

# Vom Ursprung der Masse

Autor(en): **Wiese, Uwe-Jens**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin / Vereinigung Schweizerischer Hochschuldozenten =  
Association Suisse des Professeurs d'Université**

Band (Jahr): **32 (2006)**

Heft 4

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-894074>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ich möchte diesen kurzen Beitrag mit dem Geständnis schliessen, dass ich trotz einiger negativer Tendenzen im modernen Wissenschaftsbetrieb, gerade auch in der Schweiz, meinen Beruf als Physiker noch immer mit keinem anderen vertauschen möchte. Ich kann nur hoffen und erwarte mit vorsichtigem Optimismus, dass die Physik auch in Zukunft einige der besten jungen Leute in ihren Bann ziehen wird!

### Anmerkungen

- 1) Ich möchte in diesem Beitrag darauf verzichten, stets sowohl die männliche als auch die weibliche Form solcher Substantive zu gebrauchen, da dies den Text schwerfällig machen würde. Es sind damit aber keinerlei Vorurteile oder Absichten verbunden.
- 2) Es gibt im Universum allerdings Regionen, wie Umgebungen schwarzer Löcher, die Quellen von räumlich und zeitlich relativ kohärenter elektromagnetischer Strahlung sind ("Maser"). Sie spielen in der Astrophysik eine interessante Rolle. Ich verdanke diesen Hinweis Norbert Straumann
- 3) Der bedeutende Teilchenphysiker Valentin Telegdi (1922 - 2006), Professor an der ETH Zürich von 1976 bis 1987, sagt in seiner Abschiedsvorlesung, die Gesellschaft sei "die Nährmutter und zugleich Säugling der Hochschule"
- 4) Telegdi in seiner Abschiedsvorlesung: "Pauli wirkte als mahrender Gegenpol (zu Scherrer): in seinen Vorlesungen lernten wir, der Einfachheit nicht die Logik zu opfern!"
- 5) V. Weisskopf, "The Privilege of Being a Physicist", New York: Freeman 1989
- 6) V. Weisskopf, loc. cit.
- 7) "the handwriting is on the wall" (Edward Witten)
- 8) Man denke an die Entdeckung der Bose-Einstein Kondensation von Quantengasen, der Supraleitung oder des quantisierten Hall Effekts. Man vergegenwärtige sich die Entwicklung der Theorie "kritischer Phänomene" in der Nähe kontinuierlicher Phasenumwandlungen, oder die Entdeckung der spontanen Symmetriebrechung und der Folgen spontan gebrochener Symmetrien, etwa für Eigenschaften wie die spezifische Wärme eines Festkörpers. Man führe sich die Szenarien für die Entstehung von Turbulenz, oder den Beweis der "Stabilität der Materie", etc. zu Gemüt.
- 9) Von nun an soll aber wieder das gelten, was in Fussnote 1 steht
- 10) Bloch wurde 1905 in Zürich geboren. Er erhielt den Nobelpreis für Physik des Jahres 1952, zusammen mit E. M. Purcell, für die Erforschung der Kernspinresonanz, war Professor an der Stanford University, und starb 1983 während eines Sommeraufenthaltes in seiner Vaterstadt
- 11) Ich persönlich bereue diese Entwicklung so sehr, dass ich mit einer gewissen Genugtuung meiner Emeritierung im Jahr 2011 entgegensehe
- 12) A. Einstein, "Motive des Forschens", in "Ansprachen zu Max Plancks sechzigstem Geburtstag"

- 13) Darüber kann der Leser viel Interessantes im Beitrag von Norbert Straumann finden
- 14) Valentin Telegdi sagt dazu: "Gibt es gegenwärtig grosse Physiker wie Pauli, Fermi, Heisenberg, Bloch oder Landau? Meine Antwort auf diese Frage ist ein uneingeschränktes Ja. Vielleicht gibt es heute sogar mehr solche Leute als je zuvor, denn es gibt ja viel mehr Physiker überhaupt. Was fast allen heutigen Koryphäen abgeht, ist die Universalität der früheren. Feynman ... war vielleicht der letzte, der auf den verschiedenen Gebieten der Physik Grosses leisten konnte. Gerade weil solche olympischen Vorbilder fehlen, müssen wir Sterbliche versuchen, kollektiv unseren Studenten ein zusammenhängendes Bild der Physik zu vermitteln." Das ist freilich nur an grösseren Fakultäten möglich!

