

Sieben Energiewendemärchen?

Viele Menschen in Deutschland sind unzufrieden mit dem Stil öffentlicher Debatten zu Energiepolitik und Klimawandel. Denn zahlreiche Wortführer vermengen Dichtung mit Wahrheit, Gedanken mit Gefühlen und pflegen den Gestus moralischer Überlegenheit. Das Buch nimmt sieben kontroverse Energiewendethemen unserer Zeit unter die Lupe. Der Autor legt durch sachliche und unterhaltsame Analysen den Wahrheitsgehalt der Argumentationsgebäude frei und skizziert ihre vielgestaltigen politischen Fassaden. Er zeigt, dass energie- und klimapolitische Entscheidungen durch Verknüpfung wissenschaftlicher Erkenntnisse mit persönlichen Werturteilen zustande kommen und dass es deshalb in einer freiheitlich-demokratischen Gesellschaft keine alternativlose Energie- und Klimapolitik geben kann. Das Buch bildet mit seiner sorgfältig beschriebenen Analysemethode und praxisnahen Rechenaufgaben mit Beispiellösungen den Leitfaden für eine sachbezogene, kontroverse und kurzweilige Energie- und Klimadebatte mit Familie, Freunden, Kollegen und Politikern.

Der Inhalt

Prolog: Das Gleichnis von den vielfältigen Bratpfannen – Der böse Verbrennungsmotor – Die kluge Denkfabrik – Das gute Elektroauto – Der einfältige Klimaforscher – Das genügsame Haus – Die billige Energiewende – Das stubenreine Flugzeug – Epilog: Die Hypothese von der unsichtbaren Hand – Anhang: Die Kaffeebechervermeidungskostenformel.

Der Autor

André D. Thess wurde 1964 in Leningrad geboren. Nach seinem Physikstudium an der TU Dresden, seiner Promotion am heutigen Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf sowie Forschungsaufenthalten in Lyon, Grenoble und an der Princeton University wurde er mit 34 Jahren als Professor für Technische Thermodynamik an die TU Ilmenau berufen. Seit 2014 lehrt er als Professor für Energiespeicherung an der Universität Stuttgart und leitet als Direktor das DLR-Institut für Technische Thermodynamik. Gastprofessuren führten ihn an die Stanford University, Nagoya University, Northeastern University Shenyang und Dalian University of Technology. Thess ist Hobbykoch und vermittelt den Studenten der Universität Stuttgart in seiner Vorlesung „Kulinarische Thermodynamik“ Einsichten in das Kochen, Backen, Braten und Schnapsbrennen.

ISBN 978-3-662-61999-5



9 783662 619995

► springer.com

Thess

Auszug zur persönlichen Verwendung
für die Teilnehmer an der AKE-Sitzung
der DPG am 31.03.2022

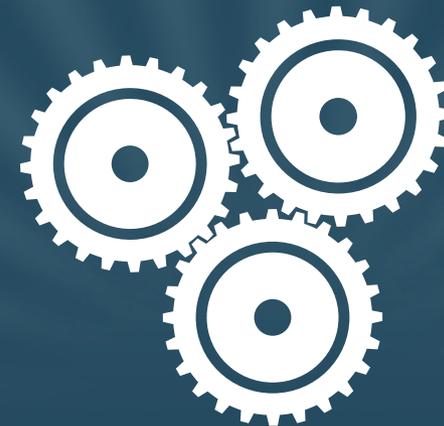


Sieben Energiewendemärchen?

André D. Thess

Sieben Energiewende- märchen?

Eine
Vorlesungsreihe
für Unzufriedene



SACHBUCH

 Springer

6. Die billige Energiewende

2020-06-04

Die Behauptung: „Der gefährliche Klimawandel wird in den kommenden Jahren mit hoher Wahrscheinlichkeit weltweit große Schäden verursachen. Es ist billiger, jetzt in Klimaschutzmaßnahmen und speziell in erneuerbare Energien zu investieren, als in späteren Jahren die Schäden des Klimawandels zu beheben. Ein effektiver Klimaschutz erzeugt überschaubare Kosten in der Größenordnung einiger weniger Prozente des globalen Bruttosozialprodukts. Überdies spart er Kosten für Energieimporte. Kurzum: Die Rettung des Klimas kostet nicht die Welt.“

Die Frankfurter Allgemeine Zeitung berichtete in ihrer Ausgabe vom 19. Februar 1990 unter der Überschrift „Die Kosten der deutsch-deutschen Währungsunion“: „Den Bedarf für einen Umbau der DDR auf westdeutschen Standard hatte der wirtschaftspolitische Sprecher der CDU/CSU-Bundestagsfraktion, Matthias Wissmann, auf rund 890 Milliarden DM (bezogen auf 10 Jahre) beziffert. Es fehlten 3,6 Millionen Kraftwagen, 8 Millionen Telefonanschlüsse und rund 600 Milliarden DM für Wohnraum. Die Entstickung und Entschwefelung der Kohlekraftwerke koste 14 Milliarden DM; auch sei über einen Neubau für etwa 39 Milliarden DM nachzudenken. Dem stellte Wissmann mögliche Einsparungen bei Berlin- und Zonenrandförderung sowie bei Leistungen an Übersiedler gegenüber.“ Die prognostizierten Wiedervereinigungskosten in Höhe von 890 Milliarden Deutsche Mark entsprechen ohne Inflationsausgleich somit einer Summe von knapp 450 Milliarden Euro.

Die tatsächlichen Kosten der deutschen Wiedervereinigung sind umstritten.

Der Spiegel titelt im Heft 15/2004: „1250 Milliarden Euro – Wofür?“. Der Ökonom Klaus Schroeder von der Freien Universität Berlin taxiert die Vereinigungskosten im Jahr 2009 auf brutto zwei Billionen Euro mit steigender Tendenz. Mithin sind die tatsächlichen Kosten bis zu viermal so hoch wie die prognostizierten. Dabei waren sämtliche „Technologien“ für das Transformationsprojekt deutsche Wiedervereinigung vorhanden. Sie hatten sich in vierzig Jahren alter Bundesrepublik auf das Beste bewährt. Nach der Wiedervereinigung galt es, Straßen, Autobahnen, Schienen, Betriebe und Häuser zu modernisieren oder neu zu bauen sowie die funktionierende parlamentarische Demokratie, das Verwaltungssystem und das Steuersystem der alten Bundesrepublik auf die neuen Bundesländer zu übertragen. Nichts

musste neu ersonnen werden.

Wie ist es zu erklären, dass trotzdem ein Faktor 4 zwischen berechneten und tatsächlichen Kosten klafft? Und was hat dieser Faktor mit der Energiewende zu tun?

Letzteres ist die Kernfrage dieses Kapitels. Ich möchte mich hier mit den Kosten des weltweiten Transformationsprojekts Energiewende befassen. Dabei werde ich nicht nur Bezüge zum erfolgreichen Megaprojekt deutsche Wiedervereinigung, sondern auch zu erfolgreichen oder erfolglosen kleineren Projekten wie dem Bau von Tunneln sowie dem Umbau kleiner Energiesysteme herstellen.

Schauen wir uns zunächst zwei Beispiele für die Kosten der Transformation komplexer Energiesysteme aus der fossilen in die erneuerbare Welt an.

6.1. Transformationskosten: Theorie und Praxis

In der Öffentlichkeit werden oft steil abfallende Kostenkurven für Solar- und Windstrom sowie für andere Energietechnologien präsentiert. Solche Darstellungen sind in den meisten Fällen wissenschaftlich nicht zu beanstanden. Sie verdeutlichen eine dynamische technologische und ökonomische Entwicklung, etwa von Solarkraftwerken in sonnenreichen Regionen wie Nordafrika, Westchina, Nordchile oder dem Südwesten der USA. Möglicherweise wird Las Vegas eines Tages die erste CO₂-neutrale Großstadt der Welt sein.

Oft werden aus fallenden Kostenkurven weitreichende Schlüsse gezogen und die Kosten für die Dekarbonisierung der Welt auf einen kleinen einstelligen Prozentsatz des globalen Bruttosozialprodukts taxiert. Der Klimaökonom Ottmar Edenhofer kommt in seinem Buch „Klimapolitik“ gar zu dem Schluss: „Es kostet nicht die Welt, den Planeten zu retten.“ Diese Aussage klingt ehrenwert. Sie lässt sich politisch gut verkaufen. Sie mag auf deutsche Professoren vielleicht sogar zutreffen, deren auskömmliche Gehälter und Pensionen vom Steuerzahler erarbeitet werden. Ich halte sie jedoch nicht nur für unzutreffend, sondern – mit Verlaub – für eine Respektlosigkeit gegenüber Krankenschwestern, Busfahrern und Verkäuferinnen. Für Menschen mit geringen Einkünften sind die hohen deutschen Stromkosten schon jetzt deutlich schmerzhafter als für beamtete Hochschullehrer.

Fallende Kostenkurven dürfen nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Ermittlung der Dekarbonisierungskosten vernetzter Energiesysteme wie etwa eines Universitätscampus, einer

Stadt, eines Industriestandorts oder einer ganzen Industrienation wie Deutschland weitaus mehr umfasst als das Auflisten einzelner Energieanlagen und das Summieren ihrer Kosten in Excel-Tabellen. Wir wollen uns deshalb jetzt zwei Transformationsbeispiele aus dem realen Leben anschauen. Die Beispiele verdeutlichen, dass Kosten und Risiken beim Umbau von Energiesystemen weitaus höher sein können als die Summe ihrer Bausteine vermuten lässt.

Der Stanford-Campus und die Eiskugel

Die Stanford University hat im Rahmen des Projekts “Stanford Energy Systems Innovations” (SESI) ihr Heizkraftwerk abgerissen und die gesamte Wärme- sowie Kälteversorgung auf erneuerbare Energie umgestellt. Der Investitionsaufwand betrug 485 Millionen Dollar. Durch SESI reduziert die Universität nach eigenen Aussagen die Treibhausgasemissionen des sonnenreichen Campus um 68 %. Fahmida Ahmed Bangert, Direktorin für Sustainability and Business Services teilte mir mit, dass durch SESI derzeit pro Jahr das Äquivalent von 139.449 Tonnen CO₂ eingespart wird. Bezogen auf eine Investitions-Jahresscheibe in Höhe von knapp 14 Millionen Dollar ergeben sich CO₂-Vermeidungskosten von ungefähr 100 Dollar pro Tonne CO₂ – ein sehr wettbewerbsfähiger Wert. Bangerts Mitarbeiter Joseph Stagner schrieb mir, dass das Projekt aufgrund der Einsparung von Brennstoffkosten nach seiner Meinung sogar negative CO₂-Vermeidungskosten erreichen könnte. Eine Informationsbroschüre über das Projekt finden Sie, wenn Sie in Ihre Internet-Suchmaschine “SESI Stanford University” eingeben.

Auf dem Stanford-Campus arbeiten und lernen knapp 30.000 Menschen. Die Investitionssumme beträgt somit reichlich 15.000 Dollar pro Person. Bei einer angegebenen Amortisationszeit der Investition von 35 Jahren kostet dies pro Person und Jahr knapp 500 Dollar und pro Monat etwa 40 Dollar.

