



RESYSTRA

Auf dem Weg zu resilienten Energiesystemen!

Thesenpapier 1

Vulnerabilität und Resilienz als Konzepte zum Umgang mit irreduziblen Unsicherheiten bei der Energiewende

Jakob Wachsmuth

Impressum

Herausgeber

artec | Forschungszentrum Nachhaltigkeit
Universität Bremen
Enrique-Schmidt-Str. 7
28359 Bremen

Autoren

Jakob Wachsmuth, Universität Bremen
Tel.: (0421) 218-64889, E-mail: wachsmuth@uni-bremen.de

Die vorliegende Publikation wurde im Rahmen des Forschungsverbundes RESYSTRA – Resiliente Gestaltung des Energiesystems am Beispiel der Transformationsoptionen „EE-Methan-System“ und „Regionale Selbstversorgung“ erstellt. Für den Inhalt sind die genannten Autorinnen und Autoren verantwortlich.

Diese Publikation ist online abrufbar unter www.resystra.de.

Bremen, 17. März 2014

1 Einführung

Mit dem Fortschreiten der Energiewende rückt zunehmend die Frage nach der Sicherheit in den Fokus, mit der die Energiesysteme die von ihnen erwarteten Dienstleistungen tatsächlich lückenlos und mit der erwarteten Qualität erbringen können. Für eine Übergangszeit muss von einer Zunahme von Instabilitäten und Störereignissen ausgegangen werden, für die es wenige Erfahrungswerte gibt. Diesbezüglich gilt es Transformationsoptionen prospektiv zu bewerten. Dabei muss eine solche dem Vorsorgeprinzip verpflichtete prospektive Betrachtung ggfs. mit einer geringeren Evidenz der jeweiligen Aussagen erkaufte werden.

Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang einerseits das Konzept der Vulnerabilität kritischer Infrastrukturen, das neben der technischen auch die sozio-ökonomische Dimension berücksichtigt (vgl. Birkmann et al 2010). Andererseits durchlebt der Begriff Resilienz derzeit eine hohe Dynamik im Diskurs über Global Change, Klimawandel, Klimaanpassung und Nachhaltigkeit. Als resilient werden hier Systeme verstanden, die auch beim Auftreten innerer und äußerer Ausfälle und Störungen ihre Dienstleistungen aufrecht erhalten (vgl. Gleich et al. 2010a).

Das Leitkonzept „Resiliente Systeme“ bezeichnet dementsprechend die Orientierung auf die Vermeidung größerer Systemzusammenbrüche bei der Gestaltung von sozio-technischen Systemen. Damit ergänzt es das breit akzeptierte Nachhaltigkeitsziel vor allem mit Blick auf die Risikodimension im Sinne der Umsetzung des Vorsorgeprinzips. Ein Ziel des Projekts RESYSTRA ist es daher, das Leitkonzept „Resiliente Systeme“ als angemessene Form des Umgangs mit nicht-auflösbarer Unsicherheit weiterzuentwickeln und zu Gestaltungsleitbildern für „resiliente Energiesysteme“ zu konkretisieren.

Dieses Thesenpapier soll in diesem Kontext eine kurze Einführung in die Begrifflichkeiten „Vulnerabilität“ und „Resilienz“ als Konzepte zum Umgang mit tiefen Unsicherheiten bei der Analyse und Gestaltung von Energiesystemen bieten. Dazu bündelt es ausgewählte Aussagen des Artikels

Gößling-Reisemann, S., Stührmann, S., Wachsmuth, J., von Gleich, A. (2013). Vulnerabilität und Resilienz von Energiesystemen. In J. Radtke, B. Hennig (Ed.), Die deutsche „Energiewende“ nach Fukushima – Der wissenschaftliche Diskurs zwischen Atomausstieg und Wachstumsdebatte, Marburg: Metropolis-Verlag,

in Thesen und erweitert diese im Hinblick auf eine detailliertere Betrachtung der resilienten Gestaltung von Kopplungen innerhalb komplexer sozio-technischer Systeme wie der Energieinfrastruktur.

2 Thesen zum Umgang mit irreduziblen Unsicherheiten im Kontext der Energiewende (und darüber hinaus)

2.1 Gefährdete Versorgung

Die massive Transformation des komplexen Systems der leitungsgebundenen Energieversorgung im Rahmen der Energiewende führt mit hohem Tempo in einen nicht eindeutig festgelegten, aber in jedem Fall unerprobten Zustand, was zumindest zeitweise mit einer deutlich höheren Gefährdung der Versorgungssicherheit einhergehen dürfte.

