

Aus Energie wird Elektrizität

Energiebilanzen
für
Kraftwerke



Bei allen Anlagen und Kraftwerken zur Elektrizitätsproduktion lässt sich fragen, in welchem Verhältnis in einer ganzheitlichen Betrachtung die produzierte Elektrizität zum Energieaufwand steht.

Diese Problemstellung war für das Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW) der Anlass, im Rahmen einer Studie die energetische Qualität der Wasserkraftnutzung im Vergleich zu anderen stromproduzierenden Anlagen untersuchen zu lassen. Gesamthaft wurden 17 verschiedene Kraftwerke und Anlagen untersucht und energetisch bilanziert. Daraus wurden verschiedene energetische Kennziffern abgeleitet, die die energetische Qualität der Kraftwerke aufzeigen. Sie geben u.a. Antwort auf die Frage, wievielmals mehr Energie in einer Anlage erzeugt werden kann, als für deren Bau, für die Energiebereitstellung, die Elektrizitätserzeugung, den Betrieb sowie den Abbruch und die Entsorgung aufgewendet werden muss.

Da sich die Studie vor allem an Fachleute richtet, hat sich das BWW entschlossen, zusätzlich eine allgemein verständliche Kurzfassung herauszugeben, in welcher in knapper Weise die methodischen Grundlagen dargestellt und einige Resultate beschrieben werden.

Leider hat die Auswahl und Präsentation der Studien-Resultate in der ersten Auflage der Kurzfassung zu Missverständnissen und Fehlinterpretationen Anlass gegeben. Die vorliegende zweite Fassung wurde entsprechend angepasst, insbesondere bezüglich der Auswahl der energetischen Kennziffern.

Jene Leser, die sich aufgrund der Lektüre für die Hauptstudie interessieren, können diese bei der Eidgenössischen Drucksachen- und Materialzentrale, 3003 Bern (Best.-Nr. 804.307), bestellen.

In diesem Sinne wünscht das BWW der vorliegenden Schrift eine interessierte Leserschaft.

Autoren:

Walter Baumgartner
Christoph Muggli
Basics AG, 8035 Zürich

Grafik:

Rodolfo Sacchi
8001 Zürich

Copyright:

Bundesamt für
Wasserwirtschaft
2503 Biel

Bezugsquelle:

Eidg. Drucksachen-
und Materialzentrale
3003 Bern
Best.-Nr. 804.400 d

2. überarbeitete Auflage
1997

Worum geht es?	4
Was ist eine Energiebilanz?	5
Ein bisschen Physik: Energieflüsse	
Vier Energieflüsse bilden die Energiebilanz	
Was wird bei einer Energiebilanz berücksichtigt?	11
Wie kann eine Energiebilanz interpretiert werden?	14
Gütefaktoren für verschiedene Kraftwerke	15
Die Kraftwerke im einzelnen	18
Speicherkraftwerk Marmorera/Tinzen	
Laufwasser-Hochdruck- kraftwerk Fieschertal	
Laufwasserkraftwerk Aarberg	
Laufwasserkraftwerk Bannwil	
Kleine Windenergieanlage Simplan	
Kleine Photovoltaikanlage (Schrägdach)	
Photovoltaisches Kraftwerk Mont Soleil	
Blockheizkraftwerk Hardau	
Gas- und Dampfturbinen- kraftwerk	
Ölthermisches Kraftwerk	
Steinkohlekraftwerk	
Siedewasserreaktor Leibstadt	

Worum geht es?

In der Landwirtschaft wird seit alters her darüber nachgedacht, in welchem Verhältnis der Ertrag eines Ackers zum aufgewendeten Saatgut, zum Dünger etc. stehen mag. Je grösser dieses Verhältnis ist, desto besser wird der Acker ausgenützt.

Eine analoge Fragestellung ergibt sich auch für die Erzeugung von Elektrizität: Für die Produktion von Elektrizität muss ja zuerst Energie hineingesteckt werden, etwa für den Bau und den Betrieb des Kraftwerkes. Erst dann kann die Elektrizität gewonnen werden. Je grösser das Verhältnis zwischen der produzierten Elektrizität und der für die Produktion der Elektrizität aufgewendeten Energie ist, desto effizienter ist die Elektrizitätsproduktion.

Elektrizität kann auf die verschiedensten Arten erzeugt werden. Die Möglichkeiten reichen von den herkömmlichen Wasserkraftwerken über die Kernkraftwerke bis hin zur photovoltaischen Erzeugung von Strom aus Sonnenenergie.

Zentral für die Ermittlung der energetischen Qualität der Elektrizitätserzeugung ist die «Energiebilanz», ein möglichst genaues Bild aller wichtigen Energieflüsse in einem Kraftwerk. Darauf basierend können dann verschiedene energetische Kennziffern gebildet werden. Mit diesen Faktoren kann man – in unterschiedlicher Hinsicht – die Frage beantworten, wievielmals mehr Energie in Form von Elektrizität gewonnen wird, als in das Kraftwerk investiert werden muss.

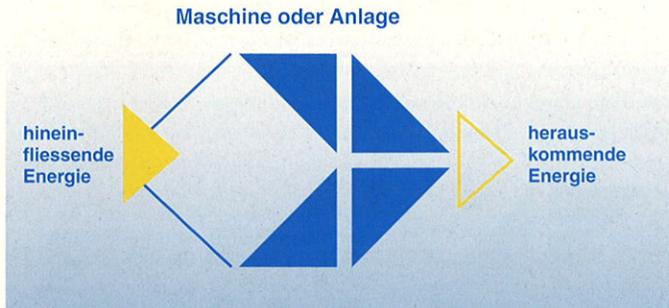
Nebst diesen energetischen Kennziffern gibt es aber viele weitere – hier nicht behandelte – zum Teil gegenläufige Kriterien, die bei einem Entscheid für oder gegen ein bestimmtes Kraftwerk von Bedeutung sind. Im Vordergrund stehen sicher die Kosten und die verfügbare Leistung der produzierten Elektrizität. Dann spielt die zeitliche Verfügbarkeit, aber auch das gesamte Produktionspotential eine wichtige Rolle. Auch die Versorgungssicherheit wird ins Kalkül eingehen, genauso wie die externen Kosten (mit oder ohne Betrachtung des Risikos von Grossunfällen) und ganz generell die Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit der genutzten Energieträger.

