19. Exkurs: Risiken

April 2007

Michel Piot, Bundesamt für Energie

Inhalt

1 Einleitung ... 1
2 Risikobegriffe ... 3
2.1 Risiko, Schadensausmass, Eintrittswahrscheinlichkeit ... 3
2.2 Risikoanalyse und Risikowahrnehmung ... 4
2.3 Risikobewertung ... 4
2.4 Risikokonzept ... 5
3 Energiespezifische Risiken ... 5
3.1 Gesellschaftsrisiken ... 6
3.2 Umweltrisiken ... 6
3.3 Finanzielle Risiken ... 6
3.4 Politische Risiken ... 7
3.5 Bemerkungen ... 7
4 Studien zu Risiken im Energiebereich ... 7
4.1 Risikoanalyse ... 7
4.1.1 Risiken von Energieversorgungssystemen ... 7
4.1.2 Severe Accidents in the Energy Sector ... 8
4.1.3 Studie der Weltgesundheitsorganisation zum Unfall von Tschernobyl ... 10
4.2 Risikowahrnehmung ... 11
4.2.1 Risikowahrnehmung Energieperspektiven 2035 ... 11
4.2.2 Marginale Zahlungsbereitschaft für eine erhöhte Internalisierung des Risikos von Kernkraftwerken ... 11
4.3 Risikobewertung ... 11
4.3.1 Katarisk: Katastrophen und Notlagen in der Schweiz; Eine Risikobeurteilung aus Sicht des Bevölkerungsschutzes ... 11
4.4 Andere Studien ... 12
5 Schlussfolgerungen ... 12
6 Literatur ... 13
Anhang 1: Übersicht über die einzelnen Prozesse des Energieversorgungssystems. ... 14
Anhang 2: Übersicht über Gesundheitsrisiken im Energieversorgungssystem. ... 16
Anhang 3: Übersicht über Umweltrisiken im Energieversorgungssystem ... 19
Anhang 4: Übersicht über finanzielle Risiken im Energieversorgungssystem ... 20

1 Einleitung

In den Perspektivarbeiten des Bundesamtes für Energie werden szenarienabhängig Auswirkungen auf die Umwelt, Wirtschaft und Versorgungssicherheit dargestellt. Jeder dieser drei Bereiche weist charakteristische Risiken auf: Bei der Umwelt sind es die Auswirkungen einer Klimaänderung und eines Unfalls bei einer Grosstechnologie insbesondere bei Kernkraftwerken; im Bereich der Wirtschaft vor allem Preisrisiken und bei der Versorgungssicherheit Risiken der Abhängigkeit gegenüber Drittstaaten und der jederzeitigen Verfügbarkeit von Energie und Elektrizität. In der Studie „Risikowahrnehmung Energieperspektiven 2035“ der Stiftung „Risiko-Dialog“ wird szenarienabhängig die Risikowahrnehmung von Interessenvertretern aus Wirtschaft und Politik dargestellt (siehe Exkurs 20). Weitere Studien zum Thema Risiko sind im Rahmen der Energieperspektiven nicht durchgeführt worden. In diesem Exkurs werden nebst einigen Grundlagen bereits bestehende Studien zu Risikoanalyse, -wahrnehmung und -bewertung zugesammengefasst.

Als Risiken werden mögliche Folgen von Handlungen und Ereignissen bezeichnet, die im Urteil einer überwiegenden Zahl von Menschen als unerwünscht gelten beziehungsweise Gefährdungen beinhalten. Dazu zählen zunächst unmittelbar fassbare Schäden an Gesundheit, Leben und Lebensgrundlagen. Darüber hinaus wird nachfolgend von der Annahme ausgegangen, dass auch solche Folgen von Handlungen dann von der überwiegenden Zahl der Menschen als unerwünscht angesehen werden, wenn sie der Menschheit als Ganzes heute oder in Zukunft in Erwartung einen Schaden zufügen. In beiden Fällen ist die Frage nach Risiken eng mit der Ethik verbunden, die als philosophische Disziplin

allein auf dem Prinzip der Vernunft aufbaut und als Ziel die Erarbeitung von allgemeingültigen Normen und Werten hat.

Implizit liegen solchen Risiko- und Schadensbegriffen die normativen Setzungen zugrunde, dass alle Menschen gleichermassen ein Recht auf Schutz ihrer Unversehrtheit haben und dass das Überleben der Menschheit als solcher sowie die Aufrechterhaltung ihrer Entwicklungsmöglichkeiten, gegebenenfalls auch der technischen Zivilisation, ein legitimes Gattungsinteresse ist. Aus diesen Setzungen sind die Forderungen der Verteilungs- und Zugangsgerechtigkeiten, die Verantwortung gegenüber künftigen Generationen ableitbar. Ethische Fragen werden insbesondere dann wichtig, wenn solche Menschen oder Gruppen von Handlungs- oder Ereignisfolgen geschädigt werden können, die nicht im Gegenzug von solchen Handlungen profitieren. Vertiefte Diskussionen zur Ableitung entsprechender Kriterien, insbesondere zur Gerechtigkeitsfrage, finden sich in [15] und [16]. Die prominentesten Beispiele solcher Fragen sind grosse Kernkraftunfälle sowie die Folgen des anthropogenen Klimawandels.

Bei Anwendung dieser Prinzipien auf den Bereich des Energieversorgungssystems sind nebst elementaren menschlichen Bedürfnissen wie Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit auch allgemeine Wertvorstellungen, wie Langfristigkeit (Verantwortung gegenüber zukünftigen Generationen), Sozialverträglichkeit und Verteilungsgerechtigkeit, zu berücksichtigen. Diese Bedürfnisse und Wertvorstellungen decken die Nachhaltigkeitskriterien nach Brundtland ab. Risiko wird deshalb nachfolgend als unerwünschte Folge von Handlungen oder Ereignissen in Bezug auf Menschen, Menschengruppen oder Lebensgrundlagen im erweiterten Sinne der oben genannten normativen Setzungen und Prinzipien aufgefasst und mit Hilfe eines Schadensmasses ausgedrückt. Dabei kann das Schadensmass unterschiedlich interpretiert werden. Bei der Risikoanalyse werden die Risiken objektiviert betrachtet, was nicht heisst, dass über die Resultate einer Risikoanalyse Einigkeit bestehen muss. Bei einer Risikowahrnehmung wird das Risiko anhand subjektiver Kriterien qualifiziert. Aus der Risikoanalyse und der Risikowahrnehmung kann eine Risikobewertung vorgenommen werden. Wenn es darum geht, Risiken finanziell zu quantifizieren, kann aus einer Risikoanalyse eine Monetarisierung vorgenommen werden, ausgehend von der Risikowahrnehmung wird eine Zahlungsbereitschaft bestimmt. Einen Überblick über dieses Vorgehen gibt Figur 1. Details zu den Begrifflichkeiten werden in Kapitel 2 erläutert.

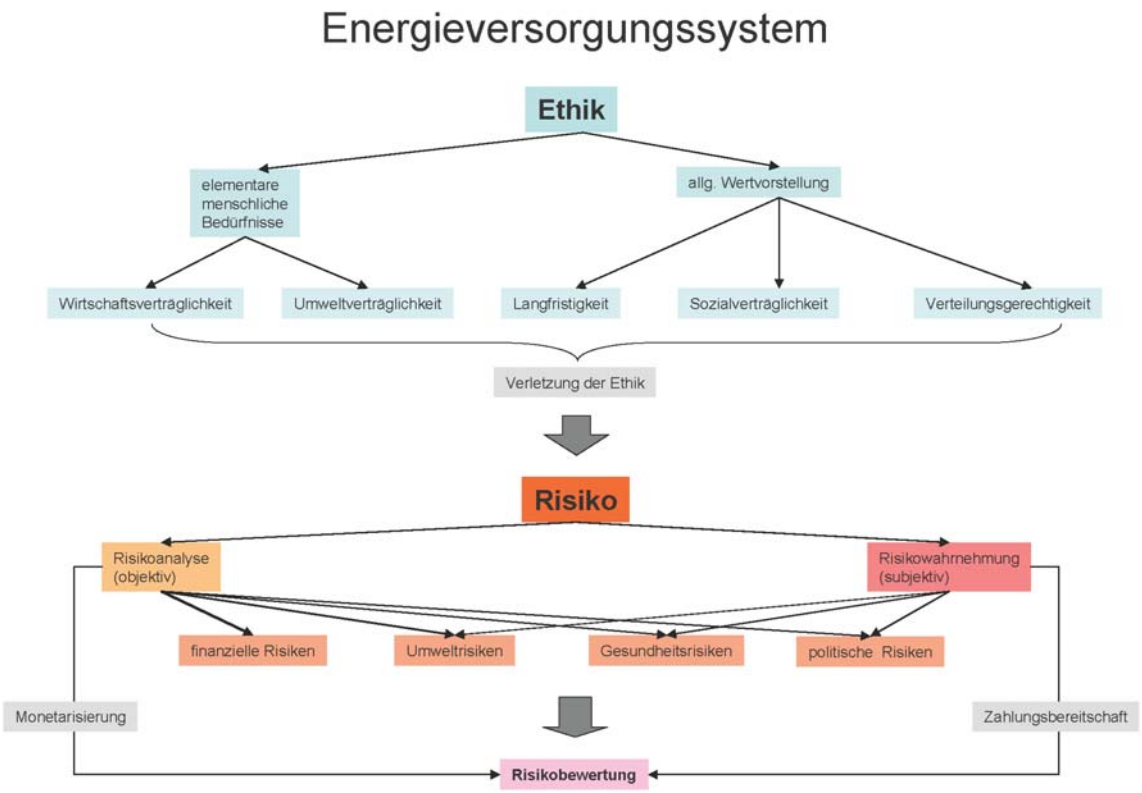
Verwandt mit dem Begriff Risiko sind die externen Kosten. Allgemeiner spricht man von externen Effekten und versteht darunter die unmittelbaren Auswirkungen der ökonomischen Aktivitäten eines Wirtschaftssubjektes auf die Produktions- oder Konsummöglichkeiten anderer Wirtschaftssubjekte, ohne dass eine adäquate Kompensation erfolgt. Je nach Wirkungsrichtung lassen sich positive externe Effekte, das heisst externe Nutzen, und negative externe Effekte, das heisst externe Kosten, unterscheiden (Quelle: [10]). Studien zu externen Kosten wurden zahlreiche erstellt. Anhang B im Bericht [1] liefert dazu eine gute Übersicht. Zwar können externe Kosten einen Anhaltspunkt für quantifizierbare Risiken geben, doch sind dabei zwei wesentliche Unterschiede zu erwähnen:

