

*Wirkungen des Ausbaus Erneuerbarer Energien
- Impact of Renewable Energy Sources -*



Untersuchung im Rahmen des Projekts

„Wirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien (ImpRES)“,

gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Wirkung erneuerbarer Energien auf die Versorgungssicherheit

Bearbeiter:

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe

Barbara Breitschopf, Alexander Schlotz

Karlsruhe, Berlin, Osnabrück, Saarbrücken, 30. Juni 2014



Inhaltsverzeichnis

Seite

1	Einleitung	1
2	Verständnis des Begriffs Energiesicherheit.....	3
2.1	Literaturüberblick.....	3
2.1.1	Entwicklung des Verständnisses der Energiesicherheit	3
2.1.2	Versorgungssicherheit.....	5
2.1.3	Komponenten einer Methodik zur Bewertung von Energiesicherheit	7
2.2	Experteneinschätzung und Energiesicherheit in dieser Studie	10
3	Konzept zur Erfassung der Energiesicherheit im Wärmebereich.....	12
3.1	Abgrenzung des Energiesystems	13
3.2	Disaggregation des Endverbrauchs und Szenario-Entwicklung	15
3.3	Festlegung der Dimension, Eigenschaften und Indikatoren	17
3.4	Indikatoren	19
3.4.1	Importabhängigkeit	20
3.4.2	Importrisiko	22
3.4.3	Preisvolatilität.....	24
3.4.4	Kurzfristige Verfügbarkeit	25
3.4.5	Erzeugungskosten	26
3.4.6	Umwandlungseffizienz	27
3.4.7	Vielfalt der verfügbaren Ressourcen.....	28
3.4.8	Diversität der Energiesystems.....	30
3.5	Aggregation	32
4	Wirkungen EE auf die Energiesicherheit	34
4.1	Sektor und Anwendungsbereich	35
4.2	Systemebene	36

5	Einordnung in das Kosten-Nutzen-Konzept	37
6	Annex.....	40
6.1	Szenario ohne EE	40
6.2	Indikatorwerte.....	40
6.2.1	Importabhängigkeit	41
6.2.2	Importrisiko	42
6.2.3	Preisvolatilität.....	43
6.2.4	Kurzfristige Verfügbarkeit.....	44
6.2.5	Erzeugungskosten.....	45
6.2.6	Effizienz der Umwandlung.....	46
6.2.7	Vielfalt der verfügbaren Ressourcen	47
6.2.8	Diversität des Systems.....	48
7	References.....	49

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 1: Energiepolitisches Zieldreieck (Maurer et al., 2010)	1
Abbildung 2: Eigenschaften und Dimensionen zur Erfassung der Energiesicherheit	11
Abbildung 3: Konzeption des Vorgehens	13
Abbildung 4: Energiemix für Wärme in Industrie, GHD, Haushalte	15
Abbildung 5: Energieträgereinsatz mit und ohne EE	17
Abbildung 6: Beziehung von Dimensionen, Eigenschaften und Indikatoren	18
Abbildung 7: Beitrag EE zur Energiesicherheit nach Sektoren und Anwendungsbereichen, 2011	35
Abbildung 8: Beitrag EE zur Energiesicherheit, 2011 und 2012	36

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1: Energieverbrauch nach Anwendungsbereich, Sektor und Energieträger, in PJ, 2011 (Szenario I mit EE	16
Tabelle 2: Indikatorwerte der Importabhängigkeit	21
Tabelle 3: Indikatorwerte zu Risiko durch Importe	23
Tabelle 4: Berechnete Preisvolatilitäten nach Energieträgern und Sektoren	24
Tabelle 5: Verfügbarkeit der Technologien auf Energieträgerbasis	26
Tabelle 6: Indikatorwerte für spezif. Erzeugungskosten in €/kWh;	27
Tabelle 7: Indikator für Umwandlungseffizienz	28
Tabelle 8: Indikator zur Vielfalt der verfügbaren Ressource	30
Tabelle 9: Übersicht über Indikatoren Technologien und Verbrauchsbereiche im Wärmesektor	32
Tabelle 19: Wirkung erneuerbarer Energien auf Indikatorwerte und Energiesicherheit	34
Tabelle 20: Substitutionsfaktoren nach UBA 2009	40
Tabelle 21: Szenario II – ohne EE	40
Tabelle 11: Importabhängigkeit	41
Tabelle 12: Risiko durch Importe	42
Tabelle 13: Preisvolatilität	43
Tabelle 14: Verfügbarkeit	44
Tabelle 15: Erzeugungskosten	45
Tabelle 16: Umwandlungseffizienz	46
Tabelle 17: Ressourcenvielfalt	47
Tabelle 18: Systemdiversität	48

1 Einleitung

Der zunehmende Ausbau erneuerbarer Energien (EE) in Deutschland wirft nicht nur Fragen hinsichtlich der Kosten des Ausbaus oder der zunehmenden Belastung der Endverbraucher auf, sondern verlangt auch zunehmend Antworten in Hinblick auf die diversen Nutzenwirkungen. Als ein wesentlicher Nutzenaspekt wird neben den positiven Wirkungen im Bereich Treibhausgasemissionen und Technologieentwicklung der Beitrag EE zur Energie- oder Versorgungssicherheit aufgeführt. Allerdings ist der Begriff „Energiesicherheit“ bzw. „Versorgungssicherheit“ nicht klar definiert, noch wird er als solcher explizit in Gesetzen verwendet.

Sein Verständnis erschließt sich eher aus dem jeweiligen Kontext. So adressiert das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) diesen Aspekt im Zweck des Gesetzes: „der Zweck [...] ist eine möglichst sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente und umweltverträgliche leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität und Gas, die zunehmend auf erneuerbaren Energien beruht.“

Auch das Erneuerbaren Energie-Gesetz (EEG 2012) greift zur Begründung des Gesetzes auf Aspekte der Versorgungssicherheit zurück, führt diese aber nicht explizit auf: „im Interesse des Klima- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen, die volkswirtschaftlichen Kosten der Energieversorgung auch durch die Einbeziehung langfristiger externer Effekte zu verringern, fossile Energieressourcen zu schonen und die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien zu fördern.“

Abbildung 1: Energiepolitisches Zieldreieck (Maurer et al., 2010)



Mit diesen beiden gesetzlichen Vorgaben zeichnet sich für Deutschlands Energieversorgung ein Zieldreieck ab (siehe Abbildung 1), das als solches auch vom BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2014) benannt wird: „In Deutschland ist die Versorgungssicherheit zusammen mit der Wirtschaftlichkeit und der Umweltverträglichkeit der Energieversorgung eines der zentralen energiepolitischen Ziele.“

Obwohl kein einheitliches Verständnis des Begriffs Energieversorgungs- bzw. Energiesicherheit besteht, wird dieser in Deutschland häufig als positive Wirkung des EE-Ausbaus aufgeführt und den Ausbaurkosten gegenübergestellt; eine quantitative Abschätzung ist bisher nicht erfolgt. Im Rahmen der Analyse der Wirkungen des Ausbaus EE ist es daher **Ziel dieses Papiers**:

- einen methodischen Ansatz zu erarbeiten, der es ermöglicht, den Beitrag EE zur Energie(Versorgungs)sicherheit aufzuzeigen.
- den Beitrag EE zur Energie(versorgungs)sicherheit in den Rahmen des Kosten-Nutzen-Konzeptes einzuordnen.

Da bisher keine genaue Definition zu „Energie(Versorgungs)sicherheit“ vorliegt, folglich die Eigenschaften, mit denen dieser Begriff bzw. diese Begriffe zu hinterlegen sind, nicht feststehen sowie der Energiesektor eine Vielzahl an Dimensionen und Bereichen umfasst, ist zunächst eine klare Abgrenzung oder Festlegung erforderlich hinsichtlich:

- des Begriffs „Energiesicherheit“
- des Energiesystems bzw. Analysebereichs
- der Messgrößen bzw. Indikatoren zu Energiesicherheit

Analog zur Kostenbetrachtung soll die Abschätzung des Beitrags EE zur Energiesicherheit im Vergleich zu einem System mit fossil basierten Energieträgern erfolgen.

Zunächst werden im Rahmen einer Literaturübersicht das Verständnis und verschiedene Ansätze zur Erfassung von Energiesicherheit bzw. Versorgungssicherheit herausgearbeitet und durch eine Experteneinschätzung mit Blick auf den deutschen Wärmesektor ergänzt. Anschließend erfolgt die Konzeption eines Ansatzes. Dies beinhaltet die Festlegung des Energiesystems bzw. die zu untersuchenden Ebenen und der Bereiche der Energieversorgung sowie die Indikatoren, mit denen der Einfluss EE auf die Energiesicherheit abgeschätzt werden soll. Letztendlich werden die Schätzergebnisse vorgestellt und mit Blick auf Energie(Versorgungs)sicherheit diskutiert.

2 Verständnis des Begriffs Energiesicherheit

Im englischen Sprachraum wird häufig der Begriff „energy security“ genutzt, der im Deutschen zwar mit Energiesicherheit übersetzt werden kann, aber bisher eigentlich kein feststehendes oder gängiges deutsches Pendant fand. Im internationalen Raum wird unter „energy security“ meist „die uneingeschränkte Verfügbarkeit von Energie zu erschwinglichen Preisen“ verstanden. Das Bundesministerium für Verteidigung hingegen bezieht in seinem Weißbuch zur Sicherheitspolitik (2006) hierunter auch geopolitische Risiken mit ein und umschreibt Energiesicherheit mit drei Eigenschaften: „sichere, nachhaltige und wettbewerbsfähige Energieversorgung.“ Als wesentliche Elemente einer hohen Energieversorgungssicherheit werden differenzierte Energiebezugsquellen, der Ausbau heimischer erneuerbarer Ressourcen und ein ausgewogener Energiemix sowie die Reduzierung des Energiebedarfs durch sparsame und effiziente Energieverwendung sowie sichere Energieinfrastruktur aufgezählt. (Bundesministerium der Verteidigung, 2006).

Die europäischen Richtlinie (2005/89/EG) adressiert explizit Versorgungssicherheit und subsumiert darunter die Gewährleistung der Sicherheit der Elektrizitätsversorgung, d.h. „safeguard security of electricity supply and infrastructure investment“ (Adelphi Consult & Wuppertal Institut, 2007). Der Fokus wird hierbei auf die Infrastruktur und die Märkte gelegt, welche die Versorgung der Endverbraucher mit Elektrizität sichern sollen. Daraus lässt sich ableiten, die „Energieversorgungssicherheit [...] dient grundsätzlich einer sicheren, stabilen und unterbrechungsfreien Befriedigung des nationalen Energiebedarfs.“ (Fischer, 2008). Im Gegensatz dazu wird „security of supply“ in der Literatur mit der Verfügbarkeit von Ressourcen oder vorhandene Reserven eines Landes gleichgesetzt (z. B. Sovacool & Mukherjee, 2011), eine umfassende und einheitliche Definition von Energiesicherheit liegt somit nicht vor.

Der nachfolgende Literaturüberblick befasst sich mit dem Verständnis und Bewertung von „Energiesicherheit“, bzw. „Versorgungssicherheit“. Dem Literaturüberblick schließt sich eine kurze Betrachtung zum Verständnis des Begriffs Energiesicherheit für den deutschen Wärmebereich aus Expertensicht an.

2.1 Literaturüberblick

2.1.1 Entwicklung des Verständnisses der Energiesicherheit

Im frühen einundzwanzigsten Jahrhundert wurde in den meisten Nationalstaaten die Energiesicherheit ein wichtiger Teil der politischen Agenda. So hat sich 2005 der Europäische Rat im Chatham House in London getroffen, um das Thema „energy security“ zu diskutieren und in 2006 hat die Kommission das Grünbuch „A European Strategy for

Sustainable, Competitive and Secure Energy“ publiziert (Adelphi Consult & Wuppertal Institut, 2007).

Auch in der Wissenschaft gewinnt die Energiesicherheit zunehmend an Bedeutung. Cherp und Jewell (2011b) zeigen auf, dass es mindestens drei verschiedene Perspektiven auf die Energiesicherheit gibt, die sich aus unterschiedlichen und unabhängigen politischen historischen Herausforderungen hinsichtlich Energiesicherheit entwickelt haben: Die Perspektive der Souveränität, der Robustheit und der Widerstandsfähigkeit. (Cherp & Jewell, 2011b).

Zu Kriegszeiten in der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts war es ein Hauptanliegen, die Versorgung des Militärs sicherzustellen. Die wichtigste politische Herausforderung für die Energiesicherheit war die Brennstoffversorgung langfristig zu schützen. Das Verständnis für Energiesicherheit war geprägt von der Perspektive der **Souveränität**, mit Fokus auf geopolitischen Theorien und strategische Sicherheitsstudien (Cherp & Jewell, 2011b, Klare, 2008, Müller-Kraenner, 2008; Yergin, 2006).

Ende des zwanzigsten Jahrhunderts erlaubten die Entwicklungen in der Naturwissenschaft und Technik, kombiniert mit Computermodellierung und Systemanalyse, Einblick in die Dynamik komplexer Systeme. Die zunehmende Komplexität von Energiesystemen erhöhte die Empfindlichkeit gegenüber kurzfristigen Versorgungsunterbrechungen bedingt durch extreme Naturereignisse oder technischer Ausfälle. Der Schutz vor diesen kurzfristigen Störungen ist zu einer neuen politischen Herausforderung geworden. Das Verständnis für Energiesicherheit wurde um die Perspektive der **Robustheit** erweitert, die vermehrt auf eine Wissenschaft- und Ingenieursdenkweise setzt (Cherp & Jewell, 2011b, Farrell et al., 2004).

Die Deregulierung der Energieversorgung, die vor allem in den 1980er und 1990er Jahren stattfand, veränderte sich die Sicht auf die Energie, das bisher eher als öffentliches Gut wahrgenommen wurde, hin zu einem Wirtschaftsgut. Nicht die physische Verfügbarkeit von Energie, sondern der Preis wurde zur wichtigsten politischen Herausforderung für Energiesicherheit. Das Verständnis der Energiesicherheit verbreitete sich um die Perspektive der **Widerstandsfähigkeit (resilience)**, die auf der Wirtschaftstheorie, insbesondere der Investitionstheorie und Risikodiversifizierung beruht. (Awerbuch, 1995; Bar-Lev & Katz, 1976; Cherp & Jewell, 2011b, Stirling, 1994).

Cherp und Jewell (2011b) führen an, dass die drei identifizierten Perspektiven bisher nur isoliert diskutiert und analysiert wurden, die Komplexität der modernen Energiesicherheit jedoch eine Integration dieser ehemals isolierten Perspektiven erfordert (Cherp & Jewell, 2011b). Neben der historischen Entwicklung weisen Goldthau und Sovacool (2012) auf die Komplexität des Begriffs Energiesicherheit hin. Er ist geprägt durch eine starke vertikale Komplexität mit mehreren technologischen Systemen, einer

starken horizontale Komplexität mit mehreren Beteiligten, hohen Produktions- und Verbrauchskosten, sowie starker Systemträgheit aufgrund des zentralisierten Charakters vieler Energiesysteme. Eine ganzheitliche Bewertungsmethodik für diese Funktionen ist notwendig (Goldthau & Sovacool, 2012). Die Herausforderungen zur Darstellung der Energiesicherheit innerhalb und zwischen Energiesystemen sind, je nach Kontext, in Umfang und Zeitrahmen der Beurteilung sehr heterogen. Die Entwicklung einer Methodik, die die komplexe Natur der Energiesicherheit in einer ganzheitlichen Form betrachtet, ist komplex (Sovacool & Lim, 2011).

2.1.2 Energiesicherheit und Versorgungssicherheit

Versorgungssicherheit, wird je nach Fragestellung sehr unterschiedlich verstanden. Im deutschen Sprachraum, ist Versorgungssicherheit als ein wesentlicher Aspekt oder ein Teilgebiet der Energiesicherheit zu betrachten. Wird Versorgungssicherheit im Englischen mit „security of supply“ übersetzt, wie beispielsweise bei Sovacool und Mukherjee (2011), wird diese als wesentliche Komponenten unter der Dimension Verfügbarkeit und Diversität gesehen. Sie bezieht sich im Wesentlichen auf die vorhandenen Ressourcen und Herkunftsvielfalt, d.h. die gesamten (Energieträger)Reserven eines Landes und die Diversifikation der Primärenergieversorgung.

Maurer et al. (2010) definieren Versorgungssicherheit als dauerhafte und nachhaltige **Deckung des Energiebedarfs** von Kunden. Versorgungssicherheit wird somit als Teil des politischen Zieldreiecks angesehen und ist daher von Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit separat zu betrachten. Versorgungssicherheit umfasst bei ihm alle Stufen der Wertschöpfungskette (Förderung der Primärenergieträger, Umwandlung in Sekundärenergieträger, Transport und Verteilung). Maurer et al. (2010) grenzen Versorgungssicherheit vom Begriff der Versorgungsqualität ab. Nach Maurer et al. (2010) gehören zu Versorgungsqualität die Zuverlässigkeit der Betriebsmittel, die Dienstleistungsqualität, die technisch-physikalische Qualität elektrischer Energie und die störungs- und unterbrechungsfreie Versorgung. Nur letzterer Aspekt der Versorgungsqualität wird als Bestandteil der Versorgungssicherheit identifiziert. Auf dem Stromerzeugungsmarkt erfolgt die Bewertung der Versorgungssituation anhand von Leistungsbilanzen. Mit anderen Worten: Das Angebot der elektrischen Energie muss zu jeder Zeit die Nachfrage decken. Auf ähnliche Weise verwenden auch Grave et al. 2012 die Wahrscheinlichkeit der gesicherten Leistung als Indikator der Versorgungssicherheit. Maurer et al. (2010) betrachten neben der gesicherten Kraftwerksleistung, auch die für den Energietransport notwendigen Netzkapazitäten. Als Indikator für die netzseitige Versorgungssicherheit wird die durchschnittliche Versorgungsunterbrechung (üblicherweise gemessen in Minuten pro Jahr) herangezogen. Darüber hinaus werden mögliche Netzengpässe in den Übertragungsnetzen untersucht.

Le Coq und Paltseva (2009) bedienen sich einer „externen Perspektive“, bei der sie Risiken berücksichtigen, die von Nicht-EU Ländern ausgehen. Sie wählen für die Analyse der externen Energieversorgungssicherheit folgende Indikatoren: Energieimportdiversifikation, politische Risiken des Exportlands, Transportrisiko, Einfachheit der Lieferantenwechsels und wirtschaftliches Risiko bei Versorgungsunterbrechungen. Die Indikatoren werden jeweils einzeln für Öl, Gas und Kohle berechnet (Le Coq & Paltseva, 2009). Der aus den Risiken abgeleitete Index zielt dabei auf kurzfristige Risiken der Versorgungssicherheit. Der Rahmen für den Index bildet also ein plötzlicher Ausfall der Versorgung durch einen Energieträger, den Märkte nicht kurzfristig ausgleichen können. Le Coq und Paltseva (2009) begründen dies damit, dass die Substituierbarkeit der Energieträger für diesen Fall nicht gegeben ist. Aus diesem Grund werden Kohle, Gas und Öl gesondert voneinander betrachtet. Zudem wird beim diesem Index berücksichtigt, dass das Risiko mit höherem Importanteil eines Energieträgers steigt.

