



Manfred Rübner

Silke Scheerer · Ulrich van Stipriaan (Herausgeber)

Festschrift
zu Ehren von
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h.
Manfred Curbach

Dresden, 28. September 2016

Impressum

Herausgeber	Silke Scheerer, Ulrich van Stipriaan
Redaktion	Silke Scheerer
Autorenfotos	<i>Fotostudio Jünger</i> S. 124 oben
	<i>Edvard Krikourian</i> S. 124 unten rechts
	<i>Kirsten J. Lassig</i> S. 12
	<i>Bertram Lubiger</i> S. 192
	<i>Juri Paulischkis</i> S. 104
	<i>A. T. Schaefer, Stuttgart</i> S. 62
	<i>Sylke Scholz, Dresden</i> S. 256
	<i>Ulrich van Stipriaan</i> S. 80, 90, 104, 124 Mitte rechts, 146, 150, 152, 160, 216, 228, 234 Mitte links und unten links/rechts, 292, 320
	<i>Nic Vermeulen</i> S. 280
	<i>Irina Westermann</i> S. 42 oben
	Von Autoren zur Verfügung gestellt: S. 16, 24, 42 unten, 124 (2x), 178, 234 (3x)
Layout, Satz	Ulrich van Stipriaan
Titelbild	Ulrich van Stipriaan
Korrektur	Birgit Beckmann, Angela Heller
Druck	addprint AG, Bannewitz

Redaktionsschluss für dieses Buch war der 28. August 2016.

Inhalt

<i>Silke Scheerer, Ulrich van Stipriaan und Wolfgang Leiberg</i>	
Zum Geleit	8
Teil I – Texte zum Kolloquium	11
<i>Hans Müller-Steinhagen</i>	
Grußwort	12
<i>Harald Budelmann</i>	
Laudatio	16
<i>Konrad Bergmeister</i>	
Weniger ist manchmal mehr – ein Beitrag zur Mindestbewehrung	24
<i>Harald S. Müller und Michael Haist</i>	
Opus Caementitium Optimum – Der nachhaltige Beton des 21. Jahrhunderts	42
<i>Werner Sobek</i>	
Über die Gestaltung der Bauteilinnenräume	62
Teil II – Weitere Beiträge	79
<i>Thomas Bösche</i>	
Mehr Mut im Ingenieurbau.....	80
<i>Harald Budelmann und Sven Lehmberg</i>	
Von der Küchenarbeitsplatte zum leichten Tragwerk – Was kann ultrahochfester faserverstärkter Feinkornbeton?	90

<i>Luna Manolia Daga und Udo Wiens</i>	
Mehr als nur schwarze Buchstaben auf weißem Papier – Ein Essay	104
<i>Ulrich Häußler-Combe</i>	
Aspekte der Modellierung von Stahlbetontragwerken	108
<i>Josef Hegger, Norbert Will, Rostislav Chudoba, Alexander Scholzen und Jan Bielak</i>	
Bemessungsmodelle für Bauteile aus Textilbeton	124
<i>Frank Jesse</i>	
Über die Länge der Leine	146
<i>Peter Mark</i>	
Mit Leichtigkeit	150
<i>Steffen Marx</i>	
Gute Lehre im Konstruktiven Ingenieurbau	152
<i>Viktor Mechtcherine</i>	
Hochduktiler Beton – eine Konkurrenz zu Textilbeton?	160
<i>Karl Morgen</i>	
Deutschlands größte Kamera	178
<i>Peter Offermann</i>	
Wie alles begann	188
<i>Dirk Proske</i>	
Ist die Energiewende ein technischer Hype?	192
<i>Mike Schlaich</i>	
Die Hommage als Quelle der Inspiration	216

<i>Jürgen Schnell</i>	
Fashion Statement	228
<i>Mario Smarslik, Christoph Kämper, Patrick Forman, Tobias Stallmann, Peter Mark und Jürgen Schnell</i>	
Topologische Optimierung von Betonstrukturen	234
<i>Jürgen Stritzke</i>	
Leipziger Großmarkthalle – ein „Historisches Wahrzeichen der Ingenieurbaukunst in Deutschland“	256
<i>Luc Taerwe</i>	
Self-anchored suspension bridges with prestressed concrete deck: historic examples	280
Teil III – Institut für Massivbau	291
<i>Silke Scheerer (Text) · Ulrich van Stipriaan (Fotos)</i>	
Massivbau an der TU Dresden gestern und heute	292
<i>Angela Schmidt</i>	
Die eingeschlichenen Fehler	320
<i>Manfred Curbach</i>	
Habilitation / Promotionen	326
<i>Ulrich van Stipriaan (Fotos)</i>	
Institut für Massivbau Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter	330

Teil II
Weitere Beiträge



Dirk Proske

Ist die Energiewende ein technischer Hype?

Dr.-Ing. Dirk Proske

Dirk Proske war von 1996 bis 2005 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau bei Prof. Manfred Curbach. Bereits in seiner Diplomarbeit befasste er sich mit der Sicherheit von Bauwerken. Dieses Thema setzte er mit seiner Promotion zur Standsicherheit von Brücken bei Schiffsanprall fort. Heute arbeitet er im Bereich Risikobewertung in der Energiewirtschaft.

1 Motivation und Einleitung

Im Jahre 2016 jährte sich die Katastrophe im Kernkraftwerk Tschernobyl zum 30. Mal und im Kernkraftwerk Fukushima Daiichi zum fünften Mal. Nach dem Ereignis in Fukushima wurden in Deutschland weltweit einzigartige politische und wirtschaftliche Entscheidungen getroffen, wie die sofortige Stilllegung von acht Kernkraftwerken oder die verstärkte Umsetzung der Energiewende. Der Zeitraum von fünf Jahren erlaubt eine erste Bewertung der damaligen Entscheidungen. Dazu wird zunächst die Stromerzeugung durch Kernenergie mit der Stromerzeugung durch neue erneuerbare Energien hinsichtlich verschiedener Eigenschaften wie Risiken oder Kosten verglichen. Der Beitrag diskutiert anschließend, ob die Energiewende, aber auch die Einführung der Kernenergie die Eigenschaften eines Hypes erfüllen. Unter dem Hype einer neuen

Technologie versteht man die systematische Überschätzung der Möglichkeiten dieser Technologie.

*

Seit dem Beginn der Menschheit spielen technische Erfindungen zum Schutz von Menschen und zur Verbesserung der Lebensbedingungen, wie Gebäude, Transportmittel (Rad, Boot) und Energie (Feuer), eine große Bedeutung. Technik, das heißt die bewusste Anwendung von Naturgesetzen, ist heute essentieller Bestandteil unserer Lebenswelt. Wir brauchen nur zu überlegen, wie viele Stunden des Tages wir in Gebäuden zubringen, vor einem Computer sitzen, telefonieren, Auto fahren oder, eigentlich ganz profan, wie viele Stunden am Tag wir Kleidung nutzen, die durch technische Prozesse hergestellt wurde. Technische Prozesse benötigen aber Energie.

Der Mensch hat seit seinem Ursprung von Pflanzen und Tieren gelebt. Er hat sie als Nahrung, Kleidung, Brennstoff und für den Bau von Unterkünften verwendet. Die Nutzung des Feuers als erste neue Technologie zur Energieerzeugung ist wahrscheinlich seit mehreren hunderttausend Jahren möglich [1], [2], die Zündung von Feuer wahrscheinlich erst seit über 30.000 Jahren. Von der Eiszeit bis zur Zeit der Han-Dynastie oder des Römischen Reiches stieg der Energieverbrauch pro Person sehr moderat um einen Faktor sieben bis acht. Etwa um das Jahr 1000 wurden in China die Grenzen der organischen Ökonomie sichtbar, als China in Kaifeng kurz vor der industriellen Revolution stand und der Übergang in die Epoche der fossilen Brennstoffe begann [3]. Natürlich hatten die Menschen bereits lange davor die Nutzung der Energie von Wind und Wasser in Form von Segelschiffen und Mühlen erlernt, aber die fossilen Brennstoffe erlaubten eine völlig neue Qualität, die später in Europa zur industriellen Revolution mit einem exponentiellen Wachstum der Energie, der Menschen und der Güter führte. Auch wenn heute von politischer Seite eine Begrenzung des Wachstums des Energieverbrauches angestrebt wird, geht man davon aus, dass in naher Zukunft der Energieverbrauch weltweit weiter ansteigen wird [4].

Und auch für die ferne Zukunft wird das Wachstum der verfügbaren und der kontrollierbaren Energie als Zeichen für den Entwicklungsstand von Gesellschaften angesehen, wie die Kardaschow-Skala

für die Einteilung von extraterrestrischen Zivilisationen zeigt [5].

Die Bereitstellung von Energie, sei es in Form von Wärme, Strom oder Treibstoff, ist die Grundlage für ein menschliches Leben, wie wir es kennen. Fossile Rohstoffe sind der Motor unserer Lebenswelt, auch heute noch. Sie besitzen aber leider verschiedene Nachteile. Vor über 50 Jahren trat die Nuklear-technik an, diese Probleme ein für allemal zu lösen. Nicht zum ersten Mal musste die Menschheit erleben, dass endgültige Lösungen nur über eine begrenzte Haltbarkeit verfügen.

2 Kernenergie

2.1 Einleitung und Geschichte

Anfang der 1950er Jahre hielt US-Präsident Eisenhower seine berühmte Rede zur Einführung der friedlichen Nutzung der Kernenergie [6]. Damals wurde diese Technologie von einer Euphorie getragen: Es gab Ideen, Schiffe, Autos, Flugzeuge, Raumschiffe oder Leuchttürme mit nuklearen Antrieben und Stromversorgungen auszustatten [6], [7]. Noch Anfang der 1960er Jahre plante man die Platzierung von Kernkraftwerken direkt in Städten [8].

Die Vorteile der Technologie schienen überwältigend: eine sehr hohe Energiedichte und damit verbunden ein sehr geringer Massetransport. Theoretisch entspricht die freigesetzte Energie bei der Kernspaltung eines Kilogramms Uran der

*Bei der Einführung
der friedlichen
Nutzung der
Kernenergie wurde
diese Technologie
von einer Euphorie
getragen*

„Der Naturschutzrat warnt eindringlich vor den Gefahren der Luftverunreinigung durch thermische Kraftwerke und unterstützt ... den Schritt zur Gewinnung von Atomenergie ...“

Verbrennung von 3.000 Tonnen Steinkohle. Ein Reaktor konnte einmal im Jahr, einmal in mehreren Jahren oder nur einmal zu Beginn seiner Nutzung mit Brennstoff beladen werden. Raumsonden wie Voyager zeigen die Funktionstüchtigkeit über Jahrzehnte.

