
Dissertation

Raum für Energie

**Ein integratives Konzept zur Modellierung einer
regionalen nachhaltigen Energieversorgung**

Vorgelegt von
Roland Zink M.A.

Philosophische Fakultät der Universität Passau

Betreuer
Prof. Dr. Ernst Struck, Lehrstuhl für Anthropogeographie
Prof. Dr. Dieter Anhuf, Lehrstuhl für Physische Geographie

Passau
2012

Zusammenfassung

Die nachhaltige Transformation der Energiesysteme wird in politischen wie gesellschaftlichen Diskussionen häufig auf die Parole „weg von fossil-atomaren hin zu erneuerbaren Energieformen“ reduziert. Dies allein wird dem Leitbild allerdings nicht zwingend gerecht. Zum einen erfüllen auch erneuerbare Energien nicht in jeder Region die Kriterien der Nachhaltigkeit und zum anderen gibt die bloße Forderung nach mehr erneuerbaren Energien noch keine Orientierung bezüglich der konkreten Umsetzung. Wo die neuen Energieformen gebaut werden sollen und wie die Technologien Bioenergie, Geothermie, Photovoltaik, Wasserkraft oder Windenergie in bestehende Versorgungsstrukturen eingebunden werden können, bleibt folglich unbeantwortet. Gleichzeitig führt die einseitige Beachtung von ökonomischer Rentabilität bzw. staatlicher Subventionierung häufig zu räumlichen Fehlallokationen und gesellschaftlichen Friktionen. Die Arbeit will deshalb einen wissenschaftlich fundierten und zugleich praktikablen Weg zur Gestaltung einer regionalen nachhaltigen Energieversorgung aufzeigen. Nachhaltigkeit ist demzufolge bereits in die konzeptionelle Entwicklung der Energiestrategie zu integrieren und anschließend für die praktische Anwendung zu operationalisieren.

Aufbauend auf der Suche nach nachhaltigen Strukturen in der Energieversorgung wird eine neue Zieldefinition von nachhaltiger Energieversorgung formuliert, um anschließend das Konzept doppelter Nachhaltigkeit zu entwickeln. Vorgabe der Zieldefinition ist es, die Bereiche der Technologiebewertung und der Potenzial- bzw. Standortsuche in einem räumlichen Kontext gemeinsam zu betrachten. Neben der Frage, welche Technologien für eine nachhaltige Versorgung in einer Region am besten geeignet sind, rückt das Konzept bei der Standortplanung die Suche nach ökonomisch rentablen, ökologisch verträglichen und sozial akzeptierten Orten in den Mittelpunkt. Damit wird eine Energiestrategie vorgestellt, die, orientiert an den Leitlinien einer nachhaltigen Entwicklung, einen Weg aufzeigt, wie kommunale und regionale Energieversorgungsstrukturen räumlich gestaltet und anhand von Nachhaltigkeitskriterien optimiert werden können. Angewendet wird das Konzept doppelter Nachhaltigkeit exemplarisch für den Regierungsbezirk Niederbayern.

Summary

The sustainable transformation of the energy system in political and social discussions is often reduced to the slogan "from fossil-nuclear to renewable forms of energy." But this single postulation does not meet the vision of sustainable development. On the one hand also renewable energies do not comply in every region the criteria of sustainability and on the other hand only the call for more renewable energies does not provide orientation for implementation. Questions on where the new energy technologies will be built and how the technologies i.e. bioenergy, geothermal, photovoltaics, hydropower or wind energy can be integrated into existing energy supply systems remain unanswered. Simultaneously the one-sided view on economic profitability or state subsidies and the absence of a comprehensive coordinated site planning often leads to spatial misallocation and social frictions. Hence, the thesis will show a scientifically sound and practical way to design a regional sustainable energy system. Sustainability has to be integrated already in the conceptual development of the energy strategy and then needs to be operationalize for practical application.

Based on the search for sustainable structures in the energy sector, a new target definition of sustainable energy supply system is formulated in order to develop the "concept of double sustainability". Central element of the target definition is to regard the technology assessment and the potential- or site planning together in a spatial context. Besides the question which technologies are the most suitable for a sustainable supply in a region, the primary focus of the concept is on site planning, to identify the potential of profitable, ecological and socially acceptable places. As a result an energy strategy is presented based on the guidelines for sustainable development, demonstrating a way how to design local or regional sustainable energy systems and how to optimize them using sustainability criteria. Moreover the application of the "concept of double sustainability" is demonstrated based on a case study for the District of Lower Bavaria.

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|------------|-----------|
| | 6 |
| | 7 |
| | 8 |
| I | 9 |
| II | 14 |
| 1. | 14 |
| 2. | 21 |
| 3. | 24 |
| 4. | 26 |
| III | 29 |
| 1. | 29 |
| 2. | 30 |
| 2.1 | 30 |
| 2.2 | 33 |
| 2.2.1 | 34 |
| 2.2.2 | 35 |
| 2.2.3 | 36 |
| 2.3 | 38 |
| 2.4 | 40 |
| 2.5 | 43 |
| 3. | 44 |
| IV | 48 |
| 1. | 48 |
| 2. | 51 |
| 2.1 | 51 |
| 2.2 | 53 |
| 2.3 | 57 |
| 3. | 61 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| V | Strategie zur Implementierung des Konzeptes | 63 |
| 1. | Regionale Bewertung von Energietechnologien hinsichtlich ihres Nachhaltigkeitsaspektes | 64 |
| 1.1 | Zieldefinition | 66 |
| 1.2 | Modellbildung | 67 |
| 1.2.1 | Kriterien zur Bewertung von Energietechnologien | 67 |
| 1.2.2 | Indikatoren zur Bewertung von Energietechnologien | 71 |
| 1.2.3 | Bestehende Indikatorensysteme im Energiebereich | 72 |
| 1.2.4 | Auswahl von Indikatoren | 76 |
| 1.2.5 | Erläuterungen zu den Indikatorengruppen | 79 |
| 1.2.6 | Hierarchische Strukturierung des Bewertungsmodells | 88 |
| 1.3 | Technologiebewertung | 90 |
| 1.3.1 | Mehrkriterielle Entscheidung | 90 |
| 1.3.2 | Wertefunktionen | 91 |
| 1.3.3 | Festlegung der Kriteriengewichte durch Akteursbefragung | 93 |
| 1.3.4 | Schriftliche Befragung und Gruppenentscheidung | 98 |
| 1.3.5 | Indexbildung | 100 |
| 1.4 | Sensitivitätsanalyse | 101 |
| 1.5 | Diskussion der Technologiebewertung | 102 |
| 2. | Nachhaltige Potenzial- und Standortmodellierung | 104 |
| 2.1 | Nachhaltigkeitsdimensionen und Potenzialermittlung | 105 |
| 2.2 | Potenzial- und Standortsuche | 109 |
| 2.2.1 | Theoretisches und technisches Potenzial als Basis zur Suche nachhaltiger Standorte | 110 |
| 2.2.2 | Ökonomische Dimension | 112 |
| 2.2.3 | Ökologische Dimension | 113 |
| 2.2.4 | Soziale Dimension | 118 |
| 2.3 | Räumliche Modellierung | 121 |
| 2.3.1 | Planungsinstrument GIS | 121 |
| 2.3.2 | Kriterienkatalog | 122 |
| 2.3.3 | Modellaufbau und Standortbewertung | 123 |
| 2.3.4 | Sichere Energieversorgung und energieautarke Regionen | 125 |
| 3. | Zwischenfazit: Nachhaltigkeit ist umsetzbar | 129 |
| VI | Empirische Untersuchung | 131 |
| 1. | Zur Auswahl des Untersuchungsraumes | 131 |
| 1.1 | Der Regierungsbezirk Niederbayern | 131 |
| 1.2 | Status Quo der Stromversorgung in Niederbayern | 135 |
| 1.3 | Strombedarf in Niederbayern | 138 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 2. | Zur Auswahl und Definition der Referenzanlagen | 141 |
| 2.1 | Atomenergie | 143 |
| 2.2 | Bioenergie | 146 |
| 2.3 | Erdgas | 152 |
| 2.4 | Kohlekraft | 155 |
| 2.5 | Photovoltaik | 156 |
| 2.6 | Wasserkraft | 162 |
| 2.7 | Windenergie | 166 |
| 3. | Befragung | 171 |
| 4. | Technologiebewertung | 172 |
| 4.1 | Herkunft und Qualität der Daten | 172 |
| 4.2 | Indikatorenwerte der Referenzanlagen | 177 |
| 4.3 | Wertefunktionen der Indikatoren | 179 |
| 4.4 | Gewichtung: Ergebnisse der Akteursbefragung | 179 |
| 4.5 | Indexwerte und Gesamtergebnis | 181 |
| 4.6 | Kritische Reflexion der Technologiebewertung | 184 |
| 4.7 | Zwischenfazit: Nachhaltige Technologien für Niederbayern | 185 |
| 5. | Räumliche Potenzial- und Standortmodellierung | 188 |
| 5.1 | Herkunft und Qualität der Geodaten | 188 |
| 5.2 | Verwendete Software | 190 |
| 5.3 | Der Kriterienkatalog | 190 |
| 5.4 | Wasserkraft | 198 |
| 5.4.1 | Potenzial der Wasserkraft | 198 |
| 5.4.2 | Nachhaltige Standorte für ein Wasserkraftwerk | 201 |
| 5.4.3 | Beitrag der Wasserkraft zur autarken Versorgung | 202 |
| 5.5 | Windenergie | 203 |
| 5.5.1 | Theoretisches Potenzial der Windenergie | 203 |
| 5.5.2 | Nachhaltige Standorte für eine Windkraftanlage | 209 |
| 5.5.3 | Exkurs: Kompromisszenario | 213 |
| 5.5.4 | Beitrag der Windenergie zur autarken Versorgung | 220 |
| 5.6 | Sonnenenergie | 221 |
| 5.6.1 | Theoretisches und technisches Sonnenenergiepotenzial | 221 |
| 5.6.2 | Nachhaltiges Potenzial von Photovoltaik-Dachanlagen | 224 |
| 5.6.3 | Beitrag von Photovoltaik-Dachanlagen zur autarken Versorgung | 225 |
| 5.6.4 | Nachhaltige Standorte für eine Photovoltaik-Freiflächenanlage | 227 |
| 5.6.5 | Beitrag von Photovoltaik-Freiflächenanlagen zur autarken Versorgung | 233 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.7 | Bioenergie | 234 |
| 5.7.1 | Theoretisches und nachhaltiges Biomassepotenzial Holz | 234 |
| 5.7.2 | Nachhaltige Standorte für ein Biomasseblockheizkraftwerk | 237 |
| 5.7.3 | Theoretisches und nachhaltiges Biomassepotenzial Mais | 241 |
| 5.7.4 | Nachhaltige Standorte für eine Biogasanlage | 247 |
| 5.7.5 | Beitrag der Bioenergie zur autarken Versorgung | 250 |
| 6. | Kritische Reflexion der Potenzial- und Standortmodellierung | 251 |
| 7. | Fazit: Nachhaltige Energieversorgung für Niederbayern | 253 |
| VII | Schlussbetrachtungen: Das Potenzial der doppelten Nachhaltigkeit als regionale Energiestrategie | 258 |
| | Bibliographie | 266 |
| | Anhang | 292 |

Verzeichnis der Abbildungen

| | | | Seite |
|------------|---------|--|-------|
| I | | Einleitung: Raum für Energie | |
| | Abb. 1 | Struktureller Aufbau der Arbeit | 12 |
| IV | | Raum für Energie: Das Konzept doppelter Nachhaltigkeit | |
| | Abb. 2 | Konzeptaufbau doppelter Nachhaltigkeit | 55 |
| V | | Strategie zur Implementierung des Konzeptes | |
| | Abb. 3 | Modellaufbau zur Bewertung von Energietechnologien | 65 |
| | Abb. 4 | Schema der Leitlinienfindung und Indikatorenauswahl | 67 |
| | Abb. 5 | Hierarchische Strukturierung des Bewertungsmodells | 89 |
| | Abb. 6 | Wertefunktionen für eine lineare Normierung und eine bandbreitenorientierte Normierung | 92 |
| | Abb. 7 | Auszug aus dem Fragebogen zur Gewichtung der sechs Leitlinien (Kriterien) mit Erläuterung und Bewertungsskala | 99 |
| | Abb. 8 | Potenzialanalyse und Nachhaltigkeitsdimensionen | 108 |
| | Abb. 9 | Struktur des Kriterienkatalogs | 123 |
| | Abb. 10 | Rasteranalyse und verwendeter Zahlencode | 124 |
| | Abb. 11 | Ergebnisvarianten der räumlichen Modellierung | 128 |
| VI | | Empirische Untersuchung | |
| | Abb. 12 | Entwicklung der Bruttostromerzeugung in Bayern | 136 |
| | Abb. 13 | Atomkraftwerk Isar II | 146 |
| | Abb. 14 | Biogasanlage Stephansposching | 150 |
| | Abb. 15 | Biomasseblockheizkraftwerk Mainkofen | 152 |
| | Abb. 16 | Erdgaskraftwerk Plattling | 154 |
| | Abb. 17 | Formen von Photovoltaik-Dachanlagen | 158 |
| | Abb. 18 | Photovoltaik-Freiflächenanlage Hettenkofen | 161 |
| | Abb. 19 | Laufwasserkraftwerk Straubing | 164 |
| | Abb. 20 | Kleinwasserkraftwerk in Plattling | 166 |
| | Abb. 21 | Entwicklung der Windenergie in Deutschland | 167 |
| | Abb. 22 | Windkraftanlagen in Wegscheid und Simbach | 170 |
| | Abb. 23 | Wirtschaftliche Rahmenbedingungen zur Berechnung von Stromgestehungskosten | 176 |
| | Abb. 24 | Akteursbefragung: Künftiger Einsatz von Energietechnologien | 186 |
| | Abb. 25 | Gemessene und berechnete Globalstrahlung ausgewählter Standorte in Niederbayern | 222 |
| | Abb. 26 | Eignung von Kiesgruben zur Photovoltaiknutzung | 228 |
| | Abb. 27 | Silomaisertrag in Niederbayern | 242 |
| | Abb. 28 | Nachhaltige Energieversorgung für Niederbayern | 257 |
| VII | | Schlussbetrachtung: Das Potenzial der doppelten Nachhaltigkeit als regionale Energiestrategie | |
| | Abb. 29 | Doppelte Nachhaltigkeit | 259 |

Verzeichnis der Karten

| | | | Seite |
|-----------|----|--|-------|
| VI | | Empirische Untersuchung | |
| Karte | 1 | Regierungsbezirk Niederbayern | 134 |
| Karte | 2 | Aktuelle Stromversorgung in Niederbayern | 137 |
| Karte | 3 | Räumliche Verteilung und Abschätzung des Stromverbrauchs in Niederbayern | 140 |
| Karte | 4 | Abschätzung des technischen Wasserkraftpotenzials in Niederbayern | 200 |
| Karte | 5 | Aktuelle Nutzung der Wasserkraft in Niederbayern | 202 |
| Karte | 6 | Windgeschwindigkeiten in Niederbayern | 206 |
| Karte | 7 | Potenzieller Windenergieertrag in Niederbayern | 209 |
| Karte | 8 | Nachhaltige Standorte der Windenergie in Niederbayern | 212 |
| Karte | 9 | Nachhaltige Standorte der Windenergie in Niederbayern Kompromisszenario | 217 |
| Karte | 10 | Windkraft in der Gemeinde Simbach Landkreis Dingolfing-Landau | 219 |
| Karte | 11 | Technisches Sonnenenergiepotenzial in Niederbayern | 224 |
| Karte | 12 | Nachhaltige Standorte von Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Niederbayern | 231 |
| Karte | 13 | Photovoltaik in der Gemeinde Stephansposching Landkreis Deggendorf | 232 |
| Karte | 14 | Theoretisches Waldrest- und Schwachholzpotenzial in Niederbayern | 235 |
| Karte | 15 | Nachhaltiges Waldrest- und Schwachholzpotenzial in Niederbayern | 236 |
| Karte | 16 | Nachhaltige Standorte von Biomasseblockheizkraftwerken in Niederbayern | 239 |
| Karte | 17 | Biomassekraftwerk in Mainkofen Stadt Deggendorf | 241 |
| Karte | 18 | Theoretisches Silomaispotenzial in Niederbayern | 243 |
| Karte | 19 | Nachhaltiges Silomaispotenzial in Niederbayern | 245 |
| Karte | 20 | Nachhaltiges Grünlandpotenzial in Niederbayern | 246 |
| Karte | 21 | Nachhaltige Standorte von Biogasanlagen in Niederbayern | 248 |
| Karte | 22 | Biogasanlagen in der Stadt Osterhofen | 250 |
| Karte | 23 | Nachhaltige Energieversorgung für Niederbayern | 256 |

Verzeichnis der Tabellen

| | | Seite |
|------------|--|-------|
| III | Nachhaltigkeit und deren Perspektive für die Energieversorgung | |
| Tab. | 1 System von Nachhaltigkeitsregeln des integrativen HGF-Ansatzes | 42 |
| V | Strategie zur Implementierung des Konzeptes | |
| Tab. | 2 Auflistung der als besonders relevant identifizierten Indikatorengruppen | 78 |
| Tab. | 3 Regionale theoretische Energiepotenziale | 110 |
| Tab. | 4 Abfrage sozialer räumlicher Restriktionen | 120 |
| VI | Empirische Untersuchung | |
| Tab. | 5 Strukturdaten von Niederbayern | 131 |
| Tab. | 6 Steckbrief Atomenergie | 145 |
| Tab. | 7 Steckbrief Biogasanlage | 151 |
| Tab. | 8 Steckbrief Biomasseblockheizkraftwerk | 152 |
| Tab. | 9 Steckbrief Erdgaskraftwerk | 154 |
| Tab. | 10 Steckbrief Kohlekraftwerk | 156 |
| Tab. | 11 Steckbrief Photovoltaik-Dachanlage | 159 |
| Tab. | 12 Steckbrief Photovoltaik-Freiflächenanlage | 162 |
| Tab. | 13 Steckbrief Laufwasserkraftwerk | 164 |
| Tab. | 14 Steckbrief Kleinwasserkraftwerk | 165 |
| Tab. | 15 Steckbrief Windkraftanlage | 169 |
| Tab. | 16 Datenquellen für die Quantifizierung der Indikatoren | 173 |
| Tab. | 17 Indikatorenwerte der Referenzanlagen | 178 |
| Tab. | 18 Gewichtung der Handlungsleitlinien | 180 |
| Tab. | 19 Indexwerte und Rangplätze der analysierten Technologien | 181 |
| Tab. | 20 Daten der Potenzial- und Standortmodellierung | 189 |
| Tab. | 21 Kriterienkatalog der Potenzial- und Standortmodellierung | 192 |
| Tab. | 22 Mittlerer Abfluss großer Flüsse in Niederbayern | 199 |
| Tab. | 23 Veränderte Kriterien im Kompromisszenario | 213 |
| Tab. | 24 Potenzieller Stromertrag von Photovoltaik-Dachanlagen in Niederbayern | 227 |

I Einleitung: Raum für Energie

„Zweck dieses Gesetzes ist es, insbesondere im Interesse des Klima- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen, die volkswirtschaftlichen Kosten der Energieversorgung auch durch die Einbeziehung langfristiger externer Effekte zu verringern, fossile Energieressourcen zu schonen und die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien zu fördern.“

§ 1 Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien
(Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG 2008)

Energie ist der Treibstoff für gesellschaftliche Entwicklung. Getreu dieser Parole ist es ein zentrales Anliegen von Staaten und Regionen ihren Bürgern¹ und ihrer Wirtschaft Energie in ausreichendem Maße, kostengünstig, versorgungssicher und in adäquater Form zur Verfügung zu stellen. Diese Bestrebungen haben in den vergangenen Jahren ein Versorgungssystem, basierend auf fossilen und nuklearen Energieträgern, mit zentralen Strukturen und globalen Verflechtungen entstehen lassen. Neben den vor allem in Industrieländern genehmen Folgen dieses Systems von wirtschaftlicher Entwicklung und stetiger Energieversorgung wachsen in zunehmendem Ausmaß die begleitenden Probleme. Schlagwörter in diesem Zusammenhang sind: Energieabhängigkeit, Klimawandel, ökologischer Kollaps und gesundheitliches Risiko.

Diese Probleme sind nur schwer fassbar, artikulieren sich räumlich höchst unterschiedlich und berühren auch die Emotionen und Empfindungen der Menschen. So lässt das Reaktorunglück in Japan die Atomkraftwerke in Deutschland stillstehen, die Freiheitsbewegungen im Nahen Osten und Nordafrika werden mit Skepsis und der Furcht um Lieferengpässe beim Erdöl begleitet, der verstärkte Einsatz von Agrosprit tritt in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion und ist deshalb ethisch umstritten, in Gorleben protestiert die Bevölkerung gegen ein Atomendlager, an anderer Stelle gegen den Einsatz der CCS²-Technologie und im Bayerischen Wald formiert sich Widerstand gegen die Nutzung von Windenergie.

Das Bewusstsein über diese Konflikte einerseits sowie über die sich beständig verschärfenden negativen Auswirkungen der Energieversorgung auf ökologische und soziale Belange andererseits, haben in Verbindung mit der medialen Omnipräsenz der Energiethematik in all ihren Facetten weltweit zu vermehrten Anstrengungen geführt, eine Energiewende einzuleiten. In welche Richtung

¹ Aus Gründen der besseren Lesbarkeit gelten alle Personenbeschreibungen sinngemäß für das weibliche und männliche Geschlecht.

² CCS (Carbon Capture and Storage) bedeutet das Abscheiden von CO₂ aus Emissionen eines Gas- oder Kohlekraftwerks mit anschließender Speicherung in geologisch geeigneten Schichten.

und mit welchem Ziel die Wende erfolgen soll, bleibt allerdings gesellschaftlich wie politisch umstritten. Die am häufigsten artikulierten Forderungen sind eine Hinwendung zu nachhaltigen Strukturen und ein Umbau der fossil nuklearen in eine erneuerbare Energieversorgung. Einigkeit besteht darin, dass die Zeit für ein umfassendes Handeln geboten ist.

Eine international honorierte Vorreiterrolle nimmt dabei die Bundesrepublik Deutschland ein, die mit dem Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG) das hochgesteckte Ziel einer Energiewende gesetzlich verankert und einen weitreichenden Anstoß für die Transformation am Energiesektor gegeben hat. Photovoltaikmodule auf Dächern, großflächige Solarparks, mächtige Windkraftanlagen und dezentrale Biogasanlagen prägen zunehmend das Landschaftsbild Deutschlands. Ein weiterer Ausbau erneuerbarer Technologien ist abzusehen. Obwohl dieser Prozess mittels globaler Argumentation – v.a. Klimaschutz – legitimiert ist und weiterhin politisch unterstützt wird, findet darüber eine gesellschaftlich kontroverse, teils emotionale Diskussion statt. Dabei treten neue Konfliktfelder speziell auf regionaler Ebene, wie persönliche Betroffenheit, Lärm- und Geruchsbelästigung, visuelle Beeinträchtigungen oder Konflikte mit dem Naturschutz in Erscheinung.

Um künftig das skizzierte Spannungsfeld verschiedener an der Energieversorgung beteiligter Dimensionen bewältigen zu können sind integrative Energiestrategien erforderlich. Die geographisch-räumliche Betrachtungsebene nimmt dabei eine bedeutende Rolle ein, wirkt sich die Transformation durch konkrete und sichtbare Umstrukturierungen doch unmittelbar auf den Raum, die dort lebenden Menschen und die Umwelt aus. Eine räumliche Perspektive ermöglicht die notwendige Reduzierung der komplexen Energiethematik, indem sie als Klammer alle relevanten Dimensionen zu verbinden vermag und gleichzeitig eine inhaltliche Eingrenzung bzw. Fokussierung auf eine Region zulässt. Die Geographie als integrative aber auf den Raum gerichtete Wissenschaft bietet hierzu die notwendigen Grundlagen, um nachhaltige regionale Energiestrategien zu entwerfen. Bei der konzeptionellen Gestaltung dieser Strategien besitzen zwei raumbezogene Fragen besondere Relevanz: Welche Technologien kommen für die jeweilige Region bzw. Raum in Betracht und wo befinden sich die entsprechenden Standorte?

Zur Beantwortung beider Fragen sind geeignete Kriterien notwendig. Das geforderte Leitprinzip einer nachhaltigen Entwicklung hält dazu zahlreiche Anknüpfungspunkte bereit und gibt Orientierung für die Gestaltung geeigneter Versorgungsstrukturen. Mit der Verknüpfung sozialer, ökologischer und ökonomischer Aspekte fordert Nachhaltigkeit zwar eine ganzheitliche Vorgehensweise, gleichzeitig verliert der Begriff aber mit zunehmender Expansion und alltäglichem Gebrauch an inhaltlicher Schärfe, was zur Verwässerung von Kriterien führt. Die Operationalisierung des Begriffes für den Energiesektor, wie er bereits in zahlreichen Veröffentlichungen vorgenommen wurde, ist folglich unerlässlich, um nicht als politische Worthülse trivialisiert zu werden.

Die vorliegende Arbeit versucht diesbezüglich geeignete Kriterien zu finden, um diese in einer Energiestrategie zur Gestaltung einer nachhaltigen regionalen Energieversorgung zu bündeln. Die integrative Strategie greift – mit Blick auf eine Region und dem Stromsektor, der eine Schlüsselstellung innerhalb künftiger Versorgungsstrukturen einnimmt – die beschriebene Zweiteilung von nachhaltigen Technologien und nachhaltigen Standorten auf und verbindet beide Bereiche zum neuen Konzept der doppelten Nachhaltigkeit. Ausgehend von einer Zieldefinition soll die Strategie dazu dienen, raumwirksame Entwicklungen im Energiebereich zu analysieren und als (informelles) unterstützendes Instrument im Planungs- und Gestaltungsprozess einer nachhaltigen regionalen bzw. kommunalen Energieversorgung fungieren.

Eine Vielzahl an Fragen, die sich bei der Definition und Operationalisierung des Nachhaltigkeitsbegriffes sowie der Konzeption der Energiestrategie ergeben, sind im Rahmen dieser Arbeit nur begrenzt zu beantworten. Gerade wegen der Aktualität und der gesellschaftlichen Relevanz des Themas ist es ein Anliegen, den Spagat zwischen theoretischer Fundiertheit und praktischer Anwendung zu überwinden. Der empirische Einsatz des Konzeptes doppelter Nachhaltigkeit anhand einer ausgewählten Region soll einerseits die Praktikabilität der Modellierung verdeutlichen und andererseits methodische Schwächen aufzeigen, um diese kritisch reflektieren zu können. Mit der Ausarbeitung des Konzeptes werden folglich auch Stellschrauben aufgezeigt, die Potenzial für eine weitere Präzisierung der Modellierung besitzen. Die Schnelllebigkeit von technologischen Entwicklungen, der prozessuale Charakter einer nachhaltigen Entwicklung und auch sich verändernde gesellschaftliche Wertvorstellungen zur zukünftigen Energieversorgung verlangen eine stetige Überprüfung und Weiterentwicklung des Konzeptes.

Die empirische Anwendung auf eine exemplarische Untersuchungsregion, ausgewählt wurde der administrativ abgegrenzte Regierungsbezirk Niederbayern, soll keinesfalls die Übertragbarkeit des Konzeptes auf andere Regionen in Frage stellen. Die Orientierung an administrativen Grenzen ist der Praktikabilität geschuldet, da zahlreiche für die Modellierung relevante Daten diesen Gebietseinheiten zu Grunde liegen. Die Arbeit will sowohl mit dem Konzept als auch mit der empirischen Analyse einen Beitrag zur konfliktarmen Transformation am Energiesektor in Richtung nachhaltiger Entwicklung leisten und darüber hinaus einen Weg aufzeigen, wie nachhaltige Versorgungsstrukturen gestaltet werden können.

Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in drei aufeinander aufbauende Bereiche strukturiert (vgl. Abb. 1). Der erste Teil umfasst die Grundlagen der aktuellen Energieproblematik und zeigt Perspektiven von Nachhaltigkeit für die zukünftige Energieversorgung auf (Kapitel II und III). Im zweiten Teil wird das Konzept

doppelter Nachhaltigkeit, welches die weitere konzeptionelle Gliederung der Arbeit bestimmt, vorgestellt und daraus eine Strategie zur Anwendung des Konzeptes entwickelt (Kapitel IV und V). Drittens beschäftigt sich mit der empirischen Umsetzung der Strategie auf einen gewählten Untersuchungsraum im Regierungsbezirk Niederbayern (Kapitel VI).

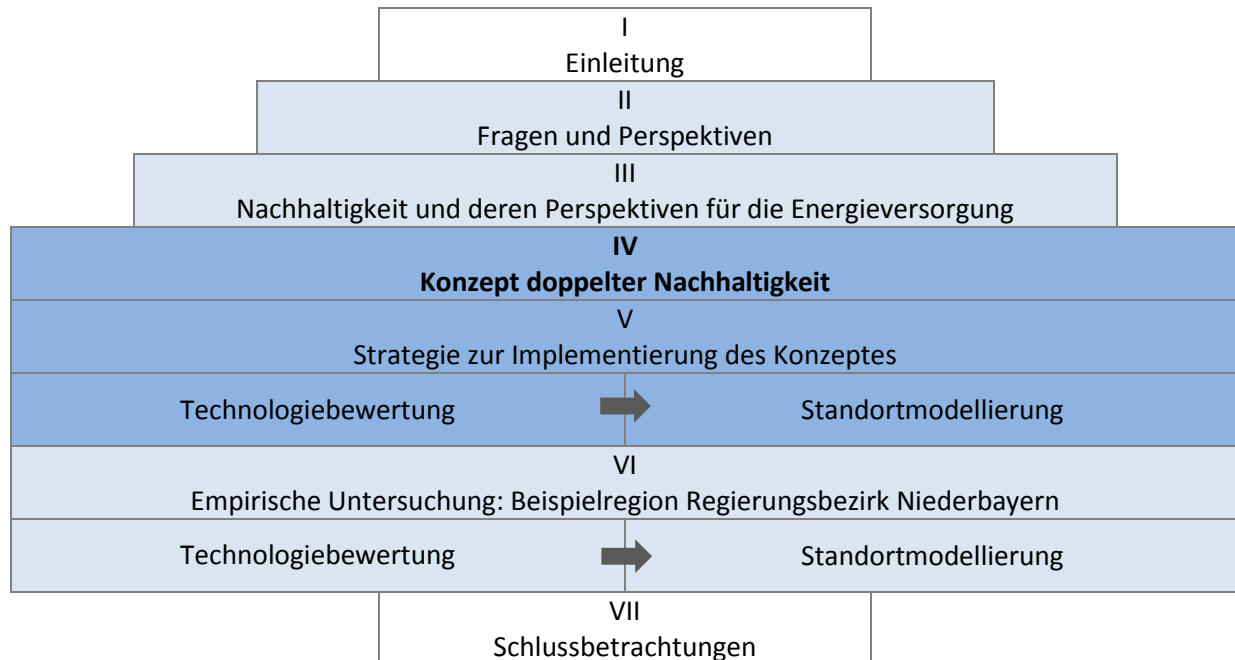


Abb. 1: Struktureller Aufbau der Arbeit

Der erste Teil wirft zum einen Fragen zur aktuellen Energieversorgung und deren vielschichtigen Nachhaltigkeitsdefiziten auf, benennt aber auch Ansätze und Perspektiven einer nachhaltigen und geographischen Energieforschung, wie diese Defizite zukünftig vermindert werden können (vgl. Kapitel II). Kapitel II schließt mit der Erkenntnis, dass der Raum eine wesentliche Komponente für die Gestaltung einer zukünftigen Energieversorgung darstellt und führt zentrale Thesen und Fragestellungen für die vorliegende Arbeit an. Zum anderen erläutert Kapitel III anhand eines historischen Rückblicks theoretische Grundlagen der Nachhaltigkeit und stellt eine Verbindung zum Energiesektor her. Nachhaltigkeit als normatives Leitbild kann für die notwendige Transformation am Energiesektor wertvolle Orientierung bieten. Wegen der problem- und disziplinübergreifenden Bedeutung des Begriffes sind zahlreiche Ansätze entstanden, die versuchen, das Leitbild in konkrete Schlussfolgerungen zu operationalisieren. Welche Aspekte für den Energiebereich Relevanz besitzen und welche Konsequenzen sich daraus ergeben, steht im Mittelpunkt dieses Kapitels.

Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der konzeptionellen Gestaltung einer Strategie zur Modellierung nachhaltiger Energieversorgungsstrukturen und zeigt einen Weg auf, wie diese umzusetzen ist. Die vorgestellte Konzeption beruht dabei auf einer neu entwickelten Zieldefinition (Kapitel IV) mit wesentlichen Eigenschaften, die die zukünftige Energieversorgung erfüllen muss, um den Vorgaben der Nachhaltigkeit gerecht zu werden. Aus dieser Zieldefinition leitet sich eine

zweiteilige Strategie ab (Kapitel V), die bereits der Konzeptname „doppelte Nachhaltigkeit“ andeutet und die Bereiche der Technologiebewertung sowie der räumlichen Modellierung umfasst. Beide Teilbereiche besitzen im wissenschaftlichen und politischen Diskurs zur Gestaltung einer nachhaltigen Energieversorgung bereits eine große Präsenz. Anliegen der vorliegenden Forschungsarbeit ist es, diese Ansätze miteinander zu verknüpfen und sie zu einer regionalen Energiestrategie orientiert an den Vorgaben der Nachhaltigkeit weiter zu entwickeln. Die verbindende Komponente ist dabei der Raum bzw. die gewählte Untersuchungsregion. Um für beide Bereiche einen hinreichenden Nachhaltigkeitsbezug herzustellen ohne dabei die Praktikabilität der Konzeption zu gefährden, lehnt sich die Forschungsarbeit einerseits an eine integrative Nachhaltigkeitsstrategie, nämlich die in der Hermann-von-Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) entwickelte Leitbildkonkretisierung (vgl. Kopfmüller et al. 2001) und andererseits an eine dimensionsbezogene Nachhaltigkeitstheorie, aufbauend auf den Ausführungen der Enquete-Kommission des 13. Deutschen Bundestages „Schutz des Menschen und der Umwelt“ (vgl. Enquete-Kommission 1998) an.

Im dritten Teil der Arbeit sind die theoretischen und konzeptionellen Vorüberlegungen an einem konkreten Untersuchungsraum anzuwenden (Kapitel VI). Die zuvor erarbeitete Strategie mit der Unterteilung der Analyse in die Bereiche Energietechnologien und räumliche Standortmodellierung wird beibehalten. Aus konzeptioneller Sicht hat sowohl die Größe als auch die Gestalt des Untersuchungsraumes keinen Einfluss auf die Analyse, weshalb auch andere Räume für eine Untersuchung in Betracht kommen können. Der empirische Teil dieser Arbeit beschäftigt sich exemplarisch mit dem Regierungsbezirk Niederbayern. Niederbayern ist eine überwiegend ländlich geprägte Region, die in den vergangenen Jahren bereits gravierende Veränderungen in der Energieversorgungsstruktur erlebt hat und diesen Prozess aktuell fortsetzt. Zahlreiche neue erneuerbare Energien, im Besonderen Biogasanlagen sowie Photovoltaikanalgen auf Dächern bzw. auf Freiflächen sind entstanden. Damit wurde einerseits die Transformation am Energiesektor eingeleitet, andererseits führte die Errichtung dieser Anlagen auch zu mannigfachen lokalen gesellschaftlichen Friktionen. Hier versucht die Arbeit mit dem Konzept doppelter Nachhaltigkeit sowie der Implementierungsstrategie zukünftig Orientierung zu geben, um den Umbau der Energieversorgung in dieser Region aktiv zu begleiten und im Sinne der Nachhaltigkeit gestalten zu können. Sie greift damit eine konkrete sowie aktuelle regionale Herausforderung – welche vor allem die kommunale Verwaltung und deren Entscheidungsprozesse betrifft – auf, beschreibt einen Weg wie Energiestrategien aus räumlicher Perspektive zu entwickeln sind und erarbeitet eine mögliche Energievision für die Beispielregion Niederbayern.

II Fragen, Ansätze und Perspektiven einer nachhaltigen und geographischen Energieforschung

„Die Energiepolitik ist das Kernstück einer nachhaltigen Entwicklung.“
(HAUFF 2003, S. 7³)

Wissenschaftliche, politische und gesellschaftliche Einigkeit besteht darüber, dass Nachhaltigkeit gerade für die zukünftige Energieversorgung ein enormes Potenzial beinhaltet, da dieses Thema – wie wohl kein anderes Problemfeld – sämtliche Nachhaltigkeitsdimensionen und -aspekte erfasst. Das Leitbild bleibt im politischen wie im gesellschaftlichen Diskurs jedoch häufig nur ein Schlagwort, ohne weitere inhaltliche Präzisierung. Um dem Kernstück Energiepolitik, verstanden als Entscheidungen und Strategien zur Gestaltung einer Energieversorgung, Orientierung zu geben, ist es folglich unerlässlich, die Gedanken der Nachhaltigkeit zu konkretisieren und in praktikable Handlungsempfehlungen zu überführen. Hierzu bietet eine räumliche Perspektive viel versprechende Anknüpfungspunkte, die nach der Analyse der gegenwärtigen Energieversorgung mit ihren wesentlichen Schwächen und einer weitgehenden Verfehlung nachhaltiger Ansprüche näher ausgeführt sind.

1. Nachhaltige Energieversorgung in weiter Ferne

Energie ist die Fähigkeit eines Systems Arbeit zu leisten, was aus physikalischer Perspektive bedeutet, dass es weder möglich ist, Energie zu erzeugen noch sie zu verbrauchen (vgl. Joos 2006, S. 7 / WAGNER 2007, S. 27f.). Diese Gesetzmäßigkeit beschreiben sowohl der mechanische Energieerhaltungssatz als auch die Hauptsätze der Thermodynamik, wonach Energie nur in eine andere Energieform umgewandelt werden kann (vgl. REBHAN 2002, S. 5f.). Da die gesamte Energiemenge folglich stets konstant bleibt und lediglich in unterschiedlichen Formen auftritt, erscheint aus physikalischer Sicht eine Diskussion über das zukünftige Energieproblem überflüssig. Das Problem der Energieversorgung liegt also nicht in einem Mangel an Energie (bleibt konstant) sondern in der Verfügbarkeit von nutzbarer Energie. Dem physikalischen Energiebegriff wird eine gesellschaftliche bzw. sozio-ökonomische Komponente hinzugefügt und das Schlagwort Energie mit der Bereitstellung von Energiedienstleistung (Energieversorgung) gleichgesetzt.

Gewisse Energieformen, zu ihnen zählen etwa Elektrizität oder Treibstoffe, sind spezielle Produkte, die der Gesellschaft einen Nutzen stiften und deshalb von ihr konsumiert werden. Für moderne

³ Vortrag im Rahmen der 2. Heidelberger Agenda-Tage (Abruf des Webdokumentes am 29.08.2007, der Link ist heute nicht mehr gültig).

Gesellschaften gilt eine sichere Energieversorgung heute als unverzichtbar. Die Schaffung von Strukturen zur Bereitstellung des, im Sinne der Gesellschaft knappen Gutes Energie, ist somit eine zentrale Aufgabe für gesellschaftliche Organisationen, um eine zukunftsfähige Entwicklung zu gewährleisten bzw. gewohnte Lebensstandards zu sichern. Die weltweite Energienachfrage verzeichnete demzufolge in den letzten Jahren eine stetige Zunahme und wird künftig durch einen weiterhin extensiven Energiekonsum in entwickelten Länder sowie einer prognostizierten Nachfragesteigerung in den Schwellen- und Entwicklungsländern weiter angetrieben. Einerseits erhalten viele Menschen dadurch die Möglichkeit, ihr Leben angenehmer und auch luxuriöser zu gestalten, andererseits stößt man an ökologische und soziale Grenzen.

Der technologische Fortschritt hat bis heute eine Vielzahl an Verfahren hervorgebracht, die dieser Energieversorgung dienen. Allen gemeinsam ist, dass in der Regel mehrere Produktions- und Umwandlungsschritte notwendig sind, um die jeweils gewünschten Energieformen zu erzeugen. Dabei treten zum einen energetische Verluste bedingt durch die Umwandlung von Primär- in Nutzenergie und dem Eigenbedarf im Erstellungsprozess auf, zum anderen wirken sich sämtliche Arbeitsschritte der Aufbereitung aber auch die Inanspruchnahme der Energiedienstleistung selbst in unterschiedlicher Art und Weise auf die Natur und Umwelt aus. Zumeist handelt es sich um gravierende Eingriffe, weshalb gerade in diesem Bereich die drängenden und vielfältigen Probleme der heutigen Energieversorgung bzw. die Nachhaltigkeitsdefizite am Energiesektor zu verzeichnen sind.

Die Komplexität der Energiebereitstellung einerseits und das hochgesteckte Ziel einer nachhaltigen Entwicklung andererseits verlangen eine differenzierte Betrachtung der aktuellen Energieversorgung. Eine Unterscheidung anhand der Betrachtungsebene bietet sich an, da sich Vor- und Nachteile bzw. Ursache und Wirkung von Folgeerscheinungen der Energieversorgung räumlich höchst unterschiedlich artikulieren und sowohl eine globale wie regionale Dimension umfassen. Regionen, zumeist Nationalstaaten, profitieren unterschiedlich stark von der Nutzung fossiler Energieträger und haben zudem in verschiedener Weise die Konsequenzen zu tragen, z.B. die Folgen einer Klimaveränderung. Gleichzeitig kollidieren die notwendigen internationalen Klimaschutzbestrebungen und der damit verbundene Ausbau erneuerbarer Energien nicht selten mit den lokalen Interessen des Natur- und Landschaftsschutzes sowie den Bürgern vor Ort. Entsprechend der räumlichen Skala variieren auch die politischen und gesellschaftlichen Einschätzungen und folglich deren Argumentationen für oder gegen eine weitere Transformation am Energiesektor. Mit Blick auf die Zielsetzung einer nachhaltigen Energieversorgung gilt es, die Folgen jeder Energieversorgungsoption in ihrem Ausmaß und ihrer Raumwirksamkeit abzuwägen, um adäquate Handlungsstrategien zu entwickeln. Auf globaler Ebene erscheinen besonders drei Bereiche – Klimawandel, Ressourcenaspekt und Energiesicherheit – mit eklatanten Nachhaltigkeitsdefiziten und

deren Konsequenzen nennenswert, die in der Wissenschaft, Politik und Gesellschaft umfassend diskutiert werden und exemplarisch bei Curtis (2007, S. 385ff.), Sims et al. (2007, S. 251ff.)⁴ und Bradshaw (2010, S. 275ff.) in anderer Klassifizierung aber inhaltlich mit der folgenden Aufzählung übereinstimmend dargelegt sind:

- **Klimawandel**

Eine Vielzahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen und zahlreiche politische Debatten drücken das gesteigerte Interesse sowie die Bedeutsamkeit des Klimawandels aus. Die globale Erwärmung ist dabei zum Faktum geworden (vgl. Pachauri & Reisinger 2007, S. 30ff.), die Bewertung der einhergehenden Folgen bleiben wegen komplexer Zusammenhänge aber umstritten. *„The issues and possible impacts of changes in climate reflect the interdependence of people, places, and environment across geographic and political scales.“* (Aspinall 2010, S. 715) Diese vielfältigen Wechselwirkungen und räumlich differenzierten Auswirkungen sind ursächlich dafür, dass internationale Abkommen und anerkannte Strategien zur Eingrenzung des Klimawandels nur schwierig erreichbar sind. So konnte man sich im Copenhagen Accord zwar drauf verständigen, den globalen Temperaturanstieg 2°C nicht zu überschreiten (vgl. UNFCCC 2010, S. 5), doch war weder ein verbindliches Abkommen noch ein adäquates Instrumentarium zu präsentieren, mit dem die Einhaltung des Ziels erreichbar wäre (vgl. WBGU 2010, S. 5). Die Begrenzung auf 2°C wird als dringlich erachtet, um eine *„gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems zu verhindern“* (WBGU 2009a, S. 14). Einklang besteht trotz eines unverbindlichen Abkommens folglich darin, dass die Reduzierung von Treibhausgasemissionen eine essentielle Aufgabe ist und dabei einer umweltverträglichen Energieversorgung, die in globaler Perspektive häufig synonym zu einer klimaneutralen Versorgung verstanden wird, eine zentrale Rolle zukommt. Erneuerbare Energien, die tendenziell niedrigere CO₂-Emissionen als fossile Energieerzeugungsformen aufweisen, rücken damit auch auf globaler Ebene verstärkt in den Mittelpunkt.

Der enge Zusammenhang zwischen Klima und Energie resultiert aus den treibhausrelevanten Abgasen, die bei der Inanspruchnahme fossiler Energiedienstleistungen entstehen. So ist die Anreicherung von Treibhausgasen wie Kohlendioxid (CO₂) oder Methan (CH₄) in den vergangenen Jahren zum Großteil auf menschliche Aktivitäten und laut dem vierten Assessment-Report des IPCC 2007 im Besonderen auf das Verbrennen fossiler Energierohstoffe zurückzuführen (vgl. Solomon et al. 2007, S. 135 / Sims et al. 2007, S. 253 und 261). Seit Beginn des Industriezeitalters nahm somit der Einfluss des Menschen auf das

⁴ Die Ausführungen von Sims et al. (2007, S. 251ff.) „Energy Supply“ sind Teil der „Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) (vgl. Metz et al. 2007).

Klima zu und tritt in zunehmendem Maße in Konkurrenz zu den natürlichen Klimasteuerungsmechanismen (vgl. Schönwiese 2005, S. 36 und 2009, S. 4). Diese Phase ist durch einen rasant ansteigenden Primärenergieverbrauch, speziell im Bereich fossiler Energieträger gekennzeichnet, in Folge dessen die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre stetig zugenommen hat und mittlerweile einen Stand erreicht, der vermutlich in den letzten 700.000 Jahren nicht überschritten wurde (vgl. Graßl 2005, S. 21 / Rahmstorf & Schellnhuber 2006, S. 33).

Wegen des großen Einflusses des Klimas auf Ökosysteme und natürliche Lebensbedingungen sind die Folgen eines prognostizierten globalen Temperaturanstieges gravierend. Eine Auswahl an bereits beobachtbaren regionalen Folgen sind nach Pachauri & Reisinger (2007, S. 31ff.) Instabilität von Permafrostböden, früherer Beginn von Blütezeiten bei Pflanzen, Gletscherschwund in den meisten Teilen der Erde oder der Meeresspiegelanstieg. Zudem sind mit weitreichenden ökonomischen Auswirkungen der Klimaerwärmung zu rechnen (vgl. Stern 2006). Hieraus ergeben sich entsprechende Konsequenzen für Gesellschaften, die sich in zweierlei Weisen präsentieren (vgl. Endlicher 2007, S. 119ff.). Einerseits haben sich die Gesellschaften diesen neuen Gegebenheiten anzupassen, müssen andererseits aber auch bestrebt sein die Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen, indem neben anderen Maßnahmen primär CO₂-Emissionen drastisch zu reduzieren sind. Dies wiederum bedeutet für den Energiesektor einen notwendigen Umdenkprozess, verbunden vor allem mit einem Ausbau CO₂-armer Energietechnologien, einer Verbesserung der Energieeffizienz und einem sparsameren Umgang mit Energie.

▪ **Ressourcenaspekt**

Im historischen Kontext der Industrialisierung haben, ausgehend von Europa und Nordamerika, fossile Energieträger wie Kohle und etwas später Erdöl und Erdgas die zuvor gebräuchlichen Energieträger Holz sowie Wasser- und Windkraft substituiert. Diese erste Transformation wirkt bis heute nach, weswegen die globale Energieversorgung aktuell überwiegend auf der Nutzung fossil-nuklearer und somit endlicher Rohstoffe basiert (vgl. Eurostat 2010 / IEA 2010). Obwohl die Endlichkeit dieser Rohstoffe bekannt ist und seit langem diskutiert wird (vgl. u.a. Meadows et al. 1972), suggerieren Statistiken zu fossilen Energieressourcen bzw. Reserven häufig keine bedenkliche Aktualität (vgl. u.a. BGR 2010 / BP 2011 / EIA 2010a). Den Prognosen liegen jedoch weitreichende Unsicherheiten und Annahmen zu Grunde, weshalb Bitzer (2006, S. 25f.) für die wichtigste Exportregion von Erdöl (Golfregion) ein differenzierteres Bild veranschaulicht. Entscheidend ist zudem nicht das Ende aller Rohstoffvorkommen sondern vielmehr der Vergleich von Förderung und

Verbrauch. Kann sich die Förderung nicht mehr dynamisch an den künftig zunehmenden Verbrauch anpassen, entstehen Knappheit und in der Folge steigende Preise. Der Zeitpunkt, an dem die Förderung nicht weiter ausgedehnt werden kann, besitzt gerade bei der Erdölversorgung Brisanz und wird mit dem Begriff „*Peak Oil*“ umschrieben. Obwohl definitorische und methodologische Schwierigkeiten sowie eine unzuverlässige Datengrundlage die Bestimmung eines genauen Zeitpunktes von „*Peak Oil*“ erschweren, ist das Erreichen eines Fördermaximums in absehbarer Zeit nicht zu vermeiden (vgl. hierzu Zhao, Feng & Hall 2009, S. 2137f.).

Die wirtschaftliche Entwicklung vor allem im asiatischen Raum lässt einen weiteren Anstieg des globalen Energieverbrauches, im Besonderen der Stromnachfrage, prognostizieren (vgl. IEA 2009, S. 4). Erste Anzeichen einer globalen Rohstoffverknappung, die in äußerst volatilen und tendenziell steigenden Energierohstoffpreisen zu erkennen ist, sowie die Angst über stagnierende bzw. rückläufige Fördermengen in instabilen Erdölexportländern, sind in jüngster Vergangenheit ursächlich dafür, dass der Ressourcenfrage und dem daran anschließenden Verteilungsaspekt bzw. der Versorgungssicherheit wieder größeres Gewicht beigemessen wird. Obwohl die fossilen Ressourcen kurzfristig noch ausreichend vorhanden erscheinen, ist deren Endlichkeit nicht zu leugnen. Aus einer historischen Perspektive analysiert Friedrichs (2010, S. 4562ff.) für Japan, Nordkorea und Cuba, was passieren kann, wenn Energieressourcen knapp werden bzw. die Energieabhängigkeit erdrückend wird. Er überträgt die Erkenntnisse auf das globale „*Peak Oil*“-Dilemma und folgert gravierende Umbrüche in gesellschaftlichen, nationalen und geopolitischen Entscheidungsmotiven. Damit verbunden sind räumlich differenzierte Konsequenzen, die im Folgenden auf den dritten Aspekt der Energieverteilung und Energiesicherheit überleiten.

▪ **Verteilungsaspekt und Energiesicherheit**

Der Verteilungsaspekt kann sowohl aus der Perspektive der Zugangsmöglichkeit zu modernen Energiedienstleistungen als auch aus der Perspektive unterschiedlich lokalisierter Rohstoffvorkommen betrachtet werden. Beim Erstgenannten gehen Schätzungen der IEA (IEA 2009, S. 7 und 2010b, S. 7) davon aus, dass ca. 1,5 Milliarden Menschen bisher keinen Zugang zu Elektrizität haben. Für eine Verbesserung der Lebenssituation dieser Menschen ist der Aufbau geeigneter Versorgungsstrukturen in Zukunft daher essentiell notwendig. Hierzu zählt eine erschwingliche, zuverlässige, gesundheitsverträgliche sowie umweltschonende Energiebereitstellung.

Die zweite Perspektive ist auf die ungleiche Lokalisierung von Energierohstoffen, vor allem von Erdöl und Erdgas, gerichtet. Der Zugang zu und die Kontrolle über Gebiete mit großen

Rohstoffvorkommen sind für die Energiesicherheit von Energie importierenden Ländern entscheidend, wodurch diese Regionen eine immer größer werdende geostrategische Bedeutung erlangen. Zu nennen sind Regionen wie die strategische Ellipse⁵, mit ca. 70% des globalen Vorkommens an konventionellem Erdöl und Erdgas (vgl. Gerling 2002, S. 76ff. / Rempel 2008, S. 25) oder die noch weitgehend unerschlossene aber aufgrund geologischer Befunde potenziell hochgeschätzte Arktisregion, gegenüber der Golfregion jedoch mit bisher geringerer Dringlichkeit und Brisanz (vgl. u.a. Gebhardt & Ingenfeld 2011 / Humrich 2011 / Ingimundarson 2011 / Piepjohn 2011). Die Konzentration der Förderung von Erdöl und Erdgas auf wenige und vielfach politisch instabile Regionen (z.B. Golfregion) und Länder (z.B. Iran, Sudan und Libyen) führt zu einem dazu, dass sich die sicherheitspolitische und geostrategische Aufmerksamkeit von Industrienationen dorthin verlagert. Die Ressourcen wecken Begehrlichkeiten, die bis zu politischen Sanktionen oder militärischen Interventionen führen können (vgl. exemplarisch Kreuzmann 2005 / Müller 2006). Energiesicherheit ist damit zu einer politischen Priorität erwachsen und stellt häufig die nationale Versorgung sowie die Sicherung von Transportwegen und Zugangsmöglichkeiten in den Vordergrund. Zum anderen regt es aber auch Bestrebungen innerhalb der Industrieländer an, asymmetrische Abhängigkeiten mittels Substitution von Erdöl und Erdgas durch andere Energieträger, z.B. Bioenergie, zu verringern.

Sowohl die Endlichkeit der Energierohstoffe mit erwartbaren Preissteigerungen als auch die Abhängigkeit von Energieimporten aus politisch instabilen Ländern besitzen einen großen Einfluss auf die Gewährung einer sicheren Energieversorgung, definiert als eine bezahlbare, ausreichende und zuverlässige Versorgung. Gleichzeitig existiert eine Interdependenz zwischen wirtschaftlicher Leistungsfähigkeit und Inanspruchnahme von Energiedienstleistungen. Das Dilemma besteht darin, dass wirtschaftliche Stärke und technisches Know-how Voraussetzungen für den Zugang zu Energierohstoffen sind, die wirtschaftliche Stärke ihrerseits aber von der Möglichkeit Energiedienstleistungen in Anspruch zu nehmen abhängt. Energiesicherheit bestimmt somit in entscheidender Weise politische Handlungen. *„Nachhaltigkeit erfordert deshalb: Die Welt muß einen gerechten Zugang und eine entsprechende Nutzung der beschränkten Ressourcen sicherstellen.“* (Quennet-Thielen 1996, S. 11)

Neben der Klimaveränderung, deren globaler Rahmen evident ist, und der Ressourcenfrage, die ebenfalls eine starke globale bzw. internationale Komponente aufweist, wirkt sich jede Energieform in unterschiedlicher Weise auch auf die lokale bzw. regionale Ebene aus. Die Konfliktlinien dieser

⁵ Das als „strategische Ellipse“ bezeichnete Gebiet umfasst den Nahen Osten, den kaspischen Raum und den Nordwesten Sibiriens.

Ebenen sind gekennzeichnet durch die Auswirkungen der eingesetzten Technologie auf die unmittelbare Umwelt des Produktions-, im Falle der Atomenergie auch des Endlagerstandortes, mit den dort lebenden Menschen und der Natur. Sowohl die Umweltwirkungen als auch deren Ausmaße variieren mit der jeweiligen Technologieoption. Folgende regionale Nachhaltigkeitsschwächen der aktuellen Energieversorgung, die in der Forschungsarbeit an verschiedenen Stellen weiter thematisiert werden, sind mit Bezug auf die Energieformen, bei denen die Beeinträchtigungen besonders stark auftreten, stichpunktartig zu nennen:

- Abraumhalden und Eingriffe in den Wasserhaushalt: v.a. Braunkohletagebau, aber generelle Folgen bei der Gewinnung fossiler Energierohstoffe
- Hoher Flächenbedarf: v.a. Bioenergie, Photovoltaik auf Freiflächen und Tagebau
- Lokale Emissionen wie Lärm und Geruch: v.a. Windenergie und Bioenergie
- Lokale Schadstoffemissionen: v.a. Kohlekraft
- Regionale Naturzerstörung und Verlust an Biodiversität: v.a. Abbau fossiler Energieträger und zum Teil bei Bioenergie, wenn z.B. ökologisch wertvolle Waldflächen für Energiepflanzen gerodet werden oder Monokulturen mit Energiepflanzen entstehen
- Risiko für die menschliche Gesundheit und Ökosysteme: v.a. Atomenergie
- Visuelle Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes: v.a. Abbau fossiler Rohstoffe und Windenergie
- Wertminderung von Eigentum: v.a. bei Atomenergie und Wasserkraft

Obwohl die genannten globalen und lokalen Nachhaltigkeitsdefizite nur einen Auszug der aktuellen Energieproblematik wiedergeben, zeigen sie bereits die enorme Vielgestaltigkeit der Energiefrage. Gleichzeitig sind die Defizite keinesfalls nur eindimensional sondern immer in ihrer Gesamtheit zu betrachten. Nicht selten kollidieren dabei wirtschaftliche Ansprüche mit ökologischen oder sozialen Belangen, sowie nationale mit internationalen und lokale mit globalen Interessen. Dem Spannungsfeld aus steigendem Energieverbrauch und globalen wie regionalen Auswirkungen verschiedener Energieformen folgend, stellen Moriarty & Honnery (2009, S. 2469ff.) die Frage „*What energy levels can the Earth sustain?*“ und kommen unter Beachtung limitierender Faktoren für sämtliche Energieoptionen zu einem differenzierten Bild mit Verweis auf große Probleme einen prognostizierten weiteren Anstieg des Primärenergieverbrauches decken zu können. Um den Vorgaben des Leitbildes einer nachhaltigen Energieversorgung gesamthaft zu entsprechen, ist es in Zukunft daher dringend geboten, diese konfligierende Interessenslage zu lösen.

Eine räumliche Betrachtung erlaubt es, bestehende Operationalisierungsansätze des Nachhaltigkeitsbegriffes aufzugreifen, konkrete Forderungen für die Energieversorgung abzuleiten und eine praktikable Strategie zur Gestaltung regionaler nachhaltiger Energieversorgungsstrukturen zu entwickeln. Solange die skizzierten Widersprüche nicht gelöst sind, ist eine nachhaltige Energieversorgung noch in weiter Ferne. Die Enquete Kommission des 14. Deutschen Bundestages (2002, S. 18) bezeichnet deshalb zurecht die vorherrschende Energieversorgung als nicht nachhaltig,

ebenso Bradshaw (2010, S. 287): „*It is now widely recognised that the current hydrocarbon-based energy system is unsustainable; (...)*“. Dem WBGU (2003, S. 10 und 151) zufolge ist jedoch eine Energiewende in Richtung einer nachhaltigen Entwicklung unerlässlich, um allen Menschen den Zugang zu moderner Energie zu ermöglichen und gleichzeitig ökologische Stabilität und damit die natürliche Lebensgrundlage des Menschen zu schützen. Diese Forderung erscheint angesichts der erwähnten Konsequenzen aktueller denn je.

2. Raumwirksamkeit einer Transformation am Energiesektor

Im Jahr 1980 stellte Frankenberg (1980, S. 77f.) die Frage, ob regenerative Energien auch ein Thema für die Bundesrepublik Deutschland seien und gibt zu bedenken, dass die Energieversorgung in weiten Teilen der Erde große Probleme verursacht und keiner der gebräuchlichen Energieträger eine befriedigende Dauerlösung darstellt. 30 Jahre später ist, zumindest in der Bundesrepublik, die Transformation am Energiesektor in Richtung erneuerbare Energien in vollem Gange. Gründe hierfür sind zum einen die wegen der Altersstruktur des bestehenden Kraftwerksinventars anstehenden Ersatzinvestitionen und zum anderen ein fest verankertes Bewusstsein in Gesellschaft und Politik, dass die bisherige Energieversorgung nicht zukunftsfähig ist. Trotz dieser regional begrenzten und staatlich geförderten Transformationsbestrebung sind die Probleme der globalen Energieversorgung indessen gleich geblieben und parallel dazu auf lokaler Ebene mit dem sich manifestierenden Ausbau erneuerbarer Energien neue Konfliktfelder hinzugekommen.

Wird die skizzierte Transformation des Energiesektors fortgesetzt, stellt dies in mehrfacher Sicht eine tief greifende Zäsur dar: fossile physisch begrenzte Energieträger werden durch erneuerbare ersetzt, zentrale kapitalintensive Großkraftwerke durch dezentrale kleine mit geringer Investitionssumme substituiert und oligopolistische teils monopolistische durch selbstverantwortliche und demokratische Strukturen abgelöst. Einhergehend mit diesem Prozess verändert sich die räumliche Dimension der Energieversorgung grundlegend, welche Brücher (2008, S. 4ff. und 2009, S. 40f.) in Bezug auf die Wechselwirkung zwischen Energie und Raum aus einer historisch-geographischen Sicht mit dem Wandel von „*energy from space*“ zu „*energy for space*“ beschreibt. Obwohl die Geographie aufgrund der vielfältigen Anknüpfungspunkte zum Themenfeld Energie als Wissenschaft geradezu prädestiniert erscheint, ist bisher eine spärliche Bearbeitung energiethematischer Probleme zu verzeichnen (vgl. Schüssler 2009, S. 269ff.). Erst in den letzten Jahren sind durch eine zunehmende wissenschaftliche Präsenz dieses Themas sowie durch die Diskussion öffentlichkeitsbedeutsamer Fragen zum Klimawandel oder zur Energiesicherheit wertvolle Impulse für eine systematische Betrachtung von Energie und Raum in Deutschland entstanden.

Das mögliche „große Spektrum der geographischen Energieforschung“ (Schüssler 2010, S. V) begründet sich aus der Tatsache, dass die Geographie nicht auf eine feststehende räumliche Betrachtungsebene fixiert ist und zudem die Eignung besitzt, unterschiedliche Zugangsmöglichkeiten zur Energiethematik gewinnbringend zu verknüpfen. Hamhaber (2010, S. 13ff.) zeigt diesbezüglich vielfältige Ansatzpunkte klassischer geographischer Teildisziplinen, wie etwa der Wirtschaftsgeographie oder der politischen Geographie, unter Beachtung verschiedener Raumbezüge und Raumkonstruktionen auf. Dies begründet auch, dass ohne den geforderten Bezug zu einer geographischen Energieforschung dennoch zahlreiche Beiträge zu den verschiedenen Energiesektoren⁶, zu regional bedeutsamen Energieprojekten⁷, zu internationalen und nationalen Energiewirtschaften⁸, zu energiewirtschaftlich bedingten Umweltauswirkungen⁹ oder geopolitischen Aspekten¹⁰ entstanden sind.

Die gesetzlich eingeleitete Transformation zur Nutzung erneuerbarer Energien ist ebenso wie die Liberalisierung des Strommarktes und der weitere Ausbau von Netzen Gegenstand von Raumforschung und Landesplanung (vgl. hierzu Gust & Pohle 2007, S. 1ff.). Mit der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien ergeben sich auch neue und differenzierte Raumansprüche. Besitzen erneuerbare Energien doch selbst eine hohe Raumwirksamkeit (vgl. Bosch & Peyke 2010a, S. 11), da die Anlagen dezentral installiert werden und somit näher an die Alltagswelt der Menschen treten. Aufgrund der starken Abhängigkeit dieser Energieformen von physisch-geographischen Voraussetzungen und sozioökonomischen Raum- und Siedlungsstrukturen sowie Prozessen ergeben sich „unterschiedliche räumliche Qualifikationen“ (Porsche 2010, S. 665) zur Nutzung dieser Energieoptionen. Der Raum determiniert unterschiedliche Energiepotenziale, getreu der Bezeichnung „energy from space“ (Brücher 2009, S. 40f.). Eine optimale Planung von Produktionsstätten oder Infrastruktureinrichtungen im Energiebereich setzt folglich die Beachtung vielfältiger raumrelevanter Sachverhalte zwingend voraus. Hierzu zählen unter anderem das Einhalten von Sicherheitsabständen, die Berücksichtigung regionaler Befindlichkeiten der Bevölkerung, die Nähe zu Verbrauchern, geeignete Transportinfrastruktur oder natürliche Energiepotenziale wie Sonneneinstrahlung und Windverhältnisse. Diesem Sachverhalt entsprechend gehören konkreten Potenzial- und Standortplanungen seit einigen Jahren verstärkte

⁶ Exemplarische Beiträge zu verschiedenen Energiesektoren: Dörrenbächer, Soyev & Schäfer 1997 / Pachner, Kersting & Samain 2002 / Gerloff 2008 / Helfer 2008

⁷ Exemplarische Beiträge zu bedeutsamen Energieprojekten: Sauer 2002 / Struck 2002 und 2003 / Coy & Geipel 2004 / Gregorowius & Zepp 2006

⁸ Exemplarische Beiträge zu internationalen und nationalen Energiewirtschaften: Schliephake 2005 und 2008 / Klein 2007

⁹ Exemplarische Beiträge zu energiebedingten Umweltauswirkungen: Friedlein 1997 / Breuer 2001 / Hasse & Denzer 2006

¹⁰ Exemplarische Beiträge zu geopolitischen Aspekten der Energieversorgung: Gabriel 2004 / Kreuzmann 2005 und 2007 / Best 2007 / Schüssler 2008

Aufmerksamkeit (vgl. z.B. Biberacher et al. 2008 / Prinz et al. 2009). Daran anschließend befinden sich aktuell systematische Ansätze zur Erschließung dieser regionalen Energiepotenziale und die Entwicklung von integrierten Energie-, Autarkie- oder Klimastrategien für unterschiedlichste Regionen im Aufbau (vgl. z.B. Tischer et al. 2006 / George et al. 2009 / Koziol 2010 / KlimaKom 2011), die auch auf kommunaler politischer Ebene diskutiert (vgl. z.B. Palmer 2010) und finanziell unterstützt werden (vgl. BMU 2011). Mit Blick auf eine nachhaltige Energieversorgung sind sowohl Energieeinsparungen und Effizienzsteigerungen bei bestehenden Energieanlagen als auch der Einsatz neuer Energieformen erforderlich (vgl. Haas & Scharrer 2005a, S. 403). Diese aktuelle Forschungsaufgabe zur Entwicklung von räumlichen Energiestrategien liegt ebenso der vorliegenden Arbeit zu Grunde.

