

## Ganzheitliche Energiebilanzen von Windkraftanlagen: Wie sauber sind die weißen Riesen?

H.-J. Wagner

**Strom aus Wind – auf den ersten Blick eine saubere Sache, schließlich „erntet“ man erneuerbare Energie. Erst auf den zweiten Blick fällt auf, wie viel Material und Aufwand notwendig sind, um eine Windenergieanlage herzustellen, aufzubauen, zu warten und zu recyceln. Was unterm Strich tatsächlich bleibt, lässt sich erst mit ganzheitlichen Energiebilanzen berechnen.**



**G**roß und schlank, strahlend weiß vor dem blauen Himmel, so kennt sie hierzulande jeder: Mit 16.000 Windrädern, eigentlich Windenergieanlagen (WEA), ist Deutschland Weltmeister in der Nutzung der Windenergie. Gut ein Drittel aller WEA der Welt stehen hier, im Jahr 2003 lieferten sie fünf Prozent des gesamten Strombedarfs. Und damit nicht genug: In Zukunft sollen die Windanlagen auch die Meere erobern. Dort weht der Wind stärker und gleichmäßiger als an Land (Abb. 1). Alleine für die deutsche Nord- und Ostsee liegen 31 Anträge zur Errichtung von Windparks vor, sieben weitere wurden bereits genehmigt. Für die ersten zwei davon – Borkum-West und Butendiek – wurden Bauaufträge bereits vergeben. (s. Tabelle 1) Doch wiegt die umweltfreundlich gewonnene Energie tatsächlich die Ressourcen auf, die der Bau, der Unterhalt

*Abb. 1: Das Meer bietet ein besseres Windangebot als das Land. In Dänemark sind erste Windparks bereits direkt vor der Küste in flachem Wasser errichtet worden. Deutschland wird mit Anlagen in tiefem Wasser weit weg von der Küste folgen: ein materialintensives und wirtschaftlich risikoreiches Unternehmen.*

und das Recycling der Windenergieanlage verbrauchen? Und wie sieht dieses Verhältnis bei den Anlagen im Meer aus, wo man in Wassertiefen von bis zu 40 Metern Stahlkonstruktionen errichten muss, die eine Plattform über dem Wasser tragen, auf der schließlich die eigentliche Windenergieanlage steht? Dieser Frage der energetischen Kosten und Nutzen gehen wir am Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft nach.

Physikalisch gesehen ist die Energiedichte des Windes, ebenso wie die der auf der Erde nutzbaren Sonneneinstrahlung, sehr gering. Somit müssen viele Anlagen gebaut und viel hochwertiges Material eingesetzt werden, um eine verhältnismäßig geringe

Energiemenge zu „ernten“. Die Werkstoffe – bei Windenergieanlagen vor allem Stahl für den Turm und Kupfer für den Generator (s. Abb. 5) – herzustellen, daraus Komponenten zu fertigen und diese wiederum zu einer Windenergieanlage zusammen zu setzen erfordert Energie, z. B. in Form von Strom, Gas und Wärme. Pro Kilowattstunde Strom aus Windkraft muss wesentlich mehr Material und damit Energie investiert werden als bei Kraftwerken, die Strom aus Kohle oder Öl produzieren. Die Frage nach der Energieeffizienz der Windenergienutzung ist also komplizierter als es zunächst aussieht.

