

IN DIESEM KAPITEL

Interessenkonflikte bei der Energieversorgung

Was es beim Stromverbrauch zu beachten gibt

Wirkungsgrade und Effizienz unserer Technologien

Die Zukunft der Energieversorgung

Kapitel 1

Energiebedarf heute und morgen

Daß der von uns Menschen verursachte Klimawandel eine grundlegende Umgestaltung unserer Energieversorgung unumgänglich macht, ist wissenschaftlich längst bewiesen. Wirbelstürme, Starkregen, Überschwemmungen und lang anhaltende Rekorddürren haben diesen Wandel in den letzten zehn Jahren jedem von uns drastisch vor Augen geführt. Doch wenn eine Schlüsselkomponente des Wirtschaftssystems auf grundsätzlich neue Technologien und andere globale Kreisläufe umgestellt werden soll, führt dies unweigerlich zu Konflikten zwischen denen, die vom alten System bisher profitierten, und denen, die sich für das neue engagieren.

Interessenkonflikte in der Energiewirtschaft

In unterschiedlichen Konstellationen wirken einflussreiche Interessengruppen noch immer gegen die Umgestaltung des Energieversorgungssystems. In Abbildung 1.1 habe ich versucht, Ihnen dieses Spannungsfeld zwischen der aktuellen Ausgangslage und dem erforderlichen Ziel anschaulich darzustellen.

Zunächst ist es glücklicherweise so, dass aus Sicht der Technik und Wissenschaft fast alles, was zur Umgestaltung unseres Energieversorgungssystems – weg von den bisherigen fossilen hin zu erneuerbaren Energieträgern – erforderlich ist, bereits zur Verfügung steht! Zwei Beispiele sollen Ihnen verdeutlichen, wie bei früheren Umweltproblemen vorhandene Technologien erfolgreich Missstände beseitigen konnten:

30 TEIL I Warum erneuerbare Energien wichtig sind



Abbildung 1.1: Ausgangslage und Ziel in der Energieversorgung

- ✓ Das Ozonloch schließt sich merklich, weil die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) in Kühlschränken durch umweltverträglichere Alternativen ersetzt wurden.
- ✓ Der saure Regen ist Vergangenheit, nachdem Rauchgasentschwefelungsanlagen in Kohlekraftwerken eingebaut wurden. Mit ihrer Hilfe werden die austretenden Schwefeldämpfe in Gips gebunden, der sich als Baumaterial weiterverwenden lässt.

Auch bei der Umgestaltung unseres Energieversorgungssystems ist die Technik nicht das entscheidende Problem. Vielmehr stehen neben einer allgemeinen Angst vor Veränderungen und der Angst vor zu hoch wahrgenommenen Transformationskosten die Interessen derjenigen Unternehmen dieser Umgestaltung entgegen, deren Geschäftsmodell bisher auf der Nutzung klima- und umweltschädlicher Energieträger beruhte. Zum Teil investieren diese zwar bereits in neue, nachhaltige Energietechnologien, aber leider auch immer noch in Lobbyismus gegen gesetzliche Regelungen, welche die Energiewende voranbringen sollen.



Unser Ziel muss es sein, gemeinsam ein Energieversorgungssystem zu gestalten, das nur so viel Energie bereitstellt, wie gebraucht wird – und zwar klimaverträglich, nachhaltig und erneuerbar.

Energieversorgung in Deutschland

Damit Sie ein Bild bekommen, wie sich unsere Energieversorgung in Deutschland verändern wird, zeige ich Ihnen in Tabelle 1.1 einige Daten zur Stromversorgung.

	2022	2023	2030 (Prognose)
Stromerzeugung	509 TWh	449,8 TWh	748 TWh
Stromimport	49,3 TWh	69,3 TWh	
Stromexport	76,3 TWh	60,1 TWh	
Stromerzeugung mittels erneuerbarer Energien	235,9 TWh	251,8 TWh	345 TWh

Tabelle 1.1: Stromerzeugung, Stromimport und -export

In der ersten Zeile der Tabelle erkennen Sie in den beiden rechten Spalten, dass die Stromerzeugung bis 2030 prognostiziert von 449,8 TWh auf 748 TWh ansteigen wird. Zudem zeigt Ihnen die vierte Zeile, dass dieser Prognose zufolge die Stromerzeugung durch erneuerbare Energien von 2023 bis 2030 sogar von 251,8 TWh auf 345 TWh ansteigt. In der rechten Spalte erkennen Sie jedoch auch, dass wenn bis 2030 tatsächlich alle Kohlekraftwerke vom Netz genommen werden sollen, sich im Jahre 2030 eine *Stromlücke* von 403 TWh aufstellt (748 TWh – 345 TWh), von der wir derzeit noch nicht wissen, wie sie geschlossen werden soll! Höchste Zeit, dass wir uns gut überlegen, wie sich diese Lücke nachhaltig schließen lässt ...



Um am Kohleausstieg 2030 festhalten beziehungsweise dem hohen Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Ausstoß von Kohlekraftwerken ein Ende bereiten zu können, müssen die erneuerbaren Energietechnologien in Deutschland stärker ausgebaut werden als in den vergangenen Jahren.

In Tabelle 1.1 können Sie in Zeile 2 noch etwas Wichtiges ablesen: 2023 wurden 69,3 TWh Strom ins deutsche Stromnetz importiert, 20 TWh mehr als 2022 – und das, während in Deutschland 59,2 TWh weniger Strom erzeugt wurde (449,8 TWh statt 509 TWh)! Ein wesentlicher Grund für Importe ist der stetig sinkende Beitrag von Kohle- und Kernkraftwerken. Denn bei Windstille oder Dunkelheit können Windkraft- und Photovoltaikanlagen keinen Strom liefern, sodass es heute noch immer Zeiten gibt, in denen externer Strom eingekauft werden muss, bis wir endlich ausreichend Energiespeicher zur Verfügung stellen. Die erforderlichen Speichertechnologien sind grundsätzlich bereits vorhanden, doch die Umsetzung in großem Stil ist noch nicht so weit, wie sie sein müsste.



Unsere Energieversorgungssicherheit hängt maßgeblich davon ab, wie gut es uns gelingt, regenerativ erzeugte Energien für Zeiten zu speichern, in denen kein Wind weht oder die Sonne untergegangen ist.