Die Errichtung neuer dezentraler Produktionsstandorte ist jedoch auch ursächlich für gravierende bauliche Veränderungen und geht mit einer teils erheblichen Beeinflussung von Umwelt, Natur und Landschaftsbild einher (vgl. hierzu DRL 2006, S. 5ff.). Deshalb ist heute bei manchen Energieformen wie z.B. der Windenergie oder der Wasserkraft eine Umweltverträglichkeitsprüfung teils gesetzlich vorgeschrieben. Mit dem Ausbau erneuerbarer Energien steigt die Anzahl an Flächennutzungskonflikten z.B. mit den Belangen der Landwirtschaft, dem Tourismus oder der Siedlungsentwicklung (vgl. z.B. Lenz 2004 / Wieser 2005 / Reinhardt, Gärtner & Pehnt 2005 / Zink et al. 2011), welche sich nicht nur im politischen sondern auch im gesellschaftlichen Diskurs befinden. Bauliche Eingriffe weisen wie Umweltschutzbelange räumliche Bezüge auf und müssen für jede Technologie und jeden Standort analysiert werden, um sie im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung optimieren zu können. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU 2009, S. 11) verlangt deshalb mit den Instrumenten der Landes- und Raumplanung die Gewährleistung eines möglichst verträglichen Ausbaus erneuerbarer Energien in Bezug auf die Biodiversität sowie den Natur- und Umweltschutz. Dies trifft generell für die gesamte Energieinfrastruktur – erneuerbare und fossile Energiekraftwerke sowie Transportsysteme – zu und ist zusätzlich um die ökonomischen wie sozialen Interessen zu erweitern, wenn die Ansprüche einer nachhaltigen Energieversorgung geltend gemacht werden sollen (vgl. z.B. Krewitt et al. 2007 / Kemfert & Müller 2007). Die konkreten Anforderungen seitens der Nachhaltigkeit an die zukünftige Energieversorgung und deren gegenseitige Abwägung bleiben dabei allerdings umstritten.

Gerade die soziale Komponente, mit der Berücksichtigung von gesellschaftlichen und individuellen Belangen von Menschen, wird häufig bei infrastrukturellen Baumaßnahmen vernachlässigt. Obwohl erneuerbare Technologieoptionen durchwegs über gute Akzeptanzwerte verfügen, ergeben sich bei vielen Projekten Konflikte auf regionaler, zum Teil sogar auf lokaler Ebene. Dieser auch aus anderen Energie- und Infrastrukturprojekten bekannte „not in my backyard“ (NIMBY)-Effekt (vgl. exemplarisch Bell, Gray & Haggett 2005 / Walker et al. 2011) muss folglich in Zukunft verstärkt

beachtet und in konkrete Planungskonzepte integriert werden, um damit die lokal betroffene Bevölkerung effektiv am Gestaltungsprozess einer nachhaltigen Energieversorgung partizipieren zu lassen. Kommunen und Verwaltungsbehörden, die mit der konkreten Bauleitplanung betraut sind (vgl. BauGB § 1), scheinen jedoch gerade mit dieser Aufgabe weitestgehend überfordert. Die Vielfalt an neuen Technologien, deren unterschiedlichen Raumwirksamkeiten und mannigfachen Standortansprüchen sowie die große Anzahl an notwendigen Neuerrichtungen von Kraftwerken stellen große Herausforderungen für Kommunen dar, weshalb diese häufig einer nachhaltigen Raumplanung im Energiebereich nicht mehr gerecht werden (vgl. Zink 2010, S. 955). Zudem bedingt die Bauleitplanung auf kommunaler Ebene eine räumlich sehr heterogene Beachtung des Themas. Einzelne Kommunen reagieren sehr geschickt und aufgeschlossen auf diese Herausforderungen, wohingegen andere Kommunen sich eher skeptisch zeigen. So entstanden in den vergangenen Jahren zahlreiche Einzelmaßnahmen, ohne dass diese in eine übergeordnete Energiestrategie eingebunden waren (vgl. Hausladen & Hamacher 2010, S. 5). Eine regionalplanerisch sinnvolle Gesamtstrategie, orientiert an nachhaltigen Kriterien und der Möglichkeit von Akteuren bereits in den Planungsprozess steuernd einzugreifen, wie es in dieser Arbeit vorgestellt wird, ist beim Umbau der Energieversorgung bisher nicht zu erkennen.

Die erwähnten Argumente sowie das Auflösen von Gebietsmonopolen im Zuge der Liberalisierung von Energiemärkten veranlassen Strobel (2006, S. 16) zur Einschätzung, dass die *„Geographie (...) von einer irrelevanten Konstanten zu einer strategisch bedeutsamen Variable wird.“* Der Raum erhält im Themenfeld Energie neben seiner ohnehin politisch-strategischen Bedeutung damit zusätzlich eine energiepotenzial, standort- und raumplanerisch bedingte Funktion. Die vorliegende Forschungsarbeit greift diesen Sachverhalt der hohen Raumbedeutsamkeit einer Transformation am Energiesektor auf und verbindet ihn mit den Vorgaben einer am Nachhaltigkeitsleitbild orientierten Energieversorgung. Dazu bedarf es innovativer Strategien, da sowohl die Technologieformen als auch deren Standorte spezielle Anforderungen an den Raum stellen oder unter gegebenen räumlichen Strukturen zu erfüllen haben, damit die Gestaltung einer nachhaltigen regionalen Energieversorgung gelingen kann. Wegen der praxisrelevanten Thematik ist es erklärtes Ziel, neben der theoretischen Konzeption der Energiestrategie im Konzept doppelter Nachhaltigkeit auch Wege aufzuzeigen, wie das Konzept auf einen konkreten Untersuchungsraum anzuwenden ist.

3. Entwicklung räumlicher Energiemodelle und GIS

Für die erforderlichen detaillierten Raumanalysen zur Modellierung von Ausschluss-, Restriktions- und Eignungsflächen für verschiedene Energieformen auf regionaler Ebene bieten sich Methoden der angewandten Geoinformatik, im Speziellen Geographische Informationssysteme (GIS), in

ausgezeichneter Weise an und generieren in vielfacher Hinsicht einen Mehrwert. Zum einen ist die Suche nach Energiepotenzialen und praktikablen Standorten mit hohen Ertragswerten und günstigen Infrastrukturbedingungen realisierbar und mittlerweile ein gängiges Verfahren. Exemplarisch für die Vielzahl an Potenzialstudien in denen GIS zum Einsatz kommt sei auf die Ausführungen von Mittelböck et al. (2006) verwiesen (vgl. vertiefend hierzu Kapitel V 2.3.1). Zum anderen lassen sich auch ausgefeilte und zunehmend an Bedeutung gewinnende Raumanalysen, welche die verschiedenen Interessen von Akteuren und Betroffenen sowie die angesprochenen Nutzungskonflikte stärker thematisieren, mit GIS-Anwendungen handhaben (vgl. hierzu Bosch / Peyke 2009 und 2010b). In voneinander getrennten Ebenen (Layers) werden sowohl räumliche Eigenschaften als auch raumrelevante Einflussfaktoren abgebildet und die für eine Standortmodellierung von Energietechnologien notwendigen Inhalte gezielt ausgewählt, womit eine Reduktion der komplexen Realität, bezogen auf energetische Sachverhalte, erzielt wird. Die unbestreitbar hohe Raumrelevanz einer dezentralen Energieversorgungsstruktur – in Zukunft ausschließlich an den Ansprüchen der Nachhaltigkeit orientiert – hat dazu geführt, dass GIS-Methoden und -Analysen ein „*unentbehrliches Werkzeug der strategischen Planung*“ (Strobel 2006, S. 18) geworden sind. Mit dem großen Spektrum an räumlichen Analysewerkzeugen und den vielfachen Möglichkeiten, energierelevante sowie raumbezogene Daten zu integrieren, sind die GIS-Funktionen heute nicht nur ein wertvolles Instrument für die kommunale Raumplanung, Raumordnung und Landesplanung im Energiesektor sondern dienen zudem Investoren für eine betriebswirtschaftliche Standortplanung und Bürgern einerseits als Medium ihre Standortkriterien zu artikulieren und andererseits als hilfreiche Informationsquelle. Gerade die kartographische Präsentation, ausgerichtet auf das jeweilige Kommunikationsziel, z.B. für die Unterstützung von Experten oder die Integration der Bürger (vgl. hierzu Grünreich 2005, S. 491), besitzt bei der Planung nachhaltiger Energieversorgungsstrukturen höchste Bedeutung. GIS bieten hierfür alle notwendigen Funktionalitäten, die bis hin zu webbasierten Darstellungsformen reichen.

Die Möglichkeiten, energierelevante Daten lagerichtig abbilden und modellieren zu können, Akteure am Planungsprozess partizipieren zu lassen und gleichzeitig eine gehaltvolle und aussagekräftige Darstellungsform zu generieren, prädestinieren GIS bei der planerischen Gestaltung einer zukünftigen Energieversorgung. Die technischen Unterschiede zwischen den jeweiligen Energieformen und den daraus resultierenden differenten Raumansprüchen erfordern jedoch häufig komplexe Modellierungsschritte. Wertvolle Ergebnisse werden stets nur dann erzielt, wenn die Methoden der jeweiligen Modellierungen offen gelegt sind und damit einen Vergleich mit anderen Analysen zulassen. Die vorliegende Forschungsarbeit nutzt GIS im zweiten Teil des Konzeptes doppelter Nachhaltigkeit, um die Energiepotenziale und die optimalen Standorte von nachhaltigen Erzeugungsformen zu erörtern.

4. Zwischenfazit: Raum als relevante Einflussgröße für eine nachhaltige Energieversorgung

“Zur Wahrung nachhaltiger Lebensbedingungen heutiger und künftiger Generationen ist anzustreben, dass Energie stets in ausreichender Menge kostengünstig, sicher und umweltschonend in allen Landesteilen zur Verfügung steht.

Es ist von besonderer Bedeutung, dass die bayerische Energieversorgung im Interesse der Nachhaltigkeit auch künftig auf einem ökologisch und ökonomisch ausgewogenen Energiemix aus den herkömmlichen Energieträgern Mineralöl, Kohle, Erdgas und Kernenergie, verstärkt aber auch erneuerbaren Energien, beruht.”

(Auszug aus dem Landesentwicklungsprogramm Bayern 2006, StMWIVT 2006, S. 52)

Die globale Energieversorgung steht zu Beginn des 21. Jahrhunderts vor grundlegenden Veränderungen. Rohstoffknappheit und steigende Preise, ungerechte Zugangschancen zu Energieressourcen, Anreicherung von Treibhausgasen in der Atmosphäre, gesundheitliche Folgen von nuklearen Störunfällen und die Verwüstung weitläufiger Landflächen durch Abraumhalden machen deutlich: der Umgang des Menschen mit Energie und mit seiner Umwelt muss sich zukünftig ändern. Spätestens seit der Agenda 21 aus dem Jahr 1992 gilt Nachhaltigkeit als viel versprechendes Leitprinzip zur Bewältigung globaler und lokaler Herausforderungen, speziell auch für den Energiesektor. Obwohl der normative Inhalt des Prinzips von der Öffentlichkeit und von Entscheidungsträgern weitestgehend anerkannt wird, existieren weit voneinander abweichende Ansichten bezüglich einer konkreten Umsetzung, wie dem Zitat aus dem bayerischen Landesentwicklungsprogramm 2006 zu entnehmen ist. So hat der heterogen verstandene Nachhaltigkeitsbegriff, wie in anderen Bereichen, auch im Energiesektor zu divergierenden und sich teils diametral ausschließenden Diskursen geführt (vgl. Petrovic / Wagner 2005, S. 1). Die Operationalisierung von Nachhaltigkeit des Energiesektors ist folglich ein brisanter, zum Teil ideologisch geprägter politischer Streitpunkt und bis heute nicht abschließend geklärt. Die Parole lautet häufig nur: Weg von fossilen Energierohstoffen, hin zu erneuerbaren Energien!

In der Tat nehmen erneuerbare Energien im postulierten und zahlreich geforderten Transformationspfad des Energiesektors in Richtung Nachhaltigkeit eine zentrale Rolle ein. Sie sind weder in ihrer Bereitstellung begrenzt noch belasten sie die Atmosphäre mit klimawirksamen Treibhausgasemissionen in dem Ausmaß, wie es fossile Energien tun. Die Entwicklungen der letzten Jahre mit einem zunehmend raschen Ausbau dieser Technologieart zeigen jedoch auch, dass erneuerbare Energien nicht per se nachhaltig sind. Gerade bei der Errichtung moderner Energieanlagen wie Windräder, Pumpspeicherkraftwerken oder großen Photovoltaik-Freiflächenanlagen kollidieren die unbestreitbaren globalen Vorteile zunehmend mit den lokalen Interessen der Bevölkerung. Obwohl die Potenziale erneuerbarer Energien hoch eingeschätzt

werden, tritt somit der globale Klimaschutz in Konkurrenz zu heterogenen Umweltgütern sowie Natur- und Landschaftsschutz auf nationaler bzw. regionaler Ebene (vgl. Dehnhardt & Petschow 2004, S. 25 / Krewitt, Nitsch & Reinhardt 2004, S. 12ff.). Durch eine großteils ineffiziente Standortwahl, einzig orientiert an ökonomischer Rentabilität bzw. hoher Subventionierung, treten Flächennutzungskonflikte sowie Kontroversen zu ökologischen und sozialen Belangen damit auch bei den Bauvorhaben von erneuerbaren Energiekraftwerken vermehrt in Erscheinung. Die Förderpolitik der letzten Jahre hat zwar den Durchbruch von erneuerbaren Energien bereitet aber auch dazu geführt, dass untaugliche Standorte plötzlich rentabel und folglich genutzt wurden (vgl. Keppler 2002, S. 12). In der Rückschau auf den bisherigen Ausbau führte dies in zahlreichen Fällen zu nicht optimalen Standortmustern. So sind mit diesem Prozess einerseits eine geringe Effizienzoptimierung und andererseits eine bisher nur in Ansätzen erkennbare Orientierung an einem nachhaltigen Gesamtkonzept verbunden. Die Intention einer nachhaltigen Energieversorgung, nämlich Natur- und Umweltschutzbelange, ökonomische Effekte und soziale Bedürfnisse zu beachten, gilt somit auch für erneuerbare Energien. Folglich stellt sich die dringende Frage, wie eine zukünftige Energieinfrastruktur zu gestalten ist, die sowohl technologisch effizient als auch ökonomisch rentabel ist und zugleich ökologische wie soziale Aspekte berücksichtigt.

Übergeordnetes Ziel der vorliegenden Arbeit ist es deshalb, eine Strategie zu entwerfen, welche einen Analyseweg aufzeigt, wie nachhaltige Energieversorgungsstrukturen regionsspezifisch zu gestalten sind. Dazu wird eine Vorgehensweise vorgestellt, die aus dem Nachhaltigkeitsprinzip relevante Kriterien für den Energiesektor ableitet und in ein konkretes regionales Modellierungsschema überleitet, um eine Balance zwischen globalen Ansprüchen und regionalen Folgen herzustellen. Dabei stehen sowohl die Energieversorgungstechniken als auch die räumlichen Standorte zur Diskussion. Die Konklusion besteht aus einer kartographischen Darstellung der optimalen, d.h. nachhaltigen Energieversorgung, bestehend aus den nachhaltigen Technologien und deren Lokalisierung. Die gewonnenen Ergebnisse dienen der jeweiligen Untersuchungsregion als grundlegende und wertvolle Information, um den Transformationsprozess der Energieversorgung einer Region in Richtung Nachhaltigkeit aktiv zu begleiten und umzusetzen. Die Arbeit begründet sich dabei im Wesentlichen auf drei zentrale Thesen, die wie folgt lauten:

1. Die heutige Energieversorgung ist weder nachhaltig noch zukunftsfähig.
2. Nachhaltigkeit als normative Leitidee bietet Ansätze zur Lösung der Energieproblematik.
3. Die Energieversorgung einer Region ist von den physischen und sozio-ökonomischen räumlichen Einflussfaktoren geprägt.

Gerade die dritte These verdeutlicht die exponierte Rolle des Raumes. Die strukturellen physischen, ökonomischen, kulturellen und sozialen Eigenschaften und Prozesse einer Region bzw. eines Raumes

determinieren die Realisierungsmöglichkeiten einer nachhaltigen Energieversorgung in entscheidender Weise und bestimmen damit deren Erscheinungsbild. Die einzelnen Teilfragen, die sich aus den genannten Thesen ableiten lassen, greifen diesen räumlichen Ansatz auf und konkretisieren die übergeordnete Zielrichtung der Forschungsarbeit weiter. Sie spiegeln das Hauptaugenmerk der Arbeit wider und geben bereits die folgende inhaltliche Struktur sowie den konzeptionellen Aufbau vor.

1. Wie kann nachhaltige Energieversorgung im regionalen Kontext definiert werden? (Kapitel IV)
2. Welche Technologien und Ressourcen sind im jeweiligen Untersuchungsraum für eine nachhaltige Energieversorgung am geeignetsten? (Kapitel V, Teil 1)
3. Welches Potenzial bieten diese Technologien und wo befinden sich ihre im Sinne der Nachhaltigkeit optimalen Standorte. (Kapitel V, Teil 2)

Mit der Beantwortung dieser Fragen entwickelt sich ein praktikables Handlungsschema zur Erörterung einer regionalen Energieversorgung orientiert an den Vorgaben der Nachhaltigkeit, welches im empirischen Teil der Arbeit (Kapitel VI) an einer exemplarischen Untersuchungsregion durchgeführt wird und im Ergebnis Ausgangspunkt für die Implementierung derartiger Strukturen ist.

III Nachhaltigkeit und deren Perspektive für die Energieversorgung

1. Einführung

Mit der Eroberung des Weltalls vor über fünfzig Jahren eröffnete der orbitale Blick auf die Erde faszinierende Eindrücke und zeigte die Erde in ihrer Gesamtheit und Schönheit ebenso wie in ihrer physischen Endlichkeit, ökologischen Begrenztheit und Verletzlichkeit (vgl. Grober 2002, S. 6). Seit dieser Zeit hat sich in den verschiedensten Wissenschaften der Suchprozess nach geeigneten Kriterien, Konzepten und Lösungsstrategien für eine global zukunftsfähige Entwicklung der Menschheit zu einem zentralen Forschungsfeld entwickelt. In diesem Suchprozess stellten und stellen sich bis heute Fragen, deren Lösung nicht mehr nur den individuell handelnden Menschen sondern die gesamte Menschheit betreffen. Impulse vor allem aus dem internationalen umwelt- und entwicklungspolitischen Diskurs gaben im Jahr 1992 den Ausschlag für die Verankerung von „*Sustainable Development*“ in der Agenda 21 (vgl. BMU 1997). Seither ist dieses Konzept en vogue und gilt für unterschiedliche Handlungsbereiche als oberste Prämisse, in dem es einen anzustrebenden Entwicklungspfad beschreibt.

Im deutschen Sprachgebrauch versteht man darunter eine dauerhafte (Hauff 1987), zukunftsfähige (WBGU 1993, S. 11), dauerhaft-umweltgerechte (SRU 1994), nachhaltig zukunftsverträgliche (Enquete-Kommission 1998) oder nachhaltige Entwicklung. Allein die unterschiedlichen Übersetzungen drücken bereits die vielfältigen und teils kontroversen Ansichten von Sustainable Development aus und machen deutlich, dass es weniger um die Worthölse als vielmehr um deren Inhalt geht. So liegen den zahlreich entstandenen Konzepten zumeist unterschiedliche Fundierungen zu Grunde, was auch in divergierenden Problembetrachtungen zum Ausdruck kommt. Obwohl die damit einhergehenden sehr weit gefassten Begriffe jeweils andere inhaltliche Schwerpunkte setzen, sagen sie nichts darüber aus, wie nachhaltige Entwicklung konkret umzusetzen ist. Vielmehr besteht ein großer Interpretationsraum, wie nachhaltige, zukunftsfähige oder dauerhaft-umweltgerechte Entwicklung gestaltet werden kann. Wohl aufgrund dieser verschiedenen Interpretationsmöglichkeit fand der Begriff Nachhaltigkeit in kurzer Zeit Anklang in den unterschiedlichsten gesellschaftlichen, wirtschaftlichen, politischen und ökologischen Bereichen und wird heute geradezu inflationär verwendet. Einhergehend mit der konzeptionellen Weiterentwicklung des Leitbildes entstand eine Vielzahl unterschiedlicher fachspezifischer Definitionen von nachhaltiger Entwicklung. Grunwald und Kopfmüller (2006, S. 10) führen diesen Umstand darauf zurück, dass Nachhaltigkeit einerseits die Sorgen vieler Menschen um die zukünftige globale Entwicklung zum Ausdruck bringt und andererseits als normatives Leitbild auch konstruktiv für Bemühungen um eine Verbesserung der

Lebensverhältnisse steht. Dennoch hat die Begriffsvielfalt auch dazu geführt, dass das Konstrukt Nachhaltigkeit schwierig zu beschreiben und nur mehr schwer fassbar bzw. vermittelbar ist, wodurch eine Realisierung erschwert wird (vgl. Ruschkowski 2002, S. 17).

Die beschriebene Begriffsvielfalt von Nachhaltigkeit macht es notwendig, zuerst zu definieren, was sich hinter dem Terminus nachhaltige Energieversorgung verbirgt, welche Kriterien eine nachhaltige Entwicklung im Energiebereich prägen und wie der Begriff in dieser Arbeit verwendet wird. Eine vorangestellte Begriffsbestimmung hat sich in der wissenschaftlichen Forschungspraxis bereits mehrfach bewährt und ergibt sich auch aus dem konzeptionellen Aufbau des Forschungsvorhabens. Dieses Kapitel wendet sich deshalb der Frage zu, in welchen Nachhaltigkeitskonzepten Anknüpfungspunkte für eine nachhaltige Energieversorgung zu suchen sind. Hierzu gilt es, die wichtigsten Definitions- und Operationalisierungsvorschläge zunächst in ihrem historischen Entstehungskontext zu skizzieren, um anschließend beurteilen zu können, welche Aspekte aus der Vielzahl der unterschiedlichen Deutungsmuster von nachhaltiger Entwicklung für den Energiebereich eine Relevanz besitzen. Anhand der Verknüpfung von bekannten Nachhaltigkeitskonzeptionen mit der aktuellen Energieproblematik sind unter Beachtung von raumrelevanten Faktoren Kriterien für eine nachhaltige Energieversorgung zu identifizieren. Die explizit für den Energiesektor erarbeitete Zieldefinition (vgl. Kap. IV 2.1) fasst somit einerseits die theoretischen Überlegungen zusammen und stellt andererseits konkrete Anforderungen an eine zukünftige Energieversorgungsinfrastruktur. Wie bereits erwähnt, ist es mittels einer vorangestellten Begriffsklärung von nachhaltiger Energieversorgung möglich, im Anschluss ein Handlungsschema zur praktikablen Implementierung bzw. räumlichen Modellierung einer nachhaltigen Energieversorgung abzuleiten.

Die folgende kurze Skizzierung des Diskurses um nachhaltige Entwicklung bezieht sich vornehmlich auf den deutschen Sprachraum. Werden dabei die Nachhaltigkeitsdimensionen sozial bzw. soziokulturell, ökonomisch und ökologisch genannt, so drückt die Reihenfolge der Nennung keine hierarchische Stufung aus oder nimmt eine Rangfolge der Dimensionen vorweg.

2. Die Theorie der Nachhaltigkeit

2.1 Geschichte der Nachhaltigkeit

Die Forstwirtschaft gilt heute als der Ursprung von Nachhaltigkeit (vgl. Köpf 2003, S. 3f.). Bereits im Jahr 1713 werden der Begriff und die Idee einer nachhaltigen Nutzung als Lösungsprinzip für die aufgetretene Holzknappeheit in Sachsen verwendet (vgl. Carlowitz 2000). Der Bedarf an Feuerholz zum Betrieb der Schmelzöfen für die Silbererzeugung war in Folge des wirtschaftlichen Aufschwungs enorm, weshalb die umliegenden Wälder radikal abgeholzt wurden. Der forstwirtschaftliche

Holzeinschlag überschritt dabei in hohem Maße die natürliche Regenerierbarkeit des Waldes und führte mit der Zeit zur flächenhaften Entwaldung der Region. Von Carlowitz erkannte die Zusammenhänge zwischen ökologischen, ökonomischen und sozialen Bereichen. Mit der massiven Waldrodung konnte auf der einen Seite zwar der ökonomische Produktionsprozess und der Aufschwung kurzfristig gesichert werden, auf der anderen Seite verlor die Region ihr natürliches Ressourcenkapital, auf welches sich die ökonomischen Aktivitäten stützten. Der anthropogen verursachte Kollaps der Forste hatte auf längere Sicht fatale Auswirkungen für die Wirtschaftskraft und folglich auch für die von Arbeitslosigkeit bedrohte Bevölkerung. Die Lösung sah von Carlowitz darin, dass zukünftig nicht mehr vom Kapital (Bestand an Wald) sondern von den Zinsen zu profitieren sei (vgl. hierzu Sebaldt 2002, S. 23ff.). Die Zinsen waren in Carlowitz Überlegungen der natürliche Zuwachs an Holz. Wird innerhalb einer Zeitspanne nicht mehr Holz geschlagen als natürlich nachwächst, bleibt die forstwirtschaftliche Nutzung und damit einhergehend der ökonomische Profit dauerhaft gesichert. Gleichzeitig wird das Ökosystem Wald in seinem Bestand erhalten.

Die Parallelen zur aktuellen Situation am Energiemarkt sind frappierend. Die intensive Ausbeute und Nutzung knapper werdender fossiler Ressourcen führt zu erheblichen ökologischen Beeinträchtigungen und langfristig zu stetigen Verteuerungen im Bereich der Energiedienstleistungen, was wiederum zu einer steigenden wirtschaftlichen und sozialen Belastung von Volkswirtschaften führt. Obwohl das damals revolutionäre forstwirtschaftliche Konzept aus einer rein ressourcenökonomischen Überlegung entstand, wird hier bereits die Multidimensionalität der Nachhaltigkeit deutlich.

Der moderne Nachhaltigkeitsbegriff, wie er seit 1992 in der Agenda 21 verankert ist, entspringt allerdings nicht der Tradition der skizzierten forstwirtschaftlichen Errungenschaften. Vielmehr standen ab der Mitte des 20. Jahrhunderts internationale Bestrebungen zur Entwicklungspolitik im Vordergrund. Entwicklungspolitische Vorgabe war es, den durch marktwirtschaftliche Ideen errungenen Wohlstand industrialisierter Staaten auf noch nicht entwickelte Regionen und Länder zu übertragen. Die ambitionierten Bestrebungen standen aber bereits nach kurzer Zeit zur Diskussion und die Aufsehen erregende Veröffentlichung des Club of Rome im Jahr 1972 (vgl. Meadows et al. 1972) stellte den angestrebten Entwicklungsweg öffentlichkeitswirksam in Frage. Die Kernaussagen beruhten darauf, dass das Wirtschafts- und Gesellschaftsmodell industrialisierter Staaten wegen des enormen Ressourcenbedarfs (unter anderem aufgrund der kostengünstigen Bereitstellung von Nutzenenergie), einem unkontrollierten Bevölkerungswachstums sowie stetig steigender Umweltbeeinträchtigungen nicht auf alle Staaten der Welt übertragbar ist. In kurzer Zeit, so die Prognosen, sei die natürliche Lebensgrundlage aufgezehrt.

Die Ausführungen von Meadows et al. (1972) und dessen Wachstumskritik stießen bei den meisten Ökonomen auf Ablehnung und waren wegen der Annahmen und den methodischen Vorgehensweisen wissenschaftlich umstritten. Durch technischen Fortschritt und Substitutionsmöglichkeiten sollte das Problem der schwindenden Ressourcen kompensiert werden. In der Tat haben sich die Prognosen des Club of Rome zu Reichweiten verschiedener Güter aufgrund falscher Annahmen zukünftiger Entwicklungen nicht bestätigt. Ähnlich zu den forstwirtschaftlichen Überlegungen wurden jedoch mit der Thematisierung ökonomischer Wachstumsgrenzen und den damit einhergehenden ökologischen Belastungen Zusammenhänge zwischen ökonomischer Entwicklung und ökologischer Stabilisierung deutlich. In dieser Verknüpfung von Umwelt und Entwicklung liegt der Ursprung des modernen Nachhaltigkeitsbegriffs (vgl. Tremmel 2003, S. 29 / Nissen 2007, S. 19).

Zum ersten Mal gelingt die Verbindung zwischen den beiden polarisierenden Positionen im Abschlussbericht der „Weltkommission für Umwelt und Entwicklung“ im Jahr 1987. Den kleinsten gemeinsamen, aber konsensfähigen Nenner beschreibt der Begriff Sustainable Development wie folgt: *“Humanity has the ability to make development sustainable to ensure that it meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.”*¹¹ (UN 1987, S. 24) Sustainable Development übersetzt man seither mit nachhaltiger Entwicklung ins Deutsche. Mit diesem Verständnis von nachhaltiger Entwicklung geht zum einen die Erkenntnis einher, dass eine Befriedigung von Bedürfnissen das Hauptziel der Entwicklung ist (vgl. Quennet-Thielen 1996, S. 9). Zum anderen ist es der Versuch, die Interessen nachfolgender Generationen, die am jeweils aktuellen Handlungs- und Entscheidungsprozess nicht beteiligt sind, zu berücksichtigen, um somit aktive Verantwortung für diese Generationen zu übernehmen. Inter- und intragenerative Gerechtigkeit sind seitdem konstitutive Elemente des Leitprinzips, ebenso wie eine starke anthropozentrische Ausrichtung des Leitbildes. Nicht die Dauerhaftigkeit von Natur und Umwelt sondern eine dauerhafte Entwicklung steht im Mittelpunkt der Definition. Auf welche Art und Weise die Interessen sowohl der heute lebenden Generationen als auch der zukünftigen Generationen angemessen befriedigt werden können, bleibt in der, als ethische Norm vor allem von Gerechtigkeitsüberlegungen abgeleiteten Brundtland-Definition allerdings unbeantwortet. *„In ihrer Kernbedeutung ist Nachhaltigkeit also eine moralische Maxime ohne konkrete inhaltliche Vorgabe.“* (Streffler et al. 2005, S. 8) Dieser Umstand führt dazu, dass die allgemein formulierte Zieldefinition zur Lösung der drängenden Probleme einer weiteren Konkretisierung bedarf. Verdienst der Kommission bleibt es, Sustainable Development einer breiten, nicht wissenschaftlichen Öffentlichkeit näher gebracht zu haben.

¹¹ Die häufig verwendete Übersetzung im Deutschen lautet: Nachhaltige bzw. dauerhafte Entwicklung ist eine „Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können.“ (Hauff 1987, S. 46 / Nissen 2007, S. 20)

2.2 Streit der Dimensionen

Die in den letzten Jahrzehnten immer stärker beobachtbaren globalen ökologischen und sozialen Missstände begünstigten die Suche nach konkreten Umsetzungsstrategien einer nachhaltigen Entwicklung der Gesellschaft, was bis heute eine zentrale Problemstellung in den Wissenschaften geblieben ist. Mit dem Brundtlandbericht von 1987 und dem Aktionsprogramm Agenda 21 aus dem Jahr 1992 begann sich das Nachhaltigkeitsleitbild über die entwicklungspolitischen und umweltwissenschaftlichen Diskussionen hinaus auch in den öffentlichen Bereichen durchzusetzen. Es avancierte zum angestrebten Entwicklungsparadigma¹² und wurde mit der Rio-Deklaration von zahlreichen Staaten als Leitprinzip anerkannt. Heute besitzt der Nachhaltigkeitsbegriff bei Politikern, Wissenschaftlern, Unternehmen und gesellschaftlichen Akteursgruppen eine außergewöhnliche Konjunktur. Die breite öffentliche Zustimmung ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass der Begriff Nachhaltigkeit sehr abstrakt und offen formuliert sowie interpretiert wird.

Seit der Rio-Deklaration ist es das Ziel, Handlungsleitlinien für das Nachhaltigkeitsleitbild vor dem Hintergrund verschiedener beteiligter Akteure zu erarbeiten und für bestimmte Handlungsräume (lokale, regionale, nationale und globale Ebene) sowie für einzelne Themenbereiche (z.B. Energie) zu konkretisieren (vgl. Kopfmüller et al. 2001, S. 28). Obschon es in der wissenschaftlichen Literatur seit 1992 eine Fülle an Ansätzen und Diskussionen zur exakteren Definition von Nachhaltigkeit bzw. nachhaltiger Entwicklung gibt, sind die Begriffe bisher weitgehend unscharf und vieldeutig geblieben (vgl. u.a. Klauer 1999, S. 86f.). Diese Begriffsvielfalt erklärt sich selbst aus dem Anliegen von Nachhaltigkeit. So zwingen die Vielfältigkeit und Globalität der Ursachen von Armut und Umweltzerstörung die Nachhaltigkeitsdebatte dazu, ihr Blickfeld zu erweitern und verschiedene Perspektiven bzw. Dimensionen in das Konzept zu integrieren. Heute ist anerkannt, dass Nachhaltigkeit mindestens die Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales umfasst. Damit bietet das Konzept verschiedenen Akteuren zwar einerseits die Möglichkeit, ihre eigenen dimensionsbezogenen Positionen verstärkt zu artikulieren, führt andererseits aber zu einer Überfrachtung und vereinzelt auch zu einer Instrumentalisierung des Leitbildes (vgl. Amelung et al. 2008, S. 6).

