

Die Nachhaltigkeit der Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien

von Wolfgang Mauch,
Hermann-Josef Wagner
und Ulrich Wagner

Überblick

Kriterien zur Beurteilung der Nachhaltigkeit werden definiert und diskutiert. An Beispielen wie Strombereitstellung, Solar-energienutzung, Wärmepumpe und Niedrigenergiehaus wird die Problematik der Beurteilung aufgezeigt. Insbesondere wird auf den Kumulierten Energieaufwand und die durch den Ressourcen- und Energieverbrauch verursachten Emissionen eingegangen. Weiterhin werden CO₂-Einsparpotentiale und Investitionen der Technologien zur Nutzung regenerativer Energien den konventionellen Verfahren, wie rationeller Energienutzung durch Wärmedämmung, gegenübergestellt.

Criteria for assessing sustainability are defined and discussed. Using electricity generation, solar energy utilization, heat pumps and low-energy housing as examples, the problematic nature of such assessment is shown. Accumulated energy consumption and the emissions caused by resource and energy use are particularly addressed. Further, renewable energy utilization and conventional measures of rational energy use such as thermal insulation are compared in terms of CO₂ reduction potential and investment needs.

1. Kategorien der Nachhaltigkeit

Nachhaltige Entwicklung (sustainable development) ist zunehmend zum umfassenden Leitbild der internationalen umwelt-, wirtschafts- und entwicklungspolitischen Debatte geworden. Nachhaltige Entwicklung ist aber wohl ein stetiger Such- und Lernprozeß, der allen drei Dimensionen des Leitbildes

- Wirtschaftlichkeit
- Umweltschutz
- Sozialverantwortung

genügen muß und die Bereitschaft zum Erkennen von Irrtümern und Irrwegen voraussetzt.

Der Begriff Nachhaltigkeit wird ebenso vielfältig wie verwirrend interpretiert. Das Deutsche Nationale Komitee des Weltenergieerates (DNK) läßt sich bei seiner Interpretation leiten von der ursprünglichen Definition, wie sie im Brundtland-Report von 1987 „Our Common Future“ gegeben wurde. Sie beschreibt Nachhaltigkeit als den Versuch, die Bedürfnisse der Gegenwart zu erfüllen ohne die Möglichkeiten für zukünftige Generationen einzuschrän-

ken. Es beinhaltet zwei Schlüsselkonzepte: die Definition der „Grundbedürfnisse“, insbesondere der Dritten Welt, und der „Beschränkung“, die sich aus dem Stand der Technik und der Anpassungsfähigkeit der Gesellschaft ergibt.

Obwohl die Brundtland Kommission sich sehr bemühte, den Begriff zu definieren, liegt doch das eigentlich Ansprechende erst in seiner vagen Aussage. Es sind zum einen vielzählige Interpretationen zur Unterstützung unterschiedlichster rivalisierender Interessen möglich, zum anderen ist der Begriff wieder so umfassend definiert, daß aus ihm „auf Arbeitsebene“ nicht ohne weiteres direkt die Punkte abgeleitet werden können, die zur Bewertung der Technik untersucht werden müssen. Auch eine eindeutige Rangfolge der teilweise konkurrierenden Bewertungskriterien untereinander wird nicht gegeben.

Relativ gut quantifizierbare Bewertungskriterien der Nachhaltigkeit sind

- Materialverbrauch,
- Primärenergiebedarf,
- Emissionen,
- Flächenverbrauch und
- ökonomische Aspekte.

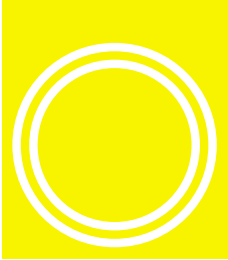
Aspekte wie Kosten, Emissionen, Materialaufwand und Kumulierter Energieaufwand (KEA) können am besten über Prozeßkettenanalysen im Rahmen von Lebenszyklusanalysen ermittelt werden. Hierbei wird ein komplexer Produktionsprozeß sukzessive in eine Vielzahl von Prozeßschritten zerlegt und das Produkt oder die Dienstleistung ganzheitlich über Herstellung, Nutzung und Entsorgung betrachtet. Eine ganze Reihe von Untersuchungen liegt hierzu vor, aus denen einige Beispiele erläutert werden sollen.