Der am häufigsten betrachtete Indikator für Versorgungssicherheit ist die Diversität der Energieträger. So mindert eine höhere Vielfalt, Ausgewogenheit und Unterschiedlichkeit den Schaden eines Ausfalls eines einzelnen Energieträgers. Meist werden in der Literatur der sog. Herfindahl-Index oder der Shannon-Wiener-Index verwendet. (ISI et al., 2010), Le Coq und Paltseva (2009) argumentieren, dass der Herfindahl-Index, welcher größere Energielieferanten stärker gewichtet, dem Shannon-Wiener-Index zu bevorzugen ist, da das Risiko für die Versorgungssicherheit mit der Größe der Lieferanten zunimmt. Diesen Zusammenhang gewichtet der Shannon-Wiener-Index weniger stark. ISI et al (2010) sowie Lehr (2009) diskutieren verschiedene Diversitätsindikatoren unter Einbeziehung länderspezifischer Risiken, die letztendlich die Qualität der Versorgung widerspiegeln sollen. Die IEA nutzt zur Messung der Versorgungssicherheit zwei Indizes, der eine bezieht sich auf die physische Verfügbarkeit (Anteil der auf Netzinfrastruktur basierten zur gesamten Energienachfrage von Energieträgern) in (preis)regulierten Märkten, der andere auf die Konzentration der Anbieter (Herfindahl-Hirschman Index gewichtet nach dem Anteil des Energieträgers im Primärenergiemix, sowie ein Maß für politische Stabilität) in einem marktbasieren Versorgungssystem (Kruyt et al., 2009). Darüber hinaus werden in weiteren Studien differenzierte Indizes oder Indikatoren diskutiert, eine klare Definition oder Festlegung der Indikatoren zur Erfassung der Versorgungssicherheit liegt jedoch nicht vor.

Le Coq und Paltseva (2009) sehen außerdem im Transport der Energieträger eine weitere Einflussgröße. Beispielsweise erhöht sich das Risiko, wenn der Transportweg des Energieträgers durch unsichere Länder führt. Dieses Risiko schätzen Le Coq und Paltseva (2009), mangels genauer Daten, mit der Distanz zwischen exportierendem und abnehmendem Land. Zusätzlich wird die Transportfähigkeit des Energieträgers bewertet. So ist etwa der Transport von Gas in Pipelines riskanter als der Transport von Flüssiggas.

Scheepers et al., 2007 bemängeln hingegen die beschränkte Betrachtung der Versorgungssicherheit auf Primärenergieträger. Sie argumentieren damit, dass die Nachfrage sowie Energieumwandlung und -transport einen erheblichen Einfluss auf die Versorgungssicherheit haben kann. (Scheepers et al., 2007) Es wird ein Angebot/Nachfrage-Index eingeführt, der aus den folgenden Teilen besteht: Versorgung mittels Primärenergieträgern (Kohle, Gas, Öl), Umwandlung in Sekundäre Energieträger und Transport (Strom, Wärme, Kraftstoffe), sowie die Endenergienachfrage. Diese Teile werden mittels verschiedener gewichteter Indices bewertet und in einem Angebot/Nachfrage-Index zusammengefasst.

Wie bei Scheepers et al. (2007), wird Versorgungssicherheit bei vielen Autoren auf mehreren Ebenen betrachtet. Buttermann und Freund (2010) betrachten das Risiko auf der Primärebene (Importabhängigkeit, Diversifikation der Energieträger), das infrastrukturelle Risiko auf der Transport- bzw. Konvertierungsebene (Reservekapazitäten, Energiemix, Netze) und die Verletzbarkeit auf der Ebene der Verbraucher (Energieeffizienz, Energiekosten).

2.1.3 Komponenten einer Methodik zur Bewertung von Energiesicherheit

In der gegenwärtigen Literatur ist man sich einig, dass Importabhängigkeit und Diversifikation wichtige Größen der Energie(versorgungs)sicherheit sind. Doch einige Wissenschaftler sind der Meinung, dass diese Aspekte nicht ausreichend sind, um die Komplexität und Vielfalt der Energiesicherheit abzubilden. Es bedarf eines Konzepts, das gesellschaftliche und ökologische Dimensionen, technische Probleme, sowie Energieeffizienz berücksichtigt und somit (Sicherheits)Risiken in vielen Bereichen abbildet. Dies würde es Politikern ermöglichen, ihre Entscheidungen auf einem ganzheitlichen Verständnis der Energiesicherheit zu fundieren (Cherp & Jewell, 2011a & 2011b; Sovacool & Mukherjee, 2011; Vivoda, 2010, Yergin, 2006). Dieses Einbinden verschiedener Aspekte, Bereiche oder Dimensionen führt zwangsläufig zu einer Erweiterung des zuvor aufgezeigten Verständnisses zu Versorgungssicherheit, und bietet damit Raum zu einer Vielfalt an Definitionen oder Festlegungen des Begriffs Energiesicherheit.

Sovacool (2011) hat 45 unterschiedliche Definitionen des Begriffs Energiesicherheit zusammengestellt, die unterschiedlichen Dimensionen und Eigenschaften umfassen. Winzer 2012 fasst hingegen unter Energiesicherheit nur drei Bereiche zusammen: Nachhaltigkeit, Effizienz (Wirtschaftlichkeit) und Versorgungssicherheit. Um Überlappungen zu vermeiden, schlägt er vor, das Konzept der Energiesicherheit auf Kontinuität der Energieversorgungssicherheit einzuengen. Er verwendet somit beide Begriffe synonym und listet für diese eingeschränkte Betrachtung der Energiesicherheit 36 Definitionen aus der Literatur auf, während Martchamadol und Kumar (2012) elf Definitio-

nen der Energiesicherheit von internationalen Organisationen und Nationalstaaten aufzuführen. Daher sind nachfolgend zunächst die verschiedenen Dimensionen der Energiesicherheit aufgeführt, sowie anschließend mögliche Indikatoren zu ihrer Messung.

2.1.3.1 Dimensionen und Eigenschaften des Begriffs Energiesicherheit

Trotz der zahlreichen Definitionen, werden zur Bestimmung der Energiesicherheit oft ähnliche **Eigenschaften** zur Beschreibung eines Energiesystems hinsichtlich Sicherheit verwendet (Martchamadol & Kumar, 2012; Sovacool, 2011; Winzer, 2012). Zu den häufigsten Eigenschaften zählen: Erschwinglichkeit/Bezahlbarkeit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Akzeptanz und Nachhaltigkeit. Sovacool et al., 2011 verstehen unter Energiesicherheit „equitably provide available, affordable, reliable, efficient, environmentally benign, proactively governed and socially acceptable energy services to end-users.“ Viele dieser Eigenschaften erfordern eigene Definitionen, die wiederum stark abhängig von der Perspektive der Beteiligten sind. Pasqualetti und Sovacool (2012) geben einen Überblick über die Bedeutung der Energiesicherheit bzw. über die Bedeutung, die den einzelnen Eigenschaften beigemessen wird. Sie zeigen, wie unterschiedlich die Ansichtsweisen der Interessengruppen hinsichtlich derselben Eigenschaften sind.

Verschiedene **Dimensionen**, beispielsweise ökonomische, soziale, technische Aspekte können helfen, verschiedene Perspektiven auf Energiesicherheit zu eröffnen und die Ansichten der verschiedenen Akteure abzubilden (Pasqualetti & Sovacool B. K., 2012). Das Spektrum der Dimensionen ist fast so breit wie das Spektrum der Definitionen. Sie unterscheiden sich nach Kontext der Bewertung und der Aggregationsebene der verschiedenen Stakeholder. Mükusch (2012) zählt drei Dimensionen der Energiesicherheit auf: Staat/Politik, Wirtschaftlichkeit und Gesellschaft. Martchamadol und Kumar (2012 & 2013) verfolgen einen ähnlichen Ansatz und diskutieren vier Dimensionen: eine institutionelle, eine soziale, eine ökologische und eine ökonomische Dimension. (Martchamadol & Kumar, 2012 & 2013). In ähnlicher Weise beschränken (Cherp & Jewell, 2011a) die Diskussion auf fünf Dimensionen: eine natürliche, eine wirtschaftliche, eine technische, eine politische und eine Diversität-Perspektive (Cherp & Jewell, 2011a). Von Hippel et al. (2011) definieren sechs Dimensionen der Energiesicherheit: ökonomisch, technisch, ökologisch, sozio-kulturell, militärisch und eine Dimension der Energieversorgung. Vivoda (2010) fügt fünf zusätzliche Dimensionen zu Hippel et al. (2011) hinzu (Vivoda, 2010, von Hippel, D. F. et al., 2011). Eng damit verbunden sind die Dimensionen von Augutis et al. (2012). Es werden einbezogen: technologische, natürliche, ökonomische, sozio-politische Dimensionen, sowie Terrorismus, Krieg und Bedrohung der Energiesicherheit (Augutis et al., 2012). Indriyanto et al., (2011) argumentieren, dass das neue Energiesicherheitsparadigma sehr eng mit dem Paradigma

der nachhaltigen Entwicklung zusammenhängt und drei Dimensionen umfasst: soziale, ökonomische und ökologische (Indriyanto et al., 2011).

Im Gegensatz dazu verwendet Winzer (2012) den Begriff Dimensionen der Energiesicherheit in einem anderen Zusammenhang. Winzer (2012) geht nicht explizit auf Perspektiven oder Ansichten der Stakeholder ein. Er identifiziert vielmehr verschiedene Risikoquellen (menschliche, technische und natürliche) und verschiedene Bereiche der Auswirkungen (technische, gesellschaftliche und wirtschaftliche) und versteht Energiesicherheit als ein Konzept, welches das Ausmaß oder die Stärke der Risiken oder Bedrohungen über bestimmte Indikatoren erfasst. Er bezeichnet dabei die Risikoquelle, den Indikatormessbereich (scope of the impact measure) sowie das Ausmaß des Risikos als Dimensionen.

2.1.3.2 Indikatoren

Indikatoren stellen Messgrößen dar, die helfen können, Energiesicherheit zu bewerten. Sie können quantitativ oder qualitativ sein. Zudem können mehrere einfache Indikatoren zu komplexen Indikatoren kombiniert werden.

Viele Indikatoren, die zur Quantifizierung der Energiesicherheit angelegt werden, stammen aus anderen Wissenschaftsdisziplinen. So sind Indikatoren für Preisvolatilitäten aus der Wirtschaftstheorie entlehnt. Indikatoren für Störungen und Ausfallwahrscheinlichkeiten stammen aus der Infrastrukturanalyse, während Indikatoren, die Abhängigkeiten von Akteuren beschreiben, in der Regel aus der politischen Wissenschaft kommen. Einige Wissenschaftler erstellen auch spezielle Indikatoren für die Energiesicherheit. Gupta (2008) beispielsweise entwirft einen Index, um die relative Verwundbarkeit der Öl importierenden Nationalstaaten zu messen.

Die Mehrheit der Indikatoren konzentriert sich auf die kurz- oder langfristige Kraftstoffversorgung. Import-Abhängigkeiten oder das Verhältnis zwischen Ressourcen und Produktion bestimmter Brennstoffe sind typische Beispiele für Indikatoren, die sich auf die Versorgungssicherheit konzentrieren (unter anderen: Indriyanto et al., 2011; Kruyt et al., 2009; Jewell, 2010). Nur wenige Indikatoren richten sich nach dem Energiebedarf, indem sie die Energie-Effizienz oder die Notwendigkeit für spezifische Eigenschaften von Energiedienstleistungen messen (u.a. Jansen & Seebregts, 2010; Jansen & van der Welle, A. J., 2011; Sovacool & Mukherjee, 2011).

Zwei Hauptindices sind bei Energiesicherheitsbewertungen dominant: Der Angebot-Nachfrage-Index und der Shannon-Wiener Diversität-Index (International Energy Agency, 2007) oder der Herfindahl-Index. Der Angebot-Nachfrage-Index misst die Verfügbarkeit und die Knappheit der Energieressourcen. Der Shannon-Wiener Diversität-Index misst den Grad der Vielfalt bestimmter Energie-Portfolios bzw. der Herfindahl-

Index die Konzentration der Lieferanten eines Energieträgers. Jansen und Seebregts (2010) sowie Kessels (2011) diskutieren diese beiden Indices im Detail. Die Europäische Union nutzt ebenfalls diese Indices, um die Energiesicherheit der EU-Länder abzuschätzen (Scheepers et al., 2007).

Die meisten Wissenschaftler wählen Indikatoren, die einem spezifischen Zweck angepasst sind. Daher unterscheiden sich Anzahl und Art der Indikatoren signifikant, je nach Zielsetzung der jeweiligen Energiesicherheitsbewertung (u.a. Prambudia Y. & Nakano, 2012; Selvakkumaran & Limmeechockchai, 2012, Winzer, 2012). Generelle Indikatorgruppen sind jedoch meist nicht praktikabel für die Bewertung der Energiesicherheit eines spezifischen Energiesystems.

Sovacool und Mukherjee (2011) beispielsweise führen eine Liste von 320 einfachen und 52 komplexe Indikatoren für politische Entscheidungsträger und Wissenschaftler an, um nationale Leistung der Energiesicherheit zu vergleichen. Die Indikatoren sind in fünf Dimensionen und zwanzig Komponenten gruppiert. Sovacool stand in der Kritik, diese Liste sei zu lang und generisch. Später führte er auch gewichtete Indikatoren für spezifischere Einsätze an (Sovacool, 2012 & 2013; Sovacool & Brown, 2011; Sovacool & Mukherjee, 2011).

In der Literatur werden Indikatoren so gewählt, dass sie auf jede Technik oder Art von Energieträger angewandt werden können, die dem betrachteten Energiesystem zugrunde liegen. Indikatoren werden immer mit Hilfe von Dimensionen und/oder Eigenschaften festgelegt. Durch diese Festlegung reduziert sich allerdings die Anzahl der verfügbaren Indikatoren (u.a.: Cherp, 2012; Cherp & Jewell, 2011a; Martchamadol & Kumar, 2012 & 2013, von Hippel, D. F. et al., 2011; Vivoda, 2010).

2.2 Experteneinschätzung und Energiesicherheit in dieser Studie

Der Literaturüberblick zu Energiesicherheit und Versorgungssicherheit verdeutlicht sehr schön die Vielfalt und Heterogenität der Arbeiten und Ansätze zur Erfassung dieser beiden Größen. Neben der Frage der Dimension und den teils damit verbundenen Eigenschaften und Indikatoren sind auch die Ebenen der Betrachtung (Primär-, Sekundär-, Endverbrauch), die Energiebereiche, Technologievielfalt und Verbrauchs- und Einsatzsektoren klar abzugrenzen bevor die Aggregation der Messgrößen angegangen werden kann. Eine einheitliche Definition der Begriffe ist jedoch nicht möglich, da diese von der Fragestellung, der Wahrnehmung und Perspektive sowie dem damit verbundenen Verständnis des Begriffs abhängt. So zeigen Arbeiten Sovacools (2011) und Sovacool et al., 2012, dass beispielsweise in Deutschland die Komponenten, die sich auf Versorgungssicherheit beziehen, in den Interviewergebnissen als relativ unbedeutend im Vergleich zu anderen Dimensionen gewertet wurden; jedoch in Ländern wie

Brasilien, Indien, China, etc. Versorgungssicherheit (supply of energy) als deutlich wichtiger eingeschätzt wurden. Somit zeigt sich, dass ein Konzept zur Erfassung der Energiesicherheit auf Länderebene letztendlich dadurch geprägt wird, wie stark welche Risiken wahrgenommen werden und wie hoch deren erwartetes Ausmaß eingeschätzt wird, d.h. mit zunehmender Bedeutung und steigender Eintreffwahrscheinlichkeit eines Risikos geht dieses in das Messkonzept zur Energiesicherheit ein. Um die Bedeutung verschiedener Eigenschaften von Energiesicherheit für die Messung von Energiesicherheit besser zu verstehen, wurde in Schlotz 2013 eine kleine Expertenbefragung durchgeführt. Die Umfrage umfasst internationale Experten im Bereich Politik und Wissenschaft (n = 9). Die Experten durften ein Votum zur Bedeutung der sechs in der Literatur am häufigsten aufgeführten Dimensionen, Eigenschaften und Indikatoren abgeben (siehe Abbildung 2). Hierbei ist zu erwähnen, dass eine Eigenschaft unterschiedliche Dimensionen ansprechen sowie ein und derselbe Indikator beispielsweise zur Messung der Verfügbarkeit und Diversität genutzt werden kann. Die Dimensionen unterscheiden sich hierbei nicht nach Quelle des Risikos oder dessen Auswirkung.

Abbildung 2: Eigenschaften und Dimensionen zur Erfassung der Energiesicherheit

		Characteristics		
		Acceptability Availability	Accessibility Diversity	Affordability Efficiency
Dimensions	Economic	Indicators		
	Environmental			
	Natural			
	Political			
	Societal			
	Technical			

Quelle: Schlotz 2013

Die ökonomische Dimension erzielte mit Abstand das höchste Ranking, während die Bedeutung der anderen Dimensionen als sehr ähnlich gesehen wurde. Unter den Eigenschaften wird der Zugang zu Energie sowie die Bezahlbarkeit als sehr wichtig angesehen, während Diversität und Effizienz eher als weniger bedeutend angegeben werden. Interessanterweise steht in der Umfrage unter den Indikatoren die Importabhängigkeit der Energiesicherheit an erster Stelle, gefolgt von Marktdiversität, Systemeffizienz und Nachhaltigkeit.

In diesem Beitrag wird **Energiesicherheit** als Ziel nationaler Energiepolitik verstanden, wobei Versorgungssicherheit mit Fokus auf externe Versorgung ein Teilaspekt der Energiesicherheit ist. Nachfolgend wird Energiesicherheit auf die verschiedenen Bereiche bezogen, in denen Risiken auftreten, erfasst oder gemessen werden können: ökonomische, gesellschaftliche, politische, ökologische, technische und naturbedingte Dimension. Die Wirkung der Risiken wird hingegen über ihren Einfluss auf die Eigenschaften wie Erhöhung oder Verminderung der Verfügbarkeit, Disparität, Bezahlbarkeit, etc. erfasst.