- Es gibt quantifizierbare Risiken, die in den anlagespezifischen Kostenberechnungen bereits internalisiert sind, so zum Beispiel Haftpflichtfragen während des Baus von elektrischen Anlagen. Damit sind solche Risiken in den Kostengrundlagen berücksichtigt, nicht aber in den externen Kosten.
- Der Bau eines Speicherkraftwerkes beinhaltet als Risiken unter Umständen unter anderem einen Verlust an Kulturland und an Artenvielfalt. Während der Verlust an Kulturland, als produktive Fläche, quantifiziert werden kann und somit allfällige externe Kosten angegeben werden können, ist dies beim Verlust der Artenvielfalt nicht möglich, da die „Auswirkungen auf die Konsummöglichkeiten anderer Wirtschaftssubjekte“ weder qualitativ noch quantitativ angegeben werden können.

Damit ist ersichtlich, dass Fragen nach den externen Kosten und Risiken zwar verwandt sind, sich aber letztlich doch stark voneinander unterscheiden, so dass in diesem Exkurs ausschliesslich auf das Risikothema eingegangen wird.

Als weiterführende Literatur sei an dieser Stelle auf [2] verwiesen. Darin wird in Ergänzung zu obigen Abgrenzungsfragen nebst dem Ansatz der Zahlungsbereitschaft – willingness to pay – auch der Ansatz der willingness to accept diskutiert.

Figur 1: **Übersicht über die Einbettung von Risiken im Energieversorgungssystem.**



Quelle: [15] mit eigenen Erweiterungen.

2 Risikobegriffe

Das nachfolgende Kapitel ist eine Zusammenfassung von [1] und soll in Kurzform Hintergrundinformationen zur Terminologie der Risikobegriffe geben.

2.1 Risiko, Schadensausmass, Eintrittswahrscheinlichkeit

Unter Risiken werden mögliche Folgen von Handlungen bezeichnet, die im Urteil der überwiegenden Zahl der Menschen als unerwünscht gelten. Dabei stehen vier Kernfragen im Vordergrund:

- Was sind erwünschte und was sind unerwünschte Folgen?;
- Wie lassen sich diese Folgen vorhersagen oder wenigstens intersubjektiv gültig abschätzen? (Vorhersagbarkeit der Folgen);
- Welche Möglichkeiten gibt es, Risiken in bestimmte Risikoklassen einzuteilen? (spezielle Charakteristika der Risiken);
- Welche Kombination und welche Verteilung von erwünschten und unerwünschten Folgen legitimieren die Ablehnung oder Zustimmung zu einer riskanten Handlung? (Risikoakzeptanz: welche unerwünschten Folgen sind für die Gesellschaft noch tragbar und welche nicht?).

Um die Fragen insbesondere nach Risikoklassen und die Kombination von erwünschten und unerwünschten Folgen zu beantworten, erweist es sich als zielführend, allen voran zwei Begriffe zu definieren: das Schadensausmass und die Eintrittswahrscheinlichkeit, während andere risikorelevante Aspekte ausgeblendet werden. Dabei handelt es sich um eine Verallgemeinerung der Angaben von relativen Häufigkeiten von unerwünschten Ereignissen. Auf der Basis von Erfahrungen aus der Vergangenheit und der Modellierung der Zukunft wird versucht, begrenzte Prognosen über zukünftige Ereignisse zu erstellen.

- Unter „Schaden“ wird eine von der überwiegenden Zahl der Menschen intuitiv als negativ bewertete Auswirkung einer menschlichen Aktivität oder eines Ereignisses verstanden. Als

Schadens- oder Gefährdungspotential gilt die Summe der möglichen Schäden, die durch eine Aktivität oder durch ein Ereignis ausgelöst werden könnten.
- Es gibt keine eindeutige Methode zur Bestimmung von Eintrittswahrscheinlichkeiten. Der Begriff Risiko wird dagegen auf die Schadensereignisse angewandt, bei denen Informationen oder auch nur Spekulationen über die relative Häufigkeit dieses Ereignisses über die Zeit vorliegen, der genaue Zeitpunkt des Ereignisses oder zumindest das Ausmass von zyklischen Ereignissen aber ungewiss bleiben. Tritt ein Ereignis immer wieder zu einem bestimmten Zeitpunkt ein (etwa Ebbe und Flut oder Jahreszeitenwechsel), ist dies ein sicheres Ereignis.

2.2 Risikoanalyse und Risikowahrnehmung

- Die Risikoanalyse verwendet wissenschaftliche Methoden mit dem Ziel, möglichst realitätsgetreu die Eintrittswahrscheinlichkeiten von konkreten Schadensfällen oder die Wahrscheinlichkeitsfunktion von Schadensausmassen auf der Basis von Beobachtungen, Modellierung und Szenariobildung zu bestimmen.
- Die Risikowahrnehmung braucht sich dagegen nicht an den stringenten Kriterien der Risikoanalyse auszurichten. Risikowahrnehmung beruht weitgehend auf persönlichen Erfahrungen, vermittelten Informationen und intuitiven Einschätzungen.

Die Risikoanalyse, die dem naturwissenschaftlich-technischen Risikokonzept entspricht, hat die Risikowahrnehmung weitgehend ausgeklammert und beschränkt sich im wesentlichen auf Sach-, Gesundheits- und Umweltschäden. Die psychologische und sozialwissenschaftliche Risikoforschung hat die Grundlage dafür geschaffen, dass auch die gesellschaftliche Risikoerfahrung erfasst und zum Teil erklärt werden kann. Was eine Gesellschaft als Risiko aufgreift oder wahrzunehmen vorgibt, steht deshalb nicht unbedingt im unmittelbaren Zusammenhang mit der Höhe des Risikos, definiert durch Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmass.

Die Beschäftigung mit der Risikowahrnehmung ist aus mehreren Gründen wichtig:

- Menschen richten ihr Verhalten nach ihrer Wahrnehmung und nicht nach wissenschaftlichen Risikomodellen aus.
- Die meisten Menschen sind nicht indifferent gegenüber Verteilungsmustern von Schäden über Zeit und Raum. Ob eine Risikoquelle 1’000 Menschen auf einen Schlag oder 1’000 Menschen kontinuierlich über einen bestimmten Zeitraum schädigt, ist in der Wahrnehmung der meisten Menschen keineswegs das gleiche. Ein typisches Beispiel dafür ist die Wahrnehmung eines selten auftretenden Flugzeugabsturzes mit vielen Todesopfern gegenüber täglich auftretenden Strassenverkehrsopfern. Empirische Studien zur Risikowahrnehmung haben regelmässig gezeigt, dass Risiken technischer Grossunfälle im Bewusstsein der meisten Menschen überrepräsentiert sind, während alltägliche Risiken systematisch unterschätzt werden. Insbesondere ist das mögliche Schadensausmass im Bewusstsein stärker präsent als die Eintrittswahrscheinlichkeit.

2.3 Risikobewertung

Risikobewertung bezeichnet Verfahren, die ein bestehendes Risiko hinsichtlich Akzeptanz und Zumutbarkeit für die Gesellschaft als ganzes oder für Gruppen der Gesellschaft beurteilen. Dabei werden die Abschätzungen und Ergebnisse der Risikoanalyse gemeinsam mit den durch empirische Studien erfassten Risikowahrnehmungen als Informationsbasis für eine rationale Abwägung herangezogen. Beide Informationen sind wichtige Bestandteile der Risikobewertung. Im einzelnen sollte die Risikobewertung folgende Grundsätze beachten:

- Technisch-naturwissenschaftliche Risikoanalysen sind hilfreiche und notwendige Instrumente einer rationalen Risikopolitik. Nur mit ihrer Hilfe lassen sich relative Risiken miteinander vergleichen und Optionen mit dem geringsten Erwartungswert von Schäden auswählen. Sie sind jedoch nicht alleinige Richtschnur.
- Risikoeigenschaften wie Eintrittswahrscheinlichkeit, Schadenspotential, Wahrnehmbarkeit, temporale Aspekte, Begrenzbarkeit der Folgen, direkte/indirekte Auswirkungen und Irreversibilität der Folgen sind wesentliche Merkmale der Risikowahrnehmung. Ihr universeller Charakter ermöglicht eine gemeinsame Orientierung gegenüber Risiken und schafft eine Basis für Kommunikation. Dieser Wahrnehmungsprozess kann und soll auch in der Risikobewertung Verwendung finden.