Ein bisschen Physik: Energieflüsse

Was ist eine Energiebilanz?

Um zu verstehen, wie Energiebilanzen für elektrizitätproduzierende Anlagen berechnet werden, sind einige Grundkenntnisse über Energieflüsse nötig.

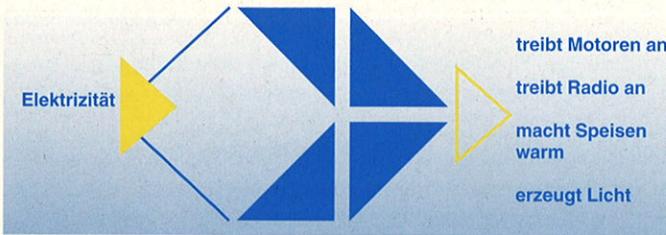
Für irgend eine Maschine oder Anlage sind immer zwei Energieflüsse zu unterscheiden. Es fließt Energie in die Maschine oder Anlage hinein, und es fließt genau die gleiche Energiemenge wieder heraus. Dies ist natürlich nur richtig, wenn in der Maschine oder der Anlage keine Energie gespeichert oder – umgekehrt – kein Energiespeicher entleert wird.



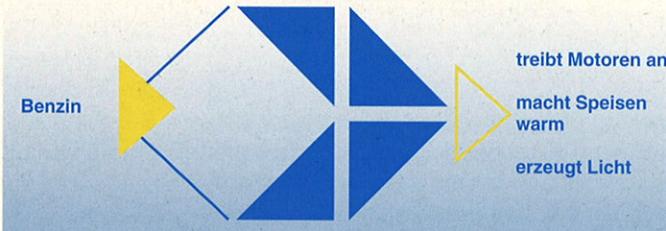
Es gilt also immer: Was an Energie in eine Anlage hineinfließt, fließt auch wieder heraus. Diesen Sachverhalt beschreiben die Physiker als den «Energieerhaltungssatz». Er besagt: Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden; man hat immer gleichviel davon.

Aber warum kostet dann Energie etwas? Die Antwort ist: Es gibt verschiedene Energieformen, und diese Energieformen sind unterschiedlich gut verwendbar. Gewisse Aufgaben sind mit einer bestimmten Energieform deutlich besser auszuführen als mit einer anderen. Drei Beispiele sollen das verdeutlichen.

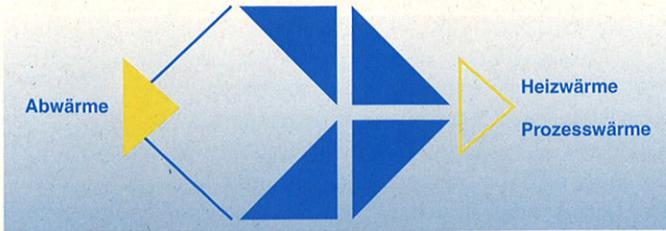
Die interessanteste Energieform ist die **Elektrizität**. Mit ihr kann man Motoren antreiben, Radios laufen lassen, kochen, Licht erzeugen und vieles mehr. Wertvoll ist die Elektrizität vor allem deshalb, weil mit ihr fast alles möglich ist. Es handelt sich also um eine hochwertige Energieform.



Ebenfalls energetisch hochwertig ist das **Benzin**. Nur wenige Liter reichen aus, mit einem Auto 100 Kilometer weit zu fahren. Kochen (mit etwas Vorsicht) und sogar die Erzeugung von Licht wären grundsätzlich auch mit Benzin möglich. Aber ein Radio mit Benzin laufen zu lassen, ist schon viel schwieriger. Hierzu müsste zuerst aus der Energie, die im Benzin steckt, mit einem Generator Elektrizität erzeugt und mit der in Elektrizität umgewandelten Energie das Radio betrieben werden.

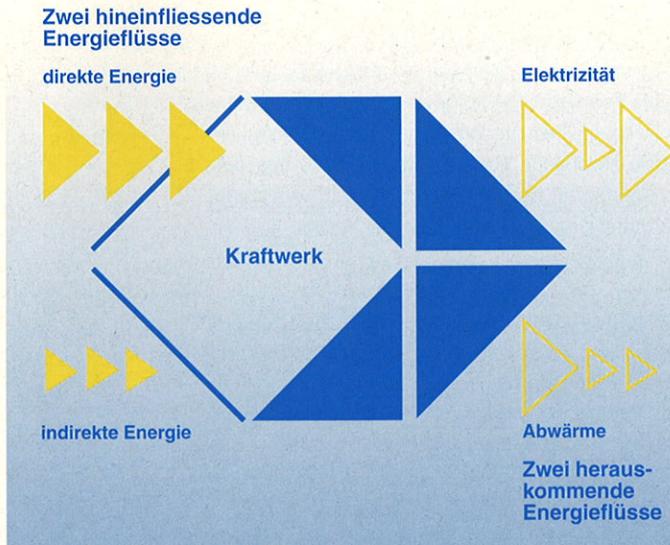


Im Gegensatz zu Elektrizität und Benzin ist eine Energieform wie die **Abwärme** – etwa diejenige eines Kernkraftwerkes – nicht sehr wertvoll. Die Abwärme entweicht als warme, feuchte Luft mit einer Temperatur von etwa 30 bis 35 Grad aus dem Kühlturm. Diese Temperatur ist so niedrig, dass die Abwärme sogar für Heizzwecke kaum unmittelbar zu gebrauchen ist. Sie kann aber für die Raumheizung oder für Industrieprozesse genutzt werden, wenn man sie auf einem etwas höheren Temperaturniveau «übernimmt». Dafür muss eine kleine Verringerung der Elektrizitätsproduktion in Kauf genommen werden. In bescheidenem Masse geschieht dies mit Fernwärmenetzen, um Gebäude in der Umgebung zu beheizen oder nahe gelegene Industriebetriebe mit Prozesswärme zu versorgen.