Die Technologie stellte eine Lösung für die damals problematische Luftverschmutzung dar. So plante die Schweizer Firma NOK Anfang der 1960er Jahre die Errichtung eines ölbetriebenen Kraftwerkes. Der Schweizer Naturschutzrat sprach sich jedoch im Dezember 1965 mit folgenden Worten dagegen aus: „Der Naturschutzrat warnt eindringlich vor den Gefahren der Luftverunreinigung durch thermische Kraftwerke und unterstützt die vom Bundesrat mehrfach zum Ausdruck gebrachte Auffassung, direkt den Schritt zur Gewinnung von Atomenergie zu tun, ... “ [9]. Deshalb entschied man sich für den vom Naturschutzrat und der Politik gewünschten Kraftwerkstyp: ein Kernkraftwerk [10].

Sogar schon zehn Jahre zuvor, 1955, wurde in Deutschland ein Bundesministerium für Atomfragen gegründet. Das erste Atomgesetz trat dort 1960 in Kraft. 1968 ging das Kernkraftwerk Obrigheim in Betrieb und das Atomschiff Otto Hahn lief aus. 1967 begann ein Versuchsprogramm zur Einlagerung von radioaktiven Abfällen in das Salzbergwerk Asse. 1971 sollte die Endlagerung von radioaktiven Abfällen im Endlager Morsleben beginnen.

Die Ölkrise trieb die Entwicklung und den Bau von Kernkraftwerken, politisch gefördert und später auch wirtschaftlich erfolgreich, voran. Gleichzeitig begann Mitte der 1970er Jahre der Widerstand gegen die Nutzung der Kernenergie. Nicht nur verschiedene wissenschaftliche Studien, wie z. B. die WASH-1400-Studie [11], sondern auch verschiedene Unfälle an Forschungsreaktoren oder Experimente mit extremen Leistungsexkursionen, wie z. B. am BORAX-Reaktor (Idaho National Laboratory, USA) im Juli 1954, zeigten die dieser Technologie innewohnenden Risiken. Damals, Ende der 1960er, Anfang der 1970er Jahre, begann sich ein politischer Widerstand gegen die neue und vielversprechende Technologie zu entwickeln [12]. Aber woher kommen die Risiken dieser Technologie?

2.2 Sicherheit und Risiken

In den Reaktoren von Kernkraftwerken findet eine unglaublich große Anzahl von Kernspaltungen statt ($> 10^{20}$ Kernspaltungen pro Sekunde). Dabei wird Masse in Energie umgewandelt. Dies führt zu einer außerordentlich hohen Energiedichte und zu einer extrem großen Menge radioaktiven Materials. Mit der Inkorporation des radioaktiven Materials eines Kernreaktors könnte man große Teile der Weltbevölkerung vergiften. Deshalb muss dieses Material unter allen Umständen eingeschlossen bleiben. In Tschernobyl und Fukushima gelang dies leider nicht.

Normalerweise wird der Einschluss des radioaktiven Materials über ein gestaffeltes Barrierekonzept sichergestellt. Dieses Konzept umfasst die Brennstoffpellets, die Brennstäbe, den Reaktor und das Containment. Leider reicht dies allein nicht aus, da man einen Kernreaktor nicht einfach abschalten und sich selbst überlassen kann: er erzeugt Nachwärme. Führt man diese Nachwärme nicht ab, werden die Barrieren über kurz oder lang alle durchbrochen. Diese Aussage gilt praktisch für alle bestehenden kommerziellen Reaktoren. Da Wasser, neben zahlreichen weiteren Vorteilen, eines der besten Wärmetransportmittel ist, wird die Nachwärme über Wasserkreisläufe mit Wärmetauschern, also mit Materialbarrieren, abtransportiert. Dies muss zunächst im Reaktor, später im Brennelementlagerbecken über mehrere Jahre erfolgen, danach ist eine Luftkühlung der Brennelemente ausreichend. Die erforderliche Wassermenge zur Kühlung liegt ein paar Tage nach Abschaltung eines Reaktors in der Größenordnung von einigen Litern pro Sekunde.

Wie bereits erwähnt, besteht das finale Sicherheitsziel eines Kernkraftwerkes im Einschluss des radioaktiven Materials. Da die Barrieren ohne eine ausreichende Kühlung beschädigt werden, ist ein weiteres Sicherheitsziel die Gewährleistung der Kühlung, meistens durch den ausreichenden An- und Abtransport von Wasser. In Fukushima konnte dieses Ziel zwar am Anfang erfüllt werden, aber nach Ausfall der Batterien zur Steuerung der

dampfgetriebenen Kühlsysteme gelang es nicht mehr. Als drittes Sicherheitsziel muss natürlich die Reaktivität des Reaktors, also die Anzahl der Kernspaltungen, kontrollierbar und begrenzt sein. Ein Beispiel für ein solches Versagen ist Tschernobyl.

Die beiden Katastrophen in Tschernobyl und Fukushima zeigen die Konsequenzen der unkontrollierten Freisetzung radioaktiven Materials: den Verlust riesiger Flächen für die menschliche Nutzung über große Zeiträume, den Verlust der Infrastruktur in diesen Gebieten, die gesundheitliche Beeinträchtigungen für die exponierte Bevölkerung, sei es direkt aus der Strahlenbelastung oder in Form von Stress durch den Verlust der Heimat oder der Arbeit.

Neben diesen beiden Unfällen gab es weitere Unfälle mit Kernschmelzen, z. B. beim Versuchsatomkraftwerk Lucens (Schweiz) 1969, oder Teilkernschmelzen. Bei solchen Kernschmelzen werden die Barrieren Pellets und Brennstäbe durchbrochen. Wenn allerdings die anderen Barrieren aufrechterhalten werden, wird eine Freisetzung vermieden.

Die Sicherheit von Kernkraftwerken kann man heute in Form von Kernschadenshäufigkeiten und Freisetzungshäufigkeiten praktisch für alle Kraftwerke angeben. Eine Definition von Kernschadenshäufigkeiten findet sich z. B. in [13], für Freisetzungshäufigkeiten in [14].

*Die beiden
Katastrophen in
Tschernobyl
und Fukushima
zeigen die
Konsequenzen der
unkontrollierten
Freisetzung
radioaktiven
Materials*

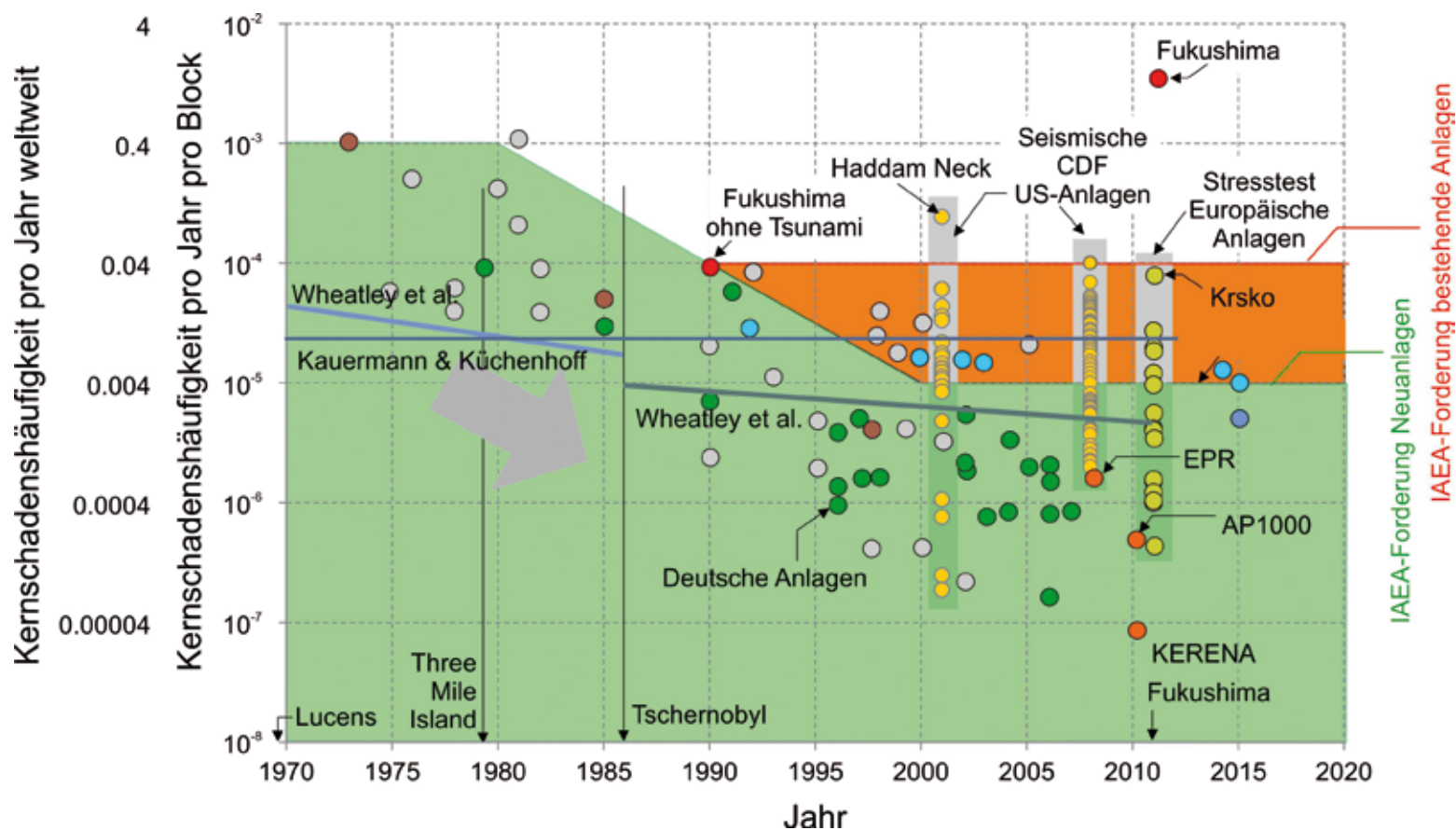


Bild 1

Kernschadenshäufigkeiten gemäß probabilistischer Sicherheitsanalysen und gemäß Statistik [17]–[20]

(Grafik: Dirk Proske)

In Bild 1 ist die zeitliche Entwicklung der Kernschadenshäufigkeiten für verschiedene Kernkraftwerke nach verschiedenen Quellen aufgetragen. Man erkennt im Bild deutlich, dass die Kernschadenshäufigkeiten Anfang der 1970er Jahre im Vergleich zu den heutigen Werten viel größer, teilweise

bei bis zu 1 % pro Jahr, lagen. Je nach Anlage geht man davon aus, dass die Freisetzungshäufigkeit von radioaktivem Material zwischen einem Drittel bis einem Zehntel der Kernschadenshäufigkeit liegt, denn nicht jede Kernschmelze führt zu einer Freisetzung. Trotzdem wird klar: sowohl die Kern-

schadenshäufigkeiten als auch die Freisetzungshäufigkeiten waren bei den damaligen Kraftwerken viel zu hoch. Dass die frühen Anlagen in ihrem ursprünglichen Design unsicherer waren, ist übrigens kein Geheimnis. So wies eine Schlagzeile in einer Schweizer Zeitung am 26. Oktober 1986 darauf hin, dass ein älteres Schweizer Kernkraftwerk ca. 100-mal unsicherer sei als ein neueres Schweizer Kernkraftwerk.