Von dieser Summe könnte sich jeder Angehörige der Stanford-University jeden Monat etwa zwanzig Kugeln Eis kaufen. Dabei erstreckt sich SESI nur auf Heizung und Klimatisierung; die Stromversorgung des Campus ist von dem Projekt unberührt, ebenso wie die Mobilität. Außerdem herrschen in Kalifornien verglichen mit Deutschland sehr vorteilhafte Bedingungen für die Nutzung von Sonnenenergie. Überdies wurde das Projekt sehr kosteneffizient geplant und umgesetzt, weil Stanford eine Privatuniversität ist. In der Gremienwirtschaft des deutschen Hochschulwesens wären die Kosten mit Sicherheit deutlich höher ausgefallen.

Wieso ist diese Zahl trotz der vorteilhaften klimatischen und administrativen

Randbedingungen in Stanford zwanzigmal so hoch wie die Kosten der sprichwörtlichen *einen* Eiskugel pro Person und Monat, mit der ein deutscher Politiker einst die Kosten der gesamten deutschen Energiewende taxiert hat?

Während das privat finanzierte Stanford-Projekt hinsichtlich Kosteneffizienz und Entscheidungsstruktur im Spitzenfeld angesiedelt sein dürfte, lohnt sich als Nächstes der Blick auf ein Projekt aus dem Mittelfeld. Hier sind Steuergelder sowie Entscheidungen von Kommunalpolitikern im Spiel.

CO₂-neutrale Inseln: Dichtung ...

El Hierro ist die kleinste der sieben Kanarischen Inseln. Auf ihr leben knapp zehntausend Menschen. Es gibt keine Industrie mit hohem Energiebedarf. Der Strom wurde bis zum Jahr 2013 ausschließlich mittels Dieselgeneratoren erzeugt. Dafür waren etwa sechstausend Tonnen Diesel pro Jahr notwendig.

Befürworter erneuerbarer Energie und Lokalpolitiker kritisierten bereits in den Neunzigerjahren, die Stromversorgung auf El Hierro sei „schmutzig“ und „teuer“. Außerdem sei der Transport des Diesels auf die Insel „umständlich“. An dieser Stelle sei eine kleine Nebenbemerkung eingeflochten. Die öffentliche Schmähung des Dieseltransports und deren ungeprüftes Nachplappern in den Medien ist nach meiner Meinung ein typisches Beispiel für unsachliche Argumentation und mangelhafte journalistische Sorgfalt bei der Werbung für erneuerbare Energieprojekte.

Würde es sich bei der Anlieferung von sechstausend Tonnen Diesel pro Jahr auf eine Kanareninsel um ein ernstzunehmendes gesellschaftliches Problem handeln, so käme es einem Wunder gleich, dass die spanische Zivilisation nicht längst unter der logistischen Last der Treibstoffversorgung ihrer Insel Flughäfen zusammengebrochen ist. Sie, liebe Leserinnen und Leser, können sich durch eine kleine Recherche anhand der Passagierzahlen, der Flugdistanz zum europäischen Festland sowie zum Kerosinverbrauch pro Passagierkilometer leicht davon überzeugen, dass die kanarischen Insel Flughäfen Gran Canaria, Teneriffa, Lanzarote und Fuerteventura mehr als sechstausend Tonnen Kerosin verbrauchen – allerdings nicht pro Jahr, sondern pro Tag. Eine Lieferung der oben genannten Mengen stellt demzufolge nicht einmal ansatzweise ein logistisches Problem dar.

Die Initiatoren des erneuerbaren Kraftwerksprojekts auf El Hierro verwiesen auf die günstigen Windverhältnisse und meinten, durch Kombination aus Windenergie und einem Pumpspeicherwerk ließen sich die Dieselgeneratoren vollständig ersetzen. El Hierro könne so

zu hundert Prozent mit CO₂-freiem Strom versorgt werden. Überdies ließen sich durch das neue Energiesystem nach Überzeugung der Protagonisten die Stromkosten senken. Die Werbeaussagen der Initiatoren des El-Hierro-Projekts lassen sich zu den folgenden vier Thesen verdichten: (1) Die Dieselgeneratoren werden überflüssig. (2) Die Insel wird sich zu hundert Prozent selbst mit erneuerbarem Strom versorgen. (3) Die Stromversorgung wird billiger als bisher. (4) Mit dem eingesparten Geld können weitere ökologische Projekte wie etwa die Anschaffung von Elektroautos finanziert werden.

Mit einem Investitionsvolumen von mehr als 80 Millionen Euro, davon ein großer Teil aus Steuergeldern, wurden auf der Insel unter dem Namen „Gorona del Viento“ 5 Windturbinen des Typs Enercon E70 mit einer Gesamtleistung von 11,5 Megawatt installiert und ein Pumpspeicherwerk mit einer Leistung von 11,3 Megawatt errichtet. Schon vor der Eröffnung des Komplexes verteilte die Presse Vorschusslorbeeren und ließ dabei jegliche journalistische Distanz zum Gegenstand ihrer Berichterstattung vermissen. So schrieb die Augustausgabe 2013 von *Geo*: „... doch die Kombination mit Windkraft und Meerwasserentsalzung macht die mit Umweltpreisen ausgezeichnete El-Hierro-Anlage einmalig – und weltweit übertragbar.“ Das Magazin mit dem umweltsensiblen Image erwähnte mit keiner Silbe, dass die Windturbinen und das Speicherbecken in einem UNESCO-Biosphärenreservat gebaut worden waren.

CO₂-neutrale Inseln: ... und Wahrheit

Am 27. Juni 2014 startete Gorona del Viento den Probetrieb. Ein Jahr später begann die reguläre Energieversorgung. Lobenswert ist nach meiner Einschätzung die Tatsache, dass der Kraftwerksbetreiber auf den Webseiten www.goronadelviento.es die Stromproduktion aus Windenergieanlage, Pumpspeicherwerk und Dieselgenerator in Form zeitaufgelöster Messreihen publik macht. Damit kann sich jeder interessierte Bürger ein Bild über die Leistung des Systems verschaffen. Diese Transparenz ist keineswegs selbstverständlich, wie wir in Kapitel 7 bei der Diskussion um Energieprojekte zur CO₂-Kompensation von Flugreisen feststellen werden.

Kritisch sehe ich hingegen die Tatsache, dass bis zum Redaktionsschluss dieses Buches keine qualitätskontrollierte Fachpublikation vorlag, die auf der Grundlage einer systematischen Kosten-Nutzen-Analyse eine faktenbasierte Bewertung des Projekts erlaubt. Die beiden Artikel “Sustainable Energy System of El Hierro Island” (Godin und Co-Autoren, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, La Coruña, 2015, im Internet frei verfügbar) und “El Hierro Renewable Energy Hybrid System: A Tough

Compromise” (Frydrychowicz-Jastrzebska, *Energies*, 2018, Band 11, 2812) sind unvollständig, teilweise inkonsistent und enthalten keine Messergebnisse. Sie hätten mit ihrer minderwertigen Methodik niemals veröffentlicht werden dürfen und verkörpern nach meiner Einschätzung zwei Beispiele für das Versagen wissenschaftlicher Qualitätssicherung.

Auch nach der Inbetriebnahme gab es in der überregionalen Presse keine Anzeichen differenzierter Berichterstattung. So schrieb etwa die Zeitung *taz* in ihrer Online-Ausgabe vom 17. August 2014: „Am 27. Juni ist auf El Hierro vor der Küste Afrikas das Pumpspeicherkraftwerk Gorona del Viento in Betrieb gegangen, das auf global einmalige Weise Windstrom und Trinkwasser gleichzeitig produziert und damit die Insel zur Energie-*Selbstversorgerin* macht“ [Hervorh. d. Verf.]. Es handelt sich hier nachweislich um eine Falschmeldung. Durch einen Klick auf die Produktionsdaten hätten die Autoren mit wenig Aufwand herausfinden können, dass *am Vortag* des Erscheinens ihres Artikels 93,48 % des Stroms aus Dieselgeneratoren und nur 6,52 % aus Windenergie stammten. Von Selbstversorgung konnte am Erscheinungstag des Energiewendemärchens nicht annähernd die Rede sein. In späteren Jahren lag der Selbstversorgungsanteil bei knapp 50 %. Unbändiger Wille zu investigativer Recherche bei politisch korrekten Themen scheint bei den Autoren keine Einstellungsvoraussetzung gewesen zu sein.

Obwohl es aufgrund der unvollständigen Datenlage nicht möglich ist, eine umfassende Kosten-Nutzen-Analyse durchzuführen, habe ich versucht, die CO₂-Vermeidungskosten für einen günstigen und einen ungünstigen Verlauf hochzurechnen. Bei optimistischer Einschätzung wären keine Zinsen auf die Finanzierung der 80-Millionen-Euro-Investition fällig, und hohe Weltmarktpreise für Erdöl während der zwanzigjährigen Amortisationszeit des Projekts würden den Windstrom billiger machen als den Dieselstrom. Für diesen Best Case komme ich unter der Annahme eines Dieselpreises von einem Euro pro Liter auf CO₂-Vermeidungskosten in der Größenordnung von minus 100 €/t. Bei ungünstigem Verlauf wären 7 % Zinsen auf die Investition fällig und niedrige Weltmarktpreise für Erdöl würden den Dieselstrom bei angenommenen fünfzig Cent pro Liter billiger machen als den Windstrom mit Speicher. In diesem Fall würden die CO₂-Vermeidungskosten in Gegend von plus 300 €/t liegen. Dabei handelt es sich wohlgernekt *nicht* um den Worst Case.

Nehmen wir im Sinne eines *most likely development* den Mittelpunkt dieses Kostenkorridors als Richtwert, dann können wir die CO₂-Vermeidungskosten für Gorona del Viento auf etwa hundert Euro pro Tonne taxieren. Diese gleichen ungefähr den Kosten der CO₂-Vermeidung durch Modernisierung von Kohlekraftwerken, auf die ich im Epilog eingehe. Wir sehen an

diesem Beispiel, dass Projekte mit atemberaubender politischer Schönheit nicht unbedingt effizienter in der Vermeidung von CO₂ sein müssen als unspektakuläre Maßnahmen wie die Ertüchtigung vermeintlicher Schmuttelkinder der Energiewirtschaft. Allerdings ist mir kein Kohlekraftwerk bekannt, dessen Bau mitten in einem UNESCO-Biosphärenreservat genehmigt worden wäre.

Würde man die Investition in Gorona del Viento übrigens ganz nüchtern als eine Geldanlage betrachten, als die sie von den Initiatoren in Punkt (4) oben angepriesen wurde, so hätte vermutlich jeder seriöse Analyst das Finanzprodukt als eine riskante Wette auf die Ölpreise der bevorstehenden zwanzig Jahre enttarnt und auf Ramschniveau eingestuft.

CO₂-neutrale Inseln: Die Bilanz

Die vier Werbeaussagen lassen sich nun im Lichte der Tatsachen wie folgt korrigieren: (1) Die Dieselgeneratoren sind nicht überflüssig geworden, sondern nach wie vor alle in Betrieb. (2) Die Insel versorgt sich nicht zu 100 % mit erneuerbarem Strom, sondern etwa zur Hälfte. Über die Lebenszeit bis zum Redaktionsschluss 2019 gerechnet, liegt der Anteil sogar unter 50 %. (3) Die Kosten der erneuerbaren Stromversorgung lassen sich anhand veröffentlichter Daten nicht genau beziffern. Auf der Basis der im zitierten Papier von Godina angegebenen jährlichen Abschreibungen in Höhe von 7,74 Millionen Euro und eines erneuerbaren Stromanteils von 50 % liegen nach meiner Schätzung die Ökostromkosten über denen des Dieselstroms. (4) Anstatt mit dem vermeintlich eingesparten Geld ökologische Projekte wie etwa Elektromobilität zu finanzieren, erzeugt das Projekt Mehrkosten. Diese werden sozialisiert, das heißt von europäischen Steuerzahlern und spanischen Stromkunden bezahlt.