Vier Energieflüsse bilden die Energiebilanz

Ein Kraftwerk produziert also keine Energie, sondern es wandelt Energie in eine andere Form um. Für Elektrizität produzierende Anlagen sind vier Arten von Energieflüssen zu unterscheiden, nämlich zwei Energieflüsse, die in das Kraftwerk hineinfließen, und zwei Energieflüsse, die das Kraftwerk verlassen:



Am einfachsten zu verstehen sind die beiden herauskommenden Energieflüsse:

- Die produzierte Elektrizität, welche an das Stromnetz abgegeben und durch Haushalte, Industrie und Dienstleistungen genutzt wird.
- Die unvermeidliche Abwärme. Sie ist beispielsweise bei Kernkraftwerken als Kühlturmfabne sichtbar. Aber auch Wasserkraftwerke «produzieren» Abwärme: Die Generatoren werden warm, wenn sie Elektrizität erzeugen.

Bei den hineingehenden Energieflüssen wird zwischen «direkter» und «indirekter» Energie unterschieden:

- Die «direkte» Energie ist jene Energie, die «offensichtlich» in das Kraftwerk hineingebracht wird, um Elektrizität zu erzeugen. Beispiele sind: die Energie des Wassers in einem Wasserkraftwerk, die Energie in den Kernbrennstoffen in einem Kernkraftwerk oder die Energie der Kohle in einem Kohlekraftwerk.
- Die «indirekten» Energieflüsse sind etwas versteckt. Hier geht es um jene Energie, die beispielsweise aufgewendet werden musste, um ein Kraftwerk zu bauen. Dazu gehört aber auch jene Energie, die nötig war, die Kohle abzubauen und zum Kraftwerk zu transportieren, sowie die Energie für den Kraftwerksbetrieb (Beleuchtung, Heizung, Schmiermittel usw.), den Abbruch der Anlage und die Entsorgung.

Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden. Wie zeigt sich das bei diesen vier Energieflüssen? Zählt man je die hineingehenden und herauskommenden Energieflüsse zusammen, so müssen deren Summen gleich gross sein. Was an Energie in ein Kraftwerk hineingeht, muss auch wieder herauskommen.

Wie können aber die verschiedenen Energieformen zusammengezählt werden? Zum Beispiel Benzin und Abwärme? Oder Elektrizität und Kohle? Um die Energieflüsse zusammenzuzählen, sind zwei Punkte wichtig:

- Die verschiedenen Energieformen sind in die gleiche Masseinheit umzurechnen. Die allgemeine Energieeinheit ist das Joule (abgekürzt: J). Da das Joule eine sehr kleine Einheit ist, wird oft ein Vielfaches dieser Einheit verwendet, etwa das Megajoule (abgekürzt: MJ, eine Million Joule) oder das Terajoule (abgekürzt: TJ, eine Billion Joule). Im Elektrizitätsbereich ist ferner die Kilowattstunde eine wichtige Energieeinheit. Auch für sie werden Vielfache verwendet, vor allem die Gigawattstunde (abgekürzt: GWh, eine Million Kilowattstunden).
- Für die Umrechnung in eine einheitliche Masseinheit werden Umrechnungsfaktoren verwendet, die im Labor bestimmt wurden. So ist ein Liter Benzin bezüglich seinem Energieinhalt gleich viel wert wie etwa 9 Kilowattstunden Elektrizität. Die folgende Tabelle gibt einige Beispiele für solche Umrechnungsfaktoren. Die Tabelle ist wie folgt zu lesen: Eine Kilowattstunde (kWh) Elektrizität entspricht 3.6 Megajoule (MJ) in allgemeinen Energieeinheiten, 0.0843 Kilogramm (kg) Heizöl, 0.0989 Kubikmeter (m³) Erdgas oder 0.11 Liter (l) Benzin.

	Energie	Elektrizität	Heizöl	Erdgas	Benzin
	MJ	kWh	kg	m ³	l
Energie	MJ	1	0.28	0.0234	0.0310
Elektrizität	kWh	3.60	1	0.0843	0.11
Heizöl	kg	42.70	11.86	1	1.32
Erdgas	m ³	36.40	10.11	0.85	1.13
Benzin	l	32.30	8.97	0.76	1

Umwandlungsfaktoren
für verschiedene Energie-
formen

Zumeist werden für die Elektrizität in Energiebilanzen aber nicht die oben erwähnten Umwandlungsfaktoren verwendet, sondern Faktoren, welche die Elektrizität um das 2.67fache höher bewerten. Diese hier auch zahlenmässig vorgenommene Höherbewertung wird damit begründet, dass für die Erzeugung «einer Einheit Elektrizität» in einem durchschnittlichen thermischen Kraftwerk etwa «2.67 Einheiten Öl, Kohle oder Gas» benötigt werden, die Elektrizität also um diesen Faktor mehr «wert» ist. Dieser Faktor entspricht einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von 37.5%. Da man hier auf die «primären» Energieträger (Brennstoffe) Öl, Kohle oder Gas Bezug nimmt, spricht man auch von der «primärenergetischen» Bewertung der Elektrizität. Diese Höherbewertung der Elektrizität kann im übrigen rein rechnerisch zur Folge haben, dass zahlenmässig die ins Kraftwerk hineinfließende Energie nicht gleich der herauskommenden ist.

Und was ist nun die «Energiebilanz»? Sie ist nichts anderes als die möglichst detaillierte Erfassung der vier Energieflüsse, die in ein Kraftwerk hineinfließen bzw. dieses wieder verlassen.

Was wird bei einer Energiebilanz berücksichtigt?