Viele Kernkraftwerke weltweit haben deshalb in den vergangenen Jahrzehnten erhebliche Mittel in die Erhöhung der Sicherheit der Anlagen gesteckt – manchmal mehr Geld, als der ursprüngliche Neubau gekostet hat. In manchen Ländern rechnet man mit etwa 100 Millionen Euro Investitionen für die Senkung der Kernschadenshäufigkeit um 1×10^{-6} pro Jahr. Verwendet man Lebensqualitätsparameter für die Ermittlung der notwendigen Investitionskosten, wie z. B. in [15] oder [16] vorgestellt, erhält man für die Ende der 1960er, Anfang der 1970er Jahre erbauten Anlagen nicht selten ca. 1 Milliarde Euro pro Anlage. Diese Summen wurden teilweise auch tatsächlich investiert.

Beispielhaft wurden in Deutschland bestehende Anlagen nach Tschernobyl, soweit noch nicht vorhanden, mit gefilterten Druckentlastungsanlagen ausgerüstet. Je nach Anlage funktionieren diese passiv und können erhebliche Mengen des radioaktiven Jods und Cäsiums bei einer Freisetzung auswaschen. Rechnungen belegen, dass bei einer

Kernschmelze mit Freisetzung über eine solche gefilterte Druckentlastung nur noch wenige Quadratkilometer kontaminiert werden. Seit über 25 Jahren liegt das technische Wissen vor. Unglücklicherweise wurde dieses Wissen beim Kernkraftwerk Fukushima nicht genutzt. Zwar hatte Japan trotz der Katastrophe großes Glück, dass der Westwind erhebliche Mengen der Freisetzung aufs Meer trug, aber die Nutzung einer gefilterten Druckentlastung hätte die Menge der Freisetzung und die Größe der kontaminierten Flächen erheblich verringert.

Betrachtet man noch einmal Bild 1, so muss man leider erkennen, dass auch im Jahre 2000 noch Anlagen mit einem erheblichen Risiko in Betrieb waren. Das Bild zeigt z. B. die bedenkliche seismische Kernschadenshäufigkeit des Kraftwerkes Haddam Neck (Connecticut), welches inzwischen stillgelegt wurde. Bild 1 zeigt auch, dass eine falsche Berechnung der Kernschadenshäufigkeit, wie bei Fukushima mit und ohne Berücksichtigung eines Tsunami, eine falsche Sicherheit vortäuschen kann.

2.3 Wahrnehmung der Sicherheit

Die empfundene Sicherheit kann sich aber deutlich zu dem im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Sicherheitsparameter unterscheiden. Solche Unterschiede können sowohl zeitlich oder territorial als auch individuell, gesamtgesellschaftlich oder medial auftreten. Kepplinger und Lemke [21] weisen z. B. auf systematische Unterschiede bei der

*Eine falsche
Berechnung der
Kernschadens-
häufigkeit
kann eine falsche
Sicherheit
vortäuschen*

Ursächlich für die Unfälle ist nicht die Kernkraftwerkstechnik selbst, sondern die Verleugnung des Standes von Wissenschaft und Technik...

Berichterstattung über Fukushima in den Medien in Deutschland, der Schweiz, England und Frankreich hin. Sie zeigen, dass die Unterschiede sowohl Umfang der Berichterstattung als auch Wichtung der Themen und Meinung der Journalisten und ausgewählter Experten umfassen. Weitere Arbeiten zu diesem Thema finden sich in [22]. Die Auswirkungen der Ereignisse in Fukushima und die Berichterstattung bezogen auf die Schweiz wurden in [23] untersucht.

Im Folgenden wird als Beispiel ein Medienbericht diskutiert. In der FAZ vom 30.3.2011 [24] haben zwei Statistiker gezeigt, dass die empirische Kernschadenshäufigkeit pro Reaktor in den vergangenen Jahrzehnten bei ca. 0,2 ‰ pro Jahr lag. Dieser Wert passt erstaunlich gut zu den Anlagen, die Ende der 1960er, Anfang der 1970er Jahre erbaut und nicht verbessert wurden. Die mittlere Kernschadenshäufigkeit lag dort zwischen 0,1 und 0,6 ‰ pro Jahr, einzelne Werke erreichten bis zu 1 ‰ pro Jahr. Die weltweite kumulierte Kernschadenshäufigkeit dürfte 1975 zwischen 2 und 7 ‰ pro Jahr gelegen haben. Zahlreiche Fast-Unfälle belegen dieses inakzeptabel hohe Risiko.

Mit der bereits erwähnten Verbesserung der bestehenden und dem Bau neuer Anlagen, der Berücksichtigung von räumlicher Trennung, Diversität, Robustheit, Qualifizierung der Komponenten sanken die Kernschadenshäufigkeiten je nach Werk um bis zu einen Faktor 100. Die Autoren in der FAZ

wundern sich dann, dass der von ihnen berechnete Wert nicht mit dem Wert übereinstimmt, den z. B. die GRS angibt, einem Wert in der Größenordnung von ca. 10^{-6} pro Jahr für deutsche Anlagen. Tatsächlich ereigneten sich die Unfälle, die wir leider beobachten mussten, in Anlagen, die entweder mit den Annahmen des Wissens vor über einem halben Jahrhundert entworfen wurden und nicht adäquat nachgerüstet waren (Fukushima) oder die schlicht falsch konstruiert und/oder betrieben wurden (Tschernobyl). Ursächlich für die Unfälle ist nicht die Kernkraftwerkstechnik selbst, sondern die Verleugnung des Standes von Wissenschaft und Technik, die Verachtung von technischem Wissen und Können, fehlende selbstkritische Bewertung von Berechnungsannahmen, der Verzicht auf das Vier-Augen-Prinzip und auf ständige Prüfungen der Annahmen. Das sind im Wesentlichen Managemententscheidungen. Solche Fehlentscheidungen wurden sowohl für die Unfallentstehung in Fukushima als auch in Tschernobyl bestätigt.

Die Autoren in [24] stellen weiter fest: „... dass das Risiko [d. V.] bedeutend größer ist, als theoretische Berechnungen ergeben.“ Diese Aussage basiert auf der Annahme, dass die Sicherheit von Kernkraftwerken über 50 Jahre konstant geblieben ist. Verschiedene Studien mit einer qualitativ besseren Sichtung der Stichproben, wie z. B. in [25], bestätigen aber die fallenden Risiken. Wahrscheinlich liegen realistische Werte für die Kernschadenshäufigkeit für deutsche Anlagen zwischen 10^{-6} und

10^{-5} pro Jahr, die Zahlen für die Freisetzung zwischen 10^{-7} und 10^{-6} pro Jahr. Für alle noch laufenden Anlagen in Deutschland dürfte der kumulierte Wert für eine Freisetzung bei etwas über 10^{-6} pro Jahr liegen.

Die Autoren in [24] verweisen weiterhin auf die Sicherheit im kommerziellen Luftverkehr. Aber auch dort gilt die Zeitabhängigkeit des Risikos. Die Unfallrate sinkt seit vielen Jahrzehnten [26]–[33]. Die Verbesserung der Sicherheit ist sowohl auf organisatorische, auf technische und auf betriebliche Verbesserungen zurückzuführen, genau wie in Kernkraftwerken.

Natürlich haben wir in den vergangenen Jahren auch Fälle gesehen, in denen die rechnerischen Kernschadenshäufigkeiten gestiegen sind. Das hat mehrere Gründe. Ein wichtiger Grund sind die immer realistischeren Gefährdungen, und in vielen Bereichen sehen wir heute größere rechnerische Gefährdungen als vor einigen Jahren oder Jahrzehnten. Eine solche realistischere Gefährdung hätte auch bei Fukushima eine höhere, aber auch realistischere Kernschadenshäufigkeit ausgewiesen (Bild 1).

2.4 Kosten

Die Kosten der Unfälle von Kernkraftwerken sind immer wieder Gegenstand intensiver Diskussionen. Verschiedene Quellen geben für die Kosten

eines bzw. aller Unfälle in der Geschichte der Kernenergie folgende Zahlen:

- ❑ auf eine halbe Billion Euro wurden die weltweiten Kosten für alle Unfälle nukleartechnischer Anlagen in der Tagesschau am 11. März 2014 geschätzt [34],
- ❑ auf 187 Milliarden Euro werden die Schadenkosten in Fukushima geschätzt [35],
- ❑ auf 200 bis 400 Milliarden Euro werden die Schadenkosten für einen schweren Störfall in Frankreich geschätzt [36],
- ❑ auf größer als eine Billionen Euro werden die potentiellen Schadenkosten im Falle eines schweren Unfalls [37] in Norddeutschland geschätzt, wobei die gefilterte Druckentlastung ignoriert wird.

Die Zahlen legen mittlere Kosten eines schweren Störfalles von mehreren hundert Milliarden Euro nahe. Zum Vergleich: die weltweiten Kosten für den Klimawandel liegen bei wenigen Billionen Euro pro Jahr. Die Gesamtkosten des Irak- und des Afghanistan-Krieges liegen für die USA bei über einer Billion Euro [38].