- Die verschiedenen Dimensionen des intuitiven Risikoverständnisses sind zu erfassen und zu messen. Risikowahrnehmung kann aber kein Ersatz für einen rationalen Umgang mit Risiken sein. Man sollte nicht die Bewertung von Risiken zum alleinigen politischen Massstab ihrer Akzeptanz machen.
- Selbst wenn man die besten wissenschaftlichen Erkenntnisse für alle Dimensionen gesammelt hätte (was in der Realität kaum möglich ist), ist damit die Entscheidung über technische Optionen noch lange nicht möglich. Abwägungen zwischen Optionen setzen immer normative Gewichtungen (Teil unserer gesellschaftlichen und kulturellen Strukturen, der die menschlichen sozialen Aktivitäten reguliert) zwischen den unterschiedlichen Zielen voraus. Wenn es auch klare Regeln für die Messung und Behandlung stochastischer Phänomene gibt, so liegt es in der Natur der Wahrscheinlichkeitsaussagen, dass sich daraus sehr unterschiedliche, sogar diametral entgegengesetzte Handlungsanweisungen ableiten lassen.

Unterschiedliche Risikopräferenzen führen dazu, dass sich die Frage nach der Akzeptanz des Risikos nicht eindeutig lösen lässt und sorgen damit für grosse politische Sprengkraft. Menschen verhalten sich in unterschiedlichem Mass risikofreudig oder -scheu:

- Der Hazardeur ist auf die Folgen fixiert, die ihm den grössten Gewinn versprechen, selbst wenn die Wahrscheinlichkeit für deren Eintreten gering ist.
- Ängstliche Naturen starren wie gebannt auf die Folgen, die besonders grosse Verluste mit sich bringen können, auch wenn deren Eintreffen höchst unwahrscheinlich ist.
- Kühle Rechner werden die Wahrscheinlichkeiten mit den Verlust- und Gewinnzahlen multiplizieren und diejenige Option auswählen, die ihnen den grössten Erwartungsnutzen versprechen.

2.4 Risikokonzept

Wie obige Begrifflichkeiten zeigen, ist es wesentlich, alle Teilaspekte der Risiken in einem ausgewogenen Verhältnis miteinander zu kombinieren. Um diesem Aspekt gerecht zu werden, wird in [16] ein Risikokonzept vorgeschlagen, das fünf Elemente umfasst:

- Ein ideales Verständnis von Risiko, das den objektiven Grad der Gefährdung widerspiegelt;
- Eine naturwissenschaftlich-technische Risikoabschätzung, die auf der Basis von Beobachtung und Modellbildung eine möglichst genaue Kenntnis der relativen Häufigkeiten von Schadensereignissen gemittelt über Zeit und Raum anstrebt, wobei diese Modellbildung mit zahlreichen Unsicherheiten verbunden sein kann;
- Eine allgemeine Risikowahrnehmung, die auf einer intuitiven Risikoerfassung und deren individueller oder gesellschaftlicher Bewertung beruht;
- Eine intersubjektive Risikobewertung, die auf einem oder mehreren Verfahren der rationalen Urteilsfindung über ein Risiko in Bezug auf dessen Akzeptabilität beziehungsweise Zumutbarkeit für die Gesellschaft als ganzes oder bestimmter Gruppen und Individuen beruht;
- Ein ausgewogenes Risikomanagement, das die geeigneten und angemessenen Massnahmen und Instrumente zur Reduzierung, Steuerung und Regulierung von Risiken je nach Risikotyp zusammenfasst.

3 Energiespezifische Risiken

Der Energieartikel (Art. 89) der Bundesverfassung verlangt von Bund und Kantonen eine ”im Rahmen ihrer Zuständigkeiten ausreichende, breit gefächerte, sichere, wirtschaftliche und umweltverträgliche Energieversorgung sowie einen sparsamen und rationellen Energieverbrauch“. Die drei Pfeiler Gesellschaft, Umwelt und Wirtschaft bilden auch die Grundlage der Nachhaltigkeitsdefinition von Brundtland.

Es bietet sich an im Bereich Gesellschaft Gesundheits- und soziopolitische Risiken zu unterscheiden, im Bereich Umwelt ökologische Risiken und im Bereich Wirtschaft finanzielle Risiken. Die vorgestellten Risiken werden jedoch nicht quantifiziert.

Es werden zwei Risikoklassen unterschieden:

- Typ I: Gesellschaftsrisiken, Umweltrisiken, finanziellen Risiken und politische Risiken;
- Typ II: ”Wertschöpfungsstufen-Risiken“. In Anlehnung an [11] werden folgende Wertschöpfungsstufen unterschieden: Energiebereitstellung, Systembetrieb, Übertragung (Transport), Verteilung, Detailhandel, Grosshandel.

Bei der weiteren Aufteilung der Typ I-Risiken ist zu unterscheiden zwischen Primär- und Sekundärrisiken. Als Primärrisiken werden unmittelbare Folgen einer Handlung bezeichnet, während Sekundärrisiken Risiken sind, die aus Primärrisiken abgeleitet werden können. Als Primärrisiken kommen alle Bereiche der Nachhaltigkeit in Frage, bei Sekundärrisiken nur finanzielle Risiken.

Beispiele:

- Primärrisiken: Gesundheitsrisiken als Folge eines möglichen Betriebsunfalles, ökologische Risiken wie Klimaerwärmung als Folge von Treibhausgasemissionen, finanzielle Risiken als Folge von Stromhandel oder Kraftwerk-Zubau;
- Sekundärrisiken: finanzielle Risiken als Folge von möglichen Gesundheitsrisiken (Folgen für das Gesundheitssystem durch Atembeschwerden bedingt durch den Ausstoss von Luftschadstoffen).

Um die verschiedenen Risiken in einem Energiesystem zu qualifizieren, werden als erstes mögliche Typ I-Risiken im Bereich Gesellschaft, Umwelt, Wirtschaft und Politik benannt, um danach (siehe Kapitel 3.5 und Anhänge 1-4) die Typ I- mit den Typ II-Risiken zu verbinden.

3.1 Gesellschaftsrisiken

Als Gesellschaftsrisiken werden nachfolgend Gesundheits- und soziopolitische Risiken unterschieden.

Gesundheitsrisiken beinhalten die Verletzung von körperlichem, seelischem und sozialem Wohlbefinden und können weiter unterteilt werden nach:

- heilbaren Verletzungen, Krankheiten und dauernder Invalidität;
- unmittelbaren Todesfällen, solchen nach längerer Krankheit oder nach jahrzehntelanger symptomfreier Latenzzeit;
- Missbildungen verursachende Schäden und Veränderungen am Erbgut;
- Angst, psychischen Stress, der zur Einschränkung der Handlungsfähigkeit und zur Arbeitsunfähigkeit führen kann.

Soziopolitische Risiken: Versorgungssicherheit, Auslandabhängigkeit, Terrorismus, Proliferation, Zugänglichkeit zu Energie beziehungsweise zu energieabhängigen Dienstleistungen (Zwei- oder Mehr-Klassen-Gesellschaft).

3.2 Umweltrisiken

Ökologie ist die Lehre der Wechselwirkungen sowohl zwischen den Lebewesen als auch zwischen Lebewesen und ihrer Umwelt.

Aus Energiesystemsicht beinhalten Umweltrisiken somit Emissionen und Immissionen vor allem durch Treibhausgase (Klimaänderung), Luftschadstoffe, Belastungen von Böden und Wasser und Landschaftsveränderungen.

3.3 Finanzielle Risiken

Risiken können zum Teil monetarisiert werden. Die grosse Unsicherheit besteht allerdings in der Einschätzung des finanziellen Risikos einer bestimmten Handlung, die mit Risiken verbunden ist. Finanzielle Risiken können als Folge unmittelbaren Handelns oder als Folgewirkung eines Primärrisikos auftreten. Bei den nachfolgenden Aufstellungen werden nur finanzielle Primärrisiken betrachtet.

Ein wichtiges finanzielles Primärrisiko ist zum Beispiel die Gewährleistung der Versorgungssicherheit, die sowohl im Energie- als auch im Elektrizitätssektor teuer ist. Gleichzeitig ist allerdings zu berück-

sichtigen, dass die Nichtgewährleistung der Versorgungssicherheit zu noch höheren finanziellen Ausfällen führen kann.

3.4 Politische Risiken

Unter politischen Risiken werden Risiken verstanden, die auf eine blockierte Energiepolitik, unzureichende Kommunikation zwischen Interessensgruppen und das Fehlen von langfristigen Entscheiden zurückzuführen sind. Diese werden ausführlich im Exkurs 20 diskutiert.