Die beiden Beispiele zeigen, dass hochwertige Dekarbonisierungsprojekte wie Stanford-SESI viel Geld kosten und möglicherweise negative CO₂-Vermeidungskosten erreichen, während durchschnittliche Dekarbonisierungsprojekte wie El Hierro beachtliche finanzielle Risiken in sich bergen. Ich möchte Universitätspräsidenten, Bürgermeistern und Firmenvorständen ans Herz legen, vor der lautstarken öffentlichen Ankündigung CO₂-neutraler Universitäten, Städte und Firmenstandorte einen aufmerksamen Blick in die Kostenstruktur von Stanford und El Hierro zu werfen. Dabei gilt es zu bedenken, dass die vielzitierte bilanzielle CO₂-Neutralität mit echter CO₂-Neutralität ungefähr so viel zu tun hat wie bilanzieller Zölibat mit echtem Zölibat. Näheres dazu ist in Abschnitt 5.7. ausgeführt.

Ich verzichte hier auf die Behandlung von Dekarbonisierungsprojekten aus dem Schlussfeld. Ich verweise jedoch auf das Solarkraftwerk *India One* in Kapitel 7. Dessen geplante und

tatsächliche Stromproduktion liegen um den Faktor 5 auseinander.

Wissenschaftlich betrachtet, werfen die genannten Beispiele drei Fragen auf: Wie werden die Kosten für den weltweiten Umbau des Energiesystems auf eine CO₂-neutrale Versorgung nach dem heutigen Stand des Wissens eigentlich berechnet? Woher kommt der Unsicherheitsfaktor in solchen Prognosen und inwieweit lässt er sich verkleinern? Was können wir aus anderen Großprojekten über das Verhältnis zwischen Kosten und Nutzen der Transformation unseres Energiesystems lernen?

Wir wollen uns als Nächstes der Beantwortung der ersten Frage zuwenden. Hierfür werfen wir einen Blick in die mathematische Struktur von Energiesystemmodellen.

6.2. Energiesystemmodelle und Energieszenarien

Für die Berechnung der Umbaukosten von Energiesystemen auf eine CO₂-arme Betriebsweise existieren zahlreiche Methoden. Diese untergliedern sich ganz grob in Top-down- und in Bottom-up-Ansätze. Beim Top-down-Ansatz werden ausgehend von globalen volkswirtschaftlichen Randbedingungen schrittweise immer feinere technologische und ökonomische Details von Energieszenarien herausgearbeitet und auf deren Basis die Kosten berechnet. Bei Bottom-up-Ansätzen hingegen wird ein Energiesystem ausgehend von seinen einzelnen technologischen Bestandteilen zusammengebaut und die Gesamtkosten ermittelt.

Energiesystemmodelle unterscheiden sich außerdem durch ihre räumliche und technologische Auflösung. Modelle mit vielen geografischen Details sind regional beschränkt, beispielsweise auf Deutschland. Weltmodelle bilden hingegen weniger Einzelheiten ab, erlauben dafür aber globale Aussagen, die ihren Weg in die Berichte des Weltklimarates IPCC finden. Technologisch hochaufgelöste Modelle bieten zahlreiche Spezifika. Sie können beispielsweise unterschiedliche Stromspeichertechnologien wie Batterien, Wärmespeicher und Pumpspeicherwerke enthalten. Ich möchte zunächst die Grundzüge globaler Modelle mit niedriger technologischer Auflösung und anschließend die mathematische Funktionsweise eines Optimierungsmodells mit hoher technologischer Auflösung skizzieren.

Integrierte Bewertungsmodelle

Die Berichte des Weltklimarats enthalten Szenarien, die nicht nur beschreiben, wie sich die Durchschnittstemperaturen auf der Erde und die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre künftig entwickeln könnten, sondern sie treffen auch eine Prognose für die Kosten, die der

Umbau des Energiesystems verursacht. Diese Berechnungen werden auf der Grundlage sogenannter *Integrated Assessment Models* (integrierter Bewertungsmodelle) durchgeführt.

Im Kapitel 4 haben wir uns mit der Funktion eines Klimamodells vertraut gemacht. Wir hatten gesehen, dass es sich hierbei um ein Simulationsprogramm handelt, welches die Zirkulation von Atmosphäre und Ozean unter dem Einfluss vorgegebener menschlicher CO₂-Emissionen berechnet und daraus die Durchschnittstemperatur ermittelt. Bei einem reinen Klimamodell werden die CO₂-Emissionen der Menschheit als Funktion der Zeit vorgegeben.

Bei einem Integrated Assessment Model wird ein Klimamodell mit einem Modell für die Bevölkerungsentwicklung sowie mit ökonomischen Modellen, Landwirtschaftsmodellen und optional Energietechnologiemodellen gekoppelt. Das Modell liefert dann auch Szenarien für die Bevölkerungsentwicklung und die Kosten der Transformation des Energiesystems. Wir können uns dies als eine perfektionierte Version des Rechenmodells vorstellen, welches wir in Kapitel 2 im Zusammenhang mit dem Buch „Grenzen des Wachstums“ diskutiert hatten. In die Integrated Assessment Modelle gehen zahlreiche Annahmen über techno-ökonomische Parameter heutiger und künftiger Technologien ein, beispielsweise die Entwicklung der Kosten etwa für Solarstrom oder Batteriespeicher. Einige Quellen dieser Unsicherheiten werde ich im nächsten Unterabschnitt erörtern.

Optimierungsmethoden

Wir wollen uns nun mit der Analyse des finanziellen Aufwands für die Energiewende vertraut machen. Dazu kann man beispielsweise Optimierungsmethoden einsetzen, die eine hohe technologische Auflösung ermöglichen. Deren mathematische Struktur wie auch deren Unsicherheiten werden am besten deutlich, wenn ich sie an einem Beispiel aus dem Alltag erkläre, das mit Energie- und Klimaforschung nichts zu tun hat.

Stellen Sie sich bitte vor, Sie sollten heute für dreißig Jahre im Voraus alle Ihre Autokäufe planen und für sämtliche Pkw, die Sie bis dahin fahren wollen, sofort verbindliche Bestellungen auslösen. Wie würden Sie die kostengünstigste Kaufstrategie ermitteln?

Sie müssten zunächst für jedes der Jahre zwischen 2020 und 2050 Ihren Mobilitätsbedarf in Kilometern spezifizieren. Außerdem wäre die notwendige Passagierkapazität festzulegen, beispielsweise fünf Passagiere für die Familienautos von 2020 bis 2035 und zwei Passagiere für das Rentnerhepaar von 2035 bis 2050. Sie könnten weitere Anforderungen angeben wie etwa Kleinwagen, Mittelklassewagen, Sportwagen, SUV, Benzinauto oder Elektroauto.

Alsdann hätten Sie die Aufgabe, eine Datenbasis zu erstellen, die für jedes zwischen 2020 und 2050 denkbare Auto – sowohl Neuwagen als auch Gebrauchtwagen – die entsprechenden Anschaffungs- und Betriebskosten berücksichtigt. Und schließlich wären Sie aufgefordert, eine Formel zu wählen, die für jegliche Autokaufstrategie die über dreißig Jahre anfallenden Gesamtkosten ermittelt. Nun würde Ihr Simulationsprogramm alle potenziellen Kombinationen aus Kaufdaten, Verkaufsdaten und Automarken berechnen und daraus die billigste Variante herausuchen.

Ähnlich funktioniert ein Simulationsprogramm für Energiesysteme. Statt des Mobilitätsbedarfs spezifizieren die Nutzer den Bedarf an Strom, eventuell auch den an Wärme und Kraftstoffen; zusätzlich können CO₂-Emissionsziele eingegeben werden. Statt der Pkw-Datenbank benötigt das Energiesystemmodell eine Datenbank mit den Investitions- und Betriebskosten für Kohlekraftwerke, Fotovoltaikanlagen, Windkraftanlagen und Stromnetze für die nächsten dreißig Jahre. Anschließend legt der Nutzer eine Formel fest, mit der ein Computer die Gesamtkosten des Systems über die betrachteten dreißig Jahre kalkuliert. Das Optimierungsprogramm berechnet daraus die preiswerteste Investitionsstrategie. Diese Strategie entspricht dann einem bestimmten Energieszenario.

Unabhängig von der gewählten Methode sind Energiesystemmodelle also Simulationsprogramme, die mit Eingangsdaten über Energietechnologien und deren Kosten gefüttert werden und als Ergebnis Szenarien für Investitionen einschließlich deren Kosten ausspucken. Wie Sie an unserem Autobeispiel sehen, kann die Vorhersagekraft einer solchen Simulation nicht besser sein als unser Wissen über den Autopark oder den Kraftwerkspark der Zukunft.

Wenn dem so ist – warum liegen dann Kostenprognosen wie etwa bei El Hierro weit unter den tatsächlichen Kosten und warum zeitigen Projekte oft einen geringeren Nutzen als zu Beginn versprochen? Die Antwort hierfür geht weit über Energie- und Klimaforschung hinaus. Sie hängt mit finanziellen Risikobetrachtungen zusammen.

6.3. Megaprojekte

Der Umbau des weltweiten Energiesystems ist ein komplexes Unterfangen, für das es in der Geschichte der Menschheit keine Vorbilder gibt. Zu den Kosten der globalen Energiewende existieren zahlreiche Schätzungen. Gleichwohl ist es mir ein Rätsel, wieso die umfangreiche

internationale Fachliteratur auf dem Gebiet der Energie- und Klimaforschung wenig Interesse von Forschern und Geldgebern an einer vertieften Analyse der finanziellen Risiken erkennen lässt. Die Fakten- und Erkenntnislage zu potenziellen Kostenfallen bei Großprojekten ist nämlich keineswegs so hoffnungslos, wie es auf den ersten Blick scheint. Wir müssen lediglich über den Tellerrand schauen.

Es gibt eine große Zahl an Infrastrukturprojekten ohne Bezug zu Energie, deren Kosten, Umsetzungszeiten und Nutzeffekte zunehmend ins Blickfeld der Wissenschaft rücken. Ein Vorreiter auf diesem aufstrebenden Forschungsgebiet ist Bent Flyvbjerg. Der Oxford-Professor beschäftigt sich seit über einem Jahrzehnt mit *Megaprojekten*. Dabei handelt es sich um Infrastrukturvorhaben mit Investitionskosten im Milliardenbereich. In den Studien von Flyvbjerg geht es um Brücken, Tunnel, Eisenbahnstrecken und Autobahnen, kurzum um Großanlagen, die sich neben den „Kathedralen des Klimaschutzes“ geradezu wie Inkarnationen der Banalität ausnehmen. Da für die Realisierung der von Flyvbjerg analysierten Megaprojekte keine neuen Technologien entwickelt werden müssen, eignen sich diese meines Erachtens sehr gut als Vergleichsfälle für Energiewendeprojekte.