Eine oftmals vollzogene Hervorhebung der ökologischen oder der ökonomischen Dimension mag beim Studium der Brundtland-Definition zu allererst verwundern, ist doch keiner der beiden Aspekte darin ausdrücklich erwähnt. Renn (vgl. 1996, S. 93f.) spricht deshalb weder der Ökologie noch der Wirtschaftswissenschaft eine Begründung für Nachhaltigkeit zu und verweist darauf, dass sich die Forderung nach einer nachhaltigen Entwicklung vielmehr aus ethischen Gründen ableitet. Dennoch

¹² Dem Rio-Abkommen folgten zahlreiche weitere Beschlüsse, Deklarationen und Konferenzen, die immer wieder Nachhaltigkeit als zentrales Ziel postulierten. An dieser Stelle sei exemplarisch auf das Kyoto-Protokoll (vgl. UN 1998), die Millenniumsziele (vgl. UN 2009) und den Weltentwicklungsgipfel in Johannesburg 2002 verwiesen.

haben sich im Konkretisierungsprozess von Nachhaltigkeit populäre Ansichten und Konzepte entwickelt, die entweder eine ökologische oder eine ökonomische Dimension favorisieren. Im Mittelpunkt der Auseinandersetzung steht die Meinungsverschiedenheit bezüglich der Struktur einer intergenerationell gerechten kollektiven Hinterlassenschaft (*fair bequest package*), wobei sich die zwei konkurrierenden Konzepte „*strong*“ und „*weak sustainability*“¹³ gegenüber stehen. Die beiden kontroversen Denkrichtungen starker und schwacher Nachhaltigkeit unterscheiden sich in ihrer unterschiedlichen Auffassung bezüglich der Substituierbarkeit von Natur- durch Sachkapital und auch aufgrund unterschiedlicher wirtschaftswissenschaftlicher Grundannahmen, weshalb es weitgehend ein Streit innerhalb der Wirtschaftswissenschaften ist.

Ein ausführlicher Vergleich beider Konzepte ist nicht Ziel dieser Forschungsarbeit. Vielmehr geht es darum, die damit einhergehenden ökologisch und ökonomisch dominierten Nachhaltigkeitsperspektiven für den Energiesektor näher zu deuten. Davon abgeleitet finden nämlich gerade für den Energiebereich sehr dimensionsbezogene Argumente Eingang in die Nachhaltigkeitsdebatte, so dass eine unterteilte Betrachtung von Ökologie und Ökonomie im Hinblick auf den Energiesektor bedeutsam erscheint. In gebotener Kürze werden die wichtigsten Strömungen im gesellschaftlichen Nachhaltigkeitsdiskurs skizziert und die jeweiligen ökologischen und ökonomischen Forderungen für den Energiebereich herausgearbeitet.

2.2.1 Ökologisch dominierte Perspektive

Obwohl Umwelt- und Naturschutz in der Brundtland-Definition als Ziele nicht explizit genannt sind, lässt sich deren Beachtung anhand der intergenerativen Gerechtigkeit begründen, da die langfristige Befriedigung von Grundbedürfnissen mit dem Erhalt natürlicher Lebensgrundlagen wie Stabilität der Atmosphäre oder Bewahrung der Artenvielfalt einher geht. Folglich ist die ökologische Säule ein wichtiger Faktor in der modernen Interpretation von Nachhaltigkeit. Ein Ansatz, der die ökologischen Belange ins Zentrum der Betrachtung rückt, ist die starke Nachhaltigkeit mit der Kernaussage, dass Naturkapital und Sachkapital (*man made capital*) komplementär und somit gegenseitig nicht substituierbar sind (vgl. hierzu Daly 1999 / Ott & Döring 2004). Die fehlende Substituierbarkeit wiederum ist Anlass dafür, das Naturkapital konstant zu halten bzw. die Natur unberührt zu lassen (*constant natural capital rule*), um den nachfolgenden Generationen die gleichen Chancen wie der heutigen Generation zur Bedürfnisbefriedigung zu gewährleisten. Damit reduziert sich die Nutzung des Naturkapitals auf den sich natürlich reproduzierenden Teil. Menschliches Handeln muss sich deshalb innerhalb dieser natürlichen Grenzen bewegen.

¹³ Ins Deutsche mit starker und schwacher Nachhaltigkeit übersetzt. Zur Diskussion um starke und schwache Nachhaltigkeit vgl. SRU (2002, S. 64ff.), zur Diskussion verschiedener Nachhaltigkeitskonzepte für den Energiebereich vgl. Steger et al. (2002, S. 8ff.).

Diese Forderung bedeutet tief greifende Veränderungen für das heutige Gesellschaftssystem und ist in Verbindung mit dem Energiesektor umstritten. Durch die Nutzung nicht erneuerbarer (fossiler) Energieträger wird der Bestand an Naturkapital irreversibel verändert, weshalb eine strikte Auslegung starker Nachhaltigkeit den Verbrauch dieser Ressourcen kategorisch ausschließt. Des Weiteren ist aber auch die Anlagenproduktion von erneuerbaren Energien, welche ebenfalls nicht-erneuerbare Materialien benötigt (z.B. Metalle), nicht mehr gestattet. Gerade dieses Postulat hat zu einer ablehnenden Haltung geführt, das Konzept starker Nachhaltigkeit am Energiesektor anzuwenden (vgl. Hirschberg & Voß 1998, S. 3; Voß 2004, S. 243f.).

Eine Hervorhebung ökologischer Belange wird im Energiebereich vor allem von Umweltverbänden und ökologisch orientierten Akteuren propagiert. Die Argumentation stützt sich auf die Auffassung, dass eine langfristige Befriedigung von Bedürfnissen ohne funktionsfähige Ökosysteme nicht möglich sei, weshalb es oberstes Gebot ist, die Ökosysteme intakt zu halten und die Natur zu schützen. Besonders die Sorgen, die drohende Klimaerwärmung könnte Ökosysteme langfristig schädigen und folglich die menschliche Entwicklung beeinträchtigen, haben in der politischen und gesellschaftlichen Diskussion um eine nachhaltige Energieversorgung Befürworter einer ökologisch geprägten Perspektive gestärkt. Zudem hat eine Vielzahl an populärwissenschaftlichen Büchern und Filmen (exemplarisch Alt 2009 / Gore 2007 / Scheer 2005) die prognostizierten ökologischen Folgen thematisiert und damit das öffentliche Meinungsbild beeinflusst, weswegen Konzeptionen, die sich am ökologischen Aspekt und somit verstärkt an der starken Nachhaltigkeit orientieren, vermehrt diskutiert werden. Der ökologische Aspekt hat speziell in der Diskussion um die Belastung von Ökosystemen mit Abfallstoffen aus der Energiebereitstellung, wie Schwefel- oder CO₂-Emissionen, große Berechtigung. Ein wesentliches konsensfähiges Kriterium zukünftiger Energieversorgung lautet deshalb, Ökosysteme, Naturkreisläufe und im Besonderen das Klima nur so stark zu belasten, wie es deren eigene natürliche Regenerationsfähigkeiten vorgeben.

2.2.2 Ökonomisch dominierte Perspektive

Als diametrale Gegenposition zur starken Nachhaltigkeit, bei der das Naturkapital konstant zu halten ist, gilt das Konzept schwacher Nachhaltigkeit. Wichtigster Unterschied ist die angenommene unbegrenzte Substituierbarkeit von Natur- durch Sachkapital. Orientiert an ökonomischen Kosten-Nutzen-Analysen sollen Tätigkeiten dann vollzogen werden, wenn der generierte Nutzen höher als die anfallenden Kosten und zwischen Gewinnern und Verlierern ein monetärer Ausgleich möglich ist. Die Überlegungen gingen sogar bis zu einem kompletten Verschwinden der Natur zugunsten von Sachkapital, da dieses einen größeren Nutzen stiften würde (vgl. hierzu Solow 1974). Dabei spielt es laut neoklassischer Nutzentheorie keine Rolle, wodurch dieser Nutzen gestiftet wird. Kritisch

bemerkt wird daher, dass Nutzen häufig mit Konsum (meist Kauf von materiellen Gütern) gleichgesetzt ist. Aufgrund dieser begrifflichen Verengung reduziert man Menschen, die nach Glück streben, auf rational handelnde Wirtschaftssubjekte, was neben weiteren Kritikpunkten wie keine vollständige Substitutionsmöglichkeit von Natur- durch Sachkapital aufgrund der Multifunktionalität ökologischer Systeme oder die ungleiche Verteilung von Kosten und Nutzen angemerkt wird (vgl. SRU 2002, S. 59 / Döring 2004, S. 5f.).

Für die zukünftige Energieversorgung bedeutet eine Anwendung der schwachen Nachhaltigkeit, dass die Ausbeute und Verbrennung fossiler Energieträger so lange sinnvoll ist, wie der aktuell erzielte Nutzen daraus größer ist als die abdiskontierte zukünftige Naturbeeinträchtigung. Diese Maxime lässt auch für den Energiesektor wesentliche externe Effekte zu, solange die negativen externen Effekte den positiven Nutzen aus der Inanspruchnahme der Energiedienstleistung nicht übersteigen. Diese Effekte finden meist jedoch keine Berücksichtigung, da deren Monetarisierung im Energiebereich wegen der vielfältigen ökologischen und soziokulturellen Auswirkungen häufig schwer fällt. Aus diesem Grund ist es zum Teil auch nicht möglich, auf den Markt als unsichtbare Steuerungshand zu vertrauen, weshalb die Anwendung des schwachen Nachhaltigkeitskonzeptes am Energiesektor ähnlich umstritten ist wie die starke Nachhaltigkeit.

Ein ökonomisch orientiertes Nachhaltigkeitsverständnis fordert eine stärkere Ausrichtung der Energiebereitstellung an marktwirtschaftlichen Bedingungen und folglich an günstigen Energiepreisen, einem offenen Wettbewerb und internationaler Wettbewerbsfähigkeit (vgl. u.a. Keppler 2002 / Grill 2004 / Bohnenschäfer et al. 2005 / BDI 2007 und 2009). Die ökonomische Rentabilität der Energieversorgung dominiert. Deren Erfüllung wird als Voraussetzung zur anschließenden Beachtung ökologischer und sozialer Folgen angesehen. Trotz der berechtigten Einwände ist zu konstatieren, dass die Wirtschaftlichkeit eine tragende Säule der Nachhaltigkeit am Energiesektor darstellt. Ohne die Aussicht auf Gewinne, unabhängig davon ob staatlich gefördert oder nicht, werden notwendige Strukturveränderungen und Investitionen unterbleiben.

2.2.3 Zusammenfassung

Sowohl das Konzept der starken als auch das Konzept der schwachen Nachhaltigkeit haben sich in der Vergangenheit als unrealistisch, illusionär und damit nicht praktikabel erwiesen (vgl. Renn 1996, S. 98). Auch zur Operationalisierung von Nachhaltigkeit am Energiesektor erscheinen beide Konzepte wenig zielführend (vgl. Miehlung 2006, S. 15 und 30f.). Die grundsätzliche Frage der Substituierbarkeit von Naturkapital kann nur mit Blick auf die jeweilige Funktion (Ressource oder Senke) von Umwelt

und Natur beantwortet werden.¹⁴ Bei der Senkenfunktion der Umwelt gilt es auf Technologien zu setzen, die die Umwelt nur bis zur physischen Aufnahmekapazität beeinträchtigen und so Ökosysteme stabil halten. Der Ansatz der starken Nachhaltigkeit dominiert. Wendet man das ökologisch dominierte Prinzip auch auf die Ressourcenfrage an, würde dies jede weitere Ausbeute von fossilen Energieträgern wie etwa Kohle, Erdöl, Erdgas und Uran verbieten. Hieraus leitet sich die Überlegung ab, dass nur erneuerbare Energien mit dem Konzept der Nachhaltigkeit vereinbar sind. Voß (2000, S. 267 f.) widerspricht diesem Ansatz, da erstens die Inanspruchnahme von erneuerbaren Energien stets auch nicht erneuerbare Stoffe (v.a. Metalle) benötigt und zweitens fossile Energieträger – dem ökologischen Nachhaltigkeitspostulat folgend – dann auch von der zukünftigen Generation nicht genutzt werden dürfen. Deshalb ist in der Ressourcenfrage dem Ansatz der schwachen Nachhaltigkeit zu folgen, da die Nutzung von fossilen Energieträgern so lange mit dem Leitbild nachhaltige Entwicklung vereinbar ist, wie es gelingt, den nachfolgenden Generationen eine mindestens gleich große technisch-wirtschaftlich nutzbare Energiebasis verfügbar zu machen (vgl. ebs., S. 267f.). Damit treten das jeweilige Problemfeld (z.B. Ressourcenversorgung) bzw. der jeweilige Sachverhalt (z.B. CO₂-Emissionen) in den Vordergrund.

Beide Interpretationen von Nachhaltigkeit sind demzufolge zu einseitig und stellen konträre Extrempositionen bezüglich der umstrittenen Substitutionsmöglichkeit von Natur- durch Sachkapital dar. Im Nachhaltigkeitsdiskurs haben sich deshalb vermittelnde Positionen¹⁵ etabliert, die gleichzeitig sowohl von einer Substituierbarkeit als auch von einer teilweisen Komplementarität von Natur- und Sachkapital ausgehen und z.B. kritische ökologische Mindestanforderungen beachten. Zudem werden in der starken und schwachen Nachhaltigkeit vorwiegend die Beziehungen zwischen Ökologie und Ökonomie analysiert, Wechselwirkungen in Bezug auf soziale Belange bleiben weitgehend unberücksichtigt. Da die soziale Dimension heute als essentieller Bestandteil einer Nachhaltigkeitsstrategie anerkannt ist, muss eine Erweiterung erfolgen, die es vermag, über die Wirtschaftswissenschaften hinaus verschiedene Wissenschaftsdisziplinen in das Konzept zu integrieren. Für die vorliegende Arbeit bleibt zusammenfassend die Erkenntnis bedeutsam, dass sowohl die Ökonomie als auch die Ökologie bei der Entwicklung von nachhaltigen Energiestrategien große Relevanz besitzen und einzelne Energieformen bzw. Energietechnologien nicht aufgrund rein ökologischer oder ausschließlich ökonomischer Überlegungen auszuschließen sind.

¹⁴ In ähnlicher Form argumentiert der Sachverständigenrat für Umweltfragen im Jahresgutachten 2002, jedoch mit einer ablehnenden Haltung gegenüber schwacher Nachhaltigkeit (vgl. SRU 2002, S. 67).

¹⁵ Eine vermittelnde Position nimmt z.B. das Konzept kritischer Bestandsniveaus von Endres und Radke (1998) ein. Hierbei wird von einer Substituierbarkeit zwischen Natur- und Humankapital ausgegangen, jedoch nur in der Höhe, in welcher zuvor definierte kritische Niveaus einzelner Bestandteile nicht unter- bzw. überschritten werden.

2.3 Einheit der Dimensionen

Seit der Konferenz der Vereinten Nationen 1992 in Rio de Janeiro und der Agenda 21 verbindet man mit dem Leitbegriff sustainable development das Verständnis, ökonomische, soziale und ökologische Entwicklungen zwingend als Einheit zu sehen. Der WBGU (1993) greift deshalb in seinem Jahresgutachten die beschriebene Problematik der eindimensionalen Betrachtung auf und thematisiert die Integration mehrerer Dimensionen. Er definiert Nachhaltigkeit als „*ökologischen Imperativ*“, der zwingend die Berücksichtigung sowohl ökologischer als auch ökonomischer und soziokultureller Faktoren gebietet (...).“ (WBGU 1993, S. 11) In ähnlicher Form argumentiert der Sachverständigenrat für Umweltfragen im Jahresgutachten 1994, in dem er die drei Komponenten Ökonomie, Ökologie und soziale Belange als eine „*immer neu herzustellende notwendige Einheit*“ (SRU 1994, S. 46) begreift. Die Dimensionen stehen dabei stets in einem Spannungsverhältnis zueinander, dürfen aber nicht voneinander isoliert und gegeneinander ausgespielt werden. Obwohl diese Nachhaltigkeitskonzepte die ökonomische und soziale Dimension integrieren, bleibt in beiden Fällen die ökologische Komponente dominant, indem angenommen wird, dass die „*Tragekapazität der natürlichen Umwelt*“ (SRU 1994, S. 47) die Grenze für eine dauerhaft umweltgerechte Entwicklung der Gesellschaft vorgibt. Viele moderne Definitionen von nachhaltiger Entwicklung haben dementsprechend zwar die drei Perspektiven aufgenommen aber dennoch, ohne die Intention der Dreiteilung in Frage zu stellen, eine davon stärker betont.

Neben der Diskussion um starke und schwache Nachhaltigkeit hat die dimensionsbezogene Betrachtungsweise dazu geführt, dass sich in Deutschland das mehrdimensionale „*Drei-Säulen-Modell*“ etabliert hat. Die Enquete-Kommission des 13. Deutschen Bundestages „*Schutz des Menschen und der Umwelt*“ fordert in ihrem Abschlussbericht von 1998 die gleichrangige bzw. gleichwertige Beachtung der ökologischen, ökonomischen und sozialen Perspektive, um die komplexen Herausforderungen im Umweltbereich sowie die vorhandenen Entwicklungsdefizite zu lösen. Die drei Säulen der Nachhaltigkeit – Ökologie, Ökonomie und Soziales – stehen miteinander in Wechselwirkung und bedürfen langfristig einer ausgewogenen Koordination. Unter diesem integrativen Gesichtspunkt ist es allerdings nicht nur ein bloßes Zusammenführen dreier nebeneinander stehender Säulen, sondern die „*Entwicklung einer dreidimensionalen Perspektive aus der Erfahrungswirklichkeit.*“ (Enquete Kommission 1998, S. 32) Die drei Dimensionen werden dabei als Systeme betrachtet, deren Leistungsfähigkeiten es unter Berücksichtigung nachfolgender Generationen zu bewahren gilt.

Die Besonderheit im Drei-Säulen-Modell liegt in der Gleichrangigkeit von Ökonomie, Ökologie und Soziales. Über den Umwelt- und Ressourcenschutz hinaus verlangt das Konzept so gleichermaßen die Verwirklichung sozialer und ökonomischer Entwicklungsziele, wobei eine Schwerpunktsetzung strikt

ausgeschlossen wird. Die Gleichrangigkeit hat zu zahlreicher Kritik geführt, die sich gegen die damit einhergehende Überfrachtung des Leitbildes und der Vernachlässigung ökologischer Grenzen richtet (vgl. u.a. Rochlitz 1998, S. 14 / Brandl et al. 2001, S. 83 / Grunwald & Kopfmüller 2006, S. 52f. / Ott 2009, S. 26f.). Zudem suggeriert eine isolierte Anwendung des Nachhaltigkeitsbegriffes auf die drei Dimensionen, dass sich Nachhaltigkeit unabhängig voneinander in den drei Dimensionen erzielen ließe (vgl. Kopfmüller et al. 2001, S. 121f.).

Die gleichrangige dreigliedrige Struktur führt in der Tat dazu, dass sich in dieses Konzept sehr viele, häufig auch kontroverse Standpunkte einbinden lassen. So liefert das Drei-Säulen-Modell für jeden Akteur, selbst wenn er vornehmlich einer Dimension zugeneigt ist, eine Argumentationshilfe, um die jeweils eigenen Vorstellungen in der Nachhaltigkeitsdiskussion zu vertreten. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen sprach sich deshalb gegen die Gleichrangigkeit der Dimensionen aus (vgl. SRU 2002, S. 68), da die Komplexität dieses Ansatzes politisch nicht mehr fass- bzw. umsetzbar ist, wodurch Nachhaltigkeit zur bloßen Wunschvorstellung verkommt und das Modell seine Orientierungsfunktion verliert (vgl. Brandt & Jochum 2000, S. 75). Dabei wird im Drei-Säulen-Modell stets betont, die drei Dimensionen nicht nur additiv zusammenzufassen sondern integrativ zu betrachten. Eine Integration erscheint bei Gleichrangigkeit jedoch schwer, da die Integration bei Zielkonflikten entweder nur durch einen Kompromiss bzw. Minimalkonsens oder eine Schwerpunktsetzung mit der Gewichtung zugunsten einer Dimension erfolgen kann.

Gerade der Umstand, dass sich sehr viele Interessen in das Modell subsumieren lassen, führt allerdings zu dessen großen Popularität, speziell in politischen Debatten. Die drei Dimensionen sind dabei Konsens, wobei wissenschaftlich wie auch politisch umstritten bleibt, ob in dem Spannungsfeld der Dimensionen Schwerpunkte zu setzen sind und wenn ja, welche Schwerpunkte. So wird sich zwar der Drei-Säulen-Idee oftmals bedient, die Integration und gegenseitige Abwägung bzw. Gewichtung der Dimensionen aber offen gelassen. Seit der Definition des dreigliedrigen Konzeptes durch die Enquete Kommission ist es somit möglich, Forschungsarbeiten und politische Entscheidungen danach zu unterscheiden, ob sie sich verstärkt einer einzelnen Säule oder allen drei Säulen gleichrangig verpflichtet fühlen. Zwar gestehen auch Nachhaltigkeitskonzeptionen, bei denen eine Dimension priorisiert wird, eine Multidimensionalität des Leitbildes ein, indem eine Integration der anderen Dimensionen unter dem Postulat der favorisierten Dimension erfolgt, widersprechen damit jedoch der Intention des Drei-Säulen-Konzeptes.

Verknüpft man die Drei-Säulen-Konzeption mit dem Energiesektor, bedarf es ebenfalls einer kritischen Hinterfragung. So ist – wie im allgemeinen Nachhaltigkeitsdiskurs – auch im Themenfeld Energie die Forderung nach einer gleichrangigen Behandlung der Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft gleichsam populär wie widersprüchlich: *„Die Energiepolitik muss die Ziele*

Versorgungssicherheit, Wettbewerbsfähigkeit und Klimaschutz gleichrangig verfolgen. (...) Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Ziele Versorgungssicherheit, Klimaschutz und Wettbewerbsfähigkeit nicht gleichrangig erfüllt werden können, da sie konfligierende Wirkungen aufweisen.“ (Kempf & Müller 2007, S. 14-15) Obwohl die Dimensionen hier auf Teilaspekte reduziert sind, stellt sich die Frage, ob es zielführend ist, die Gleichrangigkeit konzeptionell weiter zu verfolgen und sie ergebnisorientiert gleichzeitig auszuschließen. Zudem läuft die Offenheit des Konzeptes dadurch Gefahr, zum Nachteil der praktischen Umsetzung zu werden. Die vage formulierte Idee der gemeinsamen Betrachtung dreier Dimensionen gewährt nahezu allen Akteuren am Energiesektor die Möglichkeit, ihre Belange in den Nachhaltigkeitsdiskurs einzubringen. Die Anknüpfungspunkte dazu sind wegen der dimensionsübergreifenden Energiethematik reichhaltig, wodurch das Modell mit immer neuen Anforderungen Gefahr läuft, überfrachtet zu werden.

Trotz vielfältiger Kritik am Drei-Säulen-Modell bleibt dessen Verdienst, die unbestrittene Multidimensionalität der Nachhaltigkeit stärker in den Mittelpunkt sowohl der allgemeinen Nachhaltigkeitsdiskussion wie auch der Diskussion um Nachhaltigkeit am Energiesektor eingeführt zu haben. Der Energiesektor stellt ohnehin ein Paradebeispiel eines interdisziplinären aktuellen Problemfeldes dar. Für die vorliegende Forschungsarbeit besitzt der mehrstufige Aufbau der Nachhaltigkeitskonzeption insofern Bedeutung, als dass gerade die gleichrangige und isolierte Betrachtung der Dimensionen als Vorteil für die Modellierungsstruktur von Energiepotenzial- und Standortmodellierungen gelten kann.

2.4 Integratives Nachhaltigkeitskonzept

Die beschriebene Kontroverse um die Integration der einzelnen Dimensionen hat dazu geführt, dass sich in Fortführung des dreigliedrigen Systems, welches die einzelnen Dimensionen unabhängig voneinander betrachtet und lediglich die Interdependenzen zwischen ihnen berücksichtigt, neue integrative Nachhaltigkeitskonzepte mit anderen konzeptionellen Herangehensweisen weiterentwickelt haben. Das prominenteste Beispiel ist das im Verbundprojekt der Helmholtz-Gesellschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) „*Global zukunftsfähige Entwicklung. Perspektiven für Deutschland*“ mit zahlreichen Publikationen (vgl. u.a. Kopfmüller et al. 2001 / Coenen & Grunwald 2003 / Kopfmüller 2006)¹⁶ entstandene integrative Nachhaltigkeitskonzept. Die Intention des Forschungsansatzes ist die normativen Prämissen der Nachhaltigkeit, wie sie aus der Brundtland-Definition und der Rio-Deklaration abgeleitet werden können, als Zugangsschlüssel zur Nachhaltigkeit zu wählen, um damit eine ganzheitliche Perspektive einzunehmen. Dies bedeutet eine Abkehr von

¹⁶ Die folgenden Ausführungen geben lediglich einen Einblick in die Vorgehensweise des HGF-Projekts. Neben den genannten Quellen sind nähere Informationen auch unter <http://www.igas.fzk.de/home.htm> (Abruf am 17.03.2011) abrufbar.

der kritisierten dimensionalen Betrachtung und eröffnet einen neuen Zugang zum Leitprinzip. Der Ansatz versucht dabei die Komplexität von Nachhaltigkeit in einem „top-down-Ansatz“ auf verschiedenen Ebenen fassbar zu machen. Im Ansatz oben steht die theoretische Herleitung, unten die Umsetzung.

Als konstitutive Elemente der Nachhaltigkeit gelten Gerechtigkeit (inter- und intragenerative Gerechtigkeit), Globalität und Anthropozentrik (langfristige Befriedigung menschlicher Bedürfnisse) (vgl. Brandl et al. 2001, S. 85f. / Kopfmüller et al. 2001, S. 117ff.). Die konstitutiven Elemente stellen dabei den Ausgangspunkt der Operationalisierung dar und werden dimensionsübergreifend angewendet. *„Im integrativen Konzept geht es darum, das Postulat global verstandener Gerechtigkeit in Zeit und Raum auf die menschliche Nutzung von (natürlichen und sozialen) Ressourcen und ihre Weiterentwicklung zu beziehen.“* (Grunwald & Kopfmüller 2006, S. 55) Aus den drei konstitutiven Elementen leitet sich ein integratives Nachhaltigkeitsverständnis ab, welches *„angemessen und a priori“* (Kopfmüller 2006, S. 27) die ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekte berücksichtigt.

Die Operationalisierung von Nachhaltigkeit im integrativen Konzeptverständnis verläuft in aufeinander aufbauenden Schritten (top-down). Dennoch ist die Beziehung zwischen den Ebenen nicht rein deduktiv, vielmehr geben die Ergebnisse der übergeordneten Stufe Orientierungshilfen. Nachhaltigkeit an sich wird in jeder Ebene selbst begründet. Zuerst gilt es, die konstitutiven Elemente in generelle Ziele nachhaltiger Entwicklung zu übersetzen: Sicherung der menschlichen Existenz, Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivpotenzials und Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten. Daran anschließend wird ein System von Nachhaltigkeitsregeln entwickelt, welches die dimensionsübergreifenden Ziele weiter konkretisiert. Die Regeln geben einerseits die bereits erwähnte Orientierungshilfe für eine nachhaltige Entwicklung und dienen andererseits als Prüfkriterien zur Bewertung von Handlungen bzw. Problemfeldern unter Nachhaltigkeitsaspekten (Grunwald & Kopfmüller 2006, S. 56). In Tabelle 1 ist das System von Nachhaltigkeitsregeln des HGF-Projektes wiedergegeben. Farblich hinterlegt sind die generell formulierten und an den konstitutiven Elementen der Nachhaltigkeit orientierten Ziele. Die substantiellen Regeln (auch *„Was-Regeln“* genannt) sind unumgängliche Grundbedingungen menschenwürdiger Existenz und somit einer nachhaltigen Entwicklung, die instrumentellen Regeln (auch *„Wie-Regeln“*) beschreiben die politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen, die zur Erfüllung dieser Mindestanforderungen gegeben sein müssen.

Tabelle 1: System von Nachhaltigkeitsregeln des integrativen HGF-Ansatzes (Kopfmüller 2006, S. 29)

| Substanzielle Regeln und ihre Zuordnung | | |
|---|---|---|
| <i>Sicherung der menschlichen Existenz</i> | <i>Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivpotenzials</i> | <i>Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten</i> |
| 1.1 Schutz der menschlichen Gesundheit | 2.1 Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Ressourcen | 3.1 Chancengleichheit im Hinblick auf Bildung, Beruf, Information |
| 1.2 Gewährleistung der Grundversorgung (Nahrung, Bildung, ...) | 2.2 Nachhaltige Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen | 3.2 Partizipation an gesellschaftlichen Entscheidungsprozessen |
| 1.3 Selbstständige Existenzsicherung | 2.3 Nachhaltige Nutzung der Umwelt als Senke | 3.3 Erhaltung des kulturellen Erbes und der kulturellen Vielfalt |
| 1.4 Gerechte Verteilung der Umweltnutzungsmöglichkeiten | 2.4 Vermeidung unvermeidbarer technischer Risiken | 3.4 Erhaltung der kulturellen Funktion der Natur |
| 1.5 Ausgleich extremer Einkommens- und Vermögensunterschiede | 2.5 Nachhaltige Entwicklung des Sach-, Human-, und Wissenskaptals | 3.5 Erhaltung der sozialen Ressourcen |
| Instrumentelle Regeln | | |
| <ul style="list-style-type: none"> - Internalisierung der externen ökologischen und sozialen Kosten - Angemessene Diskontierung - Begrenzung der Staatsverschuldung - Faire weltwirtschaftliche Rahmenbedingungen - Internationale Kooperation - Resonanzfähigkeit gesellschaftlicher Institutionen - Reflexivität gesellschaftlicher Institutionen - Steuerungsfähigkeit - Selbstorganisationsfähigkeit - Machtausgleich | | |

Erste Anstrengungen, Nachhaltigkeit in praktische Handlungsempfehlungen anhand so genannter Mindestanforderungen umzusetzen, kamen aus der ökologisch dominierten Forschungsrichtung. Diese Mindestanforderungen oder Managementregeln liefern konkrete Vorschläge, an denen sich menschliches Handeln orientieren soll. Werden die ökologischen Mindestanforderungen nicht eingehalten, ist mit einer irreversiblen Schädigung von Ökosystemen zu rechnen. Eine Verletzung der Grenzen ist somit nicht nachhaltig. Auch im HGF-Ansatz gilt die Einhaltung bzw. Erfüllung aller Regeln als notwendige Voraussetzung, um Nachhaltigkeit zu realisieren. Als Kritik daran verwies Ott (2006, S. 78f.) darauf, dass gerade bei den instrumentellen Regeln dies allerdings schwer fällt.

Um die konzeptionelle Stufe mit den universell und abstrakt formulierten Nachhaltigkeitsregeln empirisch analysieren zu können, erfolgt auf der nächsten Stufe eine weitergehende Konkretisierung. So werden Indikatoren – im Sinne von Kenngrößen, die den angesprochenen Sachverhalt jeder Regel adäquat erfassen – sowie deren Zielwerte und Handlungsstrategien zur Umsetzung erarbeitet. Die Regeln bilden dabei den normativen Bezugsrahmen des Indikatorensystems. Die tatsächliche Indikatorenauswahl erfolgt anhand einer Fokussierung auf zentrale Problemfelder der Nachhaltigkeit. Dieser problemorientierte Ansatz wirkt zum einen als komplexitätsreduzierender Filter und zum anderen als „Scharnier zwischen dem normativ-regelorientierten Vorgehen und einem diskursiven Ansatz.“ (Coenen et al. 2001, S. 106) Das resultierende sehr umfangreiche

Indikatorensystem wird als Fundus gesehen, aus dem für den jeweiligen Zweck geeignete Indikatoren auszuwählen sind und zu dem gegebenenfalls auch Indikatoren hinzugefügt werden können (vgl. ebs, S. 107 und 125).