Um eine Energiebilanz aufzustellen, müssen die oben beschriebenen vier Energieflüsse quantifiziert werden. Da ohne die erwähnte Höherbewertung der Elektrizität die Summe der zwei ins Kraftwerk hineinfließenden Energieflüsse gleich der Summe der herauskommenden Energieflüsse sein muss, genügt es, drei der vier Energieflüsse zu bestimmen. Der vierte (das ist aus praktischen Gründen immer die Abwärme) kann als Restgröße leicht berechnet werden.

Am einfachsten zu quantifizieren ist die **produzierte Elektrizität**. Es ist jene Elektrizität, die vom Kraftwerk hergestellt und an das Netz abgegeben wird. Sie kann leicht mit einem Zähler gemessen werden.

Auch die **direkte Energie** ist recht einfach zu ermitteln. Hierzu kann man die in die Anlage gebrachte Energie direkt messen (etwa über das Gewicht oder das Volumen eines Brennstoffes). Oder sie ergibt sich über den Wirkungsgrad (etwa bei einem Wasserkraftwerk), indem man die produzierte Elektrizitätsmenge durch den Wirkungsgrad teilt.

Deutlich schwieriger ist es, die **indirekte Energie** in den Griff zu bekommen. Hier geht es darum, herauszufinden, wieviel Energie auf «versteckte» Weise in das Kraftwerk fließt oder bereits hineingeflossen ist. Im Detail ist zu ermitteln, bei welchen Prozessen wieviel Energie zu welchem Zweck aufgewendet werden musste, um das Kraftwerk zu bauen, die Brennstoffe bereitzustellen usw. Die Bestimmung dieser Energieflüsse ist damit die Hauptarbeit beim Aufstellen einer Energiebilanz.

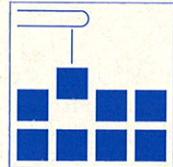
Die Ermittlung des indirekten Energieflusses ist dabei sehr umfassend zu verstehen. Es muss der ganze Lebenszyklus des Kraftwerkes «von der Wiege bis zur Bahre» berücksichtigt werden, von der Bereitstellung der direkten Energie (Gas, Kohle etc.), über den Bau des Kraftwerks bis zu dessen Entsorgung.

Bei Kraftwerken, die zur Produktion von Elektrizität nicht regenerierbare Energien verwenden, steht die **Bereitstellung der direkten Energie** am Anfang. Es geht hier um jene Energie, die erforderlich ist, um Gas, Kohle, Öl oder Uran aus der Erde zu holen, geeignet aufzubereiten und schliesslich zum Kraftwerk zu transportieren. Der hierfür nötige Energieaufwand



hängt von zahlreichen Faktoren ab. So zum Beispiel davon, ob das Gas aus der Nordsee oder aus Russland in die Schweiz kommt oder ob der Brennstoff für Kernkraftwerke in Frankreich oder Deutschland eingekauft wird. Da die Herkunft der eingeführten Energieträger in die Schweiz bekannt ist, können für jeden Energieträger Durchschnittswerte ermittelt werden.

Beim **Bau des Kraftwerks** ist die sogenannte Baustellenenergie einzubeziehen. Es handelt sich um jenen Energieverbrauch, der beim Bauen selbst anfällt: Diesel für Baumaschinen und Transporte, Elektrizität für Krane, Betonmischer usw.



Ferner muss die Energie berücksichtigt werden, welche für die Herstellung der verwendeten **Baumaterialien** (zum Beispiel Zement) und **Geräte** (zum Beispiel Turbinen) aufgewendet wird. Die folgende Tabelle zeigt für einige wichtige Materialien den entsprechenden Energieaufwand.

Material	Brennstoffe (in Mega-joule je Tonne Material)	Elektrizität (in Mega-joule je Tonne Material)
Aluminium	50'571	62'833
Beton	648	199
Glas	10'201	571
Gummi	24'100	5'159
Isolierschaum	36'110	21'333
Sprengstoff	26'521	1'040
Stahl	7'720	5'855
Zement	3'543	689

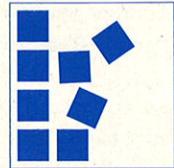
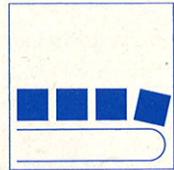
Energieaufwand für die Herstellung verschiedener Materialien

Die Hauptarbeit bei der Berechnung der indirekten Energie besteht in der Erstellung eines genauen Inventars dieser Materialien. Mit dem oben ausgewiesenen Energieaufwand pro Tonne lässt sich dann die gesamte verbrauchte Energie berechnen, die in den Materialien für Gebäude, Stau-mauern, Generatoren, Turbinen usw. steckt.

Auch während des **Betriebs** des Kraftwerks braucht es Energie. Zum Beispiel wird Fett benötigt, um die Lager zu schmieren. Oder es braucht Transporte, um die Schlacken aus einem Kohlekraftwerk wegzubringen. Auch wenn die Betriebsenergie anteilmässig nicht von Bedeutung ist, ist sie aus grundsätzlichen Überlegungen zu berücksichtigen.

Wenn ein Kraftwerk seine (technische) Lebensdauer erreicht hat, muss es abgebrochen oder allenfalls total erneuert werden. Beim **Abbruch** entstehen – was immer wieder vergessen wird – auch energetische Aufwendungen. Und diese sind in der Analyse des indirekten Energieverbrauchs ebenfalls zu berücksichtigen.

Schliesslich gilt es, die **Entsorgung** sicherzustellen. Vor allem bei Kernkraftwerken ist dies ein wichtiges Thema. Die Endlagerung der radioaktiven Abfälle erfordert erhebliche bauliche Anstrengungen (zum Beispiel Errichtung, Überwachung und Betrieb von Felskavernen), die mit einem entsprechenden Energieaufwand verbunden sind. Aber auch bei andern Energieträgern stellen sich Entsorgungsprobleme. So müssen zum Beispiel für die Endlagerung der schwermetallhaltigen Rückstände aus der Reinigung der Abgase eines Kohlekraftwerkes geeignete Deponien errichtet werden.