Flyvbjergs Fachveröffentlichungen sowie sein Sachbuch „Megaprojects and Risk“ sind eine Goldgrube an aufschlussreichen empirischen Daten. Dabei dient das Buch keineswegs dazu, gescheiterte Großprojekte durch den Kakao zu ziehen. Die Dreifaltigkeit aus Berliner Flughafen, Hamburger Elbphilharmonie und Stuttgarter Hauptbahnhof, die das weltweite Ansehen Deutschlands in Sachen Infrastrukturentwicklung nachhaltig beschädigt haben dürfte, spielt in dem Buch übrigens keine Rolle. Flyvbjerg stellt vielmehr akribisch gesammelte statistische Daten vor, anhand derer sich tatsächliche Kosten, tatsächliche Bauzeiten und tatsächlicher Nutzen Dutzender Megaprojekte mit den geplanten Größen vergleichen lassen. Flyvbjerg identifiziert in seinem Buch weiterhin die Ursachen für systematische Abweichungen zwischen Theorie und Praxis und formuliert Empfehlungen für die Planung und Umsetzung künftiger Großprojekte.

Um der Wahrheit die Ehre zu geben: Neben wissenschaftlicher Nüchternheit machen einige Bonmots das Buch besonders lesenswert. So fasst Flyvbjerg seine Beobachtungen in Form des *Iron Law of Megaprojects*, des Eisernen Gesetzes der Megaprojekte, wie folgt zusammen: „Over budget, over time, over and over again“, frei übersetzt: immer teurer, immer später, immer wieder. Da Flyvbjergs Erkenntnisse nach meiner Einschätzung in hohem Maß auf Energie- und Klimaprojekte übertragbar sind, schauen wir uns einige Eckdaten dazu an.

Megaprojekte: Zahlen und Fakten

Beginnen wir mit den konkreten Zahlen. Flyvbjerg weist anhand der Analyse von 258 Infrastrukturmaßnahmen wie Kanaltunnel, Großer-Belt-Bahntunnel und Öresundbrücke nach, dass bei Megaprojekten „regelmäßig Kostenüberschreitungen über 40 % auftreten und Kostenüberschreitungen über 80 % nichts Ungewöhnliches sind“. Diese Zahlen sind in Abbildung 2.3 seines Buches zusammengefasst. Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass es sich größtenteils um Projekte handelt, bei denen keine technologischen Neuentwicklungen notwendig waren. Das Buch listet auch Vorhaben wie die Golden Gate Bridge, das Mondlandeprogramm und die TGV-Verbindung Paris–Lyon, die innerhalb vorgesehener Budgets realisiert worden sind, obwohl bei diesen Projekten neue Technologien zum Einsatz kamen. Es handelt sich jedoch nach Aussage des Autors hierbei um seltene Ausnahmen.

Eine besonders lehrreiche Zahl findet sich in Tabelle II.ii des Buches. Dort wird für das mit massiver staatlicher Unterstützung entwickelte Überschallflugzeug Concorde eine Kostenüberschreitung von 1.100 %, in Worten eintausendeinhundert Prozent, angegeben. Die Zahl ist aufschlussreich, weil sie sich auf ein kommerzielles Produkt bezieht, für dessen Entwicklung die technischen Grundlagen aus der Militärfliegerei bekannt waren. Beim Passagierflugzeug handelte es sich nach Überzeugung damaliger Protagonisten lediglich um das Derivat einer militärischen Blaupause. Der pädagogische Wert dieses Beispiels für erneuerbare Energieprojekte besteht darin, dass für die weltweite Umsetzung oft kolportiert wird, es sei „alles im Prinzip bekannt“ und müsse mit politischer Hilfe „nur noch“ im großen Maßstab ausgerollt werden.

Die zitierten statistischen Daten umfassen nicht nur Investitionskosten, sondern auch Bauzeiten sowie den Nutzen von Megaprojekten. Die Informationen zeigen, dass die Bauzeiten systematisch über den Prognosen und der Nutzen systematisch unter den Erwartungen liegen. Da es sich oft um Verkehrsinfrastrukturen handelt, ist der Nutzen ausgedrückt in Passagierzahlen oder Tunnelbenutzungsgebühren leicht zu quantifizieren. So zeigt beispielsweise Tabelle III.i, dass für die jeweils betrachteten Referenzjahre der Kanaltunnel nur 18 % und der Denver International Airport nur 55 % des prognostizierten Verkehrsaufkommens und damit auch der Einnahmen aufweisen.

Die Ergebnisse lassen sich laut Flyvbjerg dahingehend zusammenfassen, dass bei Megaprojekten (i) eine Überschreitung der Kosten, (ii) eine Überschreitung der Bauzeit und (iii) ein Verfehlen des prognostizierten Nutzens nicht Ausnahme, sondern Regel sind. Wir

werden weiter unten sehen, dass es keinen Grund zu der Annahme gibt, die Situation bei Energiewende- und Klimaschutzprojekten im Multimilliarden-Euro-Maßstab sei grundlegend anders als bei klassischer Infrastruktur. Dies steht nicht im Widerspruch zu dem Umstand, dass es heute eine Reihe erfolgreicher großer Solarkraftwerksprojekte gibt.

Megaprojekte: Ursachen der Ineffizienz

Als zentrale Ursache für die Ineffizienz von Megaprojekten machen die einschlägig tätigen Forscher mangelndes Bewusstsein für finanzielle und organisatorische Risiken bei Planung und Umsetzung aus.

Bei Verkehrsinfrastrukturprojekten wurden beispielsweise folgende Risiken identifiziert: (1) Kostenüberschreitungen, verursacht durch Regierungen, Kunden, Manager, Unterauftragnehmer oder Unfälle, (2) gestiegene Finanzierungskosten aufgrund von Änderungen bei Zinssätzen und Wechselkursen sowie von Verzögerungen, (3) geringere Umsätze als erwartet, aufgrund von geänderten Verkehrsmustern sowie Zahlungen pro Fahrzeug.

Blättern Sie bitte zum Abschnitt 6.1. zurück und vergegenwärtigen sich die Ausführungen über die Performance des El-Hierro-Projekts. Dort hatten wir gesehen, dass im Gegensatz zur öffentlichen Verlautbarung „hundert Prozent erneuerbar“ nur etwa 50 % des Strombedarfs der Insel durch erneuerbaren Strom abgedeckt wird. Wir sehen an diesem Beispiel, dass sich Merkmale von Megaprojekten aus dem Verkehrsbereich auch in Energieprojekten wiederfinden.

Für die weit verbreitete Ignoranz gegenüber finanziellen Risiken bei Verkehrsprojekten können wir auf der Basis des von Flyvbjerg gesammelten Datenmaterials zwei Ursachen identifizieren. Dabei handelt es sich zum einen um die einseitige Fokussierung auf Best-Case-Szenarien und zum anderen auf Interessenkonflikte bei der Kostenberechnung.

Bei der Planung von Megaprojekten lassen sich Geldgeber und Planer oft von der Annahme eines bestmöglichen Projektverlaufs leiten. Anstatt einen weiten Korridor an Möglichkeiten zwischen einem günstigsten Fall, dem Best-Case-Szenario, und einem ungünstigsten Fall, dem Worst-Case-Szenario zu betrachten, geben sich Planer in ihren Analysen oft mit dem Ersteren zufrieden. So wird in zahlreichen Projekten das EGAP-Prinzip (everything goes as planned) zugrunde gelegt. Flyvbjerg plädiert stattdessen dafür, aus einem Korridor zwischen Best Case und Worst Case ein MLD-Szenario (most likely development) abzuleiten und die Planung auf dieser Basis voranzutreiben.

Eine zweite Ursache für die Ignoranz gegenüber finanziellen Risiken von Megaprojekten liegt darin, dass Personen und Institutionen, die Megaprojekte initiieren und planen, in der Regel ein hohes Eigeninteresse an einer tatsächlichen Umsetzung besitzen. Sie neigen deshalb dazu, die Kosten gegenüber den Geldgebern systematisch kleinzurechnen und den Nutzeffekt zu überhöhen. Dies ist umso mehr der Fall, wenn die Treiber keine persönliche Verantwortung für Erfolg oder Misserfolg des Projekts tragen. Wären beispielsweise die Altersbezüge des Bürgermeisters von El Hierro an die Erfüllung des Versprechens einer hundertprozentigen Dekarbonisierung der Insel gekoppelt gewesen, hätte das Projekt Gorona del Viento mit hoher Wahrscheinlichkeit niemals das Licht der Welt erblickt.

Dieser Interessenkonflikt lässt sich nach Einschätzung von Flyvbjerg durch eine strenge personelle und institutionelle Trennung von Projektdefinition einerseits und Projektevaluation andererseits vermeiden. Davon sind die meisten real existierenden Megaprojekte einschließlich der deutschen Energiewende freilich weit entfernt. Mit einem Anflug von Pessimismus zieht Flyvbjerg dann auch das Fazit: „Es muss die Frage gestellt werden, ob eine Regierung gleichzeitig effektiv als Initiator eines Projekts und als Anwalt öffentlicher Interessen wie dem Naturschutz und der Sicherheit der Steuerzahler gegenüber unnötigen finanziellen Risiken agieren kann. Die Antwort ist negativ.“ Gleichwohl findet sich in dem Werk eine Reihe konstruktiver Vorschläge für ein verbessertes Risikomanagement bei Megaprojekten, die sich sowohl für Verkehrsprojekte als auch für Energie- und Klimaprojekte anwenden lassen.

Wir wollen nun auf empirischer Basis eine Typologie der Kostenrisiken bei Energiewendeprojekten vornehmen und an konkreten Beispielen veranschaulichen. Die Überlegungen sollen insbesondere verständlich machen, warum manche Kostenrechnungen einerseits mathematisch korrekt, aber andererseits praktisch wertlos sein können.

6.4. Typologie der Kostenrisiken: bekannte Bekannte

Die finanziellen Risiken bei der Berechnung der Transformationskosten des Energiesystems sind vielfältig. Wir können sie im einfachsten Fall in die drei Kategorien „bekannte Bekannte“, „bekannte Unbekannte“ und „unbekannte Unbekannte“ einteilen.

Am leichtesten fassbar sind kalkulierbare Risiken vom Typ „bekannte Bekannte“. Im Englischen werden sie als “known knowns” bezeichnet. Es handelt sich dabei um Risiken,

deren Herkunft klar ist und deren Höhe mit qualifiziertem Personal, vorhandenen Werkzeugen und verfügbaren Daten berechnet werden kann. Die Berechnung dieser Risiken setzt freilich sowohl bei Auftraggebern als auch bei Auftragnehmern den entsprechenden Willen voraus. Das Ignorieren solcher Risiken bei Energiewendeprojekten kann unterschiedliche Ursachen haben – von fehlender Qualifikation und oberflächlicher Arbeitsweise über voreilenden Gehorsam bis hin zu vorsätzlicher Täuschung.