Das integrative Nachhaltigkeitskonzept blieb nicht auf die theoretische Herleitung beschränkt. Im Laufe des Projektes vollzog sich eine Konkretisierung und Operationalisierung für unterschiedliche Nachhaltigkeitsbereiche, so auch für den Energiesektor (vgl. Kopfmüller et al. 2000) bzw. für einzelne Themenfelder mit Energiebezug (vgl. Nitsch & Rösch 2001 / Schidler 2006 / Stelzer, Rösch & Raab 2006). Mit der Übertragung des Theoriegerüsts auf dieses Handlungsfeld konnten allgemeine Leitlinien zur Realisierung von Nachhaltigkeit in der Energieversorgung erarbeitet werden. Sie geben Orientierung für die im Energiesektor handelnden Akteure und besitzen bei der Technologiebewertung in dieser Arbeit, die im Kontext einer räumlichen Betrachtung steht und die Identifikation von nachhaltigen Energietechnologien zum Ziel hat, große Bedeutung. In Kapitel V 1.2.1 wird deshalb noch dezidiert auf die Verbindung zum Energiesektor mit den angenommenen Leitlinien und davon abgeleiteten Indikatoren eingegangen.

2.5 Nachhaltige Regionalentwicklung

Die Ansätze nachhaltiger Regionalentwicklung kombinieren die Nachhaltigkeitsidee mit dem Konzept einer eigenständigen Regionalentwicklung (vgl. Wiechmann 2004, S. 158). Während sich die Regionalentwicklung bisher vor allem um eine Verbesserung der wirtschaftlichen Strukturen einer (zumeist ländlichen) Region bemühte und dies durch Ansiedlung von Unternehmen, Stärkung des Tourismus oder der Förderung von Innovationen versuchte, wird diese ökonomisch geprägte Sichtweise in der nachhaltigen Regionalentwicklung um die Bereiche Ökologie und Soziales erweitert. Eine Strategie nachhaltiger Regionalentwicklung erfordert eine *„ressortübergreifende Politikkonzeption, die eine Integration von ökologischen, sozialen und ökonomischen Komponenten anstrebt“* (Spehl 2005, S. 680) und muss eine dauerhafte Funktionsfähigkeit aller Dimensionen gewähren. Nachhaltige Regionalentwicklung behandelt nun auch Themen wie sanften Tourismus oder die Vermarktung regionaler Produkte. Mit der Verknüpfung von Nachhaltigkeit und Regionalentwicklung werden die Ziele der Regionalentwicklung denen des Leitbildes angepasst, wodurch aber auch die allgemeinen Definitions- und Operationalisierungsprobleme des Nachhaltigkeitsdiskurses übernommen werden. Wichtiger Aspekt dabei ist, dass die Umsetzung nachhaltiger Entwicklung von den regionalen Eigenheiten abhängt und die Bürger und Akteure vor Ort in partizipativer Weise den Weg mitbestimmen und mitgestalten können.

Durch den massiven Ausbau erneuerbarer Energien in den vergangenen Jahren und der damit einhergehenden Umstellung auf dezentrale Versorgungsstrukturen findet das Themenfeld Energie

verstärkt Eingang in die Diskussion um eine nachhaltige Regionalentwicklung. Heute gelten erneuerbare Energien als hervorragendes Mittel dafür, da sie auf fast alle Ziele der nachhaltigen Regionalentwicklung positiv wirken (vgl. u.a. Tischer et al. 2006, S. 23 und S. 36 / Conrad 2007, S. 77ff. / Borsig & Kriszan 2008, S. 6ff.), wie bereits angemerkt aber auch Konflikte um Standorte und Nutzungsmöglichkeiten generieren (vgl. Born 2011, S. 7). Die Folgewirkungen des Booms an erneuerbaren Energien gelten im Besonderen für ländliche Regionen, treten allerdings auch im städtischen Kontext auf. Vorrangige Aspekte von erneuerbaren Energien in der Regionalentwicklung sind die heimische Wertschöpfung durch die Schaffung von Arbeitsplätzen und die Generierung von Einkommen (Vergütung für Energie), das effiziente Einbinden in regionale Versorgungsstrukturen und Produktionskreisläufe mit kurzen Transportwegen, Nutzung regionaler Energieressourcen sowie eine Einsparung von CO₂. Der Ausbau erneuerbarer Energien wirkt sich dabei auf die gesamte Wertschöpfungskette aus, weshalb neben den Anlagenbetreibern auch lokale Handwerksbetriebe, Bauunternehmen, Beratungsfirmen und lokale Banken (v.a. Fremdfinanzierung von Photovoltaikanlagen) profitieren können.

In den vergangenen Jahren sind bereits zahlreiche integrative kommunale und regionale Energie- bzw. Klimastrategien entstanden, die sich ebenfalls einer nachhaltigen Regionalentwicklung verschreiben. George et al. (2009, S. 13ff.) stellen ein Systemmodell vor, welches sich in vier Dimensionen (inhaltliche, räumliche, normative und zeitliche Dimension) mit unterschiedlichen Themenfeldern unterteilen lässt. Die normative Dimension umfasst dabei das 100%-Ziel sowie das Leitprinzip Nachhaltigkeit. Ähnlich zu der in dieser Arbeit entwickelten Strategie werden Indikatoren gesucht, die das Maß der Zielerreichung quantifizieren (vgl. George et al. 2009, S. 20f.). Aufbauend auf derartigen Strategien, begreift sich auch das Konzept doppelter Nachhaltigkeit als integrative Energiestrategie zur Umsetzung einer nachhaltigen Energieversorgung. Wie noch zu zeigen ist, werden dabei Nachhaltigkeitsbezüge sowohl für die Technologie- als auch für die Standortwahl aufgebaut und neben dem deskriptiven auch ein planerisches Instrument angestrebt.

3. Zwischenfazit: Notwendigkeit einer problemorientierten Definition

Das Jahr 1992 stellt eine wichtige Zäsur im Diskurs um Nachhaltigkeit dar. Die in diesem Jahr stattgefundenen Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung hatte zum Ziel, dringliche globale Probleme aufzuzeigen und mit ihren Empfehlungen einen Weg zu weisen, wie diese zukünftigen Herausforderungen zu bewältigen sind (vgl. BMU 1997). Verdienst dieser Konferenz ist es, der seit 1987 durch die Brundtland-Kommission angestoßenen intensiven wissenschaftlichen Diskussion um nachhaltige Entwicklung eine breite Aufmerksamkeit sowohl in allen Gesellschaftsbereichen als auch bei politischen Entscheidungsträgern verschafft zu haben. In

Anlehnung an den Brundtlandbericht von 1987 gilt Nachhaltigkeit seither als zentrales Leitprinzip, um Armut, Umweltzerstörung, ungleiche Verteilung von Zugangsmöglichkeiten zu materiellen Ressourcen und andere aktuelle Probleme zu beseitigen. Die Grundidee war und ist bis heute geblieben, eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle sowie sozialverträgliche Entwicklung zu ermöglichen. Das in der Rio-Folgezeit weiterentwickelte Nachhaltigkeitsprinzip wird heute zur Lösung von Problemen in den verschiedensten Aufgabenbereichen herangezogen. Dabei kommt es vielfach zu einer individuellen, problemspezifischen Ausgestaltung des Nachhaltigkeitsbegriffes. Trotz der damit einhergehenden Verwässerung des Begriffes hat sich die inhaltliche Zielsetzung allerdings nicht mehr verändert.

Die meisten Wissenschaftler und Politiker erkennen die ethische Fundierung der Nachhaltigkeit an und bescheinigen einem „*richtig*“ verstandenen Nachhaltigkeitsansatz ein großes Potenzial, sachlich gerechtfertigte Leitlinien für eine verantwortungsvolle, zukunftsfähige Entwicklung zu bestimmen. Neben der Beachtung von inter- und intragenerativer Gerechtigkeit herrscht weitgehend Konsens darüber, dass das Konzept Nachhaltigkeit mindestens die drei Zieldimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales beinhaltet und teils um eine institutionell-politische Dimension zu ergänzen ist. In welchem Verhältnis die Dimensionen zueinander stehen bleibt allerdings umstritten. Folglich tragen die einzelnen Forschungsrichtungen mittels einer individuellen dimensionsabhängigen Akzentuierung von Belangen aus ihrer Perspektive zu immer neuen Begriffsbestimmungen bei, obwohl der normative Inhalt der Leitidee dimensionsübergreifend unterstützt wird. Gleichzeitig verlieren sich die jeweiligen Disziplinen in Detailaspekten der Begriffsklärung, weshalb das Zusammenführen der verschiedenen Dimensionen im Nachhaltigkeitsbegriff als Ursache für die entstandene Definitionsvielfalt gelten kann. Die kontinuierliche Erweiterung des Terminus auf verschiedenste Bereiche birgt jedoch Risiken und führt dazu, dass dieser an Bedeutung verliert. *„Für den Begriff Nachhaltigkeit besteht durch die Extension die Gefahr, zum bedeutungsarmen Jargon trivialisiert zu werden.“* (Egan-Krieger, Ott & Voget 2007, S. 11) Verstärkt wird dieser Bedeutungsverlust am Energiesektor durch die bereits skizzierten, partiell sehr gegensätzlichen Auslegungen des Leitprinzips, die nach wie vor sowohl die Frage der Definition, das konzeptionelle Grundverständnis als auch die konkrete praktisch-politische Umsetzung des Nachhaltigkeitsleitbildes umfassen.

Trotz dieser kontroversen Ansichten sind die Multidimensionalität sowie die systemische Betrachtung der gesellschaftlichen Entwicklung zentrale Stärken und Chancen der Nachhaltigkeitsdebatte. Ziel einer integrativen Forschung muss es sein, verschiedene Methoden anzuwenden, um über eine rein additive Verknüpfung einzelner Teilaspekte verschiedener Forschungsrichtungen hinaus eine Gesamtsicht der Erkenntnisse zu erhalten. Ein integrativer Ansatz erweist sich als hilfreich, da die meisten sozialen Grundgüter, was den Aspekt ihrer Nutzung betrifft, nicht eindeutig einer einzelnen Nachhaltigkeitsdimension zuzurechnen sind, sondern mehreren

Dimensionen zugleich angehören (vgl. Kopfmüller et al. 2001, S. 119ff.). Dies gilt in besonderer Weise für den Energiebereich.

Obwohl sich das Wort Nachhaltigkeit im Allgemeinen wie im wissenschaftlichen Sprachgebrauch vollständig etabliert hat, spricht Wiegand (2007, S. 10) davon, dass *„nachhaltiges Handeln trotz zahlreicher Bemühungen noch nicht zur Realität geworden (ist), zu der es werden kann, ja werden muss“*. Hauff (2003, S. 5) bezeichnet Nachhaltigkeit als ein *„geduldetes, aber nicht wirklich akzeptiertes Thema.“* Beide Autoren bringen damit das Dilemma der Nachhaltigkeit zum Ausdruck: Einerseits sind wissenschaftlich fundierte Theorien und viel versprechende Lösungsansätze ausgearbeitet, um ökonomische, ökologische und soziale Herausforderungen erfolgreich zu bewältigen. Andererseits bereitet eine praktikable Verknüpfung dieser drei Bereiche höchste Schwierigkeit (vgl. Geiß 2006, S. 1).

Wegen der vielfältigen perspektivischen Zugangsmöglichkeiten zum Leitbild Nachhaltigkeit ist somit auch zukünftig keine konkrete, allgemein anerkannte Definition zu erwarten. Es stellt sich deshalb die Frage, ob es überhaupt noch notwendig ist, eine allseits verbindliche Definition zu suchen, um handlungsfähig zu werden. Trotz zahlreicher verbleibender Ungewissheiten konstatiert Hennicke (2003, S. 9), dass grundsätzlich genug Wissen über Ziele und Inhalte von Nachhaltigkeit vorhanden ist, um auf vielen Feldern (z.B. beim Klimaschutz) richtungssicher zu handeln. Damit die Inhalte von Nachhaltigkeit am Energiesektor umgesetzt werden können, wird gerade die Debatte um das *„richtige Handeln“*, also den Schlussfolgerungen aus dem Leitbild, künftig ein verschärftes Streitthema der Umwelt-, Sozial- und Wirtschaftspolitik sein. Weil die Nachhaltigkeitsforschung bewusst Problem- und Kontextbezüge z.B. zur Energiethematik aufbaut, gelingt es hierbei wirklichkeitsrelevantes Wissen zu erzeugen (vgl. Schäfer 2008, S. 23). Im Verständnis, dass diesen praxisorientierten Ansätzen größere Bedeutung beizumessen ist, leisten die Wissenschaften dann einen wertvollen Beitrag, wenn nicht mehr allein die Definitionsfrage, sondern die Frage nach praktikablen Umsetzungsstrategien im Mittelpunkt steht. So benennen Krewitt et al. (2007, S. 31) die wesentlichen Aufgaben einer zukünftigen Nachhaltigkeitsforschung und Technologiepolitik im Energiebereich als eine problemorientierte Interdisziplinarität, eine Verknüpfung von grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung sowie die Orientierung an gesellschaftlichen Bedürfnissen. Zukünftig muss sich folglich das Hauptaugenmerk von Wissenschaft und Forschung verstärkt auf die konkrete Umsetzung von Nachhaltigkeit in einer Gesellschaft konzentrieren. Demzufolge besitzen Problemlösungskompetenz und Praxisorientierung bei der Realisierung von Nachhaltigkeit höchste Priorität.

Obwohl dieser Sachverhalt mit der vorliegenden Forschungsarbeit aufgegriffen wird, bleibt eine zentrale Definition mit grundlegenden Zielvorgaben notwendig, um eine praktikable Strategie zur

Erreichung einer nachhaltigen Entwicklung am Energiesektor konzipieren zu können. Nachhaltigkeit wird im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung als kein starres Konzept verstanden, das einmal universell entworfen wird, um dann für sämtliche Lebensbereiche Lösungskonzepte bereitzuhalten. Vielmehr handelt es sich um ein langfristiges, dynamisches und flexibles Konzept, welches mit Veränderungen der Umwelt und der Gesellschaft gleichermaßen weiterentwickelt werden kann und muss. Die Operationalisierung verlangt den Begriff für den Einzelfall (Energie) neu zu definieren, wobei die Definitionsfrage von der Operationalisierung getrennt bleibt und dem Operationalisierungsproblem vorgelagert ist. Ohne eine klar umrissene themen- und problemorientierte Definition, aus der sich konkrete ökologische, ökonomische und soziale Ziele ableiten lassen, ist sowohl eine Bestimmung von Handlungsempfehlungen als auch eine praktische Umsetzung von nachhaltiger Entwicklung im Energiebereich nicht möglich. Die Forschungsarbeit entwickelt deshalb eine Zieldefinition für den Energiesektor, welche die übergeordnete Intention zum Ausdruck bringt und gleichzeitig Orientierung für ein praktikables Konzept zur Entwicklung regionaler nachhaltiger Energieversorgungsstrukturen gibt.

IV Raum für Energie: Das Konzept doppelter Nachhaltigkeit

Die aufgezeigten historischen und aktuellen Nachhaltigkeitsströmungen mit ihren konfligierenden Zielsetzungen machen ersichtlich, wie bedeutsam es ist, nachhaltige Entwicklung bzw. Nachhaltigkeit für das jeweilige Problemfeld konzeptionell genauer zu bestimmen, sowie Voraussetzungen für eine praktische Umsetzung zu benennen. Einigkeit besteht darüber, dass Nachhaltigkeit insbesondere für die zukünftige Energieversorgung ein enormes Potenzial beinhaltet, da dieses Thema – wie wohl kein anderes Problemfeld – sämtliche Nachhaltigkeitsdimensionen umfasst. Dementsprechend liegen bereits verschiedene Ansätze zur Konkretisierung von Nachhaltigkeit am Energiesektor vor, die sich in unterschiedlichen Definitionen ausdrücken.

1. Definitionen von nachhaltiger Energieversorgung

In den vergangenen Jahren wurden sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene zahlreiche Anhaltspunkte zur Ausgestaltung einer nachhaltigen Energieversorgung formuliert, wobei sich die erforderliche Betrachtung verschiedener Nachhaltigkeitsdimensionen in unterschiedlichen Strategien und Definitionen manifestiert hat. Die folgenden Ausführungen beziehen sich aufgrund der regionalen Auslegung der Forschungsarbeit primär auf die Entwicklungen in Deutschland mit einer dementsprechenden Literaturlauswahl.

Eichelbrönnner und Henssen (1998, S. 496) beschreiben in auffälliger Anlehnung an die Aspekte der inter- und intragenerativen Gerechtigkeit aus der Basisdefinition des Brundtlandberichts eine nachhaltige Energieversorgung wie folgt: *„Energie soll ausreichend und – nach menschlichen Maßstäben – lang andauernd so bereitgestellt werden, dass möglichst alle Menschen jetzt und in Zukunft die Chance für ein menschenwürdiges Leben haben, und in die Wandlungsprozesse nicht rückführbare Stoffe sollen so deponiert werden, dass die Lebensgrundlagen der Menschen jetzt und zukünftig nicht zerstört werden.“* Die Definition nennt zwar Kriterien, was eine zukünftige Energieversorgung leisten soll, insbesondere Verteilungsgerechtigkeit innerhalb der heutigen Generation aber auch zwischen der heutigen und den künftigen Generationen, lässt allerdings offen, wie diese Ziele und damit Nachhaltigkeit am Energiesektor erreichbar sind. Obwohl damit greifbare Aussagen zu möglichen Technologien, angestrebten Versorgungsstrukturen oder konkreten Handlungskonzepten zur praktischen Umsetzung fehlen, gibt die genannte Definition eine Orientierungshilfe zur weiteren Konkretisierung des Leitbildes. Dies geschieht indem zentrale Probleme der Energieversorgung aufgegriffen und definitorisch berücksichtigt werden. Ein Ansatz von Enzensberger, Wietschel und Renz (2001, S. 127) beschreibt die Energieversorgung demnach als nachhaltig, wenn sie *„die Bedürfnisse der Gegenwart hinsichtlich zeitlich und räumlich bedarfsgerecht*

*bereitgestellten Energiedienstleistungen unter Beachtung einer begrenzten Belastbarkeit der Natur, begrenzter Ressourcen und der zentralen Bedeutung der Energieversorgung für ein wirtschaftliches Wachstum und sozialen Wohlstand zu befriedigen vermag.*¹⁷ Hier werden die Nachhaltigkeitsdimensionen sowohl angesprochen als auch integriert, wodurch parallel zur allgemeinen Nachhaltigkeitsdebatte die Multidimensionalität am Energiemarkt akzeptiert wird. Damit tritt allerdings auch der Streit um die Priorisierung der einzelnen Dimensionen in den Vordergrund, was vor allem den Zwiespalt zwischen Ökonomie und Ökologie betrifft und bereits in den Kapiteln III 2.2.1 bis 2.2.3 zur Nachhaltigkeit im Allgemeinen thematisiert wurde. So kommt der ökologischen Dimension und dem Erhalt der natürlichen Lebensgrundlage für die Menschheit wegen der Tatsache, dass praktisch alle Nachhaltigkeitsanalysen unabhängig von ihrer Gewichtung der ökologischen, ökonomischen und sozialen Dimension im Hinblick auf den Umgang mit der Natur auf dieselben Regeln zurückgreifen, auch für den Energiebereich eine vorrangige Bedeutung zu (vgl. hierzu Fishedick & Nitsch 2002, S. 5). Dem ökologisch geprägten Nachhaltigkeitsverständnis am Energiesektor, dem sich auch zahlreiche NGOs verpflichtet fühlen, stehen ökonomisch dominierte und oftmals politisch favorisierte Ansätze diametral gegenüber. Beispielhaft sei auf Grill (2004, S. 219) verwiesen, der die Wirtschaftlichkeit der Energieversorgung als die „*elementare Voraussetzung für das Erreichen der beiden übrigen Nachhaltigkeitsdimensionen*“ ansieht. Befürchtungen, die drohende Klimaerwärmung könnte Ökosysteme langfristig schädigen und somit die menschliche Entwicklung behindern, haben allerdings in jüngster Vergangenheit die Befürworter einer ökologisch geprägten Nachhaltigkeit sowohl im politischen Einfluss als auch in der gesellschaftlichen Diskussion um eine nachhaltige Energieversorgung gestärkt.

Der Streit um eine wirksame Strategie zur Eindämmung des Klimawandels wird begleitet von der Suche nach modernen Energietechnologien, die dazu einen signifikanten Beitrag leisten können. Damit richtet sich das Augenmerk der Nachhaltigkeitsforschung am Energiesektor zunehmend auf die Technologie der jeweiligen Energiebereitstellung und -nutzung. Die Energiebereitstellung ist demnach nachhaltig, „*wenn sie auf einer ausreichenden und dauerhaften Verfügbarkeit von geeigneten Energieressourcen basiert und zugleich die negativen Auswirkungen von Energiebereitstellung, -transport und -nutzung begrenzt.*“ (vgl. Krewitt et al. 2007, S. 27) Neben dem Einsatz geeigneter Technologien nennt diese Definition die Begrenzung negativer Auswirkungen als zweites wesentliches Kriterium, woraus sich ableiten lässt, dass beide Forderungen Kernpunkte einer nachhaltigen Entwicklung im Energiebereich darstellen. Obschon die Definition sowohl bezüglich der geeigneten Energieressourcen als auch der Begrenzung negativer Umweltauswirkungen vage bleibt, wird deren konzeptuelle Idee aufgegriffen und für die vorliegende Arbeit weitergedacht.

¹⁷ Mit ähnlichem Wortlaut wurde diese Definition nochmals bei Wietschel, Enzensberger, Dreher (2002, S. 9) erwähnt. Das Nachhaltigkeitskonzept, aus dem die angeführte Definition stammt, entspricht weitgehend dem Konzept kritischer Bestandsniveaus (vgl. Enzensberger, Wietschel, Rentz 2001, S. 127f.)

Aufbauend auf diesen Definitionen existiert heute ein umfangreicher Fundus an benannten Attributen, die mit einer nachhaltigen Energieversorgung in Verbindung gebracht werden. Sie sind in der Literatur teils unterschiedlich betitelt und gelegentlich auch unterschiedlich gewichtet, lassen sich aber auf folgende Hauptkriterien zusammenfassen:¹⁸

- eine ökologisch möglichst verträgliche und das Klima schonende Energienutzung (Schutz von Flüssen, der Meere und der Atmosphäre)
- ein weitestgehend achtsamer Umgang mit Energieressourcen
- eine rationelle Energienutzung, Effizienzsteigerung und Energieeinsparung
- eine langfristig sichere und jederzeit zuverlässige Versorgung
- eine gesundheitsverträgliche und risikoarme Versorgung
- eine sozialverträgliche Energieerzeugung
- eine kostengünstige und wettbewerbsfähige bzw. wirtschaftlich tragfähige und bezahlbare Energiebereitstellung
- eine zunehmend dezentrale und großräumig vernetzte Energieversorgung
- eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Energieträger und neue Energietechnologien (z.B. Speichermedien)
- Zugang für alle Menschen zu moderner Energie
- demokratische und partizipative Teilhabe bei der Gestaltung einer Energieversorgung

Obwohl die zitierten Definitionen wie auch die aufgezählten Eigenschaften einer nachhaltigen Energieversorgung hinreichend bekannt sind, bleibt eine Realisierung nachhaltiger Strukturen häufig schwierig. Grund hierfür ist die enorme Bandbreite an Eigenschaften, welche für eine nachhaltige Energieversorgung vorausgesetzt werden. Die Wissenschaft muss daher politischen und wirtschaftlichen Akteuren sowie der Gesellschaft Hilfestellungen anbieten, die komplexen Sachverhalte im Energiebereich zugänglich machen und einen Weg aufzeigen, wie eine nachhaltige Transformation der Energiebereitstellung zu gestalten ist. Dazu wird die Definition von Krewitt et al. (2007) aufgegriffen und zu einer Zieldefinition ausgearbeitet, mit der die Entwicklung einer Strategie zur räumlichen Implementierung nachhaltiger Versorgungsstrukturen möglich wird.

¹⁸ Die Attribute einer nachhaltigen Energieversorgung entstammen den Quellen: Eichlbrönnner & Henssen (1998, S. 496), Enzensberger, Wietschel, Rentz (2001, S. 128f.), Kopfmüller et al. (2000, S. 15ff.), Fishedick & Nitsch (2002, S. 9ff.), WBGU (2003, S. 3 und 114ff.), Haas & Scharrer (2005b, S. 433ff.), Streffer et al. (2005, S. 10ff.), Kempf & Müller (2006, S. 27ff. und 2007, S. 5ff.), Miehlung (2006, S. 30ff.), Tischer et al. (2006, S. 27), Rogall (2008, S. 9ff.), Henniscke & Bodach (2010, S. 52ff. und 134ff.) und SRU (2011, S. 26ff.). Die angegebenen Literaturstellen setzen zum Teil unterschiedliche Schwerpunkte bezüglich der Eigenschaften einer nachhaltigen Energieversorgung. Dies ist durch eine variierende Gewichtung einzelner Dimensionen bzw. einer angesprochenen Gleichgewichtung erkennbar. Das breite Spektrum an Eigenschaften soll das Spannungsfeld zwischen den Nachhaltigkeitsdimensionen und der integrativen Energiethematik verdeutlichen.

2. Konzept doppelter Nachhaltigkeit

2.1 Zieldefinition

Nachhaltigkeit ist aufgrund ihrer Anwendung auf verschiedene Themen und ihrer verschiedenen theoretischen Zugangsweisen nicht einheitlich definierbar. Das Konzept doppelter Nachhaltigkeit bezieht sich deshalb explizit auf den Energiesektor und dient der Erörterung einer nachhaltigen regionalen Energieversorgung. Wegen jener Fokussierung auf den Energiesektor beansprucht die hier gewonnene Definition weder eine allgemeine Gültigkeit, noch ist es ihr vorrangiges Ziel, die Begriffsvielfalt um eine zusätzliche universelle Nachhaltigkeitsdefinition zu erweitern. Es stehen ausschließlich die Aspekte zur Gestaltung und Implementierung einer nachhaltigen Energieversorgung im Mittelpunkt. Die Zieldefinition, welche bewusst an den Anfang der Konzeptbeschreibung gestellt wird, orientiert sich an den Vorgaben von Krewitt et al. (2007) und entwickelt den zweiseitigen Ansatz von Technologieauswahl und Technologieeinsatz weiter. Mit Hilfe der Definition erfolgt anschließend sowohl die Konkretisierung von Nachhaltigkeit am Energiesektor als auch die Klärung der methodischen Vorgehensweise. Die Zieldefinition lautet wie folgt:

Ziel einer nachhaltigen Energieversorgung ist es, den Energiebedarf einer Region langfristig, sozial- und umweltverträglich sowie ökonomisch rentabel mit nachhaltigen Energietechnologien bereit zu stellen.

Die Definition verfolgt in allen Teilaspekten konsequent die Leitidee einer nachhaltigen Entwicklung bzw. nachhaltigen Energieversorgung. So nennt die Zieldefinition die Dimensionen der Nachhaltigkeit (sozialverträglich, umweltverträglich, ökonomisch rentabel) gleichfalls zum Begriff Nachhaltigkeit (nachhaltige Energietechnologien). Die doppelte Erwähnung von Nachhaltigkeit wird nicht als Redundanz verstanden, sondern spiegelt bereits den konzeptionellen Aufbau der Arbeit sowie die Strategie der Implementierung einer nachhaltigen Energieversorgung in einer Region wider. Der Aufbau artikuliert sich mit der Forderung, dass sowohl die Dimensionen als auch die nachhaltigen Energietechnologien separat zu betrachten sind, was bei Krewitt et al. (2007) der geeigneten Energieressourcen und der Vermeidung negativer Auswirkungen entspricht.

Die Arbeit nimmt darüber hinaus eine auf den Raum fokussierte Betrachtung ein, indem die Region als wesentliche Grundlage für die Ausgestaltung und Umsetzung von Nachhaltigkeit am Energiesektor in die Definition integriert wird. Der Regionsbezug bildet die „Klammer“ für die Entscheidungsfindung und gewährleistet, eine sachlich fundierte, überschaubare und logisch

strukturierte Vorgehensweise. Dabei ist das Untersuchungsgebiet in der Zielformulierung mit „Region“ ausdrücklich weit gefasst. Die Eigenschaft der gewählten Region, deren Größe und Abgrenzung sind für die Definition und das daraus abgeleitete Handlungskonzept unerheblich. Damit eignet sich das entwickelte Konzept zur Anwendung auf unterschiedlichste Räume, Regionen und Maßstabsebenen¹⁹, weshalb es auf beliebige Räume übertragen werden kann. Raum wird dabei definiert als Ausschnitt aus der Erdoberfläche, welcher sämtliche sozio-kulturellen, sozio-ökonomischen, sozio-ökologischen und natürlichen Ausstattungen inkludiert. Das modellierte Energiesystem weist wegen der raumbedingt verschiedenen potenziell möglichen Energietechnologien, den unterschiedlichen raumrelevanten Strukturen und dem jeweiligen Energiekonsum einen individuellen Charakter und Bezug zum Raum auf (vgl. hierzu Brücher 2009, S. 15ff.). Folglich ist das nachhaltige Energiesystem wesentlich durch die jeweilige physisch-natürliche und kulturelle Raumausstattung der Region sowie die Wertvorstellungen und Lebensgewohnheiten der darin lebenden Menschen determiniert, was bei der Anwendung des vorgestellten Konzeptes auf verschiedene Untersuchungsräume zu mannigfachen Erscheinungsformen einer optimalen bzw. nachhaltigen Energieinfrastruktur führen kann.

Die Definition bezieht sich weder auf das Konzept der starken noch der schwachen Nachhaltigkeit, da sich beide Konzepte am Energiesektor nicht bewährt haben. Das Leitbild liefert vielmehr konkrete Vorgaben für den Energiesektor, in dem es Kriterien für die Energieformen und Kriterien für deren Standorte vorgibt. Obwohl sich diese Vorgaben aus der Nachhaltigkeit begründen, ist das Ergebnis kein starr feststehendes Konstrukt sondern variabel und kann sich einem dynamischen Prozess der gesellschaftlichen und technologischen Entwicklung anpassen. Diesem Umstand tragen die sehr offen formulierten Begriffe „Energiebedarf“ und „nachhaltige Energietechnologien“ Rechnung. Sowohl der Energiebedarf wie auch die nachhaltigen Energietechnologien können bzw. müssen sich im Zeitablauf durch neue Konsummuster, neue Technologien oder technologische Verbesserungen verändern. Diese Veränderungen können wegen der Offenheit der Zieldefinition flexibel im Modellablauf beachtet werden, indem das Konzept zeitlich versetzt immer wieder angewendet wird. Damit erfolgt eine Anpassung an veränderte Umwelt- und Gesellschaftseinflüsse, ohne die übergeordnete Intention einer nachhaltigen Energieversorgung in Frage zu stellen. Die Definition fordert auf diese Weise die ständige Orientierung an aktuellen Entwicklungen im Bereich des technologischen Fortschrittes, der Effizienz und der Suffizienz.

¹⁹ Aufgrund von Skaleneffekten bei der Datenverfügbarkeit und -qualität ist dieser Sachverhalt nur mit Einschränkung gültig.

2.2 Abgeleitetes Handlungskonzept zum Aufbau einer regionalen nachhaltigen

Energieversorgung

Die Ausgestaltung einer regionsspezifisch nachhaltigen Energieversorgung wird als strategische Aufgabe verstanden, die auf einem zuvor bestimmten Handlungskonzept basiert (vgl. Tischer et al. 2006, S. 17). Dabei spiegelt das entwickelte Handlungsschema die Vorgaben der Zieldefinition wieder und setzt die konzeptionelle Idee um. Es ist der Wegweiser für den Prozess zur Implementierung nachhaltiger Energien in einer Region und differenziert die Forschungsarbeit in zwei große Bereiche:

1. Technologiebewertung

Da zum einen die regionale Betrachtung ungleiche Energiepotenziale ausweist und zum anderen das Leitbild einer zukunftsfähigen Energieversorgung sowie die darin enthaltenen Präferenzen aus einer gesellschaftlichen Debatte resultieren, können ganz unterschiedliche Technologieoptionen favorisiert werden (vgl. Hake & Eich 2005, S. 11). Für die jeweils betrachtete Region sind die Energietechnologien zu wählen, die hinsichtlich der erforderlichen global und lokal wirksamen Rahmenbedingungen eine optimierte Energieversorgung ermöglichen (vgl. Heimann 2001, S. 14). Ziel ist es, aus dem breiten Technologiefundus diejenigen Energietechnologien zu identifizieren, die den höchsten Beitrag zur Erreichung von Nachhaltigkeit leisten. Um nun aus der großen Bandbreite an aktuell zur Verfügung stehender Energietechnologien eine Auswahl an nachhaltigen Optionen treffen zu können, müssen vorab wissenschaftlich fundierte und transparente Kriterien bzw. Anforderungen postuliert werden. Sie resultieren aus den normativen Grundelementen der Nachhaltigkeit, definieren was eine nachhaltige Energieform zu erfüllen hat und bilden damit den Korridor der Technologiebewertung. Das Bewertungsmodell selbst besteht aus verschiedenen Indikatoren, die den Kriterien zugewiesen sind und deren Quantifizierung es erlaubt, einen Vergleich der Technologien durchzuführen. Dabei wird keine Technologie alle Kriterien und Ziele einer nachhaltigen Energieversorgung gleichermaßen gut erfüllen können (vgl. SRU 2011, S. 15), d.h. die Eine universelle nachhaltige Energietechnologie wird es nicht geben. Die Bewertung lässt folglich nur Aussagen zu, ob eine Technologie die Ansprüche der Nachhaltigkeit in einer Region, unter Beachtung gewisser Mindestanforderungen, besser oder schlechter erfüllt als eine andere. Diejenigen Energietechnologien, die im gegebenen räumlichen Kontext die Nachhaltigkeitskriterien am besten erfüllen, bilden die Bausteine der künftigen Energieversorgung. Die erzielte Rangfolge von Energieformen gibt so die Reihenfolge der im Anschluss folgenden Standortmodellierung vor.