Wie kann eine Energiebilanz interpretiert werden?

Für die Interpretation einer Energiebilanz kann man verschiedene energetische Kennziffern bilden. Diese können zum Beispiel zum Ausdruck bringen, wie «effizient» eine Kraftwerk ist, d.h. wievielmals mehr Energie erzeugt wird als man hineinsteckt oder hineingesteckt hat.

Es gibt viele Möglichkeiten, solche Kennziffern zu definieren. Im folgenden wird eine Kennziffer mit einer sehr anschaulichen Bedeutung herausgegriffen: der **Gütefaktor**.

Beim Gütefaktor vergleicht man die produzierte Elektrizität mit dem gesamten Energieaufwand, d.h. mit der Summe von direkter und indirekter Energie. Beim direkten Energieaufwand berücksichtigt man allerdings nur den nichterneuerbaren Teil, d.h. man zählt jene Energie nicht mit, die bei den entsprechenden Kraftwerken über das Wasser, den Wind oder die Sonne in die Anlage gelangt. Diese erneuerbaren Energien werden nicht «verbraucht» und gehen deshalb nicht in die Rechnung ein. Umgekehrt verhält es sich mit den nichterneuerbaren endlichen Ressourcen Gas, Öl, Kohle oder Uran. Sie werden verbraucht und müssen darum mitgerechnet werden.

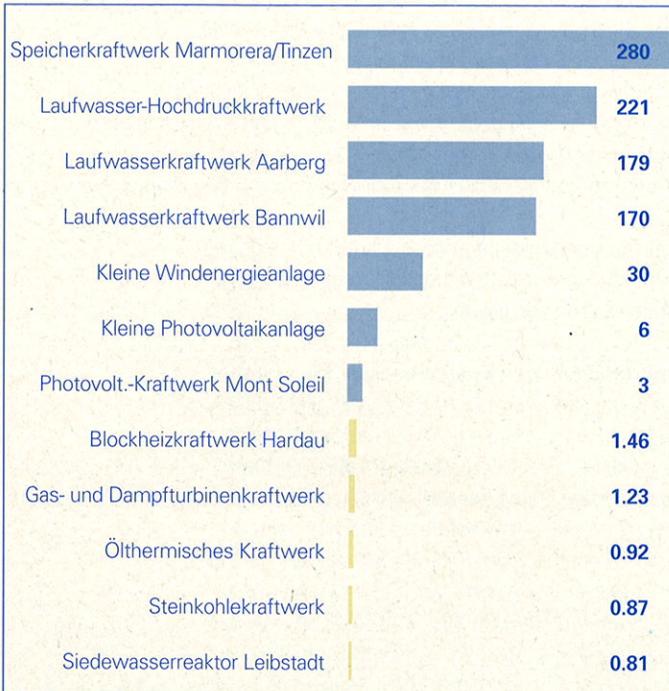
$$\text{Gütefaktor} = \frac{\text{produzierte Elektrizität}}{\text{indirekte Energie} + \text{nichterneuerbare direkte Energie}}$$

Im folgenden betrachten wir nun zwölf verschiedene Kraftwerke (im nächsten Abschnitt werden diese Werke im einzelnen dargestellt). Dabei handelt es sich jeweils um «typische» Vertreter der entsprechenden Kraftwerksart. Es sind zumeist in der Schweiz konkret vorhandene Anlagen. Zum Vergleich werden aber auch fossilthermische Kraftwerke dargestellt, die heute in der Schweiz nicht eingesetzt werden, aber in Zukunft an Bedeutung gewinnen könnten. Hierbei stehen vor allem sogenannte Kombikraftwerke (Gas- und Dampfturbinenkraftwerke) im Vordergrund.

Die folgende Abbildung zeigt die ermittelten primärenergetischen Gütefaktoren. Wir unterscheiden zwischen Kraftwerken mit erneuerbaren und solchen mit nichterneuerbaren Energiequellen.

Bei den **Kraftwerken mit erneuerbaren Energiequellen** fällt als erstes auf, wie stark die Gütefaktoren differieren: Der höchste Wert liegt bei 280, der tiefste bei 3. Alle Gütefaktoren sind also grösser als 1, d.h. für alle untersuchten Kraftwerke gilt, dass sie mehr Energie in Form von Elektrizität erzeugen, als an nichterneuerbarer Energie aufgewendet werden muss. Unter diesem Aspekt machen alle Anlagen energetisch Sinn. Und nicht überraschend ist die Erkenntnis, dass Wasserkraftwerke im Sinne einer möglichst hohen «Energieernte» ausserordentlich interessant sind. Ihre Gütefaktoren liegen zwischen 170 und 280. Im Mittelfeld liegt das Windkraftwerk mit einem Erntefaktor von 30. Die Erntefaktoren für die photovoltaische Nutzung der Sonnenenergie erreichen heute – immer für schweizerische Verhältnisse – Werte in der Grössenordnung von 3 bis 6. Allerdings ist zu bedenken, dass die verschiedenen Kraftwerke einem sehr unterschiedlichen technischen Entwicklungsstand entsprechen: Während zum Beispiel Wasserkraftwerke als technisch ausgereift gelten können, ist bei der photovoltaischen Elektrizitätserzeugung noch mit grossen technischen Fortschritten zu rechnen – mit einer entsprechenden Verbesserung der Energieausbeute.