Die Kosten der deutschen Einheit

Ein anschauliches Beispiel für das Ignorieren bekannter Bekannter bieten die Kosten der deutschen Einheit. Das im Eingangszitat beschriebene schematische Aufrechnen einzelner Kostenblöcke galt schon damals unter Ökonomen als Dilettantismus. Aufschlussreicher ist allerdings die Tatsache, dass ein Volkswirt im Bundesfinanzministerium schon im ersten Halbjahr 1990 mit einfachen Mitteln eine präzise Schätzung der jährlichen Vereinigungskosten vorgenommen hatte. Der inzwischen pensionierte Beamte erläuterte mir, dass er „auf der Basis volkswirtschaftlicher Grundkenntnisse und eines einfachen Dreisatzes“ die jährlich notwendige Kapitalzuführung auf 170 Milliarden Deutsche Mark geschätzt hatte. Diese Zahl sollte später ziemlich genau den tatsächlichen Transferleistungen in die neuen Bundesländer entsprechen. Da sie jedoch im Moment ihres Entstehens politisch nicht opportun war, „wurde die Vorlage weggeschlossen“. Sie ist nach Vermutung meines Gesprächspartners weder dem damaligen Finanzminister Theo Waigel noch Bundeskanzler Helmut Kohl zur Kenntnis gelangt. Multiplizieren wir die 85-Milliarden-Euro-Jahresscheiben mit einer 20-jährigen Wiedervereinigungszeit, so erhalten wir einen Betrag von 1,7 Billionen Euro. Dieser kommt den tatsächlichen Kosten erstaunlich nahe.

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass im Falle der Fehleinschätzung der Kosten für die deutsche Einheit weder unvorhergesehene Kostensteigerungen noch Unsicherheiten über die Privatisierungserlöse des DDR-Volkseigentums oder andere Ausreden bemüht werden müssen. Die Fehlprognose ist schlicht das Spiegelbild des Unwillens, einem charakterlich standfesten und ergebnisoffen arbeitenden Fachmann Gehör zu schenken und die „bekannten Bekannten“ zur Kenntnis zu nehmen.

Die Kosten des Stanford-Projekts

Das Stanford-Projekt bietet hingegen ein positives Beispiel – der professionelle Umgang mit bekannten Bekannten hat sich buchstäblich ausgezahlt und dem Unterfangen Erfolg beschieden. Stanford ist eine wohlhabende Privatuniversität, die sich durch personalisierte Verantwortung und klare Entscheidungsstrukturen auszeichnet. Baumaßnahmen werden dort

effizienter als an deutschen Universitäten abgewickelt. Entscheidend für den sachgerechten Umgang mit bekannten Bekannten war jedoch die Tatsache, dass das Projekt von Anbeginn wissenschaftlich durch eigene professionelle Expertise begleitet wurde. Dies umfasste etwa umfangreiche Computersimulationen, bei denen die aus langjähriger Erfahrung vorliegenden Bedarfsprofile für Kälte und Wärme realistischen Daten über das Potenzial an Solarenergie vor Ort gegenübergestellt wurden. Daraus konnten nicht nur die optimale Größe der Kälte- und Wärmespeicher berechnet, sondern auch die Investitions- und Betriebskosten zuverlässig beziffert werden.

Der Umgang mit bekannten Bekannten war in diesem Beispiel kein Hexenwerk – die Projektpartner haben lediglich von qualifizierten Fachleuten, zeitgemäßen Simulationsmethoden und vorhandenem Datenmaterial konsequent und umfänglich Gebrauch gemacht. Im Zuge der wissenschaftlichen Begleitung des Projekts wurden sogar Patente angemeldet. Im Ergebnis dieses professionellen Vorgehens waren die finanziellen Risiken des Projekts minimal und die tatsächlichen Kosten lagen in der Nähe der prognostizierten. Im September 2019 schrieb mir Fahmida Ahmed Bangert sogar, als nächster Schritt sei bis 2022 auch die Dekarbonisierung der Stromversorgung des Campus geplant. Es darf an dieser Stelle nicht verschwiegen werden, dass der Erfolg des Stanford-Projekts auch durch die Verfügbarkeit öffentlicher Solardaten des National Renewable Energy Laboratory NREL möglich war, deren Gewinnung das Department of Energy finanziert hatte.

Als Nächstes schauen wir uns mit dem El-Hierro-Projekt ein Exempel für den unprofessionellen Umgang mit bekannten Bekannten an. Um dem Trugschluss vorzubeugen, es handle sich um einen bedauerlichen Einzelfall, der womöglich nicht verallgemeinerungswürdig sei, wollen wir einen Abstecher in die Welt der Optimierung machen. Anhand einer Situation aus dem Alltagsleben möchte ich darlegen, dass eine mathematisch korrekte Rechnung bei Vernachlässigung bekannter Bekannter wertlos sein kann.

Abstecher: Die Kosten für unser täglich Brot

Das folgende Beispiel hat nichts mit Energie und Klima zu tun, ist aber anschaulich und leicht verständlich. Stellen Sie sich bitte vor, Sie wollten Ihre täglichen Ausgaben für Lebensmittel auf ein Minimum absenken. Für dessen Ermittlung würden Sie ein Optimierungsverfahren einsetzen. Dieses soll für unser Gedankenexperiment nicht ganz so kompliziert sein wie in Abschnitt 6.2. – insbesondere muss es keine Szenarien über mehrere Jahre berechnen.

Unser Modell beruhe auf einigen wenigen grundlegenden Ernährungsrichtlinien der Weltgesundheitsorganisation, sagen wir auf einem Kalorienbedarf von 3.000 Kilokalorien pro Tag. Die Mindestzufuhr von 100 Gramm Fett und 60 Gramm Eiweiß sollte hierin enthalten sein. Das Computerprogramm möge auf eine Datenbank mit Nährwerten und Preisen aller Lebensmittel sowie auf Kochrezepte Zugriff haben. Durch Auswürfeln einer Vielzahl möglicher Kombinationen möge es dann den preiswertesten täglichen Einkaufsplan berechnen, der den genannten Anforderungen genügt. Wie viel würde eine solche kostenminimale Grundversorgung wohl kosten?

Falls wir auf eine centgenaue Antwort verzichten, lässt sich die Aufgabe näherungsweise auch ohne Computer und Optimierungsalgorithmus lösen. Meine Internetrecherche hat ergeben, dass der genannte Bedarf an Nährstoffen, Fett und Eiweiß mit 500 Gramm Mehl, 100 Gramm Sonnenblumenöl und 500 Gramm Quark gedeckt ist. Nachforschungen bei Lebensmitteldiscountern haben mir im April 2019 zudem Folgendes geliefert: 1 Kilogramm Mehl erhält man für 40 Cent, 1 Liter Sonnenblumenöl kostet 1 Euro und 1 Pfund Quark gibt es beim Discounter für 70 Cent. Rechnen wir alles zusammen, so kommen wir im Ergebnis dieser händischen Optimierung zu dem Schluss, dass sich ein Mensch in Deutschland für 1 Euro pro Tag ernähren kann.

Dieses Resultat mag mathematisch durchaus korrekt sein. Aus einem Pfund Mehl lassen sich in Handarbeit Nudeln, Spätzle, Brötchen, Fladenbrot und Knödel zubereiten. Öl und Quark decken den Fett- beziehungsweise Eiweißbedarf. Die Speisepläne unserer Vorfahren haben über Jahrhunderte hinweg so ähnlich ausgesehen. Hätte diese Menge an Lebensmitteln den unter dem Joch von Stalin und Mao leidenden Menschen während der Hungersnot *Holodomor* in der Ukraine 1931 und während des *Großen Sprungs nach vorn* in China 1961 zur Verfügung gestanden, wäre Millionen von Menschen der sozialistische Hungertod erspart geblieben. Wenn diese Menge an Lebensmitteln heute einer Milliarde unterernährter Menschen zur Verfügung stünde, wäre die Welt vermutlich weitgehend von Hunger befreit.

Trotzdem ist eine solche Rechnung aus heutiger Sicht nicht nur irreführend, sondern wertlos. Für eine zeitgemäße, gesunde und abwechslungsreiche Ernährung ist nämlich weitaus mehr notwendig als Mehl, Öl und Quark. Wir benötigen die „bekannten Bekannten“ Fleisch, Fisch, Eier, Gemüse, Obst, Ballaststoffe und das in einer gewissen Vielfalt. Dies führt dazu, dass die notwendige Summe zur Ernährung eines Menschen nach heutigen Maßstäben wesentlich höher ist als der berechnete eine Euro. Wie weit ist unsere Analyse von der Wahrheit entfernt?

Die Wahrheit beträgt mindestens 400 % unseres Optimierungsergebnisses.

Vor einigen Jahren wurde ein deutscher Politiker für vermeintliche Herzlosigkeit kritisiert, weil er in einem mehrtägigen Selbstversuch nachgewiesen hatte, ein Erwachsener könne sich für ungefähr vier Euro pro Tag gesund und abwechslungsreich ernähren. Dieser Betrag entsprach damals dem Hartz-IV-Regelsatz. Das Beispiel illustriert, dass eine Optimierungsanalyse mathematisch korrekt sein mag, jedoch aufgrund ignoriertes Kostenrisiken vom Typ „bekannte Bekannte“ um Größenordnungen von einer realistischen Schätzung entfernt sein kann.

Kehren wir nun zurück zum El-Hierro-Projekt

Die Kosten des El-Hierro-Projekts

Gemäß den Ankündigungen sollte das über achtzig Millionen Euro teure Kraftwerksprojekt den Strombedarf der Insel in Höhe von jährlich etwa fünfzig Gigawattstunden durch eine Kombination aus reichlich zehn Megawatt Erzeugungskapazität aus Windkraft und knapp dreihundert Megawattstunden an Energiespeicherkapazität im Pumpspeicherwerk decken. Der Strom sollte dabei vollständig erneuerbar sein und die Dieselgeneratoren überflüssig machen.

Um die Abwegigkeit dieser Verlautbarung zu begreifen, muss man kein Energieexperte sein. Schüler der gymnasialen Oberstufe dürften nach meiner Einschätzung ohne Weiteres in der Lage sein, im Leistungskurs Physik im Rahmen einer Hausarbeit die notwendigen Recherchen innerhalb eines Tages zu erledigen und die Berechnung durchzuführen. Ich habe die Zahlen oben bewusst in gerundeter Form angegeben, damit Sie oder Ihre Schulkinder die Rechnung möglicherweise sogar im Kopf vornehmen.

Die Gymnasiasten müssten hierzu lediglich zwei Zahlen in Erfahrung bringen – den täglichen Strombedarf der Insel und die maximale Dauer einer Windflaute. Aus diesen beiden Zahlen folgt die Mindestkapazität des Pumpspeicherwerks. Der durchschnittliche Stromverbrauch pro Tag lässt sich aus dem Jahresbedarf in Höhe von 50 Gigawattstunden in einem ersten Schritt zu 137 Megawattstunden berechnen. Um bei einfachen Zahlen zu bleiben, runden wir auf 100 Megawattstunden ab. Somit kann das installierte Pumpspeicherwerk 3 Tage Windstille überbrücken.