Es gibt kein mit Deutschland vergleichbares Industrieland, das über ein CO₂-armes und atomkraftfreies Energiesystem verfügt, welches als Vorbild für die Transformation dienen kann. Erschwerend hinzu kommt das auf Grund des Klimawandels gebotene Tempo des Energiesystemumbaus, welches die Umsetzung eines vorsorgeorientierten behutsamen Ausprobierens nur sehr bedingt zulässt. Deswegen ist zu erwarten, dass das gegenwärtige hohe Niveau an Versorgungssicherheit zumindest während der Phase der beschleunigten Transformation immer wieder Gefährdungen ausgesetzt sein wird. Dies wird momentan schon deutlich an der Zunahme der Redispatchmaßnahmen im Stromnetz, der Sicherung von Reservekapazitäten durch die Netzbetreiber, und einigen besonderen Vorfällen, wie dem Engpass bei der Versorgung von Süddeutschland mit Strom und Gas im Februar 2012 (vgl. Bundesnetzagentur 2012).

In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu klären, was vordringlich als erhaltenswert angesehen wird. Dies können in Anbetracht der notwendigen CO₂-Einsparungen sicherlich nicht die Strukturen und Prozesse des derzeitigen Energiesystems sein, sondern nur die von ihm bereit gestellten Leistungen, also die Versorgung mit Strom, Wärme und Kraftstoffen. Welche Qualitätsansprüche und Nebenbedingungen dabei an diese Dienstleistungen in Bezug auf technische, ökonomische, ökologische Kriterien gestellt werden, ist eine normative Frage, die gesellschaftlich diskutiert werden muss und von der Wissenschaft nur durch Beratung unterstützt werden kann (vgl. Gleich et al 2010a).

2.2 Mangelnder Umgang mit Unsicherheiten

Die Unsicherheiten über die Entwicklung des sozio-technischen Energiesystems im Zeitraum von Jahren und erst recht Jahrzehnten sind so groß, dass die Betrachtung nur weniger heute konsistent erscheinender Szenarien keine ausreichende Entscheidungsgrundlage für die Wahl eines Transformationspfads bietet.

Die Unsicherheiten über die Entwicklung des sozio-technischen Energiesystems beziehen sich u.a. auf die Entwicklung des Verbrauchs, den Umfang und die räumliche Verteilung des Ausbaus der verschiedenen Erzeugungskapazitäten, den Ausbau der Netze, die Kosten von Technologien, Roh- und Brennstoffen, den Klimawandel und die gesellschaftliche Akzeptanz von Technologien und Flächennutzungen. So sind sich z.B. die einschlägigen Studien uneinig, ob der Strombedarf und der Gaspreis in Deutschland steigt oder sinkt (vgl. Agentur für Erneuerbare Energien 2012a/b). Auch hat keine Studien von vor 2010 den massiven Zubau an Photovoltaik der letzten Jahre annähernd abgebildet (vgl. Quaschnig 2011).

Diese Unsicherheiten sind in erster Linie dadurch charakterisiert, dass die Wahrscheinlichkeit möglicher Entwicklungen nicht ansatzweise abschätzbar ist und die Unsicherheit auch nicht wesentlich reduziert werden kann (vgl. Stirling 2003). Als Konsequenz daraus ist keine klassische Risikoanalyse (Eintrittswahrscheinlichkeit multipliziert mit der potenziellen Schadenshöhe) möglich. Eine verbreitete Antwort darauf ist die Betrachtung einer überschaubaren Menge an explorativen Szenarien, die auf Basis von Konsistenz-, Robustheits- und Plausibilitätsüberlegungen ausgewählt werden (vgl. Börjeson 2006) und dadurch hauptsächlich auf dem gegenwärtigen Wissen fußen. Aber dies scheint nur bedingt angemessen, weil einerseits die Konsistenz bestimmter Szenarien ebenfalls irreduziblen Unsicherheiten unterliegt und andererseits eine geringe Anzahl von Szenarien kaum die Bandbreite der bestehenden Unsicherheiten abdecken kann.