Um das Verhältnis zwischen erzeugter und benötigter Energie der Wind-

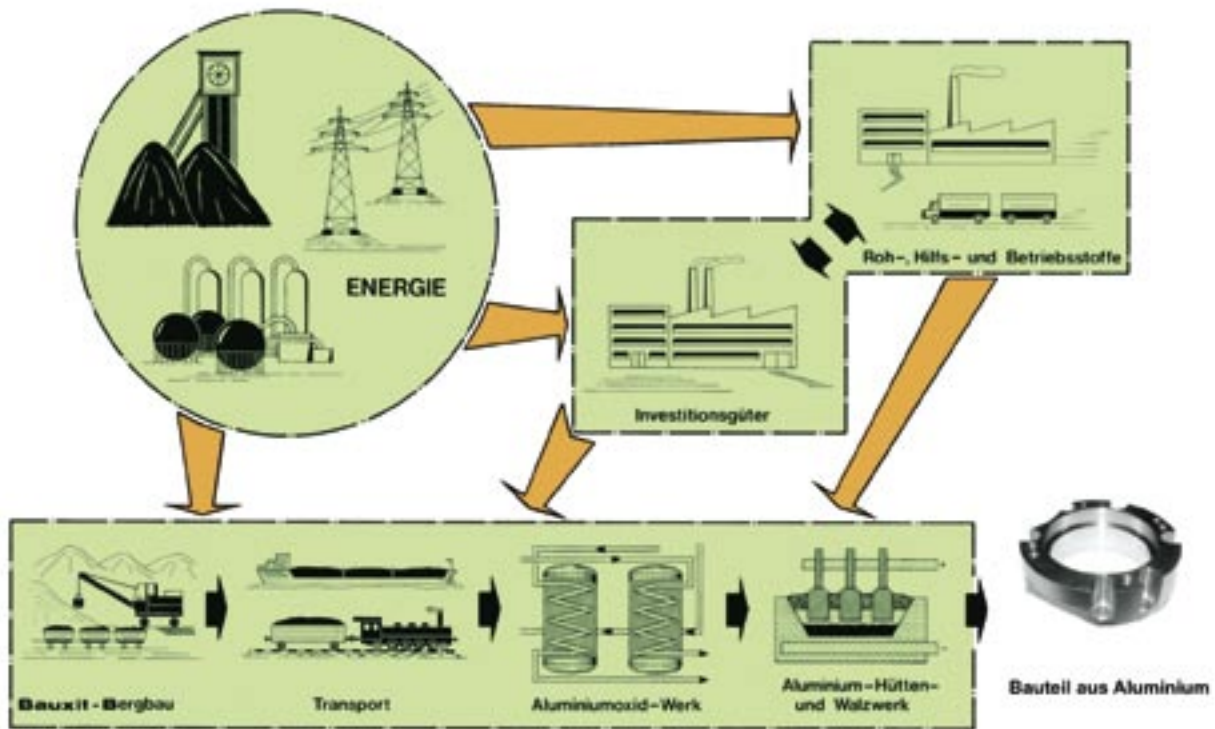


Abb. 2: Prozesskettenanalyse: In diesem Beispiel geht es um die Bilanzierung der kumulierten Energieaufwendungen für ein Aluminiumbauteil zum Beispiel für eine Windanlage.

energieanlage aufzuklären, müssen wir den Aufwand an Energie und natürlich die damit verbundenen Emissionen an Luftschadstoffen und Klimagasen erst einmal genau bestimmen, und zwar über die gesamte Lebensdauer einer Windenergieanlage hinweg. Diese Lebenszyklusanalyse, die wir z. T. in Zusammenarbeit mit Industriepartnern erstellen, beginnt bei der Herstellung des Materials für die Anlagen, verfolgt dann den Anlagenbau und die Nutzungsphase bis zum Abbau der Anlage und dem Recycling des eingesetzten Materials am Ende seiner Lebenszeit. Dabei berücksichtigen wir alle relevanten Energie- und Emissionsströme, die in und aus dem Fertigungsprozess und aus der Anlage heraus fließen, also z. B. auch für Wartungsarbeiten und Ersatzteiltransporte. Für die Berechnungen gehen wir von einer Betriebsdauer von 20 Jahren für eine Windenergieanlage aus.

Material- und Energiebedarf können wir am besten über Prozesskettenanalysen ermitteln und zum sog. kumulierten Energieaufwand summieren. Dabei zerlegen wir einen komplexen

Produktionsprozess in eine Vielzahl von Prozessschritten und betrachten das Produkt oder die Dienstleistung ganzheitlich über Herstellung, Nut-

### Nehmen und Geben

zung und Entsorgung (Abb. 2). Alle Energieströme rechnen wir der Vergleichbarkeit halber auf Primärenergie zurück. Das ist letztendlich die Energiemenge, die in Form von Rohkohle, Rohöl oder Gas der Natur entnommen werden muss, um beispielsweise Strom, Fernwärme oder Benzin zur Verfügung zu haben.