Die Schüler würden nun in einem zweiten Schritt anhand öffentlich zugänglicher Informationen die Windstärken auf El Hierro recherchieren und die maximale Dauer einer Windflaute in Erfahrung bringen. Eine kluge Gymnasiastin würde im Internet das

Wetterarchiv des Flughafens von El Hierro https://rp5.ua/Weather_archive_in_El_Hierro_%28airport%29 finden und aus den dort hinterlegten Daten die Dauer von Windflauten ermitteln. Bei einem weniger begnadeten Gymnasiasten dürfte es zumindest für die Erkenntnis reichen, dass in der betreffenden Region Schwachwindperioden mit einer Dauer von zwei bis drei Wochen in den Frühlingsmonaten April und Mai sowie in den Herbstmonaten September und Oktober keine Seltenheit sind. Daraus folgt, dass für eine vollständige Versorgung der Insel mit erneuerbarer Energie eine Speicherkapazität von drei Wochen notwendig wäre. Das Speichersystem müsste somit statt 0,3 Gigawattstunden eine Kapazität von 2,1 Gigawattstunden besitzen. Das wäre siebenmal mehr als vorhanden. Um auf der sicheren Seite zu sein, müsste man statt sieben besser zehn einplanen, also drei Gigawattstunden. Für ein Pumpspeicherwerk dieser Kapazität sind die geologischen Bedingungen auf El Hierro nicht einmal ansatzweise vorhanden. Rein rechnerisch würde ein solches etwa 300 Millionen Euro kosten. Das Gesamtprojekt wäre dann statt 80 Millionen über 350 Millionen Euro teuer. Die Kostensteigerung auf reichlich 400 % wäre der Preis für den Sprung von erträumter zu tatsächlicher Klimaneutralität. Ein Kollege von mir bezweifelt selbst diese Zahl, weil die installierte Windkapazität nach seiner Einschätzung zu klein ist und die Speicherverluste nicht berücksichtigt sind.

Wäre das El-Hierro-Projekt so professionell vorbereitet worden wie das Stanford-Projekt, hätte eine Systemsimulation zu dem Schluss geführt, dass eine vollständig erneuerbare Versorgung in der vorgesehenen Kombination aus Windkraft und Pumpspeicher nicht möglich ist. Sie hätte vermutlich gezeigt, dass ein preiswerterer Weg der CO₂-Reduktion im Ersatz des fossilen Diesels durch Biodiesel bestanden hätte, ergänzt durch Fotovoltaik als *fuel saver*. Die Variante hätte zwar nicht die politische Schönheit gehabt, um in einschlägigen Presseartikeln gefeiert zu werden. Sie hätte dem UNESCO-Biosphärenreservat aber fünf Windkraftanlagen und zwei Pumpspeicherbecken erspart. Mein Kollege Hans-Christian Gils hat mittels der DLR-Optimierungssoftware ReMix eine weitere Alternative identifiziert, bei der Wasserstoff durch Elektrolyse erzeugt und zur Energiespeicherung eingesetzt werden könnte. Diese Variante hätte nach seiner Simulation zwischen hundert und hundertfünfzig Millionen Euro gekostet. Bemerkenswerterweise betrug der Arbeitsaufwand für diese Grobanalyse bei einem Energiesystemexperten wie Gils weniger als einen Arbeitstag. Daran ist erkennbar, dass eine fachgerechte Simulation während der Projektentwicklung problemlos möglich gewesen wäre.

An diesem Beispiel erkennen wir, dass schon die einfachste Sorte von Kostenrisiken, nämlich

vom Typ „bekannter Bekannter“, Kostensteigerungen von mehreren hundert Prozent erzeugen kann. Dies liegt deutlich über den Werten bei den Infrastrukturprojekten aus dem Verkehr, die wir im Abschnitt über Megaprojekte erörtert hatten. Ist das Kostenrisiko von El Hierro repräsentativ? Oder handelt es sich um einen bedauernswerten Ausrutscher?

Ich komme zu dem Schluss, dass Gorona del Viento einige wiederkehrende Merkmale erneuerbarer Energieprojekte aufweist. Erstens stützt sich die öffentliche Argumentation teilweise auf Scheinprobleme konventioneller Energiesysteme, wie etwa auf die vermeintliche Schwierigkeit des Dieseltransports. Zweitens erfolgt bei der Voruntersuchung ohne sachliche Begründung eine Beschränkung auf eine kleine Teilmenge möglicher technischer Lösungen wie etwa Wind und Pumpspeicher. Anderenfalls hätte man bei der Projektvorbereitung den Einsatz von Biodiesel oder Wasserstoff in Erwägung gezogen. Drittens wird das Potenzial zeitgemäßer Computersimulationen für die Abschätzung finanzieller Risiken, in unserem Fall einer langen Periode der Windstille, nicht eingesetzt. Diese Charakteristika sind bei zahlreichen Energieprojekten zu finden.

Blicken wir abschließend in Sachen Risikoanalyse noch kurz über den Tellerrand und schauen uns an, welche strenge Regeln für „bekannte Bekannte“ in der Luftfahrt gelten. Bevor ein Flugzeug zugelassen wird, muss der Hersteller nachweisen, dass kein *einzelner* Zwischenfall zu einem Absturz der Maschine führt. So muss ein startendes Passagierflugzeug selbst bei widrigsten Bedingungen wie dem Start bei über dreißig Grad Celsius auf einem hoch gelegenen Flughafen wie La Paz vollgetankt und vollbeladen mit Passagieren und Fracht bei Triebwerksausfall mit dem noch funktionierenden Antriebsaggregat eine Platzrunde drehen und sicher landen. Die meisten Piloten werden in ihrem Berufsleben nie mit einer solchen Situation konfrontiert; und selbst diese strengen Regeln konnten zwei Abstürze von Passagiermaschinen des Typs Boeing 737 MAX 8 nicht verhindern. Ich finde es als Vielflieger trotzdem beruhigend, dass Flugzeuge nach anderen Regeln zertifiziert werden als das erneuerbare Energiesystem von El Hierro.

6.5. Typologie der Kostenrisiken: bekannte Unbekannte

Wir kommen nun zur zweiten Sorte von Kostenrisiken. Es handelt sich hierbei um Unsicherheiten, die wir zwar kennen, aber für die Zukunft noch nicht genau berechnen können. Diese „bekannten Unbekannten“ werden im Englischen als “known unknowns” bezeichnet. Eine wichtige bekannte Unbekannte ist die Entwicklung der Kosten von

Windenergieanlagen, Solarkraftwerken, Batteriespeichern, synthetischen Treibstoffen und weiteren Schlüsseltechnologien in den kommenden dreißig Jahren. Um die Größenordnung dieser Unsicherheiten zu verdeutlichen, möchte ich ein Beispiel aus eigener Forschungstätigkeit anführen – die Herstellung synthetischer flüssiger Kohlenwasserstoffe. Dabei möchte ich mich speziell auf synthetisches Kerosin für den Flugverkehr konzentrieren.

Kerosinkosten im IPCC-Bericht

Schauen wir uns zunächst den Bericht des Weltklimarates aus dem Jahr 2014 an. Das Dokument trägt den Titel “Climate Change 2014 – Mitigation of Climate Change” und ist im Internet frei verfügbar. Kapitel 6 handelt von der Dekarbonisierung des Verkehrs. Ein Teil der Ausführungen widmet sich speziell dem Flugverkehr. Der Langstreckenflugverkehr wird auch in absehbarer Zukunft mit hoher Wahrscheinlichkeit auf der Basis flüssiger Treibstoffe abgewickelt. Wie wir in Kapitel 7 sehen werden, könnten auf Kurz- und Mittelstrecken zwar Brennstoffzellenantriebe mit Wasserstoff eine Rolle spielen, auf Kurzstrecken eventuell sogar Batterieantriebe. Doch für Langstreckenflüge wird Kerosin aufgrund seiner unangefochtenen Energiedichte vermutlich konkurrenzlos bleiben. Eine Herausforderung besteht deshalb in der Entwicklung preiswerter Verfahren zur Herstellung von synthetischem klimaneutralem Kerosin.

Der Weltklimarat zitiert für synthetisches Kerosin CO₂-Vermeidungskosten in Höhe von 80 \$/t. Er kommentiert diese Zahl auf Seite 624 mit den Worten „Die Vermeidungskosten sind so empfindlich, dass beispielsweise die CO₂-Vermeidungskosten ungefähr 80 \$/t CO₂-Äquivalent betragen, wenn eine Energieeinheit von Biotreibstoff die CO₂-Emissionen um 80 % verringert, jedoch 20 % mehr kostet als Benzin, während die CO₂-Vermeidungskosten auf 0 \$/t CO₂-Äquivalent absinken, wenn der Preis des Biotreibstoffs auf den Wert abfällt, an dem er Parität zu Benzin hat“ [wörtliche Übersetzung d. Verf.]. Als Quelle wird eine Studie der Internationalen Energieagentur IEA aus dem Jahr 2009 zitiert. Übersetzen wir den Satz aus der Fachsprache in verständliches Deutsch, so würde er besagen, dass sich die CO₂-Vermeidungskosten für Fliegen mit synthetischem Kerosin im Bereich zwischen 0 \$/t und 80 \$/t bewegen.

Diese beiden Zahlen sind mathematisch nicht zu beanstanden, ähnlich wie unsere oben ermittelten Lebensmittelkosten in Höhe von einem Euro pro Tag. Wie diese Werte genau zustande kommen, lässt sich zwar ansatzweise, aber nicht vollumfänglich anhand der IEA-Studie “Transport, Energy and CO₂” nachvollziehen. Dieses Dokument ist im Internet frei verfügbar. Kapitel 2 widmet sich den “transport fuels”, den Brennstoffen für den Transport.

Die IEA-Studie gibt in Tabelle 2.21 auf Seite 110 die CO₂-Vermeidungskosten für unterschiedlich hergestellte Biotreibstoffe an. Die Kosten bewegen sich dabei zwischen minus 200 \$/t und plus 800 \$/t. Der für die Luftfahrt angegebene Wert liegt zwischen 30 \$/t und 200 \$/t. Damit sind die Aussagen von IPCC und IEA zwar ähnlich, aber nicht identisch. Die im IPCC angegebene Preisspanne ist niedriger als die in der zitierten Originalarbeit.

Die Zahlen gelten unter der stillschweigenden Voraussetzung, dass für die Produktion von Biotreibstoffen ein unbegrenztes Potenzial an preiswerter Biomasse zur Verfügung steht. Das mag regional für den nicht-nachhaltigen Anbau von Energiepflanzen in brasilianischen Monokulturen gelten, ist aber ansonsten wenig realistisch. Würde man beispielsweise sämtlichen in Deutschland produzierten Weizen in Kerosin umwandeln, könnte man damit gerade einmal ein Drittel des jährlichen Kerosinbedarfs decken. An diesen Überlegungen wird deutlich, dass die Zahlen aus den Berichten von IPCC und IEA zwar mathematisch korrekt sind, jedoch Kostenrisiken vom Typ bekannte Unbekannte unberücksichtigt lassen.

Um die Kostenrisiken für die Herstellung synthetischer Treibstoffe im globalen Maßstab zu beziffern, ist es notwendig, neben Biokraftstoffen auch solche aus Herstellungsverfahren zu betrachten, die von der Verfügbarkeit von Biomasse unabhängig sind. Wir haben hierzu am DLR-Institut für Technische Thermodynamik eine Methodik entwickelt, mit der die Kostenunsicherheiten sowohl für Biotreibstoffe als auch für E-Fuels nachvollziehbar analysiert werden können.