Als Beispiel sei erwähnt, dass es klar ist, dass die fossilen Ressourcen beschränkt sind und somit ausgehen werden, unsicher ist aber der Zeitpunkt. Die heutige Debatte thematisiert leider vor allem die Frage nach dem Wann statt vielmehr die Frage nach dem Wie weiter nach dem fossilen Zeitalter.

3.5 Bemerkungen

In den Anhängen 1-4 sind Übersichten zu möglichen Risiken in Form von Kreuztabellen mit Typ I und Typ II-Merkmalen angefügt. Diese Darstellungen erheben nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, sondern sollen vielmehr die Vielfalt der zu unterscheidenden Risiken aufzeigen. Um eine Vergleichbarkeit von Risiken zu erhalten, ist es sinnvoll, eine nutzengewichtete Grösse zu verwenden, im Energiebereich bei Gesundheitsrisiken Todesfälle pro GWh oder bei finanziellen Risiken CHF/GWh.

Im weiteren wird auch keine Wertung vorgenommen. Die zeitliche Dimension, die in solchen statischen Betrachtungen verloren geht, ist ebenfalls von Bedeutung. So sind zum Beispiel in Bezug auf die allgemeinen Wertvorstellungen Fragen über die Langzeitauswirkungen gewisser Risiken entscheidend und auch der Beurteilung von möglichen Schäden die in ferner Zukunft entstehen können im Vergleich zu Bedrohungen, die unmittelbar bevorstehen können.

4 Studien zu Risiken im Energiebereich

Umfassende Studien, in denen für das gesamte Energiesystem sowohl Risikoanalysen als auch die Risikowahrnehmung und eine Risikobewertung durchgeführt werden, gibt es keine. Vielmehr werden zu Einzelthemen Analysen und Studien durchgeführt, die für sich interessant sind, aber Vergleiche mit anderen Studien meist erschweren oder verunmöglichen, da die Fragestellung und die Voraussetzungen beziehungsweise Annahmen nicht vergleichbar sind. Dies führt in der Regel dazu, dass je nach Standpunkt die Studien umstritten sind. Nachfolgend wird ausdrücklich keine Wertung über die Qualität der Studien vorgenommen.

Bezugnehmend auf Figur 1, werden einige Arbeiten nach Risikoanalyse, -wahrnehmung und –bewertung aufgelistet und kurz zusammengefasst:

- Risikoanalyse:
  - Risiken von Energieversorgungssystemen
  - Severe Accidents in the Energy Sector
  - WHO: Health effect of the Chernobyl accident: an overview 2006
- Risikowahrnehmung:
  - Risikowahrnehmung Energieperspektiven 2035 (Quelle: [6])
  - Marginale Zahlungsbereitschaft für eine erhöhte Internalisierung des Risikos von Kernkraftwerken (Quelle: [18])
  - Zahlungsbereitschaft für die Verhinderung einer globalen Klimaerwärmung (Quelle: [11])
- Risikobewertung:
  - Katarisk (Quelle: [7], [8], [9])

4.1 Risikoanalyse

4.1.1 Risiken von Energieversorgungssystemen

Die Studie „Risiken von Energieversorgungssystemen“ (Quelle: [4]) wurde von A. F. Fritzsche im Rahmen der Expertengruppe Energieszenarien (EGES) im Jahre 1988 durchgeführt und untersucht Risiken von Energiesystemen zur Stromerzeugung. Sie wurde als Literaturübersicht konzipiert.

Der Bericht beschränkt sich auf Gesundheitsrisiken aufgeteilt in Risiken für Berufsleute und für die übrige Bevölkerung. Dabei werden innerhalb der Erzeugungstechnologien Erkrankungs-, Todesfall- und Unfallrisiken unterschieden und nach Wertschöpfungsstufen aufgeteilt, begonnen beim Abbau der Rohstoffe bis zur Stilllegung der Kraftwerke beziehungsweise bis zur Endlagerung der Abfälle. Bei dieser Arbeit handelt es sich in erster Linie um eine reine Risikoanalyse, weshalb als Vergleichsgrösse die Anzahl Erkrankungs-, Todes- oder Unfälle pro Gigawattjahr angegeben wird. In einem Zusatzkapitel werden die Risiken von seltenen Grossunfällen betrachtet, was der Idee der Risikowahrnehmung nahekommt.

Die Quantifizierung von Gesundheitsrisiken ist schwierig, weil für zahlreiche Technologien keine umfassenden Untersuchungen existieren und es sich bei Unfällen im Energiesystem in den meisten Fällen um seltene Ereignisse handelt, so dass eine statistische Analyse erschwert wird. Während die Auswirkungen eines Kernkraftwerkunfalls am häufigsten untersucht wurden, fehlen für die Wasserkraftnutzung solche Untersuchungen weitestgehend. Dabei ist insbesondere auch zu berücksichtigen, dass die Sicherheitsvorschriften und Sicherheitsvorkehrungen in den einzelnen Ländern sehr unterschiedlich sind, so dass Analogschlüsse vom Studienland auf die Schweiz schwierig sind. Aus diesem Grund werden im letzten Teil der Arbeit anhand konkreter Energieoptionen für die Schweiz die Risiken entsprechend des Stromverbrauchs und der Angebotsvarianten aufsummiert und erlauben damit Vergleiche zwischen den Szenarien.

Was die quantitativen Resultate der Studie anbelangt, werden diese an dieser Stelle nicht zitiert und zwar aus mehreren Gründen:

- Die Studie ist bereits knapp 20 Jahre alt. Seither hat die Diskussion über Risiken erst richtig eingesetzt, was zur Folge hat, dass die Mess- und Beurteilungsmethoden sich verbessert haben;
- Bei den erneuerbaren Energien wie Wind, Biomasse und Geothermie wurden technologisch wesentliche Fortschritte erzielt. Somit dürften die Abschätzungen aus dieser Studie heute keine Gültigkeit mehr haben.
- Die Berücksichtigung von Gesundheitsrisiken ist wichtig aber aus heutiger Sicht sind in Bezug auf die ethischen Grundsätze gemäss Figur 1 auch Fragen der Umwelt mitzuberücksichtigen.

4.1.2 Severe Accidents in the Energy Sector

Das Paul Scherrer Institut (PSI) hat die Datenbank ENSAD (Energyrelated Severe Accident Database) über weltweit schwere Unfälle im Energiebereich erstellt und diese im Jahre 1998 in einer umfassenden Arbeit vorgestellt (Quelle: [5]).

Als schwerer Unfall wird ein Ereignis definiert, bei dem mindestens eines der nachfolgenden Kriterien eintritt:

- Mindestens 5 Todesfälle;
- Mindestens 10 Verletzte;
- Mindestens 200 Evakuierte;
- Ein weit reichendes Verbot des Verzehrs von Lebensmitteln;
- Eine Freisetzung von mindestens 10'000 Tonnen Kohlenwasserstoffen;
- Die Säuberung einer Land- oder Wasserfläche von mindestens 25 km^2;
- Wirtschaftliche Schäden von mindestens 5 Millionen USD (Preisstand 2000).

Damit werden in dieser Arbeit alle Nachhaltigkeitskriterien mitberücksichtigt, was gegenüber der ersten Studie zu wesentlich umfassenderen Aussagen genutzt werden kann. In [13] hat das PSI eine Zusammenfassung publiziert, der auch die nachfolgenden Figuren 2 und 3 entnommen werden. In Figur 2 werden die relativen Anteile der Unfalltodesopfer pro Element der Wertschöpfungskette nach Energieträger ausgewiesen. Daraus wird ersichtlich, dass bei Kohle, Wasserkraft und Kernenergie die Risiken auf jeweils eine Wertschöpfungsstufe konzentriert sind, während beim Erdöl und Erdgas die Risiken gleichmässiger über die verschiedenen Stufen auftreten. Von den 18'400 Einträgen bis ins Jahr 2000 sind rund 3'100 als schwere Unfälle deklariert, wovon knapp 2'100 mit fünf oder mehr Todesfällen. Davon ereigneten sich rund 75 Prozent in Nicht-OECD-Ländern. Die schweren Unfälle haben trotz Technologieverbesserungen im Energiebereich seit den späten sechziger Jahren zugenommen, parallel zum Bevölkerungswachstum und dem steigenden Energieverbrauch. Katastrophen in hoch entwickelten Ländern führen häufig zu immensen wirtschaftlichen Schäden, wobei nur ver-

gleichsweise wenige Todesopfer zu beklagen sind, während es in weniger entwickelten Ländern tendenziell umgekehrt ist. Um bei den Kernkraftwerken Risiken für die Bevölkerung abzuschätzen, hat das PSI ein „Probabilistic Safety Assessment“ (PSA, siehe Figur 3) durchgeführt. Dieses Verfahren wird in [5] beschrieben.

Das Gros der Unfälle in den fossilen Umwandlungsstufen ereignen sich nicht im Kraftwerk, sondern in anderen Gliedern der Energiekette, während die Wasserkraft nur Unfälle im Bereich Staudamm/Reservoir kennt. Bei den fossilen Energieträgern ist Flüssiggas am unfallträchtigsten, aber auch Erdöl und Kohle schneiden bedeutend schlechter ab als Erdgas.