Primärenergetische Gütefaktoren



Primärenergetische
Erntefaktoren für zwölf
verschiedene Kraftwerke

- blau: Kraftwerke mit erneuerbaren Energiequellen
- gelb: Kraftwerke mit nichterneuerbaren Energiequellen

Bei den **Kraftwerken mit nichterneuerbaren Energiequellen** variieren die Gütefaktoren nur wenig. Sie liegen alle im Bereich um 1, d.h., die Werke produzieren primärenergetisch etwa so viel Elektrizität, wie gesamthaft an nichterneuerbarer Energie (direkt und indirekt) aufgewendet werden muss. Betrachtet man die Gütefaktoren im einzelnen, so fallen die höheren Werte für das Blockheizkraftwerk (1.46) und das Gas- und Dampfturbinenkraftwerk (1.23) auf. Diese Werke nutzen die in den Brennstoffen steckende Energie deutlich effizienter als die übrigen Anlagen: Das Blockheizkraftwerk macht dies über eine weitgehende Nutzung der Abwärme zu Heizzwecken. Beim Gas- und Dampfturbinenkraftwerk werden die heißen Abgase der Gasturbine in einer nachgeschalteten Dampfturbine ein zweites Mal zur Elektrizitätserzeugung genutzt. Die übrigen Anlagen (ölthermisches Kraftwerk, Steinkohlekraftwerk und Siedewasserreaktor) liegen mit Gütefaktoren zwischen 0.92 und 0.81 recht nahe beieinander.

Die Kraftwerke im einzelnen

Im folgenden werden die zwölf Kraftwerke bzw. Anlagen kurz vorgestellt und mit einigen wichtigen Kennziffern charakterisiert. Alle Energieangaben in Terajoule (TJ) verstehen sich als «primärenergetisch», d. h., die Elektrizität ist gegenüber den Brennstoffen immer um den Faktor 2.67 höher bewertet. Deshalb kann bei Werken mit nichterneuerbaren Energiequellen die direkte nichterneuerbare Energie – rein rechnerisch – kleiner sein als die produzierte Energie. Die meisten Zahlenwerte sind gerundet. Die Reihenfolge der Werke entspricht der Grösse des ermittelten Gütefaktors.

Marmorera/Tinzen ist das höchstgelegene Kraftwerk der Kraftwerkgruppe Mittelbünden des Elektrizitätswerkes der Stadt Zürich (EWZ) unterhalb des Julierpasses. Es handelt sich um ein Speicherkraftwerk, bestehend aus dem Castilletto-Damm (Marmorera), einem 9.5 km langen Druckstollen, einer anschliessenden Druckleitung und der Zentrale Tinzen (Tinizong). Die Anlage wurde 1950 bis 1954 erbaut. Der Marmoreradamm ist ein Erddamm, welcher den Marmorerasee mit 60 Millionen Kubikmeter Inhalt aufstaut. Das Einzugsgebiet des gestauten Flusses Julia beträgt 89 km². In der Zentrale Tinzen sind zwei Pelton-Doppelturbinen von je 26 MW und eine einfache Pelton-turbine von 17 MW Leistung installiert. Da das im Marmorerasee gestaute Wasser auch durch tiefer gelegene Kraftwerke genutzt wird (Tiefencastel Ost, Sils und Rothenbrunnen), werden die Bauaufwendungen für den Erddamm entsprechend dem genutzten Marmorawasser aufgeteilt und dem Werk Tinzen nur zu 45.6% angelastet.



Speicherkraftwerk
Marmorera/Tinzen

Leistung	64 MW
Ausbauwassermenge	16.1 m ³ /sec
Maximales Gefälle	479 m
Mittlere jährliche Produktionserwartung (netto)	190.8 GWh
Wirkungsgrad	85.8%
Lebensdauer der Anlage	80 Jahre
Gesamte indirekte Energie	524 TJ
Gesamte nichterneuerbare direkte Energie	0 TJ
Gesamte produzierte Energie	146'700 TJ
Primärenergetischer Gütefaktor	280

Das Kraftwerk Fieschertal der Electricité Neuchâtoise SA nutzt das Wasser des Fiescher Gletschers im Fieschertal. Statt eines Staubeckens ist ein Rückhalte-Ableitungsstollen gebaut worden, der einen Nutzinhalt von 40'000 Kubikmetern aufweist. Dem Ableitungsstollen vorgelagert ist ein Entkieser von 30 m Länge und ein Entsander von 80 m Länge.



Laufwasser-
Hochdruckkraftwerk
Fieschertal

Leistung	60 MW
Ausbauwassermenge	14.2 m ³ /sec
Maximales Gefälle	525.5 m
Mittlere jährliche Produktions Erwartung (netto)	110 GWh
Wirkungsgrad	85.8 %
Lebensdauer der Anlage	80 Jahre
Gesamte indirekte Energie	382 TJ
Gesamte nichterneuerbare direkte Energie	0 TJ
Gesamte produzierte Energie	84'500 TJ
Primärenergetischer Gütefaktor	221

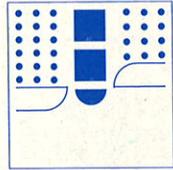
Das Wasserkraftwerk Aarberg der BKW Energie AG liegt am Anfang des Hagneck-Kanals, bei seiner Abzweigung von der Alten Aare. Das Kraftwerk wurde 1963 bis 1968 erbaut und stellt den Abschluss der Nutzbarmachung des Aareabschnittes zwischen Bern und dem Bielersee dar. Die Hauptzentrale umfasst ein Maschinenhaus mit zwei vertikal angeordneten Kaplan-turbinen von je 7.2 MW Leistung.



Laufwasserkraftwerk
Aarberg

Leistung	13.8 MW
Ausbauwassermenge	170 m ³ /sec
Gefälle	9.9 m
Mittlere jährliche Produktionserwartung (netto)	83.5 GWh
Wirkungsgrad	84.7%
Lebensdauer der Anlage	80 Jahre
Gesamte indirekte Energie	364 TJ
Gesamte nichterneuerbare direkte Energie	0 TJ
Gesamte produzierte Energie	65'000 TJ
Primärenergetischer Gütefaktor	179

Das Aarekraftwerk Bannwil wurde von der BKW Energie AG 1966 bis 1970 im Zusammenhang mit der «Zweiten Juragewässerkorrektion» erstellt. Das Werk liegt unterhalb Solothurn, zwischen den Kraftwerken Flumenthal und Wynau. Der Oberwasserkanal des alten Kraftwerkes Bannwil wurde teilweise aufgefüllt und ist heute ein Naturschutzgebiet. In der Zentrale sind drei Kaplan-Rohrturbinen von je 8.42 MW Leistung installiert. Die Abwärme der Generatoren wird über eine Wärmepumpe zur Heizung des Gebäudes verwendet.