## Vom Ursprung der Masse

Uwe-Jens Wiese

*Zusammenfassung: Die Masse ist eine wichtige Eigenschaft der Materie, deren Verständnis von zentraler Bedeutung für die moderne Physik ist. Sie ist ein Mass für Trägheit und Schwere der Materie. Der Grossteil der Masse der uns umgebenden Materie resultiert aus der starken Wechselwirkungsenergie von Quarks und Gluonen im Atomkern. Der Ursprung der Masse elementarer Teilchen wie Quarks oder Elektronen ist hingegen noch weitgehend unverstanden. Der Grossteil der Masse im Universum stammt ohnehin von sogenannter dunkler Materie, deren Natur ebenfalls noch weitgehend unbekannt ist. Der Large Hadron Collider (LHC) am CERN verspricht tiefe Einsichten in diese grossen offenen Fragen der Physik.*

### 1. Einleitung

Die Masse ist eine zentrale physikalische Grösse, deren Betrachtung uns von den Anfängen der klassischen Mechanik über die moderne Physik bis zu einigen grossen ungelösten Fragen der aktuellen Forschung führt. Der Autor hat sich bewusst entschieden, in diesem Aufsatz nicht auf mathematische Formeln zu verzichten. Physik ist eine quantitative Wissenschaft, in der wir die Sachverhalte mathematisch formulieren können. In der Tat ist die Mathematik die Sprache, in der die Naturgesetze geschrieben sind. Die Alltagssprache hingegen ist oft unzulänglich, um physikalische Zusammenhänge angemessen zu erklären. Zum Verständnis dieses Aufsatzes sollen aber keine besonderen mathematischen Kenntnisse erforderlich sein. Die verwendeten Formeln lediglich die Beherrschung der Grundrechenarten voraus, und man sollte sich von ihnen keineswegs abschrecken lassen.

So wie wir in unserer Kultur Fremdsprachen pflegen, können wir auch die Mathematik als Sprache kultivieren, wenn wir uns mit Themen der quantitativen Naturwissenschaften beschäftigen. Wir können so zu tiefen Einsichten über fundamentale Eigenschaften der Natur gelangen, die wir ohne die Mathematik gar nicht formulieren könnten.

## 2. Die Masse in der klassischen Mechanik

### *Die Beschleunigung von Materie*

Als Galileo Galilei vor etwa 400 Jahren Experimente mit schiefen Ebenen machte, legte er damit den Grundstein für die moderne Naturwissenschaft. Insbesondere vermochte er die Bewegung von Körpern, die er eine schiefe Ebene heruntergleiten liess und beschrieb diese mathematisch. Ob er auch am schiefen Turm von Pisa Fallexperimente durchführte, ist historisch nicht belegt. Wir können uns aber durchaus vorstellen, dass er diesen als den ersten "Teilchenbeschleuniger" der Physikgeschichte verwendet hat. Wenn man einen Gegenstand aus einer Höhe  $h$  zu Boden fallen lässt, so dauert dies eine Zeit  $t$ . Dabei sind Fallhöhe und Falldauer durch die einfache mathematische Beziehung

$$h = \frac{1}{2} g t^2 \quad (1)$$

miteinander verknüpft. Hierbei ist  $g \approx 9.8 \text{ m/sec}^2$  der gemessene Wert der Erdbeschleunigung.