Eine Ergänzung und ggf. sogar Alternative besteht in der Durchführung von Vulnerabilitätsanalysen (VA), welche im Kontext der Katastrophenforschung entwickelt wurden und im Rahmen der Klimafolgenforschung zu einer weit verbreiteten Anwendung gelangt sind. In einer VA werden die potentiellen Auswirkungen möglicher Störereignisse mit den für diesen Fall bestehenden Anpassungskapazitäten in Beziehung gesetzt (vgl. Adger 2006). Um sich dabei von den derzeit schon denkbaren bzw. erwartbaren Störereignissen zu lösen, sollten neben erwartbaren externen Gefährdungen („was-wäre-wenn?“) auch von Störimpulsen unabhängig strukturelle Schwachstellen von unter Druck geratenden Versorgungssystemen mit Blick auf mögliche interne Ausfälle betrachtet werden („fast-egal-was-kommt!“) (vgl. Gleich et al 2010a).

2.3 Vulnerabilität von Transformationspfaden

Bei der Transformation eines Systems sollte nicht nur die Vulnerabilität des Zielzustands, sondern auch die Vulnerabilität der dorthin führenden Wege untersucht werden.

Auch wenn vom Zielzustand einer Transformation gezeigt werden kann, dass seine Vulnerabilität geringer oder zumindest nicht größer als die des Ausgangszustands ist, muss dies nicht für die während der Transformation durchlaufenen Zustände gelten. Dabei spielt bei systemischen Innovationsprozessen wie der Energiewende, die sich nicht auf einzelne technische oder soziale Innovationen beschränken, eine wichtige Rolle, dass es schwierig ist, die zeitliche Parallelität der Transformation in verschiedenen Bereichen zu gewährleisten. Es sollten somit Transformationspfade angestrebt werden, die trotz des Eintretens von verzögernden oder den Pfad ändernden Störereignissen nicht zu einer übermäßig erhöhten Vulnerabilität führen.

Hierzu ein Beispiel: In der Vergangenheit konnte der Netzausbau in bestimmten Regionen auf Grund von Genehmigungsverfahren und Akzeptanzproblemen nicht Schritt halten mit dem vom EEG induzierten starken Ausbau von EE. Auch beim Ausbau der Offshore-Windkraft hat sich gezeigt, dass es viele Unsicherheiten über die Ausbaurate gibt (Netzanbindung, Wetterbedingungen, Finanzierung). Beim Transformationspfad „Offshore-Windkraft + Nord-Süd-Netztrassen“ bestehen also beidseitig hohe Unsicherheiten über die Geschwindigkeit der Verwirklichung. Gerät nun eins der beiden Ausbauprojekte stark in Verzug, liegt es nahe, dass die Anpassungskapazität deutlich geringer ist, als dies bei dem wesentlich flexibleren dezentralen Onshore-Wind-Ausbau in Kombination mit nur moderatem Netzausbau der Fall wäre. Dies soll kein generelles Argument gegen den Ausbau der Offshore-Windenergie sein, sondern nur die Problematik einer zu starken Fixierung darauf aufzeigen.

2.4 Vorbereitung auf Überraschungen

Es ist davon auszugehen, dass stets in Art oder Ausmaß unvorhergesehene Störereignisse (Überraschungen) auftreten. Diesen sollte mit heuristischen Prinzipien zur Vorsorge begegnet werden.

Ereignisse wie der Fall der Mauer, die Katastrophe von Fukushima, der Schiefergasboom in den USA oder der partielle Zusammenbruch des Bankensystems verdeutlichen dies auf globaler Ebene, selbst wenn der eine oder andere schon vorher etwas Derartiges ‚geahnt‘ haben mag. Auch die größeren Blackouts in Europa, z.B. im Münsterland 2005, kamen durch das unerwartete Zusammentreffen mehrerer Störereignisse und unvorhergesehene Verkettungen zu Stande (vgl. Birkmann et al 2010). Es ist davon auszugehen, dass auch der Klimawandel noch einige derartige Überraschungen in petto hat (vgl. Seneviratne 2012).