Falls Sie sich fragen, was es mit der Einheit TWh (Terawattstunden) auf sich hat, lesen Sie im Kasten »Riesige Einheiten« nach. Dort finden Sie auch Informationen darüber, wie viel Energie verschiedene Kraftwerkstypen ins Versorgungsnetz liefern können.

Riesige Einheiten

Die physikalische Einheit der Leistung ist das Watt (W). Ein Gigawatt (GW) entspricht einer Milliarde Watt, ein Terawatt (TW) ist noch 1000-mal mehr, also eine Billion Watt. In Zahlen ausgedrückt:

$$1 \text{ TW} = 1.000 \text{ GW} = 1.000.000 \text{ MW} = 1.000.000.000 \text{ kW} = 1.000.000.000.000 \text{ W}$$

Auf Ihrer Stromrechnung finden Sie aber nicht die Einheit kW und schon gar nicht MW, GW oder TW, sondern kWh. Was es wohl damit auf sich hat? Nun, Energie ist Leistung mal Zeit, also steht die Einheit kWh, in Worten *Kilowattstunde*, für eine Leistung, die in einer bestimmten Zeit erbracht wurde, also die Energiemenge, die Sie vom Versorger erhalten haben. Dafür gilt:

$$1 \text{ kWh} = 1 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h} = 1.000 \text{ W} \cdot 1 \text{ h} = 1.000 \text{ W} \cdot 3.600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Ws} = 3,6 \text{ MWs}$$

Dabei habe ich 1 h (Stunde) = 3.600 s (Sekunden) umgerechnet, weil $1 \text{ Stunde} = 60 \text{ Minuten}$ enthält und $1 \text{ Minute} = 60 \text{ Sekunden}$ besteht. Weiterhin gilt $1 \text{ MW} = 1.000 \text{ kW}$. Wenn Sie also 1 kWh elektrische Energie verbrauchen, dann haben Sie eine Stunde lang die Leistung von 1.000 W von Ihrem Energieversorger bezogen, zum Beispiel um 100 LED-Lampen mit je 10 W Leistung eine Stunde lang zu betreiben.

Die größeren Einheiten MW, GW oder TW werden für Energieangaben oder für Kraftwerke verwendet. Ein Kernkraftwerk leistet etwa 1.200 MW , ein großes Kohlekraftwerk etwa 800 bis 1.000 MW . Eine Windkraftanlage bringt es im Binnenland derzeit auf bis zu 5 MW und auf dem Meer bis zu 15 MW , mit steigender Tendenz. Eine Photovoltaikanlage auf Ihrem Dach leistet etwa $8 \text{ kW}_{\text{peak}}$, wobei der Index *Peak* angibt, dass es sich dabei um die *Maximalleistung* der Anlage handelt.

Eine Photovoltaikanlage mit $8 \text{ kW}_{\text{peak}}$ erzeugt etwa 8.000 kWh im Jahr. Da ein Haushalt mit vier Personen etwa 4.000 kWh im Jahr verbraucht, können Sie damit Ihren eigenen Bedarf gleich zweimal abdecken! Neben den 4.000 kWh für Ihren eigenen Strombedarf können Sie also noch 4.000 kWh in das Versorgungsnetz einspeisen und dafür eine Vergütung erhalten – oder besser noch, Sie laden damit Ihr Elektroauto.

Der Umrechnungsfaktor 1000 von $8 \text{ kW}_{\text{peak}}$ zu 8.000 kWh ist übrigens eine naturbedingte Zahl. Die Strahlungsleistung der Sonne an der Obergrenze der Erdatmosphäre liegt bei 1.367 W/m^2 . Auf dem Erdboden kommen davon bei klarem Wetter etwa 75% an. Dies führt auf eine Bestrahlungsstärke von 1.000 W/m^2 . Mehr dazu lesen Sie in Kapitel 11.

Einheitenvorsätze wie k (Kilo), M (Mega) oder G (Giga) machen, wie Sie sehen, das Lesen mit großen Zahlen einfacher. In Tabelle 1.2 habe ich die gebräuchlichsten Vorsätze und deren Bedeutung noch einmal zusammengefasst.

Vorsatz	Zeichen	Multiplikativer Faktor	In Worten
Kilo	k	10^3	Tausend
Mega	M	10^6	Million
Giga	G	10^9	Milliarde
Tera	T	10^{12}	Billion
Peta	P	10^{15}	Billiarde

Tabelle 1.2: Einheitenvorsätze und Zehnerpotenzen

Mit den Zahlen aus dem Kasten »Riesige Einheiten« können Sie eine einfache Rechnung aufstellen: Der Druckwasserreaktor im Block 2 des Kernkraftwerks in Philippsburg leistete 1.200 MW . Wenn eine Windkraftanlage im Binnenland $1,5 \text{ MW}$ leistet, bräuchten Sie also 800 Windkraftanlagen, um dieses Kernkraftwerk wirksam zu ersetzen. Doch leider stimmt diese Rechnung nicht ganz, denn Sie müssen noch die *Wirkungsgrade*, also die Effizienz bei der Anlagen berücksichtigen.

Kernkraftwerke haben typischerweise einen Wirkungsgrad von 36 %, das heißt nur 36 % der durch die Kernspaltung erzeugten Energie wird tatsächlich in Strom umgewandelt. Der Rest, also fast zwei Drittel, ist Abwärme. Für die Windkraftanlage können Sie einen Wirkungsgrad von etwa 18 % annehmen. Weiterhin müssen Sie beachten, dass ein Kernkraftwerk an 365 Tagen 24 Stunden lang Strom liefert, wir also 8.760 Betriebsstunden im Jahr annehmen können ($24 \text{ h} \cdot 365 \text{ Tage} = 8.760 \text{ Stunden pro Jahr}$). Eine Windkraftanlage erzeugt hingegen nur dann Strom, wenn der Wind weht. Wenn Sie dies alles beim Vergleich berücksichtigen, wird schnell klar, dass Sie mehr als 800 Windkraftanlagen brauchen, um ein Kernkraftwerk zu ersetzen. Für ein großes Kohlekraftwerk kommen Sie auf ein ähnliches Ergebnis.