### *Die Masse als Mass der Trägheit*

Es war Sir Isaac Newton, der die Experimente Galileis mit seiner Theorie der klassischen Mechanik erstmalig umfassend erklären konnte. Newton führte jede Beschleunigung  $g$  eines Körpers auf eine Kraft

$$F = mg \quad (2)$$

zurück, die auf den Körper einwirkt. Die aus einer gegebenen Kraft  $F$  resultierende Beschleunigung  $g$  hängt dabei von der Trägheit des zu beschleunigenden Körpers ab, die durch die Masse  $m$  bestimmt wird. Dieselbe Kraft, die eine starke Beschleunigung eines Körpers mit kleiner Masse bewirkt, wird daher einen Körper grösserer Masse geringer beschleunigen.

### *Die Masse als Mass der Schwere*

Wenn man Fallexperimente mit Körpern unterschiedlicher Masse durchführt, und der Luftwiderstand dabei vernachlässigbar ist, so stellt man fest, dass alle Körper im Schwerfeld der Erde die gleiche Erdbeschleunigung  $g$  erfahren. Dies muss gemäss Gleichung (2) bedeuten, dass Körper einer grösseren Masse auch einer grösseren Schwerkraft ausgesetzt sind.

In der Tat beschreibt das Newtonsche Gravitationsgesetz die Schwerkraft als

$$F = \frac{GMm}{R^2} \quad (3)$$

Diese ist somit der Masse  $m$  des fallenden Körpers proportional. Mit anderen Worten: die Masse bestimmt nicht nur die Trägheit sondern auch die Schwere eines Körpers. Die Äquivalenz von träger und schwerer Masse hat Einstein später zum Äquivalenzprinzip geführt, das seiner allgemeinen Relativitätstheorie zu Grunde liegt. Die anderen Grössen im Gravitationsgesetz sind die Newtonsche Gravitationskonstante  $G$ , die Masse  $M$  des Körpers, der das Schwerfeld erzeugt (in unserem Fall also die Erdmasse), und der Abstand  $R$  des fallenden Körpers vom Gravitationszentrum (in unserem Fall der Erdradius).

Ein Vergleich der Gleichungen (2) und (3) führt sofort auf

$$g = \frac{GM}{R^2}, \quad (4)$$

womit die Erdbeschleunigung  $g$  durch die Newtonsche Gravitationskonstante  $G$ , die Erdmasse  $M$  und den Erdradius  $R$  ausgedrückt ist.

## 3. Die Masse in der modernen Physik

### *Die Erdmasse als Summe ihrer Bestandteile*

Woher kommt nun die Erdmasse? Wie wir wissen, besteht die uns umgebende Materie aus Atomen. Diese wiederum bestehen aus einem positiv geladenen Atomkern und einer negativ geladenen Elektronenhülle. Da Elektronen im Vergleich zu Atomkernen extrem leicht sind, ist fast die gesamte Masse des Atoms im Atomkern konzentriert. Mit anderen Worten: die Erdmasse ergibt sich (bis auf winzige Korrekturen) als Summe der Massen der Atomkerne aller im Erdkörper enthaltenen Atome.

### *Die Masse der Atomkerne*

Woher aber kommt die Masse der Atomkerne? Atomkerne bestehen aus positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen. Nun könnte man denken, dass die Masse eines Atomkerns einfach durch die Summe der Massen der darin enthaltenen Protonen und Neutronen gegeben ist. Dies ist aber nicht ganz richtig. Der Kern eines Heliumatoms beispielsweise besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen, die durch die starke Kernkraft aneinander gebunden sind. Protonen haben eine Masse  $M_p$  und Neutronen haben eine Masse  $M_n$ .

Der Heliumatomkern aber hat eine Masse

$$M_{\text{He}} = 2M_p + 2M_n - m, \quad (5)$$

die um den Betrag  $m$  kleiner ist als die Masse  $2M_p + 2M_n$  von je zwei nicht aneinander gebundenen Protonen und Neutronen. Nach Einsteins berühmter Formel

$$E = mc^2 \quad (6)$$

entspricht das Massendefizit  $m$  einer Bindungsenergie  $E$  des Atomkerns (wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit ist). Nach Einsteins Relativitätstheorie ist Masse eine Form von Energie. Entsprechend bleibt die Masse nicht unbedingt erhalten, sondern kann in andere Energieformen umgewandelt werden.

