

Sind die (neuen) Entwicklungslinien der Energietechnik nachhaltig?

Photovoltaik und Windenergie als Beispiele

Dipl. Umweltwiss. **T. J. Petrovic**, Prof. Dr.-Ing. **H.-J. Wagner**, Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft (LEE) der Ruhr-Universität Bochum

Kurzfassung

Weil der Energiebereich innerhalb des Nachhaltigkeitskonzepts eine Schlüsselrolle einnimmt, sind insbesondere neue technische Entwicklungslinien im Zuge der energietechnischen Begleitforschung unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit zu bewerten. Die Bewertung erfolgt dabei über Indikatoren, welche die für den Energiebereich relevanten Nachhaltigkeitsaspekte umfassend abbilden. Im Rahmen eines am Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft der Ruhr-Universität Bochum durchgeführten Forschungsvorhabens wurden sieben geeignete Nachhaltigkeitsindikatoren erarbeitet. Diese wurden auf Windenergiekonverter und Photovoltaikanlagen sowie auf ein konventionelles Erdgas-GuD-Kraftwerk angewendet. Es ergeben sich charakteristische Stärken-Schwächen-Profile für die betrachteten Techniken. Das Indikatorensystem ist prinzipiell auf alle technischen Entwicklungslinien anwendbar und lässt relative Vergleiche zwischen konventionellen und innovativen Techniken zu.

Abstract

Since the energy sector plays a key role inside the concept of Sustainable Development, sustainability aspects should be addressed within the scope of technology assessments. This applies in particular to new energy systems and new technological solutions. To evaluate sustainability, indicators are needed. Ideally, these should cover all significant sustainability issues of the energy sector. Seven appropriate indicators were found in a research project performed at the Chair of Energy Systems and Energy Economics of Ruhr-University Bochum. They were applied to wind energy converters and photovoltaic systems as well as on a conventional natural gas fired gas and steam plant. The results show characteristic strength and weakness profiles for the evaluated systems. Beside these examples, the indicator set is in principle applicable on all technological pathways and enables comparisons between conventional and innovative energy systems.

1. Einleitung

Seitdem im Jahr 1987 der Bericht „*Our Common Future*“ der UN-Kommission für Umwelt und Entwicklung - der sog. „Brundtland-Kommission“ - [1] veröffentlicht wurde, hat das Leitbild der Nachhaltigen Entwicklung Eingang in alle relevanten Gesellschafts- und Politikbereiche gefunden. Auf nationaler Ebene sind hier die Verabschiedung der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie [2] und die Aufnahme des Umweltstaatsziels in Artikel 20a GG zu nennen; auf europäischer Ebene die europäische Nachhaltigkeitsstrategie [3], die Ratifizierung des Kyoto-Protokolls sowie subsequent der Ratsbeschluss zum „Burden Sharing“, mit dem für einen zentralen Nachhaltigkeitsbereich Rechtsverbindlichkeit hergestellt wurde.

Weil Primärenergieträger, Elektrizität und weitere Sekundärenergieträger die Grundlage für nahezu alle gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Prozesse darstellen, spielt der Energiesektor eine Schlüsselrolle im Nachhaltigkeitskonzept. Jedoch gilt das Energiesystem in seiner derzeitigen Struktur als nicht nachhaltig [4]. Hauptgründe hierfür sind der Verbrauch endlicher Ressourcen zur Energieumwandlung, die mit ihr verbundenen Umweltauswirkungen von der Klimawirksamkeit der Kraftwerksemissionen bis hin zur Inanspruchnahme von Flächen sowie die mittel- bis langfristig steigenden Versorgungsrisiken, die mit Energieträgerimporten assoziiert sind. Die verschiedenen Problembereiche stellen die Energieforschung vor die Herausforderung geeignete Systemlösungen zu finden, die zu einer Transformation des Energiesektors in Richtung einer nachhaltigen Entwicklung beitragen.

In den kommenden Jahrzehnten wird durch die Stilllegung und den Ersatz überalterter Kraftwerkskapazitäten ein Zeitfenster für die strukturelle Erneuerung des Energiesystems aufgestoßen. Bei den anstehenden Planungen werden Nachhaltigkeitsaspekte eine wesentliche Rolle spielen. Um die richtigen Entscheidungen treffen zu können, muss daher eine Bewertung der technischen Neu- und Weiterentwicklungen im Bereich der Energieumwandlung vorgenommen werden. Hierzu werden allgemein akzeptierte Kennzahlen benötigt, die eine Abwägung zwischen verschiedenen zur Auswahl stehenden technischen Anlagenkonzepten erlauben.