Allerdings hört der Gedankengang an dieser Stelle nicht auf, sondern fängt erst richtig an. Denn neben ihrer klimaschädlichen Wirkung, auf die wir in Kapitel 2 näher eingehen, hat die bisherige fossile und nukleare Energieversorgung noch ein weiteres, oft weniger beachtetes Problem: Unsere fossilen und nuklearen Ressourcen werden nicht mehr besonders lange verfügbar sein! In Tabelle 1.3 sehen Sie die entsprechend geschätzten Reichweiten für verschiedene Energieträger.

Energieträger	Reichweite	Energiewandler	Endenergie
Kohle (Stein-/ Braunkohle)	150/300 Jahre	Kohlekraftwerk	Strom
Erdöl	50 Jahre	Ottomotoren	Antriebsleistung
Erdgas (Methan)	50 Jahre	Gas-und-Dampf-Kraftwerk (GuD)	Strom + Wärme
Uran	30 Jahre	Kernkraftwerk	Strom
Sonne	erneuerbar	Photovoltaikanlage Solarthermieanlage	Strom Wärme
Wind	erneuerbar	Windkraftanlage	Strom
Wasser	erneuerbar	Wasserkraftwerk	Strom
Biogas (Methan)	erneuerbar	Vergärungsanlage mit Blockheizkraftwerk	Strom + Wärme
Abfall	erneuerbar	Biogasanlage mit Blockheizkraftwerk	Strom + Wärme
Holz	erneuerbar	Holzvergasungsanlage mit Blockheizkraftwerk	Strom + Wärme
Erdwärme	erneuerbar	Geothermiekraftwerk Wärmepumpe	Strom + Wärme Wärme
Wasserstoff	erneuerbar	Methanisierung mit Einspeisung ins Gasnetz oder ins Blockheizkraftwerk	Strom + Wärme

Tabelle 1.3: Energieträger und ihr geschätzter Zeithorizont

So liegt der derzeit geschätzte Zeithorizont für die weltweiten Erdölreserven bei nur noch etwa 50 Jahren. Auch bei den Gasreserven wird in rund 50 Jahren Schluss sein, mit den derzeit zugänglichen Reserven. Lediglich Kohle könnte noch bis ins nächste Jahrhundert reichen, allerdings nur die besonders umweltschädliche Braunkohle. Und der Uranvorrat würde uns nur für 30 Jahre reichen, was den Ausstieg aus der Kernkraft erforderlich macht. Oder wollten Sie in sehr teure Kernkraftwerke investieren, deren Brennstoff bereits in einigen Jahrzehnten versiegt? Alle Zahlenangaben in Tabelle 1.3 sind gerundet, da wir die tatsächlichen Zahlen nicht exakt angeben können.

Trotz intensiver Ausbaubemühungen einzelner Länder ist der derzeitige Anteil der Kernenergie an der weltweiten Primärenergieversorgung mit 4 % sehr gering. Ein Ausbau würde mit Kosten im zweistelligen Milliardenbereich pro Kraftwerk gigantische Summen erfordern. Ohne massive öffentliche Subventionen mit Steuergeldern wäre das nicht vorstellbar und war bisher auch nicht realisierbar. Der Bau und Betrieb unserer Kernkraftwerke war schon immer mit Steuergeldern extrem bezuschusst, die Gewinne blieben bei den Betreibern. Hinzu kommen die extrem hohen Schäden bei Störfällen und vor allem die Tatsache, dass es nirgendwo auf der Welt eine Lösung für die sichere Verwahrung von hoch radioaktivem Restmüll über die kommenden Jahrtausende gibt. Ein weiteres Argument gegen den Bau neuer Kernkraftwerke mit 10 bis 20 Jahren Bauzeit und Betriebsdauern von etwa 40 Jahren sind die in Tabelle 1.3 bereits erwähnten zu Ende gehenden globalen Uranvorräte: Im ungünstigsten Fall sind diese bereits aufgebraucht, wenn die neuen Kernkraftwerke fertiggestellt sind.

Neben ihrer Klimaneutralität haben Sonnen- und Windenergie den entscheidenden Vorteil, dass sie uns in quasi unendlicher Menge und überall auf der Erde zur Verfügung stehen – es sind erneuerbare Energien im wahrsten Sinne des Wortes. Hinzu kommt, dass uns diese beiden Energieträger kostenlos zur Verfügung stehen, sie müssen nicht erst mit hohem technischen und finanziellen Aufwand erschlossen werden. Trotzdem ist die ausschließliche Versorgung durch erneuerbare Energien nicht von heute auf morgen realisierbar, da diese noch erheblich mehr als bisher ausgebaut werden müssen. Darüber hinaus steht uns der Strom zwar an wind- und sonnenreichen Tagen in großen Mengen, an anderen Tagen hingegen in zu kleinen Mengen zur Verfügung. Hier kommen die Energiespeicher ins Spiel, mit denen wir uns in Teil IV und V dieses Buches genauer befassen werden. Ohne Energiespeicher werden wir uns nicht ausschließlich mit Energie aus erneuerbaren Energieträgern versorgen können.

Die gute Nachricht ist, dass der Umbau unseres Energieversorgungssystems – weg von fossilen und hin zu erneuerbaren Energien – realisierbar ist. Die Entwicklungen erfordern lediglich in einigen Bereichen noch Zeit und finanzielle Investitionen. Wie bei allen neuen Technologien sind auch diese anfangs teuer, doch die Investitionen werden sich auszahlen, sobald mit einer größeren Nachfrage die Preise fallen – was sie bereits für viele erneuerbare Energietechnologien tun. Darüber hinaus werden mit diesen Entwicklungen auch neue, hochinteressante Arbeitsplätze geschaffen. Es macht sicherlich wesentlich mehr Spaß, eine Photovoltaik- oder Windkraftanlage aufzubauen als unter Tage Braunkohle zu fördern, oder nicht?



Aus technischen Innovationen werden zunächst Luxusartikel und dann preiswerte Massenwaren. Der erste Mercedes (1885) kostete beispielsweise umgerechnet 100.000 Euro und das erste Mobiltelefon (1992) 8.000 Euro. Doch bereits nach kurzer Zeit sanken die Preise drastisch, und das obwohl die Produkte immer

besser wurden! Dasselbe wird bei unseren erneuerbaren Energietechnologien passieren: Sie werden preiswerter und gleichzeitig besser! Während die Ressourcenknappheit von Kohle, Erdöl, Erdgas und Uran die bisherige Energiegewinnung teurer macht, wird die umweltfreundliche und klimaneutrale Energieversorgung immer billiger. Mussten Sie 2011 für eine 8-kW_{Peak}-Photovoltaikanlage noch 25.000 Euro investieren, kostet diese Anlage heute nur noch etwa 12.000 Euro, also grade mal die Hälfte.