Im Nachhinein lassen sich meist vorangegangene Warnsignale für solche Extremereignisse identifizieren, was in jedem Fall nützlich zur Vorsorge ist. Trotzdem ist es wichtig festzuhalten, dass es immer in Art oder Ausmaß unvorhersehbare Störereignisse geben wird. Als Konsequenz daraus müssen im Sinne einer Umsetzung des Vorsorgeprinzips Formen eines adäquaten Umgangs mit Nichtwissen entwickelt und praktiziert werden. So sollten z.B. heuristische, also nur induktiv motivierte Prinzipien entwickelt werden, mit deren Hilfe negative Auswirkungen überraschender Ereignisse abgemildert und positive befördert werden können. In systemischen Innovationsprozessen können solche Heuristiken dann für die Formulierung von konkreten Gestaltungsleitbildern und abstrakteren Leitkonzepten genutzt werden. Solche Leitorientierungen dienen dazu, bestimmte Gestaltungsoptionen von vorn herein auszuschließen (z.B. wegen evtl. Nebenwirkungen) und andere als wünschenswert und realisierbar auszuzeichnen (vgl. Gleich et al 2010b).

Zur Umsetzung des Vorsorgeprinzips soll das Leitkonzept „Resiliente Systeme“ dienen. Unter Resilienz wird hierbei die Fähigkeit eines Systems verstanden, seine Dienstleistungen auch bei massiven äußeren Störereignissen und internen Ausfällen weiter erbringen zu können (vgl. Gleich et al 2010a). Resilienz wurde zwar ursprünglich von Holling (1973) als analytische Kategorie zur Bewertung der Stresstoleranz von Ökosystemen eingeführt, hat sich aber im Kontext des Managements sozio-ökologischer Systeme mehr und mehr zu einem normativen Leitkonzept entwickelt (vgl. Gleich et al 2010a).

Abstrakte Gestaltungselemente resilienter Systeme, wie Puffer, Redundanzen, Diversität und dämpfende Rückkopplungen, sind aus der Analyse von Ökosystemen, in denen diese teilweise über Millionen von Jahren erprobt sind, abgeleitet worden (vgl. Brand 2005). Bei der Übertragung auf sozio-technische Systeme wie das Energiesystem stellt sich dann aber die Frage nach dem Nachweis der Nützlichkeit einerseits und Art und Umfang der Umsetzung solcher Leitkonzepte andererseits. Hierzu bedarf es zunächst wissenschaftlicher Argumente, für die tatsächliche Umsetzung dann auch einer ökonomischen Rechtfertigung.

2.5 Reduktion von Wissensanforderungen

Es gibt Gestaltungsprinzipien für Infrastrukturen, welche als Vorsorge für das Auftreten unvorhergesehener Störereignisse dienen und dadurch die Wissensanforderungen an das Auftreten von Störereignissen reduzieren sollen. Heuristisch evaluiert werden kann dies durch systematische Überschreitung der bekannten Unsicherheitsbereiche.

Die Gestaltung von sozio-technischen Systemen hat einen Einfluss auf die Wissensanforderungen in Bezug auf die verlässliche Erbringung seiner Dienstleistungen. Ein stark idealisiertes aber instruktives Beispiel ist das folgende: Angenommen, in einem modular aufgebauten System können zwei unterschiedliche Technologien die gleiche Dienstleistung zu den gleichen Kosten erbringen. Dann ist bei einem parallelen Einsatz beider Technologien, um einen vollständigen Ausfall zu vermeiden, nur noch Wissen über diejenigen (Kombinationen von) Störereignissen notwendig, welche beide Technologien zugleich lahm legen. Die breite Anwendbarkeit so gearteter Gestaltungsprinzipien auf das Energiesystem wurde schon von Kahn (1978) und Lovins und Lovins (1981) diskutiert.

Einige solcher Prinzipien sind schon in die heutige Infrastruktur integriert (vgl. Lenz 2009). Tatsächlich ist der flexible und an dynamischer Stabilität orientierte Stromnetzbetrieb in bestimmter Hinsicht darauf ausgelegt mit unerwarteten Störereignissen umzugehen (vgl. Leyens et al 2012). Es wird dabei nicht davon ausgegangen, dass Störungen vorhergesehen oder komplett vermieden werden können, sondern es wird auf Reservekapazitäten, Speicher und Lastmanagement gesetzt. Die Anwendung solcher Gestaltungsprinzipien soll kein Ersatz dafür sein, dass bei der Planung von Infrastruktur möglichst detaillierte Abschätzungen und Simulationen erfolgen und Vorkehrungen zur Vermeidung von Ausfällen getroffen werden.

Wenn es solche Gestaltungsprinzipien gibt, sollten sie auch hilfreich für den Umgang mit den bekannten Unsicherheiten und den denkbaren Störereignissen sein. Dies kann mit einer Vulnerabilitätsanalyse belegt werden. Dabei sollte möglichst mehr als die bekannte Bandbreite an unsicheren Rahmenbedingungen in Betracht gezogen werden, um zumindest heuristisch zu untermauern, dass eine Vorbereitung auf das Auftreten unvorhergesehener Ereignisse erfolgt.