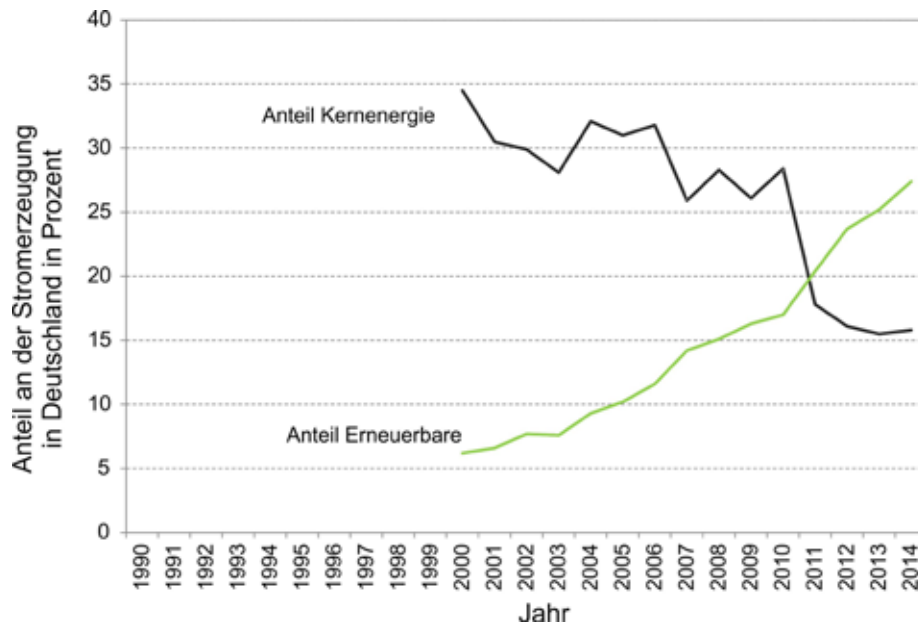
Fakt ist, dass die Kosten für Unfälle von Kernkraftwerken mit Freisetzungen außerordentlich hoch sind und diese durch das Kraftwerk allein nicht getragen werden können. Fakt ist aber auch,

*Kostenvergleich
Unfälle von
Kernkraftwerken,
Klimawandel,
Kriege etc.*

dass die finanziellen Forderungen an Kernkraftwerke heutzutage extrem geworden sind: So wird TEPCO inzwischen auf finanzielle Kompensation für Selbsttötungen verklagt [39]. Eine erhöhte Anzahl von Selbsttötungen gab es in Japan auch nach dem Erdbeben in Kobe, allerdings wurde damals niemand zur Kompensation herangezogen.

Bild 2
Anteile an der Stromerzeugung für Kernenergie und neue Erneuerbare [42], [44]

(Grafik: Dirk Proske)



Neben den möglichen Unfallkosten gab es reale Förderungen der Kerntechnik und es gibt zukünftige Kosten für die Endlagerung. Greenpeace spricht davon, dass die Kernenergie in Deutschland mit ca. 200 Milliarden Euro gefördert wurde und rechnet mit weiteren ca. 100 Milliarden für die Endlagerung [40]. In [41] werden die Entsorgungskosten der

Kernkraftwerke bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf 168,9 Milliarden Euro geschätzt. Auch hier handelt es sich um signifikante Beträge.

3 Energiewende

3.1 Einleitung

Deutschland hat sich 2011 für den Ausstieg aus der friedlichen Nutzung der Kernenergie bis Ende 2022 entschieden. Neben den Kernkraftwerken bilden Kohlekraftwerke das Rückgrat der deutschen Stromproduktion. Langfristig wird in Deutschland auch der Neubau von Kohlekraftwerken verboten, so dass als konventionelle Kraftwerke eigentlich nur noch Gaskraftwerke verbleiben. Auf Grund ihrer hohen Kosten verschwinden diese gerade vom Markt. Diese Aussage gilt übrigens auch für Wasserkraftwerke, die zwar erneuerbare Energien sind, aber nicht gefördert werden. Politisch gewollt wandelt sich in Deutschland also das Energieversorgungssystem von einem konventionellen Großkraftwerkssystem zu einem dezentralen System mit neuen erneuerbaren Energiequellen. Energieerzeuger, wie Windkraft oder Photovoltaik, die langfristig die Funktion der Großkraftwerke übernehmen sollen, werden zurzeit massiv ausgebaut.

3.2 Ziele

Ziel des Umbaus des Stromsystems ist die Verringerung des CO₂-Ausstoßes und die Erhöhung der Sicherheit der Bevölkerung für den Fall eines Un-

fallendes mit Freisetzung radioaktiver Stoffe. Tatsächlich liefern die neuen erneuerbaren Energien heute einen Beitrag von über 30 % an der Stromversorgung in Deutschland (2015) [42] (Bild 2 bis 2014). Trotzdem zeigte sich in den vergangenen Jahren in den Statistiken keine wesentliche Verbesserung der CO₂-Bilanz (Bild 3). Das wird auch bis 2022 so bleiben, da die CO₂-arme Stromproduktion der Kernkraftwerke durch Wind und Photovoltaik ersetzt werden wird, nicht die Stromerzeugung durch Kohle. Wesentliche Fortschritte wurden dagegen Anfang der 1990er Jahre mit dem Rückbau der DDR-Industrie erreicht. Bild 3 zeigt übrigens nur die Werte bezogen auf die Stromproduktion, die Werte für die Primärenergieproduktion mit Wohnungsverheizungen und Kraftstoffen zeigen eine prozentual noch geringere Abnahme.

Bezüglich des Zieles der Sicherheit in Form der Kernschadenshäufigkeit bzw. der Freisetzungshäufigkeit gab es zwei signifikante Verbesserungen, zum einen die Stilllegung der ostdeutschen Kernkraftwerke und zum zweiten die Stilllegung der acht Kernkraftwerke 2011 (Bild 4). Es sei an dieser Stelle nur darauf hingewiesen, dass solche Freisetzungshäufigkeiten auch über Ländergrenzen importiert und exportiert werden können [43].

3.3 Sicherheit und Risiken

Die Wandlung des Energieversorgungssystems in Deutschland von einem konventionellen Großkraft-

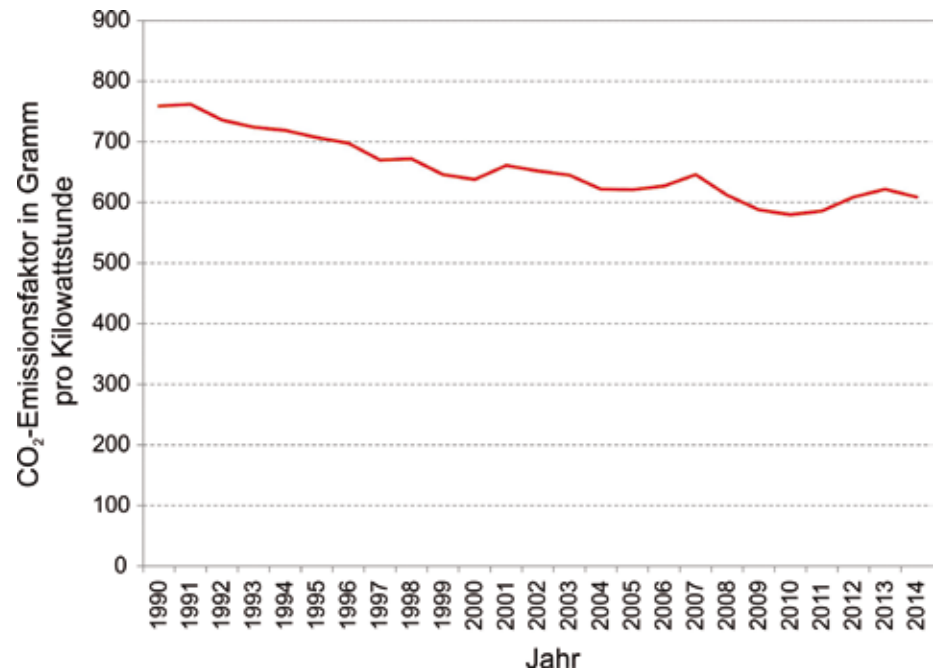


Bild 3
CO₂-Emissionsfaktor für die Stromerzeugung in Deutschland in Gramm pro Kilowattstunde, [45]
(Grafik: Dirk Proske)

werkesystem zu einem dezentralen System mit erneuerbaren Energiequellen hat verschiedene Auswirkungen hinsichtlich:

- ❑ zunehmender Volatilität der Energieerzeugung und des Energietransports,
- ❑ Anwachsen des mittleren Abstandes zwischen Erzeugung und Verbrauch,
- ❑ Neugestaltung der Märkte und Zunahme der Akteure und

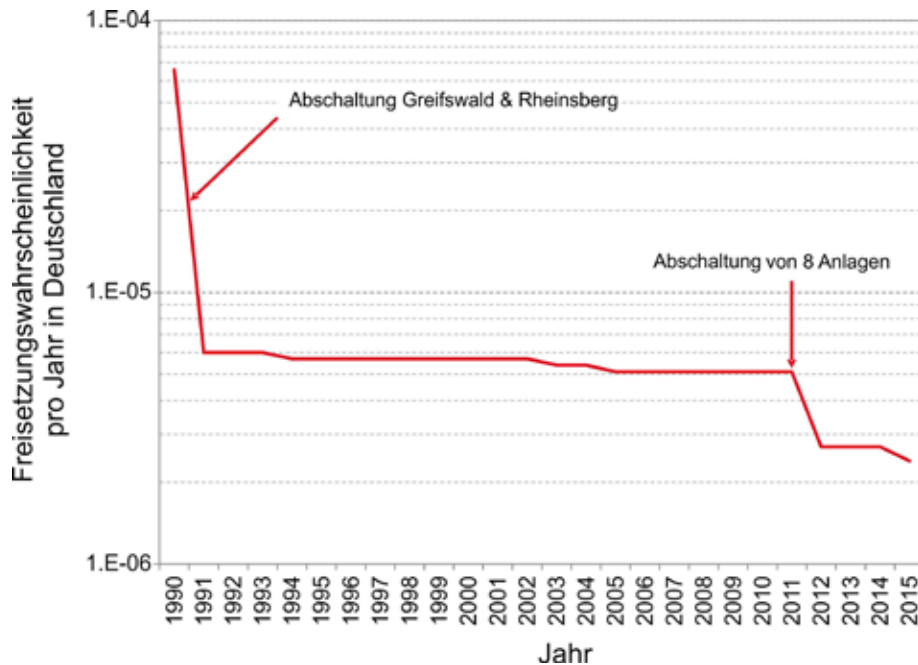


Bild 4
Entwicklung der Freisetzungswahrscheinlichkeit für deutsche Kernkraftwerke

(Grafik: Dirk Proske)

□ Veränderung der Verteilungs- und Übertragungsnetze.