Eine Prozesskettenanalyse ist ein sehr zeitaufwändiges Vorgehen, bei dem eine Vielzahl von Daten ermittelt werden müssen. Wir greifen deshalb auch auf Vorarbeiten von Forschungsinstituten aus aller Welt zurück, die die Werte für Rohstoffe ermittelt haben, und rechnen damit nach der sog. Materialbilanzen-Methode weiter. Dabei werden die absoluten Massen der in das Produkt einfließenden Materialien wie z.B. Kupfer, Stahl oder Glasfaserverbundwerkstoffe ermittelt und anschließend mit den aus Prozesskettenanalysen gewonnenen spezifischen Materialdaten multipli-

tabelle <sup>1</sup>		
	Dänemark Middelgrunden	Deutschland Borkum West
Standort	Vor Kopenhagen	In der Nordsee
Landentfernung	3,5 km	100 km
Wassertiefe	2-6 m	30-40 m
Mittlere Windgeschwindigkeit	ca. 7 m/s	ca. 9 m/s
Anzahl WEA	20x2 MW	208x5 MW im Endausbau
Derzeitiger Stand	Seit 2000	Bau der ersten 12 Anlagen genehmigt, Endausbau für 2012 geplant



ziert. Die Materialdaten geben z. B. Aufschluss über den Energiebedarf und die Emissionen bestimmter Luftschadstoffe pro Kilogramm des benötigten Materials. Rotorblätter beispielweise bestehen im Wesentlichen aus Glasfaser verstärktem Kunststoff (sog. GFK) auf Epoxidharzbasis. (s. Abb. 3) Ausgehend von den Anteilen der Materialien Epoxidharz,

### 106 MWh für ein Rotorblatt

Härter, Glas und Lack und ihren spezifischen Energieverbräuchen errechnet sich pro kg Rotorblatt ein Energiebedarf von rund 60 kWh. Bei einer kleinen 500 kW-Windanlage wiegt ein Rotorblatt 450 kg. Das ergibt dann insgesamt 27 MWh .

Besonders wichtig ist es bei diesem Verfahren, die Energieaufwendungen für die Weiterverarbeitung von

Grundstoffen bzw. Halbzeugen zum gewünschten Produkt zu berücksichtigen, z. B. von Stahl bzw. unbearbeiteten Gussteilen zu Getrieben. Die in der Literatur angegebenen Werte beziehen sich nämlich meist nur auf Grundstoffe bzw. Halbzeuge. Die entsprechenden Zuschläge können wir bei einfachen Produkten abschätzen und auf die spezifischen kumulierten Energieaufwendungen der einzelnen Materialien aufschlagen (Abb. 5). Bei aufwändigeren Produkten wie Getrieben oder Rotoren sind diese Faktoren allerdings so einflussreich, dass sie mit viel technischem Sachverstand von Forschern mit Unterstützung der Hersteller im Detail erarbeitet werden müssen. Leider liegen derartige Daten auch in Unternehmen nicht direkt greifbar vor, da sie zur fertigungs- und betriebswirtschaftlichen Abwicklung nicht benötigt werden.

Abb. 3: Um den Energiebedarf für die Herstellung der riesigen Rotorblätter aus glasfaserverstärktem Kunststoff zu ermitteln, müssen die Forscher den Anteil jedes einzelnen Bestandteils wie Epoxidharz, Härter, Glas und Lack und ihre spezifischen Energieverbräuche kennen.