Noch ein weiterer Aspekt spricht für den Ausbau der erneuerbaren Energien: Sie machen uns endlich unabhängig von Energieimporten aus Ländern, die nicht unsere Grundwerte teilen und uns politisch oder gar militärisch unter Druck setzen können. Die Energiewende trägt also auch zu unserer eigenen Sicherheit bei. Selbst die Ängste der Menschen in Bezug auf eine Abschaltung der Kernkraftwerke ist bei genauerem Hinsehen nicht nachvollziehbar gewesen, da deren Anteil an der Stromproduktion in Deutschland lediglich 20 % betrug, während der Anteil der erneuerbaren Energien bereits 50 % überschreitet. Die Droggebärden, der Strom würde ausfallen, wenn die Kernkraftwerke stehen, hat sich durch den konsequenten Ausbau erneuerbarer Energietechnologien nicht erfüllt.

Ein Punkt ist allerdings noch nicht zufriedenstellend gelöst. Die bisherige konventionelle, mit fossilen Energieträgern gespeiste Energieversorgung mit relativ wenigen dauerhaft laufenden Großkraftwerken brauchte nur eine verhältnismäßig einfache Struktur der Verteilungsnetze. Die künftige Energieversorgung durch erneuerbare Energieträger benötigt dagegen variable und »intelligente« Verteilungsnetze, um den durch Sonne, Wind, Wasser, Erdwärme und Biomasse dezentral erzeugten Strom effizient zu verteilen beziehungsweise zu speichern. Der moderne Strommarkt braucht leistungsfähigere Netze, auch für den länderübergreifenden Energietransport. Hierzu sind Investitionen im gleichen Tempo erforderlich, wie der weitere konsequente Ausbau der regenerativen Energietechnologien erfolgt.

Die Energie und ihr Wirkungsgrad

Der »Energiehunger« der Menschheit wächst mit der weiter zunehmenden Bevölkerung und ihrem Lebensstandard. Lag der weltweite Primärenergieverbrauch 2004 noch bei 500 Exajoule (die Zahl 500 ergänzt durch 18 Nullen, also 500.000.000.000.000.000 Joule), waren es im Jahr 2018 bereits 650 Exajoule – Tendenz weiter steigend.



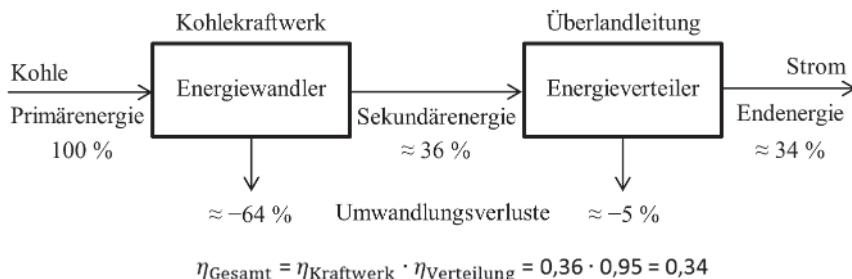
Joule (J) ist die Einheit der Energie und der Arbeit: 1 J entspricht einer Leistung von einem Watt, die eine Sekunde lang erbracht wird, also einer Wattsekunde, kurz 1 Ws. Die Einheit Exajoule wird als EJ abgekürzt.

Um ein Gefühl für die Größenordnung dieses Energieverbrauchs zu bekommen, müssten Sie den Wert zuerst in die für uns gebräuchlichere Einheit Kilowattstunden (kWh) umrechnen. Im Kasten »Riesige Einheiten« im vorherigen Abschnitt steht für Sie das dafür nötige Handwerkszeug zur Verfügung. Wenn Sie damit die Umrechnung durchführen, werden Sie staunen, wie gigantisch viel Energie wir Menschen jedes Jahr benötigen!

Beim technischen Umgang mit Energie müssen wir eine wichtige begriffliche Unterscheidung beachten: *Primärenergie* ist Energie in der ursprünglichen, das heißt technisch noch

36 TEIL I Warum erneuerbare Energien wichtig sind

nicht aufbereiteten Form, beispielsweise die in Kohle, Erdöl, Uran, Solarstrahlung, Wind oder Biomasse gespeicherten Energien. Um diese Energie für die weitere Verwendung nutzbar zu machen, muss sie zunächst umgewandelt werden. Ein Kohlekraftwerk wandelt die Primärenergie der Kohle in Strom um, wie dies Abbildung 1.2 zeigt. Bei dieser Umwandlung in *Sekundärenergie* entstehen Umwandlungsverluste. Was am Ende als elektrische Energie, also Strom, übrig bleibt, wird als *Endenergie* bezeichnet. Endenergie ist Energie in einer Form, wie sie uns Energieverbrauchern zugeführt wird, also Strom, Benzin oder Wärme im Heizkörper.



$$\eta_{\text{Gesamt}} = \eta_{\text{Kraftwerk}} \cdot \eta_{\text{Verteilung}} = 0,36 \cdot 0,95 = 0,34$$

Abbildung 1.2: Energiearten und Wirkungsgrade am Beispiel eines Kohlekraftwerks

In Abbildung 1.2 können Sie auch ablesen, dass bei der bisherigen elektrischen Energieversorgung mit Kohle nur 34 % der eingesetzten Primärenergie als Endenergie an Ihrer Steckdose ankommt. Im Kohlekraftwerk sind bereits 64 % Umwandlungsverluste zu verzeichnen und die Überlandleitung fordert nochmals 5 %.



Vielleicht fragen Sie sich gerade, ob ich keine Zahlen addieren kann? 100 minus 64 minus 5 ergibt doch 31 und nicht 34. Ich kann Ihnen versichern, dass alles seine Richtigkeit hat! Die Berechnung des Gesamtwirkungsgrads η_{Gesamt} erkläre ich für Sie im folgenden Kasten »Wie wirkt der Wirkungsgrad?«. An dieser Stelle nur so viel: Die Wirkungsgrade zweier miteinander gekoppelter Systeme werden *multipliziert* und nicht addiert.