Kerosinkosten und die Dissertation König

Um die Methodik zu erproben, habe ich vor einigen Jahren gemeinsam mit meinem Kollegen Ralph-Uwe Dietrich den Doktoranden Daniel König betreut. Herr König trat mit der Zielsetzung an, die Kosten für erneuerbares Kerosin zu berechnen, welches nicht aus Biomasse, sondern aus regenerativ erzeugtem Wasserstoff unter Zuhilfenahme von CO₂ aus Industrieprozessen hergestellt wird. Solche synthetischen Kraftstoffe heißen E-Fuels, weil der Wasserstoff durch Elektrolyse gewonnen wird.

Herr Dietrich und ich haben Herrn König keinerlei Vorgaben über wünschenswerte Treibstoffkosten gemacht. Wir haben ihm vielmehr signalisiert, dass seine Promotionsnote nur von der Qualität seiner Analysemethode und nicht von der politischen Opportunität seiner Zahlen abhängen würde. Unsere Maßgaben bestanden vielmehr darin, dass Herr König seine Berechnungen erstens anhand realistischer und aktueller Kosten von Windstrom und CO₂ durchführen sollte. Zweitens sollte er die Berechnungsmethode so transparent gestalten, dass

sich die Abhängigkeit des Kerosinpreises von den unterschiedlichen Parametern in Form sogenannter Sensitivitätskurven leicht darstellen ließe.

Herr König hat seine Dissertation mit der Note „Sehr gut“ abgeschlossen und die Ergebnisse in mehreren referierten internationalen Fachzeitschriften veröffentlicht. Ein zentrales Resultat seiner Analysen besteht darin, dass erneuerbares Kerosin aus deutschem Windstrom und CO₂ aus Industrieprozessen im Jahr 2016 reichlich drei Euro pro Liter kosten würde. Es wäre damit etwa fünfmal teurer als fossiles. Der größte Hebel zur Preissenkung liegt nach Königs Erkenntnissen in der Verringerung der Kosten für Windstrom. An der Größenordnung der Zahlen hat sich seit Veröffentlichung der Dissertation nichts Grundlegendes geändert.

Um aus den Herstellungskosten von E-Fuels die CO₂-Vermeidungskosten zu ermitteln, müssen wir die Differenz zwischen dem Preis für fossiles Kerosin in Höhe von 0,60 €/l und dem für CO₂-neutralen Treibstoff in Höhe von 3 €/l berechnen. Die Preisdifferenz von 2,40 €/l entspricht den Mehrkosten für die Vermeidung von etwas mehr als 2 Kilogramm CO₂. Wir erhalten somit CO₂-Vermeidungskosten von knapp 1.000 €/t. Dies liegt etwas über der oberen Grenze im Bericht der IEA und um den Faktor 10 über der oberen Zahl aus dem Bericht des Weltklimarates. Der Faktor 10 quantifiziert das Kostenrisiko durch die „bekannte Unbekannte“ in Gestalt des begrenzten Biomassepotenzials.

Das Beispiel der synthetischen Flugtreibstoffe verdeutlicht, dass Kostenrisiken durch bekannte Unbekannte wie etwa die Kosten von Windstrom und das globale Biomassepotenzial zu erheblichen Steigerungen der Kosten der Dekarbonisierung des Energiesystems gegenüber Schätzungen aus dem Bericht des Weltklimarates führen können.

Bei der Vorhersage der Kosten des Energiesystems der Zukunft existieren noch zahlreiche andere bekannte Unbekannte. Zwei davon seien kurz beleuchtet.

Kosten des Rohstoffs CO₂

Eine wichtige bekannte Unbekannte ist die Frage, wie wir in einer künftigen Welt ohne fossile Rohstoffe preiswert Kohlenstoff für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe gewinnen. Eine Abscheidung von CO₂ aus der Luft ist zwar technisch möglich. Ich halte es jedoch für unwahrscheinlich, dass diese Technologie jemals so günstig wird, dass sie gegenüber CO₂ aus Biomasse konkurrenzfähig wäre. Eine originelle Diskussion dazu präsentiert der Nobelpreisträger Robert Laughlin in seinem Buch „Der Letzte macht das Licht aus“. Eine Erzeugung von CO₂ – oder genauer gesagt CO für Synthesegas – aus Biomasse könnte unsere Biosphäre an die Grenzen ihrer Belastbarkeit bringen. Die Wissenschaft sollte deshalb meines

Erachtens herausfinden, ob es möglich ist, die Biomasseerzeugung vom Landverbrauch abzukoppeln. Dies könnte entweder durch *vertical farming*, also den Anbau von Pflanzen in speziell errichteten Bauwerken, oder durch großflächige Algenproduktion im Meer erfolgen. Die Kostenrisiken hierfür sind noch weitgehend unerforscht.

Kosten von Stromspeichern

Eine andere bekannte Unbekannte ist die langfristige Entwicklung der Kosten für Stromspeicher. Hierzu gehören sowohl Batterien als auch die in der Öffentlichkeit noch weitgehend unbekanntes Carnot-Batterien. Bei konventionellen Batterien ist zu klären, in welchen Mengen und zu welchen Preisen sie unter der Randbedingung nachhaltiger Herstellung und Wiederverwertung auf lange Sicht verfügbar sein werden. Von dieser bekannten Unbekannten hängt ab, ob sich das Verkehrssystem tatsächlich so preiswert durch Elektromobilität ergänzen lässt, wie manche Energieszenarien nahelegen. Davon hängt auch ab, welche Zukunft die Kopplung von Fotovoltaik- und Windkraftwerken mit großen Batteriespeichern hat.

Carnot-Batterien können elektrische Energie in vergleichbarem Umfang wie Pumpspeicherwerke speichern, allerdings an jedem beliebigen Ort der Welt. Wir hatten diese Technologie für dezentrale Anwendungen bereits in Kapitel 5 kurz angesprochen. Carnot-Batterien sind nach dem Begründer der Thermodynamik Sadi Carnot benannt. Sie speichern elektrische Energie in Form von Wärme, beispielsweise in flüssigem Salz bei Temperaturen zwischen 250 °C und 550 °C in Behältern von der Größe eines Gasometers. Die Umwandlung von Strom in Wärme erfolgt durch Elektroheizer oder künftige Hochtemperaturwärmepumpen. Für die Rückverstromung können Dampfturbinen oder Gasturbinen eingesetzt werden.

Der Nobelpreisträger Robert Laughlin von der Stanford University hat einen maßgeblichen Anteil an der Entwicklung dieser Technologie. Ob sich in Zukunft das Laughlin-Konzept auf der Basis von Gasturbinenprozessen oder das DLR-CHEST-Konzept meines Instituts auf der Basis von Dampfkraftprozessen als das preiswertere erweist, ist eine bekannte Unbekannte, an der wir gemeinsam forschen. In seinem Buch „Der Letzte macht das Licht aus“ schreibt Laughlin hoffnungsvoll: „Die beste Alternative zum Pumpspeicherwerk ist die Stromspeicherung über Wärme“. Als Laughlin im Herbst 2018 bei uns im DLR und an der Universität Stuttgart zu Besuch war, hat er mit seinem Optimismus siebenhundert Zuhörer im überfüllten Hörsaal inspiriert. Ob er mit seiner Vision recht hat, wird die Zukunft zeigen.

6.6. Typologie der Kostenrisiken: unbekannte Unbekannte

Die am schwierigsten fassbare Kategorie sind die „unbekannten Unbekannten“. Im Englischen spricht man von “unknown unknowns”. Wir wissen heute noch nicht, welche erfreulichen oder unerfreulichen Überraschungen uns in den nächsten dreißig Jahren bis zum vielzitierten Jahr 2050 erwarten. Aus diesem Grund ist es hier – anders als in den vorherigen Abschnitten – nicht möglich, ein verlässliches Beispiel für diese Kostenrisiken vorzustellen.

Wir können uns jedoch eines Kunstgriffs bedienen und uns gedanklich in die Vergangenheit begeben. Blicken wir aus unserem heutigen Alltagsleben in das gestrige, so stellen wir fest, dass wir stets von unbekanntem Unbekanntem umgeben waren. Aus der Perspektive des Jahres 1989 waren Alkoholgenuss, Bewegungsmangel und Drogensucht Gesundheitsrisiken für Jugendliche. Es handelte sich schon damals um *Bekanntes*, weil die Laster seit Menschengedenken unser Leben begleiten. Es handelte sich überdies um *bekanntes* Bekanntes, weil deren Gesundheitsrisiken schon damals vor dreißig Jahren umfassend verstanden waren.

Hätten wir im Jahr 1989 vorhersehen können, dass heute Smartphones und Computerspiele zu einer weiteren Suchtgefahr für Jugendliche werden würden? Das Smartphone war im Jahr 1989 eine Unbekannte. Für Computerspiele gilt Ähnliches, obwohl diese Form des Zeitvertreibs damals schon in Ansätzen existierte. Da Smartphones und Computerspiele *Unbekanntes* waren, gab es auch niemanden, der über deren Risiken nachdenken konnte. Somit waren die Risiken von Smartphones und Computerspielen im Jahr 1989 *unbekanntes* Unbekanntes.

Wie können wir die finanziellen Risiken unbekannter Unbekannter bei der Prognose von Energiewendekosten berücksichtigen? Wir können heute nicht ahnen, ob erneuerbare Energien morgen vor ähnlichen Problemen stehen werden wie die gestrigen Zukunftstechnologien Kernenergie oder Magnetschwebbahnen heute. Wir können jedoch auch hier versuchen, aus einem Blick in die Technikgeschichte Lehren für den künftigen Umgang mit unbekanntem Unbekanntem abzuleiten.

Soziale Kosten erneuerbarer Energie

Als Beispiel möchte ich die sozialen Kosten erneuerbarer Energien aus meiner Perspektive als Doktorand in den Jahren 1987 bis 1990 beschreiben. Aus heutiger Sicht gehören diese finanziellen Risiken zwar in die Kategorie *bekanntes* Unbekanntes, doch damals waren sie für

mich *unbekannte* Unbekannte.

Im Spätherbst 1989, kurz nach dem Mauerfall, hörte ich als Doktorand am Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf, dem heutigen Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, den Gastvortrag eines Professors von der Universität Oldenburg. Der Referent hieß Joachim Luther. Er sprach von externen Kosten der Kernenergie und der Kohleverstromung, einem Begriff, den die meisten Zuhörer bis dahin nie gehört hatten. Luthers Rede hat mich tief beeindruckt. Ich könnte weite Teile des Inhalts noch heute aus dem Gedächtnis wiedergeben.

Um den Bezug zu den unbekanntem Unbekanntem herzustellen, muss ich kurz die DDR-Energiepolitik erläutern. Die wichtigste Säule der Stromversorgung waren Braunkohlekraftwerke. Am Ausbau der Kernenergie wurde in Kooperation mit der Sowjetunion gearbeitet. Zwar gab es in der DDR unter dem Einfluss der westdeutschen Anti-Atomkraft-Bewegung zaghafte Aktionen gegen den Ausbau der Kernenergie. Doch handelte es sich dabei um keine prägende gesellschaftliche Strömung. Für erneuerbare Energie interessierte sich in der DDR so gut wie niemand. Das Thema war im damaligen Alltagsleben ungefähr so bedeutsam wie heute die Suche nach Exoplaneten. Kurzum: Erneuerbare Energie war in meiner einstigen Welt eine *Unbekannte*.