Auf diese Weise haben wir für verschiedene Anlagentypen an Land ganzheitliche energetische Betrachtungen angestellt, z. B. für einen kleineren mit 500 kW (Typ E 40) Leistung und einen großen mit 1500 kW (Typ E 66) Leistung (s. Tabelle 2). Beide zeichnen sich von ihrer Bauform her dadurch aus, dass sie kein Getriebe enthalten. Die Anlagen werden mit Stahltürmen geliefert. Dabei variieren die Turmhöhen je nach Windgeschwindigkeit am jeweiligen Standort: In der Modellrechnung wird der Rotor bei der kleineren Anlage an der Küste in 44 Metern und im Bin-

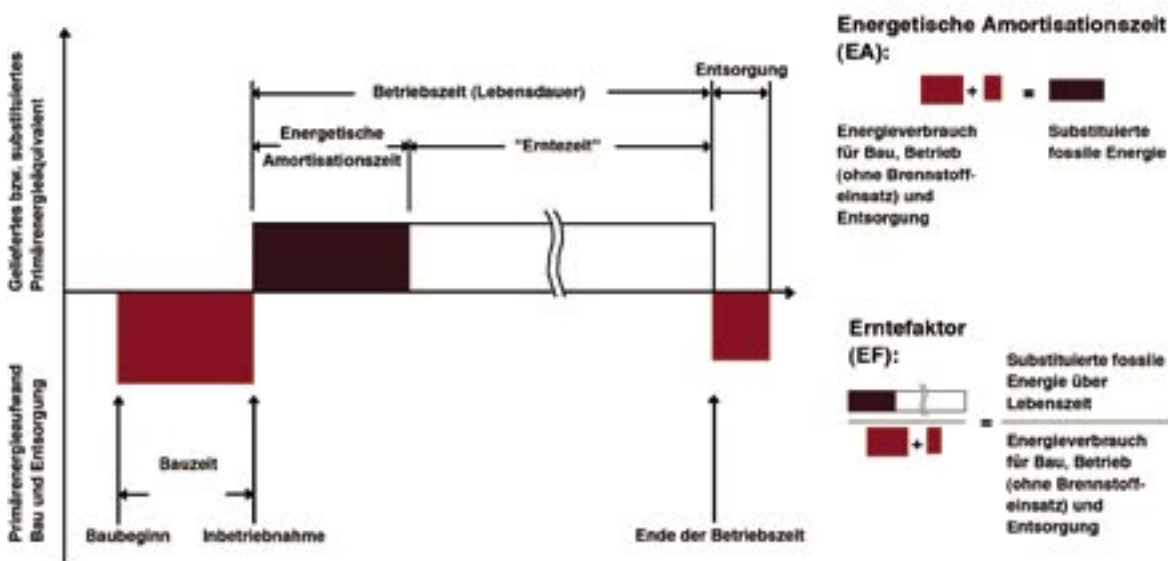


Abb. 4: Die „energetische Amortisationszeit“ bzw. der „Erntefaktor“ als Maßstab für die energetische Effizienz einer Windanlage.



Abb. 5: Eine 1500 kW-Windenergieanlage energetisch gesehen: Die Zahlen geben die kumulierten Primärenergieaufwendungen (in MWh) zum Bau der Anlage – unterteilt nach Baugruppen - an. Insgesamt werden für diese Windenergieanlage 3464 MWh Primärenergie benötigt, das ist genau so viel wie an Energie in rund 120 m<sup>3</sup> Rohöl steckt – also über 17 große Tankwagen voll.

nenland in 65 Metern Höhe montiert (Nabenhöhe). Die größere Anlage hat dagegen eine Nabenhöhe von 67 Metern. Die Energieaufwendungen variieren, weil je nach Standort verschiedene Türme und Fundamente zum Einsatz kommen, weshalb z. B. unterschiedliche Transporte ablaufen. Ebenso sind die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten an den verschiedenen Orten verschieden: Sie liegen zwischen knapp sechs Metern pro Sekunde und 7,3 Metern pro Sekunde. Dieser Unterschied klingt zwar gering, aber macht 80 Prozent mehr Stromerzeugung aus: Wenn sich die Windgeschwindigkeit verdoppelt, verachtfacht sich die erzeugte Menge Strom. Die Windgeschwindigkeit ist damit eine der wesentlichen Einflussgrößen in der Energiebilanz.