Uns allen ist der Umgang mit Energie so selbstverständlich geworden, dass wir uns nicht mehr viele Gedanken darüber machen, wo die Energie herkommt und wie Energie bereitgestellt und genutzt wird. Beim Kaffeekochen brauchen Sie elektrische Energie für die Kaffeemaschine und auch Ihr Föhn, der Rasierapparat oder Ihr Smartphone brauchen elektrische Energie. Worüber sich aber durchaus einmal nachzudenken lohnt ist die Frage: »Was ist eigentlich Energie?«



Die physikalische Größe *Energie* ist ein Maß für die Arbeit, die man mithilfe einer Energiequelle verrichten kann. Technisch bereitgestellte Energie braucht es in der modernen Zeit überall: zur Herstellung von Lebensmitteln, zum Heizen unserer Häuser, zur Erleichterung verschiedenster Tätigkeiten wie zum Beispiel Lasten hochzuheben und für unsere Mobilität. Die Energie wird mit dem Formelzeichen E abgekürzt. Für die *Arbeit* (englisch: *Work*) nutzen wir hingegen das Formelzeichen W . Wenn Sie einem System Arbeit zuführen oder entnehmen, ändert sich die Energie des Systems. Die Begriffe *Leistung* und *Energie*

hängen ebenfalls eng zusammen, weshalb beide leider häufig verwechselt werden. Die Leistung (englisch: Power) hat das Formelzeichen P . Sie gibt an, in welcher Zeit eine Energiemenge E umgewandelt wird. Die Einheit der Leistung P ist das Watt (W). Die Einheit der Energie E (und der Arbeit W) ist das Joule (J) oder auch die Wattsekunde (Ws).



Die Einheit Watt (W) und das Formelzeichen der Arbeit W werden mit demselben Buchstaben abgekürzt, was deren Unterscheidung nicht gerade erleichtert. Sie können sich aber merken, dass das Formelzeichen für die Arbeit wie für alle anderen physikalischen Größen stets kursiv geschrieben wird, also » W «, während die Zeichen für Einheiten wie zum Beispiel Watt (W) immer steil geschrieben sind, also »W«.

Am Anfang dieses Kapitels haben Sie mit der Angabe des weltweiten Primärenergieverbrauchs von 650 EJ festgestellt, dass sich beispielsweise der weltweite Energiebedarf in gigantischen Größenordnungen bewegt, die für uns kaum fassbar sind. Durch die Angabe des *Wirkungsgrads* η hingegen lässt sich der Energie- und Leistungsaufwand wesentlich anschaulicher darstellen. Deshalb stelle ich in diesem Buch alle Energiewandler mithilfe ihrer Wirkungsgrade vor, wie es Abbildung 1.3 zeigt.

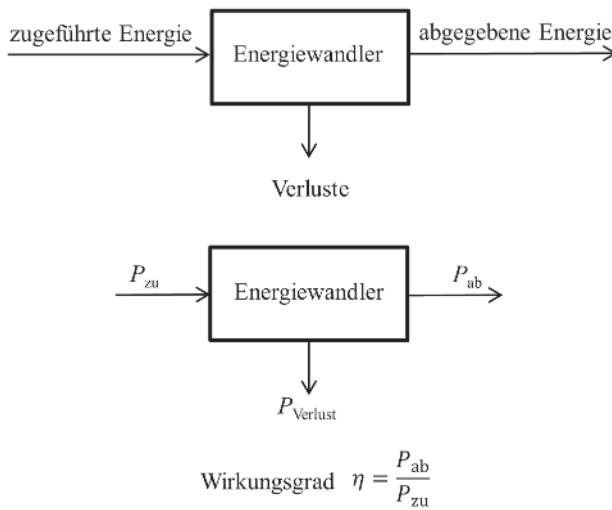


Abbildung 1.3: Energiewandler und ihr Wirkungsgrad

Für Sie ist an dieser Stelle zunächst wichtig, dass der Wirkungsgrad η das Verhältnis der abgegebenen zur zugeführten Energie ist, beziehungsweise das Verhältnis der abgeführten Leistung P_{ab} zur zugeführten Leistung P_{zu} , also $\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$ gilt. Damit können Sie die Leistungsfähigkeit eines Energiewandlers ganz einfach in Prozent angeben.

Eine moderne Photovoltaikanlage hat zum Beispiel einen Wirkungsgrad von 20 bis 25 %, ein Kohlekraftwerk von 36 % und ein Gas-und-Dampf-Kraftwerk von mehr als 60 % für die Stromgewinnung. Die mathematisch-physikalische Erklärung zum Wirkungsgrad beschreibe ich Ihnen im nachfolgenden Kasten »Wie wirkt der Wirkungsgrad?«.



Achten Sie stets darauf, ob sich der Wirkungsgrad auf die Strom- oder die Wärmegegewinnung bezieht, ob es sich bei den Angaben also um den Strom- oder Wärmewirkungsgrad handelt!

Andererseits ist das natürliche Angebot erneuerbarer Energieformen wie Sonne oder Wind so groß, dass deren Wirkungsgrad bei der Umwandlung von der Primär- zur verwendbaren Endenergie kaum eine Rolle spielt. Sonnenstrahlen sind für uns ein kostenloser »Brennstoff«, deshalb ist bei dem relativ kleinen Wirkungsgrad einer Photovoltaikanlage die Endenergie immer noch »100 % kostenlos«, wenn die Anlage betrieben wird. Gleiches gilt für viele andere erneuerbare Energieformen – zum Beispiel bei Gezeitenkraftwerken, denen der Mond kostenlos seine Gravitationskraft zur Verfügung stellt.

Wie wirkt der Wirkungsgrad?

Die Umwandlung von einer Energieform in eine andere – beispielsweise der Wärmeenergie von Dampf in elektrische Energie mittels einer Turbine im Kraftwerk – geschieht nie ohne Verluste. Zwar kann nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik Energie nie erzeugt, sondern nur umgewandelt werden. Doch der zweite Hauptsatz der Thermodynamik sagt aus, dass sich eine Energieform nie vollständig in eine andere (nutzbare) Energieform überführen lässt. Denn bei der Umwandlung tritt immer eine – meistens als Abwärme endende – *Verlustleistung* P_{Verlust} auf.