Für die Sicherheit der Stromversorgung sind das erhebliche Herausforderungen. Beispielhaft gezeigt haben dies der Stromausfall in Westeuropa am 4. November 2006 [46] in Verbindung mit einer planmäßigen Abschaltung einer Leitung und erheblichen Windeinspeisungen in Norddeutschland, die Vorbereitungen für die Sonnenfinsternis am 20. März 2015 und weitere Ereignisse [47]. Das Thema Blackout in Verbindung mit Kosten und möglichen

Todesopfern findet langsam seinen Weg in die Medien [48].

Die Auswirkungen der hohen Volatilität sollen kurz erläutert werden. Ende 2015 gab es in Deutschland ca. 26.000 Windräder mit einer Spitzenleistung von knapp 42 GW [49]. Geht man von einem Ausbauziel von ca. 100 GW Spitzenleistung aus und berücksichtigt eine Erhöhung der Leistung pro Windrad, so dürften in Zukunft insgesamt etwa 50.000 Windräder notwendig werden (Bild 5). Mit dem parallelen Ausbau der Photovoltaikanlagen, wobei auch hier langfristig ca. 100 GW Spitzenleistung geplant sind, werden die Fluktuationen im Netz extrem zunehmen. Es wird deutlich mehr Tage geben, an denen das Stromnetz massenhaft Einspeisungen erlebt, ohne dass es dafür Abnehmer gibt. Bereits im Jahre 2015 gab es 25 Tage mit negativen Strompreisen, teilweise erreichten die Preise -125 Euro pro Megawattstunde [50]. Zum Vergleich: im Augenblick (Mitte Mai 2016) liegt der mittlere Börsenpreis bei +20 bis 25 Euro pro Megawattstunde. Im Sommer 2013 stellte die Bahn die Weichenheizungen an, um Strom zu verbrauchen und damit Geld zu verdienen. Diese Kosten werden letztendlich vom Stromkunden bezahlt.

Gleichzeit besteht die Möglichkeit von sogenannten Dunkelflauten, also einem Mangel an Windkraft- und Solareinspeisung. Mit der Abschaltung der Kernkraftwerke bis 2022 und dem Rückgang der gesamten konventionellen Stromerzeugung in

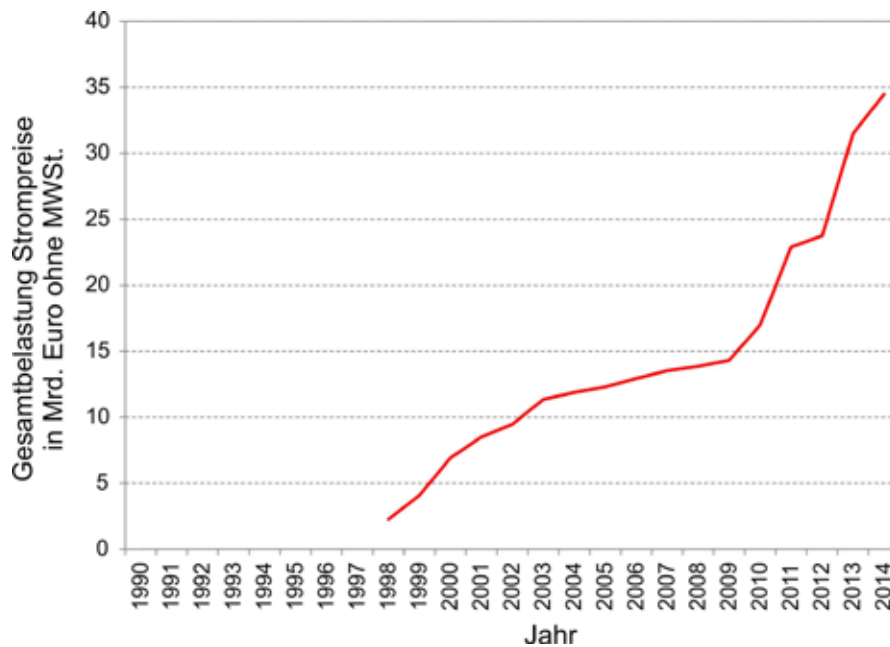
Deutschland in den nächsten Jahren wird etwa ab dem Jahre 2020 die konventionelle Stromerzeugung (Kohle, Gas, Kerntechnik) nicht mehr in der Lage sein, die Jahreshöchstlast zu erbringen [51]. Ab diesem Zeitpunkt müssen entweder neue erneuerbare Energien garantiert ins Netz einspeisen, Deutschland wird zum Nettoimporteur von Strom oder der Stromverbrauch wird signifikant gesenkt. Der erste Punkt ist auf Grund der Wetterabhängig-

keit nicht gegeben, der zweite Punkt zeichnet die wahrscheinlichste Entwicklung auf und der dritte Punkt ist ebenfalls im Augenblick nur begrenzt zu beobachten.

Neben der Fluktuation der Stromeinspeisung durch das Wetter wird die Steuerung der neuen Anlagen durch weitere Einflüsse erschwert. So sollen Windkraftanlagen während des Vogelzuges im



*Bild 5
Windkraftanlage in
Kalifornien
(Foto: Dirk Proske)*



*Bild 6
Entwicklung der
Gesamtbelastung
der Strompreise in
Mrd. Euro (ohne MWSt)
[57], [42]*

(Grafik: Dirk Proske)

Herbst abgestellt werden [52]–[54]. Außerdem sollen Anlagen nachts stillstehen, wenn wenig Wind herrscht, um Fledermäuse zu schützen [52]–[54]. Die Anforderungen an die Steuerung des Stromnetzes werden also deutlich steigen.

Neben der hohen Volatilität der Stromerzeugung gibt es viele weitere Risiken, die nicht in der Öffentlichkeit wahrgenommen werden. Speziell für Windkraftträder wurde z. B. das Risiko des Eiswurfs in der Nähe von Autobahnen diskutiert [55]. Außerdem laufen zurzeit Forschungsuntersuchungen zur Möglichkeit von Gesundheitsauswir-

kungen durch von Windkraftanlagen verursachten Infraschall [56].

Die Risiken dieser neuen Technologien sind vielleicht noch nicht so sichtbar geworden wie die der Kernenergie durch Tschernobyl und Fukushima, aber sie bestehen und müssen bewertet werden.

3.4 Kosten

Bereits bei den Kernkraftwerken wurde auf Kosten durch Unfälle, auf Subventionen und auf Kosten für die Endlagerung hingewiesen. In diesem Abschnitt werden zum Vergleich im Wesentlichen nur die Kosten durch Subventionen angegeben. Weitere Kosten, z. B. für einen durch die Volatilität verursachten Stromausfall in einem unteren einstelligen Milliardenbetrag oder Kosten für die Entsorgung von Solarzellen, werden hier nicht berücksichtigt.

Im Jahre 2014 beliefen sich die Abgaben auf Strom in Deutschland ohne Mehrwertsteuer auf ca. 35 Milliarden Euro (Bild 6) [57]. Diese ergeben sich zum überwiegenden Teil aus der Förderung der neuen Erneuerbaren und sind:

- ❑ Konzessionsabgabe (Leitungsverlegung etc.),
- ❑ EEG-Umlage (Preisdifferenz),
- ❑ KWK-Aufschlag (Vergütung für Kraft-Wärme-Kopplung),

- ❑ §19 StromNEV-Umlage (Befreiung großer Stromverbraucher, atypische Netznutzung),
- ❑ Offshore-Haftungsumlage,
- ❑ abLa-Umlage (Kosten für abschaltbare Lasten) und
- ❑ Stromsteuer (indirekte Verbrauchssteuer, Öko-steuer).

Von 2011 bis 2015 betrugen die Abgaben knapp 145 Milliarden Euro. Zum Vergleich, die Kosten des Unfalles von Fukushima liegen unterhalb 200 Milliarden Euro. Sollte diese Entwicklung weiterlaufen, ohne die politischen Rahmenbedingungen anzupassen, sind im Jahre 2020 EEG-Umlagen von 30 bis 40 Milliarden Euro möglich [58]. Zusammen mit allen sonstigen Gebühren wäre man bei einem Abgabevolumen von ca. 50 Milliarden Euro pro Jahr.

Diese Zahlen ergeben sich aus den Prognosen der Strompreise an der Börse für die nächsten Jahre. Die Prognosen sagen bis 2020 etwa 20 bis 25 Euro pro Megawattstunde vorher. Allerdings kann der mittlere Preis auch darunter liegen, da, wie bereits erwähnt, die Anzahl der Tage mit negativen Strompreisen weiter steigen wird und die Verbraucher diese negativen Preise über die Abgaben bezahlen müssen.

Gleichzeitig werden die Kosten für den Stillstand der konventionellen Kraftwerke steigen,

da ihre Nutzungszeit immer geringer wird. Diese steigenden Preise werden sich insbesondere bei den Strompreisen bei sogenannten Dunkelflauten, wenn nachts kein Wind weht, zeigen. Die Kosten der Dunkelflauten würde man vermeiden, wenn man Strom speichern könnte.

Während man bei der Kernenergie das ewig diskutierte Problem der Endlagerung sieht, ist das Problem der Stromspeicherung im Rahmen der Energiewende bis heute aber ungelöst und die wenigen Pumpspeicherkraftwerke sind nicht in der Lage [59], die produzierten Mengen an Energie zu speichern. Tatsächlich sind neue Pumpspeicherkraftwerke gar nicht mehr rentabel.