Eine wissenschaftliche Behandlung zahlreicher Aspekte der Nachhaltigkeit muß berücksichtigen, daß eine objektive Beurteilung nicht möglich ist, da jede Bewertung eine Verknüpfung von Sachinformationen und subjektiven Werturteilen darstellt. Werturteile sind aber keine feststehenden Größen, sie differieren je nach der persönlichen Einstellung oder der gesellschaftlicher Gruppen und sie sind darüber hinaus zeit- und situationsabhängig.

Dr.-Ing. Wolfgang Mauch ist Leiter der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE), München.

Prof. Dr.-Ing. Hermann-Josef Wagner ist Inhaber des Lehrstuhls für ökologisch verträgliche Energiewirtschaft an der Universität Gesamthochschule Essen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner ist Inhaber des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik an der Technischen Universität München.



Die subjektiven Werturteile unterliegen daher einer ständigen und oft auch sprunghaften Veränderung. Eine vergleichende Bewertung vieler Aspekte im Hinblick auf Nachhaltigkeit wird deshalb außerordentlich problematisch. Dies um so mehr als Wirkungsfaktoren von Schadstoffen keineswegs eindeutig erkannt und Gegenstand erheblicher Diskussionen sind. Der quantifizierte Vergleich zweier Schadstoffe entzieht sich einer objektiven Bewertung.

2. Beispiele für die Umsetzung des Begriffs Nachhaltigkeit

2.1 Die Energieträger im Vergleich

Viele Kategorien der Nachhaltigkeit können bisher nicht quantifiziert werden. Hier helfen nur qualitative Vergleiche. Die Grenzen der Quantifizierbarkeit des Begriffs Nachhaltigkeit wird hier in einem Vergleich von fossilen Energien mit regenerativen Energien veranschaulicht. Dieser Vergleich wird zeigen, daß jede Energienutzung direkt und/oder indirekt mit Umweltbelastungen verbunden ist; eine in dieser Hinsicht ideale Lösung gibt es nicht. Die Problematik eines derartigen Vergleiches wird hier nur anhand stichpunktartig herausgegriffener Aspekte dargestellt.

Schon bei der Förderung der fossilen Energieträger (Tagebau, Untertagebergbau, Offshore-Plattformen) gibt es Schadstoffbelastungen von Luft und Wasser, beim Transport, durch Emissionen oder Lecks. Die Entsorgung fossiler Feuerungen erfolgt beim Kleinverbrauch direkt über die Kamine in die Atmosphäre. Bei industriellen Feuerungen mit Rauchgas-Reinigungsanlagen müssen die Reststoffe auf Deponien (zum Teil als Sondermüll) entsorgt werden. Die Schadstoffe aus der fossilen Verbrennung können weitestgehend zurückgehalten werden. Dies ist beim Verbrennungsprodukt Kohlendioxid nicht möglich (oder nur mit unverträglichem hohem Aufwand). Wegen des unterschiedlichen Gehalts an Kohlenstoff unterscheiden sich die Primärenergieträger hinsichtlich der erzeugten CO_2 -Mengen pro freigesetzter Energieeinheit.