Genau dies passiert im Inneren der Sonne, wenn durch Fusion aus Protonen und Neutronen Heliumatomkerne entstehen. Das Massendefizit  $m$  wird dabei in Sonnenenergie  $E = mc^2$  umgewandelt, und bildet auf diese Weise die Grundlage allen Lebens auf der Erde.

#### Die Masse der Protonen und Neutronen

Zwar ist die Masse der Atomkerne etwas geringer als die Summe der Massen der darin enthaltenen Protonen und Neutronen, doch wird sie durch diese dominiert. Woher also kommen die Massen von Protonen und Neutronen? Wie wir heute wissen, bestehen Protonen und Neutronen aus noch kleineren Teilchen - den Quarks und Gluonen. Interessanterweise kommen Quarks und Gluonen nicht einzeln vor, sondern sind in Gruppen von je drei Quarks und einer unbestimmten Anzahl von Gluonen permanent in Protonen und Neutronen eingeschlossen. Die Kraft, die Protonen und Neutronen im Innersten zusammenhält, ist wiederum die starke Kernkraft, die durch die sogenannte Quantenchromodynamik (QCD) beschrieben wird.

Wir haben bereits am Beispiel des Heliumatomkerns gesehen, dass sich Bindungsenergie auf die Masse auswirkt. Dies ist für Protonen und Neutronen in noch viel stärkerem Masse der Fall. Insbesondere ist die Masse der Protonen und Neutronen fast ausschliesslich auf die starke Wechselwirkungsenergie fast masseloser Quarks und masseloser Gluonen zurückzuführen.

Das quantitative Verständnis der Masse von Protonen und Neutronen ist zur Zeit Gegenstand intensiver Forschung. Dazu versucht man, die QCD Theorie der Quarks und Gluonen zu lösen. Für eine analytische Lösung wurde sogar ein Preis von einer Million US Dollar ausgelobt.

Aussichtsreicher erscheinen zur Zeit aber numerische Lösungsverfahren. Die sogenannte Gitter-QCD erlaubt die Berechnung der Massen von Protonen und Neutronen (sowie vieler anderer Eigenschaften stark wechselwirkender Teilchen) durch Monte Carlo Simulation, erfordert aber sehr grosse Computerressourcen. Die Gitter-QCD wird ideal komplementiert durch die sog. chirale Störungstheorie, eine systematische Methode, die es zum Beispiel ermöglicht, den Einfluss der kleinen Quarkmassen auf die Massen der Protonen und Neutronen analytisch zu berechnen.

#### Die Schwäche der Gravitation

Wir empfinden die Schwerkraft im Alltag als eine starke Kraft, einfach weil sie vom gigantischen Erdkörper unter uns erzeugt wird. Dennoch ist die Gravitation die schwächste aller fundamentalen Wechselwirkungen und insbesondere viel schwächer als die elektrischen Kräfte. Vergleichen wir einmal die elektrostatische Abstoßungskraft

$$F_e = e^2 / r^2 \quad (7)$$

zwischen zwei Protonen der Ladung  $e$  bei einem Abstand  $r$  mit der anziehenden Gravitationskraft

$$F = \frac{GM_p^2}{r^2} \quad (8)$$

zwischen diesen beiden Teilchen. Gleichung (8) ist nichts weiter als das Newtonsche Gravitationsgesetz aus Gleichung (3) angewandt auf zwei Protonen der Masse  $M_p$ . Das Verhältnis der Schwerkraft und der elektrostatischen Kraft ist somit durch

$$\frac{F}{F_e} = \frac{GM_p^2}{e^2} = \frac{M_p^2}{e^2 M_{\text{Planck}}^2} \quad (9)$$