Bisherige Bewertungsansätze aus den Bereichen der Technikfolgenabschätzung und Ökobilanzierung beschränken sich auf die Darstellung technisch-ökonomischer und ökologischer Aspekte und lassen oftmals den Bezug zum Nachhaltigkeitskonzept vermissen. Die vorhandenen Nachhaltigkeitsindikatorensysteme zeichnen sich zumeist durch eine unpraktikable Vielzahl von Kennzahlen aus. Zudem bestehen weiterhin Defizite bei der Abbildung sozialer Nachhaltigkeitsaspekte. Diese Gründe gaben Anlass, am Lehrstuhl für Energiesysteme und

Energiesysteme der Ruhr-Universität Bochum das Forschungsvorhaben „Nachhaltigkeit am Beispiel regenerativer Energiesysteme zur Stromerzeugung“ durchzuführen.

2. Nachhaltigkeit am Beispiel regenerativer Energiesysteme zur Stromerzeugung

In dem von der AG Solar des Landes NRW geförderten Projekt wurden drei Ziele verfolgt:

- die Konkretisierung von Nachhaltigkeit für den Energiebereich,
- die Vorauswahl und Bewertung von Nachhaltigkeitsindikatoren und
- die Konzeption eines Indikatorensystems.

Die Vorgehensweise innerhalb des Projekts ist in Abbildung 1 dargestellt.

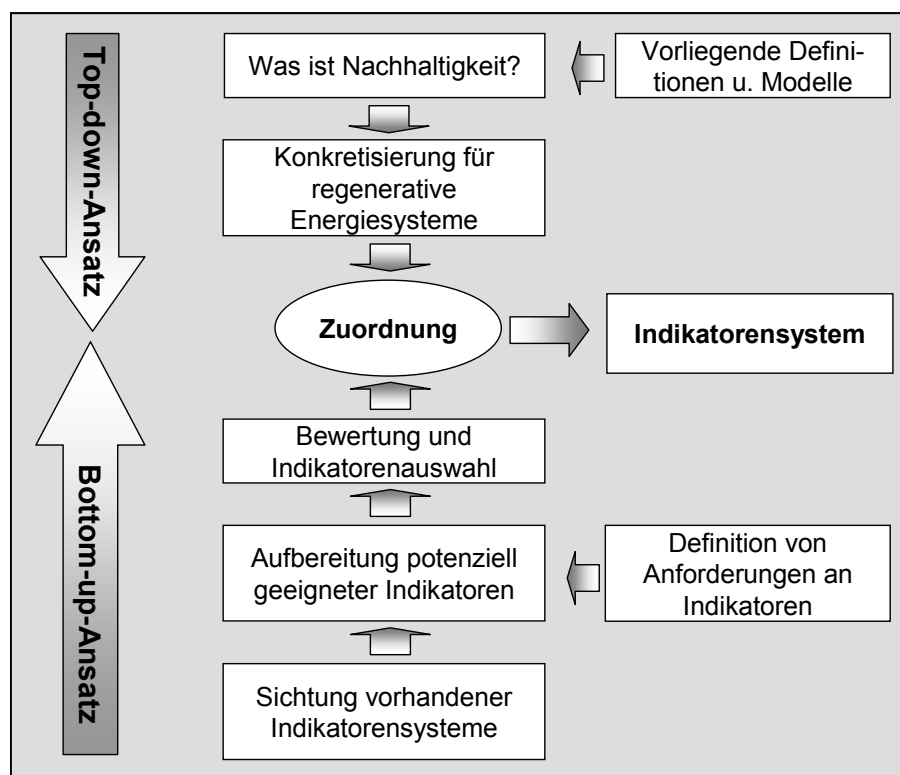


Abbildung 1: Struktur des Projekts „Nachhaltigkeit am Beispiel regenerativer Energiesysteme zur Stromerzeugung“

2.1 Konkretisierung von Nachhaltigkeit für den Energiebereich

Ausgehend von der Nachhaltigkeitsdefinition nach Brundtland wurde der Begriff „Nachhaltigkeit“ für den Energiebereich in einem Top-down-Ansatz konkretisiert. Dabei konnte auf wichtigen Vorarbeiten, die im Rahmen des Forschungsvorhabens „Global zukunftsfähige Entwicklung - Perspektiven für Deutschland“ [5] geleistet wurden, aufgebaut werden. Im Ergebnis wurden die für den Energiebereich relevanten Nachhaltigkeitsfelder identifiziert und anhand konkreter Handlungsleitlinien ausformuliert (siehe Kasten 1).