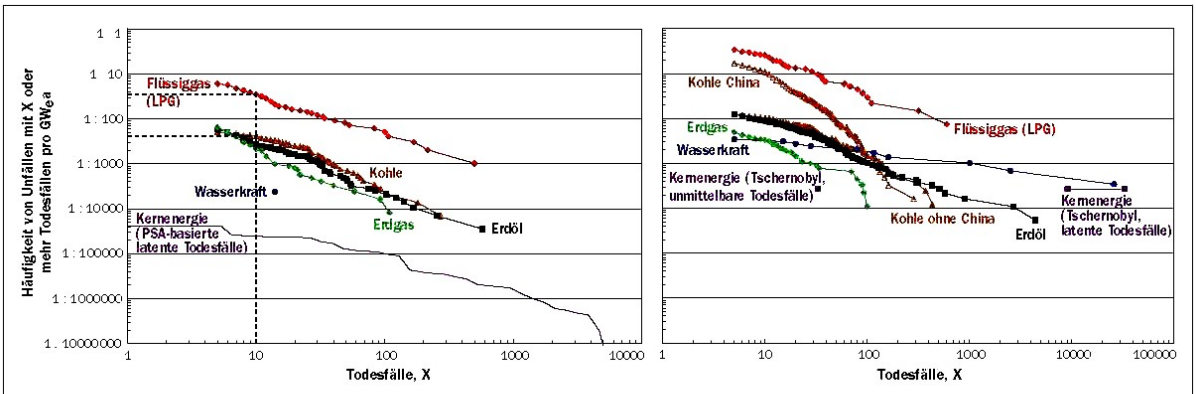
Die Arbeit des PSI nimmt keine Risikobewertung vor, da die Risikowahrnehmung weder beurteilt noch taxiert wird. Da aber gemäss [16] die Wahrnehmung des Risikos nicht unabhängig von der Risikoanalyse ist und sich deshalb auf Dauer nur die Risikowahrnehmungen durchsetzen, die sich mit der Erfahrung von realen Schäden decken, könnte diese umfassende Datenbank als wichtigste Arbeit für eine weiterführende Diskussion auch zur Risikowahrnehmung und Risikobewertung dienen.

Figur 2: **Relative Anteile der Unfalltodesopfer in der Wertschöpfungskette.**

	Kohle	Erdöl	Erdgas	Wasserkraft	Kernenergie
Exploration und Förderung / Aufbereitung	Explosionen und Feuer in Kohlebergwerken	Bohrlochausbrüche, Unfälle auf Bohrplattformen auf See	Bohrlochausbrüche, Unfälle auf Bohrplattformen auf See		
Ferntransport		Tankerunfälle auf See	Pipelineunfälle		
Verarbeitung / Speicherung		Prozessunfälle in Raffinerien und Tankfarmen			
Regionale / Lokale Verteilung		Umkippen und Kollisionen von Tanklastzügen	Pipelineunfälle		
Kraftwerke oder Heizungen			Prozessunfälle	Überlauf oder Bruch des Staudamms	Kernschmelze mit grosser Freisetzung von Radioaktivität
Abfallbehandlung / -entsorgung					
	0–5 %	5–15 %	15–30 %	30–60 %	60–100 %

Quelle: [13].

Figur 3: **Schadenshäufigkeiten für OECD- (links) und Nicht-OECD-Länder (rechts).**



Grafik 5a und 5b: Schadenshäufigkeitskurven für a) OECD- und b) Nicht-OECD-Länder.
Wie wird ein F-N Diagramm gelesen? Nimmt man beispielsweise eine Opferzahl von 10, so zeigt sich, dass in der OECD die Häufigkeit eines Unfalls mit 10 oder mehr Toten für Kohle rund eine Grössenordnung tiefer liegt als für LPG.

Quelle: [13].

4.1.3 Studie der Weltgesundheitsorganisation zum Unfall von Tschernobyl

Am 26. April 1986 ereignete sich in Tschernobyl als Folge einer Kernschmelze und Explosion im Kernreaktor Tschernobyl Block 4 eine Katastrophe. Nach der Katastrophe hatten hunderttausende Helfer, sogenannte „Liquidatoren", einen provisorischen Betonmantel um den explodierten Reaktor errichtet, der inzwischen an vielen Stellen eingerissen ist und einzustürzen droht. Die Weltgesundheitsorganisation (Quelle: [14], [17]) hat einen Bericht erstellt, in dem drei Personengruppen unterschieden werden:

- Liquidatoren: rund 600'000 Feuerwehrleute und Aufräumarbeiter aus allen Teilen der Sowjetunion.
- Stark exponierte Personengruppe der Bevölkerung: gut 600'000 Personen. Diese Gruppe hat, aufsummiert über die letzten 20 Jahre etwa eine Verdoppelung der Dosis gegenüber der natürlichen Strahlung aufgenommen.
- Schwach exponierte Personengruppe der Bevölkerung: rund fünf bis sechs Millionen Personen.

Gesundheitliche Schadensbilder

Es können verschiedene Krankheitsbilder auftreten:

- Akute Strahlenkrankheit
- Schilddrüsenkrebs: es wurde eine deutliche Zunahme festgestellt, insbesondere bei Personen, die im Zeitpunkt des Unfalls Kinder oder Jugendliche waren. In Weissrussland, Russland und der Ukraine sind in dieser Bevölkerungsgruppe seither knapp 5'000 Erkrankungen gemeldet worden. Ein Zusammenhang mit der Strahlung von Tschernobyl gilt als gesichert.
- Leukämie und andere Krebsarten: die Ergebnisse sind für eine gesicherte Aussage noch nicht ausreichend. Die WHO hat vor allem die von Hiroshima und Nagasaki her bekannten Dosis-Wirkungs-Beziehungen abgeschätzt, wie viel strahlenbedingte Krebstodesfälle eintreten können. Für 200'000 Liquidatoren sind dies 2'200, für 135'000 Evakuierte aus der 30 km Zone 160 und für 270'000 Bewohner des stark kontaminierten Gebietes 1'600, zusammen also 3'960. Für diese insgesamt rund 600'000 stark exponierten Personen ist, unabhängig von der Strahlung eine gesamte Krebstodeszahl von rund 120'000 Personen zu erwarten.
- Erbschäden: Mit den vorliegenden Untersuchungen ist es der WHO nicht gelungen, einen strahlenbedingten Einfluss auf Fruchtbarkeit, Anzahl der Totgeburten, Häufigkeit von Missbildungen Neugeborener sowie allgemeine Gesundheit, Überlebenschancen und Intelligenz von Kindern strahlenexponierter Eltern nachweisen zu können.
- Katarakte (Grauer Star): Trübungen der Augenlinse bei Personen mit hohen Dosen wurden festgestellt.
- Herzkreislauferkrankungen: Erfahrungen aus der Strahlentherapie haben gezeigt, dass ionisierende Strahlung mit hohen Dosen Herzkreislauferkrankungen auslösen kann. Bei russischen Liquidatoren wurde eine eindeutige Zunahme beobachtet.
- Psychologische Effekte: Unsicherheit, Umsiedelung, Entwurzelung, gesellschaftliche Stigmatisierung, sinkender Lebensstandard, Angst vor gesundheitlichen Folgen und dergleichen mehr haben zu erheblichem psychischem Stress mit negativen Auswirkungen auf die Gesundheit geführt. Alkohol und Tabakkonsum haben deutlich zugenommen und die Selbstmordrate ist gravierend gestiegen. Es sind diese psychologischen Effekte, die Tschernobyl zum bisher grössten Industrieunfall in der Menschheitsgeschichte machen. Diese Todesfälle überwiegen die Strahlenopfer um ein Vielfaches.

Während obige Betrachtungen auf Individualdosen beruhen, wird vor allem in [3] darauf hingewiesen, dass auch Kollektivdosen zu berücksichtigen sind. Kollektivdosen sind die Summe der Individualdosen aller einer Strahlung ausgesetzten Personen innerhalb eines bestimmten Bereichs. Gemäss [3] könnten diese Kollektivdosen, dessen glaubwürdigste Schätzung gemäss diesem Bericht 600'000 Personen-Sievert beträgt und die zu 36 Prozent auf die Bevölkerung von Weissrussland, Ukraine und Russland entfallen, zu 53 Prozent auf das übrige Europa und 11 Prozent auf die übrige Weltbevölkerung, weitere rund 30'000 – 60'000 zusätzliche Todesfälle fordern.

4.2 Risikowahrnehmung

4.2.1 Risikowahrnehmung Energieperspektiven 2035

Diese Studie wird integral als Exkurs 20 publiziert (Quelle: [6]). Deshalb wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen.