2. Potenzial- und Standortmodellierung

Die unter Punkt eins identifizierten nachhaltigen Energietechnologien sollen anschließend für die Energieversorgung einer Gesellschaft zum Einsatz kommen. Dazu wird eine Standortmodellierung entwickelt, die eine vollständige Versorgung einer Region mit Energie (energieautarke Region) zum Ziel hat. Der Potenzial- und Standortmodellierung selbst liegt wiederum das Leitprinzip der Nachhaltigkeit aus der Zieldefinition zu Grunde. Dieses Vorgehen trägt dem Problem Rechnung, dass ein Energiesystem bestehend aus nachhaltigen Energietechnologien nicht zwingend dem Nachhaltigkeitsleitbild entspricht. Ein plakatives Beispiel dazu zeigt die Diskrepanz zwischen Punkt eins (Technologieauswahl) und zwei (Technologieeinsatz): angenommen, die Energietechnologie Laufwasserkraftwerk stellt sich in der ersten Analyse als nachhaltige Energieversorgung heraus, bedeutet dies jedoch noch nicht, dass diese Technologie in räumlicher Perspektive überall dem Nachhaltigkeitspostulat genügt. So könnte in sehr dicht besiedelten Gebieten eine notwendige Aufstauung des Wassers gravierende soziale Beeinträchtigungen wie z.B. Umsiedlungen wegen Überstauung von Siedlungsflächen zur Folge haben. Umsiedlungen von Menschen wiederum sind mit dem normativen Leitgedanken der intragenerativen Gerechtigkeit und damit der Nachhaltigkeit kaum vereinbar. Ebenso sind negative ökologische Folgen zu begrenzen (bzw. zu vermeiden) und ein ökonomisch rentabler Betrieb anzustreben. Deshalb muss es Ziel der räumlichen Implementierung sein, die ohnehin bereits nachhaltigen Energietechnologien (Schritt eins) so sozialverträglich, umweltschonend und ökonomisch rentabel wie möglich in einer Region zu planen (siehe Zieldefinition). Aus dieser Forderung abgeleitet erscheint ein Ansatz nötig, der die Nachhaltigkeitsdimensionen in den Mittelpunkt rückt und damit Orientierung gibt, um eine standortoptimierte nachhaltige Energieversorgung mit Hilfe von analytischen Kartographiemethoden, gestützt auf Geographische Informationssysteme, zu modellieren.

Sowohl die Auswahl an geeigneten Energietechnologien als auch deren Modellierung im regionalen Kontext sind separate Handlungsschritte mit jeweils eigenem Bezug zur Nachhaltigkeit und bauen in der genannten Reihenfolge aufeinander auf. Abbildung 2 zeigt den schematischen Konzeptaufbau der Modellierung, den Einfluss der Nachhaltigkeit sowohl auf die Technologiebewertung als auch auf die Potenzial- und Standortsuche, die Trennung der beiden Handlungsschritte und den chronologischen Ablauf. Der erste Teil befasst sich mit der Identifikation von nachhaltigen Energietechnologien, für welche im zweiten Teil der Arbeit integrierte bzw. technologieübergreifende Standortmodellierungen durchgeführt werden. Beide Teile zusammen bilden den zentralen Kern der doppelten Nachhaltigkeit und somit der Handlungsstrategie zur Erreichung einer nachhaltigen Energieversorgung. Die verbindende Komponente ist der Untersuchungsraum. Er nimmt die Rolle einer determinierenden Größe ein, indem er die Vorgaben der Nachhaltigkeit

(Kriterien, Indikatoren und Standortkriterien) mit entsprechenden Inhalten füllt, wodurch das Energieversorgungssystem den spezifischen Bezug zum Raum erhält. Wie bereits erwähnt sind dabei nicht nur die nachhaltigen Energietechnologien sondern auch das modellierte Standortmuster von den spezifischen physisch-natürlichen und sozio-kulturellen Eigenschaften und Prozesse der jeweiligen Untersuchungsregion in entscheidender Weise abhängig.

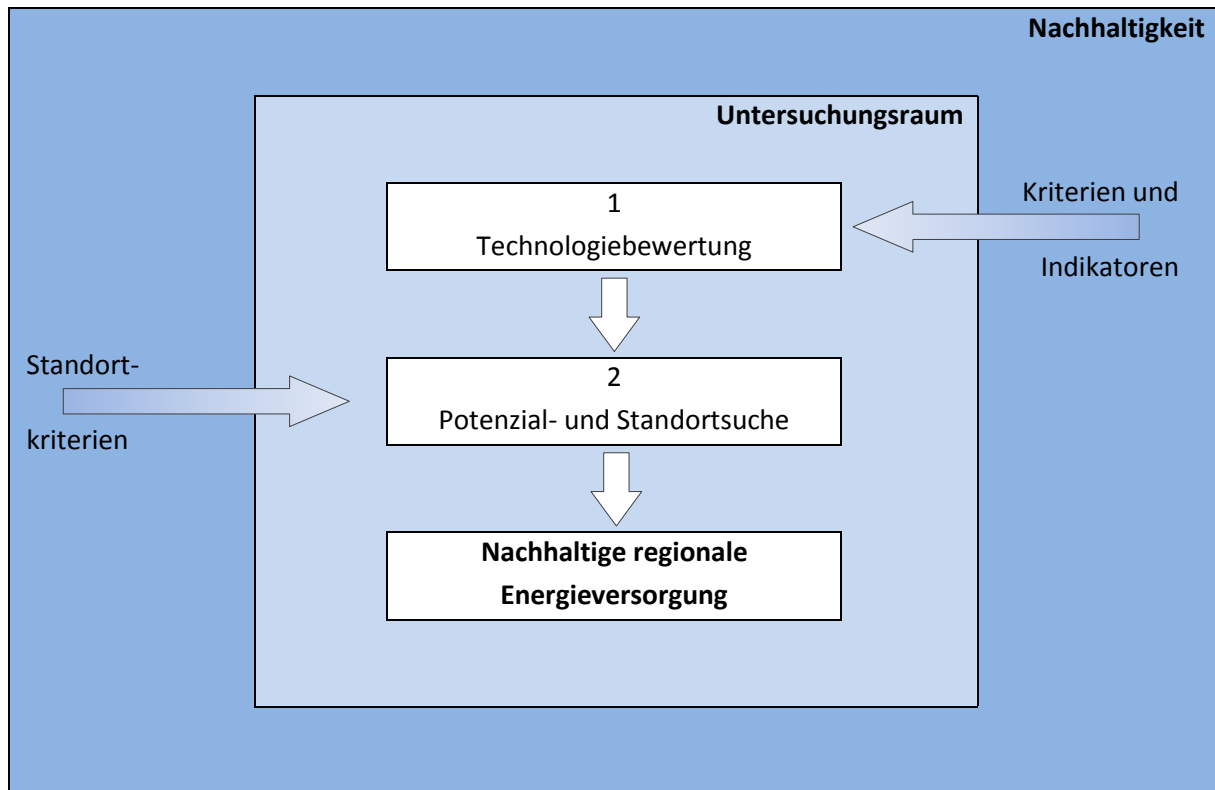


Abb. 2: Konzeptaufbau doppelter Nachhaltigkeit

Die Vorgehensweise der separaten Technikbewertung, wie im ersten Handlungsschritt vorgeschlagen, kann wegen der getrennten Untersuchung der Technologieoptionen kritisch hinterfragt werden (vgl. hierzu Enzensberger, Wietschel & Rentz 2001, S. 129f.) Die angenommene Unabhängigkeit ist demzufolge in der Realität nicht anzutreffen, da ein Energieversorgungssystem verschiedene Anforderungen wie zum Beispiel die Abdeckung aller Lastbereiche oder die Gewährung permanenter Versorgungssicherheit erfüllen muss und eine einzelne Technologie dies nicht bewerkstelligen kann. In der Tat besitzt eine einzige Energieform nur in den seltensten Fällen sämtliche Eigenschaften, um die komplexen Anforderungen einer Energieversorgung zu erfüllen. Die somit berechtigte Kritik der individuellen Technikbewertung wird allerdings im Konzept der doppelten Nachhaltigkeit abgeschwächt, da genau dieses Problem der Einzelbewertung im zweiten Handlungsschritt aufgegriffen wird, in dem alle in Frage kommenden Energietechnologien aus Schritt eins in Kombination zur Versorgung einer Region modelliert werden. Zudem existiert mit dem kommunikativ vernetzten, sog. virtuellen Kraftwerk die Möglichkeit, auch Techniken zu kombinieren, die in ihrer Stromproduktion starke Variationen aufweisen und alleine für eine Abdeckung der

Lastbereiche und folglich einer sicheren Energieversorgung nicht in Betracht kommen würden. Zu nennen sind z.B. die Photovoltaik oder Windkraft. Neue Speichermedien erleichtern zudem die Integrationsmöglichkeit derartiger Technologien in bestehende Strukturen.

Des Weiteren gibt es allgemeine Kritik an der Bewertung von Energietechnologien unter dem Nachhaltigkeitsaspekt. Nachhaltigkeit wird dabei als Endzustand im Gleichgewicht zwischen Mensch und Natur gesehen und ist physikalisch exakt definiert (vgl. Bossel 2010, S. 26). Damit ist ein Nachhaltigkeitsdefizit (z.B. hoher Materialverbrauch) nicht durch einen Vorteil in einem anderen Bereich (z.B. geringe CO₂-Emissionen) zu kompensieren. Folglich dürfen die Indikatoren nicht als *„Basis für eine nach Nachhaltigkeit strebende Energiepolitik verwendet werden.“* (Bossel 2010, S. 27) Trotz dieser Kritik, die sich noch auf die Auswahl der Kriterien und Indikatoren erweitern lässt (vgl. hierzu Kap. V 1.5), haben sich Kriterien und Indikatoren in der Anwendung bewährt und geben wertvolle Orientierung bei der Gestaltung künftiger Energieversorgungsstrukturen.

Ergebnis des Konzeptes doppelter Nachhaltigkeit ist der flächendeckende Ausweis bzw. die kartographische Visualisierung von Energiepotenzialen mit Standorten für Produktionsstätten. Obwohl mit der Modellierung eine hohe räumliche Auflösung angestrebt wird, sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Modellierung eine konkrete Standortplanung einzelner Energieanlagen für Investoren oder Betreiber, aufgrund vielfältiger individueller Gegebenheiten bei Infrastrukturmaßnahmen nicht ersetzt. Erst bei der Anwendung auf sehr kleine Räume, z.B. auf kommunaler Ebene, sind hierzu Aussagen möglich. Die Realisierung jeglicher Anlagen bedarf jedoch stets einer rechtlichen und bautechnischen Feinplanung. Im Konzept doppelter Nachhaltigkeit geht es in erster Linie um die Ausarbeitung einer Gesamtstrategie zur Versorgung einer Region (z.B. eines oder mehrerer Landkreises/e) mit Energie. Dazu werden die einzelnen Technologien wie beschrieben am Beginn zwar einzeln bewertet und anschließend in der Modellierung individuell analysiert, die gewonnenen Teilergebnisse dann jedoch zu einer Gesamtsicht, d.h. zu einer sinnvollen Versorgungsstruktur für die Region ausgearbeitet, die konkrete Standorte nur andeutet. Dennoch können so Zusammenhänge sowohl zwischen den Technologien als auch in Bezug auf den Raum gewonnen und kartographisch sichtbar gemacht werden. Zusätzlich ermöglicht eine Bilanzierung von regionalen Energiepotenzialen und regionalem Energieverbrauch die Erörterung energieautarker Räume, die sich selbstständig und zuverlässig mit Energie versorgen können.

Gerade auf kommunaler und regionaler Maßstabebene besitzt die kartographische Aufbereitung der vorhandenen Energiepotenziale bzw. sich potenziell selbst versorgender Regionen eine herausragende Funktion. Sie *„rücken die in der Bevölkerung tief verankerten diffusen und oftmals verzerrten Vorstellungen über Grenzen und Möglichkeiten Erneuerbarer Energien gerade und können dadurch zu mehr Sachlichkeit in den kontrovers geführten Diskussionen zwischen Befürwortern und*

Gegnern regenerativer Technologien beitragen.“ (Bosch & Peyke 2009, S. 45) Der kartographische Mehrwert ist ebenso bei der Planung fossiler Kraftwerke, großer Energiespeicher (Pumpspeicherkraftwerke) oder Stromleitungen zu erwähnen, um Informationen anschaulich zu visualisieren. Die räumliche Modellierung mit anschließender graphischer Ergebnispräsentation ist somit ein vorzügliches Hilfsmittel zur Ermittlung von Energiepotenzialen und begünstigt zudem die Kommunikation mit Bürgern, Investoren und Entscheidungsträgern.

2.3 Akteure im Gestaltungsprozess einer nachhaltigen Energieversorgung

Über die Frage, wie eine gesellschaftliche Einigung zum Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung mit den entsprechenden Vorgaben erfolgen soll, gibt es kontroverse Ansichten (vgl. hierzu Baranek et al. 2005, S. 16). Einerseits erfordert das Fehlen einer übergeordneten Instanz, welche die Legitimität und Durchsetzungskraft besitzt, einen nachhaltigen Entwicklungspfad zu determinieren, die Beteiligung von möglichst vielen Anspruchsgruppen an den Willensbildungs-, Entscheidungs- und Umsetzungsprozessen (vgl. Amelung et al. 2008, S. 9), andererseits wird davon ausgegangen, dass sich Kriterien und Ziele einer nachhaltigen Entwicklung aus übergeordneten allgemein anerkannten Leitbildvorgaben deduktiv ableiten lassen. In dieser Arbeit werden mit Orientierung an bestehenden Nachhaltigkeitskonzeptionen und einer problemorientierten Betrachtung des Energiesektors zwar Kriterien und Indikatoren vorgegeben, doch soll verschiedenen Akteuren auch die Möglichkeit eingeräumt werden, sich an der Gestaltung einer nachhaltigen Energieinfrastruktur beteiligen zu können.

Im Konzept doppelter Nachhaltigkeit wird es folglich als wesentlich angesehen, bei der Ausarbeitung einer nachhaltigen Energiestrategie die individuellen Interessen verschiedener Akteure im Planungsprozess zu berücksichtigen, um gesellschaftlich konsensfähige Lösungen zu erzielen und damit dem Prädikat Nachhaltigkeit gerecht zu werden. Die Vorgabe durch einen Akteur bzw. einer zentralen Stelle würde einerseits einen enormen Informationsbedarf benötigen, welcher kaum zu bewerkstelligen wäre und andererseits stets nur subjektive bzw. akteurspezifische Ergebnisse hervorbringen. Dies gewährt allerdings nicht zwingend die Voraussetzung einer nachhaltigen Energieversorgung, da aufgrund rationaler Wertvorstellung der Akteure eher subjektive Präferenzen dominieren.

Dieser Sachverhalt manifestiert sich im Energiebereich wiederum in den beiden Bereichen der Technologie- und Standortwahl. Bei ersterem ist im Besonderen der gesellschaftliche und politische Streit über die Nutzung der Atomenergie zu nennen, kritisch diskutiert wird aber auch der weitere Einsatz der Kohlekraft. Bei der Standortwahl hat der vermehrte Einsatz dezentraler Energieformen wie Windenergie und Photovoltaik in den letzten Jahren zu heftigen gesellschaftlichen Konflikten um

Standorte geführt. Indiz dafür sind Interessensverbände gegen Windkraftanlagen, die sich in zahlreichen Regionen gebildet haben (vgl. z.B. Windkraftgegner 2011) und zeigen, welche bedeutende Rolle die Gesellschaft bei der Transformation am Energiesektor und der Markterschließung neuer (erneuerbarer) Energietechnologien einnimmt. Alleine auf wissenschaftlich-objektiven Kriterien basierende Strategien und Handlungsempfehlungen zur Implementierung nachhaltiger Versorgungsstrukturen im Energiesektor kann es folglich nicht geben (vgl. hierzu Wietschel, Enzensberger & Dreher 2002, S. 5). Das Konzept doppelter Nachhaltigkeit sieht deshalb eine Beteiligung vor, mittels derer sich verschiedene Akteure aktiv einbringen können. Hiermit wird angestrebt, die Bedürfnisse und das Engagement Betroffener zu evaluieren, zusammenzuführen und im Modellierungsprozess zu berücksichtigen.

Die Einbindung von Institutionen, Vereinen, juristischen Personen und wirtschaftlichen Gesellschaften sowie (interessierten) Menschen aus der Region – zusammenfassend als Akteure bezeichnet – in die Gestaltung der zukünftigen Energieversorgung ist eine Notwendigkeit, um eine konsensfähige Planung zu erzielen und opportunistischem Verhalten einzelner vorzubeugen. Jeder Akteur erhält hohe Wertschätzung, indem er an der Ausgestaltung der zukünftigen Energieversorgung beteiligt wird. Eine gelungene Beteiligung von Akteuren bemisst sich daran, ob es gelingt sie zu motivieren, dass sie ihre Präferenzen im Planungsprozess artikulieren und gegebenenfalls bereit sind Kompromisse einzugehen, um so zu konsensfähigen Lösungen beizutragen. Eine möglichst frühe Integration in den Planungsprozess erhöht die Bereitschaft der Teilnahme und gibt die geforderte Wertschätzung, das Ergebnis mit beeinflussen zu können (vgl. hierzu Keeney 1988, S. 396ff.). Die gemeinsam erzielten Ergebnisse führen gleichzeitig zu einer verbesserten Planungssicherheit und einer Identifikation der Akteure mit den notwendigen Maßnahmen, was zu einer erhöhten Akzeptanz der getroffenen Entscheidungen führen kann, da sich die Verantwortung auf alle Beteiligten verteilt.

Die Akteure erhalten an zwei zentralen Stellen der Modellierung ein umfassendes Mitspracherecht, nämlich bei der Gewichtung der Kriterien zur Auswahl nachhaltiger Energietechnologien sowie bei der räumlichen Standortmodellierung innerhalb der sozialen Dimension. Weil sowohl die Technologiebewertung als auch die anschließende Modellierung ursächlich für das Erscheinungsbild eines nachhaltigen Energieversorgungssystems sind, können sich die Akteure hier aktiv in den Planungsprozess integrieren und maßgeblich auf das Endergebnis einwirken. Die Beschränkung auf zwei Analyseschritte wurde mit Bedacht gewählt; führt sie einerseits doch dazu, dass die Koordination und Durchführung der Analysemethode in der Hand eines Einzelnen bzw. einer begrenzten Personengruppe bleibt, was praktische Vorteile bringt. Andererseits kann durch eine durchdachte Reduktion des komplexen Sachverhaltes eine erleichterte Integration wichtiger Akteure gelingen, ohne dass diese Experten des Energiesektors bzw. der Technologien sein müssen. Dieser

Sachverhalt ist dahingehend berücksichtigt, dass in beiden Integrationsgelegenheiten ein Fragen- bzw. Kriterienkatalog als zentrales Element dient, der durch die Akteure inhaltlich auszufüllen ist. Die Kataloge beziehen sich auf die Vorgaben der Nachhaltigkeit und orientieren sich gleichzeitig auch an anwendungsbezogenen Vorgaben der Analyse.

Wie bereits beschrieben gehen die Vorstellungen zu einer nachhaltigen Energieversorgung in der Gesellschaft weit auseinander, was entsprechend durch ein breites Akteursfeld repräsentiert wird. Eine regionale Akteursanalyse hilft dabei, sich einen guten Überblick über mögliche Akteure zu verschaffen und regionsspezifisch wichtige Akteure zu identifizieren. Eine Auflistung und Systematisierung von Akteuren, die im Energiebereich von Bedeutung sind, findet sich exemplarisch bei Tischer et al. (2006, S. 93ff.). Bei Fragen der Raumordnung sollte zusätzlich darauf geachtet werden, dass ein „möglichst weites, gesellschaftlich plurales Interessensspektrum“ (Oppermann 2005, S. 633) in die Kommunikations- und Partizipationsstrukturen eingebunden ist. Für die vorliegende Forschungsarbeit ist eine Begrenzung auf wesentliche Akteure aus Effizienzgründen jedoch unerlässlich, damit die Analyse sowie die Energiestrategie im Allgemeinen handhabbar bleiben. Die Auswahl ist dabei maßgeblich von der Struktur der jeweiligen Region abhängig und kann folglich auch variieren, allerdings sollten die gewählten Vertreter, wie bereits erwähnt, möglichst viele Facetten des gesellschaftlichen wie politischen Diskurses repräsentieren. Ein Systematisierungsvorschlag, der auch im empirischen Teil der Arbeit aufgegriffen wird, umfasst vier Akteursklassen, die keine homogenen Meinungsblöcke verkörpern, für das Konzept doppelter Nachhaltigkeit allerdings als wesentlich erachtet werden²⁰:

1. Entscheidungsträger

Hierunter werden Personen der Kommunalverwaltung und kommunale Entscheidungsträger wie Bürgermeister und Gemeinderäte verstanden. Aufgrund der Planungshoheit und Genehmigungspflicht von Bauvorhaben durch die Gemeinde (vgl. BauGB 2011 § 1) besitzen sie ein großes Mitspracherecht bei der Gestaltung einer zukünftigen Energieversorgung. Aufgrund des politischen Einflusses sind in dieser Akteursgruppe Meinungsführerschaften sowie parteipolitische Einflussfaktoren und gegebenenfalls auch Zwänge zu beachten. Bei Genehmigungsverfahren von Energieproduktionsstandorten zeigt sich jedoch häufig, dass lokale politische Funktionsträger ihre eigene Position vertreten, die durchaus von bundes- oder landespolitischen Vorgaben abweichen kann.

2. Experten

Die Akteursgruppe der Experten umfasst Repräsentanten von Institutionen des Energiesektors und Personen, die sich beruflich mit dem Thema Energie beschäftigen. Hierzu

²⁰ Die alphabetische Auflistung drückt keine Gewichtung aus.

zählen Handwerksbetriebe, Installateure oder klein- und mittelständige Unternehmen (KMU), die Energieanlagen vor Ort installieren, Architekten, kommunale Energieberater und Energiebeauftragte sowie Vertreter regionaler Energieversorgungsunternehmen (z.B. Stadtwerke oder Stromnetzbetreiber).

3. Grundeigentümer und Investoren

Die Transformation der Energieversorgung in Richtung Nachhaltigkeit ist mit einem enormen finanziellen Aufwand sowie einer räumlichen Neuordnung der Produktionsstandorte verbunden. Deshalb sind Vertreter der Anspruchsgruppe „*Grundeigentümer und Investoren*“ ebenfalls eine wichtige Gruppe, die es bereits in den Planungsprozess zu integrieren gilt. Im Besonderen zählen hierzu Landwirte und Waldeigentümer sowie Investmentfirmen und Banken. Gerade lokale Banken haben in den vergangenen Jahren durch spezielle Finanzierungsangebote im Bereich erneuerbarer Energien zu einem verstärkten Ausbau dieser Technologien beigetragen. Land- und Forstwirte haben wegen ihres hohen Eigentums an Boden für flächenintensive Energieformen, speziell für erneuerbare Energien, großen Einfluss.

4. Meinungsbildner und Interessensvertreter

Zur Akteursgruppe der Meinungsbildner und Interessensvertreter zählen Personen, die lokal einen hohen Bekanntheitsgrad haben und eine ehrenamtliche bzw. berufliche Tätigkeit in Vereinen, Interessensgemeinschaften, Verbänden, Schulen oder Kirchen ausüben. Zum einen können sie durch ihre spezielle Tätigkeit bzw. ihrer Bekanntheit persönliche Meinungen zur zukünftigen Energieversorgung leicht verbreiten und somit beeinflussend wirken (Meinungsbildner); zum anderen repräsentieren sie auch organisierte Mehrheitspositionen einzelner Gruppen (Interessensvertreter).

Alle Akteursgruppen verbindet i.d.R. die Einschätzung, als Energieverbraucher vor Ort einerseits an einer sicheren und kostengünstigen Energieversorgung interessiert zu sein und andererseits aber durch die Energiebereitstellung in ihrem Lebensalltag nicht negativ beeinflusst zu werden. Obwohl damit ähnliche Zielvorstellungen vorliegen umschreibt das Akteursfeld eine Gemengelage aus komplizierten, teils widersprüchlichen Meinungen und Positionen (vgl. hierzu auch Gregorowius & Zepp 2006, S. 121). Von einer nachhaltigen Energieversorgungsstrategie ist nur dann zu sprechen, wenn es gelingt, die verschiedenen Interessen auszubalancieren und den Akteuren eine Teilhabe an der Ausgestaltung und ggf. Umsetzung zu ermöglichen. Zu beachten ist, dass mit zunehmender Größe des Untersuchungsgebietes das Interesse sowie die Identifikation mit dem Ziel einer nachhaltigen Energieversorgung seitens der Akteure schwinden. Ein Bürgermeister wird bestrebt sein, vor allem für seine Gemeinde zu argumentieren, ein Anbieter von Photovoltaikanlagen

hingegen für sein Absatzgebiet. In ähnlicher Weise gilt diese räumliche Einschränkung auch für die Bevölkerung.

Personen aus den Akteursklassen, die mit Anwendung der Modellierung befragt werden, sind als Vertreter ihrer jeweiligen Funktion (z.B. Landwirt) ausgewählt und auch so zu betrachten. In wie weit der Einzelne die Meinung der Grundgesamtheit (alle Landwirte des Untersuchungsraumes) repräsentiert bleibt offen. Bei Untersuchungen auf kommunaler Ebene erscheint über eine reine Befragung hinaus eine vertiefte Vernetzung von Akteuren z.B. in Form einer Arbeitsgruppe oder eines Runden Tisches sinnvoll (vgl. hierzu Oppermann 2005, S. 631 / Zink 2010, S. 957ff.). Derartige informelle Foren spannen einen Möglichkeitsraum auf, innerhalb dessen ein Aushandlungsprozess stattfindet. Sie sollen jeden Akteur aktivieren und ihm die Chance bieten, eigene Präferenzen und Vorstellungen zu artikulieren oder auf Gegenpositionen reagieren zu können. Bei Analysen zu größeren Regionen und damit zu weit reichenden Entscheidungssituationen kann dies aus praktikablen Gründen zumeist nicht gewährleistet werden. Die Größe des Untersuchungsgebietes beeinflusst nicht nur die Personenanzahl sondern auch die Zusammensetzung der Entscheidungsträger, indem auch übergeordnete (regionale) Akteursgruppen zu berücksichtigen sind.

Dem Anwender des Konzeptes doppelter Nachhaltigkeit kommt die Rolle eines fachkundigen aber neutralen Moderators zu, der versucht, die verschiedenen Motive der Akteure zu erfassen und in eine gemeinschaftliche Strategieplanung zu bündeln. Dazu zeigt das Konzept doppelter Nachhaltigkeit Wege auf, wie die Integration der genannten Akteure in den beiden Bereichen Technologiebewertung und räumlicher Potenzial- und Standortmodellierung im Einzelnen aussehen kann. Die konkrete Akteursbeteiligung ist in den jeweiligen Kapiteln zur Strategie der Implementierung einer nachhaltigen Energieversorgung näher dargelegt (vgl. Kapitel V 1.3.3 und V 2.2.4). Es handelt sich hierbei um praktikable Vorschläge einer Beteiligung. Die Beteiligungsform bleibt grundsätzlich offen für Ergänzungen, Veränderungen und individuellen Wertschätzungen und kann folglich dynamisch an gesellschaftliche, technische oder methodische Innovationsprozesse sowie an den jeweiligen Untersuchungsraum angepasst werden.

3. Zwischenfazit: Raum als verbindende Komponente

Das Konzept doppelter Nachhaltigkeit versucht einen Weg aufzuzeigen, wie eine nachhaltige Energieversorgung gestaltet werden kann. Die Zieldefinition fordert dabei sowohl die Technologieoptionen als auch die Standortfrage zu prüfen und integriert beide Bereiche in eine regionale Energiestrategie. In der Forschungspraxis sind bereits zahlreiche Ansätze zur Technologiebewertung und zur Potenzial- bzw. Standortmodellierung vorhanden, auf denen im

Folgenden aufgebaut werden kann. Verbindende Komponente der Energiestrategie ist der Raum. Er begrenzt zum einen das Untersuchungsgebiet und führt damit auch zu einer inhaltlichen Reduktion; zum anderen bestimmt er mit seinen natürlichen und sozioökonomischen Eigenschaften das Erscheinungsbild der Energieversorgung. Mit der Anwendung des Konzeptes doppelter Nachhaltigkeit sollen die für die jeweilige Region am besten geeigneten Technologien sowie deren am besten geeigneten Standorte identifiziert werden. Das Leitbild Nachhaltigkeit liefert die dimensionsübergreifenden Kriterien für die Bewertung bzw. Standortsuche. Dies bedeutet jedoch auch, dass eine Technologie oder ein Standort vermutlich nie alle Aspekte der Nachhaltigkeit erfüllen kann, sondern eben nur besser als eine andere Energieform oder ein anderer Standort abschneidet (relative Nachhaltigkeit).

In dem gesellschaftlich höchst bedeutsamen wie umstrittenen Themenfeld Energie besitzt Partizipation eine große Bedeutung. Deshalb ist es ein zentrales Anliegen des Konzeptes, Integrationsmöglichkeiten für verschiedene lokale Akteure des Energiesektors zu schaffen, um bei der Ausgestaltung der zukünftigen Energieversorgung deren Interessen berücksichtigen zu können, Zielkonflikte zwischen den Akteuren zu lösen und somit zu einer höheren Akzeptanz beizutragen. Wie die Partizipationsmöglichkeit gestaltet ist und wie die Analysen der Technologiebewertung und der Potenzialmodellierung aufgebaut sind, wird mit der Strategie zur Implementierung einer nachhaltigen Energieversorgung näher ausgeführt. Die Zieldefinition sowie das abgeleitete Konzept doppelter Nachhaltigkeit dienen dabei als Grundlage, mittels der in Anlehnung an bereits publizierte Methodiken zur Technologiebewertung und zur Potenzialmodellierung die Vorgehensweise der Energiestrategie weiter konkretisiert wird.

V Strategie zur Implementierung des Konzeptes

Die Vielzahl an Wissenschaftsdisziplinen, welche sich mit Energieforschung und Nachhaltigkeit beschäftigen, begründet das breite Spektrum an verschiedenen methodischen Zugangsmöglichkeiten zum Thema. Die Bandbreite im Energiebereich reicht von physikalischer, chemischer, biologischer und technischer Grundlagenforschung bis hin zu gesellschaftswissenschaftlichen und psychologischen Akzeptanzanalysen. Ebenso heterogen gestaltet sich die Nachhaltigkeitsforschung, bei welcher oftmals versucht wird anhand von einer konkreten Fragestellung der jeweiligen Thematik ein adäquates Forschungsprogramm zu entwerfen, was vielfach eine Kombination aus quantitativer und qualitativer Methoden beinhaltet (vgl. Schäfer 2008, S. 29).

Eine erschöpfende Beachtung sämtlicher Forschungsmethodiken ist weder Ziel dieser Arbeit noch erscheint es bei der rasanten Entwicklung im Forschungsfeld von Energie und Nachhaltigkeit angebracht, dieses anzustreben. Das vorgestellte Konzept doppelter Nachhaltigkeit versucht allerdings einen Handlungsrahmen vorzugeben, in welches sehr viele Wissenschaften ihre Methodiken und Ergebnisse einbringen können bzw. müssen. Es hält eine Fülle an Optionen bereit, die es den verschiedenen Disziplinen erlauben, sich an unterschiedlicher Stelle zu integrieren, um damit die praktikable Anwendung des Konzepts zu verfeinern und stets aktuell zu halten. Dieser Sachverhalt wird ohnehin bereits aus der Zieldefinition gefolgt.