2.6 Gestaltung gekoppelter Infrastrukturen

Um mit unerwarteten Störereignissen in adäquater Weise umgehen zu können, ist bei der Kopplung sowohl räumlich getrennter als auch verschiedenartiger Infrastruktursysteme eine starre Abhängigkeit soweit wie möglich zu vermeiden. Weder eine stark zentralisierte noch eine stark dezentralisierte Versorgung erscheinen dafür als geeignet.

Es ist derzeit sehr umstritten, wo die richtige Balance zwischen Dezentralität und Zentralität beim Umbau des Energiesystems liegt. Dies betrifft einerseits die Größe und den Standort der Erzeugungsanlagen. Dem Konzept eines (pan-)europäischen Supergrid mit Offshore-Windparks in der Nordsee, Pumpspeichern in Norwegen und Wind- und Solarparks in Nordafrika steht das Konzept der regionalen Selbstversorgung mit Wind-, Solar- und Bioenergie gegenüber (vgl. Groscurth und Bode 2012). In der Vergangenheit haben das nationale und das europäische Übertragungsnetz vor allem dem optionalen bidirektionalen Ausgleich zwischen den Regionen gedient. Mit den im Netzentwicklungsplan vorgesehenen HGÜ-Leitungen von Nord nach Süd ändert sich das grundlegend (vgl. Schucht et al 2012). Noch stärker erodieren könnte dies im Zuge der Umsetzung der Planungen für ein europäisches Supergrid in Verbindung mit einer Erzeugung von Wind- und Solarenergie an den günstigsten Standorten. Andererseits geht es um die Art der Steuerung und Regelung von Erzeugung, Verteilung und Verbrauch und um die Entscheidungshoheit darüber. Stark vereinfacht ist die Frage, ob die Steuerung und Regelung von Erzeugung, Verteilung und Verbrauch eher subsidiär und Bottom-up (He et al 2008) oder Top-down (vgl. Appelrath et al 2012) erfolgen sollen.

Weiterhin dreht sich eine Debatte um die Kopplung zwischen verschiedenen Energieinfrastrukturen (Elektrizität, Gas und Wärme/Kälte), sowie um die Kopplung von Energieinfrastrukturen

(Übertragungs- und Verteilnetze) mit Informations- und Kommunikationsnetzen (vgl. Appelrath et al 2013). Diese Kopplungen bieten Chancen für den Erhalt der Versorgungssicherheit auch bei stark fluktuierender Erzeugung. Es besteht dabei aber auch die Gefahr einer Komplexitätsfalle (vgl. Appelrath et al 2012), und es entstehen grundsätzliche Risiken durch gegenseitige Abhängigkeiten (vgl. Birkmann et al 2010). Ein permanenter Einsatz von Strom für die Wärme- und Treibstoffversorgung kann beispielsweise zu einer massiven Abhängigkeit in der Versorgung mit den verschiedenen Gütern führen, wie dies bei der strombasierten Wärmeversorgung in Frankreich zu beobachten ist.

Die permanente Nutzung der Kopplung von Infrastrukturen geht mit einer Abhängigkeit zwischen den gekoppelten Systemen einher, die sich unter Umständen selbst verstärkt. Die Auswirkungen nicht-vorhersehbarer Störereignisse können sich dann weiter ausbreiten und gehen potentiell mit höheren Schäden einher. Eine nur optionale Kopplung sorgt hingegen dafür, dass Störungen an der Ausbreitung gehindert werden können. Perrow (1987) unterscheidet bezüglich der Kopplung von verschiedenen Systemen oder den Elementen eines Systems zwischen losen und engen Kopplungen, wobei dies streng genommen ein fließender Übergang ist. Bei engen Kopplungen wirkt sich der Zustand des einen Systems unmittelbar auf das andere aus. Im Gegensatz zu lose gekoppelten Systemen bestehen keine Möglichkeiten zur Änderung des Ablaufs, jeglicher Umgang mit Störfällen muss vorgeplant sein.