Das Verhältnis zwischen der bei der Energieumwandlung abgegebenen Leistung P_{ab} und der zugeführten Leistung P_{zu} bezeichnen wir als *Wirkungsgrad* η , für den die folgende Formel gilt:

$$\eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}}$$

Da die abgeführte Leistung wegen der Verluste immer kleiner als die zugeführte Leistung ist, muss der Wirkungsgrad stets kleiner als 1 sein, es gilt also $\eta < 1$. Häufig wird der Wirkungsgrad in Prozent angegeben, in diesem Fall lautet die äquivalente Aussage, dass η immer unter 100 % liegen muss. Die Effektivität einer Energienutzung lässt sich also durch ihren Wirkungsgrad beschreiben: Je höher der Wirkungsgrad ist, desto weniger Energie müssen Sie bei gleichem Nutzen aufwenden.

Den Gesamtwirkungsgrad eines Systems aus mehreren Teilsystemen berechnen Sie, indem Sie alle einzelnen Wirkungsgrade der Teilsysteme *multiplizieren* (bitte nicht addieren!):

$$\eta_{\text{gesamt}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \dots \cdot \eta_n$$

In Abbildung 1.2 berechne ich mit dieser Formel den Gesamtwirkungsgrad der Prozesskette von der Stromerzeugung in einem Kohlekraftwerk über die Verteilung über die Überlandleitung des Energieversorgungsnetzes bis zur Stromeinspeisung bei uns Energieverbrauchern.

Energie gibt es in vielen Formen, sie kann zum Beispiel als potenzielle, kinetische, elektrische, chemische, thermische oder Strahlungsenergie auftreten. Zum Glück lassen sich diese Energiearten ineinander – wenn auch nie ganz verlustfrei – umwandeln. Zum Beispiel bewirkt in einem Kohlekraftwerk die Wärmeenergie des beheizten Kohlenkessels mechanische Arbeit. Konkret wird durch die Wärme Wasser erhitzt und zu Dampf umgewandelt. Da sich bei diesem Phasenübergang das Wasser stark ausdehnt, kann die Ausdehnungskraft verwendet werden, um eine Turbine anzutreiben, also in Bewegung zu versetzen. Dies wiederum vermindert die Wärmeenergie, die im erzeugten Wasserdampf gespeichert war – der Dampf wird wieder kalt. Ein durch die (Rotations-)Bewegung der Turbine angetriebener Generator erzeugt dann den für uns nutzbaren Strom. Insgesamt wird also Wärme über Bewegungsenergie in Elektrizität umgewandelt. Die bei solchen Energieumwandlungen unvermeidbare (Ab-)Wärme wird bei mechanischen Anwendungen durch Reibung und bei elektrischen Anwendungen durch den elektrischen Widerstand oder durch Wirbelströme verursacht.



Je mehr zugeführte Energie ein System in nutzbare Energie umwandeln kann, desto effizienter ist es als Energiewandler und desto höher ist sein Wirkungsgrad.

Moderne Elektromotoren sind absolute Profis in Sachen Wirkungsgrad: Sie können über 80 % der zugeführten Energie effektiv verwerten! Umgekehrt bedeutet das: Bei einem Elektromotor gehen nur 20 % der Energie als Verlustleistung verloren.

Der Wirkungsgrad einer einzelnen Komponente sagt jedoch meistens recht wenig aus. Häufig ist es entscheidend, wie hoch der Wirkungsgrad eines Gesamtsystems ist. Bei einem Elektromotor müssten Sie also noch das stromerzeugende Kraftwerk zum Gesamtsystem hinzunehmen – schließlich kommt der Strom nicht einfach aus der Steckdose, sondern wird im Kraftwerk erzeugt und von dort unter Umständen über lange Leitungen zur Steckdose transportiert. Das Kraftwerk wiederum gewinnt seine Energie noch aus Kohle und hat damit einen vergleichsweise niedrigen Wirkungsgrad von 36 %. Im Kasten »Wie wirkt der Wirkungsgrad?« können Sie nachlesen, dass sich der Gesamtwirkungsgrad dieses Systems aus Kraftwerk und Elektromotor wie folgt berechnen lässt:

$$\eta_{\text{gesamt}} = \eta_{\text{Kraftwerk}} \cdot \eta_{\text{Elektromotor}} = 0,36 \cdot 0,8 = 0,29$$

Der Gesamtwirkungsgrad dieser Systemkette beträgt also 29 %. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass die Verlustenergie im gesamten System 71 % beträgt. Das bedeutet aber nicht, dass der Elektromotor insgesamt ineffizient wäre; ganz im Gegenteil!

Ein Ottomotor, der die chemische Energie von Benzin in Bewegungsenergie des Autos umwandelt, weist zum Beispiel Verluste von etwa 80 % auf, hat also einen Wirkungsgrad von etwa 20 %. Beim Dieselmotor steigt der Wirkungsgrad zwar auf 45 %, aber den Wirkungsgrad von über 80 % eines Elektromotors erreicht keiner der ölbasierten Antriebe! Beim Benzin- oder Dieselmotor müssten wir auch noch die für die Raffinierung des Rohöls zum Treibstoff aufgewendete Energie abziehen.

Wenn Sie natürlich den Motor eines Elektroautos mit erneuerbaren Energieträgern versorgen, indem Sie es zum Laden an eine Photovoltaikanlage anschließen, bekommen Sie das klimaschonendste und effizienteste Fortbewegungsmittel, das wir derzeit haben. Selbst

wenn Photovoltaikanlagen einen Wirkungsgrad von nur 20 % besitzen, also schlechter als Kohlekraftwerke mit 36 % abschneiden: Da die Sonnenenergie kostenlos für uns ist und uns in quasi unendlichem Maße zur Verfügung steht (außer nachts), können Sie als Endenergie-Wirkungsgrad der Photovoltaikanlage formal 100 % annehmen – und schon besitzt das Gesamtsystem aus Photovoltaikanlage und Elektroauto die effizienteste Energieausbeute mit 80 % Wirkungsgrad! Zudem ist eine Photovoltaikanlage nicht so teuer wie ein Kohlekraftwerk und erzeugt bei der Stromerzeugung kein Kohlenstoffdioxid.