Vor dem Hintergrund des damals entspannten Verhältnisses zu Kohle und Kernenergie fand ich es bemerkenswert, wie der spätere Direktor des Freiburger Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ausführte, in den Preisen für Kohle- und Atomstrom seien zahlreiche Kosten unberücksichtigt. Er nannte als Beispiele die medizinische Versorgung von Menschen, die in der Nähe von Kohlekraftwerken an Lungenkrankheiten litten, die Rekultivierungskosten für Tagebaue sowie die Kosten für die Folgen des Reaktorunfalls in Tschernobyl.

Luther forderte, diese externen Kosten zu *internalisieren*, also in den Strompreis einzurechnen. Dann würden sich nach seiner Meinung diese beiden Arten der Stromerzeugung deutlich verteuern. Am Ende erläuterte Luther, dass Strom aus erneuerbaren Ressourcen 1989 noch spürbar kostspieliger sei als aus fossilen und atomaren Quellen. Im Fall einer konsequenten Internalisierung der externen Kosten würde sich jedoch die Preisdifferenz schrittweise verringern und dazu führen, dass sich die Kostenverhältnisse eines Tages zu Gunsten der erneuerbaren Energien umkehren. Der Begriff *Internalisierung externer Kosten* wird heute selten verwendet. Wir sprechen vielmehr von sozialen Kosten – die für Kohle- und Atomstrom sind heute, dreißig Jahre nach Luthers Vortrag, wissenschaftlich gut untersucht und gelten als umfassend verstanden.

Aus meiner Sicht als Doktorand im Wendeherbst 1989 waren die sozialen Kosten, die Kohle- und Atomstrom ebenso wie erneuerbare Energien hervorriefen, *Unbekannte* – bis zu jenem Vortrag. Doch wo waren zuvor die *unbekannten* Unbekannten, also die Unbekannten, von denen ich nicht einmal wusste, dass ich über sie nichts wusste? Die Antwort liegt in der Verknüpfung von sozialen Kosten mit erneuerbarer Energie.

Soziale Kosten der Windenergie

Dreißig Jahre nach Luthers Vortrag schilderte mir mein Kollege Franz Trieb seine neue Hypothese. Trieb ist ein weltweit anerkannter Energieanalyst, der mit seinen Arbeiten die theoretische Grundlage für künftige Solarstromimporte aus Nordafrika nach Europa geschaffen hat. Auf einem Workshop der Deutschen Physikalischen Gesellschaft hatte er über seine Untersuchungen zum Einfluss von Windkraftanlagen auf Insekten vorgetragen. Neben seiner Beschäftigung mit Solarkraftwerken, Flüssigsalzspeichern sowie dem Umbau von Kohlekraftwerken zu CO₂-armen Wärmespeicherkraftwerken hatte sich Trieb der Frage zugewandt, ob Windkraftanlagen eine der Ursachen für den Rückgang der Insektenpopulation sein könnten.

Mit akribischer Sorgfalt hatte Trieb dutzende Fachveröffentlichungen zur Insektendichte in der Atmosphäre, zur Strömungsstruktur in bodennahen Grenzschichten, zur Aerodynamik von Windkraftanlagen sowie zur Überlebensrate von Insekten bei der Wechselwirkung mit dem Rotor eines Windrades durchforstet. Auf der Basis seiner Erkenntnisse stellte er eine konzeptionell sehr einleuchtende Hypothese auf, die nicht nur in Fachartikeln, sondern sogar in einem Sachbuch wie diesem im Detail vermittelbar gewesen wäre.

Die Hypothese liefert eine Schätzung für die Masse der pro Jahr in deutschen Windkraftanlagen getöteten Insekten. Sie beruht auf drei Eingangsparametern: (1) der Insektendichte in den bodennahen Luftschichten, ausgedrückt in Insekten pro Kubikkilometer, (2) der pro Jahr durch alle deutschen Windkraftanlagen fließenden Luftmenge, ausgedrückt in Kubikkilometern und (3) der Wahrscheinlichkeit, dass ein Insekt beim Durchfliegen einer Windkraftanlage zu Tode kommt. Jeder dieser drei Parameter lässt sich im Prinzip experimentell bestimmen. Durch deren Kombination gelangt Trieb zu einer einfachen Formel, die die Insektenverluste pro Jahr beschreibt. Trieb's wissenschaftliche Leistung liegt in der Herleitung dieser Formel, nicht im Einsetzen spezieller Zahlenwerte.

Obwohl alle drei Parameter mit großen Unsicherheiten behaftet sind, kommt Trieb zu dem Schluss, dass Windkraftanlagen *möglicherweise* zum Insektenrückgang beitragen. Seine

Hauptaussage lautet, dass diese Fragestellung einer fundierten Untersuchung bedarf. Ich halte es für beschämend, dass dem weltbekannten Wissenschaftler Trieb trotz unwiderlegter Korrektheit seiner Formel und trotz seines sachlichen und zurückhaltenden Auftretens eine Welle öffentlicher Aggression entgegengerollt ist. Von den Kommentaren gehört „Die DLR-Studie ist eine Luftnummer“ zu den harmloseren. Was die Wortwahl der zitierten Politikerin gegenüber einem renommierten Forscher allerdings brisant macht, ist die allgegenwärtige Klage ihrer Partei über die Verrohung der Sprache im politischen Diskurs.

Dabei ist die Trieb-Hypothese aus theoretischer Sicht nichts anderes als eine Aussage über mögliche soziale Kosten der Windenergie und eine Empfehlung, diese weiter zu untersuchen. Wenn Kohle- und Atomstrom soziale Kosten erzeugen, warum nicht auch Ökostrom? Die sozialen Kosten der erneuerbaren Energien sind aus der Perspektive eines Doktoranden im Jahr 1989 die unbekannt Unbekannten. Aus heutiger Sicht handelt es bei den sozialen Kosten erneuerbarer Energien um bekannte Unbekannte.

Kehren wir zurück zur Gegenwart. Aus unbekannt Unbekannt werden Kostenrisiken für die Transformation des Energiesystems entstehen, die sowohl positive als auch negative Vorzeichen besitzen können. Wie diese Variablen in künftige Kostenschätzungen einzubauen sind, ist eine offene Frage an die Forschung. Bis zu deren Beantwortung kann eine Übergangslösung darin bestehen, dass wir für die Kostenrisiken der Transformation des Energiesystems ebenso großzügige Sicherheitsfaktoren ansetzen wie bei der Risikobewertung von Passagierflugzeugen und Kernkraftwerken.

Zwischen Redaktionsschluss und Drucklegung dieses Buches hat uns die Corona-Epidemie – eine bislang unbekannt Unbekannte für medizinische und volkswirtschaftliche Kostenrisiken – anschaulich vor Augen geführt, wie hilfreich Vorratswirtschaft, Redundanz und hohe Sicherheitsfaktoren für die Bewältigung von Krisen sein können. Während sich die vielgepriesenen öffentlichen Verkehrsmittel als Infektionsbeschleuniger entpuppten und ihren Betrieb teilweise einstellten, erwies sich der von Mobilitätswendetheoretikern oft gescholtene Pkw mit Verbrennungsmotor als verlässliche Hygieneinsel und Retter in der Not. Niemand weiß heute, wie die künftigen Risiken vom Typ unbekannt Unbekannt für das Energiesystem aussehen. Denkbar wären ein Blackout im deutschen Stromnetz, ein internationaler Blackout durch Sonnenwindfluktuationen, eine Überflutung von Megacities durch Tsunamis sowie eine globale Abkühlung infolge regionaler Atomkriege oder durch Vulkanausbrüche. Um auf solche seltenen unbekannt Ereignisse vorbereitet zu sein, ist ein robustes, redundantes und durch technologische Diversität mit hohen Sicherheitsfaktoren

gekennzeichnetes Energiesystem nach meiner Ansicht die beste Vorsorge. Ich sehe es deshalb kritisch, die Vielfalt unseres Energiesystems per Dekret zu reduzieren. Anders als bei der Corona-Epidemie, die alle Länder schädigt, hätte ein deutscher Blackout für die Wettbewerbsfähigkeit und den Wohlstand Deutschlands unabsehbare Folgen.

6.7. Fazit

Unsere eingangs formulierte Behauptung über die Energiewende lässt sich im Ergebnis unserer Analyse durch die folgenden Thesen auf eine rationale Basis stellen.

1. In zahlreichen Veröffentlichungen werden Berechnungen präsentiert, die für die Dekarbonisierung des weltweiten Energiesystems Kosten in der Größenordnung weniger Prozente des globalen Bruttosozialprodukts angeben. Diese Berechnungen enthalten weder technische noch ökonomische Risikoanalysen und stellen insofern Best-Case-Szenarien dar.

2. Optimierungsprogramme liefern mathematisch korrekte und konsistente Energieszenarien mit minimalen Kosten. Ohne Risikoanalyse lässt sich jedoch nicht angeben, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass solche kostenminimalen Szenarien tatsächlich realisiert werden.

3. Anhand einer quantitativen Analyse von 258 Großprojekten aus dem Bereich Verkehrsinfrastruktur hat Flyvbjerg nachgewiesen, dass Budgetüberschreitungen von mehr als 40 % die Regel und über 80 % keine Seltenheit sind. Gegenüber den Planungen sind die Projekte meist gekennzeichnet durch höhere Kosten, langsamere Umsetzung und geringeren Nutzen.

4. Für Großprojekte aus dem Bereich CO₂-freier Energieinfrastruktur existieren weltweit keine vergleichbar umfassenden Untersuchungen. Eine unabhängige und statistisch repräsentative Kosten-Nutzen-Analyse bereits realisierter Projekte ist nach dem derzeitigen Wissensstand somit nicht möglich.

5. Eine techno-ökonomische Risikoanalyse der Dekarbonisierung des globalen Energiesystems erfordert zusätzlich zu den existierenden Best-Case-Szenarien die Analyse von Worst-Case-Szenarien. Aus dem entstehenden Kostenkorridor lässt sich ein Szenario maximaler Wahrscheinlichkeit (Most-Likely-Development-Szenario, MLD) ableiten.

6. Risiken aus der Kategorie „bekannte Bekannte“ umfassen bei Energieprojekten beispielsweise zu geringe erneuerbare Energiepotenziale, zu schwache erneuerbare

Energieerzeugungskapazitäten, zu niedrige Energiespeicherkapazitäten, zu schwache Übertragungskapazitäten, zu optimistische Realisierungszeitprognosen und zu optimistische Nutzensprognosen. Diese Risiken führen gegenüber dem Best-Case-Szenario zu deutlich höheren Kosten und geringeren Einnahmen.

7. Risiken aus der Kategorie „bekannte Unbekannte“ umfassen bei Energieprojekten beispielsweise Unsicherheiten über die Herkunft von nicht-fossilem Kohlenstoff, über die Rolle von Wärmespeichern in einem künftigen Energiesystem, über die Ressourcenfrage bei der globalen Batterieproduktion sowie über künftige Kostendegressionen bei Energieerzeugungs-, Energiespeicher- und Energieverteilungssystemen. Diese Unwägbarkeiten können gegenüber heutigen Szenarien sowohl zu einer Kostensenkung als auch zu einer Kostensteigerung führen.

8. Risiken aus der Kategorie „unbekannte Unbekannte“ lassen sich naturgemäß nicht prognostizieren. Zu ihnen gehören jedoch künftige Erfindungen sowie die sozialen Kosten erneuerbarer Energien, die heute noch nicht umfassend verstanden sind.