Die Kosten für die neuen erneuerbaren Energien sind auch deshalb so hoch, weil durch die Variabilität des Windes und die Berücksichtigung weiterer Effekte der Nutzungsgrad der Windanlagen nur bei ca. 15 bis 20 % liegt [60], [61]. Das entspricht einer durchschnittlichen Leistung von ca. 8 bis 9 GW im Jahr trotz der Spitzenleistung von 42 GW. Die Auslastung der Photovoltaik liegt bei ca. 10 %. Zum Vergleich, bei Kernkraftwerken in Deutschland liegt die Auslastung bei ca. 90 %. Die Leistung der noch laufenden Anlagen liegt bei über 10 GW. Deshalb konnten 8 bzw. 9 Kernkraftwerke im Jahre 2015 mehr Strom erzeugen als 26 000 Windräder (14,1 % vs. 13,3 % Anteil der Energieträger an der Bruttostromerzeugung 2015). Und deshalb erzeugt Photovoltaik, obwohl praktisch die gleiche

Während man bei der Kernenergie das Problem der Endlagerung sieht, ist das Problem der Stromspeicherung im Rahmen der Energiewende bis heute ungelöst

*Langfristig wird
in Deutschland
unter den heutigen
Bedingungen eine
konventionelle
Stromerzeugung
nicht mehr
wettbewerbsfähig
umsetzbar sein*

Spitzenleistung wie die Windräder, weniger als die Hälfte des Stromes der Windkraft (5,7 % Anteil an der Bruttostromerzeugung 2015). Und auch wenn Anlagen nicht laufen, sie kosten im Gegensatz zur üblichen Aussage, dass die Sonne und der Wind keine Rechnung stellen, Instandhaltungskosten. Bei Kernkraftwerken entstehen die hohen Kosten durch die umfangreiche Sicherheitstechnik und die Bildung von Rücklagen für den Rückbau und die Endlagerung.

Fazit: Unter Berücksichtigung dieser Entwicklungen dürfte bis Ende 2020 eine Förderung der neuen erneuerbaren Energien in der Größenordnung von 200 bis 300 Milliarden Euro erfolgt sein. Bereits im Jahre 2013 wurden die Gesamtkosten der Energiewende bis Ende 2030 auf ca. eine Billion geschätzt [62]. Dieser Wert erscheint basierend auf den eigenen Überlegungen nicht unrealistisch. Damit ist man in der gleichen Größenordnung wie ein schwerer Unfall in einem Kernkraftwerk, nur ist die Wahrscheinlichkeit des Eintritts der Kosten der Energiewende deutlich höher als die Eintrittswahrscheinlichkeit der Kosten des Unfalls. Intangible oder nichtmaterielle Kosten, wie ein möglicher Verlust der Heimat, sind dabei aber nicht berücksichtigt.

Langfristig wird in Deutschland unter den heutigen Bedingungen eine konventionelle Stromerzeugung nicht mehr wettbewerbsfähig umsetzbar sein [51]. Es wird also davon ausgegangen, dass eine

Stromerzeugung über neue erneuerbare Energien sicher und wirtschaftlich umsetzbar ist. Dies ist bis heute nicht nachgewiesen.

Dieser Abschnitt stellt keinen vollständigen Vergleich von Kosten verschiedener Stromerzeugungstechniken dar (siehe z. B. [78] und [79]). Er soll aber verdeutlichen, dass auch die neuen Technologien heute und in Zukunft viel Geld kosten werden. Wahrscheinlich sind die realen Kosten für die Stromerzeugung einfach größer als das, was wir in den letzten Jahren und Jahrzehnten dafür bezahlt haben.

4 Hypes neuer Technologien

4.1 Einleitung

Die Entwicklung der nuklearen Energieerzeugung war ein klassischer Hype, also eine Übertreibung, Überbewertung. Allein die Anzahl der Kraftwerke, die in den 1970er und 1980er Jahren entstanden, ist ein Indiz dafür. Im Augenblick beobachtet man die parallele Entwicklung für die neuen erneuerbaren Energien. Solche Übertreibungen sind kein Ergebnis der Neuzeit. Im Folgenden sollen zwei historische Beispiele genannt werden.

4.2 Kesselexplosionen

Die Erfindung der Dampfmaschine war in doppelter Hinsicht der Antrieb für die industrielle Revolution im 18. und 19. Jahrhundert. Die Erfindung änderte die Lebensumstände von Millionen von

Menschen. Im 19. Jahrhundert wurden Schiffe, Lokomotiven, Fabriken und Kraftwerke damit angetrieben.

Die Dampfkessel waren genietet und die Drücke relativ moderat, üblicherweise 3 bis 4 bar. Mit der allmählichen Erhöhung des Kesseldruckes wurden Kesselexplosionen häufiger. Anfang des 20. Jahrhunderts wurden jährlich 50.000 Todesopfer und über 2 Millionen Verletzte durch Kesselexplosionen gezählt [63]. Bereits davor hatten sich einige katastrophale Explosionen ereignet: Traurige Berühmtheit erreichte die Explosion von drei der vier Dampfkessel des Mississippi-Dampfers Sultana am 27. April 1865. Die Explosion und der Untergang forderten zwischen 1.200 und 1.500 Opfer [63]. Berühmt ist ebenfalls die Explosion der Brockton Schuhfabrik am 20. März 1905. Sie forderte 58 Todesopfer und über 100 Verletzte [63].

Die verschiedenen Katastrophen waren der Auslöser dafür, dass sich am 6. Februar 1880 ca. 30 Ingenieure in New York City im Büro des American Maschinist Magazine trafen, um eine Gesellschaft zur Verbesserung der Qualität der Tragfähigkeitsnachweise von Kesseln zu gründen: den ASME. 1908 begann die Entwicklung einer Norm und im März 1915 wurde die erste Norm herausgebracht [63].

Man verwendete also sehr schnell und sehr häufig die neue Technologie, ohne ein fachlich fundiertes Wissen über die Technik zu besitzen. Die Kon-

sequenzen waren letztendlich gewaltig, wurden aber von der Gesellschaft getragen und die Risiken wurden durch steigendes fachliches Wissen Stück für Stück verringert.

4.3 Schiffe

Das erste Boot wurde wahrscheinlich vor mehr als 10.000 Jahren entwickelt [64]. Die Erfindung des Bootes und der Schiffe ermöglichte dem Menschen den Zutritt zu einem anderen Lebensraum und damit den Gewinn von Nahrung und die Erschließung neuer Gebiete, wie z. B. die Entdeckung Amerikas durch Kolumbus. Das Ende der Hungerkatastrophen in Europa ist maßgeblich auf den Erfolg des Schiffsverkehrs zurückzuführen. Die Nutzung von Booten ermöglichte die Versorgung ganzer Küstenregionen.

Seit der Nutzung der Boote und Schiffe gab es aber auch unzählige Untergänge. So geht man davon aus, dass an der britischen Küste mindestens eine Viertelmillion Schiffswracks liegt [65]. Angeblich soll im Jahre 255 vor Christus die römische Flotte bei der Rückkehr aus Karthago in einen Sturm geraten und 280 Schiffe mit 100.000 Menschen untergegangen sein [66].

Zur Zeit der großen Entdeckungen um 1500 kalkulierte man den Verlust von 30 % der Besatzung ein [67]. Auf einer zweimonatigen Reise verlor ein spanisches Schiff von seiner ursprünglichen

Das Ende der Hungerkatastrophen in Europa ist maßgeblich auf den Erfolg des Schiffsverkehrs zurückzuführen

360-köpfigen Besatzung 123 Mann. Francis Drake verlor während seiner Expedition nach Westindien 1585 von 2.300 Seeleuten 600 Mann und auf der Fahrt von James Lancaster nach Ostindien um 1600 starb die Hälfte der Besatzung. Das englische Linienschiff Gloucester verlor auf seiner Fahrt 1617 626 Mann seiner ursprünglichen 961-Mann-Besatzung. Auslöser für die hohen Verluste waren Skorbut, Schiffsfieber, Malaria und Gelbfieber. Im 17. und 18. Jahrhundert sankt die Mortalität und erreichte dann ca. 1 %.

Bild 7
Hype-Zyklus-Diagramm
nach [68]
(Grafik: Dirk Proske)

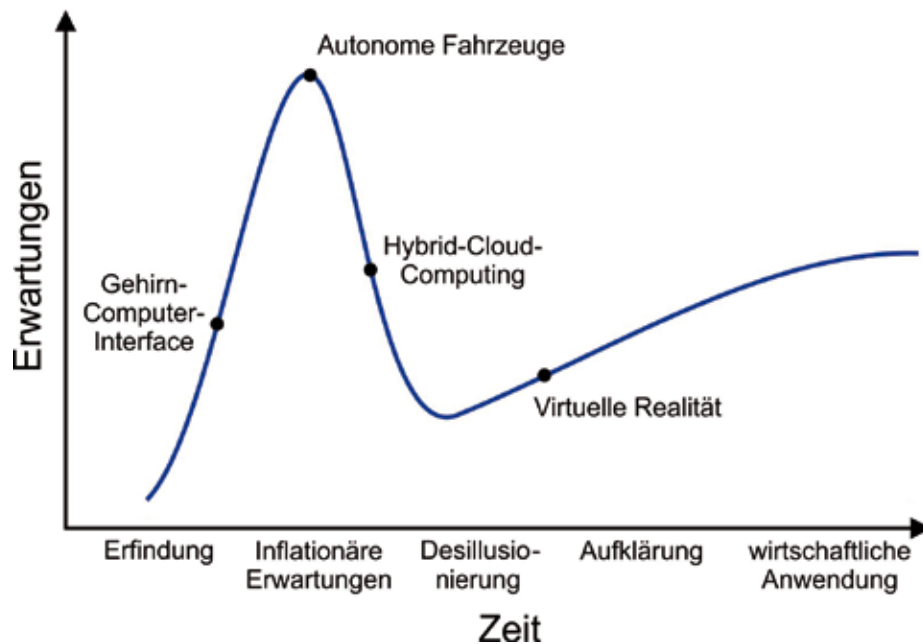
Noch einmal erlebte die Schifffahrt einen Boom mit tragischem Ausgang Anfang des 20. Jahrhunderts, erinnert sei hier nur an den Untergang der

Titanic. Die größten Tragödien ereigneten sich im zweiten Weltkrieg mit dem Angriff auf Flüchtlings-schiffe, aber auch in den letzten Jahren, wie z. B. die Kollision eines Tankers mit einer Fähre auf den Philippinen 1987 mit über 4.000 Todesopfern.