Gewährleistung der Grundversorgung

Die Bereitstellung der zur Deckung der Grundbedürfnisse benötigten Energiedienstleistungen ist durch eine weitgehend von physischen Unterbrechungen freien Versorgung, die definierten Sicherheitskriterien entspricht, zu gewährleisten. Dazu gehören die Reduzierung von Versorgungsrisiken durch Diversifizierung des Energieträgermixes, der Versorgungspfade und des Technikparks zur Energieumwandlung sowie die Sicherstellung einer hohen Zeitverfügbarkeit technischer Anlagen.

Nachhaltige Ressourcennutzung

Energiebezogene Aktivitäten sind möglichst effizient zu gestalten. Erneuerbare Ressourcen dürfen nur in dem Maße genutzt werden, wie dies den Reproduktions- bzw. Regenerationsraten entspricht. Nicht erneuerbare Ressourcen sind so zu nutzen, dass die Ressourcenpotenziale (und die dahinter stehenden Handlungsspielräume) in adäquater Form für kommende Generationen erhalten bleiben.

Wettbewerbsfähigkeit

Durch die Struktur des Energiesystems soll die wirtschaftliche Dynamik erhalten bzw. gefördert werden. Die Energiedienstleistungsunternehmen und ihre Produkte sollen im (inter-)nationalen Umfeld wettbewerbsfähig sein.

Machtausgleich

Marktbeherrschende Stellungen auf der Ebene großer Konzerne bei der Energieproduktion und -verteilung sollen möglichst vermieden werden. Dem entsprechend sollten dezentrale Strukturen gefördert werden, die einer größeren Anzahl von Akteuren den Marktzutritt erlauben.

Selbständige Existenzsicherung

Als Beitrag zur Daseinsvorsorge ist allen Menschen ein freier, sicherer und bezahlbarer Zugang zu Energieressourcen und -dienstleistungen zu gewährleisten. Durch die Struktur des Energiesystems sollen Möglichkeiten zur Existenzsicherung (z. B. Arbeitsplätze) bereitgestellt werden. Energiebezogene Aktivitäten und/oder Subventionierungen, die eine selbständige Existenzsicherung anderer verhindern bzw. zur Zerstörung lokaler Marktstrukturen führen, sind zu vermeiden.

Nachhaltige Entwicklung des Sach-, Human- und Wissenskaptals

Forschung und Entwicklung, die eine nachhaltige Entwicklung des Energiebereichs unterstützen, sollen gefördert werden. Dazu gehören auch Demonstrationsvorhaben und Markteinführungsprogramme für innovative Technologien.

Schutz von Gesundheit, Umwelt und Kulturerbe

Die von energiebezogenen Aktivitäten und ihren vor- und nachgelagerten Prozessketten ausgehenden kurz-, mittel- oder langfristigen Schädwirkungen für die menschliche Gesundheit, die Umwelt und das Kulturerbe, die im Wesentlichen durch die Ressourcennutzung sowie durch stoffliche oder energetische Freisetzungen induziert werden, sind zu minimieren. Jede Generation hat die Verpflichtung, kommenden Generationen eine intakte Umwelt zu hinterlassen.

Vermeidung unvertretbarer Risiken

Gefahren und Risiken, die mit energiebezogenen Aktivitäten in Zusammenhang stehen, sind zu minimieren. Risiken sind nur zulässig, soweit durch das größtmögliche Schadenereignis keine dauerhaften Schäden verursacht werden.

Partizipation

Bei energiewirtschaftlichen und energiepolitischen Entscheidungsprozessen (z. B. Investitionsentscheidungen und der Ausgestaltung von Energieversorgungssystemen) ist zu gewährleisten, dass den relevanten Anspruchsgruppen eine demokratische Teilhabe möglich ist.