Wir berücksichtigen auch die Energieaufwendungen für die Wartung der Anlagen, z. B. für Transporte und für die Herstellung von Verschleißteilen und Betriebsmitteln wie Rotorblättern, Komponenten der Steuerungs- und Regelungstechnik, Ölen und Fetten. Bei der Herstellung fallen einige

Teile energetisch besonders ins Gewicht: So benötigt der Generator rund 20 Prozent der Gesamtaufwendungen an Energie. Aber auch der Turm, die

### A & O: Windgeschwindigkeit

restliche Gondel, das Fundament und die Rotorblätter sind energieaufwändige Bauteile (Abb. 5).

Diesen „Kosten“ wird nun der Ener-

giegewinn gegenübergestellt. Er ergibt sich daraus, dass die von der Windenergieanlage gelieferte Elektrizität nicht mit Kohle oder Öl erzeugt werden muss, also fossile Energieträger eingespart werden können. Zur methodisch sauberen Bilanzierung rechnen wir auch hier alle Energieträger auf Primärenergie zurück, wobei wir den Mix, der für die deutsche Stromerzeugung benötigten Primärenergieträger zugrunde legen.

Als Bewertungsmaßstäbe haben sich die „Energetische Amortisationszeit“ und der daraus ableitbare „Erntefaktor“ herauskristallisiert (Abb. 4). Die energetische Amortisationszeit ist die Zeit, die die Anlage in Betrieb sein muss, um ihren kumulativen Energieaufwand wieder „hereingespielt“ zu haben. Der Erntefaktor gibt das Verhältnis der „eingespielten“ zu der aufgewendeten Energiemenge über der Lebensdauer an. Je geringer die energetische Amortisationszeit und je größer der Erntefaktor sind, umso energetisch effektiver ist die Stromerzeugung mit Windenergieanlagen.

Das Ergebnis für die beiden betrachteten Anlagen auf Land kann sich sehen lassen: Die energetischen Amortisationszeiten liegen zwischen gut drei und sechs Monaten. Es ergeben sich daraus bei einer kalkulatorisch angesetzten Lebensdauer von 20 Jahren Erntefaktoren von etwa 70 für die große Anlage bzw. 40 für die kleine. Diese Zahlen gelten nur für die Wind-

tabelle <sup>2</sup>			
Technische Daten der untersuchten Windkraftanlagen an Land			
Generelle Daten			
<b>Rotor</b>			
Blattanzahl:	3		
Blattmaterial:	GFK (Epoxidharz)		
Antriebsstrang mit direkt getriebenem Ringgenerator			
<b>Typ E-40</b>		<b>Typ E-66</b>	
<b>Nennleistung:</b>	500 kW	<b>Nennleistung:</b>	1500 kW
Rotordurchmesser:	40	Rotordurchmesser:	66
Nabenhöhe:	44 - 65 m	Nabenhöhe:	67 - 98 m
<b>Nenngeschwindigkeit:</b>	12,5 m/s	<b>Nenngeschwindigkeit:</b>	12,5 m/s
<b>Rotor mit Blattverstellung</b>		<b>Rotor mit Blattverstellung</b>	
Blattlänge:	19 m	Blattlänge:	31 m
Drehzahl:	variabel;	Drehzahl:	variabel;
	18 - 38 U/min		10 - 20,3 U/min

## info<sup>1</sup>

### Windenergieanlage

Unter den Konstruktionen von Windenergieanlagen gibt es zwei Gruppen: Die mit und die ohne Getriebe. WEA mit Getriebe sind an ihrer großen, rechteckigen Gondel zu erkennen, die ohne Getriebe sind eher oval. Das Getriebe dient dazu, die langsame Drehung des Rotors – er dreht sich durchschnittlich ca. 20mal pro Minute – für den Generator, der für die Stromerzeugung bis zu 3000 Umdrehungen pro Minute braucht, zu übersetzen. Windenergieanlagen ohne Getriebe enthalten spezielle Generatoren, die weniger Umdrehungen benötigen, dafür aber viele sog. Pole haben, man nennt sie auch „elektrisches Getriebe“. In der Energiebilanz macht es keinen großen Unterschied, ob eine WEA ein Getriebe enthält oder nicht. Die Spezialgeneratoren sind zwar in der Herstellung aufwändiger und vor allen Dingen baulich größer, müssen dafür aber weniger oft gewartet werden und verschleifen nicht so schnell wie ein Getriebe.