3 Konzept zur Erfassung der Energiesicherheit im Wärmebereich

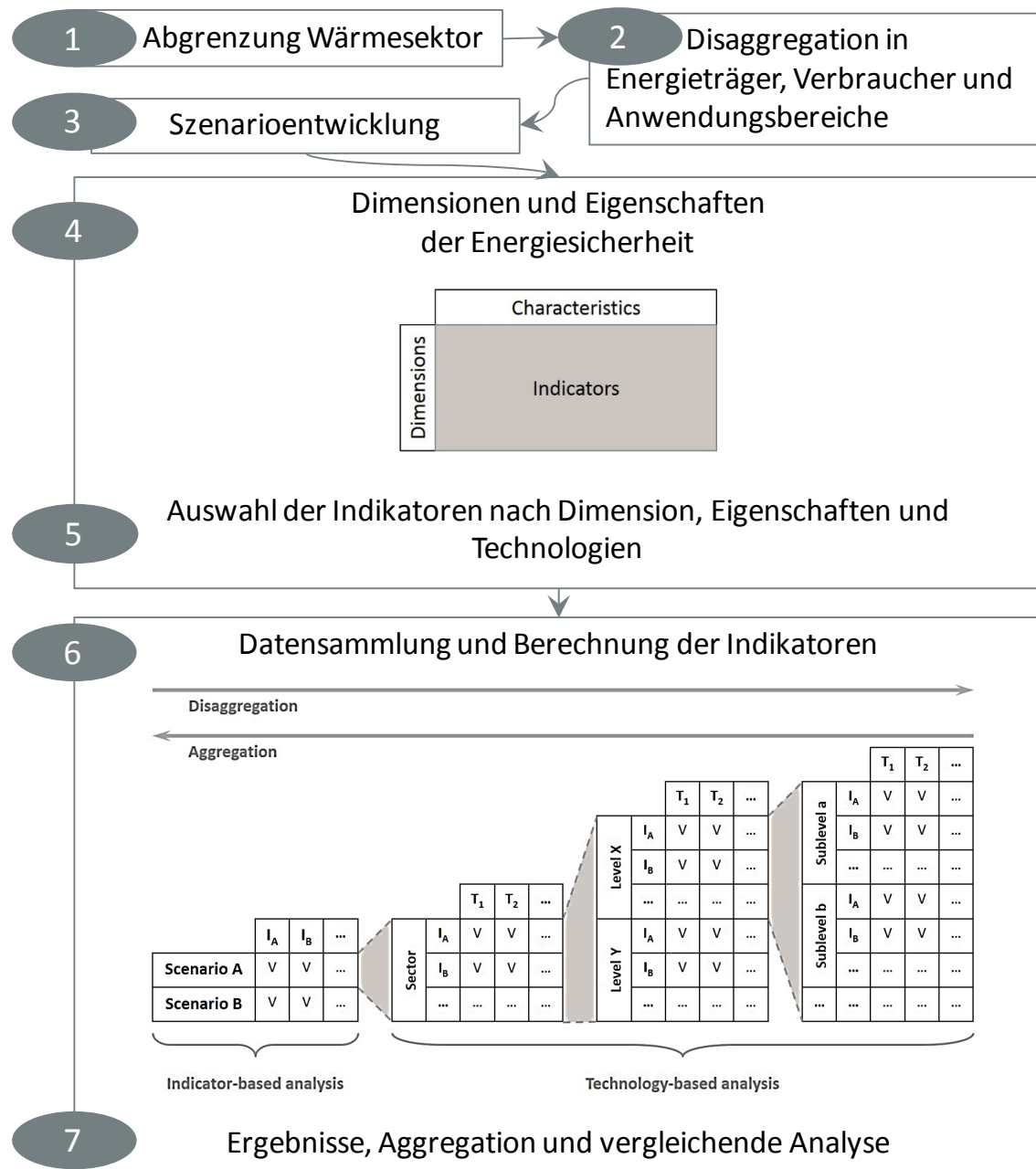
Zur Messung der Versorgungssicherheit bzw. der Energiesicherheit sind zunächst drei Leitfragen zu beantworten:

- Welche Eigenschaften soll ein Energiesystem im deutschen Wärmesektor erfüllen, damit es eine hohe Energiesicherheit ausweist?
- Mit welchen Indikatoren können sie gemessen werden?
- Auf welcher Aggregationsebene erfolgt die Messung?

Diese Fragen implizieren mehrere Unterfragen bzw. Schritte, die letztendlich in ein umfassendes Konzept zur Messung des Einflusses EE auf die Energie(versorgungs)sicherheit münden. Dieses ist nachfolgend in Abbildung 3 dargestellt:

1. Im ersten Schritt wird der Wärmesektor inklusiver seiner Technologien, Verbrauchssektoren und Einsatzbereiche der Wärme vom restlichen Energiesektor abgegrenzt. Diese Abgrenzung erfolgt in Kapitel 3.1.
2. In einem zweiten Schritt müssen die zu betrachteten Technologie- und Verbrauchsbereiche festgelegt werden. Da sich diese aus der Abgrenzung des Wärmesektors und der Datenverfügbarkeit ergeben, folgt dieser Schritt nach Kapitel 3.2.
3. Dem schließt sich die Bildung zweier Szenarien an, die die Wärmeerzeugung mit EE und ohne EE abbilden. Diese Szenarioentwicklung beruht auf den aktuellen Daten und ist in Kapitel 3.2 beschrieben.
4. Die Festlegung, welche Dimensionen und Eigenschaften/Charakteristika unser Verständnis von Energie(versorgungs)sicherheit am besten abdeckt, basiert auf einer Literaturrecherche und Expertenmeinungen (Kapitel 3.3).
5. Entsprechend der ausgewählten Dimensionen und Charakteristika bietet die Literatur ein Pool an Indikatoren. Je nach Datenverfügbarkeit und Expertenmeinung werden verschiedene Indikatoren ausgewählt (Kapitel 3.4).
6. Basierend auf vorliegenden Daten erfolgt die Berechnung der Indikatorwerte, methodische Erläuterungen sind in Annex 6.2 zu finden.
7. Die Ergebnisse werden auf Endverbrauchsebene ermittelt und nach Sektoren und Energiesystem ausgewiesen. Energiesicherheit wird anhand einer unterschiedlichen Kombination von Indikatoren erfasst. Beide Größen werden auf Sektor- und Energiesystemebene dargestellt (siehe Kapitel 4).

Abbildung 3: Konzeption des Vorgehens



Quelle: Schlotz 2013, angepasst

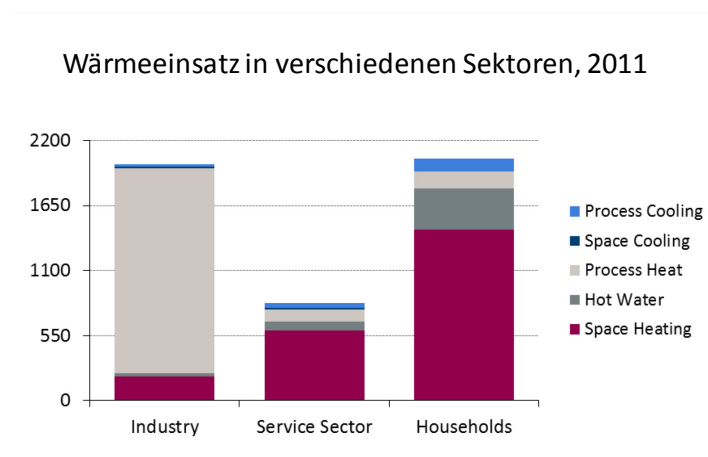
3.1 Abgrenzung des Energiesystems

Da der Energieeinsatz in den Bereichen Wärme, Strom und Transport hinsichtlich der Energieträger, Technologien, Anwendungsbereiche und Verbrauchssektoren sehr unterschiedlich erfolgt und somit eine Vielfalt an Indikatoren erfordert sowie eine große Herausforderung für die Aggregation der Größen darstellt, konzentriert sich diese Arbeit auf einen klar umrissenen Untersuchungsbereich, den deutschen Wärmebereich. Abschätzungen zur Energie- und Versorgungssicherheit speziell für den Wärmebereich

sind den Autoren dieser Arbeit bisher nicht bekannt. Darüber hinaus ist der Wärmebereich mit ein paar Ausnahmen sehr gut vom Strom- oder Transportbereich abgrenzbar.¹

Der deutsche Wärmeerzeugungssektor ist stark dezentralisiert, d.h. rund 90 % des Endenergieverbrauchs für Wärme wird durch Anlagen, die in Gebäuden integriert sind, bereitgestellt (AGEB 2013). Er lässt sich in drei Verbrauchssektoren untergliedern – Industrie, Gewerbe-, Handel-, Dienstleistungssektor (GHD) und Haushalte, wobei Haushalte direkt gefolgt von der Industrie den höchsten Verbrauch aufweisen. Eine Aufteilung des Energieverbrauchs nach Anwendungsbereichen weist die Raumwärme als größter Verbrauchsbereich auf, gefolgt von Prozesswärme und mit deutlichem Abstand von Warmwasser, Prozesskälte und Raumkühlung.

Abbildung 3-1: Endenergieverbrauch für Wärme nach Sektoren und Anwendungsbereichen, 2011



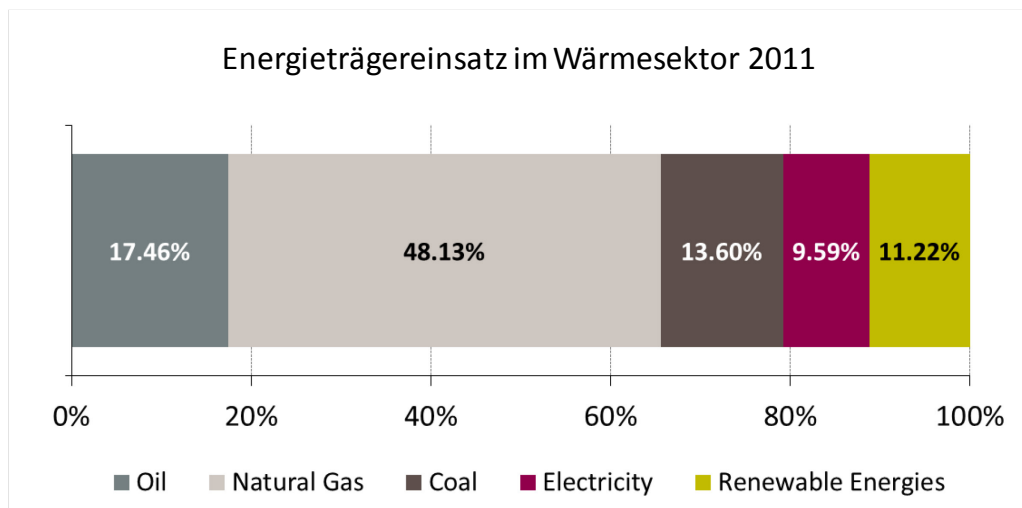
Quelle: Schlotz 2013 basierend auf AGEB 2013

Der Energiemix zur Erzeugung von Wärme ist Abbildung 4 zu entnehmen. Für die nachfolgende Analyse wird allerdings Elektrizität im Wärmebereich² nicht explizit betrachtet, da ansonsten weitere Ebenen, Systemeigenschaften und Technologien in die Analyse eingeschlossen werden müssten und somit deren Komplexität erhöhen und ggf. Aussagekraft vermindern. Diese Einschränkung wird jedoch umso problematischer, je mehr Strom für Heizzwecke, Lüftung, etc. benötigt wird wie beispielsweise in Frankreich. Fernwärme wird über die zur Fernwärme benötigten Energieträger berücksichtigt. Aspekte der Netzinfrastruktur (Wärmenetze) bleiben jedoch ebenfalls unberücksichtigt. Somit umfasst die Analyse die wesentlichen Energieträger für Heizzwecke

- 1 Ausnahmen sind beispielsweise Strom für Heiz- und Kühlzwecke sowie der Einsatz von Elektroautos.
- 2 Elektrizität wird implizit über Effizienz bei Wärmepumpen, Erzeugungskosten sowie über die Importabhängigkeit und Preisvolatilitäten der Energieträger Kohle, Gas oder Biomasse, die ja auch zur Stromerzeugung eingesetzt werden, berücksichtigt.

jedoch nicht Infrastrukturaspekte wie in Abbildung 4 dargestellt. Der Einsatz EE-Träger zur Wärmeerzeugung in Deutschland ist allerdings für die Abschätzung differenzierter erfasst als in Abbildung 4 ausgewiesen.

Abbildung 4: Energiemix für Wärme in Industrie, GHD, Haushalte



Quelle: Schlotz 2013 basierend auf AGEB 2013

3.2 Disaggregation des Endverbrauchs und Szenario-Entwicklung

Auf Grundlage dieser drei Abgrenzungskriterien Anwendungsbereich, Verbrauchssektor und Energieträger bzw. Technologien spannt sich eine Matrix zum Endenergieverbrauch auf (Tabelle 1), die als Ausgangsbasis für ein Wärmeerzeugungssystem mit und ohne EE dient. Der Endverbrauch der Sektoren Haushalte, GHD und Industrie unterteilt sich in Raumwärme, Prozesswärme, Warmwasser. Kälteerzeugung wird aufgrund der geringen Bedeutung von Energie zur Kältebereitstellung in Deutschland in der nachfolgenden Analyse nicht weiter berücksichtigt. Ebenfalls nicht berücksichtigt werden Prozesswärme bei Haushalten und GHD sowie Warmwasser bei Industrie und GHD, da diese beiden Anwendungsbereiche in den jeweiligen Sektoren nicht von großer Bedeutung sind und detaillierte Daten teils nur begrenzt verfügbar sind. Somit beschränkt sich die Analyse auf die folgenden Sub-Sektoren:

- Warmwasser und Raumwärme in Haushalten,
- Raumwärme in GHD,
- Raum- und Prozesswärme in der Industrie.

Die zur Wärmeerzeugung genutzten Technologien bzw. Energieträger umfassen Öl, Erdgas, Kohle, Biomasse, Biogas, tiefe und oberflächennahe Geothermie und

Solarthermie³. Vom Energieträgermix in Abbildung 4 wird der Strombedarf für Wärme abgezogen und die Anteile EE und Fernwärme auf die jeweiligen Energieträger verteilt. Der Endenergieverbrauch wird so je Technologie, Verbrauchssektor und Anwendungsbereich ausgewiesen.

Tabelle 1: Energieverbrauch nach Anwendungsbereich, Sektor und Energieträger, in PJ, 2011 (Szenario I mit EE)

		Scenario I			
		End Use			
		Space Heating	Hot Water	Process Heating	
Sector	Industry	Oil	22,0	2,1	98,3
		Natural Gas	128,9	13,5	865,5
		Coal	22,1	2,3	438,5
		Biomass	29,8	3,1	141,1
		Biogas	0,0	0,0	0,0
		Geothermal	0,0	0,0	0,0
		Solar Thermal	0,0	0,0	0,0
	Service Sector	Oil	141,1	12,9	27,3
		Natural Gas	356,5	28,3	45,0
		Coal	44,4	2,0	5,1
		Biomass	10,0	0,8	2,2
		Biogas	22,7	2,4	4,7
		Geothermal	0,7	0,4	0,0
	Households	Oil	416,6	85,4	0,0
		Natural Gas	624,0	156,2	3,0
		Coal	106,3	6,8	0,0
		Biomass	221,5	10,7	0,0
		Biogas	10,4	5,2	0,0
Geothermal		29,7	1,8	0,0	
Solar Thermal		2,0	11,5	0,0	

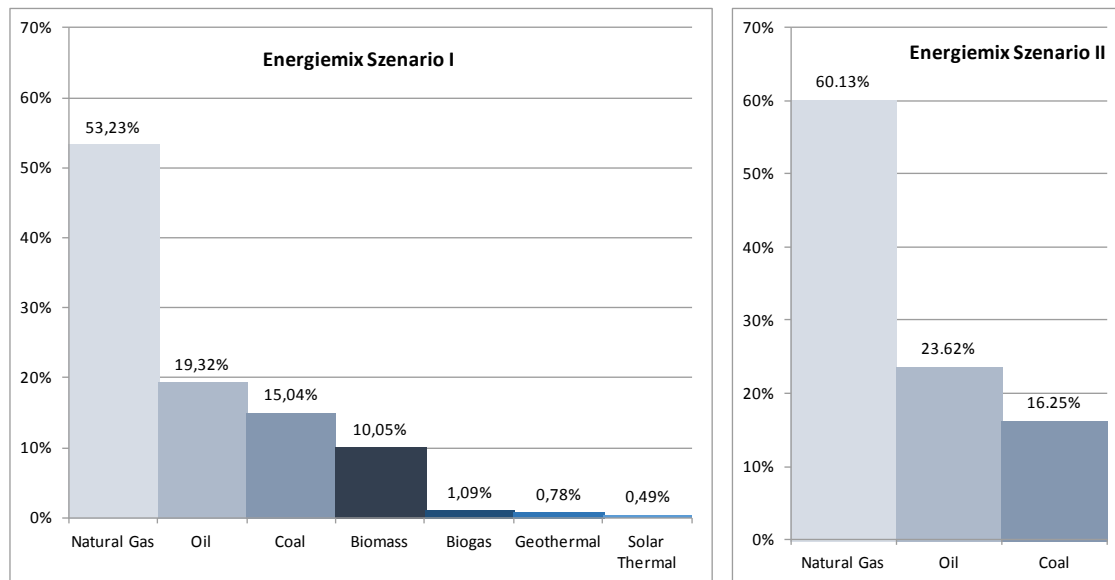
Quelle. Schlotz 2013 basierend auf AGEB 2013, Daten von 2011. Geothermal umfasst tiefe wie oberflächennahe Geothermie.

Zur Erstellung eines Systemvergleichs „mit und ohne EE“ werden zwei Szenarien festgelegt: Ein „mit EE Szenario“, das sich an den tatsächlichen Endverbrauch von Wärme in Deutschland anlehnt und eines, bei dem es keine EE gibt. D.h. die EE-Träger, die im „mit EE Szenario“ (Szenario I) zur Wärmeerzeugung beitragen, werden auf Grundlage der Substitutionsfaktoren des UBA (siehe Annex, UBA 2009) im „ohne EE Szenario“

³ Die Abwärme wird wie in der AGEB Anwendungsbilanz nicht gesondert ausgewiesen und somit hier auch nicht gesondert betrachtet.

(Szenario II, siehe Anhang) durch fossile Energieträger ersetzt. Somit errechnet sich auf Basis des tatsächlichen Verbrauchs, dargestellt in Tabelle 1, und der Substitutionsfaktoren das „ohne EE Szenario“. Die Zusammensetzung des Verbrauchs nach Energieträger bzw. Technologie der jeweiligen Szenarien ist in Abbildung 5 (und Annex 6.1) dargestellt.