Die großen Erfolge der Seefahrer zu Zeiten der Renaissance waren also auch mit unglaublichen menschlichen Verlusten verbunden. Diese wiederholten sich auf einem geringeren Niveau mit der Einführung der Dampfschiffahrt.

4.4 Eigenschaften von Hypes

Die Überbewertung neuer Technologien ist auf Grund der heutzutage schnellen technologischen Entwicklung deutlich intensiver und häufiger. Im Bereich der elektronischen Systeme hat z. B. Gartner [68], [69] ein sogenanntes Hype-Zyklus-Diagramm entwickelt (Bild 7). In dieses Diagramm werden verschiedene Technologien eingetragen und die notwendige zeitliche Dauer bis zur erfolgreichen Markteinführung wird abgeschätzt. Interessant in dem Diagramm ist der Bereich der inflationären Erwartungen an die neue Technologie. Metzner [70] hat versucht, solche Zyklen in Subjektiv-wahrgenommene-versus-objektive-Risiken-Diagrammen darzustellen (Bild 8). Auch hier zeigt sich die systematische Unterschätzung der Risiken zum Zeitpunkt der Einführung der Technologie und eine Überhöhung der Risiken nach einer gewissen Zeit.



Wichtige Eigenschaften von Hypes neuer Technologien sind:

- ❑ übersteigerte Wahrnehmung der Nachteile und Risiken bestehender Technologien,
- ❑ Verleugnung der Vorteile bestehender Technologien,
- ❑ übersteigerte Wahrnehmung der Vorteile neuer Technologien,
- ❑ Verleugnung der Nachteile und Risiken der neuen Technologien,
- ❑ Verleugnung von offenen technischen Fragen (z. B. Endlagerung oder Speicherung),
- ❑ Anwendung unterschiedlicher Methoden zur Bewertung der Technologien und
- ❑ Vernachlässigung technischer Fragestellungen und Verschiebung zu ideologischen Fragestellungen.

Die derzeitigen gesellschaftlichen Entwicklungen und Prozesse in Deutschland bei der Energiewende erfüllen einen Großteil dieser Eigenschaften, so wie bei der Einführung der Kernenergie vor 50 Jahren. Drehen Sie doch einmal das Rad der Zeit zurück und lesen sie die Zeitungen vom Anfang der 1970er Jahre über die Einführung der Kernenergie.

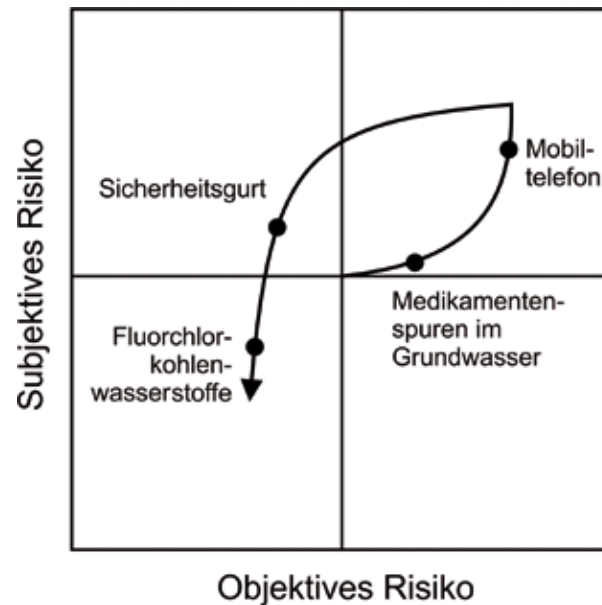


Bild 8
Zusammenhang zwischen objektivem und subjektivem Risiko über die Entwicklungszeit von Technologien, in Anlehnung an [76]
(Grafik: Dirk Proske)

Der einzige aus Sicht des Autors korrekte Weg ist die rationale Gegenüberstellung der möglichen Vorteile, Nachteile und Unsicherheiten verschiedener Technologien mit gleichen Methoden. Tatsächlich haben verschiedene Studien wie Burgherr/Hirschberg bzw. Hirschberg et al. [70], [71], Preiss et al. [72], ExternE [73], Inhaber [74] oder Hauptmanns [75] versucht, die Gefährdungen der unterschiedlichen Energieerzeugungsformen wissenschaftlich zu vergleichen. Hier zeigen sich keine großen Unterschiede bei den Gefährdungen. Letztendlich muss uns klar sein: jede Technologie birgt Risiken.

5 Wertung und Zusammenfassung

Zum Jahrestag der nuklearen Katastrophen in Tschernobyl und Fukushima 2016 diskutiert der vorliegende Beitrag Geschichte, Sicherheit, Kosten und Nutzen der Kernenergie und der Energiewende in Deutschland. Es zeigt sich, dass beide Technologien, die Kernenergienutzung und die neuen erneuerbaren Energien Vor- und Nachteile besitzen. In den Berichterstattungen werden dagegen häufig nur bestimmte ausgewählte Eigenschaften der genannten Technologien hervorgehoben.

Deshalb wird anschließend geprüft, ob auf die Entwicklung der Kernenergie und die Energiewende das Konzept der Hypes neuer Technologien angewendet werden kann. Tatsächlich gleichen sich die politischen, sozialen und medialen Prozesse bei der Einführung der Kernenergie in Deutschland vor ca. 50 Jahren und der Einführung der neuen erneuerbaren Energien heute. Risiken und Kosten der bestehenden Technologien werden in der Öffentlichkeit überhöht und Risiken und Kosten der neuen Technologien werden unterschätzt.

Natürlich basiert die Entscheidung zur Energiewende nicht nur auf technischen Fakten, politische und soziale Aspekte spielen eine erhebliche Rolle [77]. Deshalb muss auch niemand allein auf Risiken basierende Entscheidungen treffen. Aber das Wissen um Risiken ist bei Entscheidungen zwingend zu berücksichtigen. Man spricht dann von Risiko-in-

formierten Entscheidungen [78]. Die Einordnung beider, der Kernenergie und der Energiewende als potentielle technische Hypes legt die Vermutung nahe, dass die Risiken damals und heute nicht adäquat berücksichtigt wurden. Die Risiken und Grenzen beider Technologien sind eng mit physikalischen Gesetzmäßigkeiten verbunden und wenn uns die Unfälle der Kernenergie eins gelehrt haben, dann die Tatsache, dass man physikalische Gesetze nicht durch politische Entscheidungen außer Kraft setzen kann.

Referenzen

- [1] Berna, F.; Goldberg, P.; Horwitz, L. K.; Brink, J.; Holt, S.; Bamford, M.; Chazan, M.: Microstratigraphic evidence of in situ fire in the Acheulean strata of Wonderwerk Cave, Northern Cape province, South Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109 (2012) 20, E1215–E1220 – doi: 10.1073/pnas.1117620109
- [2] Roebroeksa, W.; Villa, P.: On the earliest evidence for habitual use of fire in Europe. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108 (2011) 13, 5209–5214 – doi: 10.1073/pnas.1018116108
- [3] Morris, I.: *Wer regiert die Welt: Warum Zivilisationen herrschen oder beherrscht werden.* Frankfurt am Main: Campus, 2011

- [4] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) e.V. (Hrsg.): Delphi Energy Future 2040, Delphi-Studie zur Zukunft der Energiesysteme in Deutschland, Europa und in der Welt im Jahre 2040. 3/2016
- [5] Kardashev, N.: Transmission of Information by Extraterrestrial Civilizations. *Soviet Astronomy* 8 (1964) 2, 217–222
- [6] Pellaud, B.: Kernenergie Schweiz – Fakten, Hintergründe, Verwirrungen und Politik. orell füssli, 10/2013
- [7] Laeng, T.: Zukunftsträume von gestern, heute und übermorgen. Berlin: LIT, 2010
- [8] Engineering Safeguards Key to Urban Siting. *Nucleonics*, 10/1965
- [9] Stellungnahme des Naturschutzrates zur Energiepolitik vom 11.12.1965. In: *Schweizer Naturschutz* 1 (1966) 14
- [10] Kupper, P.: Gestalten statt Bewahren: Die umweltpolitische Wende der siebziger Jahre am Beispiel des Atomenergiediskurses im Schweizer Naturschutz. In: Brüggemeier, F.-J.; Engels, J. I. / Stiftung Naturschutzgeschichte in Deutschland (Hrsg.): *Natur- und Umweltschutz nach 1945: Konzepte, Konflikte, Kompetenzen*, Frankfurt / New York: campus, 2005
- [11] WASH-1400 (NUREG 75/014): Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risk in the U.S. Commercial Nuclear Power Plants. U.S. NRC, 10/1975
- [12] Radkau, J.: Eine kurze Geschichte der Atomkraftbewegung. Aus *Politik und Zeitgeschichte* 61 (2011) 46–47, 7–15
- [13] Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (HSK, Hrsg.): Definition of Level 1 PSA Risk Measures. 2005
- [14] Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (HSK, Hrsg.): Definition of Level 2 PSA Risk Measures. 2007
- [15] Pliefke, T.; Peil, U.: On the integration of equality considerations into the Life Quality Index concept for managing disaster risk. In: Taerwe, L.; Proske, D. (Eds.): *Proceedings of the 5th International Probabilistic Workshop*, 28./29.11.2007 in Genth (Belgium), Genth: Acco, 2007, 267–281 – urn:nbn:de:bsz:14-ds-1228914919488-65713
- [16] Rackwitz, R.; Streicher, H.: Optimization and Target Reliabilities. In: *Proceedings of JCSS Workshop on Reliability Based Code Calibration*, 21./22.3.2002 in Zürich (Switzerland), Swiss Federal Institute of Technology, ETH Zürich, 2002
- [17] Mohrbach, L.: Fukushima two years after the tsunami – the consequences worldwide. *atw* 58 (2013) 3, 152–155
- [18] Dedman, B.: What are the odds? US nuke plants ranked by quake risk. *NBCnews*, 2011
- [19] ENSREG: EU Stress Tests and Follow-up, Diverse Dokumente – <http://www.ensreg.eu/EU-Stress-Tests>
- [20] Kennedy, R. P.: Risk (Performance-Goal) Based Approach for Establishing the SSE Design