Windenergieanlagen sind je nach Untergrund auf unterschiedliche Fundamente montiert, die z. T. durch Betonsäulen tief im Boden verankert sind. Die meisten WEA werden mit einem Stahlrohrturm geliefert, dessen Höhe je nach Standort variiert. Je größer das Windangebot, desto niedriger kann der Turm sein. Auf dem Turm befindet sich die Gondel, an deren Vorderseite, der Nabe, die Rotorblätter montiert sind. Sie bestehen aus glasfaserverstärktem Kunststoff und können bis zu 50 Metern lang und drei Tonnen schwer sein.

Bei der Wartung müssen vor allem das Getriebeöl ausgetauscht, Verschleißteile ersetzt und Risse in den Rotorblättern ausgebessert werden. Am Ende ihrer Lebensdauer werden die Windenergieanlagen recycelt, vor allem die Metalle, der Stahl des Turms, das Kupfer des Getriebes sind wiederverwertbar. Am schwierigsten ist die Wiederverwertung des Rotormaterials. Das Fundament wird beseitigt, was tiefer im Boden liegt als anderthalb Meter, darf bleiben. Insgesamt bleiben nach dem Recycling nach ersten Abschätzungen etwa 20 Prozent nicht wiederverwertbaren Abfalls von der WEA zurück.



*Auf dem Dach der Ruhr-Universität lässt sich Prof. Dr. Hermann-Josef Wagner den Wind um die Ohren wehen. Ein Handwindmesser zeigt die Geschwindigkeit an.*

anlagen selbst. Noch nicht erfasst sind die zusätzlichen Aufwendungen in der bestehenden Stromversorgung, die der starke sog. Zubau der Windenergie auslöst, beispielsweise die Verstärkung der Hochspannungsnetze

### Erntefaktor "sehr gut"

und der weitere Ausbau der Kraftwerke (sog. Regelkraftwerke), die die unstete Windenergie bei Bedarf ersetzen müssen.

Wie sieht das Verhältnis nun bei Offshore-Anlagen aus? Erste Ergebnisse ganzheitlicher Energieanalysen von in der Entwicklung befindlichen Anlagen mit 5000 kW Leistung zeigen erwartungsgemäß erheblich größere Aufwendungen für den Bau der Anlagen. Ein über 30 Meter hohes, im Wasser stehendes Drei-Bein Stahlgerüst (Tripod), auf dem der Windenergiekonverter über Wasser befestigt ist, kommt hinzu. Die Rotoren der WEA im Meer sollen im Durchmesser 100 Meter messen – an Land sind es bis zu 66 Meter. Jedes einzelne Rotorblatt wiegt bis zu drei Tonnen. Diesem zusätzlichen Aufwand steht jedoch ein größeres Windenergieangebot als an Land gegenüber – es ist eine mindestens doppelt so große Stromausbeute zu erwarten. Deshalb

haben unsere ersten Berechnungen auch für uns überraschend eine energetische Amortisationszeit von unter einem halben Jahr ergeben. Aber auch hier werden die Werte wohl noch etwas ungünstiger werden, wenn die durch die Windparks ausgelösten Zusatzinvestitionen an Land berücksichtigt sind.