Kasten 1: Relevante Nachhaltigkeitsfelder des Energiebereichs

2.2 Vorauswahl und Bewertung von Nachhaltigkeitsindikatoren

In den letzten Jahren wurde bereits eine Vielzahl von Energie- und Nachhaltigkeitskennzahlen vorgeschlagen und in teils sehr umfangreiche Indikatorensysteme integriert. Aus diesen wurden im Rahmen einer Literaturlauswertung alle Kennzahlen mit Bezug zum Energiebereich herausgefiltert, standardisiert aufbereitet und bewertet. Dabei wurde eine Vorgehensweise gewählt, die eine quantifizierte, multikriterielle Analyse von Kennzahlen zulässt. Sie basiert auf einer gut dokumentierten Methodik aus dem Bereich des Qualitätsmanagements, dem *Quality Function Deployment (QFD)*. Herzstück bildet eine Matrix, in der die Untersuchungsgegenstände vordefinierten Kriterien gegenübergestellt werden. Diese Kriterien stellen Anforderungen dar, die an Nachhaltigkeitsindikatoren (siehe Tabelle 1) zu richten sind. Hierbei ist die übergeordnete Anforderung „Nachhaltigkeitsrelevanz“ zu erfüllen; die übrigen Anforderungen sollten möglichst gut erfüllt werden.

Tabelle 1: Anforderungen an Nachhaltigkeitsindikatoren.

Übergeordnete Anforderung	Nachhaltigkeitsrelevanz
Wissenschaftliche Anforderungen	Wissenschaftliche Fundiertheit
	Reproduzierbarkeit/Nachvollziehbarkeit
Funktionale Anforderungen	Quantifizierbarkeit
	Richtungssicherheit
	Vergleichbarkeit
Anforderungen aus Sicht von Nutzern	Öffentlichkeitsrelevanz
	Politikrelevanz
	Verständlichkeit
	Informationsgehalt
	Möglichkeit der Festlegung von Zielwerten

Im Ergebnis erhält jeder Indikator zwei Kenngrößen zugeordnet: einen Wert für seine Nachhaltigkeitsrelevanz und einen Signifikanzwert, der seinen Erfüllungsgrad gegenüber den übrigen Anforderungen charakterisiert. Die Werte charakterisieren die Qualität der Indikatoren.

2.3 Konzeption des Indikatorensystems

Durch die Synthese von Top-down- und Bottom-up-Ansatz können die bewerteten Indikatoren (Ergebnis von Schritt 2.2) den identifizierten Nachhaltigkeitsfeldern (Ergebnis von Schritt 2.1) zugeordnet werden. Mit Hilfe einer Portfolio-Analyse lassen sich Indikatoren identifizieren, welche die Nachhaltigkeitsfelder bestmöglichst abdecken. Im Verlauf des Projekts konnten auf diese Weise sieben Indikatoren bestimmt werden, die eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung von Energieanlagen zulassen. Sie werden in Kasten 2 beschrieben.

Versorgungsrisiko

Das Versorgungsrisiko aggregiert Aspekte der geopolitischen und technischen Versorgungssicherheit. Dies sind zum einen Risiken, die aus der Volatilität der Energieträgerpreise und der politischen Stabilität der Energieträger exportierenden Länder resultieren. Zum anderen betrachtet der Indikator die technische Zuverlässigkeit der Anlagen und die jeweilige Verfügbarkeit des Energieangebots. Die Berechnung erfolgt dabei über ein Konzentrationsmaß, das eine modifizierte Variante des Hirschman-Herfindahl-Index darstellt. In dieses gehen die beiden Teilbereiche des Versorgungsrisikos als unabhängige Größen ein [6]. Da das Risiko unabhängig vom Energieoutput besteht, entfällt der Bezug auf eine funktionelle Einheit.

Spezifischer Kumulierter Energieaufwand

Der Spezifische Kumulierte Energieaufwand wird nach VDI-Richtlinie 4600 [7] berechnet. Bilanziert werden Energieaufwendungen aus der Herstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase von Energieanlagen, die über Primärenergieäquivalente aggregiert werden. Der Indikator unterscheidet „nachhaltige“ und „nicht nachhaltige“ Energieaufwendungen. Nachhaltige Energieaufwendungen sind regenerative Energieinputs sowie Aufwendungen für die Bereitstellung von Materialien, die einem späteren stofflichen Recycling zugeführt werden können. Ihr Anteil wird dem Indikator als prozentualer Beiwert zugefügt.