- Response Spectrum Aimed at Achieving a Seismic Core Damage Frequency Less than a Target goal for Future Nuclear Power Plants. RPK Structural Mechanics Consulting, Escondido, CA, 2012
- [21] Kepplinger, H.-M.; Lemke, R.: Die Reaktorkatastrophe bei Fukushima in Presse und Fernsehen in Deutschland, Schweiz, Frankreich und England. Vortrag auf der Jahrestagung 2012 der Strahlenschutzkommission, 15.3.2012 in Hamburg
- [22] Wolling, J.; Arlt, D. (Hrsg.): Fukushima und die Folgen – Medienberichterstattung, Öffentliche Meinung, Politische Konsequenzen. Ilmenau: Universitätsverlag, 2014
- [23] Bonfadelli, H.; Kristiansen, S.: Meinungsklima und Informationsverhalten im Kontext von Atomenergie und ENSI. Zwischenbericht zuhanden des Eidgenössischen Nuklearinspektorats, Universität Zürich, IPMZ – Institut für Publizistikwissenschaft und Medienforschung, Zürich, 11/2012
- [24] Kauermann, G.; Küchenhoff, H.: Reaktorsicherheit: Nach Fukushima stellt sich die Risikofrage neu. FAZ, 30.3.2011
- [25] Wheatley, S.; Sovacool, B.; Sornette, D.: Of Disasters and Dragon Kings: A Statistical Analysis of Nuclear Power Incidents and Accidents. Risk Analysis, arXiv:1504.02380v1 [physics.soc-ph] 10.4.2015, 24 pages
- [26] Boeing (Ed.): Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations | 1959–2013. Seattle (US), 8/2014
- [27] Bundesamt für Statistik (Hrsg.): Swiss civil aviation 2013. Neuchâtel (Switzerland), 2014
- [28] European Aviation Safety Agency (EASA, Ed.): Annual Safety Review 2013
- [29] International Air Transport Association (IATA, Ed.): Safety Report 2013. Montreal-Geneva, 4/2014
- [30] International Civil Aviation Organization (ICAO, Ed.): Safety Report. Edition 2 014, Montreal (Canada)
- [31] Airbus (Ed.): Commercial Aviation Accidents 1958–2013: A Statistical Analysis. Blagnac Cedex (France), 4/2014
- [32] International Association of Oil and Gas Producers (OGP, Ed.): Aviation transport accident statistics. OGP: Risk Assessment Data Directory, Report No. 434-11.1, 3/2010
- [33] US Department of Transportation/Federal Aviation Administration (Ed.): Trends in Accidents and Fatalities in Large Transport Aircraft. Final Report, DOT/FAA/AR-10/16, 6/2010
- [34] Tagesschau am 11.3.2014: Kosten von Atomunfällen, Fukushima, Tschernobyl und viele andere, Hintergrund
- [35] Bundesamt für Bevölkerungsschutz (Hrsg.): Katastrophen und Notlagen Schweiz 2015, Welche Risiken gefährden die Schweiz. Bern (Schweiz), 5/2015
- [36] Pascucci-Cahen, L.; Momal, P.: Massive radiological releases profoundly differ from controlled releases. Eurosafe – Towards Conver-

- gence of Technical Nuclear Safety Practices in Europe, 2012, 7 Seiten, lectures' summaries: <https://www.eurosafe-forum.org/eurosafe2012>
- [37] http://www.eurosolar.de/de/images/stories/pdf/Infoblatt_Kosten_Atomenergie06_de.pdf
- [38] Bilmes, L. J.: The Financial Legacy of Iraq and Afghanistan: How Wartime Spending Decisions Will Constrain Future National Security Budgets. Faculty Research Working Paper Series, Harvard Kennedy School, 3/2013, RWP13-006
- [39] Expert Workshop: Fukushima Five Years on: Legal Fallout in Japan, Lesson for the EU. 4./5.3.2016 at Darwin College Cambridge (GB), lecture summary, <http://www.law.cam.ac.uk>
- [40] <https://www.greenpeace.de/themen/atomkraft/atomstrom-mit-304-milliarden-euro-subsventioniert>
- [41] Ralph Bollmann in FAZ: Das kostet den Steuerzahler der Atommüll. 2.5.2016
- [42] BDEW (Hrsg.): Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2016), Anlagen, installierte Leistung, Stromerzeugung, EEG-Auszahlungen, Marktintegration der Erneuerbaren Energien und regionale Verteilung der EEG-Anlagen. Berlin, 18.2.2016
- [43] http://flexrisk.boku.ac.at/en/site_list.html
- [44] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW, Hrsg.): BDEW-Strompreisanalyse Juni 2014, Haushalte und Industrie. Berlin, 20.6.2014 – www.bdew.de
- [45] Icha, P.: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2014. In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Climate change 9/2015, 6/2015
- [46] Bundesnetzagentur (Hrsg.): Bericht über die Systemstörung im deutschen und europäischen Verbundsystem am 4. November 2006. Bonn, 2/2007
- [47] Brill, K. in Süddeutsche Zeitung: Grüne Stromflut. 3.11.2012, 3 S.
- [48] Aargauer Zeitung: So sind wir für einen Blackout gerüstet. 15.12.2015, S. 2
- [49] FAZ: Gegenwind für neues Erneuerbares-Energien-Gesetz. 10.5.2016
- [50] EEX Transparency Platform: <https://www.eex-transparency.com/>. 8.5.2016
- [51] Buttler, A.; Spliethoff, H.: Bedarf und Auslastung konventioneller Kraftwerke im Zuge der Energiewende: Eine Metastudie. VGB Power-Tech 3 (2016), 41–47
- [52] Siegfried, S.; Wörtz, T.: Streitfall Windkraft: Don Quijotes (Alb)Traum. natur (2016) 5, 39–45
- [53] Etscheid, G.: Kampf um freie Horizonte. natur (2016) 5, 46–50
- [54] Neu Luzerner Zeitung: Stromeinbussen wegen Fledermäusen. 9.11.2012
- [55] Drapalik, M.; Formayer, H.; Pospichal, B.; Kromp, W.: Risk of ice shed from wind turbines. In: Budelmann, H.; Holst, A.; Proske, D. (Ed.): Procee-

- dings of the 9th International Probabilistic Workshop, 17./18.11.2011 in Braunschweig, 8 S.
- [56] Müller, H.; Artinger, G.: Kommentierung verschiedener Studien und Berichte über Infraschall. www.umweltmessung.com, 2016
- [57] Lambertz, J. F.; Milošević, G.: Perspektiven der deutschen Braunkohlenindustrie 2013: Braunkohle – Partner und Impulsgeber. VGB Power-Tech (2013) 9, 104–113
- [58] Rasim, W.: Auch Stromspeicher würden diese Energiewende nicht retten. Dresdner Universitäts Journal (2014) 18, 4
- [59] Global Wind Energy Services: <http://www.dewi.de>. diverse Berichte, 2016
- [60] Pieper, T.; Fleckenstein, H.; Rosen, M.: Das Wohl und Wehe des Windes. *emw – Magazin für Energie, Markt und Wettbewerb* (2007) 1, 40–46
- [61] Altmeier, P.: Energiewende kann eine Billion Euro kosten. Handelsblatt, 20.2.2013
- [62] Bamford, W.: The History of the ASME Code. Westinghouse: ASME B&PV Course, 27.–29.4.2010, lecture's documentation
- [63] Mann, G. (Hrsg.): Propyläen Weltgeschichte – Eine Universalgeschichte. Berlin · Frankfurt am Main: Propyläen, 1991
- [64] Wilson, N.: Great Sea Disasters. Parragon: 1998 – German Version: Augsburg: Bechtermünz | Weltbild, 1998
- [65] Eastlake, K.: A century of sea disasters. Brown Partworks Limited | German Version: Blindlach: Gondrom, 1998
- [66] Schadeewaldt, H.: Zur Geschichte der Verkehrsmedizin unter besonderer Berücksichtigung der Schifffahrtsmedizin. In: Wagner, K.; Wagner, H.-J. (Hrsg.): Handbuch der Verkehrsmedizin, Berlin – Heidelberg – New York: Springer, 1968
- [67] <http://www.gartner.com/technology/research/methodologies/hype-cycle.jsp>
- [68] van Lente, H.; Spitters, Ch.; Peine, A.: Comparing Technological Hype Cycles: Towards a Theory. ISU Working Paper 11.03, Innovation Studies Utrecht (ISU), Utrecht University, Copernicus Institute of Sustainable Development, 2011
- [69] Metzner, A.: Die Tücken der Objekte – Über die Risiken der Gesellschaft und ihre Wirklichkeit, 2002, Campus Verlag GmbH, Frankfurt Main
- [70] Burgherr, P.; Hirschberg, S.: Comparative Risk Assessment of Severe Accidents in the Energy Sector. Energy Policy 74 (2014) S45–S56
- [71] Hirschberg, S.; Spiekerman, G.; Dones, R.: Project GaBE: Comprehensive Assessment of Energy Systems: Severe Accidents in the Energy Sector. PSI-Bericht Nr. 98-16, 11/1998
- [72] Preiss, P.; Wissel, S.; Fahl, U.; Friedrich, R.; Voß, A.: Die Risiken der Kernenergie in Deutschland im Vergleich mit Risiken anderer Stromerzeugungstechnologien. Arbeitsbericht/Working Paper, Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Bericht Nr. 11, 2/2013

- [73] European Commission: ExternE – Externalities of Energy, 2007. <http://www.externe.info/>
 - [74] Inhaber, H.: Risk Analysis applied to energy systems. Encyclopedia of Energy, Elsevier, 2004
 - [75] Hauptmanns, U.; Herttrich, M.; Werner, W.: Technische Risiken. Berlin: Springer, 1991
 - [76] Proske, D.; van Gelder, P.; Vrijling, H.: Some remarks on perceived safety with regards to Optimal safety of structures. Beton- und Stahlbetonbau 103 (4/2008) Supplement 1: Robustness and Safety of Concrete Structures, 65–72
 - [77] Arrow, K. J.; Cropper, M. L.; Eads, G. C.; Hahn, R. W.; Lave, L. B.; Noll, R. G.; Portney, P. R.; Russell, M.; Schmalensee, R.; Smith, V. K.; Stavins, R. N.: Is there a role for benefit-cost analysis in environmental, health and safety regulations. Science, 272 (1996) 221/222
 - [78] Öko-Institut (Hrsg.): Die Entwicklung der EEG-Kosten bis 2035. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Freiburg, 2015
 - [79] Henning, H.-M.; Palzer, A.: Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 2015
- Anmerkung: Alle Internetquellen wurden am 15.8.2016 überprüft