Abbildung 5: Energieträgereinsatz mit und ohne EE



Quelle: basierend auf Schlotz 2013

3.3 Festlegung der Dimension, Eigenschaften und Indikatoren

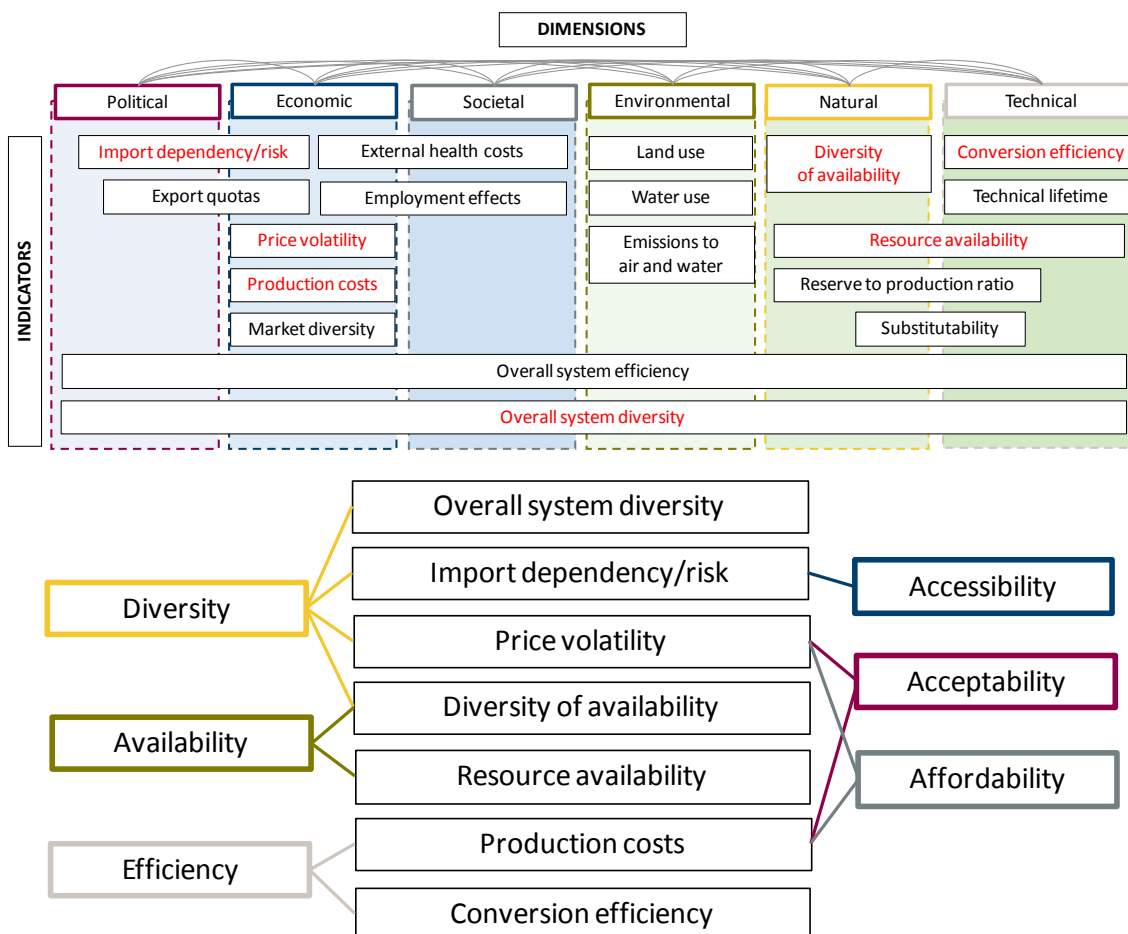
Zur Abschätzung des Einflusses EE auf die Energiesicherheit bzw. zur Auswahl der Indikatoren finden verschiedene Dimensionen und relevante Eigenschaften des Energiesystems hinsichtlich der Sicherheit Berücksichtigung.

Die Häufigkeit der Nennung der verschiedenen **Dimensionen und Eigenschaften** in der Literatur zur Erfassung der Energiesicherheit bietet sich als Selektionskriterium an, obwohl diese nicht zwangsläufig ein Maß für Qualität oder Eignung der Dimension oder der Eigenschaft hinsichtlich der Fragestellung darstellt. Basierend auf den Recherchen spannt sich somit eine Matrix zwischen den Dimensionen Wirtschaft, Gesellschaft, Politik, Umwelt, Technik, natürliche Gegebenheiten und den Eigenschaften Akzeptanz, Verfügbarkeit, Diversität, Effizienz, Zugänglichkeit, Bezahlbarkeit.

Alle der Literatur entnommenen, wichtigen Eigenschaften finden Eingang in den Schätzansatz während bei den Dimensionen eine Einschränkung erfolgt: die Dimensionen Gesellschaft, Umwelt bzw. Nachhaltigkeit sind in der Literatur als wichtige Ele-

mente der Energiesicherheit identifiziert, aber sie werden nachfolgend nicht weiter berücksichtigt, da im Rahmen des Projektes ImpRES die Umweltwirkungen hinsichtlich Emission von Luftschadstoffen und Treibhausgasen gesondert Beachtung finden. Dagegen ist die ökonomische Dimension durch zwei Indikatoren vertreten, die nicht vernachlässigbare Eigenschaften der Energiesicherheit widerspiegeln. Somit beinhaltet die Analyse eine ökonomische, politische, technische und natürliche (ressourcenbezogen) Dimension. Zu beachten ist, dass manche Indikatoren sich teilweise über mehrere Dimensionen (Abbildung 6) erstrecken oder für mehrere Eigenschaften stehen sowie mit diesen positiv wie negativ korreliert sein können.

Abbildung 6: Beziehung von Dimensionen, Eigenschaften und Indikatoren



Quelle: Schlotz 2013, angepasst

Mit Hilfe der in der Literatur aufgeführten Zuordnungen von Indikatoren zu Dimensionen bzw. Eigenschaften, werden für die vorliegende Fragestellung Indikatoren zusammengestellt, die möglichst weitgehend die gewählten Dimensionen und Eigenschaften abdecken. Des Weiteren stützt sich die Selektion auch auf Expertenmeinungen. Die befragten Experten identifizieren eindeutig Importabhängigkeit als wichtigsten Indika-

tor, gefolgt von Marktdiversität, Nachhaltigkeit und Effizienz. Diese finden sich auch häufig in der Literatur im Zusammenhang mit den ausgewählten Dimensionen wieder.

Darüber hinaus erscheint es angebracht, sich auf diejenigen Faktoren der Energiesicherheit zu beschränken, auf sich durch den Ausbau erneuerbarer Energien ggf. verändern können. Auf Primärebene sind dies Importabhängigkeit und Diversifikation des Energieportfolios bzw. der Energiemix. Auf Verbraucherebene sind vor allem Unterschiede bei Energiepreisen und –Kosten sowie bei Preisvolatilitäten zu beobachten. Des Weiteren unterscheiden sich EE durch ihre Verfügbarkeit und Wirkung auf Umwelt und Gesundheit. Eine Differenzierung der Indikatoren hinsichtlich der Anwendungsbereiche oder Verbrauchssektoren erfolgt nicht.

Die für die weitere Analyse ausgewählten Indikatoren umfassen somit folgende Aspekte:

- Importabhängigkeit bzw. –risiko mit Blick auf die externe Versorgungssicherheit
- Preisvolatilität mit Blick auf Akzeptanz und Kostenunsicherheit
- Kurzfristige Verfügbarkeit im Sinne einer verlässlichen Versorgung
- Produktionskosten mit Blick auf die Bezahlbarkeit
- Umwandlungseffizienz im Hinblick auf die benötigte Menge eines Energieträgers
- Vielfalt verfügbarer Ressourcen und Energiesystemdiversität

Zu beachten ist, dass die absoluten Indikatorwerte hinsichtlich Energiesicherheit je nach Bezug und Indikator unterschiedlich zu interpretieren sind. Dies wird auf Subsektorebene jeweils bei den Indikatoren vermerkt.

Hinsichtlich des Anwendungsbereichs- und **Systemvergleichs** sind die Indikatoren normiert: ein negatives Vorzeichen weist auf eine abnehmende Energiesicherheit bei zunehmenden Einsatz EE hin, ein positives Vorzeichen auf eine zunehmende Energiesicherheit.

3.4 Indikatoren

Die hier dargestellten Indikatoren haben nicht zum Ziel die Wirkung EE auf die Energiesicherheit monetär zu quantifizieren. Sondern sie stellen dimensionslose Werte dar, die Aussagen hinsichtlich der jeweiligen Dimension(en) und Eigenschaften der Energiesicherheit erlauben und nicht zu einem „composite“ Indikator zusammengebaut werden. Die absoluten Werte der verschiedenen Indikatoren sind nicht miteinander vergleichbar, da sie auf unterschiedlichen Eingangsgrößen beruhen.

Zu beachten bleibt, dass das Heranziehen von Indikatoren zur Messung des Einflusses EE auf die Energiesicherheit immer nur Teilaspekte abbildet, wobei einzelne Eigen-

schaften oder Dimensionen je nach Auswahl der Indikatoren unterschiedlich stark in die Betrachtung eingehen können.

Grundsätzlich sei noch angemerkt, dass durch den hier durchgeführten Systemvergleich die Gewichte der einzelnen Faktoren wie beispielsweise Distanz oder politische Stabilität nicht zwangsläufig auf eins normiert sein müssen. Nachfolgend ist die Berechnung, Datenbasis und Aussage der einzelnen Indikatoren dargestellt.

3.4.1 Importabhängigkeit

Eine wichtiger Aspekt für die Versorgungssicherheit ist, wie stark die Versorgung eines Energieträgers vom Import abhängig ist, wobei hier nicht nur die Einfuhr sondern auch die Sicherheit der Einfuhr bzw. die Unterbrechung aufgrund politischer Instabilitäten im Bezugsland/region (siehe Cohen et al. 2011, Lehr 2009) sowie das Risiko bei hohen Transportstrecken mit berücksichtigt werden soll. Nachfolgend wird diese Abhängigkeit als Importabhängigkeit bezeichnet und zunächst anhand einer einfachen Berechnung quantifiziert.

Vorgeschlagen wird hier die Importabhängigkeit eines Landes für jeden Energieträger separat auszuweisen und zwar als Summe der mit der politischen Stabilität und Entfernung gewichteten Importanteile vom jeweiligen Bezugsland multipliziert mit der Gesamtimportquote des Energieträgers. Die politische Stabilität sowie die Entfernung wurden auf den Wert 1 normiert. Die Indikatorwerte der Importabhängigkeit sind dimensionslos und haben daher nur in Relation zueinander Aussagekraft. So impliziert im Vergleich ein höherer Indikatorwert auch eine höhere Importabhängigkeit, und somit eine geringere Energiesicherheit.

$$IA = \left(\sum_{i=1}^n (\text{Importanteil von Land}_i * \text{politische Stabilität}_i * \text{Entfernung}_i) \right) * \text{Gesamtimportquote}$$

Importanteil: Anteil eines Energieträgers am Gesamt Nettoimport des Energieträgers eines Landes; je höher der Quotient desto höher die Abhängigkeit von einem Land

politische Stabilität Land i: je höher der Wert desto instabiler die politische Situation

Distanz des Landes i: Entfernung zu Deutschland

Gesamtimportquote: jeweiliger Nettoimportanteil des Energieträgers

Die Daten zur politischen Stabilität beruhen auf dem politischen Instabilitätsindex „Worldwide Governance Indicators (WGI)“⁴. Die Datenwerte hinsichtlich der Entfernung stammen aus DFT (2013). Die Importdaten basieren auf BAFA (2012 & 2013), VDKI (2012), und DERA (2012 & 2013).

Die Rechnung basiert auf der Überlegung, dass das Risiko und damit die Importabhängigkeit mit der politischen Instabilität und der Entfernung zu nehmen. Für Deutschland ergeben sich die in Tabelle 2 aufgeführten Werte. Sie zeigen für Kohle eine größere Importabhängigkeit auf als für Erdöl, da über 50% des deutschen Imports aus Süd/Nordamerika, Australien oder Südafrika importiert wird. Durch Minderung des Gewichts „Entfernung“ würde sich der Indikatorwert für Kohle relativieren. Da bei fester Biomasse Deutschland weitestgehend von Importen unabhängig ist die Importabhängigkeit gleich Null.

Tabelle 2: Indikatorwerte der Importabhängigkeit

Nettoimport 2011	in %	Indikatorwert
Öl	96,60 %	0,18
Erdgas	86,40 %	0,10
Steinkohle	81,60 %	0,23

Diese Berechnung birgt zwar den Vorteil einer hohen Transparenz und nachvollziehbaren Abzuschätzen, allerdings werden hier einige Faktoren nicht oder ungleich berücksichtigt, die Einfluss auf das Risiko des Imports haben könnten:

- Eine hohe globale Marktdiversität vermindert die Wirkung des Ausfalls eines einzelnen exportierenden Landes. Gerade bei Steinkohle ist der Weltmarkt sehr heterogen bzw. divers, sodass das Risiko durch den Ausfall eines Exportlandes eher gering einzuschätzen ist.
- Die Anzahl der Länder, aus denen importiert wird. Je größer die Anzahl der Länder, desto eher werden Risiken durch einzelne Ausfälle gemindert.
- Das Transportrisiko wird hier mit der Distanz zum Importland abgeschätzt. Jedoch ist fraglich, ob die alleinige Distanz als Maß des Risikos ausreicht. Es ist beispielsweise vorstellbar, dass etwa das Risiko eines Ölimports mittels Pipeline durch Krisenländer des nahen Ostens höher ist, als der Steinkohleimport mit einem Schiff aus Kolumbien.
- Die Möglichkeit des Wechsels zu einem anderen Bezugsland/region, bezeichnet als Fungibilität, spielt eine Rolle. Beispielsweise hat Steinkohle durch seine regionale Verteilung der Vorkommen eine denkbar höhere Fungibilität als Gas

⁴ <http://info.worldbank.org/governance/wgi/index.aspx#home>

und Öl. Darüber hinaus wird bei Importen via Pipelines der Wechsel des Lieferanten erschwert.

Die Bewertung des Transportrisikos oder der Fungibilität birgt jedoch einen immer größeren Spielraum für subjektive Einschätzungen. Somit besteht ein Trade-Off zwischen transparenter, bzw. zu vereinfachter Berechnung und einer sehr spezifischen Betrachtung des Risikos, das möglicherweise durch objektiv schwer fassbare Einschätzungen verfälscht wird.

3.4.2 Importrisiko

Um der oben beschriebenen Problematik zur Importabhängigkeit zu entsprechen, wird hier die Importabhängigkeit in Anlehnung an Le Coq und Paltseva (2009) und Cohen et al. (2011) etwas differenzierter betrachtet und nachfolgend als Importrisiko bezeichnet. Sie berücksichtigen hierbei die Konzentration der Importe auf Bezugsländer, die Transportstrecke und politische Stabilität sowie die Möglichkeit der Substitution von Bezugsländern. Hohe Werte weisen auf eine geringe Energiesicherheit

Die nachfolgende Formel zur Berechnung des Importrisikos für einen Energieträger ist angelehnt an (Le Coq & Paltseva, 2009):

$$IR = \left[\sum_{i=1}^{73} (\text{Importanteil}_i^2 \times \text{politische Stabilität}_i \times \text{Distanz}_i \times \text{Fungibilität}_i) \right] \times \text{Gesamtimportquote}$$

Importanteil²_i: *quadrierter Anteil des Energieträgers eines Bezugslandes i am Gesamt Nettoimport des Energieträgers in Deutschland; je höher der Quotient desto höher die Abhängigkeit von einem Land*

politische Stabilität Land i: *je höher der Wert desto instabiler die politische Situation*

Distanz des Landes i: *Entfernung zu Deutschland*

Fungibilität des Energieträgers bei Import aus Land i: *Möglichkeit des Austauschs eines Bezugslandes durch ein anderes, d.h. ein hoher Wert zeigt auf, dass das Bezugsland schwer durch ein anderes ersetzt werden kann.*

Gesamtimportquote: *jeweiliger Nettoimportanteil des Energieträgers*

Die Daten für Importe und Distanz stammen aus BAFA (2012&2013), VDKI (2012) und DERA (2012 & 2013), für politische Stabilität wird der Indikator aus WGI (World Governance Indicators) angelegt. Der Faktor für die Distanz basiert auf Le Coy und Paltseva (2009), Cohen et al. (2011), die hier keinen linearen Bezug zur Entfernung annehmen, sondern diese in drei Kategorien einteilen:

$$Dist_i = \begin{cases} 1, & \text{wenn Distanz} < 1500\text{km} \\ 2, & \text{wenn } 1500\text{km} < \text{Distanz} < 4000\text{km} \\ 3, & \text{wenn Distanz} > 4000\text{km} \end{cases}$$

Hierdurch relativiert sich die Bedeutung der Entfernung. D.h. auf der einen Seite scheint das Risiko durch Importe aus allen Ländern in der Nähe Deutschlands (also vor allem EU-Staaten) ähnlich hoch, auf der anderen Seite kann das Importrisiko aus weit entfernten Ländern ab einer gewissen Distanz jedoch gleich hoch bewertet werden. Dennoch bleibt für den Indikator die Abhängigkeit von der „Distanz“ bestehen.

Bei der Fungibilität als Maß der Einfachheit eines Wechsels zu einem anderen Bezugsland spielen Faktoren wie die Abhängigkeiten durch die Anbindung mittels Pipelines oder auch vertragliche Abmachungen eine Rolle. Aufgrund einer fehlenden Datengrundlage für Fungibilität wird wiederum das Vorgehen Le Coy und Paltseva (2009) angelegt. Diese haben für Kohle- und Flüssiggasimport den Wert 1 hinterlegt, für Importe über Pipelines (Erdgas) den Wert 2. Da eine Differenzierung der Erdölimporte nach Transportart nicht möglich ist, haben sie für diese den Wert 1 angenommen.

Tabelle 3: Indikatorwerte zu Risiko durch Importe⁵

Nettoimportquote 2011	in %	Indikatorwert Importrisiko
Öl	96,60%	0,36
Erdgas	86,40%	0,62
Steinkohle	81,60%	0,27

Im Gegensatz zu den Werten der Importabhängigkeit, ist das Risiko für Importe von Steinkohle am geringsten (Tabelle 3). Allerdings ist dieses Risiko stark von der Höhe der Fungibilität und der Distanz bestimmt. So ist das Risiko für Importe von Erdgas deutlich höher als beim vorhergehenden Indikator für Importabhängigkeit, da die absolute Transportdistanz nicht mehr so deutlich durchschlägt. Bei Brennholz oder Pellets ist Deutschland Nettoexporteur sieht sich somit keinem Importrisiko gegenüber. Insgesamt bleiben folgende Schwächen bestehen:

- Das Maß für Distanz beinhalten weder die Art und Weise des Transports noch die Streckenführung des Transports bzw. die Wahrscheinlichkeit von Ausfällen bei Transporten durch Krisengebiete.
- Obwohl die Substitution von Bezugsländern durch die Fungibilität aufgegriffen wird, kann diese aufgrund fehlender objektiver Daten doch nur sehr pauschal und wenig nach Energieträger differenziert angelegt werden.

⁵ Nettoimporte von Biomasse (Brennholz und Pellet) sind negativ oder sehr unbedeutend und sind daher nicht berücksichtigt.

3.4.3 Preisvolatilität

In der Literatur greifen Sovacool et al. (2011), Winzer (2012) und Martchamadol and Kumar (2012), Shin et al. (2013) die Preisvolatilität als einen Indikator unter mehreren zur Messung der Energiesicherheit auf. Grundgedanke dieses Ansatzes ist, dass eine hohe Schwankung der Preise innerhalb eines Jahres Unsicherheiten bezüglich dieses Energieträgers hervorrufen, so die Akzeptanz und die Bezahlbarkeit des Energieträgers beeinträchtigen und somit eine negative Wirkung auf Energiesicherheit haben können. Somit ist eine hohe Preisvolatilität als Beeinträchtigung der Energiesicherheit zu sehen.