Spezifische Stromgestehungskosten

Die Berechnung der Spezifischen Stromgestehungskosten erfolgt nach der Annuitätenmethode unter der Berücksichtigung von Ersatzbeschaffungen und Restwerten gemäß VDI-Richtlinie 2067 [8]. Bei der Bilanzierung wird eine Diskontrate von 5% angelegt.

Spezifische Brutto-Beschäftigungseffekte

Der Indikator weist die kumulierten Spezifischen Brutto-Beschäftigungseffekte aus, die durch den Zubau von 1.000 MW installierter Leistung einer spez. Technik im Vergleich zu einem Referenzszenario („Business as usual“-Entwicklung) innerhalb von 20 Jahren induziert werden. Berücksichtigt werden Investitionseffekte, Betriebseffekte und Effekte infolge verminderter Primärenergieimporte. Die Bilanzierung erfolgt durch das erweiterte Input-Output-Modell MARES [9], wobei die Eingangsdaten über das Energiesystemmodell IKARUS-Markal bereitgestellt werden.

Beanspruchung der Umweltmedien: Spezifische Luftinanspruchnahme

Der Indikator beschreibt die Inanspruchnahme des Umweltmediums „Luft“ im Rahmen der Energieumwandlung. Diese wird über das kritische Luftvolumen ermittelt, welches notwendig ist, um die im Zusammenhang mit der Energieumwandlung entstehenden Luftschadstoffemissionen bis auf die gesetzlich geforderten Grenzwerte zu reduzieren [10]. In gleicher Weise werden die Emissionen klimawirksamer Gase auf laut IPCC „tolerierbare“ atmosphärische CO₂-Konzentration von 550 ppm bezogen. Dieser Anteil wird dem Indikator als prozentualer Beiwert zugefügt.

Beanspruchung der Umweltmedien: Spezifische Wasserinanspruchnahme

Die Inanspruchnahme des Umweltmediums „Wasser“ im Rahmen der Energieumwandlung wird analog zum Indikator Spezifische Luftinanspruchnahme ermittelt. Sie beschreibt das kritische Wasservolumen, welches notwendig ist, um die bei der Energieumwandlung entstehenden Abwasser-Schadstofffrachten bis auf die gesetzlich geforderten Grenzwerte zu reduzieren [10].

Beanspruchung der Umweltmedien: Spezifische Flächeninanspruchnahme

Der Indikator beschreibt die räumlich-zeitliche, direkte oder indirekte Beanspruchung von Flächen durch Energieanlagen und ihrer Infrastruktur. Bei der Bilanzierung direkter Flächeninanspruchnahmen wird die unterschiedliche Wertigkeit beanspruchter Flächen über Gewichtungsfaktoren berücksichtigt. Zur Bestimmung der indirekten Flächeninanspruchnahme kommt ein Verfahren aus der Landschaftsplanung zur Anwendung, bei dem die Größe einer Kompensationsfläche berechnet wird, die von der Erheblichkeit einer visuellen Störung abhängt. Letztere ist maßgeblich von der Bauhöhe eines Objekts abhängig [11]. Sowohl bei direkten, als auch indirekten Flächeninanspruchnahmen ist die Zeitdauer zu berücksichtigen. Der Anteil indirekter Flächeninanspruchnahmen wird dem Indikator als prozentualer Beiwert zugefügt.