Wie bereits im Kapitel zur Perspektive der Nachhaltigkeit für den Energiesektor (Kapitel III) aufgezeigt, bietet die Leitidee vielfältige Anknüpfungspunkte für das Themenfeld. Vielen Strategien wird häufig jedoch fehlende Praktikabilität vorgeworfen. Um diesem Vorwurf entgegenzuwirken und gleichzeitig einen strikten Nachhaltigkeitsbezug gewährleisten zu können, greift die Forschungsarbeit, dem konzeptionellen Vorgehen entsprechend, auf zwei übergeordnete methodische Ansätze zurück: Erstens der Bewertung von Energietechnologien mit Hilfe einer ganzheitlichen Technologiebetrachtung anhand von Nachhaltigkeitskriterien und zugewiesenen Indikatoren sowie zweitens einer räumlichen Potenzial- und Standortmodellierung mittels eines Geographischen Informationssystems (GIS). Beides geschieht vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeitsforschung und einer regionalen Betrachtungsweise. Es ist somit Aufgabe, beide Methodiken unter das Postulat Nachhaltigkeit zu stellen, um der übergeordneten Intention (siehe Zieldefinition) zu folgen. In dieser Forschungsarbeit wird vorgeschlagen, bekannte Nachhaltigkeitskonzepte – zum einen den integrativen HGF-Ansatz (vgl. Kopfmüller et al. 2001) und zum anderen den dimensionsbezogenen Ansatz, vertreten durch die Enquete-Kommissionen „*Schutz des Menschen und der Umwelt*“ (Enquete-Kommission 1998) und „*Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung*“

²¹ (Enquete-Kommission 2002) – zu wählen. Beide eignen sich in besonderer Weise, die erwähnten Methoden in die Nachhaltigkeitsdiskussion einzubetten. Bei den Methoden wiederum kann auf bereits vorhandene grundlegende Untersuchungsdesigns zur ganzheitlichen Bilanzierung von Technologien und einer GIS-basierten Standortmodellierung zurückgegriffen werden, die in den vergangenen Jahren bereits Einblicke sowohl in die Technologiebewertung als auch in die Vorgehensweise einer räumlichen Modellierung gegeben haben. Für die Standortplanung von Energieproduktionsstätten sei an dieser Stelle bereits exemplarisch auf die Methodik einer Potenzialanalyse für erneuerbarer Energie von Prinz et al. (2009) für die Republik Österreich und auf den bayerischen „*Leitfaden Energienutzungsplan*“ (StMUG, StMWIVT & OBB 2010) verwiesen. Zur Technologiebewertung unter Nachhaltigkeitsaspekten sind speziell die Forschungsarbeiten von Petrovic & Müller (2005) als auch von Hirschberg et al. (2008) zu erwähnen. Diese und folgende noch zu thematisierende Arbeiten beschäftigen sich bereits eingehend mit jeweils einer der genannten Thematiken. Ziel der Energiestrategie doppelter Nachhaltigkeit ist es, an diesen Vorarbeiten unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien anzuknüpfen und zu einem integrativen raumbezogenen Gesamtkonzept auszubauen. Eine für regionale Energiestrategien notwendige Synthese beider Bereiche kann dadurch gelingen.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Ausarbeitung einer Gesamtstrategie, die praktikabel sein soll und zugleich die Integration von Akteuren ermöglicht, weshalb nur bedingt auf spezielle Fragen der Technologiebewertung und Modellierung eingegangen werden kann. Das Konzept doppelter Nachhaltigkeit schließt aber in keinem seiner Teilbereiche eine mögliche vertiefende Analyse aus. Eine ausführliche Beschreibung der verwendeten Methoden und des chronologischen Aufbaus sowie die Erörterung von Anknüpfungspunkten zu den gewählten Nachhaltigkeitskonzeptionen und Schnittstellen zu anderen Wissenschaften erfolgen in den entsprechenden Kapiteln.

1. Regionale Bewertung von Energietechnologien hinsichtlich ihres Nachhaltigkeitsaspektes

Das Konzept doppelter Nachhaltigkeit fordert im ersten Schritt zu klären, welche Energietechnologien dem Nachhaltigkeitsaspekt genügen, um folglich als Erzeugungsform für den Untersuchungsraum in Betracht zu kommen. Zur Beantwortung dieser Frage ist eine Technologieanalyse mit anschließender Bewertung und Entscheidung erforderlich. Die bewusste

²¹ Die Enquete-Kommission „*Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und Liberalisierung*“ geht von dem Verständnis aus, dass Nachhaltigkeit die drei Dimensionen schonende Nutzung und Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlage sowie soziale und wirtschaftliche Entwicklung umfasst. Entsprechend werden ökologische, soziale und ökologische Ziele formuliert, wobei eine Hierarchie zugunsten von „*Naturschranken*“ angenommen wird. Damit sollen irreversible Schädigungen der Natur verhindert werden, da eine intakte Natur die Grundlage für soziale und ökonomische Entwicklung ist (vgl. Enquete-Kommission 2002, S. 35).

Entscheidung für eine (Technologie-)Alternative ist ein komplexer Prozess, da sich das Leitbild Nachhaltigkeit nicht mittels eines einzigen Zieles konkretisieren lässt, sondern vielmehr durch eine multiple Zielsetzung charakterisiert ist. Zur Erleichterung und besseren Strukturierung solcher komplexer Prozesse hält die präskriptive Entscheidungstheorie eine Vielzahl an unterschiedlichen Methodiken bereit, die auch als multi-criteria-decisions benannt sind. Sie umfassen all diejenigen Entscheidungssituationen, bei denen mehrere Ziele zur Bewertung einer oder mehrerer Alternativen beachtet werden.

Die Erarbeitung eines problemadäquaten Bewertungsmodells, welches für die potenziell zur Verfügung stehenden Energietechnologien nachhaltigkeitsrelevante Gesichtspunkte in übersichtlicher Weise quantitativ abbildet und zusammenfasst, orientiert sich an den Vorgaben dieser mehrkriteriellen Entscheidungstheorien. Die konkrete Entscheidungsanalyse muss dabei stets der Problemstellung sowie dem Untersuchungskontext angepasst werden. Durch gedankliche Reduktion der Realität kann ein Bewertungsmodell erstellt werden, das vorgibt, welche Aspekte analysiert werden sollen und wie diese in Beziehung zueinander stehen (vgl. Lifka 2009, S. 35). Im vorliegenden Fall gliedert sich die Entscheidungsanalyse in vier chronologisch aufeinander aufbauende Prozessschritte (siehe Abb. 3), die eine regionale Bewertung von Energietechnologien erlauben. Bei der Anwendung des Bewertungsmodells auf einen Untersuchungsraum sind zusätzlich die Schritte der Alternativenwahl und der Datenerhebung zu beachten. Beide Schritte werden im empirischen Teil der Arbeit (vgl. Kapitel VI) näher ausgeführt.

| | | Prozessschritte | Aufgaben |
|---------------------------------|--|-------------------------------------|--|
| Modell zur Technologiebewertung | Operationalisierung von Nachhaltigkeit | 1 Zieldefinition | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Klärung des Kontextes ▪ Formulierung der Zielsetzung |
| | | 2 Modellbildung | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Operationalisierung des Nachhaltigkeitsbegriffes ▪ Identifikation von Kriterien und Indikatoren ▪ Zielhierarchie |
| | Entscheidungsverahren | 3 Technologiebewertung | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wertefunktionen und Normierung ▪ Gewichtung ▪ Integration der Akteurspräferenzen ▪ Indexbildung (Aggregation) |
| | | 4 Ergebnisbeurteilung und Kontrolle | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sensitivitätsanalyse |

Abb. 3: Modellaufbau zur Bewertung von Energietechnologien

Die Methodik der Technologiebewertung sowie die Integration der Akteure in die Entscheidung werden anhand der einzelnen Prozessschritte vorgestellt. Die Modellkonzeption bezieht sich dabei auf die Vorgaben aus dem integrativen Nachhaltigkeitskonzept (HGF) zur Operationalisierung des

Leitbildes. Eine kritische Reflexion sowohl der Technologiebewertung im Allgemeinen als auch der erarbeiteten Entscheidungsanalyse folgt abschließend.

1.1 Zieldefinition

Ohne eine klare Zielsetzung sind rationale Entscheidungen nicht möglich (vgl. Eisenführ & Weber 2003, S. 53ff.). Ein Ziel wird dabei definiert als eine Vorstellung eines Entscheidungsträgers über den gewünschten zukünftigen Zustand und gibt damit einen Maßstab zur Bewertung der Alternativen vor (vgl. Lifka 2009, S. 36 / Schönwandt 2006, S. 28). Es lässt sich von einer konkreten Problemstellung ableiten, zu deren Lösung eine Entscheidung getroffen werden muss. Eine präzise Problemformulierung gewährleistet dabei die Beachtung aller als relevant erscheinende Aspekte der Entscheidungsfindung und gibt den inhaltlichen Rahmen der Bewertung vor. Mit dem Konzept doppelter Nachhaltigkeit wurde bereits eine Definition vorgestellt (vgl. Kapitel IV 2.1), aus der sich auch die Problemstellung zur Technologieanalyse entnehmen lässt: Welche heute verfügbare Technologieform erfüllt für den Untersuchungsraum die Vorgaben der Nachhaltigkeit am besten? Mit Nachhaltigkeit ist dabei der Untersuchungskontext bereits vorgegeben, muss allerdings weiter operationalisiert werden, um für die Bewertung als Grundlage in Betracht zu kommen. Folglich ist zu klären, welche Anforderungen die Zielformulierung einer nachhaltigen Entwicklung zur Auswahl der günstigsten Technologiealternative stellt und wie diese Anforderungen in den konkreten Entscheidungsprozess zu integrieren sind (vgl. Schuh 2001, S. 3).

Die Einordnung der Entscheidungsanalyse in den Nachhaltigkeitskontext basiert auf der integrativen Strategie des HGF-Ansatzes, greift dessen top-down-Strukturierung auf und bedient sich der darin erstellten Leitlinien für den Energiesektor als Rahmen für die angestrebte Technologiebewertung. Dieses Nachhaltigkeitskonzept eignet sich, weil es sich nicht aus den Dimensionen der Nachhaltigkeit sondern aus den normativen Grundelementen begründet. Es gibt eine stringente Vorgehensweise – auch Bauplan bezeichnet – zur Ableitung von Indikatoren aus den konstitutiven Elementen der Nachhaltigkeit vor (vgl. u.a. Hartmuth, Huber & Rink 2006, S. 101) und erlaubt dadurch Kriterien für eine nachhaltige Energieversorgung zu definieren. Die Indikatoren reduzieren dabei die Fülle an Daten auf zentrale Aspekte und können zu einem Indikatorenset ausgearbeitet werden, mit dessen Hilfe eine aussagekräftige Analyse sowohl fossiler als auch erneuerbarer Energien hinsichtlich ihres Beitrages zu einer nachhaltigen Energieversorgung ermöglicht wird.

1.2 Modellbildung

1.2.1 Kriterien zur Bewertung von Energietechnologien

Nachdem in der Zieldefinition der Bezugsrahmen mit Nachhaltigkeit abgesteckt und die Problemstellung auf die Identifikation der Energietechnologie, die den Nachhaltigkeitsansprüchen am nächsten kommt, präzisiert wurde, muss in der Phase der Modellbildung geklärt werden, wie sich aus den normativen Vorgaben der Nachhaltigkeit messbare Eigenschaften und Zielhierarchien ableiten lassen. Hierzu bedient sich die Arbeit eines iterativen Verfahrens. So wird einerseits das integrative Nachhaltigkeitskonzept mit den zugehörigen Leitlinien verwendet, um den geforderten Bezug der Entscheidungsanalyse zur Nachhaltigkeit herstellen zu können. Andererseits erfolgt die tatsächliche Indikatorenauswahl durch einen Vergleich mit weiteren gängigen und in der aktuellen Literatur bereits diskutierten Indikatorensystemen zur Bewertung von Nachhaltigkeit am Energiesektor. Abbildung 4 zeigt die Struktur des integrativen Nachhaltigkeitskonzeptes sowie die Anknüpfungspunkte dieser Forschungsarbeit.

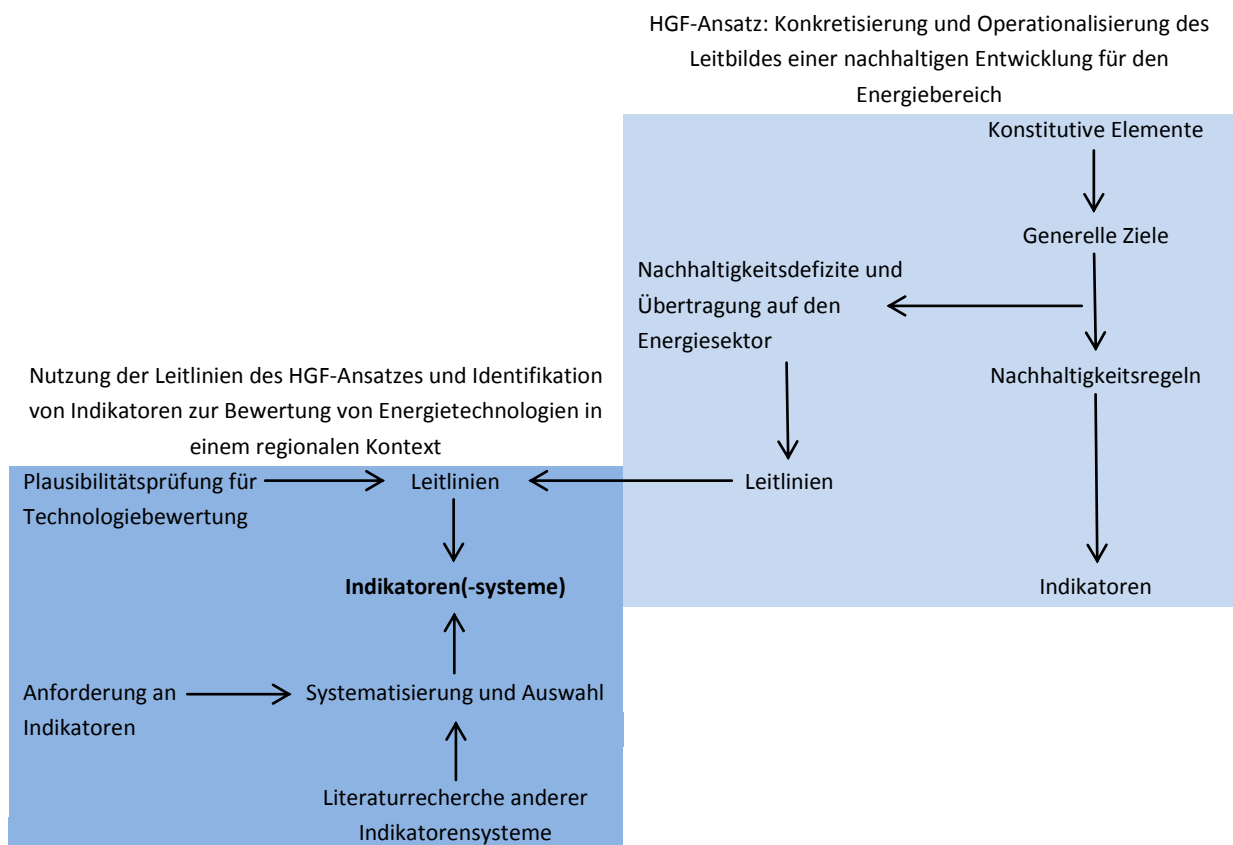


Abb. 4: Schema der Leitlinienfindung und Indikatorenauswahl

Ausgehend von den konstitutiven Elementen der Nachhaltigkeit leitet das HGF-Konzept in einer top-down-Strukturierung generelle Ziele, Nachhaltigkeitsregeln und Indikatoren ab. Diese Grundlagen der integrativen Nachhaltigkeitstheorie (Konstitutive Elemente, Generelle Ziele und

Nachhaltigkeitsregeln) wurden bereits in Kapitel III 2.4 näher dargelegt. Innerhalb des HGF-Projektes fand bereits eine Konkretisierung und Operationalisierung für den Energiebereich statt. Durch eine problembezogene Betrachtung des Energiesystems unter Nachhaltigkeitsaspekten konnten vier Bereiche mit eklatanten Nachhaltigkeitsdefiziten herausgestellt werden (vgl. Kopfmüller et al. 2000, S. 15f.):

- Ressourcenaspekt
- Emissions- und Senkenaspekt
- Risikoaspekt
- Verteilungsaspekt

Wie bereits in Kapitel II (Gliederungspunkt 1) dargelegt, stellen diese Bereiche in der aktuellen Forschung sowie in der gegenwärtigen öffentlichen Diskussion um eine nachhaltige Energieversorgung noch immer die Kernprobleme einer nachhaltigen Entwicklung im Energiebereich dar und besitzen deshalb weiterhin ihre Gültigkeit, wobei der Aspekt einer umweltverträglichen bzw. klimafreundlichen Energiepolitik dominiert.²² Ausgehend von diesen Nachhaltigkeitsdefiziten und der Definition einer nachhaltigen Energieversorgung von Eichelbröner & Henssen (1998, S. 496) konnten durch die Übertragung des integrativen Ansatzes auf den Energiebereich allgemeine Handlungsleitlinien vorgegeben werden (vgl. Kopfmüller et al. 2000, S. 17f. / Fishedick & Nitsch 2002, S. 11ff.). Diese energiespezifischen Leitlinien sind primär als eine Orientierung für die am Energiesektor tätigen Akteure bzw. politischen Entscheidungsträger gedacht und dem konzeptionellen Aufbau des integrativen Ansatzes folgend als eine Gesamtheit zu verstehen, in der eine einzelne Leitlinie nur in den Grenzen der übrigen Leitlinien gilt (vgl. Kopfmüller et al. 2000, S. 18). Damit definieren sie Mindestanforderungen einer nachhaltigen Entwicklung am Energiesektor, was bedeutet, dass Nachhaltigkeit keinesfalls realisierbar ist, wenn die Mindestanforderungen nicht erfüllt bzw. nicht eingehalten werden. Die Leitlinien geben damit einen Korridor zur Erreichung einer nachhaltigen Energieversorgung vor. Sie finden sich in verschiedenen Literaturstellen wieder (vgl. Krewitt et al 2007, S. 28 / Hennicke & Bodach 2010, S. 134f.) und lauten wie folgt²³:

- Zugang für alle und Verteilungsgerechtigkeit
- Ressourcenschonung
- Umwelt-, Klima- und Gesundheitsverträglichkeit
- Soziale Verträglichkeit
- Risikoarmut und Fehlertoleranz
- Umfassende Wirtschaftlichkeit
- Bedarfsgerechte Nutzungsmöglichkeit und dauerhafte Versorgungssicherheit
- Internationale Kooperation

²² Seit der nuklearen Katastrophe in Japan scheint sich die Diskussion um den Risikoaspekt der Energieversorgung zu verstärken. In Folge des damit einhergehenden Atomenergieausstiegs und des verstärkten Ausbaus erneuerbarer Energien erhält zudem der Kostenaspekt (Strompreise) in Deutschland wieder größere Aufmerksamkeit.

²³ Bei Kopfmüller et al. (2000, S. 18) ist eine weitere Leitlinie „Demokratie und Partizipation“ genannt.

Das Ziel dieser Forschungsarbeit, das integrative Nachhaltigkeitskonzept für die Bewertung von einzelnen Energietechnologien in einem räumlichen Kontext anzuwenden, verlangt die hierfür relevanten Vorgaben heraus zu arbeiten. Im HGF-Konzept bilden die Regeln den normativen Bezugsrahmen des Indikatorensystems, was bedeutet, dass den Regeln Indikatoren, mit denen ihre Quantifizierung möglich wird, zugeordnet werden (vgl. Coenen et al. 2001, S. 106). Abweichend davon bilden bei der Technologiebewertung im Rahmen dieser Arbeit nicht die Regeln sondern die gerade erwähnten Leitlinien den übergeordneten Bewertungsrahmen. Diese Vorgehensweise wird gewählt, da die Leitlinien auch als konkrete Anforderungen an eine nachhaltige Energieversorgung zu betrachten sind (vgl. Hennicke & Bodach 2010, S. 134ff.) und deshalb als umfassendes Kriteriensystem fungieren können. Des Weiteren erleichtert die klare Benennung und Strukturierung der Leitlinien eine spätere Integration von Akteuren in den Entscheidungsprozess (vgl. hierzu Kap. V 1.3.3).

Obwohl die Regeln der integrativen Nachhaltigkeit nicht als Bezugsrahmen verwendet werden, bleibt ihre Gültigkeit dennoch bestehen, da die Leitlinien aus der Übertragung des HGF-Ansatzes auf den Energiebereich in Anknüpfung an die konstitutiven Elemente und generellen Ziele stammen. Die Architektur der integrativen Nachhaltigkeit bleibt somit unangetastet. Gleichzeitig sind auch die Regeln bei der Anwendung des Konzeptes auf ein konkretes Problemfeld stets auf ihre Relevanz zu überprüfen und gegebenenfalls auszuwählen (vgl. exemplarisch Stelzer, Rösch & Raab 2006, S. 238). Grunwald & Kopfmüller (2006, S. 56) bescheinigen diesbezüglich, dass eine Kontextualisierung der Regeln in Bezug auf Regionen, Politikfelder oder Wirtschaftsbereiche anhand der jeweiligen spezifischen Anforderung geschehen muss. Mit den formulierten Leitlinien sind bereits die zentralen Handlungsfelder für den Energiebereich angesprochen. Die Anpassung der Handlungsleitlinien als Bezugsrahmen für die Technologiebewertung ist deshalb nicht als Veränderung des integrativen Konzeptes – die übergeordnete top-down-Struktur und somit die systematische Ableitung, beginnend bei den konstitutiven Elementen der Nachhaltigkeit, bleiben unangetastet – sondern als Anwendung für die vorliegende Aufgabenstellung gedacht.

Die Handlungsleitlinien repräsentieren Anforderungen an eine nachhaltige Energieversorgung und sind in der wissenschaftlichen Diskussion konsensfähig. Um die Leitlinien zur Beurteilung von Energietechnologien in einem regionalen Kontext verwenden zu können, bedarf es einer Relevanz- und Eignungsprüfung für die Technologiebewertung. Davon sind im Besonderen die beiden Leitlinien *„Zugang für alle und Verteilungsgerechtigkeit“* sowie *„Internationale Kooperation“* betroffen. Beide sind aus den konstitutiven Elementen der intragenerativen Gerechtigkeit und der globalen Perspektive (siehe Kapitel III 2.4) abgeleitet. Ohne ihre Berechtigung und Intention in Frage zu stellen, erscheinen sie bei der Beurteilung von Energietechnologien nur schwer einsetzbar. Unverkennbar geben diese Handlungsleitlinien Orientierung für ein nachhaltiges Energiesystem (vor

allem auf internationaler Ebene), nicht jedoch für eine einzelne Technologie. Der Aspekt der Verteilungsgerechtigkeit und des Zugangs zu moderner Energie wird im zweiten Modellierungsabschnitt dahingehend berücksichtigt, dass das Ziel der Implementierung von nachhaltigen Energietechnologien in einer Region die vollständige Versorgung dieser mit Energie (Autarkie) einschließt. Folglich bleiben zur Beurteilung von Energietechnologien auf regionaler Ebene sechs Handlungsleitlinien von Bedeutung:^{24 25}

1. Bedarfsgerechte Nutzungsqualität und dauerhafte Versorgungssicherheit

Energie muss dauerhaft, in ausreichender Menge und zeitlich wie räumlich bedarfsgerecht zur Verfügung stehen.

2. Ressourcenschonung

Die Nutzungsmöglichkeit von Energieressourcen ist für kommende Generationen offen zu halten oder vergleichbare alternative Bereitstellungsformen der Energiedienstleistung sind zu schaffen.

3. Risikoarmut und Fehlertoleranz

Unvermeidlich auftretende Risiken und Gefahren der Energieerzeugung sind zu minimieren. Ihre räumliche und zeitliche Ausdehnung ist zu begrenzen.

4. Soziale Verträglichkeit

Allen Betroffenen soll die Teilhabe am Gestaltungs- und Entscheidungsprozess zur Energieversorgung möglich sein. Die Handlungs- und Gestaltungsmöglichkeiten wirtschaftlicher Akteure dürfen nicht eingengt werden sondern sind möglichst zu erweitern.

5. Umfassende Wirtschaftlichkeit

Energiedienstleistungen sind, in Relation zu anderen Kosten des Wirtschaftens und des Konsums, zu vertretbaren Kosten bereitzustellen.

6. Umwelt-, Klima- und Gesundheitsverträglichkeit

Energiebedingte Emissionen und Abfälle dürfen die Anpassungs- und Regenerationsfähigkeit natürlicher Systeme nicht überschreiten. Gesundheitliche Schäden sind zu vermeiden.

Für den angestrebten Vergleich von Energietechnologien anhand dieser ausgewählten sechs allgemeinen Anforderungen sind Indikatoren notwendig, die eine Quantifizierung ermöglichen. Sowohl auf internationaler als auch auf nationaler Ebene existieren bereits zahlreiche Indikatorensets mit einem Energie- und Nachhaltigkeitsbezug, die jedoch partiell sehr unterschiedliche Bewertungsziele verfolgen. Ebenso wurde auch im Rahmen der Operationalisierung des HGF-Ansatzes für den Energiebereich eine umfangreiche Indikatorenliste erstellt. Die darin enthaltenen Indikatoren ermöglichen eine Evaluierung des Energiesektors eines beliebigen Landes. Für den speziellen Fall der Bewertung von Energietechnologien müssen deshalb aus diesem Fundus bekannter Indikatoren geeignete ausgewählt werden (vgl. u.a. Schidler 2006, S. 161).

²⁴ Die Reihenfolge der Nennung entspricht keiner Gewichtung.

²⁵ Die Erläuterungen zu den Handlungsleitlinien sind von Krewitt et al. (2007, S. 28) übernommen und verkürzt wiedergegeben.

Die Indikatorenauswahl findet schließlich in einem Spannungsfeld bestehender HGF-Vorgaben und Indikatoren anderer Nachhaltigkeitsstudien für den Energiesektor statt. Den Leitlinien können so repräsentative Indikatoren zugewiesen werden, die mittels einer umfangreichen Literatursichtung zuvor kritisch diskutiert und analysiert wurden. Dieses iterative Verfahren verbindet die normativen Elemente der Nachhaltigkeit mit den aktuellen Forschungsansätzen und verschafft damit eine Gesamtbetrachtung, mit der eine Auswahl an geeigneten Indikatoren für die vorliegende Forschungsarbeit erfolgen kann, anhand derer die Vor- und Nachteile von Technologien analysiert und im Anschluss in einer vergleichenden Bewertung dargestellt werden können.²⁶

1.2.2 Indikatoren zur Bewertung von Energietechnologien

Ein bewährtes und grundlegendes Mittel zur empirischen Analyse von Nachhaltigkeit sind Indikatoren. Mit ihnen ist eine Konkretisierung von Nachhaltigkeit möglich, indem sie die einzelnen Handlungsleitlinien (bzw. Leitplanken, Mindestanforderungen oder Kriterien) anhand von messbaren Eigenschaften quantitativ bewerten. Folglich repräsentieren Nachhaltigkeitsindikatoren allgemein akzeptierte *„Kenngrößen, mit denen bestimmte Sachverhalte abgebildet und gemessen werden sollen“* (Grunwald & Kopfmüller 2006, S. 59). Unter Indikator wird die *„Operationalisierung eines Konstruktes“* (Genosko 2005, S. 457) verstanden, wobei das Interesse nicht dem Indikator selbst sondern dem jeweils angezeigten Sachverhalt gilt. Indikatoren geben somit Auskunft über den jeweiligen Grad an Nachhaltigkeit, was allerdings häufig nur mit einer deskriptiven Aufgabe, nämlich der Informationsbeschaffung verbunden ist. Darüber hinaus besitzen sie die Funktion als entscheidungsunterstützendes Werkzeug in politische und kommunalpolitische Entscheidungsprozesse eingebunden zu werden (vgl. Hartmuth 2004, S. 4).

Um die Multidimensionalität von Nachhaltigkeit abbilden zu können, reicht ein Indikator zumeist nicht aus. Vielmehr ist ein System von Indikatoren notwendig, welches zwar in überschaubarer Weise aber dennoch dimensionsübergreifend Auskunft gibt. Die darin enthaltenen Indikatoren sollen, mit Blick auf die Zielstellung, individuell geeignet und zudem auf sämtliche Energietechnologien, d.h. sowohl auf fossile als auch auf regenerative Erzeugungsformen anwendbar sein, was ebenso für

²⁶ Eine ähnliche konzeptionelle Strategie verwendet die Studie „Nachhaltigkeit: Kriterien und Indikatoren für den Energiebereich“ zur Erstellung eines Indikatorensets (vgl. Walter et al. 2001, S. 27). Der Indikatorenkatalog verfolgt das Ziel einer nationalen Bestandsaufnahme mit anschließender Erfassung von Zeitreihen. Dabei findet, im Unterschied zum HGF-Projekt, ein anderer Kriterienkatalog Anwendung. So leitet die Arbeit ihre Kriterien und Indikatoren aus der Nachhaltigkeitstheorie ab, indem sie Kriterien nennt und diese als *„Aspekte oder Merkmale von Nachhaltigkeit“* (ebs. 2001, S. 10) definiert. Hierzu zählen: Aktivitäten, Politik, Energieeffizienz und Wirkungen Umwelt/Wirtschaft/Gesellschaft. Eine Quantifizierung der Kriterien erfolgt mit Zuordnung geeigneter Indikatoren zu jeder Kriteriumsklasse. Für jeden Indikator wird wiederum ein quantitativer Zielwert oder zumindest eine gewünschte Entwicklungsrichtung definiert. Ähnlich zum HGF-Ansatz halten die Autoren dieser Studie eine Anwendung auf lokaler oder regionaler Ebene (in der Schweiz: Kantone) grundsätzlich für möglich, verlangen aber diesbezüglich eine *„Reihe von Ergänzungen und Anpassungen“* (ebs. 2001, K. 9).

unterschiedliche Anlagengrößen, verschiedene Leistungsspektren und den verwendeten Technikvarianten (z.B. Biogas, Biomasse, ...) gilt.

Für den Vergleich verschiedener Anlagenkonzepte und der darauf aufbauenden Identifikation von nachhaltigen Technologieoptionen ist die Zusammenstellung eines Indikatorensets unabdingbar. Allerdings unterliegt das Auswahlverfahren von Indikatoren, unabhängig davon welcher Sachverhalt abgebildet wird, stets der Subjektivität eines Einzelnen oder einer Gruppe und ist folglich eine wertbehaftete Entscheidung, die unvollkommen ist und einer gesellschaftlichen Legitimation bedarf (Grundwald / Kopfmüller 2006, S. 64). Gleichzeitig beeinflusst dieser Schritt die späteren Ergebnisse und somit auch das Erscheinungsbild einer nachhaltigen Energieversorgung in bedeutendem Maße. Deshalb ist die Erörterung des hier verwendeten Indikatorensets eingebunden in die logische Strukturierung des HGF-Nachhaltigkeitskonzeptes und orientiert sich zusätzlich an vergleichbaren Indikatorensystemen. Der Bezug zum integrativen Nachhaltigkeitskonzept sowie der Abgleich mit bereits vorhandenen Indikatorenlisten soll den subjektiven Einfluss weitgehend reduzieren und eine zweckdienliche, sinnvolle und vor allem transparente Indikatorenauswahl gewährleisten. Hierzu ist es notwendig, bereits bestehende Indikatorensysteme näher zu beleuchten und ihre Relevanz für die vorliegende Forschungsarbeit zu diskutieren, um im Anschluss eine fundierte Auswahl an Indikatoren vornehmen zu können.

1.2.3 Bestehende Indikatorensysteme im Energiebereich

Indikatoren, als Messinstrumente eines bestimmten Zustandes, werden auch im Energiebereich häufig verwendet. Deshalb sei vorweg genannt, dass die Betrachtung bestehender Indikatorensysteme nicht auf eine vollständige Erörterung aller Systeme ausgerichtet ist. Zum einen lässt die Fülle an unterschiedlichen Indikatorensystemen (vgl. hierzu Patlitziyas et al. 2008) dieses nahezu unmöglich erscheinen, zum anderen erweisen sich gerade Indikatorensätze für eine internationale Bestandsaufnahme zur Analyse von Energietechnologien oftmals als ungeeignet. Für die angestrebte Technologiebewertung im Rahmen dieser Arbeit sollen relevant erscheinende Indikatorensysteme mit Fokus auf den deutschen Sprachraum gezielt ausgewählt und analysiert werden, um aufbauend auf dieser Grundlage eine Zusammenstellung von Indikatoren für den Zweck der regionalen Technologiebewertung unter Nachhaltigkeitsaspekten zu entwickeln.

Die inhaltliche Zielsetzung einer Studie bestimmt dabei, ob ihr Indikatorenset als Teil des untersuchten Korpus in Betracht kommt. Mindestens eine Zielsetzung, nämlich ein Nachhaltigkeitsbezug²⁷, eine Technologiebewertung, eine regionale Betrachtungsweise oder eine Kombination davon wird vorausgesetzt. Mit einer umfassenden Literaturrecherche können

²⁷ Den gewählten Systemen dürfen unterschiedliche konzeptionelle Nachhaltigkeitsverständnisse zu Grunde liegen.

ausgehend von diesen Anforderungen neben der Indikatorenliste des HGF-Projektes zwölf weitere, sich teils überschneidende Indikatorensets identifiziert werden. Sie bilden die Grundlage für das anschließende Auswahlverfahren.²⁸

1. Kopfmüller et al. (HGF, 2000)

Die Indikatoren des HGF-Ansatzes beziehen sich auf eine nachhaltige Energieversorgung, weisen jedoch eine überwiegend nationale und nur teils eine regionale Fokussierung auf. Ihr inhaltlicher Schwerpunkt ist auf die strukturelle Beschreibung und Evaluation von gesamten Energieversorgungssystemen zumeist eben auf nationaler Ebene ausgerichtet. Diese ambitionierte Zielsetzung drückt sich auch in der hohen Anzahl an vorgestellten Einzelindikatoren aus (vgl. Kopfmüller et al. 2000, S. 42ff.). Eine Zusammenstellung der vorgeschlagenen Indikatoren findet sich auch bei Fishedick & Nitsch (2002, S. 15ff.), welche ergänzend in der Indikatorenanalyse berücksichtigt wird.