4.2.2 Marginale Zahlungsbereitschaft für eine erhöhte Internalisierung des Risikos von Kernkraftwerken

Die Untersuchung „Marginale Zahlungsbereitschaft für eine erhöhte Internalisierung des Risikos von Kernkraftwerken“ (Quelle: [18]), die von Prof. Zweifel am sozialökonomischen Institut der Universität Zürich durchgeführt wurde, „setzte sich zum Ziel herauszufinden, wieviel die schweizerischen Stimmbürger zusätzlich über den Strompreis für eine erhöhte finanzielle Sicherheit bei einem schweren nuklearen Unfall zu zahlen bereit sind.“

Diese Fragestellung wurde mit dem Ansatz der marginalen Zahlungsbereitschaft untersucht. Dabei kamen die Studiennehmer zum Schluss, „dass die marginale Zahlungsbereitschaft für mehr finanzielle Sicherheit durch erhöhte Versicherungsdeckung über den geltenden Betrag von 1 Mrd. CHF hinaus eindeutig von Null verschieden ist; mehr als die Hälfte der Befragten ist bereit, 0.12 Rp./kWh und mehr dafür zu bezahlen. Die marginale Zahlungsbereitschaft sinkt jedoch mit zunehmender Versicherungsdeckung ab und erreicht noch vor der vollen Deckung den Nullwert.“

In einem Kommentar zur Studie hält Prof. Borner vom Institut für angewandte Wirtschaftsforschung der Universität Basel fest, „dass die Studie nicht die marginale Zahlungsbereitschaft für die Reduktion des Risikos eines Schadensfalls, sondern die marginale Zahlungsbereitschaft für die Versicherungsdeckung für private finanzielle Schäden ermittelt.“ Daraus schliesst er, dass „die Studie wenig bis kaum relevant ist für das, was die Menschen wirklich bewegt. Wenn ganze Landstriche für lange Zeit unbewohnbar würden, interessiert es mich wenig, ob mein Auto und meine Fensterscheiben versichert waren!“

4.3 Risikobewertung

4.3.1 Katarisk: Katastrophen und Notlagen in der Schweiz; Eine Risikobeurteilung aus Sicht des Bevölkerungsschutzes

Das Bundesamt für Zivilschutz hat eine vergleichende Übersicht über die Katastrophen und Notlagen in der Schweiz aus dem Jahre 1995 überarbeitet, aktualisiert und ergänzt (Quelle: [7], [8], [9]). Alle Berichte sind unter www.katarisk.ch erhältlich (Stand Oktober 2006). In einer Risikoanalyse wurden die Gefahren bezüglich ihrer Häufigkeit und des erwarteten Schadensausmasses anhand von Schadenindikatoren beschrieben und quantifiziert. Die Risikobewertung berücksichtigte sodann die Zahlungsbereitschaft der Gesellschaft zur Verhinderung von Schäden sowie eine Risikoaversion gegenüber Grossereignissen. Mit dem Aversionsfaktor wird dem Umstand Rechnung getragen, dass die Risikoaversion in Abhängigkeit von der Schwere des Ereignisses zunimmt. In der Katarisk-Studie wurde eine exponentielle Zunahme unterstellt.

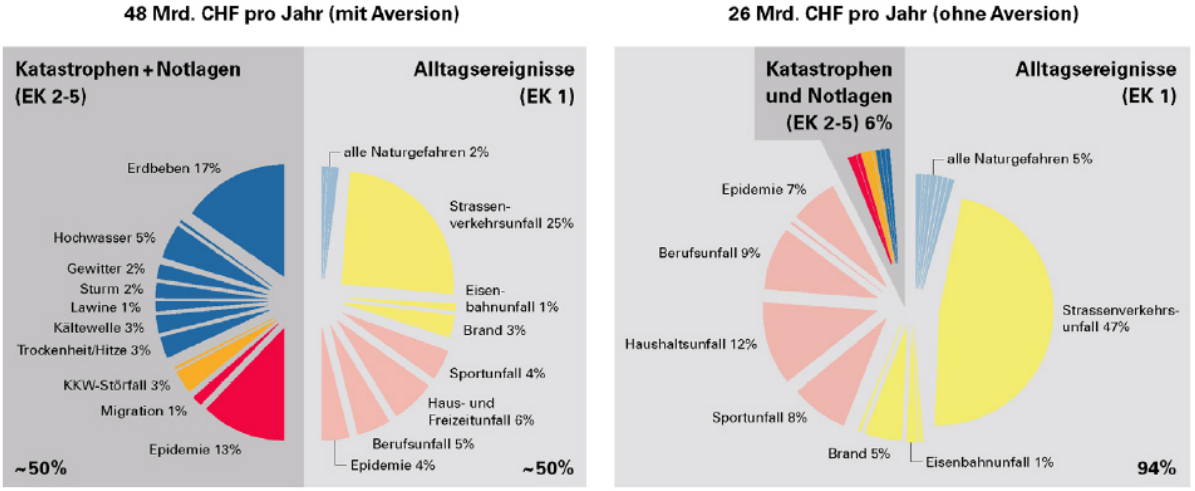
Als technische Gefahren aus dem Energiebereich wurden der

- „Notfall bei Stauanlagen“: Versagen mit Bruch oder Überflutung von Talsperren, welche mindestens 10 m Stauhöhe über Niederwasser des Gewässers beziehungsweise über Geländehöhe aufweisen oder bei wenigstens 5 m Stauhöhe einen Stauraum von mehr als 50'000 m^3 abschliessen. Solche Ereignisse sind unter anderem auch infolge von Fels- und Bergstürzen in einen Stausee denkbar;
- „KKW-Störfall“: Unfälle mit einer Freisetzung radioaktiver Substanzen. Freisetzen infolge eines Naturereignisses werden im Schadensbild der entsprechenden Naturgefahr berücksichtigt.

Figur 7 zeigt auf, wie sich das gesamte monetarisierte Risiko über die Ereignisklassen, ohne und mit der Berücksichtigung einer Aversion gegenüber Katastrophen und Notlagen zusammensetzt – aufgeschlüsselt auf Alltagsereignisse sowie Katastrophen und Notlagen. Der Anteil der Risiken infolge Katastrophen und Notlagen am Gesamtrisiko schwindet ohne die Berücksichtigung der Aversion auf

unter 10 Prozent. Das gesamte monetarisierte Risiko mit Aversion ist rund zweimal grösser als ohne Aversion.

Figur 7: **Zusammensetzung des monetarisierten Risikos in Alltagsereignisse und Katastrophen und Notlagen mit und ohne Aversion.**



Quelle: [7].

4.4 Andere Studien

Nachfolgend werden noch zwei Studien erwähnt, die nur am Rande einen Zusammenhang zum Thema Risiken im Energiebereich aufweisen. Deshalb wird darauf nicht weiter eingegangen:

- Zahlungsbereitschaft für die Verhinderung einer globalen Klimaänderung (Quelle: [11])
- Verbesserte Deckung des Nuklearrisikos zu welchen Bedingungen? (Quelle: [19] mit Koreferaten)

5 Schlussfolgerungen

- Das Betreiben von Energiesystemen ist mit Risiken verbunden;
- Die Einschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Unfällen ist schwierig. Je mehr Fachwissen vor allem über die Technologien und Funktionsweise der einzelnen Systemkomponenten vorhanden ist, desto besser kann diese Eintrittswahrscheinlichkeit abgeschätzt und beurteilt werden, um verlässliche Abschätzungen machen zu können;
- Die Abschätzung des Schadensausmasses von Unfällen ist mit grossen Unsicherheiten verbunden. Diese Unsicherheiten nehmen tendenziell mit der Höhe des Schadensausmasses zu.
- Die Monetarisierung von Risiken ist ein Versuch, unterschiedliche Risikoarten vergleichbar zu machen. Dabei ist die Festsetzung von Risiko-Vermeidungskosten in Form von Zahlungsbereitschaftsbeiträgen eine Schlüsselgrösse gleichzeitig aber nicht objektivierbar.
- Bereits bei der Risikoanalyse bestehen zwischen einzelnen Studien grosse Unterschiede. Es erstaunt deshalb nicht, dass unter Berücksichtigung von zusätzlichen Elementen der Risikowahrnehmung die Risikobewertung, je nach Technologie, Bandbreiten aufweist, die keine grosse Aussagekraft mehr haben.
- Literaturübersichten haben den Vorteil, dass sie sich auf breite Grundlagen abstützen können. Die Auswahl der darin berücksichtigten Arbeiten ist allerdings nicht immer transparent und die Resultate nicht immer plausibel und vergleichbar.
- Risiken zu Kernenergieunfällen sind am besten dokumentiert und werden gleichzeitig am kontroversesten diskutiert. Innerhalb des Energiesystems ist die Eintrittwahrscheinlichkeit eines grossen Unfalls im Vergleich zu anderen Technologien klein, aber das Schadensausmass ist gross. Die Risikoanalyse kann diese Differenzierungen nicht vornehmen, weshalb die Risikowahrnehmung von Bedeutung ist.
- Grundlagenarbeiten sind auf dem Gebiet der Risikoanalyse für alle Technologien notwendig. Ebenso wichtig ist es, dieses Wissen so aufzubereiten, dass es für die Bevölkerung möglich ist, dieses in ihre Risikowahrnehmung und -beurteilung zu integrieren.

6 Literatur

[1] Ecoplan: Energieperspektiven – volkswirtschaftliche Auswirkungen. Bern 2007.

[2] Ewers Hans-Jürgen, Klaus Rennings: Abschätzung der Schäden durch einen sogenannten „Super-Gau“. Prognos-Schriftenreihe „Identifizierung und Internalisierung externer Kosten der Energieversorgung“. Basel 1992

[3] Fairlie Ian, David Sumner: The other report on Chernobyl (TORCH) An independent scientific evaluation of health and envirnomental effects 20 years after the nuclear disaster providing critical anaysis of a recent report by the international atomic energy agency (IAEA) and the world health organisation (WHO)

[4] Fritzsche A. F.: Risiken von Energieversorgungssysteme. Expertengruppe Energieszenarien Schriftenreihe Nr. 21. Bern 1988

[5] Hirschberg Stefan, G. Spiekermann, R. Dones: Severe Accidents in the Energy Sector. PSI Bericht Nr. 98-16. Villigen 1998.