gegeben. Dabei haben wir die Newtonsche Gravitationskonstante  $G = 1/M_{\text{Planck}}^2$  durch die sogenannte Planckmasse  $M_{\text{Planck}}$  ausgedrückt, die als höchste relevante Massenskala der Elementarteilchenphysik gilt. Nun ist das Verhältnis der Protonmasse  $M_p$  zur Planckmasse  $M_{\text{Planck}}$  extrem klein, nämlich  $M_p/M_{\text{Planck}} \approx 10^{-19}$ , was gemäss Gleichung (9) eine sehr schwache Gravitationskraft impliziert. Wenn wir also verstehen wollen, warum die Gravitation so extrem schwach ist, müssen wir uns fragen, warum das Proton viel leichter ist als die Planckmasse. In der Tat folgt dies auf natürliche Weise aus der Eigenschaft der asymptotischen Freiheit der QCD, für deren Verständnis der Physik Nobelpreis des Jahres 2004 verliehen wurde.

#### 4. Grosse ungelöste Probleme im Zusammenhang mit der Masse

##### *Das Problem der Quark- und Elektronenmassen*

Obwohl sie zum Beispiel den Wert der Erdmasse quantitativ nur wenig beeinflussen, ist es sehr interessant zu fragen, woher die kleinen Massen der Quarks und der Elektronen kommen. Auf diese Frage gibt es heute noch keine verlässliche Antwort. Allerdings hängt sie eng mit der Suche nach dem letzten experimentell noch nicht nachgewiesenen Teilchen des Standardmodells der Elementarteilchenphysik zusammen. Dieses sogenannte Higgsteilchen wird oft als der Schlüssel zum Rätsel der Masse bezeichnet. Das Higgsteilchen ist eine quantisierte Schwingung des Higgsfeldes, welches im Vakuum den Wert  $v$  annimmt. Die Massen der Quarks und des Elektrons sind direkt proportional zu  $v$ . Allerdings sind die entsprechenden Proportionalitätskonstanten im Rahmen des Standardmodells frei wählbare unverstandene Parameter. Wir verstehen also den Ursprung der Quark- und Elektronenmassen zur Zeit nicht.

##### *Das Problem der Massenhierarchie*

Auch der Vakuumwert  $v$  des Higgsfeldes selbst gibt grosse Rätsel auf.

Da die Wechselwirkungen des Higgsfeldes (anders als die der QCD) nicht asymptotisch frei sind, verstehen wir nicht, warum  $v \approx 10^{-17} M_{\text{Planck}}$  ist und damit die Massen der Quarks und Elektronen sehr viel kleiner sind als die Planckmasse.

##### *Das Problem der dunklen Materie*

Durch Beobachtung der Rotation von Sternen um das Zentrum entfernter Galaxien wissen wir, dass Galaxien mehr enthalten als nur leuchtende Materie.

Auch die genaue Untersuchung der kosmischen Mikrowellen Hintergrundstrahlung, die unmittelbar nach dem Urknall entstanden ist, ergibt, dass im Universum etwa viermal mehr dunkle als leuchtende Materie existieren muss. Woraus besteht nun diese dunkle Materie? Zum Beispiel die Erde, aber auch alle anderen Planeten, zählen zur dunklen Materie, da sie selbst nicht leuchten. Allerdings muss es neben solchen Objekten, die aus gewöhnlicher Materie - also aus Atomen - bestehen, auch exotischere Formen der dunklen Materie geben, deren Natur noch weitgehend ungeklärt ist.

##### *Die Idee der Supersymmetrie*

Zur Erklärung der Massenhierarchie sowie der dunklen Materie verfolgt eine Mehrheit der Experten die Idee der Supersymmetrie, nach der jedes bekannte

Elementarteilchen ein noch unentdecktes Partnerteilchen besitzen soll. Das leichteste dieser Partnerteilchen wäre in der Tat ein vielversprechender Kandidat für die exotische Form der dunklen Materie. Die Supersymmetrie verspricht auch eine Lösung des Problems der Massenhierarchie und kann bei der grossen Vereinheitlichung der fundamentalen elektromagnetischen, schwachen und starken Wechselwirkungen hilfreich sein. Allerdings ist der Enthusiasmus für die Supersymmetrie nicht ungeteilt. So ist die Supersymmetrie selbst (anders als zum Beispiel die Gitter-QCD), bisher jenseits der sogenannten Störungstheorie noch nicht zufriedenstellend konstruiert worden. Sie mag daher sogar eine unnatürliche Symmetrie sein, die in der Natur vielleicht gar nicht realisiert ist.