Laufwasserkraftwerk
Bannwil

Leistung	24.5 MW
Ausbauwassermenge	350 m ³ /sec
Gefälle	8.1 m
Mittlere jährliche Produktionserwartung (netto)	148.8 GWh
Wirkungsgrad	88.6%
Lebensdauer der Anlage	80 Jahre
Gesamte indirekte Energie	672 TJ
Gesamte nichterneuerbare direkte Energie	0 TJ
Gesamte produzierte Energie	114'300 TJ
Primärenergetischer Gütefaktor	170

Die Windenergieanlage Simplon liegt 2000 m über Meer auf der Simplon-Passhöhe. Die Windgeschwindigkeit am Standort beträgt im Mittel 4.8 m/s. Die aus Dänemark importierte Anlage ist ursprünglich für den Küstenbetrieb konzipiert worden. Die Einschaltgeschwindigkeit beträgt 4 m/s; bei über 20 m/s wird die Anlage abgestellt. Die Nennleistung beträgt 8.5 kW bzw. 30 kW. Der 30 kW-Betrieb wird ab einer Windgeschwindigkeit von mindestens 11 m/s erreicht. Die zwei Rotoren von 12.5 m Durchmesser bestehen aus glasfaserverstärktem Epoxidharz. Der Turm hat eine Höhe von 22 m.



Kleine Windenergieanlage
Simplon

Leistung	0.03 MW
Mittlere jährliche Produktionserwartung (netto)	0.027 GWh
Lebensdauer der Anlage	15 Jahre
Gesamte indirekte Energie	0.13 TJ
Gesamte nichterneuerbare direkte Energie	0 TJ
Gesamte produzierte Energie	3.89 TJ
Primärenergetischer Gütefaktor	30

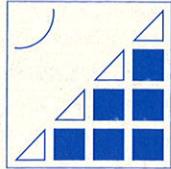
Die untersuchte photovoltaische Kleinanlage (typische Schrägdachanlage) besitzt eine Nennleistung von 3kW. Dies ist ausreichend für die Deckung des Elektrizitätsbedarfs eines kleineren Einfamilienhauses. Als Energiespeicher dient dabei das öffentliche Stromnetz, in welches die nicht gebrauchte Elektrizität eingespeisen oder zusätzliche Elektrizität bezogen wird. Es wird eine Anlage mit monokristallinen Solarpanels auf einem Schrägdach betrachtet. Die gesamte Solarzellenfläche beträgt 27.5 Quadratmeter.



Kleine Photovoltaikanlage
(Schrägdach)

Leistung	0.003 MW
Mittlere jährliche Produktionserwartung (netto)	0.003 GWh
Lebensdauer der Anlage	30 Jahre
Gesamte indirekte Energie	0.139 TJ
Gesamte nichterneuerbare direkte Energie	0 TJ
Gesamte produzierte Energie	0.864 TJ
Primärenergetischer Gütefaktor	6.2

Das «Photovoltaische Alpine Kraftwerk» (PHALK) wurde 1992 fertiggestellt und steht auf dem Mont Soleil oberhalb St.-Imier im Berner Jura. Als Solarmodule wurden 10'560 rahmenlose Lamine zu 36 monokristallinen Silizium-Solarzellen verwendet, die auf freistehenden Stahlträgern montiert sind. Die gesamte Solarzellenfläche beträgt 4'576 Quadratmeter. Die Modulflächen sind um 50 Grad geneigt. Der Nettowirkungsgrad beträgt 12.5%.



Photovoltaisches Kraftwerk
Mont Soleil

Leistung	0.5 MW
Mittlere jährliche Produktionserwartung (netto)	0.678 GWh
Lebensdauer der Anlage	30 Jahre
Gesamte indirekte Energie	68 TJ
Gesamte nichterneuerbare direkte Energie	0 TJ
Gesamte produzierte Energie	195 TJ
Primärenergetischer Gütefaktor	2.9

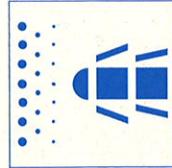
Blockheizkraftwerke werden hauptsächlich zur Wärmeproduktion für Heizzwecke eingesetzt. Die Wärmequelle ist dabei ein mit fossilen Treibstoffen betriebener Motor, welcher einen Generator antreibt. So wird neben der Nutzwärme auch Elektrizität produziert. Das Blockheizkraftwerk Hardau wurde 1989 als Ersatz einer konventionellen Heizanlage in der Städtischen Wohnsiedlung Hardau (Zürich) installiert. Das Kraftwerk versorgt über ein lokales Fernwärmenetz 985 Wohnungen, zwei Altersbauten, zwei Schulhäuser und einen Kindergarten mit Heizwärme. Das Werk besteht aus zwei Gasmotoren zu rund 480 kW mechanischer Leistung, die mit geregelten Dreiwegkatalysatoren ausgerüstet sind. Die thermische Leistung der Motoren, d.h. deren Abwärme, wird über je einen Wärmetauscher genutzt. Die maximale Wärmeleistung beträgt zusammen mit einer im Maschinenraum installierten Wärmepumpe 1'830 kW. Dazu kommt ein Spitzenlastkessel mit einer Leistung von 7 MW. Für die Berechnung des Gütefaktors wird die produzierte Wärme der produzierten Elektrizität hinzuaddiert. Im Kraftwerk wird scheinbar mehr Energie produziert als hineingesteckt wird. Dies ist kein wirklicher Effekt, sondern lediglich eine Folge der primärenergetischen Bewertung der Elektrizität, die auf eine durchschnittliche Anlage Bezug nimmt.