Ein Großteil der Prinzipien zur resilienten Gestaltung von kritischen Infrastrukturen lässt sich in diesem Kontext deuten. So gibt es einige Prinzipien, die darauf abzielen die Starrheit von Kopplungen sowohl räumlich getrennter als auch verschiedenartiger Infrastruktursysteme zu reduzieren und diese Kopplungen soweit wie möglich optional zu gestalten. Dazu zählt beispielsweise die Kombination aus der Ausschöpfung der lokal vorhandenen Ressourcen und der Integration von Pufferkapazitäten. Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass sich dadurch alle Kopplungen lose gestalten lassen. Genau genommen ergibt sich aus der Festlegung des räumlichen Systemumfangs eine Zeitskala, auf der das System bei entsprechender Gestaltung ohne Rückgriff auf angekoppelte Systeme auskommen, sich also selbst versorgen kann. Daher sind weitere Prinzipien nötig, die dafür sorgen sollen, dass der Rückgriff auf die optionalen Kopplungen bei Bedarf auch tatsächlich möglich ist. Dazu dienen beispielsweise die redundante und diversifizierte Auslegung von Kopplungen an andere Systeme und ihr zeitlich entsprechend getaktetes Monitoring. Im Kontext von Energieinfrastrukturen ist eine natürliche Skala durch den Umfang von Verteilnetzen gegeben, wobei sich diese regional sehr unterschiedlich gestaltet.

Dabei gibt es Trade-Offs zwischen der Verbesserung der Selbstversorgung, die eher dezentral orientiert ist, und der eher zentral verwirklichtbaren Stärkung der Kopplungen. Noch Klärungsbedarf besteht auch in Bezug auf eine Bewertung der Konflikte zwischen effizienten und resilienten Lösungen, z.B. in Bezug auf ein sinnvolles Maß an Redundanzen im System, und in Bezug auf die jeweiligen Verantwortlichkeiten, auch auf entsprechende Strukturen hinzuwirken. Diesbezüglich sollte jeweils eine Balance angestrebt werden, welche die jeweiligen Kosten und die denkbaren Versorgungsengpässe ins Verhältnis setzt. Darüber hinaus bedarf es aber auch Prinzipien, um im Fall des Versagens sowohl der Eigenversorgung als auch der Kopplungen zumindest eine Minimalversorgung zu ermöglichen und die reguläre Versorgung möglichst schnell wiederherzustellen, z.B. Notfallreserven und Backup-Systeme, aber auch Pläne für einen Schwarzstart.

3 Quellenverzeichnis

- Adger, W. N. (2006): Vulnerability. *Global Environmental Change* 16 (3):268-281.
- Agentur für Erneuerbare Energien (2012a): Studienvergleich. Entwicklung des Energieverbrauchs in Deutschland: Primärenergie, Endenergie, Strom. http://www.energiestudien.de/uploads/media/AEE_Dossier_Studienvergleich_Energieverbrauch_apr12.pdf [zuletzt abgerufen am 07.01.2014].
- Agentur für Erneuerbare Energien (2012b): Studienvergleich: Annahmen zur Entwicklung der Importpreise für fossile Brennstoffe: Rohöl, Erdgas, Steinkohle. http://www.energiestudien.de/uploads/media/AEE_Dossier_Studienvergleich_Brennstoffpreise_aug12_02.pdf [zuletzt abgerufen am 07.01.2014].
- Appelrath, H.-J., Kagermann, H., Mayer, C. (2012): Future Energy Grid - Migrationspfade ins Internet der Energie. acatech, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, acatech-Studie 11/2012.
- Appelrath, H.-J., Lehnhoff, S., Rohjans, S., König, A. (2013): Hybridnetze für die Energiewende - Forschungsfragen aus Sicht der IKT. acatech, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, acatech MATERIALIEN, 1/2013.
- Birkmann, J.; Bach, C.; Guhl, S.; Witting, M.; Welle, T.; Schmude, M. (2010): State of the Art der Forschung zur Verwundbarkeit Kritischer Infrastrukturen am Beispiel Strom /Stromausfall. Forschungsforum Öffentliche Sicherheit. Schriftenreihe Sicherheit Nr. 2.
- Börjeson L, Höjer M, Dreborg KH, Ekvall T, Finnveden G (2006) Scenario types and techniques: Towards a users guide. *Futures* 38:723–739.
- Brand, Fridolin (2005). Ecological resilience and its relevance within a theory of sustainable development. UFZ Centre for Environmental Research, Leipzig.
- Bundesnetzagentur (2012): Bericht zum Zustand der leitungsgebundenen Energieversorgung im Winter 2011/12, http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1912/DE/Allgemeines/DieBundesnetzagentur/Publicationen/Berichte/berichte-node.html [zuletzt abgerufen am 17.07.2013].
- Gleich, A. von; Gößling-Reisemann, S.; Stührmann, S.; Woizescke, P. (2010a): Resilienz als Leitkonzept – Vulnerabilität als analytische Kategorie. In: Fichter, K.; Gleich, A. von; Pfriem, R.; Siebenhüner, B. (Hg.) (2010): Theoretische Grundlagen für erfolgreiche Klimaanpassungsstrategien. nordwest2050-Berichte 1, Bremen/Oldenburg.
- Gleich, A. von; Brand, U.; Stührmann, S.; Gößling-Reisemann, S.; Lutz-Kunisch, B. (2010b): Leitorientierte Technologie- und Systemgestaltung. In: Fichter, K., Gleich, A. von, Pfriem, R., Siebenhüner, B. (Hrsg.): Theoretische Grundlagen für erfolgreiche Klimaanpassungsstrategien. nordwest2050-Berichte 1, Bremen/Oldenburg.
- Gößling-Reisemann, S., Stührmann, S., Wachsmuth, J., von Gleich, A. (2013). Vulnerabilität und Resilienz von Energiesystemen. In J. Radtke, B. Hennig (Ed.), Die deutsche „Energiewende“ nach Fukushima – Der wissenschaftliche Diskurs zwischen Atomausstieg und Wachstumsdebatte, Marburg: Metropolis-Verlag.