Bei den regenerativen Energiequellen entfallen – bis auf die Biomasse – die

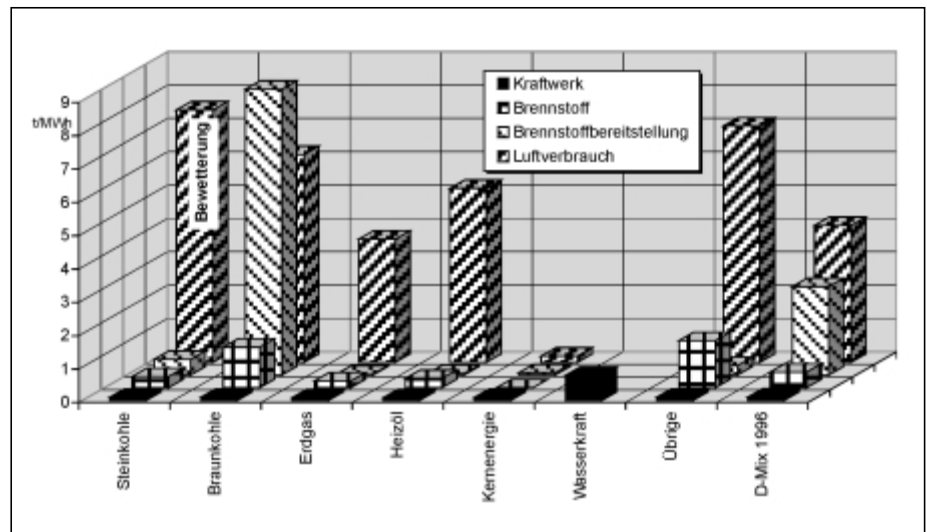


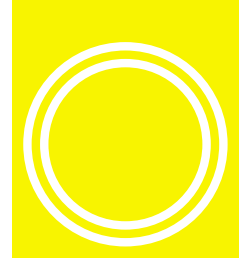
Abbildung 1: Stoff-Flüsse bei der Bereitstellung von 1 MWh elektrischer Energie [6]

Stufen Brennstoffgewinnung und -transport. Beim Anbau von Energiepflanzen als Monokulturen in Plantagen werden Dünge- und Schädlingsbekämpfungsmittel eingesetzt. Die Nutzung von Biomasse kann sehr unterschiedlich erfolgen: bei der direkten Verbrennung, etwa von Holz, sind die Emissionen mit denen bei der Ölverbrennung vergleichbar; werden als Zwischenprodukt erst Alkohole (wie Ethanol, Methanol) erzeugt, sind sie meist geringer. Bei der Erdwärmenutzung enthalten die heißen Wässer oder Dämpfe, die der Erde entnommen werden, gelöste Schadstoffe, z.B. Schwefelwasserstoff (H_2S). Wegen der geringen Energiedichte der Sonneneinstrahlung und des Windes erstrecken sich die Anlagen zur Energiegewinnung über große Flächen; der Materialbedarf dafür ist entsprechend hoch. Bei der Verbrennung von Biomasse aus Plantagen wird zwar CO_2 freigesetzt, die gleiche Menge wird jedoch immer wieder in die Pflanzen der Plantagen eingebaut, so daß im Endeffekt durch die Verbrennung kein zusätzlicher CO_2 -Eintrag in die Atmosphäre erfolgt, wohl aber durch den Anbau, Pflege und Ernte der Biomasse.

Vergleiche von Energiesystemen hinsichtlich des Kriteriums Nachhaltigkeit basieren auf dem sparsamen und möglichst rationellen Umgang mit Energie und Rohstoffen. In einem von der Bayerischen Forschungsstiftung geförderten Projekt [6] wurden ganzheitliche energetische Bilanzierungen der Energiebereitstellung durchgeführt.

Abbildung 1 zeigt einige quantifizierbare Aspekte, die sich aus den Stoffflüssen bei der Bereitstellung einer MWh elektrischer Energie ergeben. Hier sind für die klassischen Kraftwerkstechniken der Massenverbrauch für die Herstellung des Kraftwerkes, der Brennstoff selbst, die Gewinnung der Brennstoffe (z.B. Abtrag des Deckschicht bei der Braunkohlenförderung) und der Luftverbrauch bei der Verbrennung von Brennstoffen bzw. Bewitterung von Untertagebau vergleichend dargestellt. Bei der Herstellung der Kraftwerke haben die Wasserkraftwerke auf Grund der Dammbauten und Wehre einen vergleichsweise sehr hohen Massenaufwand. Der Verbrauch von Brennstoffen sowie die vorgelagerten Schritte der Brennstoffbereitstellung werden von der Braunkohle dominiert. Auch bei der Steinkohlenbereitstellung werden erhebliche Massen bewegt. Entsprechend des Strommixes für Deutschland für 1996 wurde ein mittlerer Stofffluß für die Bereitstellung einer MWh für elektrischer Energie berechnet.