3. Nachhaltigkeit von Photovoltaiksystemen und Windenergieanlagen

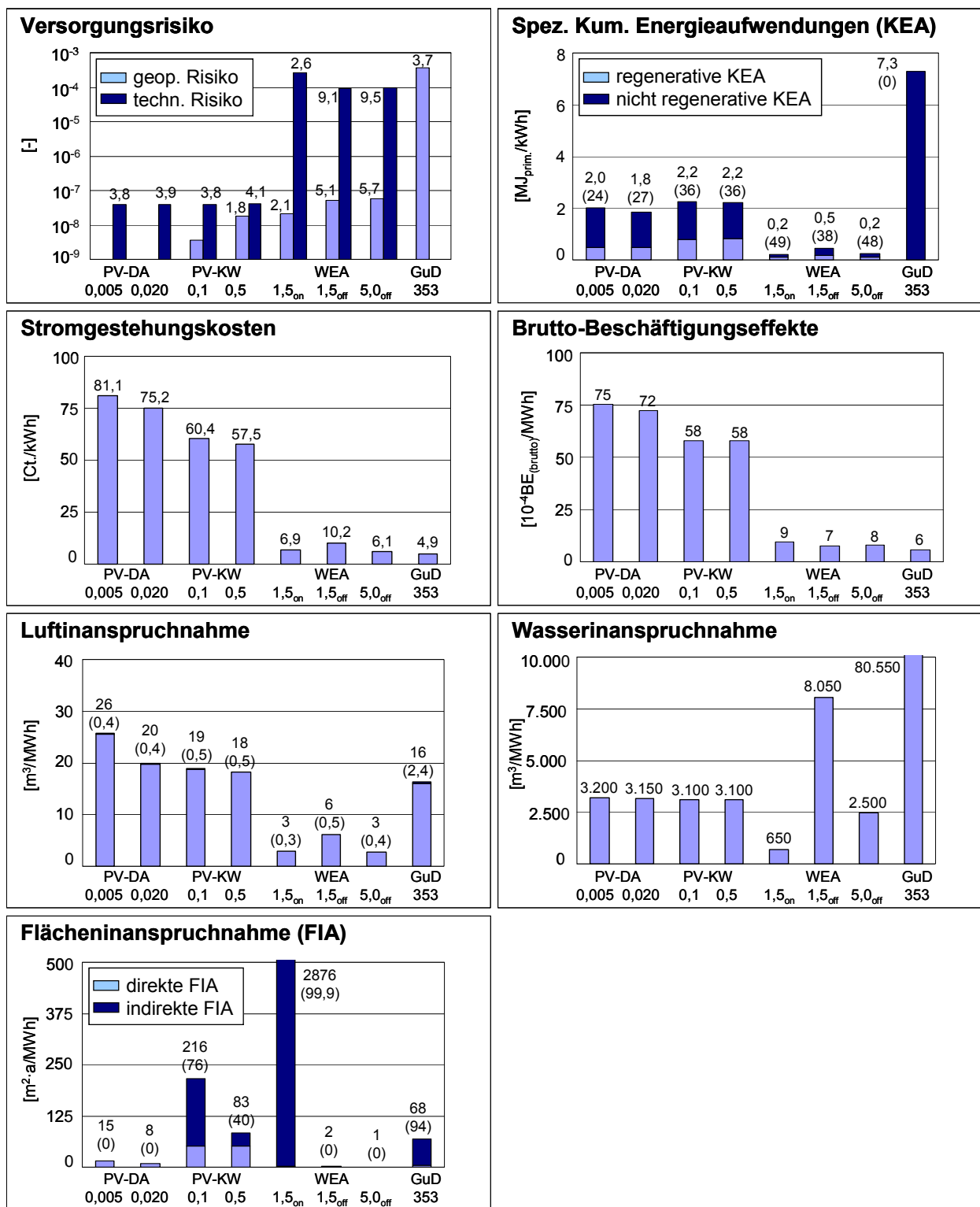
Die Frage, ob Photovoltaik-(PV-)Systeme und Windenergieanlagen (WEA) zu einer nachhaltigen Entwicklung beitragen können, kann mit Hilfe der erarbeiteten Nachhaltigkeitsindikatoren beantwortet werden. Zu diesem Zweck wurden Beispielrechnungen für je zwei PV-Dachanlagen (0,005 und 0,020 MW_p) und PV-Kraftwerke (0,1 und 0,5 MW_p), drei WEA in den Leistungsklassen 1,5 MW onshore/offshore und 5,0 MW offshore und für ein Erdgas-GuD-Kraftwerk (353 MW) durchgeführt. Die Bilanzierung erfolgt unter Berücksichtigung der unmittelbaren Infrastrukturanbindung (Fundamente, Kabel, Umspannstation), jedoch im Falle der regenerativen Systeme ohne Berücksichtigung notwendiger Maßnahmen zur Netzertüchtigung. Die Ergebnisse (siehe Abbildungen 2a-g) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Beim Versorgungsrisiko zeigt sich, dass das geopolitische Risiko, das mit den Erdgasimporten für das GuD-Kraftwerk assoziiert ist, etwa in der gleichen Größenordnung liegt, wie das technische Risiko, das sich aus dem unsteten Windangebot für die Onshore-WEA ergibt. Die relativ niedrigen Werte für die PV-Systeme sind hier auf den (noch) geringen Beitrag dieser Technik zum deutschen Strommix zurückzuführen.