Die Preisvolatilität der Energieträger errechnet sich in Anlehnung an Brealey et al. (2007) als Standardabweichung des natürlichen Logarithmus aus dem Quotienten vom Energieträgerpreis eines Monats und dem Preis des Vormonats über zwölf Monate multipliziert mit der Wurzel aus zwölf. Sie wird für die einzelnen Energieträger ausgewiesen:

$$\sigma_{pV} = \sigma_{m=1}^M \left(\ln \left(\frac{p_m}{p_{m-1}} \right) \right) * \sqrt{12}$$

σ = Standardabweichung; p_m = Preis im Monat m ; M = Anzahl Monate

Die Multiplikation mit der Wurzel von zwölf erfolgt, um die monatliche Preisvolatilität in einem Jahr aufzuzeigen. Die Berechnung erstreckt sich über die letzten sieben Jahre, d.h. die Standardabweichung der logarithmierten monatlichen Quotienten wird für 7 Jahre berechnet und daraus anschließend der Durchschnittswert ausgewiesen. Der natürliche Logarithmus relativiert den Einfluss der statistischen Ausreißer.

Tabelle 4: Berechnete Preisvolatilitäten nach Energieträgern und Sektoren

Preisvolatilitäten – Indikatorwerte (2006-2012)				
Energieträger	Industrie	GHD	Haushalte	Durchschnitt ↓
Öl	21,6	20,8	20,8	21,1
Steinkohle	7,9	4,1	4,2	5,4
Biomasse	11,9	11,9	11,9	11,9
Erdgas	4,2	4,2	4,2	4,2
Biogas	7,9	4,1	4,2	5,4
Braunkohle	7,6	9,4	8,6	8,5
Geothermie	4,6	2,6	2,6	3,3
Solarthermie	0,0	0,0	0,0	0,0

Quelle: eigene Berechnung, auf Basis Energiepreise Destatis 2013

Die Preise basieren auf Daten des statistischen Bundesamts (Destatis, Statistisches Bundesamt, 2013). Tendenziell weisen regenerative Energieträger insgesamt eine

niedrigere Preisvolatilität als fossile aus (Tabelle 4). Unter den fossilen Energieträgern hat Braunkohle die geringsten Preisschwankungen, gefolgt von Erdgas, das preislich mit Biogas gleichgestellt ist. Biomasse verzeichnet etwas höhere Preisschwankungen, jedoch deutlich unterhalb derer von Öl und Steinkohle. Für Geothermie wurde der monatliche Strompreisindex der verschiedenen Verbrauchssektoren angelegt. Dieser zeigt im Zeitverlauf weniger eine Schwankung als vielmehr einen stetigen Preisanstieg auf.

3.4.4 Kurzfristige Verfügbarkeit

Laut Winzer (2012) werden in einigen Studien unter anderem auch die kurzfristige Verfügbarkeit und Ausfälle der Erzeugungstechnologien sowie der Infrastrukturen als Risikoquellen für Energiesicherheit aufgezählt. Energiesicherheit ist gegeben, wenn plötzliche Ausfälle der Technologien oder Nicht-Verfügbarkeit der Ressourcen vermieden werden. Die kurzfristige Verfügbarkeit bezieht sich hier auf technische wie auch die ressourcenbedingte Verfügbarkeit von Wärme. Dagegen führen Sovacool and Mukherjee (2011) die Kosten eines Ausfalls als einfachen Indikator für Energiesicherheit auf.

In diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass Ausfälle für Wartung und Reparatur sowie die natürliche Begrenzung der Ressource (Sonne, bei Strom auch Wärme) die Versorgungssicherheit bzw. die Energiesicherheit vermindern. In der Literatur findet sich bisher keine Diskussion darüber wie sich ein solcher Indikator konkret zusammensetzen lässt. Die Bildung des Indikators erfolgt hier über die Ausfälle gemessen in Stunden in Relation zur potentiellen Verfügbarkeit in Stunden gewichtet mit der mittleren potentiellen Verfügbarkeit. Die mittlere potentielle Verfügbarkeit nimmt bei allen Technologien außer bei Solarthermie den Wert 1 an, da diese potentiell immer voll zur Verfügung stehen; bei Solarthermie ergibt sich aus dem Quotient Leistungsstunden zu Sonnenscheindauer ein Wert von rund 0,37, der besagt, dass nur gut ein Drittel der Verfügbarkeit für die volle Wärmeerzeugung zur Verfügung steht. Die Indikatorwerte für Verfügbarkeit umfassen Daten über Wartung und Reparatur sowie Daten über die natürliche Verfügbarkeit der jeweiligen Ressource. Die Daten basieren auf VDI (2007), BMWi (2014) und DWD (2013). Die Verfügbarkeit je Erzeugungstechnologie errechnet sich aus:

$$VF = \left(\frac{t_m}{t_n} \right) * \left(\frac{1}{\bar{x}} \right) * 100$$

t_m = Reparatur und Wartung in h, je Erzeugungstechnologie

t_n = natürliche Verfügbarkeit in h je Erzeugungstechnologie

x = mittlere potentielle Verfügbarkeit je Erzeugungstechnologie

Dieser Indikator steht in negativer Relation zur Energiesicherheit, d.h. je niedriger er ist, desto besser bzw. höher wird die Energiesicherheit eingeschätzt.

Tabelle 5: Verfügbarkeit der Technologien auf Energieträgerbasis

Energieträger	Indikator↓	mittlere potentielle Verf.	Wartung & Rep. [h/a]	Nat. Verf. [h/a]
Geothermie	0,23	1	20	8760
Öl	0,23	1	20	8760
Erdgas	0,23	1	20	8760
Biogas	0,23	1	20	8760
Kohle	0,11	1	10	8760
Biomasse	0,11	1	10	8760
Solarthermie	0,26	0,37	5	1587

In Tabelle 5 ist zu erkennen, dass Technologien auf Kohle und Biomassebasis die niedrigsten Indikatorwerte aufweisen. Die anderen Technologien unterscheiden sich nicht wesentlich im Indikatorwert. Solarthermie weist zwar geringere Wartungs- und Instandhaltungszeiten auf, dieser Vorteil wird jedoch durch die mittlere potentielle Verfügbarkeit kompensiert.

3.4.5 Erzeugungskosten

In verschiedenen Definitionen zur Energiesicherheit ist „die Versorgung zu bezahlbaren Preisen“ ein wesentlicher Bestandteil der Energiesicherheit. So wird „affordability“, oft durch die jährlichen Kosten (Hughes 2012) oder Preise (Kruyt et al. 2009, Shin et al. 2013, Sovacool 2012) erfasst. In diesem Ansatz wird hingegen auf die Gestehungskosten abgestellt, die zum einen Technologiekosten, die zum Zeitpunkt der Investition (Ersatz) anfallen, aber auch Betriebskosten umfassen. Da bei erneuerbaren Energien die Technologiekosten teils deutlich über denen der konventioneller Wärmeerzeugungsanlagen liegen sollten diese bei einem Vergleich zwischen erneuerbaren und fossilen Energieträgern berücksichtigt werden sollten. Grundsätzlich sind die Gestehungskosten negativ mit Energiesicherheit korreliert, d.h. ein höherer Wert vermindert die Energiesicherheit, da sich die Wärmeerzeugungskosten erhöhen und die Bezahlbarkeit der Wärmeversorgung verschlechtert. Die Daten zu Erzeugungskosten beinhalten zum einen die Investitions- wie auch Betriebs-, Treibstoff- und Wartungskosten und sind Seefeldt et al. (2011) entnommen. Für den Industriesektor sind allerdings keine Kosten verfügbar. Daher werden für die Schätzung der Kosten im Industriesektor diese des GHD Sektors angelegt. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass die Erzeugungskosten im Industriesektor niedriger sind als bei GHD (Seefeldt et al., 2011). Durchschnittliche Werte je Wärmeerzeugungstechnologie sind in Tabelle 6 dargestellt. Sie liegen außer bei Geothermie und Biogas für alle Technologien im Industrie- und GHD-Sektor eng beieinander, während sie im Haushaltsbereich teils etwas höher teils etwas geringer aber eine ähnliche Streuung zwischen den Technologien aufweisen. Dies impliziert ggf. eine etwas geringere Energiesicherheit bei Haushalten.

Tabelle 6: Indikatorwerte für spezif. Erzeugungskosten, in €/kWh;

Energieträger und Technologie	Indikator (Spezifische Gestehungskosten)		
	Industrie	GHD	Haushalte
Biogas*	0,22	0,22	0,22
Biomasse (Pelletkessel)	0,13	0,13	0,16
Kohle	0,11	0,11	0,18
Geothermie/Umweltwärme	0,18	0,18	0,16
Erdgas BW Erdgas	0,12	0,12	0,12
Öl Brennwertkessel	0,13	0,13	0,13
Solarthermie + BW			0,14/15

Quelle: Daten aus Seefeldt et al., 2011; basierend auf sanierte Büro bzw. EFH bei GHD und Haushalte, 100% im Brennwertkessel. * Durchschnittskosten über verschiedene Technologien

Ein klarer Vorteil dieses Indikators liegt in seiner Einfachheit, während die statische Betrachtung, d.h. die Nichtberücksichtigung der Technologiekostenentwicklung eine Schwäche des Indikators darstellt. Darüber hinaus können innerhalb einer Technologie je nach Qualität und Ausgestaltung große Kostenunterschiede bestehen, die sich hier nur in einem Durchschnittswert niederschlagen, der vor allem bei fossil basierten Technologien von den laufenden Betriebsstoffpreisen getrieben wird während bei erneuerbaren Technologien die Investitionskosten dominieren.

3.4.6 Umwandlungseffizienz

Gemäß dem ökonomischen Prinzip sollte mit einer knappen Ressource ein möglichst hoher Ertrag erzielt werden. In Bezug auf die Energieversorgung erhöht somit eine effiziente Allokation oder Nutzung von Energieträgern die Versorgungssicherheit. Dies heißt, Effizienz kann eine große Rolle bei der Reduzierung der Energiearmut, Unterversorgung sowie bei Umweltbelastungen spielen (Blum and Legey 2012). Hughes (2012) führt die Konversions- oder Energieeffizienz als einen Faktor zur Erhöhung der Energiesicherheit auf.

Für diese Studie wird die durchschnittliche Umwandlungseffizienz für verschiedene Wärmeerzeugungstechnologien zu Standardbedingungen als ein weiterer Indikator zur Abschätzung der Energiesicherheit angelegt. Begründet wird dies damit, dass eine höhere Effizienz sich in eine höhere Energiesicherheit übersetzen lässt, da bei hoher Umwandlungseffizienz pro Energieträgereinheit eine größere Wärmemenge zur Verfügung steht, das heißt die vorhandenen Ressourcen besser genutzt werden können. Die Daten hierzu sind Dengler et al. (2012) entnommen. Da Informationen zur Effizienz in der Industrie nicht vorliegen und diese sich zwischen Haushalten und GHD nicht stark unterscheiden (ähnliche Technologien und Leistungsgrößen) ist in Tabelle 7 nur ein Datensatz zu Raum/Prozesswärme und Warmwasser abgebildet. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die Effizienz in der Industrie etwas höher sein

dürfte als bei Haushalten und GHD (Dengler et al., 2012). Ergänzend hierzu wird der Primärenergiefaktor ausgewiesen.

Die Umwandlungseffizienz (Verhältnis von eingesetzter Energie zu erzeugter Wärme) von Erdgaskesseln ist bei Prozess- und Raumwärme relativ hoch und bei Warmwasser niedriger. Bei Solarthermie ist der Ertragsfaktor bei Kombi-Anlagen niedriger als bei Anlagen zur reinen Warmwassererwärmung. Grundsätzlich weisen die fossil basierten Wärmeerzeugungstechnologien eine relativ hohe Effizienz und somit Energiesicherheit aus.

Tabelle 7: Indikator für Umwandlungseffizienz

Energieträger	Indikator / Primärenergiefaktor			
	Raum/Prozesswärme		Warmwasser	
Biogas (Biomethan)	0,95	0,5	0,7	0,5
Biomasse (Pellet)	0,85	0,2		0,2
Kohle	0,95	1,1		1,1
Geothermie Umweltwärme (COP)*	3,85			2,3
Geothermal (Endeff.)*	1,62			2,3
Erdgas	0,95	1,1	0,7	1,1
Öl	0,97	1,1		1,1
Solarthermie**	0,33	0	0,44	0

*Der COP-Wert bei Geothermie wird mit der Umwandlungseffizienz (0,42) der Stromerzeugung multipliziert, da diese meist auf Basis von Elektrizität betrieben wird. **Verhältnis von Kollektorsertrag (Wärme) zur jährlichen Einstrahlung. Der Primärenergiefaktor berücksichtigt die Effizienz auf Primärenergieebene.

Quelle: Dengler et al., 2012 (S. 149); Umweltbundesamt (2013)

Sofern Energieträgerressourcen sehr knapp sind, trägt eine hohe Umwandlungseffizienz zur Energiesicherheit bei. Allerdings ist bei Solarthermie der „Energieträger“ zwar nicht immer aber dennoch frei verfügbar, so dass hier nicht so sehr die Effizienz sondern vielmehr die natürliche Verfügbarkeit (siehe kurzfristige Verfügbarkeit) für die Energiesicherheit von Bedeutung ist. Dies bedeutet, dass die Wirkung der geringen Effizienz bei Solarthermie nicht die tatsächliche Wirkung auf die Energiesicherheit wiedergibt. Insgesamt liegen die meisten Effizienzwerte eng beieinander, so dass bei unterschiedlichen Energiesystemen eher geringe Unterschiede auftreten.

3.4.7 Vielfalt der verfügbaren Ressourcen

Dieser Indikator zielt darauf ab, die Ressourcenvielfalt zu erfassen. Er integriert die Diversität der Lagerstätten (Länder) und die naturgegebene Verfügbarkeit einer Ressource – und nicht die Exporte eines Landes. Laut Stirling (2011) finden die Anzahl der Lagerstätten, die Größe der Lager und der Grad der Unterschiedlichkeit der Lager Eingang in die Schätzung. Aus Praktikabilitätsgründen werden in dieser Arbeit alle abbau-

baren Lagerstätten (Ressourcen)⁶ je Land aufsummiert, der Anteil des Landes an den gesamten Ressourcen berechnet und mit dem politischen Instabilitätsindex ((PITF)⁷, aus Economist Intelligence Unit), des jeweiligen Landes sowie mit der Entfernung zu Deutschland gewichtet. Der Kehrwert dieser Größe dient dann als Nährwert für Lager- und Transportrisiken. Er wird noch mit dem Kehrwert der Varianz der Ressourcenanteile gewichtet. Je höher er ist, desto höher ist die Energiesicherheit.

Zur Berechnung der abbaubaren Ressourcenanteile werden die Länder mit relevanten, natürlichen Ressourcen herangezogen und Daten von BMWi (2013) und DBFZ (2009) genutzt. Daten zur politische Instabilität und der direkten Entfernung zu Deutschland sind EIU (2013) und DFT (n.d.) entnommen. Die Berechnung des Indikators erfolgt in Anlehnung an Stirling (2011), der verschiedene Maße zur Messung der Diversität auflistet. Verwendet wird hier je Energieträger ein Maß für Disparität eines Energieträgers, das sich hier aus den Anteilen des Landes an den Ressourcen gewichtet mit dessen politischen Stabilitätsindex und der Entfernung zu Deutschland ableitet. Des Weiteren werden je Energieträger die Anzahl der Ressourcenländer sowie die Varianz der Ressourcenanteile (je Energieträger) einbezogen.

$$Diversität_{ET} = \frac{1}{Disparität_{ET}} * n_{ET} * \frac{1}{Varianz_{ET}}$$

$$Disparität_{ET} = \sum_{i=1}^n (ResAnteil_i * polit.Stabilität_i * Distanz_i)$$

- n*: Anzahl potentieller Lieferländer je Energieträger, je höher desto größer die Diversität
i: Land
ET: Energieträger
Varianz: Varianz der Ressourcenanteile der Länder je ET, je höher, desto ungleicher verteilt sind die Ressourcen eines ET
Distanz: Entfernung zu Deutschland in km
Polit. Stabilität: Maß für politische Stabilität, je höher desto instabiler
ResAnteil: abbaubarer Ressourcenanteil eines Landes *i* für Energieträger *ET*, je höher desto konzentrierter die Anteile

Da die verfügbaren Ressourcen für Umweltwärme (hier unter Geothermie gefasst) und Solarthermie unbegrenzt in Deutschland zur Verfügung stehen wird dieser Wert gleich eins gesetzt, weitere Länder gehen nicht in diese Schätzgröße ein, da Importe (des

⁶ Verfügbarkeit der Ressourcen ist abhängig von Kosten der Förderung.

⁷ Political Instability Task Force, <http://globalpolicy.gmu.edu/political-instability-task-force-home/pitf-reports-and-replicant-data-sets/>

Energieträgers) bei diesen Technologien nicht vorstellbar sind. Der Wert für Varianz wird ebenfalls gleich 1 gesetzt, da die Varianz nahe Null angenommen wird. In Tabelle 8 sind die Werte nach Technologien aufgeführt. Insgesamt sind die Werte für fossil basierte Technologien niedriger als für EE-Technologien, erstere leisten somit einen geringen Beitrag zur Energiesicherheit.

Tabelle 8: Indikator zur Vielfalt der verfügbaren Ressource

Energieträger	1/Disparität Ress.	Anzahl Länder je Ress.	1/Varianz Ress.Anteil Land	Indikator
Biogas	1,83 ⁻⁴	18	173	0,57
Biomasse	1,83 ⁻⁴	18	173	0,57
Steinkohle	0,26 ⁻⁵	32	214	0,18
Braunkohle	0,32 ⁻⁵	36	240	0,27
Geothermie	1,00	1	1	1,00
Erdgas	0,34	29	324	0,32
Öl	0,31	19	255	0,15
Solarthermie	1,00	1	1	1,00

Quelle: BMWi, 2013; DBFZ, 2009; DFT, (n.d.); EIU, 2013; VDKI, 2012

Die Ressourcenvielfalt unterscheidet sich vom Indikator für Importabhängigkeit insofern, dass er nicht Importe betrachtet, sondern unabhängig von den Importen die verfügbaren Ressourcen und deren Konzentration bzw. Verteilung auf (Liefer)Länder betrachtet. Da hier auf wirtschaftlich nutzbare, also abbaubare Ressourcen zurückgegriffen wird, kann dieser Indikator sich mit sinkenden Abbaukosten verändern. Darüber hinaus ist dieser Indikator nicht für alle erneuerbaren Energieträger anlegbar und wird daher für diese gleich eins gesetzt, da diese grundsätzlich verfügbar sind. Die wetterbedingte Verfügbarkeit erneuerbarer Energieträger wird durch den Indikator kurzfristige Verfügbarkeit aufgefangen.