Bereits dieses Beispiel zeigt, daß sogar der selbe Stoff, in diesem Fall Luft, angewandt für unterschiedliche Zwecke, ein Bewertungsproblem birgt. Analog verhält es sich mit Wasser, das bei thermischen Kraftwerken zur Kühlung verwendet, zuerst aufbereitet, gereinigt, dann erwärmt und beim Auslauf mit Sauerstoff angereichert wird. Bei Wasserkraftwerken dagegen wird dem Wasser Energie entzogen.



2.2 Solarthermische Anlagen zur Warmwasserbereitung

In diesem Beispiel geht es um die Erfassung von kumulierten Emissionen von Luftschadstoffen, die bei der Herstellung und dem Betrieb von solarthermischen Anlagen zur Warmwasserbereitung in Mehrfamilienhäusern oder in öffentlichen Gebäuden entstehen. Betrachtet werden dabei zwei unterschiedliche Anlagenvarianten:

- eine Flachkollektoranlage mit Aluminiumgehäuse (Flachkollektor) und
- eine Vakuumröhrenanlage (Vakuumkollektor).

Diese Systeme können Brennstoff aber keine konventionelle Anlage einsparen, da angebotsbedingt eine ganzjährige Versorgung mit Warmwasser nicht möglich ist.

Abbildung 2 zeigt die Primärenergie- und Emissionsbilanz zweier Kollektoren. Ein negatives Ergebnis bedeutet Reduktion der Primärenergie bzw. der Emissionen. Die Nutzung der Sonnenenergie führt bei einzelnen Schadstoffen zu höheren erzeugten Emissionen. Dies ist immer dann der Fall, wenn in der Bilanz mit einem konventionellen Heizungssystem verglichen wird, das die betrachteten Schadstoffkomponenten nicht nennenswert enthält, wie zum Beispiel SO_2 - und Staubemissionen bei Gasheizungsanlagen. Weil bei der Herstellung der Materialien für Solaranlagen nennenswert Stromverbrauch anfällt, werden die Solaranlagen über den anteiligen Stein- und Braunkohlenverbrauch der Stromerzeugung mit Schwefeldioxid und Stäuben belastet.

2.3 Wärmepumpe

Bei der Beheizung von Gebäuden zählen Wärmepumpen und Gas-Brennwertkessel zu den umweltfreundlichsten und nachhaltigsten Heizsystemen. Ein Vergleich dieser Systeme unter Berücksichtigung ihres gesamten Lebenszykluses soll im folgenden Beispiel dargestellt werden.

Beim Gas-Brennwertkessel handelt es sich um einen 11 kW Kessel mit einem Normnutzungsgrad von 108%. Die Wärmepumpe hat eine Heizleistung

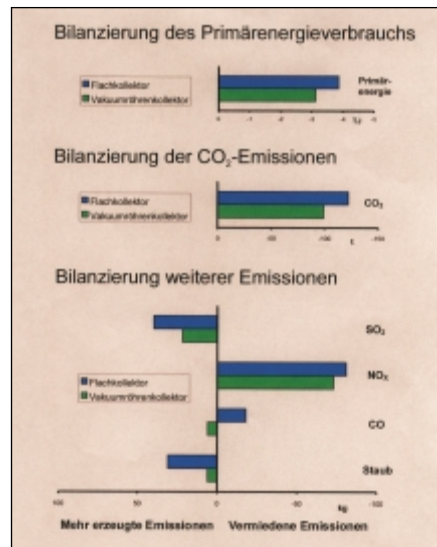


Abbildung 2: Primärenergieeinsparung und Emissionsbilanz von Kollektoranlagen für Mehrfamilienhäuser, bezogen auf eine kalkulatorische Lebensdauer der Anlagen von 20 Jahren bei substituiertem Brennstoff aus einem Gasheizsystem. Die kalkulatorische Lebensdauer der Anlagen beträgt 20 Jahre. Berücksichtigung finden die Emissionen, die durch die Herstellung der Anlagen verursacht werden. Dem werden die vermiedenen Emissionen aus den substituierten Brennstoffaufwendungen entgegengesetzt, unter Berücksichtigung der Aufwendungen für die benötigten Hilfsenergien zum Betrieb der Anlagen. Alternativ wird die Wärme mit Erdgas bereitgestellt.