[6] Holenstein Matthias: Risikowahrnehmung und Thesen zur Debatte Energieperspektiven 2035 Übersicht zur Risikowahrnehmung von Interessensvertretern. Stiftung Risiko-Dialog, St. Gallen 2006.

[7] Katarisk: Katastrophen und Notlagen in der Schweiz: Ergebnisse der Risikobewertung. Bern 2004.

[8] Katarisk: Katastrophen und Notlagen in der Schweiz: Erläuterung der Methode. Bern 2004.

[9] Katarisk: Katastrophen und Notlagen in der Schweiz: Grundlagen und Informationen zur Risikobewertung: Angaben pro Gefahrenart. Bern 2004.

[10] Krewitt Wolfram, B. Schlomann: Externe Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Stuttgart 2006.

[11] Ledergerber Elmar, W. Ott, R. Iten, D. Peter, B. Jäggin: Zahlungsbereitschaft für die Verhinderung einer globalen Klimaänderung. Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern 1994.

[12] Plaut. 2003. Vorprojekt Marktmodelle (Schlussbericht). Bern: BFE.

[13] PSI: Schwere Unfälle im Energiebereich. Energie-Spiegel. Villigen 2005.

[14] Roth Eike: Tschernobyl: Die IAEA spricht von 56, Greenpeace von 93000 Todesopfern. Wer hat Recht?. Energie-Fakten, 2006.

[15] Streffer et. al: Ethische Probleme einer langfristigen globalen Energieversorgung. De Gruyter, Berlin 2005.

[16] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltrisiken (WBGU): Welt im Wandel: Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken. Springer, Berlin 1999.

[17] WHO. Health effect of the Chernobyl accident: an overview, 2006.

[18] Zweifel Peter, Yves Schneider: Marginale Zahlungsbereitschaft für eine erhöhte Internalisierung des Risikos von Kernkraftwerken. BFE, Bern 2002.

[19] Zweifel Peter, Roland Umbricht: Verbesserte Deckung des Nuklearrisikos zu welchen Bedingungen? BFE, Bern 2002.

Anhang 1: Übersicht über die einzelnen Prozesse des Energieversorgungssystems.

	Abbau, Rohstoffe (Primärenergieträger)	Umwandlung (Fuel Cycle)	Transport	Erzeugung	Systembetrieb	Übertragung, Transport	Verteilung	Detailhandel / Verbrauch	Grosshandel / Börse
Tabelle 1:									
Strom	---	---	---	Bau und Betrieb von Kraftwerken (Turbine, Generator, Transformator)	Systemdienstleistungen, Kraftwerkabruf, Koordination von Kraftwerks- und Übertragungsnetzinvestitionen	Planung, Bau und Betrieb von Übertragungsnetzen (Hoch- und Höchstspannung) zum Transport von Strom über weite Distanzen	Planung, Bau und Betrieb von Verteilnetzen (Nieder- und Mittelspannung) zur regionalen und lokalen Verteilung von Strom	Kauf und Verbrauch von Strom der Endverbraucher (Licht, elektrische Geräte, Elektro-Heizungen)	Handel, Ein- und Verkauf von Strom in grossen Mengen (Spot- und Terminhandel)
Wärme	---	---	---	Bau und Betrieb von Anlagen (WKK, KVA, ARA)	---	---	Fernwärmenetze	Kauf und Verbrauch von Wärme der Endverbraucher (Heizungen)	Handel, Ein- und Verkauf von Heizöl in grossen Mengen
Treibstoff	---	Bau und Betrieb von Erdölraffinerien	---	---	---	Treibstofftransport	• Tankstellennetz • Kauf von Treibstoff (Land-Wasser-, Luftverkehr)	Verbrauch von Treibstoff (Land- Wasser-, Luftverkehr)	Handel, Ein- und Verkauf von Treibstoff in grossen Mengen
Tabelle 2: Energieträger									
Fossile Energieträger									
Erdöl	Rohölgewinnung on- und offshore (Prospektion, Tiefbohrung, Bau und Betrieb von Ölforderungsanlagen)	Erdölraffination (Destillation, Crack- und andere chemische Prozesse)	Öltransport (Eisenbahn, Schiff, Strasse, Pipeline)	Bau und Betrieb des Ölkraftwerks			Tankstellennetz	Installation und Betrieb von Ölheizungen	Rohöl, Heizöl, Benzin, Diesel
Erdgas	Erdgasgewinnung on- und offshore (Prospektion, Tiefbohrung, Bau und Betrieb von Gasforderungsanlagen)	Gasverarbeitung (Trocknung, Reinigung, Beimischung Odoriermittel)	Gastransport (Pipeline, Schifftransport [LNG])	Bau und Betrieb des Erdgaskraftwerks			Tankstellennetz	Installation und Betrieb von Gasheizungen, Gaskochherd	Erdgas, LNG
Kohle (Braun- und Steinkohle)	Kohlengewinnung, Kohlenförderung (Berg- und Tagbau)	• Kohlenaufbereitung (brechen, sortieren und sonstige Aufbereitung) • Entsorgung der Verbrennungsrückstände	Kohlentransport (Eisenbahn, Schiff, Lastkahn, Strasse, Pipelines [Kohlestaub in Wasser])	Bau und Betrieb des Kohlekraftwerks					Braunkohle, Steinkohle
Nuklear	Uranerzförderung (Berg- und Tagbau, in situ)	• Uranverarbeitung: Erzaufbereitung, Konversion, Anreicherung, Umwandlung, Herstellung von UO2-Pillen, Fabrikation von Brennstoffelementen) • Wiederaufbereitung des Brennstoffs (Abtrennung von Restbestandteilen an spaltba-	Nukleare Transporte	Bau und Betrieb des Kernkraftwerks					

		rem Material) • Nukleare Entsorgung (Beseitigung aller in den verschiedenen Prozessstufen laufend entstehenden radioaktiven Abfälle, Demontage und endgültige Stilllegung aller in diesem Zyklus verwendeten technischen Anlagen.)							
Erneuerbare Energieträger									Zertifikatehandel EE
Wasser	---	---	Zuflüsse, Bau und Betrieb von Stollen, Leitungen	Bau und Betrieb Staumauern, Zentralen Lauf-, Speicher-, Umwälzwerke					
Geothermie (Wärme und Strom)	---	---	---	Bau und Betrieb Hot Dry Rock (Wärme, Strom)				Installation und Betrieb Erdwärmesonde mit Wärmepumpe (Wärme)	
Wind	---	---	---	Bau und Betrieb On- und Offshoreanlagen	Netzintegration (stochastisches Windaufkommen)				
Biomasse (Wärme, Strom, Treibstoff)	Gewinnung Biomasse (Waldholz)	---	Transport unbearbeitete Biomasse	• Vergärung (Treibstoff) • Vergasung: Fischer-Tropsch Verfahren (Treibstoff) • Bau und Betrieb Biogasanlagen: Vergärung, Verbrennung (Strom)		Treibstofftransport		• Installation und Betrieb Holzheizungen (Wärme) • Treibstoffverbrauch	
Photovoltaik (Strom)	Gewinnung von Silizium	Produktion von Photozellen	---	---	Netzintegration (Einspeisung von Strom ins Netz)			Installation und Betrieb Photozellen	
Solarthermie (Wärme)	---	---	---	---					
Brennstoffzellen									

Niederspannung: bis 1 kV; Mittelspannung (>1 kV bis 30 kV); Hochspannung (>30kV bis 150 kV); Höchstspannung (über 150 kV)

Anhang 2: Übersicht über Gesundheitsrisiken im Energieversorgungssystem.