Die Ergebnisse belegen, dass die Bilanz für alle Windenergieanlagen aus energetischer Sicht vernünftig ist. Zum Vergleich: Photovoltaische Solarenergieanlagen zur Stromerzeugung amortisieren sich energetisch erst nach drei bis vier Jahren. Die Nachteile der Windenergie liegen aber anderswo: Der Strom aus Wind ist zurzeit mehr als doppelt so teuer wie Strom aus fossilen Brennstoffen, weswegen er nicht konkurrenzfähig ist. Außerdem sind Windenergieanlagen unzuverlässige Stromlieferanten, weil sie von der Windstärke abhängig sind. Bei zu wenig Wind erzeugen sie keinen Strom, bei Sturm muss man sie abschalten, damit sie keinen Schaden nehmen. Deshalb tragen sie zwar in steigendem Maße zur Stromerzeugung bei und sparen Kohle und Gas, können aber den teuren Bau von Ersatzkraftwerken, die mit Kohle oder Gas betrieben werden, wenn der Wind nicht weht, nicht verhindern.

Die Rechnungen am Beispiel Wind zeigen, dass ganzheitliche Betrachtungen notwendig sind und es nicht ausreicht, nur die Betriebsphase alleine zu berücksichtigen. Es bedarf darüber hinaus immer einer kritischen Interpretation der Ergebnisse von ganzheitlichen Energie- und Ökobe-trachtungen durch die Wissenschaft. Denn die Vielzahl der ermittelten Daten, die damit verbundenen Unsicherheiten und die verschiedenen methodischen Vorgehensweisen führen schnell zu Fehlinterpretationen. (s. Info 2).

■ *Prof. Dr.-Ing. Hermann-Josef Wagner, Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft, Institut für Energietechnik*

## info<sup>2</sup>

### Ganzheitliche Betrachtungen im Vergleich

Ganzheitliche Betrachtungen haben wir auch für Solarkollektoren zur Warmwasserbereitung, für Photovoltaikanlagen, die Sonnenlicht direkt in Strom umwandeln, und für Niedrigenergiehaussiedlungen durchgeführt.

Bei Solarkollektoren hängen die energetischen Amortisationszeiten erheblich davon ab, ob nur Schwimmbadwasser im Sommer mit niedriger Temperatur erwärmt werden soll oder wärmeres Duschwasser, das über einen Speicher jederzeit zur Verfügung stehen soll. Auch sind die Kollektorkonstruktionen sehr unterschiedlich: Manche verwenden energieintensives Aluminium, manche nur Kunststoffe. Alles in Allem liegen die Amortisationszeiten aber unter einem Jahr.

Stromerzeugung mit Photovoltaik geschieht heutzutage weltweit überwiegend mit Siliziumsolarzellen. Sie müssen trotz großer Fortschritte energieintensiv hergestellt werden. So liegen die energetischen Amortisationszeiten bei bis zu vier Jahren – bei älteren Produktionsverfahren sogar noch darüber. Da wir ganzheitliche Betrachtungen primärenergetisch bewerten, hängt die errechnete Zahl sehr davon ab, in welchem Land der Produktionsprozess des Siliziums

betrachtet wird, welche Energieträger dort zur Stromerzeugung eingesetzt werden, in welchem Land der Solarkollektor später eingesetzt wird und „welchen Strom“ er verdrängt – ein typisches Beispiel für die Notwendigkeit der erklärenden Kommentierung der Ergebnisse durch den Forscher: Der reine Wert der energetischen Amortisationszeit sagt nicht viel aus.

Niedrigenergiehäuser sind moderne Gebäude mit sehr hohem Wärmedämmstandard. Sie verbrauchen nur die Hälfte und weniger Energie zum Heizen als moderne Gebäude üblicher Bauart. Hier ist die ganzheitliche energetische Analyse dazu da, herauszufinden, wie viel Energie in Form von Baumaterialien als „versteckte Energie“ in das Gebäude geht. Die Bilanz für die im Jahr 2000 gebaute Niedrigenergie-Solarhaus-siedlung Gelsenkirchen ist überraschend: Von allen Energiemengen, die über 50 Jahre Betrachtung in die Siedlung fließen, sind immerhin 40 Prozent versteckte Energie in Form von Baumaterialien. Öl oder Gas zum Heizen macht die restlichen 60 Prozent aus. Der Wahl der Baumaterialien kommt somit eine wichtige Rolle zu.