von 7,8 kW und eine Leistungszahl von 4,15. Als Wärmequelle dienen zwei Erdwärmesonden mit je 40 m Länge. Diese Heizungssysteme werden in einem Einfamilienhaus mit einer Wohnfläche von 134 m² betrachtet. Der Normwärmebedarf beträgt 5,6 kW und der Jahresheizwärmebedarf 71 kWh/(m²a).

Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt. Der Herstellungs- und Entsorgungsaufwand für die beiden Systeme hat einen geringen Einfluß auf die Bilanz des ganzen Lebenszykluses. Der Einsatz einer Wärmepumpenanlage kann den KEA gegenüber dem Gas-Brennwertkessel um ca. 25% reduzieren. Wie schon beim kumulierten Energieaufwand haben die Emissionen bei der Herstellung und der Entsorgung einen geringen Anteil. Die CO_2 -Emissionen lassen sich um rd.

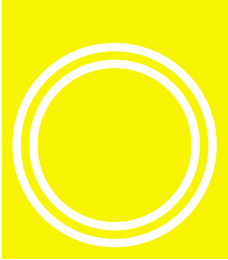
21% reduzieren. Die CH_4 -Emissionen des Gas-Brennwertkessels liegen um den Faktor 2,7 höher als die der Wärmepumpe. Einzig die SO_2 -Emissionen sind bei der Wärmepumpenanlage vergleichsweise höher, liegen aber auf einem sehr niedrigen Niveau. Nachhaltige Wärmeversorgung eines Gebäudes bedingt, daß die ressourcenschonendste Technik eingesetzt wird. Ob dies nun die Wärmepumpe oder ein Brennwertkessel oder eine Solaranlage ist, läßt sich nicht ausschließlich mit dem KEA und den Emissionen beantworten. Dazu müssen vielmehr alle Aspekte der Nachhaltigkeit Berücksichtigung finden.

2.4 Niedrigenergiehaus

Ein Niedrigenergiehaus hat einen um mindestens 25% reduzierten Heizwärmebedarf gegenüber einem Haus nach WSchVO'95. Der reduzierte Heizwärmebedarf wird allerdings durch einen verbesserten Wärmeschutz, der höhere Herstellungsaufwendungen verursacht, erkaufte.

In Abbildung 4 ist die Aufteilung des KEA_H eines Niedrigenergiehauses dargestellt. Der KEA_H beträgt 1,42 TJ. Davon entfallen 22% auf das Fundament, 19% auf das Dach und 13% auf die Außenwände. Auf die Wärmedämmung entfallen insgesamt 0,16 TJ (11%). Ein gewisser Anteil der Wärmedämmung ist erforderlich, um den vorgeschriebenen Standard nach WSchV'95 zu erreichen. Geht man von einer Reduzierung des Heizenergiebedarfs von nur 20 kWh/m²a aus, so amortisiert sich der Mehraufwand für die Wärmedämmung unter Berücksichtigung der Nutzungsgrades des Heizkessels und der Brennstoffbereitstellung nach maximal 12 Jahren. In der verbleibenden Lebensdauer wird Primärenergie eingespart.

Durch verbesserte Wärmedämmung lassen sich Brennstoff einsparen, die Heizungsanlage mit Wärmeverteilung kleiner dimensionieren (Materialeinsparung) und die Kosten der Haustechnik reduzieren. Derart nachhaltiges Bauen schont die Ressourcen künftiger Generationen. Obwohl sich das öffentliche Interesse auf Niedrigenergie-, Nullheizenergie- und Energieautarke Häuser konzentriert, darf sich nachhaltiges Handeln nicht auf



Neubauten beschränken, denn in einem Großteil des vorhandenen Gebäudebestandes könnte ein erhebliches Einsparpotential ausgeschöpft werden.