Zudem wird das Problem der frei wählbaren Massenparameter der Elementarteilchen in Anwesenheit der Supersymmetrie eher noch schwieriger. Trotz solcher Zweifel ist die Supersymmetrie aber eine sehr interessante Idee, die neben anderen intensiv studiert wird.

##### *Der Rückzug auf das antropische Prinzip*

Obwohl wir den Ursprung der Massen der Quarks und des Elektrons heute nicht verstehen, so wissen wir doch, dass deren spezifische Werte für unsere eigene Existenz von zentraler Bedeutung sind. So wäre es möglich, dass schon bei geringfügig anderen Werten der Quarkmassen die Atomkerne - und damit die gesamte gewöhnliche Materie - instabil wären. Damit wäre jegliches Leben, zumindest wie wir es kennen, sicher unmöglich. In Ermangelung einer besseren Erklärung der Werte der Quarkmassen ziehen sich manche Experten auf das antropische Prinzip zurück: sie erklären die Werte der Quarkmassen einfach mit unserer Existenz. Mit anderen Worten: wir leben in einem Teil der Welt, in dem Leben möglich ist, eben weil die Quarkmassen dort besonders "lebensfreundliche" Werte hätten. Dies setzt voraus, dass unser Universum Teil eines noch viel grösseren "Multiversums" wäre, in dem die Quarkmassen anderswo andere Werte hätten als hier bei uns. Wiederum sind die Expertenmeinungen zu diesem Erklärungsversuch geteilt.

##### *Der Large Hadron Collider*

In der Teilchenphysik scheinen wir an einem Punkt angelangt zu sein, an dem wir durch reines Nachdenken allein keine wesentlichen Fortschritte mehr machen können. Daher ist es sehr erfreulich, dass im Jahre 2007 der Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Betrieb genommen werden wird.

Dort sollen Protonen mit bisher im Experiment noch nie erreichten Energien aufeinander geschossen werden. Wenn zwei Protonen aufeinander prallen, zerbersten sie in Quarks und Gluonen, deren hohe Energie  $E = mc^2$  sich in bisher noch unbekanntem Elementarteilchen grosser Masse  $m$  materialisieren kann. So besteht begründete Hoffnung, am LHC das Higgsteilchen zu finden. Auch nach supersymmetrischen Partnerteilchen wird intensiv gesucht werden. Es ist eine aufregende Zeit in der Teilchenphysik, und wir werden hoffentlich bald mehr über die Probleme der Massenhierarchie oder der dunklen Materie lernen, und damit auch dem Ursprung der Masse einen weiteren Schritt näher kommen.

## Das Problem der Stoffflüsse bei Energieumwandlungen

Prof. Dr. Ralph Eichler

Unser Wohlstand hängt wesentlich ab vom Zugang zu genügend und bezahlbarer Energie. Jeder Erdenbürger konsumiert heute im Durchschnitt 2000 Watt, wobei diese Leistung sehr unterschiedlich verteilt ist. Die USA führen die Spitze an mit rund 12'000 Watt, gefolgt von Europa mit 6'000 Watt. Im Vergleich dazu verbraucht ein Mensch ohne technische Hilfsmittel in Landwirtschaft, Haushalt und Industrie nur ca. 100 Watt. Es stellen sich die Fragen: Wie viel Energie kann unsere Erde in jeder Sekunde in einer gerechten Ressourcenverteilung jedem Menschen zubilligen? Können die Entwicklungsländer aufholen oder müssen die reichen Nationen abgeben?