Bezüglich der Ressourcennutzung besitzen die regenerativen Energiesysteme hinsichtlich der Spezifischen Kumulierten Energieaufwendungen recht deutliche Vorteile gegenüber solchen konventionellen Kraftwerkssystemen, bei denen Energieträger im Zuge von Umwandlungsprozessen verbraucht werden. Ein nicht geringer Anteil der z. T. erheblichen Aufwendungen für die Herstellung der regenerativen Anlagensysteme kann zudem als „nachhaltig“ charakterisiert werden, da die eingesetzten Baumaterialien zu einem hohen Prozentsatz wieder verwendet werden können.

Die niedrigsten Stromgestehungskosten ergeben sich erwartungsgemäß für das GuD-Kraftwerk, die höchsten für die PV-Systeme. Bei den WEA zeigt sich in der Detailanalyse, dass die kleine Offshore-Anlage gegenüber den anderen betrachteten Systemen wegen der hohen Infrastrukturaufwendungen eine deutlich schlechtere Wirtschaftlichkeit aufweist.

Bei den Spezifischen Brutto-Beschäftigungseffekten ist zu erkennen, dass diese für die WEA und das GuD-Kraftwerk relativ niedrig, für PV-Systeme jedoch deutlich höher ausfallen. Dies ist zu einem darauf zurückzuführen, dass durch die hohen Investitionen für den Bau der PV-Anlagen deutlich positive Beschäftigungseffekte ausgelöst werden. Zum anderen werden durch den relativ niedrigen Systemwirkungsgrad eher geringe Energieerträge erwirtschaftet. Hier ist zu erwarten, dass im Zuge der technischen Weiterentwicklung sowohl die Investitionskosten sinken werden, als auch Wirkungsgradverbesserungen erzielt werden können und damit die positiven Beschäftigungswirkungen allmählich zurückgehen. Im Falle des GuD-Kraftwerks werden anfangs positive Beschäftigungseffekte, die durch Investitionen ausgelöst



Abbildungen 2a-g: Nachhaltigkeitsindikatoren zur Bewertung von Energieanlagen. Ergebnisdarstellung für die bilanzierten Systeme (PV-DA: Photovoltaik-Dachanlage; PV-KW: Photovoltaik-Kraftwerk, WEA: Windenergieanlage; GuD: Erdgas-GuD-Kraftwerk)

werden, durch negative Effekte während der Betriebszeit, die aus einem Kapitalabfluss für die notwendigen Energieträgerimporte resultieren, nahezu kompensiert.

Für die Beanspruchung der Umweltmedien zeigt sich für die betrachteten Systeme ein heterogenes Bild:

In Bezug auf die Luftinanspruchnahme schneiden die PV-Systeme am schlechtesten ab. Dies geht maßgeblich auf den hohen Strombedarf bei der Herstellung der PV-Module zurück, mit dem hohe indirekte Emissionen über den dahinter stehenden Kraftwerkspark verbunden sind. Würden die Module mit regenerativem Strom gefertigt, ergäben sich deutlich geringere Werte. Die Luftbeanspruchung des GuD-Kraftwerks ist ebenfalls erheblich. Sie ist primär durch den Brennstoffeinsatz bedingt. Insgesamt zeigt die Analyse, dass die Emission klimawirksamer Gase gegenüber den übrigen Emissionen keine große Rolle spielen.

Die höchste Wasserinanspruchnahme weist das GuD-Kraftwerk auf. Sie resultiert aus der Bereitstellung des Brennstoffs Erdgas. Bei der 1,5 MW-Offshore-WEA ergibt sich der relativ hohe Wert im Vergleich zur 5,0 MW-Anlage aufgrund der (fast) unverändert hohen Infrastrukturaufwendungen.