Blockheizkraftwerk
Hardau

Leistung	elektrisch	0.9 MW
	thermisch	8.8 MW
Mittlere jährliche Produktionserwartung (netto)		4.5 GWh
Mittlere jährliche Wärmeproduktion		12.1 GWh
Lebensdauer der Anlage		30 Jahre
Gesamte indirekte Energie		53 TJ
Gesamte nichterneuerbare direkte Energie		1'838 TJ
Gesamte produzierte Energie		2'759 TJ
Primärenergetischer Gütefaktor		1.46

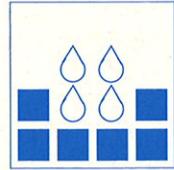
In einem Gas- und Dampfturbinenkraftwerk werden zwei Prozesse kombiniert. Zunächst werden die bei der Verbrennung von Erdgas entstehenden Abgase mit einer Temperatur von 1'000 bis 1'200 Grad Celsius einer Gasturbine zugeführt. Beim Ausströmen aus der Gasturbine sind die Abgase aber immer noch so heiss (über 500 Grad Celsius), dass man diese zur Erzeugung von Wasserdampf verwenden kann, um damit noch eine Dampfturbine zu betreiben. Die beiden Prozesse zusammengenommen weisen einen sehr guten Wirkungsgrad auf: Während der Wirkungsgrad einer Gasturbine allein zwischen 25 und 35 % liegt, ergibt die Kombination von Gas- und Dampfturbine einen Wirkungsgrad, der zwischen 45 und 55 % liegt. Zur Ermittlung des Gütefaktors wurde ein typisches deutsches Werk mit einer Leistung von 200 MW und einem Wirkungsgrad von 47 % unterstellt. Für die Gasversorgung gelten die Bedingungen des schweizerischen Hochdruck-Gasnetzes. Im Kraftwerk wird scheinbar mehr Energie produziert als hineingesteckt wird. Dies ist kein wirklicher Effekt, sondern lediglich eine Folge der primärenergetischen Bewertung der Elektrizität, die auf eine durchschnittliche Anlage Bezug nimmt.



Gas- und Dampfturbinenkraftwerk

Leistung	200 MW
Mittlere jährliche Produktionserwartung (netto)	1'314 GWh
Lebensdauer der Anlage	20 Jahre
Gesamte indirekte Energie	3'672 TJ
Gesamte nichterneuerbare direkte Energie	201'300 TJ
Gesamte produzierte Energie	252'300 TJ
Primärenergetischer Gütefaktor	1.23

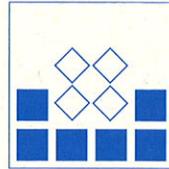
Das Kraftwerk Chavalon oberhalb Vouvry ist das einzige ölthermische Kraftwerk in der Schweiz. Es verbrennt Schweröl aus der Raffinerie Collobey. Das 300-MW-Werk dient heute ausschliesslich als Reservekraftwerk. Der Wirkungsgrad beträgt 37 %. Für die Ermittlung des Gütefaktors wurde die für europäische Verhältnisse typische jährliche Nutzungsdauer von 5'700 Stunden angenommen (effektiv sind es heute etwa 2'100 Stunden). Weiter werden ein Sprühabsorptionsverfahren zur Elimination des in den Abgasen befindlichen Schwefels sowie Vorkehren zur Reduktion der Stickoxidverbindungen in den Rauchgasen und zur Entstaubung unterstellt.



Ölthermisches Kraftwerk

Leistung	300 MW
Mittlere jährliche Produktionserwartung (netto)	1'710 GWh
Lebensdauer der Anlage	30 Jahre
Gesamte indirekte Energie	35'800 TJ
Gesamte nichterneuerbare direkte Energie	496'700 TJ
Gesamte produzierte Energie	492'500 TJ
Primärenergetischer Gütefaktor	0.92

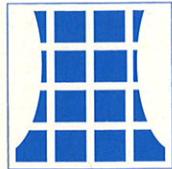
Beim Steinkohlekraftwerk beziehen sich die Anlagedaten nicht auf ein konkretes Werk, sondern entsprechen einem typischen westdeutschen Kraftwerk. Die angenommene Nettoleistung beträgt 500 MW, die jährliche Betriebszeit 4'000 Stunden. Der Wirkungsgrad beträgt 36.5%. Das Werk ist mit Elektrofiltern und einer Rauchgasentschwefelungsanlage sowie zusätzlich mit einer DeNO_x-Anlage ausgerüstet.



Steinkohlekraftwerk

Leistung	500 MW
Mittlere jährliche Produktionserwartung (netto)	2'000 GWh
Lebensdauer der Anlage	37.5 Jahre
Gesamte indirekte Energie	83'900 TJ
Gesamte nichterneuerbare direkte Energie	739'800 TJ
Gesamte produzierte Energie	720'000 TJ
Primärenergetischer Gütefaktor	0.87

Das Kernkraftwerk Leibstadt (KKL) nahm 1984 den Betrieb auf und liegt in ungefähr halber Distanz zwischen Schaffhausen und Basel. Die Leistung beträgt 990 MW. Die Kühlung erfolgt über einen 144 m hohen Kühlturm, wobei das Kühlwasser aus dem nahegelegenen Rhein stammt. Das Kernkraftwerk Leibstadt gehört zu den Leichtwasserreaktoren, bei denen normales Wasser sowohl als Moderator wie auch als Kühlmittel dient. Das Wasser wird beim Durchströmen durch den Reaktorkern bei einer Temperatur von rund 300 Grad Celsius zum Sieden gebracht (deshalb Siedereaktor). Der so erzeugte Dampf (je Sekunde rund 1.6 Tonnen) treibt die Dampfturbine an.



Siedewasserreaktor
Leibstadt

Leistung	990 MW
Mittlere jährliche Produktionserwartung (netto)	7'288 GWh
Lebensdauer der Anlage	40 Jahre
Gesamte indirekte Energie	118'700 TJ
Gesamte nichterneuerbare direkte Energie	3'331'000 TJ
Gesamte produzierte Energie	2'802'000 TJ
Primärenergetischer Gütefaktor	0.81