2.5 Effizienz und Kosten verschiedener Maßnahmen zur CO₂-Einsparung

Für verschiedene Maßnahmen zur rationellen Energienutzung und Nutzung regenerativer Energiequellen wurde das CO₂-Einsparpotential in konkreten Einzelfällen bestimmt. In Abbildung 5 sind die Mehrinvestitionen für verschiedenen Maßnahmen in einem Einfamilienhaus mit 134 m² Wohnfläche über den CO₂-Einsparpotentialen dargestellt.

Die Sanierung eines Einfamilienhauses Baujahr 1960 auf den Stand der WSchV'95 bzw. Niedrigenergiehausstandard bringt eine CO₂-Einsparung von 330 bzw. 390 Tonnen während der Lebensdauer von 50 Jahren. Die Mehrinvestitionen bezüglich einer Minimalsanierung (Streichen, Putzausbessern...) betragen ca. 46 bzw. 54 TDM. Die Installation einer 1 kW_{peak} Photovoltaikanlage (PV) spart in ihrer Betriebsphase (18 Jahre) ca. 10 Tonnen CO₂ durch Substitution von Strom aus dem öffentlichen Netz ein. Die Mehrinvestitionen von knapp 20 TDM beziehen sich auf die Alternative ohne PV-Anlage.

Die Kosten der Sanierungsmaßnahmen betragen ca. 0,15 DM/kgCO₂. Die PV-Anlage ist mit 2 DM/kgCO₂ deutlich teurer. Wie hiermit angedeutet kann auf diese Weise bezüglich der ökonomischen Aspekte von emissionsmindernden Maßnahmen eine Rangfolge festgelegt werden.

Nachhaltiges Handeln bedeutet in diesem Zusammenhang begrenzte Finanzmittel mit maximaler Effektivität zur Emissionsminderung einzusetzen.

3. Fazit

Nachhaltigkeit ist der verantwortungsvolle schonende Umgang mit den Ressourcen, wie Rohstoffe, Energie, Fläche, usw., in Kombination mit einer Minimierung oder gar Vermeidung der Umweltbelastungen von Luft, Wasser und Boden.

Die aufgeführten Beispiele zeigen, daß bereits bei einzelnen Ressourcen, wie Luft- oder Stoffbedarf, eine Beurteilung der Qualität der Nachhaltigkeit nie trivial ist und kaum eindeutig durchgeführt werden kann.

So ist aus Sicht der Ressourcennutzung der Stromerzeugung aus Kernenergie und Wasserkraft eindeutig der Vorzug vor Braunkohle, Steinkohle, Heizöl und Erdgas zu geben, aber natürlich gibt es eine ganze Reihe anderer hier nicht betrachteter Beurteilungskriterien, die zu anderen Ergebnissen führen können. Ein wesentliches Kriterium für nachhaltiges Handeln sollte immer die Kosteneffizienz

sein. So kann beispielsweise durch Sanierung von Gebäuden auf Niedrigenergiehausstandard mit den selben Investitionen mehr als das zehnfache an CO₂ eingespart werden gegenüber einer Photovoltaikanlage. Die eingangs beschriebenen zahlreichen Aspekte der Nachhaltigkeit sollte man weiterhin durch Erarbeiten fundierter Daten untermauern, um robuste Beurteilungskriterien für jeden Einzelnen zu schaffen. Aus der großen Palette von Kriterien kann er dann die für ihn wichtigsten Aspekte zur Beurteilung der Nachhaltigkeit auswählen

Ein eindeutiges und für die Gesellschaft gültiges Kriterium gibt es nicht.