Energie lässt sich weder erzeugen noch vernichten. Wir reden von primärer Energie, die aus primären Energieträgern wie Wind, Wasser in Stauseen, Kohle, Erdöl, Erdgas, Uran, Sonnenlicht, Erdwärme gewonnen wird, und von Endenergie wie Beleuchtung, Bewegung von Fahrzeugen und Maschinen, Wärme für Heizung, Kochen und industrielle Prozesse. Die physikalischen Gesetze bestimmen den maximalen Wirkungsgrad der Umwandlung von einer Energieform in eine andere. Der heikle Punkt ist hier - da keine Energie verloren gehen kann -, wie viel unbrauchbare Energie z.B. in Form von nicht verwertbarer Abwärme bei der Umwandlung entsteht.

### Gefragte Ingenieurskunst zur Steigerung des Wirkungsgrades

Die Ingenieurskunst besteht nun darin, die technischen Geräte und Maschinen so zu konstruieren, dass der physikalische Idealfall möglichst nahe erreicht wird.

Die Physik erlaubt aber auch einen ökonomischen Wirkungsgrad von über 100%. Mittels Wärmepumpe kann der Garten abgekühlt und die entzogene Wärme dem Haus zugeführt werden. Da die entzogene Wärme aus dem Garten gratis ist, erhält man mehr Wärmeenergie als der Betrieb der Wärmepumpe benötigt. Durch erhöhten Stromverbrauch wird also gesamtheitlich betrachtet Energie eingespart. Diese beispielhaft aufgezählten Effizienzsteigerungen bewirken also, dass bei gleich bleibender Endenergie der Verbrauch von primären Energieträgern gesenkt werden kann. Der Gesamtenergieverbrauch der Erdenbürger ist nur ein Zehntausendstel der Energie, welche die Sonne täglich auf unsere Erde strahlt. Der absolute Verbrauch ist also nicht das direkte Problem.

Oben wurden primäre Energieträger (Kohle, Uran, Erdgas etc.) erwähnt, alles Materien, aus denen primäre Energie gewonnen wird. Beispiele sind Wärmeenergie bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen sowie bei der Spaltung von Uran, Bewegungsenergie von Wasser beim Gefälle aus den Bergen. All diesen Beispielen gemeinsam sind die Stoffflüsse, wie der Entzug von nicht erneuerbarer Materie, wie der Ausstoss von Treibhausgasen ( $\text{CO}_2$ ) oder anderen Schadstoffen (Russ,  $\text{NO}_x$ , Ozon), wie die Produktion von radioaktivem Abfall oder wie der Verbrauch von schützenswerter Landschaft durch Stauseen. Diese Stoffflüsse verursachen Klimaänderungen, Gesundheitsschäden oder finden, wie etwa bei den radioaktiven Abfällen, nur bedingte Akzeptanz in der Bevölkerung. Die Energiegewinnung aus Biomasse nimmt hinsichtlich der Treibhausproblematik eine neutrale Rolle ein. Bei der Verbrennung von Holz oder aus Holz gewonnenem Erdgas wird beispielsweise gleich viel  $\text{CO}_2$  frei gesetzt wie die Natur zuvor mittels Photosynthese in das Holz eingebracht hat. Würde man das Holz im Wald verrotten lassen, entstünde ebenfalls  $\text{CO}_2$  - eine Nutzung ist daher sinnvoller.

Hinsichtlich Stoffflüssen schneiden Sonnenkraftwerke (solarchemische, solarthermische oder Photovoltaik) und Windparks am besten ab. Auch hier gibt es mitunter Akzeptanzprobleme wegen des Landschaftschutzes. Ihr grösster Nachteil ist jedoch der zeitlich schwankende Anfall der Energie. Da auch der Energieverbrauch sowohl im Tagesrhythmus als auch im Rhythmus der Jahreszeiten wechselt und zusätzlich eine stochastische Komponente aufweist, ist die Bereitstellung von zusätzlicher Regelenergie unabdingbar. Solange der Anteil der stochastischen Energiebeiträge prozentual klein ist, lassen sich die Schwankungen leicht regeln. Bei grösserem Anteil wird die Regelenergie aus z.B. Wasser- oder Gaskraftwerken immer wichtiger und trägt zu den Kosten der sauberen Energiequellen bei. Daher ist die Energiespeicherung ein wichtiges Thema für die Energieforschung.