3.4.8 Diversität der Energiesystems

Die Berechnung dieses Indikators lehnt sich ebenfalls an die in Stirling (2011) aufgeführten Indices zur Erfassung der Vielfältigkeit an, wobei die hier betrachtete Größe die Diversität des Technologiemixes zweier Systeme vergleicht. Der Indikator berücksichtigt die Anzahl verschiedener Erzeugungstechnologien (variety oder Vielfalt) im den betrachteten Subsystem (wie beispielsweise Haushalte Warmwasser, Raumwärme Industrie, ...) dividiert durch die Anzahl der insgesamt verfügbaren Erzeugungstechnologien (für das hier betrachtete Wärmeerzeugungssystem: 7 Energieträger als Technologien). Des Weiteren schließt er die Verteilung der Technologieanteile auf Subsystemebene (balance oder Varianz) ein sowie die grundlegende Unterschiedlichkeit der Technologien oder Energieträgeroptionen selbst (Disparität). Hinsichtlich der Ver-

teilung der Technologieanteile sind in der Literatur verschiedene Maße aufgeführt, in dieser Berechnung wird die Varianz verwendet. Für die Disparität kann in zwei Hauptgruppen unterschieden werden – erneuerbare und fossil –, oder alternativ, um der Verschiedenheit der Energieträger Rechnung zu tragen, kann auch ein Maß von drei angelegt werden, das auf fossile und thermisch (Solarthermie, Geothermie) Energieträger und Biomasse basiert – im Strombereich wären Wasserkraft und Kernenergie hinzuzurechnen. Für jeden Sub-Sektor wird der Indikator wie folgt berechnet:

$$Diversität_{System} = Vielfalt * 1/Varianz * Disparität$$

$$Vielfalt = \frac{n}{7} \qquad Disparität = \frac{d}{2}$$

n: Anzahl der Technologieoptionen im Sub-System, hier: bezogen auf die ausgewählten Energieträger, die gedanklich einer Technologieoption entsprechen

Varianz: Varianz oder Standardabweichung der Technologieanteile im jeweiligen Sub-System, je höher die Varianz bzw. Standardabweichung, umso ungleicher sind die Anteile verteilt.

d: Maß für Verschiedenartigkeit der Technologie- oder Energieträgergruppen im Sub-System

In dieser Abschätzung erfolgt nur eine Unterscheidung in zwei verschiedene Energiesysteme ($d = 2$), d.h. in ein System mit und ohne EE (Stirling, 1994 & 2011). Da hier nur die Disparität des Technologiemixes eines Sub-Systems oder Sub-Sektors und nicht einzelner Technologien oder Ressourcen abgeschätzt wird, sind im Ergebnis keine Werte für die einzelnen Technologien ausgewiesen. Der Indikator verdeutlicht, je größer die Diversität ist, umso höher die Energiesicherheit.

Kritisch hierbei ist vor allem das Maß für Disparität zu sehen. Im Grunde soll es aufzeigen, wie unterschiedlich die Erzeugungsoptionen sind. Allerdings existiert hierzu kein objektiv anlegbares Maß, sondern häufig wird eine subjektive Taxonomie bzw. ein auf sprachliche Abgrenzungskonventionen basiertes Maß für System oder Option angelegt (Sterling, 2011). Die Streuung bzw. in gewisser Weise die „Balance“ der Energieträger oder Technologien kann lt. Sterling 2011 über verschiedene Maße (Gini-, Herfindahl-, Shannon-Wiener-Index) erfasst werden. Hier wird die einfache statistische Varianz der Anteile im jeweiligen Sub-System erfasst. Je nach Wahl dieses Indexes variieren die relativen Unterschiede zwischen den beiden Wärmezeugungssystemen. Darüber hinaus führen die Anzahl der Technologieoptionen und noch mehr das Maß für Verschiedenartigkeit der Systeme zu großen absoluten Unterschieden des Indikators je System, so dass sich auch in relativen Maßen ein großer Einfluss auf Energiesicherheit aufbaut.

3.5 Aggregation

Die Berechnung der Indikatoren zur Abschätzung der Energiesicherheit wird zunächst auf den Energieverbrauch nach Energieträgern, Sektor und Anwendungsbereichen durchgeführt. Beispielsweise wird die Preisvolatilität bei Biomasse (Technologien) für den Subsektor Raumwärme Haushalte, Warmwasser Haushalte, Prozesswärme Industrie, etc. ausgewiesen. Die einzelnen Indikatorwerte haben allein stehend keine Aussagekraft sondern sind immer im Vergleich zu einem System ohne EE und mit EE zu betrachten. Sie stellen somit kein absolutes Maß für die Energiesicherheit dar. Nur die Differenz zwischen den Szenarien erlaubt eine Aussage über den Beitrag EE zur Energiesicherheit, d.h. über die Richtung und das Ausmaß der Veränderung der Energiesicherheit im jeweiligen Sub-Sektor und der jeweiligen Technologie.

Die Aggregation des Indikators über Technologien, Anwendungsbereiche und Sektoren erfolgt für jeden Indikator über eine Gewichtung der Indikatorwerte mit den Sektor-, Anwendungs- und Technologieanteilen am Verbrauch. Grundlage der Gewichtung sind die jeweiligen Anteile im Energiesystem. In der Summe steht zunächst ein absoluter Wert, der ebenfalls nur im Vergleich zu einem System „mit und ohne EE“ Aussagekraft erhält. Er ermöglicht eine Aussage darüber, inwieweit EE beispielsweise die durchschnittliche Preisvolatilität erhöhen oder vermindern. Es erfolgt jedoch keine Aggregation der verschiedenen Indikatoren zu einem einzigen Wert.

Die Energiesicherheit auf Systemebene wird somit auf Basis der sieben dargestellten Indikatoren aufgezeigt. Die zur Abschätzung der Energiesicherheit angelegten Indikatoren umfassen verschiedene Technologien/Energieträger, Sektoren mit Anwendungsbereichen. Sie sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Übersicht über Indikatoren Technologien und Verbrauchsbereiche im Wärmesektor

Verwendete Indikatoren	Betrachtete Energieträger	Betrachtete Sektoren mit Anwendungsbereich
Importabhängigkeit	Biogas	Industrie Prozesswärme
Preisvolatilität	Biomasse	Industrie Raumwärme
Kurzfr. Verfügbarkeit	Steinkohle	GHD Raumwärme
Produktionskosten	Kohle	Haushalt Raumwärme
Umwandlungseffizienz	Erdwärme	Haushalt Warmwasser
Vielfalt der verfügbaren Ressourcen	Erdgas	
Diversität des Energiesystems	Öl	
Importrisiko	Solarthermie	

Die Indikatoren werden mit Ausnahme der Diversität des Energiesystems auf Technologie und Sub-Sektorebene abgeschätzt und sowohl über die Technologien aggregiert nach Verbrauchsbereich und Sektor wie auch für das gesamte Energiesystem (Szenario mit und ohne EE) dargestellt. Nur der Vergleich der Werte zwischen den beiden Energiesystemen erlaubt eine Aussage über den Einfluss EE auf die Energiesicherheit. Um die Bedeutung der verschiedenen Abweichungen der Indikatorwerte hinsichtlich Energiesicherheit interpretieren zu können, werden diese relativ ausgewiesen – d.h. in prozentualer Veränderung.

Während Energiesicherheit über verschiedene Dimensionen und Eigenschaften relativ breit definiert ist und über verschiedene Indikatoren umfassend abgebildet werden kann, stellt Versorgungssicherheit auf wenige Dimensionen und Eigenschaften eine eingeschränkte Betrachtung der Energiesicherheit dar. Sie wird hier durch Verfügbarkeit und Importabhängigkeit dargestellt.

4 Wirkungen EE auf die Energiesicherheit

Aufbauend auf der vorgestellten Methodik, wird die Energiesicherheit im deutschen Wärmesektor bewertet. In der Szenario-Analyse werden die jeweiligen Indikatoren für das Szenario mit EE (Szenario I) sowie für dieses mit ausschließlich fossilen Energieträgern –Szenario ohne EE (Szenario II) – berechnet und miteinander verglichen. Die Indikatorwerte sind für jeden Energieträger bzw. Technologie sowie nach Anwendungsbereichen und Verbrauchssektoren berechnet. Eine Aggregation über die verschiedenen Indikatoren erfolgt nicht. Ergebnisse werden ausgewiesen für:

- die jeweilige Technologie, den Anwendungsbereich und Sektor (siehe Annex 6.2)
- aggregiert über Technologien nach Sektoren und Anwendungsbereiche (Kapitel 4.1), und
- aggregiert über Technologien, Sektoren und Anwendungsbereichen für das Energiesystem insgesamt (Kapitel 4.2).

Die Werte für die verschiedenen Ebenen basieren auf den nachfolgenden Berechnungsschritten: (i) Indikatorwert Szenario I: Multiplikation der errechneten Indikatoren mit den Anteilen der Technologien bzw. der Energieträger aus Szenario I; (ii) Indikatorwert Szenario II: Multiplikation der errechneten Indikatoren mit den Anteilen der Technologien bzw. der Energieträger aus Szenario II; (iii) Differenz: Indikatorwert Szenario II minus Indikatorwert Szenario I; (iv) Wirkung EE: ergibt sich als prozentuale Veränderung der Subsektoren zwischen Szenario mit und ohne EE.

Die Wirkung erneuerbarer Energien auf die Indikatoren sowie die Interpretation mit Blick auf die Energiesicherheit ist in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Wirkung erneuerbarer Energien auf Indikatorwerte und Energiesicherheit

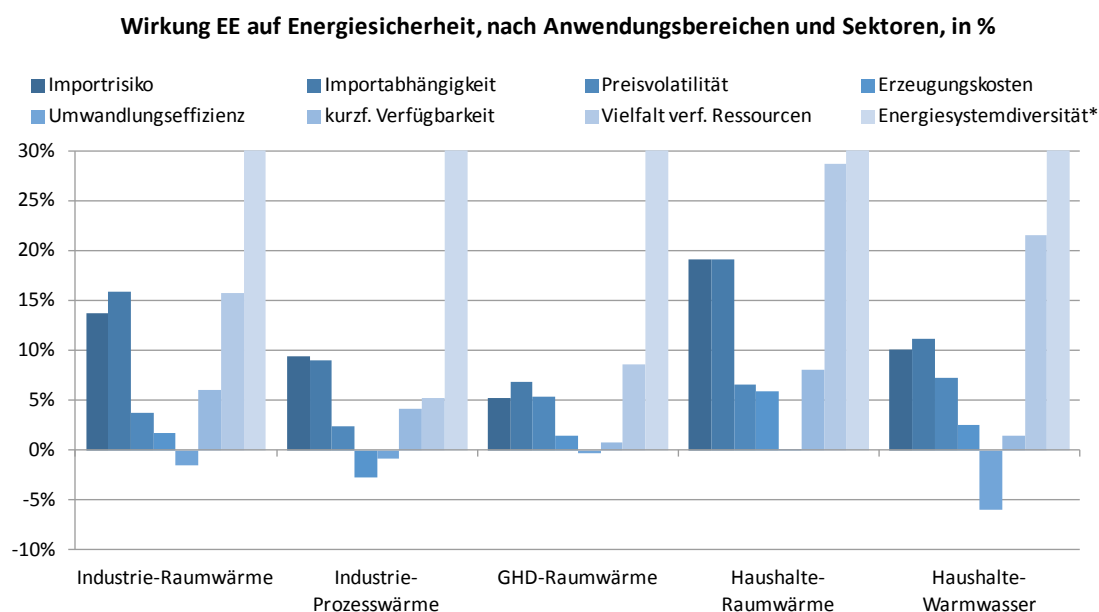
	Veränderung bei den Indikatoren	Beitrag EE zur Energiesicherheit
Importabhängigkeit/ Importrisiko	EE vermindern Importabhängigkeit	Erhöhen Energiesicherheit
Preisvolatilität	EE vermindern Volatilität	Erhöhen Energiesicherheit
Erzeugungskosten	EE vermindern Erzeugungskosten bspw. bei Industrieprozesswärme (statische Betrachtung)	Erhöhen Energiesicherheit bei Industrieprozesswärme
Verfügbarkeit	EE erhöhen Verfügbarkeit	Erhöhen geringfügig Energiesicherheit
Umwandlungseffizienz	EE weisen (gegenwärtig) eine etwas geringere Effizienz aus	Vermindern geringfügig Energiesicherheit
Ressourcenvielfalt	EE erhöhen Vielfalt	Erhöhen Energiesicherheit
Systemdiversität	EE erhöhen Diversität	Erhöhen Energiesicherheit

4.1 Sektor und Anwendungsbereich.

Die Indikatorwerte im Energiesystem ohne und mit EE sind hier aggregiert für die betrachteten Subsektoren ausgegeben. Hierbei ist die Wirkungsrichtung der hier abgebildeten Werte vereinheitlicht, d.h. alle hier dargestellten positiven Wirkungen sind als „Energiesicherheit erhöhend“ zu interpretieren, negative Werte als „Energiesicherheit vermindern“.

Abbildung 7 bildet die prozentuale Veränderung der Indikatorwerte eines Energiesystems mit EE im Vergleich zu einem System ohne EE ab. Die Werte zeigen für 2011 mit Ausnahme der Erzeugungskosten und Effizienz eine klare positive Wirkung auf Energiesicherheit. Insbesondere die Wirkung EE auf Diversität und Ressourcenvielfalt sowie Importabhängigkeit sind deutlich positiv hinsichtlich ihres Beitrags zur Energiesicherheit, d.h. der Einsatz EE vermindert die Importabhängigkeit des Energiesystems Wärme und erhöht dessen Systemdiversität und Ressourcenvielfalt in allen hier betrachteten Sektoren und Anwendungsbereichen. Auch die Preisvolatilität verringert sich in allen Bereichen und erhöht dadurch die Energiesicherheit. Dahingegen weisen die Anwendungsbereiche mit EE eher eine geringere Umwandlungseffizienz auf, d.h. EE vermindern unter diesem Aspekt eher die Energiesicherheit. Aus statischer Sicht ist auch bei den Erzeugungskosten - abgesehen von Prozesswärme Industrie - eher ein leicht negativer Effekt auf die Energiesicherheit erkennbar, wobei zu erwarten ist, dass sich dieser im Laufe der Technologiekostenentwicklung umkehren wird.

Abbildung 7: Beitrag EE zur Energiesicherheit nach Sektoren und Anwendungsbereichen, 2011



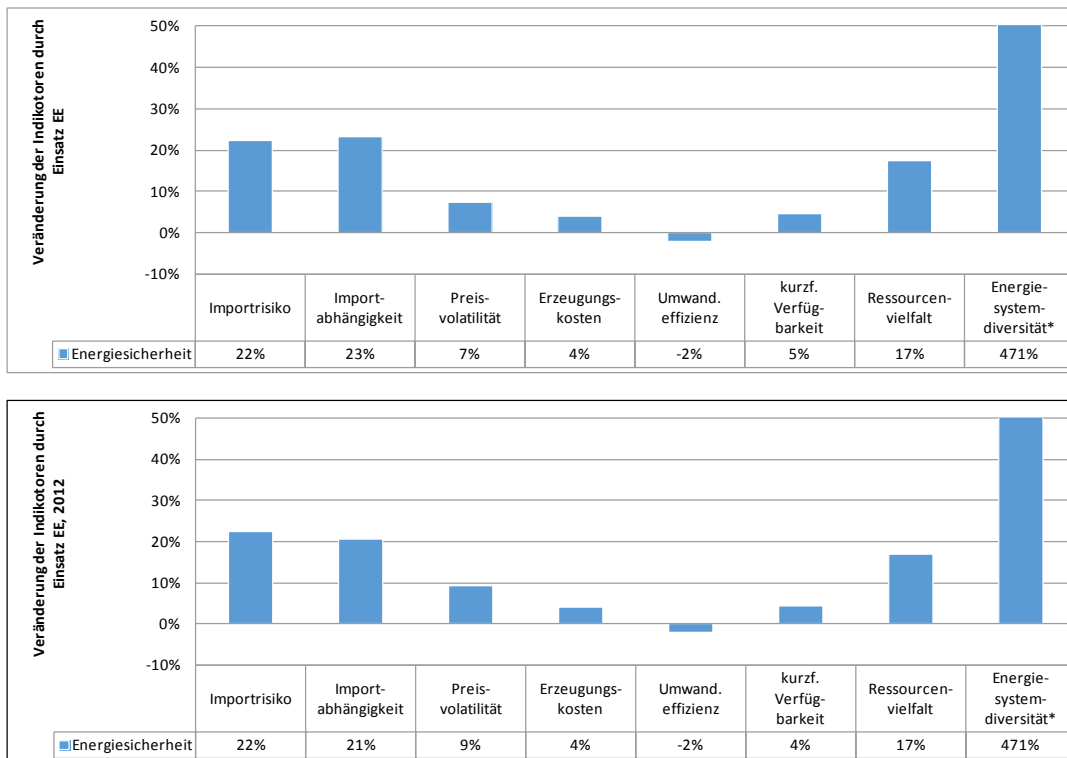
Quelle: eigene Berechnung; Anmerkung: * Werte liegen zwischen 240 % und 610 %; Die Indikatorwerte sind normalisiert, so dass ein positiver Wert immer als positiver Beitrag zur Energieversorgungssicherheit zu werten ist.

4.2 Systemebene

Die Indikatorwerte sind hier auf Systemebene aggregiert ausgegeben und zeigen die prozentuale Veränderung der Werte eines Systems mit EE im Vergleich zu einem System ohne EE basierend auf den Daten 2011 und eine erste Aktualisierung für 2012. Der Beitrag EE zur Energiesicherheit auf Systemebene ist im Gegensatz zur Anwendungs/Sektorebene bei fast allen Indikatoren positiv (siehe Abbildung 8), d.h. die Energiesicherheit hat sich durch den Einsatz EE – Ausnahme: Effizienz – erhöht.

Festzuhalten ist, dass sich durch den Einsatz EE in der Wärmeerzeugung Importabhängigkeit/ -risiko deutlich und Preisvolatilität noch sichtbar vermindern, während sich die Ressourcenvielfalt sowie die Systemdiversität deutlich erhöhen und sich insgesamt dadurch die Energiesicherheit erhöht. Da die Umwandlungseffizienz bei EE noch Entwicklungsspielraum bietet, ist die Wirkung EE auf die Energiesicherheit gemessen an diesem Indikator geringfügig negativ. Die Erzeugungskosten auf Systemebene vermindern sich Summe durch den Einsatz EE, d.h. die eher höheren Kosten der Wärmeerzeugung mit EE in Haushalten und GHD werden durch den positiven Kosteneffekt EE in der Industrie kompensiert.

Abbildung 8: Beitrag EE zur Energiesicherheit, 2011 und 2012



Quelle: eigene Berechnung

5 Einordnung in das Kosten-Nutzen-Konzept

Zusammenfassung des Ansatzes

In der Literatur werden verschiedene Ansätze zur Erfassung der Energiesicherheit diskutiert. Hierbei wird Versorgungssicherheit als der Teil der Energiesicherheit verstanden, der sich auf die physische Bereitstellung, Preise und das System beziehen während Energiesicherheit oft weiter gefasst wird und Umwelt-, Kostenaspekte oder Gesellschaft einbeziehen kann. In diesem Ansatz wird die Energiesicherheit und Versorgungssicherheit des Wärmebereichs in Deutschland bewertet und zwar basierend auf den wirtschaftlichen, politisch-gesellschaftlichen, technischen und natürlichen Aspekten, die durch folgende Indikatoren wiedergegeben wird: Importabhängigkeit/risiko, Preisvolatilität, kurzfristige Verfügbarkeit, Erzeugungskosten, Umwandlungseffizienz, Diversität des Systems und der verfügbaren Ressourcen. Die Abschätzung erfolgt auf Sektor- und Anwendungsebene und ist bisher einmalig für den Wärmebereich.