Energie und das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid

Wir müssen davon ausgehen, dass der Weltenergiebedarf für Strom und Wärme wegen der weiter ansteigenden Weltbevölkerung zunehmen wird. Damit wird auch eine Zunahme der Emissionen von Kohlenstoffdioxid, also CO_2 einhergehen, wenn wir weiter mit fossilen Energieträgern die erforderliche Energie gewinnen. Abbildung 1.4 zeigt die historische Entwicklung der CO_2 -Emissionen.

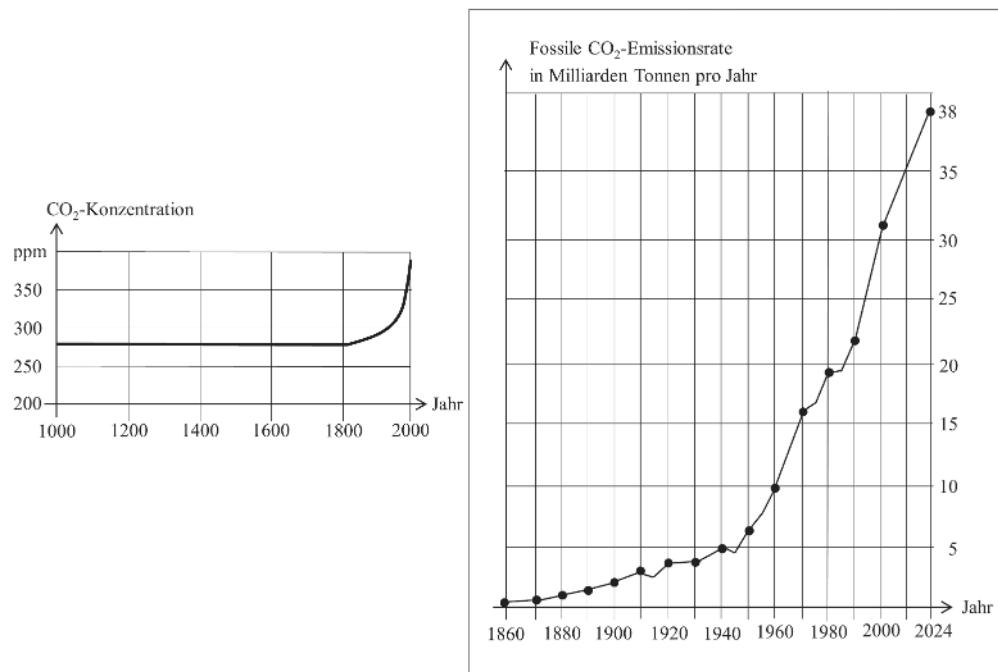


Abbildung 1.4: Konzentration und Emissionsraten von Kohlenstoffdioxid

In der linken Darstellung in Abbildung 1.4 sehen Sie die CO_2 -Konzentration ab dem Jahre 1000. Offenbar herrschte bis zum Ende des 18. Jahrhunderts ein sehr stabiler Wert von circa 280 ppm (parts per million, das heißt auf eine Million Luftmoleküle kamen 280 CO_2 -Moleküle) vor. Seitdem jedoch ist die Konzentration erheblich angestiegen! In der rechten

Darstellung sehen Sie die CO₂-Emissionsrate von 1860 bis heute. Erkennen Sie an den beiden Kurven, dass es sich dabei um einen exponentiellen Anstieg handelt?

Warum habe ich gerade das Jahr 1860 als Startpunkt gewählt? Weil etwa ab 1860 die Industrialisierung in ihre »heiße Phase« eingetreten ist, zunächst auf Basis von Dampfmaschinen, die mit Kohle beheizt wurden, was die CO₂-Emissionsrate ansteigen ließ. Ab Ende der 1880er-Jahre sorgte die fortschreitende Entwicklung der Elektrizität dafür, dass immer mehr Kraftwerke zur Stromerzeugung gebaut wurden, die ebenfalls auf Kohleverbrennung basierten und somit die CO₂-Emissionsrate weiter in die Höhe trieben. Heute emittieren wir fast 38 Milliarden Tonnen CO₂ hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger, durch die Forstwirtschaft und die sich weiter ausbreitende Landnutzung – zumeist durch die Brandrodung der Regenwälder – sowie durch unsere Mobilität, die Industrie und unsere Haushalte.

Da die zunehmenden CO₂-Emissionen über den damit verursachten Treibhauseffekt das Klima unserer Erde maßgeblich verändern, haben Wissenschaftler seit Langem vor dieser exponentiellen Zunahme der CO₂-Emissionsrate gewarnt. Verschiedene Interessengruppen aus Politik und Wirtschaft (insbesondere die Energieerzeuger und Ölkonzerne) haben dies allerdings so lange wie möglich geleugnet und zu vertuschen versucht. Dies hat unter anderem dazu geführt, dass die Warnungen unserer Wissenschaftler erst sehr spät (fast zu spät) öffentlichkeitswirksam wurden. Noch vor 20 Jahren nahm die breite Öffentlichkeit kaum Notiz von diesem Problem, während die Ölkonzerne bereits wussten, was mit der Verbrennung fossiler Energieträger auf uns zukommen wird. Mittlerweile setzt jedoch ein breites Umdenken ein, nicht zuletzt, weil die Folgen des Klimawandels immer direkter von jedem von uns zu spüren sind: Die letzten zehn Jahre gehörten fast alle zu den wärmsten je gemessenen Jahren, es gab mehrere extreme Dürresommer in Mitteleuropa und ab Mitte 2023 war fast ein Jahr lang jeder Monat der heißeste bisher gemessene Monat der jeweiligen Jahreszeit. Auch kenntnisreiche Bücher von renommierten Wissenschaftlern wie Claudia Kempfert (»Kampf um Strom«, »Schockwellen«) oder Hans Joachim Schellnhuber (»Selbstverbrennung«) sorgen für die erforderliche Breitenwirkung.

Die mittlerweile beschlossenen Klimaabkommen zeigen, dass die Warnungen der Wissenschaftler endlich in Handlungskonzepte umgesetzt werden. So sah das Pariser Abkommen von 2015 vor, die CO₂-Emissionsrate weltweit so stark zu reduzieren, dass die Erderwärmung unter +1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau bleibt. Ob wir dieses Ziel erreichen, wissen wir heute noch nicht! Aber klar ist, dass wir es nicht erreichen werden, wenn wir nicht sofort konsequent umsteuern. Sicherlich ist es nicht leicht, alle Menschen zum Umdenken zu bewegen. Aber die Folgen des »Weiter so« wären ungleich schwerer zu bewältigen und würden extrem teuer werden. Wesentlich teurer als der konsequente Ausbau der erforderlichen erneuerbaren Energietechnologien. Sie können das gerne bei Claudia Kempfert in »Kampf um Strom« oder »Schockwellen« nachlesen.