- Groscurth, H.-M., Bode, S. (2012): Zielkonflikte in der Stromerzeugung im Kontext der Energiewende, arrhenius Institut für Energie- und Klimapolitik, Discussion Paper 7, Hamburg.
- Hellige, H.-D. (2013) Transformationen und Transformationsblockaden im deutschen Energiesystem. Eine strukturgenetische Betrachtung der aktuellen Energiewende, in: Jörg Radtke, Bettina Hennig (Hrsg.): Die Energiewende nach Fukushima. Beiträge aus der Wissenschaft. Metropolis Verlag, Marburg.
- He, M., Reutzel, E.M., Jiang, X., Katz, R.H., Sanders, S.R., Culler, D.E., Lutz, K. (2008): An Architecture for Local Energy Generation, Distribution, and Sharing, IEEE Energy2030 Conference Proceedings.
- Holling CS (1973) Resilience and stability of ecological systems. Annual Review in Ecology and Systematics 4:1–23.
- Kahn, E (1978) Reliability planning in distributed electric energy systems, Energy & Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory.
- Lempert RJ, Popper SW, Bankes SC (2003) Shaping the Next One Hundred Years: New Methods for Quantitative, Long-Term Policy Analysis. MR-1626-RPC. Santa Monica, CA: RAND Corporation.
- Lenz, S. (2009): Vulnerabilität Kritischer Infrastrukturen. Forschung im Bevölkerungsschutz Band 4.
- Leyens, D.; Engelhard, P.; Reck, H. (2012): Klimaanpassung in der Energiewirtschaft, Energiewirtschaftliche Tagesfragen 9/2012, S. 50 ff.
- Lovins, A. B.; Lovins L. H. (1982): Brittle power: Energy strategy for national security. Brick house Publishing Company, Andover.
- Quaschnig, V. (2011): Wie viel Solarstrom brauchen wir? Sonne, Wind & Wärme 03/11, 26-28.
- Perrow, C. (1988): Normale Katastrophen. Die unvermeidlichen Risiken der Großtechnik. Campus, Frankfurt/New York.
- Schucht, B. et al. (2012): Netzentwicklungsplan Strom 2012, 2. überarbeiteter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber, 50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; TenneT TSO GmbH; TransnetBW GmbH, <http://www.netzentwicklungsplan.de/content/netzentwicklungsplan-2012-2-entwurf> [zuletzt abgerufen am 30.9.2012]..
- Seneviratne, S.I., Nicholls, D. Easterling, C.M. Goodess, S. Kanae, J. Kossin, Y. Luo, J. Marengo, K. McInnes, M. Rahimi, M. Reichstein, A. Sorteberg, C. Vera, and X. Zhang (2012): Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109-230.
- Stirling, A (2003) Risk, uncertainty and precaution: Some instrumental implications from the social sciences, in Scoones I, Leach M, Berkhout F (ed.): Negotiating change: Perspectives in environmental social science, London.