Der Einfluss erneuerbarer Energien auf die Energiesicherheit wird für das deutsche Wärmeversorgungssystem (2011) mit seinem Technologiemix aus erneuerbaren und fossilen Energieträgern im Vergleich zu einem nur auf fossilen Energieträgern basierten System abgeschätzt. Somit nimmt auch die Höhe der Anteile erneuerbarer Energien Einfluss auf das Ergebnis. Zu beachten ist, dass die Kapitel 4 aufgeführten Vorzeichen der Veränderung (in %) vereinheitlicht sind, d.h. ein positiver Wert zeigt auf, um wie viel ein System mit EE den entsprechenden Indikatorwert erhöht und somit sich positiv auf die Energiesicherheit auswirkt.

Kritik am Ansatz

Grundsätzlich ist zu überlegen, ob für alle Sektoren und Anwendungsbereiche die gleichen Eigenschaften und Indikatoren zu verwenden sind, oder ob Sektor spezifische Indikatoren/Eigenschaften nicht sinnvoller wären. Ist für die Industrie nicht Verfügbarkeit ein wesentlich wichtigerer Aspekt als für Haushalte, die eine kurze Unterbrechung mit weniger wirtschaftlichen Schäden verkraften können? Dagegen könnte sich die Industrie eher Preissicherungsinstrumenten bedienen als Haushalte. Dieselbe Überlegung – Sektor spezifische Betrachtung - gilt für die Gewichtung der Anwendungsgebiete und Sektoren nach Verbrauchsanteilen. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass häufig nur eine Kombination von erneuerbaren und fossilen Energieträgern sinnvoll ist (Solarthermie und Erdgas) und somit eine Veränderung der Energiesicherheit sich nur über den Mengeneffekt ergibt. Hinsichtlich der einzelnen Indikatorwerte sind die Annahmen zu den jeweiligen Werten bzw. die Operationalisierung der Kriterien wie politische Stabilität, Distanz, Fungibilität, etc. sowie auch die verfügbaren Daten zu Preisen, Kosten, Effizienz, etc. kritisch zu beleuchten. Manche Indikatoren nutzten ähnliche

oder gleiche Gewichte, wie beispielsweise politische Stabilität, Entfernung, Importanteile, etc., oder bedingen sich gegenseitig. Beispielsweise können sich bei hoher Importabhängigkeit und –risiko möglich Ausfälle in den Preisen des Energieträgers widerspiegeln und somit die Produktionskosten oder Preisvolatilität beeinflussen. Wird ein Gut knapp, da der Transport oder die politische Stabilität eine Versorgung mit diesem Gut nicht gewährleisten, erhöht sich dessen Preis, d.h. politische Stabilität ist indirekt auch im Indikator Preisvolatilität oder Erzeugungskosten enthalten.

Schließlich ist das hier entwickelte Konzept nicht als Ansatz zur monetären Abschätzung der Wirkungen des Ausbaus EE auf Energiesicherheit zu verstehen. Im Gegenteil, der Ansatz zeigt auf, über welche verschiedenen Eigenschaften, Dimensionen oder Indikatoren diese Wirkung erfasst, bzw. Energiesicherheit auch gemessen werden kann – ohne Maßeinheit – und dass eine klare Definition und Abgrenzung dieses Begriffs nicht existiert bzw. die Auslegung des Begriffs von der jeweiligen Situation (Politik, Preisentwicklung, Infrastruktur, etc.) abhängig ist.

Einordnung in das Kosten-Nutzen-Konzept

In Hinblick auf die drei Wirkungskategorien des Kosten-Nutzen-Konzepts (siehe Breitschopf und Diekmann 2011), den systemanalytischen Effekten, einzelwirtschaftlichen Be/Entlastungen (Verteilungswirkung) sowie den makroökonomischen Wirkungen, ist Energiesicherheit, gemessen anhand der hier aufgeführten Indikatoren, den systemanalytischen Effekten zuzuordnen. Energiesicherheit kann nicht als separater Nutzen-effekt in die Bilanzierung eingehen, da sie bereits in die Berechnung der Differenzkosten oder Nutzenwirkung eingeht:

- Erzeugungskosten werden in den Differenzkosten über Technologiekosten und Preise für Energieträger erfasst.
- Importrisiken oder –abhängigkeiten schlagen sich teils in den Lagerhaltungskosten und damit in den Verbraucherpreisen für Erdgas und Öl nieder und finden folgerichtig in den Differenzkosten Berücksichtigung.
- Kurzfristige Verfügbarkeit (Wartungskosten, Ertragsausfälle) sowie Umwandlungseffizienz finden sich in den Gestehungskosten und somit ebenfalls in den Differenzkosten wider.
- Positive Umweltwirkungen und Nachhaltigkeitsaspekte der Nutzung erneuerbarer Energien sind zwar hier nicht in der Analyse berücksichtigt, doch sind sie Kosten-Nutzenkonzept unter der Kategorie systemanalytische Effekte in Form von vermiedenen Umweltschäden als Nutzengröße bereits explizit aufgeführt.

Keinen direkten oder mittelbaren Eingang in die systemanalytischen Kosten- oder Nutzenwirkungen finden hingegen die Preisvolatilität sowie die Diversität des Systems und der Ressourcenverfügbarkeit. Allerdings kann argumentiert werden, dass Hedging-

strategien als Sicherungsinstrument gegen Preisvolatilitäten in den Marktpreis eingehen können, und Diversität in gewisser Weise die Markt- und Versorgungsstruktur widerspiegelt und sich insofern ebenfalls in den Marktpreisen niederschlagen kann.

Ergebnisse

Die Ergebnisse veranschaulichen, dass gemessen an den Indikatoren zur Vielfalt und Importabhängigkeit das Wärmeerzeugungssystem mit EE in 2011 eine um über 17 % höhere Energiesicherheit aufweist als ein System ohne EE, während die Energiesicherheit gemessen an Erzeugungskosten, Preisvolatilität, Effizienz und Verfügbarkeit eher geringfügig oder nicht zunimmt. Die Analyse führt insgesamt zu dem Ergebnis, dass erneuerbare Energien im deutschen Wärmeerzeugungssystem in 2011 gemessen an den hier ausgewählten unterschiedlichen Indikatoren einen sichtbaren Beitrag zur Energiesicherheit leisten, das Ausmaß der Wirkung jedoch von der Auswahl der Indikatoren abhängt sowie von der Vielfalt oder Diversität der Ressourcen bzw. Technologien, die nicht zwangsläufig erneuerbar sein müssen, sondern auch Kernenergie umfassen können. Darüber hinaus ist Energiesicherheit ein relativ abstrakter Begriff, der indirekt über Technologiekosten, Absicherungskosten und Preise in die Wärmeerzeugungskosten eingeht, hier jedoch nicht monetär erfasst ist und auch nicht als Einzelgröße in das Kosten-Nutzenkonzept integrierbar ist.

6 Annex

6.1 Szenario ohne EE

Tabelle 11: Substitutionsfaktoren nach UBA 2009

	Oil	Natural Gas	Coal
Biogas	48.00%	46.00%	6.00%
Biomass (Industry)	11.46%	64.58%	25.00%
Biomass (Service)	72.22%	22.22%	5.56%
Biomass (Households)	44.57%	54.35%	1.09%
Geothermal	48.91%	47.83%	3.26%
Solar Thermal	46.88%	53.13%	0.00%

Tabelle 12: Szenario II – ohne EE

		Scenario II		
in PJ		End-Uses		
	Energy source	Space Heating	Hot Water	Process Heating
Industry	Oil	25,42	2,43	114,51
	Natural Gas	148,15	15,48	956,62
	Coal	29,54	3,13	473,75
Service S	Oil	160,11	17,50	31,16
	Natural Gas	370,12	32,86	47,60
	Coal	46,37	2,24	5,54
Househo	Oil	535,85	98,95	0,00
	Natural Gas	764,47	171,35	3,00
	Coal	110,28	7,29	0,00

6.2 Indikatorwerte

Die Ergebnisse sind wie folgt zu interpretieren: z.B. der Wert für einen Energieträger zur Erzeugung von Raumwärme in der Industrie besagt, **wie hoch der Beitrag des Energieträgers im Anwendungsbereich zur Importabhängigkeit, Preisvolatilität, etc. im entsprechenden Energiesystem ist**, aber nicht, dass der Energieträger im jeweiligen Anwendungsbereich beispielsweise weniger oder stärker importabhängig ist. Die jeweiligen Spalten mit den Unterschieden weisen nur den Beitrag des jeweiligen Energieträgers/Technologie zum jeweiligen Indikatorwert innerhalb des Sektors und

Anwendungsbereichs auf. Eine **positive Differenz (Szenario ohne EE (II) – Szenario mit EE (I)) der Indikatoren besagt, dass der Indikatorwert des Sektor und Anwendungsbereichs in einem Energiesystem ohne EE höher ist als in einem Energiesystems mit EE**, während eine negative Differenz (Werte Szenario II – Szenario I) dahingehend zu interpretieren ist, dass der Indikatorwert im Energiesystem mit EE höher ist als in einem System ohne EE. Allerdings ist eine positive Differenz zwischen den Szenarien nicht bei jedem Indikator als „Energiesicherheit vermindern“ zu übersetzen, sondern bei Umwandlungseffizienz, Ressourcenvielfalt und Systemdiversität zeigt eine positive Differenz auf eine steigende Energiesicherheit.

6.2.1 Importabhängigkeit

Die Differenz zwischen Szenario II und Szenario I ist durchgehend positiv. Dies bedeutet, dass die Werte im Energiesystem ohne EE größer sind als in einem System mit EE und somit EE die Importabhängigkeit verringern. Die senkende Wirkung EE (Tabelle 13) erklärt sich unmittelbar durch den verminderten Anteil fossiler Energieträger am Energiemix.

Tabelle 13: Importabhängigkeit

Import dependency					
		Scenario I	Scenario II	Difference	Impact of RE
I-SH	Oil	0,02	0,02	0,00	16%
	Natural Gas	0,06	0,07	0,01	
	Coal	0,02	0,03	0,01	
I-PH	Oil	0,01	0,01	0,00	9%
	Natural Gas	0,05	0,06	0,01	
	Coal	0,06	0,06	0,00	
S-SH	Oil	0,04	0,05	0,01	7%
	Natural Gas	0,06	0,06	0,00	
	Coal	0,02	0,02	0,00	
H-SH	Oil	0,05	0,07	0,02	19%
	Natural Gas	0,04	0,05	0,01	
	Coal	0,01	0,01	0,00	
H-HW	Oil	0,05	0,06	0,01	11%
	Natural Gas	0,05	0,06	0,01	
	Coal	0,00	0,00	0,00	
Total		0,04	0,05	0,01	23%

6.2.2 Importrisiko

Das Risiko durch Importe verringert sich aufgrund des Einsatzes EE ebenfalls, da sich der Einsatz fossiler Brennstoffe, die zum größten Teil importiert werden, vermindert.

Tabelle 14: Risiko durch Importe

Import risk					
		Scenario I	Scenario II	Difference	Impact of RE use
I-SH	Oil	0,0	0,0	0,0	14%
	Natural Gas	0,4	0,5	0,1	
	Coal	0,0	0,0	0,0	
I-PH	Oil	0,0	0,0	0,0	9%
	Natural Gas	0,4	0,4	0,0	
	Coal	0,1	0,1	0,0	
S-SH	Oil	0,1	0,1	0,0	5%
	Natural Gas	0,4	0,4	0,0	
	Coal	0,0	0,0	0,0	
H-SH	Oil	0,1	0,1	0,0	19%
	Natural Gas	0,3	0,3	0,1	
	Coal	0,0	0,0	0,0	
H-HW	Oil	0,1	0,1	0,0	10%
	Natural Gas	0,4	0,4	0,0	
	Coal	0,0	0,0	0,0	
Total		0,2	0,3	0,1	22%

6.2.3 Preisvolatilität

Wie Tabelle 15 zeigt, verringert sich die Preisvolatilität im Szenario I, d.h. Szenario I weist überwiegend geringere Werte zur Preisvolatilität auf als Szenario II. Dies entspricht einem positiven Effekt EE hinsichtlich der Energie(versorgungs)sicherheit. Bei der Interpretation der Werte ist allerdings zu beachten, dass die Differenz zwischen den beiden Szenarien bei den erneuerbaren Energieträgern negative Werte aufweisen kann. Dies ist dann der Fall, wenn im Energiesystem ohne EE die Preisvolatilitäten bei EE gleich Null gesetzt sind (es gibt dort ja keine EE). Insgesamt ist jedoch die Preisvolatilität der fossilen Energieträger höher als dieser der erneuerbaren, so dass auf Anwendungs-, Sektor- und Systemebene EE die Preisvolatilität vermindern.

Tabelle 15: Preisvolatilität

Price Volatility					
		Scenario I	Scenario II	Difference	Impact
I-SH	Oil	2,35	2,71	0,36	4%
	Natural Gas	5,01	5,74	0,74	
	Coal	1,17	1,57	0,39	
	Biomass	1,12	0,00	-1,12	
I-PH	Oil	1,38	1,60	0,23	2%
	Natural Gas	4,42	4,88	0,46	
	Coal	3,06	3,30	0,24	
	Biomass	0,70	0,00	-0,70	
S-SH	Oil	5,08	5,77	0,68	5%
	Natural Gas	2,52	2,61	0,10	
	Coal	0,92	0,96	0,04	
	Biomass	0,16	0,00	-0,16	
	Biogas	0,16	0,00	-0,16	
	Geothermal	0,00	0,00	0,00	
H-SH	Oil	6,14	7,89	1,76	7%
	Natural Gas	1,85	2,27	0,42	
	Coal	0,90	0,93	0,03	
	Biomass	1,35	0,00	-1,35	
	Biogas	0,06	0,00	-0,06	
	Geothermal	0,06	0,00	-0,06	
H-HW	Oil	6,39	7,40	1,01	7%
	Natural Gas	2,35	2,58	0,23	
	Coal	0,29	0,31	0,02	
	Biomass	0,33	0,00	-0,33	
	Biogas	0,16	0,00	-0,16	
	Geothermal	0,02	0,00	-0,02	
Total		9,38	10,11	0,74	7%

6.2.4 Kurzfristige Verfügbarkeit

Tabelle 16 zeigt die Daten über die Verfügbarkeit der Technologien auf Basis der jeweiligen Energieträger. Je niedriger der Wert des Indikators, desto größer ist dessen Verfügbarkeit. Die Verfügbarkeit verändert sich nur marginal. Die Differenz zwischen Szenario II und I ist nur bei den Technologien negativ, die im Szenario II aufgrund ihres Nicht-Einsatzes den Wert Null einnehmen; bei ihrer Nutzung nimmt der Indikatorwert zur Verfügbarkeit einen Wert größer Null ein. Insgesamt steigt die Verfügbarkeit mit EE an.

Tabelle 16: Verfügbarkeit

Short-term supply					
		Scenario I	Scenario II	Difference	Impact
I-SH	Oil	2,48	2,86	0,38	6%
	Natural Gas	14,51	16,65	2,14	
	Coal	1,24	1,66	0,42	
	Biomass	1,68	0,00	-1,68	
I-PH	Oil	1,45	1,69	0,24	4%
	Natural Gas	12,80	14,14	1,33	
	Coal	3,24	3,50	0,26	
	Biomass	1,04	0,00	-1,04	
S-SH	Oil	5,59	6,34	0,75	1%
	Natural Gas	14,12	14,66	0,54	
	Coal	0,88	0,92	0,04	
	Biomass	0,20	0,00	-0,20	
	Biogas	0,90	0,00	-0,90	
	Geothermal	0,03	0,00	-0,03	
	Solar Thermal	0,05	0,00	-0,05	
H-SH	Oil	6,74	8,67	1,93	8%
	Natural Gas	10,10	12,37	2,27	
	Coal	0,86	0,89	0,03	
	Biomass	1,79	0,00	-1,79	
	Biogas	0,17	0,00	-0,17	
	Geothermal	0,48	0,00	-0,48	
	Solar Thermal	0,04	0,00	-0,04	
H-HW	Oil	7,03	8,14	1,11	1%
	Natural Gas	12,85	14,09	1,25	
	Coal	0,28	0,30	0,02	
	Biomass	0,44	0,00	-0,44	
	Biogas	0,42	0,00	-0,42	
	Geothermal	0,15	0,00	-0,15	
	Solar Thermal	1,06	0,00	-1,06	
Total		0,20	0,21	0,01	5%

6.2.5 Erzeugungskosten

Die Erzeugungskosten spiegeln die Bezahlbarkeit sowie die Effizienz einer Technologie wider. Je höher die Werte desto stärker vermindert sich die Energiesicherheit. Eine positive Differenz deutet darauf hin, dass EE die Erzeugungskosten vermindern und somit die Energiesicherheit erhöhen. Auch hier ist zu beachten, dass die Differenzen bei erneuerbaren Energieträgern negativ sind, da im Energiesystem ohne EE hier die Werte mit Null ausgegeben sind (EE verursachen ja keine Kosten, da sie nicht genutzt werden). Insgesamt erhöhen EE unter den jetzigen Preisen oder Kosten den Indikatorwert und leisten gegenwärtig einen negativen Beitrag zur Energiesicherheit, d.h. die Energieversorgung mit EE ist nicht zu günstigsten Preisen gegeben. Diese Wirkung kann sich jedoch umdrehen, wenn die Preise für fossile Energieträger ansteigen, oder die Technologiekosten für EE deutlich sinken.

Tabelle 17: Erzeugungskosten

Produktion costs						
		Scenario I	Scenario II	Difference	Impact of RE	
I-SH	Oil	0,02	0,02	0,00	2%	
	Natural Gas	0,08	0,09	0,01		
	Coal	0,01	0,02	0,00		
	Biomass	0,02	0,00	-0,02		
I-PH	Oil	0,01	0,01	0,00	-3%	
	Natural Gas	0,07	0,07	0,01		
	Coal	0,03	0,03	0,00		
	Biomass	0,01	0,00	-0,01		
S-SH	Oil	0,04	0,05	0,01	1%	
	Natural Gas	0,07	0,08	0,00		
	Coal	0,01	0,01	0,00		
	Biomass	0,00	0,00	0,00		
	Biogas	0,00	0,00	0,00		
	Geothermal	0,00	0,00	0,00		
	Solar Thermal	0,00	0,00	0,00		
H-SH	Oil	0,06	0,08	0,02	6%	
	Natural Gas	0,10	0,12	0,02		
	Coal	0,01	0,01	0,00		
	Biomass	0,02	0,00	-0,02		
	Biogas	0,00	0,00	0,00		
	Geothermal	0,01	0,00	-0,01		
	Solar Thermal	0,00	0,00	0,00		
H-HW	Oil	0,07	0,08	0,01	3%	
	Natural Gas	0,12	0,14	0,01		
	Coal	0,00	0,00	0,00		
	Biomass	0,01	0,00	-0,01		
	Biogas	0,00	0,00	0,00		
	Geothermal	0,00	0,00	0,00		
	Solar Thermal	0,01	0,00	-0,01		
Total		0,16	0,17	0,01	4%	

6.2.6 Effizienz der Umwandlung

Je höher die Effizienz desto höher ist der Beitrag der Energieträger zur Energiesicherheit zu werten. Eine positive Differenz zeigt auf, dass die Technologien im Energiesystem ohne EE höhere Effizienz haben und somit EE aufgrund ihrer geringeren Effizienz die Energiesicherheit vermindern.