Abkürzungen: R: Risiko, GR: Gesundheitsrisiko, ER: Erkrankungsrisiko, UR: Unfallrisiko, TR: Todesfallrisiko; BL: Berufsleute, B: Bevölkerung

	Abbau, Rohstoffe	Umwandlung (Fuel Cycle)	Transport	Erzeugung	Systembetrieb	Übertragung, Transport	Verteilung	Detailhandel / Verbrauch	Grosshandel / Börse
Tabelle 3: Risiken nach Energieträger									
Fossile Energieträger									
Erdöl	UR für BL: Prospektion, Tiefbohrungen, Bau und Betrieb von Ölförderungsanlagen, Off- und Onshore.	UR für BL: Raffinationsprozesse	R für BL: Strasse, Eisenbahn, Schiff, Pipeline.	UR für BL: • Bau und Betrieb von Ölkraftwerken ER für B: • Emission von **SO2** und Staub, **Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)** • Radioaktivität von Schweröl**.**				R: Installation und Betrieb von Ölheizungen	
Erdgas	UR für BL: Prospektion, Tiefbohrungen, Bau und Betrieb von Gasförderungsanlagen. Off- und Onshore.	UR für BL: • Gasverarbeitung: Trocknung, Reinigung und Beimischung eines Odoriermittels	R für BL: Gastransport (Pipeline, Schifftransport [LNG])	UR für BL: • Bau und Betrieb von Ölkraftwerken. ER für B: • Emission von **SO2**, **PAK**. • Radiologische Emissionen				R: Installation und Betrieb von Gasheizungen, Gaskochherd	
Kohle (Braun- und Steinkohle)	R für BL: • UR: Mechanisierung im Tag- und Bergbau • TR: Bestrahlung durch radioaktive Gase Radon und Thoron. • ER: Pneumokoniose[1]	UR für BL: Brechung, Sortierung und sonstiger Aufbereitung der Kohle.	R für BL: • Be- und Entladen oder Rangieren. R für B: • UR beim Landtransport für die Bevölkerung	UR für BL: • Bau und Betrieb des KW R für B: • Emissionen chemischer Schadstoffe betroffen: **CO2**: Klimaänderung, Veränderung der Vegetation, Ansteigen des Meeresspiegels. **SOx, NOx** (Reizgase), Flugstaub: Erkrankungen der Atemwege. **CO**: beeinträchtigt Sauerstoffversorgung des menschlichen Organismus. **PAK**: krebserregend und mutagen. Spuren vieler **Schwermetalle**: karzinogen, teratogen und wahr-					

[1]Erkrankung des Respirationstraktes. Diese, durch den Staubgehalt der Luft bedingte Krankheit, ist nicht tödlich, macht die Lunge aber sehr empfänglich für andere Krankheiten (chronische Brochitis, Tuberkulose) insbesondere im Zusammenhang mit dem Rauchen.

				scheinlich auch mutagen. • Abgase von Kohle-KW radioaktiv: Risiko unklar.					
Nuklear	R für BL: • Tag-, Bergbau und in-situ • Pneumokoniose • Gammastrahlung R für B: • Erhöhte Radonemissionen	**Uranverarbeitung** R für BL (Erzaufbereitung, Konversion, Anreicherung, Brennelementfabrikation): • UR: Uranverarbeitung • TR: Krebserkrankungen TR für B: • Krebserkrankungen **Wiederaufbereitung** R für BL: • Emissionen von langlebigem Tritium, Krypton, Kohlenstoff, Jod **Nukleare Entsorgung** R für BL: • Unfälle und Strahlenexposition bei Abfallbehandlung und Stilllegung R für B • Strahlenrisiken	R für BL und B: Radiologische Gefahren durch Transporte bestrahlter Brennstoffelemente vom KW zur Wiederaufbereitungs- oder Entsorgungsanlage	R für BL: • Bau und Betrieb des KW • Bestrahlung des Betriebspersonals • Risiko der Bevölkerung durch routinemässige Emission radioaktiver Stoffe GR für B: • Austritt radioaktiver Strahlung					
Erneuerbare Energieträger									
Wasser	---	---	UR für BL: Zuflüsse, Bau und Betrieb von Stollen, Leitungen	UR für BL: • Materialbeschaffung • Talsperrenbau • Transporte • KW-Betrieb					
Geothermie (Wärme und Strom)	---	---	---	UR für BL: Bau und Betrieb Hot Dry Rock (Wärme, Strom)				UR für BL: Installation und Betrieb Erdwärmesonde mit Wärmepumpe (Wärme)	
Wind	---	---	---	UR für BL: • Materialbeschaffung Kraftwerk, Speicher • Zellenfabrikation • Transporte • KW Bau, Installation, Betrieb; Entsorgung	Netzintegration (stochastisches Windaufkommen)				
Biomasse (Wärme, Strom, Treibstoff)	R für BL: Gewinnung Biomasse (Waldholz)	---	UR für BL: Transport unbearbeitete Biomasse	UR für BL: • Vergärung (Treibstoff) • Vergasung: Fischer-Tropsch Verfahren (Treibstoff) • Bau und Betrieb		UR für BL: Treibstofftransport		UR für BL: • Installation und Betrieb Holzheizungen (Wärme) • Treibstoffverbrauch	

				Biogasanlagen: Vergärung, Verbrennung (Strom) ER für B: • Emissionen Staub, SOx, NOx, CO beim Betrieb					
Photovoltaik (Strom)	R für BL: Gewinnung von Silizium	R für BL: Produktion von Photozellen	---	UR für BL: • Materialbeschaffung Kraftwerk, Speicher • Zellenfabrikation • Transporte • KW Bau, Installation, Betrieb; Entsorgung UR für B: • Transportunfälle • Immissionen bei der Materialbeschaffung und Entsorgung (SO2, Staub)				UR für BL: Installation und Betrieb Photozellen	
Solarthermie	---	---	---	UR für BL: • Materialbeschaffung • Fabrikation • Kraftwerk, Speicher • Bau und Betrieb des KW UR für B: • Immissionen bei der Materialbeschaffung					
Brennstoffzellen									

Anhang 3: Übersicht über Umweltrisiken im Energieversorgungssystem (Landschaftsbildeingriffe werden nicht namentlich erwähnt, sind allerdings bei allen Technologien mehr oder weniger enthalten)

	Abbau, Rohstoffe	Umwandlung (Fuel Cycle)	Transport	Erzeugung	Systembetrieb	Übertragung, Transport	Verteilung	Detailhandel / Verbrauch	Grosshandel / Börse
Tabelle 4: Risiken nach Energieträger									
Fossile Energieträger									
Erdöl	Auslaufen von Öl	Brand in Raffinerie	Öltankerunfall, Pipelinebau, -defekt	Verbrennung (CO2): Klimaveränderung					
Erdgas	Entweichen von Gas		• Pipelinebau, -defekt • LNG-Schiffsunfall	Verbrennung (CO2): Klimaveränderung					
Kohle (Braun- und Steinkohle)	Absenkung Boden			Verbrennung (CO2): Klimaveränderung					
Nuklear		Aufbereitsanlage, Entsorgung		Reaktorzwischenfall		Netze: • Elektrosmog • Ökosystemveränderungen			
Erneuerbare Energieträger									
Wasser			Ökosystemveränderungen	• Staumauerbruch • Ökosystemveränderungen durch Landschaftseingriff • Überschwemmung, Schwall und Sunk					
Geothermie (Wärme und Strom)									
Wind									
Biomasse (Wärme, Strom, Treibstoff)									
Photovoltaik (Strom)		Entsorgung							
Solarthermie (Wärme)									
Brennstoffzellen									

Elektrosmog: Sammelbezeichnung für alle technisch erzeugten elektrischen und magnetischen Felder.

Anhang 4: Übersicht über finanzielle Risiken im Energieversorgungssystem

	Abbau, Rohstoffe	**Umwandlung (Fuel Cycle)**	**Transport**	**Erzeugung:** ändernde gesetzliche Grundlagen, fehlende Diversifikation, veränderter Spread Peak-Bandenergie	**Systembetrieb**	**Übertragung, Transport:**	**Verteilung**	**Detailhandel / Verbrauch**	**Grosshandel / Börse**
Tabelle 5: Risiken nach Energieträger									
Fossile Energieträger									
Erdöl	• Fehleinschätzung der verfügbaren Reserven • Politische Versorgungssicherheit	Überangebot Raffinerieka-pazitäten	• Pipelinebau • Steigende Transportkosten	Erdölpreis				Versorgungsengpass Heizöl, Benzin	Steigende Preise auf dem Weltmarkt, Koppelung Öl- und Gaspreis, Spekulation: Futures, Optionen
Erdgas			• Pipelinebau • Steigende Transportkosten	Gaspreis				Brand	
Kohle (Braun- und Steinkohle)									
Nuklear		Steigende Anreicherungs-, Trennkosten, Entsorgungskosten		Bauzinsen		• Netzinstabilität • Blackout	Versorgungsqualität	Kurzschluss, Brand	Spekulation im Stromhandel: Futures, Optionen, Spreadspekulation Peak-Base
Erneuerbare Energieträger					Gewährleistung Netzstabilität				
Wasser				• Restwasserbestimmung • Bauzinsen • trockene Jahre					
Geothermie (Wärme und Strom)				Forschungsausgaben					
Wind				Stochastisches Windaufkommen					
Biomasse (Wärme, Strom, Treibstoff)									
Photovoltaik (Strom)	Siliziumknappheit			Unwirtschaftlichkeit, stochastische Sonneneinstrahlung					
Solarthermie (Wärme)				stochastische Sonneneinstrahlung					
Brennstoffzellen	Fehlende Forschungserfolge								

Weitere Stichworte:

- Wetter: erneuerbare Energien (Wind, Photovoltaik und Wasser) sind wetterabhängig.
- Terrorismus, Krieg: Risiken existieren weltweit, in instabilen Regionen sind sie allerdings (momentan) grösser als etwa in der OECD
- Versorgungssicherheit: höher, je diversifizierter die Energieversorgung nach einzelnen Energieträgern. Kleine Erzeugungsanlagen erhöhen tendenziell die Versorgungssicherheit
- Marktmacht: Risiko, das auf allen Wertschöpfungsstufen auftreten kann. Je diversifizierter ein Markt, desto kleiner ist die Gefahr von Marktmacht
- operationelle Risiken: permanentes Risiko, kann sich nicht nur finanziell sondern auch auf Umwelt und Gesundheit auswirken
- externe Kosten: Literaturzusammenfassung von Ecoplan
- graue Energie
- Materialtransport