. bis 476: 133 v. bis 31 v. Bürgerkriege, 235 bis 285 Reichskrise) und die Dynastien von Han (206 v. bis 220), Maurya (320 v. bis 185 v.) und Gupta (320 bis 550) aufgeführt.[273] Es wurden fünf Risiko-Faktoren identifiziert: Bevölkerungswachstum, Klimawandel, Wasserversorgung, Landwirtschaftsentwicklung und Energieverbrauch. Sollten diese fünf Faktoren so zusammenwirken, dass zwei bestimmte Entwicklungen einsetzen, ist ein Kollaps unausweichlich:

1. Durch die Überlastung der Ökosysteme durch zu hohen Verbrauch der Ressourcen, bei
2. gleichzeitiger Aufspaltung der Gesellschaft in reiche Eliten und einen armen Rest.

Beim Untergang aller großer Hochkulturen haben beide Dynamiken eine zentrale Rolle gespielt. Aktuell sehen die Forscher beide Entwicklungen bereits als eingetretene an.[273] Dem häufig angeführten Gegenargument, eine gesteigerte *Ressourcen-Effizienz* durch technologischen Fortschritt könne diese Probleme lösen, wird von den Forschern widersprochen.

<sup>3</sup>Lebenserwartung: 50% der Bevölkerung erreicht das Alter

### 1.3 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Schon allein aus dem Namen des Drittmittelprojekts “Energieoptimierte Neubauten”, stellte sich vorab schon mal die Fragestellung: Reicht es eigentlich aus, Neubauten energetisch zu optimieren, um im Bausektor, als einen von den fünf vom IPCC genannten Bereichen (Energiesektor, Industrie, Landwirtschaft, Bau und Verkehr) den Beitrag zu den geforderten und notwendigen “drastischen Maßnahmen” (s.o.) [407, 452] zur Einhaltung des 1,5°- bzw. 2,0°C-Ziels zu erreichen? Neben den Optimierungen sollte auch den Bewohnern der Siedlung Ihre Verbrauchsdaten durch Smart Metering immer aktuell zur Verfügung gestellt werden. Dies sollte “zu einem bewussten Umgang mit der jeweiligen Energie” und *folglich* zu Einsparungen führen. [440] Hierbei muss allerdings hinterfragt werden, ob der im vorherigen Satz postulierte stringente Zusammenhang überhaupt besteht.

Ziemlich früh im Projekt wurde klar, dass das Benutzerverhalten der bestimmende Faktor war, d.h. selbst die ausgeklügelte Technik zur Energieeinsparung kann durch die Bewohner torpediert werden, sowohl bewusst, unbewusst als auch durch Gleichgültigkeit. Hier werden einige Aspekte beleuchtet.

Den Bürgern, die im Rahmen der *Globalisierung* viele ehemals staatliche soziale Sicherungssysteme selbst zu übernehmen haben und jetzt noch, quasi nebenbei, aktiv den  $CO_2$ -Ausstoß reduzieren sollen, wird häufig suggeriert, man könne die Probleme im Umfeld des Energieverbrauches mit Hilfe der *Digitalisierung* lösen: in diesem Projekt durch Einführung eines Smart Home-Systems - trotz des zu erwartenden geringen Energieeinsparpotentials.

Interessant hierbei ist, dass man unter *Digitalisierung* nicht die *Automatisierung* (d.h. ohne menschliche Eingriffe) sah, sondern im Gegenteil die Datenbereitstellung zur Beeinflussung und Steuerung durch den Menschen. Somit ist es angezeigt, auch die psychologischen und soziologischen Aspekte im Umgang mit Energie zu betrachten; laut VDI-Richtlinie 3780 umfasst Technik “die Menge menschlicher Handlungen und Einrichtungen, in denen Sachsysteme entstehen“ bzw. „in denen Sachsysteme verwendet werden“.[473]

Da schon im Förderungsantrag die geringe Effizienz dieser Maßnahmen vermutet wurde, werden diese anhand der selbstgesteckten Ziele, der Steigerung von Eigenverbrauchsquote und Autarkiegrad im Strombereich untersucht und mit den möglichen Reduzierungen eines automatisierten Photovoltaik-Speichersystems mit entsprechenden Ladestrategien verglichen. Letztendlich wird der Frage nachgegangen, ob der Mensch mit Technikunterstützung oder die Technik ohne menschlichen Eingriff die besseren Ergebnisse liefert.

### 1.4 Struktur der Arbeit

Nachdem Motivation und Zielrichtung der Arbeit einleitend beschrieben wurden, folgen zunächst eine Herleitung der Strahlungsbilanz und des Wärmehaushalts der Erde, womit der Treibhauseffekt erklärt werden kann. Die Treibhauseffekt wird in den natürlichen Anteil, der die Erde erst in einer habitablen Zone im Sonnenumlauf hält, und einen schädlichen anthropogenen Anteil aufgeteilt.

Dazu wird das Verhalten des Klimas unter den heutigen Bedingungen vorgestellt. Aus der Klimasensitivität kann man Projektionen und künftige Szenarien erstellen. Die



entsprechenden Simulationen wurden anhand der Klimageschichte der Erde, s. Anhang B, getestet.

Aus den physikalischen Parametern ergeben sich die Auswirkungen des Klimawandels. Ein Teil der Auswirkungen, wie die Erwärmung der Atmosphäre und die Erhöhung der Anzahl von Extremwetterereignissen, wird vorgestellt. Die Beschreibung anderer Auswirkungen wie Gletscherschmelze, Meeresspiegelanstieg und Meeresversauerung ist in den Anhang B.3 ausgelagert.