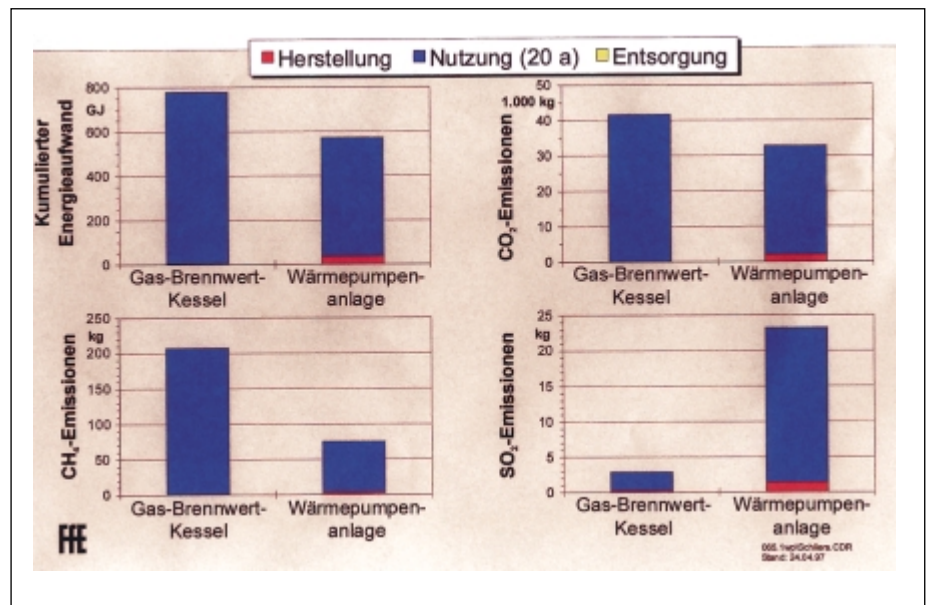
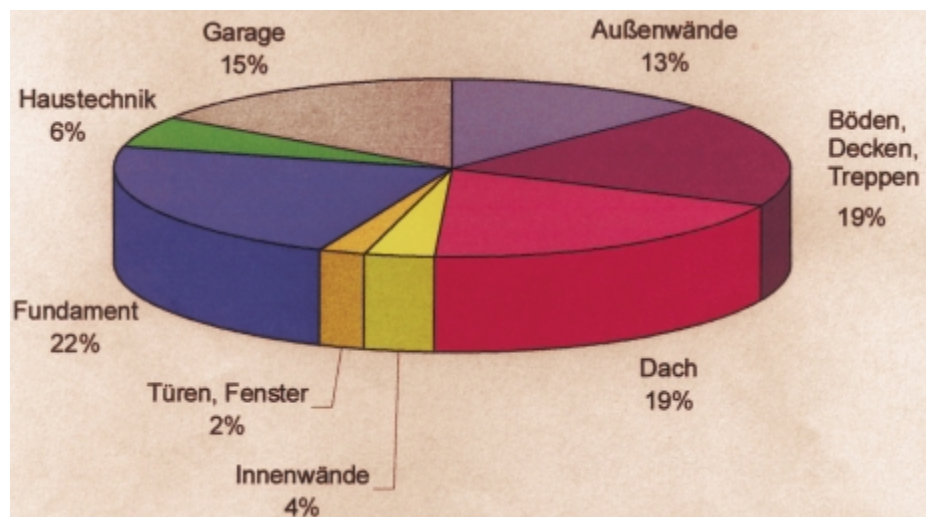


Abbildung 3: Kumulierter Energieaufwand und Emissionen eines Gas-Brennwertkessels (BWK) und einer Wärmepumpenanlage (WP) [4]

Abbildung 4: KEA_H eines Niedrigenergiehauses (157 m², ohne Keller, 100% entspricht 1,42 TJ) [5]