Hinsichtlich der Beanspruchung von Flächen schneidet die Onshore-WEA aufgrund der von ihr ausgehenden visuellen Beeinträchtigung am schlechtesten ab. Die größten direkten Flächeninanspruchnahmen werden allerdings für die PV-Kraftwerke ausgewiesen. Bei Offshore-WEA und PV-Dachanlagen spielt dieser Aspekt keine große Rolle.

4. Fazit

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die betrachteten regenerativen Energiesysteme in Relation zum konventionellen Vergleichssystem auf vielen Feldern zu einer nachhaltigen Entwicklung des Energiesektors beitragen können. Die Stärken und Schwächen der Techniken in Bezug auf einzelne Indikatoren verdeutlichen jedoch, dass eine diversifizierte Struktur im Sinne eines ausgewogenen Technikmixes bei der Energieumwandlung angestrebt werden sollte, um einseitig negative Entwicklungen zu verhindern. Zur Validierung der Ergebnisse sollten bei der Bilanzierung von Nachhaltigkeitsindikatoren für Energieanlagen zukünftig neben der Infrastrukturanbindung auch Netzertüchtigungsmaßnahmen einbezogen werden.

Quellennachweise

- [1] UN 1987: "Our Common Future"; Bericht Nr. A/42/427 der World Commission on Environment and Development („Brundtland-Kommission“), New York, August 1987.
- [2] Deutsche Bundesregierung: „Perspektiven für Deutschland - Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung“, Berlin, Mai 2002.

- [3] EU-Kommission: „Nachhaltige Entwicklung in Europa für eine bessere Welt: Strategie der Europäischen Union für die nachhaltige Entwicklung. Vorschlag der Kommission für den Europäischen Rat in Göteborg“; Kommission der Europäischen Gemeinschaften; Mitteilung der Kommission KOM(2001)264 endgültig, Brüssel, Mai 2001.
- [4] Enquete-Kommission: „Endbericht der Enquete-Kommission »Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung«“ (Tz. 48ff); Deutscher Bundestag, 14. Wahlperiode, Drucksache 14/9400, Berlin, 2002.
- [5] J. Kopfmüller, R. Coenen, J. Jörissen: „Konkretisierung und Operationalisierung des Leitbilds einer nachhaltigen Entwicklung für den Energiebereich“; Wissenschaftlicher Bericht FZKA 6578; Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (Hrsg.), Karlsruhe, 2000.
- [6] E. Pick (unveröffentlicht): „Literaturrecherche und Beitrag zur Methodenentwicklung zu den Wirkungskategorien Versorgungssicherheit und Risiko als Indikatoren für eine Nachhaltige Entwicklung im Energiebereich“; Arbeitsbericht im Rahmen eines Werkauftrags zum Projekt „Nachhaltigkeit am Beispiel regenerativer Energiesysteme“, Hamburg, 2003.
- [7] VDI: „Kumulierter Energieaufwand – Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden“, VDI-Richtlinie 4600, Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.), VDI-Gesellschaft Energietechnik, Düsseldorf, 1997.
- [8] VDI: „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen. Grundlagen und Kostenrechnung“; VDI-Richtlinie 2067/Blatt 1, Verein Deutscher Ingenieure (VDI, Hrsg.), VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung, Düsseldorf, 2000.
- [9] A. Ziegelmann, Z. Ziolk, H. Unger, P. Markewitz, A. Kraft: „Arbeitsmarkteffekte ressourcenschonender Klimagas-Reduktionsstrategien in Deutschland“ (S. 105ff); Selbstverlag des Lehrstuhls für Nukleare und Neue Energiesysteme; ISBN 3-9806267-9-2; Bochum/Jülich, 2000.
- [10] W. Hirtz, W. Huber, G. Kolb: „Umweltvorsorgeprüfung bei Forschungsvorhaben am Beispiel von Photovoltaik. Band 1: Zusammenfassung und Ergebnisdarstellung“ (S. 42); Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE); Bericht des Forschungszentrums Jülich: Angewandte Systemanalyse Nr. 67, ISSN 0944-2952, Jülich, 1993.
- [11] W. Nohl: „Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes durch mastenartige Eingriffe. Materialien für die naturschutzfachliche Bewertung und Kompensationsermittlung.“; Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, Werkstatt für Landschafts- und Freiraumentwicklung, Kirchheim bei München, 1993.