Da häufig von einer Klimaneutralität bei der Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien ausgegangen wird, stellt das nächste Kapitel den tatsächlichen  $CO_2$ -Fußabdruck für die Photovoltaik vor. Die Werte der anderen regenerativen Energieträger und -arten, sowie im Vergleich dazu die der fossilen Energieträger, finden sich im Anhang C.

Dann wird der Verlauf der bisherigen Energiewende vorgestellt, anhand des Energie-Einspar-Gesetzes, EEG, der Stromautobahnen und dem Kohleausstieg.

In den Kapiteln Photovoltaische Stromerzeugung und Akkumulator werden Parameter erarbeitet, um das Photovoltaik-Speicher-System des Projektes beurteilen bzw. simulieren zu können. Es wird die Größe und Ausrichtung des PV-Generators erörtert, der Sinn von Energiespeicherung in der Energiewende und die Lithium-Ionen-Technologie. Weitere Informationen, z.B. zu den Reichweiten des Rohstoffs und zu möglichen Alternativen sind im Anhang C.3 beschrieben.

Zur Vorbereitung der Optimierung mittels Simulation wird mit den gemessenen Daten ein eigenes Lastprofil erstellt und die möglichen Energie-Einspar-Potentiale und Alternativen betrachtet, die vor Ort bestehen. Dazu werden die einzelnen Verbraucher im Haushalt auf ihre Verwendbarkeit im Rahmen eines Smart Home-Systems geprüft und durchführbare Optimierungsmaßnahmen erörtert.

Anschließend wird das Konzept der Eigenstromversorgung vorgestellt. Die gemessenen Daten der vergangenen Jahre werden mit den theoretisch möglichen Werten verglichen.

Dazu werden Betriebsstrategien zur Steigerung des Eigenverbrauchs vorgestellt und analysiert. Anhand der gemessenen Daten werden mit den erarbeiteten Parametern Kennwerte wie Autarkiegrad und Abregelverluste unter realistischen Bedingungen simuliert, um die vorgestellte neue Betriebsstrategie hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit beurteilen zu können. Durch sukzessive empirische Approximation werden dabei die das System bestimmenden varianten und invarianten Parameter und Einflussgrößen im Hinblick auf die Optimierung des Eigenverbrauchs bzw. des Autarkiegrades identifiziert. Die erreichbaren Kennwerte werden vorgestellt, sowie auf die Vor- und Nachteile der Technik eingegangen.

Abschließend wird die neue Technik und die im Projekt durchgeführten Arbeiten auf ihre Klimaschutzwirkung beurteilt, indem die Einsparung mit dem persönlichen  $CO_2$ -Fußabdruck verglichen wird.

# 2 Strahlungsbilanz und Treibhauseffekt

## 2.1 Strahlungsbilanz

### 2.1.1 Solar-Strahlung

Regenerative Energien stehen alle direkt oder indirekt im Zusammenhang mit der Sonne, selbst die Erdwärme stammt, neben Anteilen aus der Zeit der Erdentstehung, von radioaktiven Elementen, die bei der Explosion früherer Sonnen im All verteilt wurden.[478]

Die Sonne befindet sich derzeit im Stadium eines Hauptreihensterns, das ca. 11 Mrd. Jahre dauern wird.[384] Sie gewinnt ihre Energie durch Kernfusionsprozesse, zurzeit durch Wasserstoff-Brennen, der Proton-Proton-Reaktion:

Pro Sekunde werden 564 Mio. Tonnen Wasserstoff in 560 Mio. Tonnen Helium umgewandelt. Dabei werden vier Protonen zu einem Helium-Kern,  ${}^4\text{He}$ , verschmolzen. Zunächst bildet sich aus zwei kollidierenden Protonen ein Deuteriumkern,  ${}^2\text{H}$ , wobei sich eines der Protonen in ein Neutron, ein Positron und ein Neutrino umwandelt. Mit einem weiteren Proton bildet der  ${}^2\text{H}$ -Kern unter Aussendung eines Protons einen  ${}^3\text{He}$ -Kern. Stoßen zwei davon zusammen, entsteht ein  ${}^4\text{He}$ -Kern und zwei Protonen werden freigesetzt. Der Massenverlust von 0,7% wird in Energie umgesetzt, gemäß der Einsteinschen Äquivalenz von Masse und Energie.[155] Die Sonne nimmt so ständig an Leuchtkraft zu.

Seit ihrer Entstehung hat die Sonne bereits 25-30% an Leuchtkraft hinzu gewonnen.[392] In 900 Mio. Jahren wird die Erde eine Oberflächentemperatur von mehr als  $30^\circ\text{C}$  gegenüber heute erreicht haben, was einen Grenzwert für höheres Leben darstellt.[384, 482] Bei einer Erhöhung der Temperatur von  $1/30^\circ\text{C}$  pro Jahrmillion kann man trotz endlichen Energievorrats der Sonne für die voraussichtliche Dauer der menschlichen Existenz auf der Erde von einer konstanten und unendlichen Energiequelle ausgehen.

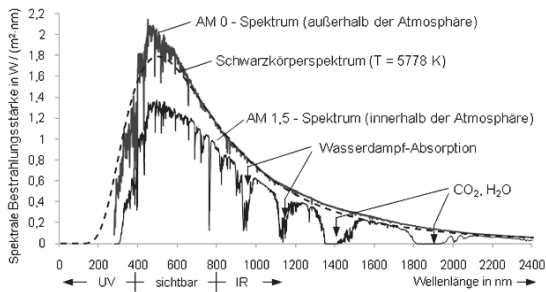


Abb. 2.1: Vergleich der extraterrestrischen spektralen Bestrahlungsstärke der Sonne mit dem Schwarzkörper-Spektrum für  $T = 5778 \text{ K}$ . [302]