Bekanntlich haben auch Veränderungen im Kleinen in der Summe eine große Wirkung! Um die CO₂-Emissionen also wirksam zu reduzieren, sollten wir beispielsweise folgende Maßnahmen umsetzen:

- ✓ Im Straßenverkehr Elektroautos verwenden, die mit regenerativ erzeugtem, also grünem Wasserstoff (Brennstoffzelle) oder grünem Strom (Akkumulator) betrieben werden.

- ✓ Zum Heizen unserer Gebäude und Wohnungen selbst erzeugtes Biogas oder Wärmepumpen mit grünem Strom einsetzen; und natürlich so dämmen, dass am besten gar keine Heizung mehr erforderlich ist.
- ✓ Ausbau weiterer Windkraft- und Photovoltaikanlagen und als Übergang emissionsreduzierte Blockheizkraftwerke sowie Gas-und-Dampf-Kraftwerke mit Biogas betrieben einsetzen.
- ✓ Hierzu ist der Ausbau von Energiespeichern dringend erforderlich, um unsere Energieversorgung zu sichern.



Der Begriff »grün« bedeutet im Zusammenhang mit Strom oder anderen Energieträgern, dass die Endenergie aus erneuerbaren Primärenergieformen wie Sonnenenergie, Wind- und Wasserkraft, Erdwärme oder Biomasse erzeugt wurde.

Energie als Krisenherd

Das Festhalten an fossilen Energieträgern sorgte für zahlreiche Konflikte rund um die Welt beziehungsweise heizt sie weiter an. So versucht China mit aller Macht, sich den Zugriff auf Öl vorkommen und andere Ressourcen in Afrika zu sichern oder die alte Seidenstraße zu reaktivieren, um Brennstoffe oder Rohstoffe möglichst effizient ins eigene Land zu bringen. Auch der Nahe Osten erweist sich in dieser Hinsicht als Pulverfass. So verfügen Irak, Iran, Kuwait, Saudi-Arabien und die Vereinigten Arabischen Emirate über 60 % der globalen *konventionellen Erdölreserven*, das heißt Reserven, die sich mit den heutigen Förderverfahren zu noch erschwinglichen Preisen erschließen lassen. Es stellt sich hierbei die Frage, inwiefern ein Zusammenhang zwischen diesen Erdölreserven und den militärischen Konflikten in dieser Region bestehen.

Diese Konflikte werden sich in Zukunft noch weiter verschärfen, wenn wir so lange auf fossile Brennstoffe setzen, bis es gar nicht mehr geht. Auch die Abhängigkeit der Industriationen von den erdölfördernden Ländern würde sich weiter zuspitzen, während die nutzbaren Brennstoffreserven immer schneller abnehmen. Aus diesen Abhängigkeiten kommen wir nur heraus, wenn wir umdenken – hin zur ausschließlichen Nutzung erneuerbarer Energieträger, die für uns alle gleichermaßen und im Prinzip überall auf der Welt zur Verfügung stehen.

Wir müssen uns endlich eingestehen, dass das aktuelle auf fossile Brennstoffe basierende Energieversorgungssystem und damit unsere darauf angewiesene Gesellschaft in einer großen Krise stecken. Die zu bewältigenden Herausforderungen angesichts der Ressourcenverknappung und des zunehmend spürbaren Klimawandels sind enorm. Die in Deutschland und vielen anderen Ländern einsetzende *Energiewende* gibt jedoch Hoffnung, dass der erforderliche Wandel demokratisch und im gesellschaftlichen Konsens gelingen kann.

Die zu bearbeitenden Arbeitsfelder für das Energiesystem von morgen habe ich in Abbildung 1.5 zusammengefasst. Die konventionellen Kraftwerke, die durch erneuerbare Energietechnologien ersetzt werden müssen, werden Sie in Teil II dieses Buches kennenlernen. Die erneuerbaren Energietechnologien, welche sie ersetzen werden, präsentiere ich Ihnen

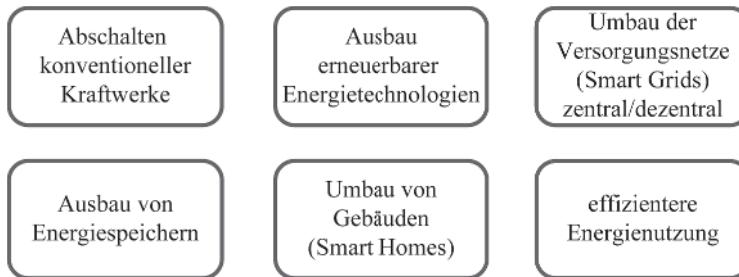


Abbildung 1.5: Arbeitsfelder für das Energiesystem von morgen

in Teil III. Daran anschließend werden wir überlegen, wie sich die Versorgungsnetze von der bisherigen zentralen auf eine dezentrale Betriebsweise umbauen lassen (Smart Grids). Auch Energiespeicher, die trotz der Wetterabhängigkeit von Windkraft- und Photovoltaikanlagen eine energiebezogene Grundversorgung sicherstellen, sind Inhalt des Buchteils IV. Den Wandel von Gebäuden und unseren Haushalten hin zu Smart Homes sowie die effizientere Energienutzung diskutieren wir in allen Details in Teil V. Hier sind auch Fragen rund ums konsequente Energiesparen untergebracht. Sie sehen also: Nachdem Sie dieses Buch gelesen haben, kennen Sie die erforderlichen Schritte für die notwendige Energiewende – wir müssen sie dann nur noch konsequent und ohne zu zögern gehen!

Bevor wir uns in die Details der konventionellen und auch erneuerbaren Energietechnologien stürzen, gebe ich Ihnen in den folgenden beiden Kapiteln eine Übersicht zu den physikalischen Ursachen des Klimawandels sowie den politischen Klimaabkommen und Gesetzen, die bisher zur Eindämmung des Klimawandels erlassen wurden.