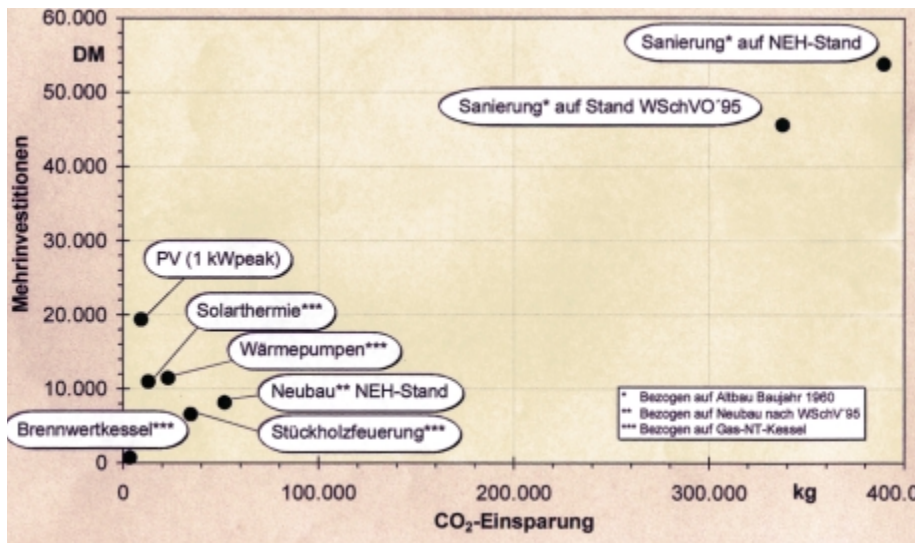
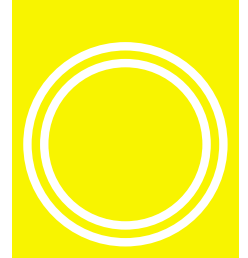


Abbildung 5: CO₂-Einsparung und dafür notwendige Mehrinvestitionen in einem Einfamilienhaus mit 134 m² Wohnfläche [3]

Jedoch kann durch einen sparsamen Umgang mit Ressourcen eine Vielzahl der im Hinblick auf Nachhaltigkeit diskutierten Aspekte positiv beeinflusst werden. Deshalb sollten vor allem den Kriterien eines möglichst sparsamen kumulierten Massen- und Primärenergieverbrauchs eine besondere Bedeutung zukommen.

Bei all den in den Beispielen genannten Aspekten der Nachhaltigkeit wurden nur Aspekte der Umweltschonung und der Wirtschaftlichkeit be-

trachtet. Auf soziale Aspekte wurde nicht eingegangen, aber gerade dieser Aspekt kann und wird nachhaltiges Handeln oft blockieren – oder auch fördern.

Nachhaltiges Handeln sollte möglichst ursachenorientiert sein und nicht nur Symptome betreffen. Nicht die CO₂-Emissionen sind das primäre Problem, sondern die steigenden Anforderungen einer wachsenden Menschheit an Energiedienstleistungen.

Literatur

- [1] H.-J. Wagner
„Ermittlung des Primärenergieaufwandes und Abschätzung der Emissionen zur Herstellung und zum Betrieb von ausgewählten Absorberanlagen zur Schwimmbadwassererwärmung und von Solarkollektoren zur Brauchwassererwärmung“, VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 6, Nr. 325, VDI-Verlag, Düsseldorf (1995)
- [2] H.-J. Wagner, P. Borsch
„Energie und Umweltbelastung“, Springer Verlag (1998)
- [3] A. Saller, W. Mauch
„Förderrichtlinie der Gemeinde Poing zur rationellen Energienutzung und zur Nutzung regenerativer Energien – Erläuterung der Förderrichtlinie und Dokumentation von Fördermaßnahmen“, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München (1997)
- [4] A. Saller
„Ganzheitliche Energie- und Stoffbilanz für eine erdgekoppelte Wärmepumpenanlage“, VDI-Bericht 1328, VDI-Verlag, Düsseldorf (1997)
- [5] C. Schmittinger
„Wege zum Niedrigenergiehaus: Ganzheitliche Bewertung“, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München (1996)
- [6] „Analyse von Energie- und Stoffströmen – Basisdaten für die ökologische Bewertung von Unternehmen, Wirtschaftsgütern und Dienstleistungen“, Projekt gefördert von der Bayerischen Forschungsförderung, (in Bearbeitung)