Tabelle 18: Umwandlungseffizienz

Conversion efficiency					
		Scenario I	Scenario II	Difference	Impact of RE
I-SH	Oil	0,11	0,12	0,02	2%
	Natural Gas	0,60	0,69	0,09	
	Coal	0,10	0,14	0,03	
	Biomass	0,13	0,00	-0,13	
I-PH	Oil	0,06	0,07	0,01	1%
	Natural Gas	0,53	0,59	0,06	
	Coal	0,27	0,29	0,02	
	Biomass	0,08	0,00	-0,08	
S-SH	Oil	0,24	0,27	0,03	0%
	Natural Gas	0,59	0,61	0,02	
	Coal	0,07	0,08	0,00	
	Biomass	0,01	0,00	-0,01	
	Biogas	0,04	0,00	-0,04	
	Geothermal	0,00	0,00	0,00	
	Solar Thermal	0,00	0,00	0,00	
H-SH	Oil	0,29	0,37	0,08	0%
	Natural Gas	0,40	0,49	0,09	
	Coal	0,04	0,04	0,00	
	Biomass	0,13	0,00	-0,13	
	Biogas	0,01	0,00	-0,01	
	Geothermal	0,03	0,00	-0,03	
	Solar Thermal	0,00	0,00	0,00	
H-HW	Oil	0,30	0,35	0,05	6%
	Natural Gas	0,51	0,56	0,05	
	Coal	0,01	0,01	0,00	
	Biomass	0,03	0,00	-0,03	
	Biogas	0,00	0,00	0,00	
	Geothermal	0,01	0,00	-0,01	
	Solar Thermal	0,00	0,00	0,00	
Total	0	0,92	0,94	0,02	2%

6.2.7 Vielfalt der verfügbaren Ressourcen

Mit Blick auf die Vielfalt der verfügbaren Ressourcen erhöhen EE die Energiesicherheit. D.h. die Indikatorwerte im Szenario mit EE (HH Warmwasser Solar) sind höher als diese im Szenario ohne EE. Je höher die Werte für die Vielfalt desto positiver ist dies unter Sicherheitsaspekten zu werten. Die Interpretation der einzelnen Werte ist jedoch immer mit Blick auf die Gesamtheit der Energieträger, d.h. das Energiesystem zu treffen. Beispielsweise vermindert sich in der Industrie/Raumwärme der Beitrag von Erdgas zur Energiesicherheit unter dem Szenario mit EE, da Erdgas durch EE substituiert wird, d.h. die Differenz reflektiert einen Mengeneffekt aber nicht eine verminderte Ressourcenvielfalt bei Erdgas.

Tabelle 19: Ressourcenvielfalt

Diversity of resources					
		Scenario I	Scenario II	Difference	Impact
I-SH	Oil	0,02	0,02	0,00	-16%
	Natural Gas	0,20	0,23	0,03	
	Coal	0,02	0,03	0,01	
	Biomass	0,08	0,00	-0,08	
I-PH	Oil	0,01	0,02	0,01	-5%
	Natural Gas	0,18	0,20	0,02	
	Coal	0,06	0,06	0,00	
	Biomass	0,05	0,00	-0,05	
S-SH	Oil	0,04	0,04	0,00	-9%
	Natural Gas	0,20	0,21	0,01	
	Coal	0,01	0,01	0,00	
	Biomass	0,01	0,00	-0,01	
	Biogas	0,02	0,00	-0,02	
	Geothermal	0,00	0,00	0,00	
	Solar Thermal	0,00	0,00	0,00	
H-SH	Oil	0,04	0,06	0,01	-29%
	Natural Gas	0,14	0,17	0,03	
	Coal	0,02	0,02	0,00	
	Biomass	0,09	0,00	-0,09	
	Biogas	0,00	0,00	0,00	
	Geothermal	0,02	0,00	-0,02	
	Solar Thermal	0,00	0,00	0,00	
H-HW	Oil	0,05	0,05	0,01	-21%
	Natural Gas	0,18	0,20	0,02	
	Coal	0,01	0,01	0,00	
	Biomass	0,02	0,00	-0,02	
	Biogas	0,01	0,00	-0,01	
	Geothermal	0,01	0,00	-0,01	
	Solar Thermal	0,04	0,00	-0,04	
Total		0,31	0,26	- 0,05	-17%

6.2.8 Diversität des Systems

Dieser Indikator wird nicht nach Technologien, sondern nur nach Anwendungs- und Verbrauchssektoren ausgewiesen. Je größer die (negative) Differenz, desto höher ist der Beitrag EE zur Energiesicherheit. Hier ist der Beitrag EE zur Energiesicherheit durchgehend positiv.

Tabelle 20: Systemdiversität

Overall system diversity				
	Scenario I	Scenario II	Difference	Impact of RE
I-SH	11	3	-9	-3,2
I-PH	15	4	-10	-2,4
S-SH	23	4	-19	-4,8
H-SH	41	6	-35	-6,1
H-HW	26	4	-22	-6,0
Total	33	6	-27	-4,7

7 References

- Adelphi Consult & Wuppertal Institut (2007). *Die sicherheitspolitische Bedeutung erneuerbarer Energien*.
- AGEB (2013). AG Energiebilanzen e.V., Anwendungsbilanzen 2011, <http://www.ag-energiebilanzen.de/DE/daten-und-fakten/anwendungsbilanzen/anwendungsbilanzen.html>
- Augutis, J., Krikstolaitis, R., Martisauskas, L., & Peciulyte, S. (2012). Energy security level assessment technology. *Applied Energy*, 143–149.
- Awerbuch, S. (1995). Market-based IRP: It's easy!!! *The electricity journal*.
- Bar-Lev, D., & Katz, S. (1976). A portfolio approach to fossil fuel procurement in the electric utility industry. *Journal of Finance*, 933–947.
- Brealey, R. A., Myers, S. C., & Allen, F. (2007). *Principles of Corporate Finance*. New York, NY: McGraw Hill Higher Education.
- BAFA (2012): Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle [BAFA]. *Entwicklung der Erdgaseinfuhr in die Bundesrepublik Deutschland*. Eschborn, Germany: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle.
- BAFA (2013): Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle [BAFA]. *EnergieINFO – Rohölimporte*. Eschborn, Germany: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle.
- Blum, H., Legey, L.F.L, (2012); The challenging economics of energy security: Ensuring enregy benefits in support to sustainable development, *Energy Economics*, 34 (2012) 1982-1989
- Bundesministerium der Verteidigung (2006). *Weißbuch 2006: zur Sicherheitspolitik Deutschlands und zur Zukunft der Bundeswehr*.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2012). *EEG2012: EEG2012*.
- BMWi (2014) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2014), *Energiewirtschaftsgesetz*.
- BMWi (2014a); *Entwicklung der erneuerbaren Energien in Zahlen in Deutschland im Jahr 2013; Stand Februar 2014*: download June 2014: http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/agee-stat-grafiken-und-tabellen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-im-jahr-2013-deutsch.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2013). *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland*. Berlin.

Bundesministerium der Verteidigung (2006). *Weißbuch 2006: zur Sicherheitspolitik Deutschlands und zur Zukunft der Bundeswehr*.

Breitschopf, B., Diekmann, J., 2011: "Gesamtwirtschaftliche Auswirkungen des Ausbaus Erneuerbarer Energien (economic impact of RE deployment)", in: Finanzierung Erneuerbarer Energien, T. Rüschen, M. Gerhard and A. Sandhölvel, Eds. Frankfurt am Main: Frankfurt School Verlag GmbH, 2011.

Buttermann, H. G., & Freund, F. (2010). *Sicherheit unserer Energieversorgung – Indikatoren zur Messung: Untersuchung im Auftrag des Weltenergieerats - Deutschland*.

Cherp, A. (2012). Energy and Security. In T. B. Johansson, A. Patwardhan, N. Nakicenovic, & L. Gomez-Echeverri (Eds.), *Global Energy Assessment (GEA) Towards a Sustainable Future* (pp. 325–384). Cambridge, Laxenburg, Austria: Cambridge University Press; International Institute for Applied Systems Analysis.

Cherp, A., & Jewell, J. (2011b). The three perspectives on energy security: intellectual history, disciplinary roots and the potential for integration. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 202–212.

Cherp, A., & Jewell, J. (2011a). Measuring energy security: From universal indicators to contextualized frameworks. In B. K. Sovacool (Ed.), *The Routledge handbook of energy security* (pp. 330–335). Abingdon: Routledge.

Cherp, A., & Jewell, J. (2011b). The three perspectives on energy security: intellectual history, disciplinary roots and the potential for integration. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 202–212.

Cohen, G., Joutz, F., Loungani, P., (2011) Measuring Energy Security: Trends in the Diversification of Oil and Natural Gas Supplies; IMF working Paper WP/11/39

Dengler, J., Fette, M., Henning, H.-M., Idrissova, F., Jochem, E., Kost, C., Reitze, F., Schick Tanz, M., Schnabel, L., Schulz, W., Steinbach, J., & Toro, F. (2012). *Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie: Arbeitspaket 1 - Bestandsaufnahme und Strukturierung des Wärme- und Kältebereichs*. Berlin.

Destatis Statistisches Bundesamt (2013). Preise; Daten zur Energiepreisentwicklung, Lange Reihen bis Dez. 2013, Preisindizes Energiepreise, Wiesbaden 2014.

DERA (2012): Deutsche Rohstoff Agentur (2012). *Energistudie 2012 - Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen*. Berlin.

-
- DERA (2013): Deutsche Rohstoff Agentur (2013). *Energiestudie 2012 – Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen*. Berlin.
- Deutsches BiomasseForschungsZentrum gemeinnützige GmbH (2009). *Final Report Global and Regional Spatial Distribution of Biomass Potentials: Status quo and options for specification*. Leipzig.
- DFT (n.d) (2013): DistanceFromTo [DFT]. (n.d.). Distance Between Cities/Places On Map. Retrieved August 8, 2013, from <http://www.distancefromto.net/>
- DWD (2013): Zahlen und Fakten zum Klimawandel in Deutschland 2012, retrieved: http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Presse/Pressekonferenzen/2013/PK__07__05__13/ZundF__zur__PK,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/ZundF__zur__PK.pdf
- Farrell, A. E., Zerriffi, H., & Dowlatabadi, H. (2004). ENERGY INFRASTRUCTURE AND SECURITY. *Annu. Rev. Environ. Resourc.*, 29, 421–469.
- Fischer, S. (2008). *Energieversorgungssicherheit: Was kann Europa leisten?*
- Goldthau, A., & Sovacool, B. K. (2012). The uniqueness of the energy security, justice, and governance problem. *Energy Policy*, 232–240.
- Gupta, E. (2008). Oil vulnerability index of oil-importing countries. *Energy Policy*, 36, 1195–1211.
- Hughes, L., (2012); A generic framework for the description and analysis of energy security in an energy system; *Energy Policy* 2012, vol 42, issue C, p 221-231
- Indriyanto, A. R., Fauzi, Dwi, A., & Firdaus, A. (2011). The Sustainable Development Dimension Of Energy Security. In B. K. Sovacool (Ed.), *The Routledge handbook of energy security*. Abingdon: Routledge.
- International Energy Agency (2007). *Energy Security and Climate Policy - Assessing Interactions*. Paris: OECD Publishing.
- ISI et al. (2010); Breitschopf, B., ISI, Klobasa, M., ISI, Steinbach, J., ISI, Ragwitz, M., Sensfuß, F., GWS: Lehr, U.; IZES: Horst, J., Leprich, U.; DIW: Diekmann, J., Braun, F., Horn, M., (2010). Einzel- und gesamtwirtschaftliche Analyse von Kosten- und Nutzenwirkungen des Ausbaus Erneuerbarer Energien im deutschen Strom- und Wärmemarkt.
- Jansen, J. C., & Seebregts, A. J. (2010). Long-term energy services security: What is it and how can it be measured and valued? *Energy Security - Concepts and Indicators with regular papers*, 38, 1654–1664.

- Jansen, J. C., & van der Welle, A. J. (2011). The energy services dimension of energy security. In B. K. Sovacool (Ed.), *The Routledge handbook of energy security* (pp. 239–249). Abingdon: Routledge.
- Jewell, J. (2010). The IEA Model of Short-Term Energy Security (MOSES): Primary Energy Sources and Secondary Fuels. <http://ideas.repec.org/p/oec/ieaaaa/2011-17-en.html>. Accessed 14.03.2014.
- Kessels, J. (2011). Measuring security of energy supply with two diversity indexes. In B. K. Sovacool (Ed.), *The Routledge handbook of energy security* (pp. 313–329). Abingdon: Routledge.
- Klare, M. (2008). *Rising powers, shrinking planet: How scarce energy is creating a new world order*. Oxford: Oneworld.
- Kruyt, B., van Vururen, D. P., de Vries, H. J. M., & Groenenberg, H. (2009). Indicators for energy security. *Energy Policy*, 2166–2181.
- Le Coq, C., & Paltseva, E. (2009). Measuring the security of external energy supply in the European Union. *Energy Policy*, 37, 4474–4481.
- Lehr, U. (2009): More Baskets? Renewable Energy and Energy Security. GWS Discussion Paper 2009/8, Osnabrück
- Martchamadol, J., & Kumar, S. (2012). Thailand's energy security indicators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6103–6122.
- Martchamadol, J., & Kumar, S. (2013). An aggregated energy security performance indicator. *Applied Energy*, 653–670.
- Maurer, C., Lüdorf, K., Lindenberger, D., Paulus, M., Grave, K., Moser, A., & Hermes, L. (2010). *Remptenh Versorgungssicherheit in der Elektrizitätsversorgung: Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi)*.
- Mükusch, C. (2012). Vernetzte Energiesicherheit - Mehr Chancen für Deutschlands Zukunft. *Zeitschrift für Außen- und Sicherheitspolitik*, 425–444.
- Müller-Kraenner, S. (2008). *Energy security: Re-measuring the world*. (1. publ). London u.a: Earthscan.
- Pasqualetti, M. J., & Sovacool B. K. (2012). The importance of scale to energy security. *Journal of integrative Environmental Sciences*, 167–180.
- Prambudia Y., & Nakano, M. (2012). Integrated Simulation Model for Energy Security Evaluation. *Energies*, 5086–5110.

-
- Scheepers, M., de Jong, J., Seebregts, A., & Maters, H. (2007). *EU Standards for Energy Security of Supply*.
- Schlotz, A. (2013). Measuring the impact of renewable energy technologies on energy security - a multi-level assessment of the German heating sector. IIIIEE-Theses 2013, Lund, September 2013
- Seefeldt, F., Struwe, J., Ragwitz, M., Steinbach, J., Jacobshagen, U., Kachel, M., Simon, S., & Bürger, V. (2011). *Fachliche und juristische Konzeption eines haushaltsunabhängigen Instruments für erneuerbare Wärme*. Berlin.
- Selvakkumaran, S., & Limmeechockchai, B. (2012). Assessment of energy security and co-benefits of low-carbon society scenarios in Thailand. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 61–78.
- Shin, J., Shin W.S., Lee, Ch. (2013); An energy security management model using quality function deployment and system dynamics; *Energy Policy* 54 (2012) 72-86
- Soda (2013): Solar Radiation Data. Solar Energy Services for Professionals. <http://www.soda-is.com/eng/index.html>. Accessed 14.03.2014.
- Sovacool, B. K. (2011). Introduction: Defining, measuring, and exploring energy security. In B. K. Sovacool (Ed.), *The Routledge handbook of energy security* (pp. 1–42). Abingdon: Routledge.
- Sovacool, B. K. (2012). The methodological challenges of creating a comprehensive energy security index. *Energy Policy*, 835–840.
- Sovacool, B. K. (2013). An international assessment of energy security performance. *Ecological Economics*.
- Sovacool, B. K., & Brown, M. A. (2011). Measuring energy security performance in the OECD. In B. K. Sovacool (Ed.), *The Routledge handbook of energy security* (pp. 381–395). Abingdon: Routledge.
- Sovacool, B. K., & Lim, T. W. (2011). Conclusion: Exploring the contested and convergent nature of energy security. In B. K. Sovacool (Ed.), *The Routledge handbook of energy security* (pp. 414–427). Abingdon: Routledge.
- Sovacool, B. K., & Mukherjee, I. (2011). Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach. *Energy Policy*, 5343–5355.
- Sovacool, B. K., Mukherjee, I., Drupady, I. M., & D'Agostino, A. L. (2011). Evaluating energy security performance from 1990 to 2010 for eighteen countries. *Energy*, 36, 5846–5853.

- Sovacool, B. K., Valentine, S. V., Malavika, J. B., Brown, M. A., de Fátima C., Terezinha, Nurbek, S., Suleimenova, G., Li, J., Xu, Y., Jain, A., Alhajji, A. F., & Zubiri, A. (2012). Exploring propositions about perceptions of energy security: An international survey. *Environmental Science & Policy*, 16, 44–64.
- Stirling, A. (1994). Diversity and ignorance in electricity supply investment: addressing the solution rather than the problem. *Energy Policy*, 195–216.
- Stirling, A. (2011). The diversification dimension of energy security. In B. K. Sovacool (Ed.), *The Routledge handbook of energy security* (pp. 146–175). Abingdon: Routledge.
- The Economist Intelligence Unit Limited (2013). ViewsWire - Political Instability. http://viewswire.eiu.com/index.asp?layout=VWArticleVW3&article_id=874361472. Accessed 14.03.2014.
- Universität Marburg. *Begriff Energiesicherheit*.
- VDI (2007). Düsseldorf. Verein Deutscher Ingenieure [VDI]. (2007). *VDI Richtlinien: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Grundlagen und Kostenberechnung*. Düsseldorf, Germany: Verein Deutscher Ingenieure
- Vivoda, V. (2010). Evaluating energy security in the Asia-Pacific region: A novel methodological approach. *Energy Policy*, 5258–5263.
- VDKI 2012: Verein der Kohlenimporteure [VDKI]. (2012). Jahresbericht 2012. Hamburg, Germany: Verein der Kohlenimporteure.
- von Hippel, D. F., Suzuki, T., Williams, T. S., & Hayes, P. (2011). Evaluating the energy security impacts of energy policies. In B. K. Sovacool (Ed.), *The Routledge handbook of energy security* (pp. 74–95). Abingdon: Routledge.
- Winzer, C. (2012). Conceptualizing energy security. *Energy Policy*, 46 (2012), 36–48.
- Yergin, D. (2006). Ensuring Energy Security. *Foreign Affairs*, 86.