2. dos Santos Bernardes et al. (IER, 2002)

Der Forschungsbericht „Grundlagen zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen in Baden-Württemberg“ beschäftigt sich dezidiert mit dem Nachhaltigkeitskonzept und zeigt einen Weg auf, mittels quantitativer Indikatoren den Nachhaltigkeitszustand eines Energiesystems zu messen (vgl. dos Santos Bernardes et al. 2002, S. 11f.). Bei den durchgeführten Lebenszyklusanalysen werden neben regenerativen Energien auch fossile und nukleare Erzeugungsformen evaluiert. Das entstandene Indikatorensystem zur Bewertung von Energietechniken umfasst 17 Indikatoren, welche anhand der Nachhaltigkeitsdimensionen Ökologie, Ökonomie und Sozial unterteilt sind (vgl. ebs. 2002, S. 43)

3. Enquete-Kommission (2002)

Die Enquete-Kommission des 14. Deutschen Bundestages hat das Indikatorensystem SIENA (Standard-Indikatoren für Energie und Nachhaltigkeit) entwickelt, um den Nachhaltigkeitsgrad von Situationen und Prozessen im Energiebereich bewerten zu können, bzw. den relativen Beitrag einzelner technischer oder ökonomischer Optionen zu einer nachhaltigen Entwicklung vergleichbar zu machen (vgl. Enquete-Kommission 2001, S. 42ff.). Wie die Zielsetzung der Studie bereits verdeutlicht, steht im Fokus dieses Indikatorensets die Bewertung von Energiesystemen und Energieversorgungsstrukturen, weniger die direkte Technologiebewertung. Das Indikatorenset umfasst die ökologische, die ökonomische und die soziale Nachhaltigkeitsdimension.

4. Fleury (2005)

In dieser Forschungsarbeit wird das Ziel verfolgt, ein entscheidungsunterstützendes Werkzeug zu entwickeln, welches zur Ausarbeitung einer geeigneten Nachhaltigkeitsstrategie im Energiesektor dient (vgl. Fleury 2005, S. 2). Ähnlich zur vorliegenden Forschungsarbeit werden aus einer grundlegenden Definition von Nachhaltigkeit systematisch Kriterien und Indikatoren abgeleitet. Die Evaluierung ist auf die Erfassung von Nachhaltigkeit am Energiesektor auf nationaler Ebene, also eines Energiesystems und nicht auf eine konkrete

²⁸ Mit der Auswahl dieser Indikatorenssysteme für den Energiebereich versucht der Autor die Bandbreite an unterschiedlichen Zielsetzungen der Indikatorenssysteme sowie die differenzierten räumlichen Bezugsebenen abzudecken, ohne damit einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.

Technologie ausgerichtet. Wegen der Bezüge zur Nachhaltigkeit und zu einem festgelegten Raum findet die Indikatorenliste Berücksichtigung.

5. Heimann (2001)

Die Methodik zur technisch-ökologischen Bewertung von regenerativen Energiesystemen von Heimann (2001, S. 10) hat zum Ziel eine objektive Beurteilung verschiedener Energieumwandlungsvarianten mit Blick auf die Technik, Ökonomie und Ökologie zu gewährleisten. Diese Vorgehensweise hebt einen regionalen Aspekt hervor, in dem optimale Energieversorgungssysteme für die jeweilige Region gesucht und Energieumwandlungssysteme "*standort- bzw. regionalspezifisch*" (Heimann 2001, S. 11) begutachtet werden. Verschiedene Einflussgrößen sind zu Beurteilungskriterien zusammengefasst, die wiederum den Indikatoren entsprechen.

6. Hirschberg et al. (PSI, 2008)

Das Paul Scherrer Institut (PSI) beschäftigt sich umfassend mit der Technologiebewertung im Energiebereich und hat unter dem Namen "*Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen*" (GaBE) (vgl. EnergieSpiegel 2000, S. 1ff.) eine Methodik zur systematischen Beurteilung von Energieformen bezüglich Nachhaltigkeit publiziert. Aufbauend auf diesem Indikatorenkatalog sind zahlreiche Studien entstanden (siehe hierzu auch Punkt 10). Das Bewertungsverfahren des PSI wird ständig weiterentwickelt, was durch präzise Quantifizierungsverfahren sowie ausdifferenzierten Indikatoren und Indexbildungsverfahren zum Ausdruck kommt (vgl. exemplarisch Schenler et al. 2009 / EnergieSpiegel 2010) Analysiert wird das Indikatorenset von Hirschberg et al. (2008, S. 29ff.).

7. Marheineke (2002)

Diese Indikatoren entstammen nicht primär der Verbindung von Energiesektor und Nachhaltigkeit sondern beziehen sich auf die ganzheitliche Bilanzierung von Energie- und Stoffströmen verschiedener Energieversorgungstechniken. Diese werden als Ökobilanzen oder Lebenszyklusanalysen bezeichnet und erlauben vor allem einen technischen Vergleich (vgl. Marheineke et al. 2000, S. 1f.). Die verwendeten Wirkungsindikatoren (vgl. Marheineke 2002, S. 43) werden den Nachhaltigkeitsindikatoren der vorliegenden Arbeit gleichgesetzt.

8. Möller (BTU, 2004)

Die an der BTU Cottbus entwickelte Methode zur Gesamtbewertung erneuerbarer Energien hat zum Ziel energiewirtschaftliche und energiepolitische Entscheidungsprozesse mit Fakten zu unterlegen (vgl. Möller 2004, S. 80). Dazu wird ein "*durch Kennziffern gestützter Vergleich*" (Kalina et al. 2005, S. 467) verschiedener Versorgungsvarianten angestrebt. Die Kennziffern entsprechen den Indikatoren der vorliegenden Arbeit. Sie sind bei Möller (2004, S. 85f.) als Bewertungskriterien publiziert und definitorisch erläutert sowie mit geringen Abweichungen auch bei Kalina et al. (2005, S. 468) tabellarisch aufgelistet.

9. Nitsch et al. (2001)

Die Studie "*Schlüsseltechnologie Regenerative Energien*" von Nitsch et al. (2001) entstand im Umfeld des HGF-Projektes und besitzt mit der top-down-Vorgehensweise große strukturelle Übereinstimmung. Jeder Regel des integrativen Nachhaltigkeitskonzeptes werden Leitindikatoren und weitere Indikatoren zugewiesen, wodurch ein sehr umfangreicher Indikatorenkatalog entsteht (vgl. Nitsch et al. 2001, S. 286/287).

10. Petrovic & Wagner (2006)

Die Technikbewertung aus dem Forschungsprojekt „*Nachhaltigkeit am Beispiel regenerativer Energiesysteme zur Stromerzeugung*“ von Petrovic & Wagner (2005 & 2006) hat ebenfalls nachhaltige Entwicklung als Anknüpfungspunkt gewählt und stimmt sowohl hinsichtlich der Bestrebung als auch der Strukturierung mit der vorliegenden Arbeit überein. Anhand sieben ausgewählter Indikatoren erfolgt eine Bewertung von Technologieoptionen.

11. Pretre et al. (ILK Stellungnahme 2004²⁹)

Die Stellungnahme der Internationalen Länderkommission Kerntechnik (ILK) geht ebenfalls davon aus, dass alle relevanten Erzeugungsoptionen „*mittels einer systematischen und umfassenden Betrachtungsweise methodisch vergleichbar bewertet werden müssen*“. (Pretre et al. 2004, S. 4) Hierzu bedient sich die ILK einem Indikatorenset, welches sich auf die Untersuchungen des Paul Scherrer Instituts (PSI) und dessen Indikatorenkatalog in der Studie "*Sustainability of Electricity Supply Technologies under German Conditions: A Comparative Evaluation*" (vgl. Hirschberg et al. 2004, S. 39) bezieht. Die Indikatoren werden dem deutschen Wortlaut folgend aus der ILK Stellungnahme (Pretre et al. 2004, S. 8) übernommen.

12. Walter et al. (BFE / ECOPLAN, 2001)

Die im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Energie (BFE) und von ECOPLAN durchgeführte Studie "*Nachhaltigkeit: Kriterien und Indikatoren für den Energiebereich*" setzt sich zum Ziel, ein quantitatives Indikatorensystem zu entwickeln, mit dem die Nachhaltigkeit der Energiepolitik sowie der Energieversorgung und -nutzung erfasst werden kann (Walter et al. 2001, S. 1). In Anlehnung an internationale und nationale energiebezogene Nachhaltigkeitsindikatoren entsteht eine detaillierte Zusammenstellung aus 27 Kriterien und 60 zugeordneten Indikatoren (vgl. ebs. 2001, S. 128-130).

13. Wietschel, Enzensberger & Dreher (2002)

Ziel dieser Ausarbeitung ist es, Politikempfehlungen für das Umsetzen nachhaltiger Entwicklung am Energiesektor zu geben. Dazu wird ein achtstufiger Prozess, beginnend bei der Definition von Nachhaltigkeit mit anschließender Übertragung auf das Aktionsfeld Energieversorgung bis zur Konkretisierung (Indikatoren) und der quantitativen Festlegung von Zielwerten sowie der Festlegung eines Maßnahmenbündels, durchgeführt (vgl. Wietschel et al. 2002, S. 26).

Die Indikatorensets der genannten Arbeiten bilden die Grundlage für das weitere Auswahlverfahren, d.h. es werden nicht die Studien und Forschungsberichte an sich sondern nur mehr deren Indikatorenkataloge analysiert. Mit einer Selektion darin vorgegebener Indikatoren kann eine zielgerichtete und problemorientierte Konzipierung eines Indikatorensets für das Konzept doppelter Nachhaltigkeit gelingen. Eine derartige intentionsbezogene Auswahl von Indikatoren wird vereinzelt in den Arbeiten selbst gefordert, indem sie mit ihren Indikatorensets einen Fundus vorgeben, aus welchem für die jeweilige Anwendung gezielt Indikatoren zu wählen sind. Die Auswahl an Indikatoren ist dabei stets eine wertbehaftete und subjektive Entscheidung. Um diese Entscheidung zu

²⁹ Zitiert nach dem Vorsitzenden der ILK 2004.

objektivieren, orientiert sich das Auswahlverfahren einerseits an den erwähnten Nachhaltigkeitsstudien und schlägt andererseits ein vierstufiges Auswahlverfahren vor.

1.2.4 Auswahl von Indikatoren

Das Auswahlverfahren hat zum Ziel, mit Hilfe der dreizehn beschriebenen Indikatorensysteme einzelne Messgrößen zu benennen, die eine praktikable Nachhaltigkeitsbewertung von Energietechnologien in einem regionalen Kontext ermöglichen. Die Vorgehensweise beruht dabei auf vier Stufen, beginnend bei einer Eignungsprüfung aller Indikatoren hinsichtlich der Zielsetzung einer Technologiebewertung. Daran anschließend erfolgt eine inhaltliche Gruppierung, um die Relevanz einzelner Indikatoren zu erörtern. Im dritten Schritt werden die zuvor ermittelten Indikatorengruppen den übergeordneten Leitlinien zugewiesen. Abschließend sind die Gruppen zu beschreiben und einzelne Indikatoren konkret zu definieren.

Im Rahmen der Eignungsprüfung der Indikatoren wird davon ausgegangen, dass durch die dreizehn gewählten Indikatorenkataloge ein umfassendes und ausreichendes Spektrum an Indikatoren vorgegeben ist, weshalb es nicht notwendig erscheint, neue Indikatoren selbst zu benennen. Neben den grundsätzlichen Anforderungen an einen Indikator bzw. ein Indikatorensystem (vgl. u.a. Kopfmüller et al. 2000, S. 42ff. / Fishedick & Nitsch 2002, S. 14f. / Möller 2004, S. 84 / Hirschberg et al. 2008, S. 6) ist es in diesem ersten Schritt die Aufgabe, jeden einzelnen Indikator zu prüfen, ob er für die Technologiebewertung geeignet ist und Aussagekraft für verschiedene Technologien hat. Ein Beispiel für einen Indikator, der für die Technologiebewertung nicht in Frage kommt, in den analysierten Arbeiten aber mehrmals genannte wurde, ist der Indikator „*Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergie-, Endenergie- oder Stormverbrauch*“. Dieser Indikator gibt Auskunft über den quantitativen Einsatz von erneuerbaren Energien in einem Energiesystem und lässt einen regionalen bzw. nationalen Vergleich dieser Systeme zu. Für die Technologiebewertung fehlt ihm jedoch der Bezug zu einer einzelnen Energieform und somit die Aussagekraft. Mittels einer derartigen Plausibilitätsprüfung hinsichtlich des Beitrages für eine Technologiebewertung können bereits vor Beginn der Gruppierung erste Indikatoren ausgeschlossen werden.

Im zweiten Schritt werden alle verbliebenen Indikatoren der dreizehn analysierten Untersuchungen aufgelistet und ihrer Intention und ihrem Inhalt entsprechend gruppiert. D.h. in den Studien genannte Indikatoren, die denselben bzw. einen ähnlichen Sachverhalt (bezogen auf die Intention) messen, dies aber auf Grundlage unterschiedlicher Werte, Einheiten oder Bezugsgrößen tun, werden zu Indikatorengruppen zusammengefasst. Ein Beispiel für eine Indikatorengruppe ist der „*Flächenbedarf*“. Diese Thematik wird in neun der dreizehn analysierten Arbeiten angesprochen,

dabei aber auf unterschiedlich definierte Indikatoren verwiesen.³⁰ Die inhaltliche und intentionale Gruppierung von Indikatoren soll Aufschluss über ihre Relevanz geben und zentrale Bereiche zur Messung von Nachhaltigkeit bei Energietechnologien aufzeigen. Es wird erörtert, in wie vielen Studien der Sachverhalt der jeweiligen Indikatorengruppe thematisiert ist.

Im Anschluss an die Gruppierung der Indikatoren erfolgt eine Ordnung der Indikatorengruppen anhand der übergeordneten sechs Leitlinien. Damit werden die Nachhaltigkeitsbezüge aufgebaut. Meist sind diese Bezüge bereits aus den analysierten Arbeiten vorgegeben, indem die einzelnen Indikatoren selbst bereits auf Nachhaltigkeitsaspekte hinweisen. Das Bewertungsmodell mit seinen sechs Leitlinien wird durch die Indikatorengruppen weiter konkretisiert.

Sowohl die inhaltliche Gruppierung der Indikatoren als auch die Zuordnung zu den Leitlinien gestalten sich teils schwierig. Bezüglich der Gruppierung sind die Heterogenität der Indikatoren sowie deren Vielzahl dafür ursächlich; die Summe aller genannten Indikatoren in den untersuchten Studien beträgt 441. Die eindeutige Zuordnung von Indikatoren(-gruppen) zu den sechs gewählten Leitlinien wird erschwert, da einige Indikatoren mehrere Leitlinien tangieren. Dennoch wird in beiden Fällen auf eine inhaltlich stimmige Gruppierung sowie auf eine klare Zuteilung geachtet. Das Ergebnis ist in Tabelle 2 dargestellt. Dort sind die Indikatorengruppen, die sich als relevant ausgezeichnet haben, mit ihrer Zuordnung zu den jeweiligen Leitlinien aufgelistet. Die Relevanz einer Indikatorengruppe bemisst sich an der Häufigkeit, mit der entsprechende Indikatoren in den analysierten Studien genannt sind. Listet eine Studie zwei Indikatoren mit gleicher Intention aber unterschiedlicher Bezugsgröße oder Einheit auf – in Tabelle 2 gekennzeichnet durch eine Zahl im Feld der jeweiligen Indikatorgruppe und zugehöriger Studie – wird dies allerdings nur als eine Nennung berücksichtigt. Zusätzlich sind in Tabelle 2 für jede Indikatorengruppe mögliche Unterteilungen angegeben. Diese vermitteln einen Eindruck über die Bandbreite an Indikatoren jeder Gruppe und geben Rückschluss auf die Vorgehensweise der inhaltlichen Gruppierung.

³⁰ Indikatoren die der Thematik des Flächenbedarfes zugeordnet werden, sind (in Klammern steht die Nummer der Studie): (1) Flächennutzung bzw. Flächenmodifikation, (3) Flächeninanspruchnahme durch das Energiesystem, die eine andere Nutzung ausschließt oder eine andere Nutzung beeinträchtigt, (4) genutzte Fläche, (5) Flächenbedarf, (8) spezifischer Betriebsflächenbedarf, (9) Flächenversiegelung und Flächenmodifikation für Energienutzung, -wandlung und -verteilung, (10) spezifische Flächeninanspruchnahme, (11) Landverbrauch und (13) bebaute bzw. überbaute Fläche von Erzeugungs-, Übertragungs- und Verteilungsanlagen.

Dem Autor ist bewusst, dass eine Indikatorengruppe jeweils unterschiedliche Indikatoren beinhalten kann. Ausschlaggebend für die Gruppierung ist allerdings die Intention eines Indikators. Wie die verwendeten Indikatoren schlussendlich definiert und quantifiziert sind, wird in den Erläuterungen zum Indikatorenset (Kapitel V 1.2.5) sowie im empirischen Teil der Arbeit (Kapitel VI 4.2) näher ausgeführt.

Tabelle 2: Auflistung der als besonders relevant identifizierten Indikatorengruppen

| Indikatorgruppe | analysierte Studie | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|
| Ressourcenschonung | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | Abfallaufkommen, nicht radioaktiv Absolutes oder spezifisches Abfallaufkommen Mögliche Unterteilung nach Abfallart (toxisch, nicht toxisch, nicht radioaktiv, Sondermüll) und Abfallherkunft (Haus-, Produktions-, Bau- oder Entsorgungsfall) | 2 | 3 | 2 | | | 1 | | | 2 | | 1 | | 1 |
| 2 | Energieaufwand Absoluter oder spezifischer kumulierter Energieaufwand Mögliche Unterteilung nach Energieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas, Uran, nicht-erneuerbar, erneuerbar) | 1 | 1 | 1 | | 1 | 2 | 1 | | 1 | 1 | | | 1 |
| 3 | Flächenbedarf Absoluter oder spezifischer Flächenbedarf Mögliche Unterteilung nach Art der Nutzung (Versiegelung, Modifikation oder Nutzungseinschränkung) | 2 | | 2 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 |
| 4 | Materialeinsatz, nicht energetisch Absoluter oder spezifischer kumulierter Materialaufwand Mögliche Unterteilung nach Materialien (z.B. Aluminium, Eisen, Kupfer, Glas oder Zement) | 2 | 3 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 1 |
| Umwelt-, Klima- und Gesundheitsverträglichkeit | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | Abfallaufkommen, radioaktiv belastet Absolutes oder spezifisches Abfallaufkommen oder Emissionen Mögliche Unterteilung nach Abfallbelastung (stark, gering oder nicht wärmeentwickelnder Abfall) | 1 | 2 | 2 | 1 | | 1 | | | 1 | | | 2 | |
| 6 | Eutrophierung Absolute oder spezifische Emissionen (life cycle) Mögliche Unterteilung nach Stoffen (NO _x , NH ₃) | 2 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 1 |
| 7 | Gesundheitsrisiken Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit Mögliche Unterteilung nach Art der Beeinträchtigung (Verlorene Lebensjahre / Lebensjahre mit gesundheitlicher Beeinträchtigung) | | 1 | 1 | | 1 | 2 | 2 | | | | 1 | | |
| 8 | Treibhausgasemissionen Absolute oder spezifische Emissionen (life cycle) Mögliche Unterteilung nach Stoffen (Kyoto Korb, CO ₂ , CH ₄), meist ausgedrückt in CO ₂ -Äquivalenten | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 |
| 9 | Versauerung Absolute und spezifische Emissionen Mögliche Unterteilung nach Stoffen (NO _x , SO ₂ , NH ₃), meist ausgedrückt in SO ₂ -Äquivalenten | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 |
| Bedarfsgerechte Nutzungsqualität und dauerhafte Versorgungssicherheit | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | Abhängigkeit von Energieimporten & geopolitische Faktoren Importanteil von Energieträgern / Qualität der Lieferbeziehungen Mögliche Unterteilung nach Energieträgern (Kohle, Erdöl, Erdgas, Uran) oder nach Einheit (Menge, Preise, Bilanzierungssaldo) Bewertung politischer Stabilität von Lieferländern, bilateraler Beziehungen und geopolitischer Faktoren | 4 | | 1 | | | 1 | | | | 3 | 1 | 1 | 3 |
| 11 | Versorgungszuverlässigkeit Technische und angebotsseitige Versorgungszuverlässigkeit Mögliche Unterteilung nach Ursache eines Stillstandes einer Technologie (planmäßig, unplanmäßig, Störung, Angebotsschwankung) | | | 1 | | 2 | 1 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | |
| Risikoarmut und Fehlertoleranz | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | Schadensausmaß eines Unfalls Maximale Konsequenzen eines Unfalls Mögliche Unterteilung nach Art des Unfalls (typischer oder großer) | 1 | | 1 | | | 2 | | | 1 | | 2 | | 1 |
| Soziale Verträglichkeit | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | Arbeitskräftebedarf Absoluter oder spezifischer Arbeitskräftebedarf Mögliche Unterteilung nach der Art der Tätigkeit (Herstellung, Betrieb, Erhaltung, Stilllegung oder Entsorgung einer Anlage oder Erbringung einer Energiedienstleistung) und Beschäftigungseffekt bei einer Veränderung des Energiesystems | 2 | | 2 | 1 | | 1 | | 3 | 1 | 1 | 1 | | 1 |
| Umfassende Wirtschaftlichkeit | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | Kosten der Energiebereitstellung Absolute oder spezifische Kosten Mögliche Unterteilung in Gesteungskosten oder Kosten für bestimmte Aufgaben (Herstellung, Betrieb oder Entsorgung) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 3 | 2 | 1 | 1 | | 2 |

Die Voraussetzung zur Aufnahme in das Indikatorenset besteht bei sechs und mehr Nennungen, also der Nennung eines entsprechenden Indikators in nahezu der Hälfte an analysierten Studien. Mit dieser Vorgabe wird einerseits die Zahl an Indikatorengruppen auf vierzehn beschränkt und andererseits gewährleistet, dass jeder übergeordneten Leitlinie mindestens eine Indikatorengruppe zugewiesen werden kann. Die Indikatorenanzahl ist ein wichtiges Kriterium bei der Erstellung eines Indikatorensets. So soll die Bandbreite an Indikatoren möglichst alle nachhaltigkeitsrelevanten Aspekte wiedergeben, dies jedoch in übersichtlicher Weise tun, weshalb gleichzeitig eine begrenzte Zahl an Indikatoren anzustreben ist. Eine überschaubare Indikatorenanzahl gewährleistet zudem, dass die Analyse in kurzen Zeitabständen wiederholbar ist und die Indikatoren neben der Situations- auch eine Entwicklungsbeschreibung, im Sinne von Wiederholungen, zulassen. Diese Eigenschaft hat besonders im Energiebereich Bedeutung, da durch stetige Technologieentwicklung permanent neue und/oder verbesserte Erzeugungsformen erfunden werden. Neue und bessere Technologien können die zukünftige Ausgestaltung einer regionalen nachhaltigen Energieversorgung stark beeinflussen, weshalb diese Veränderungen schnell in die Modellierung integrierbar sein müssen. Weitere Indikatorengruppen, auf die weniger als sechs aber dennoch mehrere Nennungen entfallen, sind die Gruppe der *„Reichweite energetischer Rohstoffe“* mit fünf Nennungen sowie mit jeweils vier Nennungen die Bereiche *„Externe Kosten der Energieversorgung“*, *„Nutzungsrate von Biomasse“*, *„Partikel- und Staubemissionen“*, *„visuelle Beeinträchtigung“*, und *„Schallemissionen“*. Alle übrigen Indikatoren konnten entweder zu Indikatorengruppen mit maximal drei Indikatorenennungen oder zu keiner Gruppe zusammengefasst werden.

Die Zusammenstellung eines Indikatorensets anhand bereits publizierter Studien bedingt, dass alle gewählten Indikatoren zur Messung von Nachhaltigkeit am Energiesektor bereits verwendet werden. Da die bisher identifizierten Indikatorengruppen intentional und inhaltlich übereinstimmen, die Indikatoren sich aber hinsichtlich der exakten Definition unterscheiden können, wird im vierten Schritt durch eine kurze Beschreibung der Indikatorengruppen geklärt, ob zum einen die Operationalisierung der einzelnen Nachhaltigkeitsleitlinien durch die vorgeschlagene Gruppenauswahl einschlägig ist und zum anderen welche Indikatoren schließlich für die jeweiligen Indikatorengruppen zu wählen sind. Eingang in das hier entwickelte Indikatorensystem finden schlussendlich diejenigen Indikatoren, die die Indikatorengruppe adäquat repräsentieren und mit Blick auf die praktische Anwendung des Modells eine Quantifizierung zulassen.

1.2.5 Erläuterungen zu den Indikatorengruppen

Das entwickelte Indikatorenset umfasst vierzehn Indikatoren, die den sechs Leitlinien zugeordnet sind. Vier Indikatoren sind der Leitlinie *„Ressourcenschonung“*, fünf der Leitlinie *„Umwelt-, Klima-*

und Gesundheitsverträglichkeit“ und zwei der Leitlinie „Bedarfsgerechte Nutzung und dauerhafte Versorgungssicherheit“ zugeordnet, die übrigen drei Leitlinien sind jeweils durch einen Indikator konkretisiert. Im Anschluss wird die Relevanz der Indikatorengruppen im Hinblick auf Nachhaltigkeit dargelegt sowie die Aussagekraft ihrer zugeordneten Indikatoren beschrieben. Die Definitionen beziehen sich auf die einschlägige und bereits zur Zusammenstellung des Indikatorensets verwendete Literatur. Weiterführende Angaben sind der zusätzlich zitierten Literatur zu entnehmen. Im empirischen Teil dieser Arbeit wird die Quantifizierung der Indikatoren näher ausgeführt.

Indikatorgruppe 1: Abfallaufkommen nicht radioaktiv

Das nicht radioaktive Abfallaufkommen ist der Leitlinie Ressourcenschonung zugewiesen, da dessen Höhe teils auch Rückschlüsse auf die in Anspruch genommenen Ressourcen zulässt. Abfälle entstehen bei der Erstellung einer Anlage, bei dessen Betrieb und deren Entsorgung. Das Abfallaufkommen ist dabei sehr heterogen und kann hinsichtlich der Abfallart, der Stoffzusammensetzung und der Toxizität weiter klassifiziert werden. So ist z.B. zwischen Haus- und Produktionsabfälle, Bauabfälle oder Sonderabfälle zu unterscheiden, weshalb sich verschiedene Einzelindikatoren ergeben. Ein Indikator zur Messung der Menge an toxischen Abfällen, z.B. in Form von Sondermüll, wäre ebenso der Leitlinie Umwelt-, Klima und Gesundheitsverträglichkeit zuzuordnen, wobei neben dem reinen Abfallaufkommen auch dessen Toxizität zu berücksichtigen ist, um Folgen für die Umwelt beurteilen zu können. Aufgrund der Handhabbarkeit des Indikators wird jedoch darauf verwiesen, dass eine detaillierte Differenzierung von Abfällen als wenig sinnvoll erscheint (vgl. Kopfmüller et al. 2000, S. 45 / Petrovic & Wagner 2006, S. 123). Unabhängig davon, welche Abfallmenge konkret zur Bewertung herangezogen wird, lässt die häufige Nennung in den analysierten Studien auf eine große Relevanz bei der Beurteilung von Technologien schließen. Ein Vergleich der Erzeugungsformen wird durch die spezifische Angabe von Abfallmenge je produzierter Stromeinheit ($\text{kg/kWh}_{\text{el}}$) erreicht.

Indikatorgruppe 2: Energieaufwand

Der kumulierte Energieaufwand (KEA) ist eine Maßzahl für den gesamten primärenergetisch bewerteten Aufwand zur Bereitstellung, d.h. Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Produktes oder einer Dienstleistung (vgl. VDI 1997, S. 4), wobei aufgrund besserer Aussagekraft und Transparenz zwischen dem regenerativen, nicht-regenerativen (fossil, nuklear) und anderem (z.B. thermische Abfallbeseitigung) Energieverbrauch unterschieden werden kann. Bei der Bewertung von Energietechnologien umfasst der KEA folglich alle Energieumsätze, die der Herstellung, dem Betrieb und dem Rückbau der Anlage zugrunde liegen (vgl. Petrovic & Wagner 2006, S. 115f.). Alle drei Bereiche sind durch die VDI Richtlinie 4600, welche für den KEA einschlägig ist, weiter spezifiziert (vgl. VDI 1997, S. 5).

Der KEA dient je nach Berechnungsmethodik einerseits als Screening-Größe zur Abschätzung von Umweltwirkungen und andererseits der Quantifizierung des Verbrauches an endlichen Energieträgern (vgl. Marheineke 2002, S. 70f.). Beides sind wesentliche Bereiche einer nachhaltigen Entwicklung, weshalb der KEA einen möglichst geringen Wert annehmen soll. Kritisch wird hierbei jedoch angemerkt, dass zum einen die Richtungssicherheit bei Umweltwirkungen nicht eindeutig ist (eine Reinigung von Abgasen eines Kohlekraftwerkes führt zu einem erhöhten KEA aber zu einer geringeren Umweltbelastung) und zum anderen weder physische noch ökonomische Knappheiten von Rohstoffen berücksichtigt werden (vgl. Marheineke 2002, S. 72). Der KEA wird stets als spezifische Größe mit Bezug auf eine produzierte Energieeinheit ausgedrückt (z.B. kWh/kWh_{el}), um eine aussagekräftige Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Technologien zu ermöglichen.

Indikatorgruppe 3: Flächenbedarf

Jede Form der Energiebereitstellung beansprucht eine gewisse Fläche, welche sowohl aus ökonomischer wie auch aus ökologischer Perspektive als knappes Gut gilt und folglich im Sinne der Nachhaltigkeit möglichst klein sein soll. Bei der Bewertung von Energietechnologien versteht man unter Flächeninanspruchnahme die „*raum-zeitliche Inanspruchnahme von Flächen durch Bauwerke und im Rahmen von Prozessen.*“ (Petrovic & Wagner 2006, S. 126) Dies können Flächen zur Installation der Energieanlage selbst, Flächen für Sicherheitsabstände oder Flächen zur Gewinnung von Rohstoffen sein, die sich nicht unmittelbar am Kraftwerksgelände oder in dessen Nachbarschaft befinden müssen. Aufgrund dieser verschiedenen Varianten sind die beeinträchtigten Flächen sowohl hinsichtlich der Nutzungsdauer, der Nutzungsintensität und der Flächenwertigkeit weiter zu klassifizieren (vgl. Heimann 2001, S. 44f.). Eventuelle Veränderungen des Landschaftsbildes, die in ihrer Wahrnehmung häufig von subjektiven Empfindungen geprägt sind, werden mit diesem Indikator nicht erfasst. Der besseren Vergleichbarkeit wegen wird der Indikator wiederum als spezifische Größe angegeben. Er errechnet sich aus dem gesamten, gegebenenfalls verschieden klassifizierten Flächenbedarf dividiert durch die Nettostromerzeugung während der technischen Nutzungsdauer (m²/kWh).

Indikatorgruppe 4: Materialeinsatz nicht energetisch

Der nicht energetische Materialeinsatz betrifft die Leitlinie der Ressourcenschonung und leitet sich aus der Forderung ab, nachfolgenden Generationen eine gleichgroße (absolut) bzw. gleichwertige (technische und wirtschaftliche) Ressourcenbasis zur Verfügung zu stellen. Der Einsatz sollte daher möglichst gering sein. Weiterhin ist auch der ökologische Aspekt zu nennen, da die Gewinnung von Rohstoffen Auswirkungen auf die Abbauregion mit häufig negativen Umweltwirkungen hat.

Als spezifische Angabe, bezogen auf die Nettostromproduktion (kg/kWh_{el}), gibt die Materialintensität im Unterschied zum KEA an, wie viele nicht energetische Rohstoffe zur Produktion einer

Energieeinheit eingesetzt werden müssen. Hierbei ist die gesamte nicht energetische Materialaufwendung, d.h. sowohl bei der Herstellung der Energieanlage als auch bei deren Betrieb, zu beachten. Die Materialintensität ist somit eine Kenngröße zur Darstellung des Umgangs mit Ressourcen bei der Energiebereitstellung (vgl. Heimann 2001, S. 43). Die bilanzierten Materialien sind nach ihrer jeweiligen Beschaffenheit (abiotisch, biotisch, mineralisch) oder nach einzelnen Materialien (Kupfer, Stahl, Zement ...) zu differenzieren. Diese gesonderte Beachtung verschiedener Stoffe führt dazu, dass der Bereich Materialintensität weiter in einzelne Indikatoren unterteilt werden kann. Um dennoch aussagekräftige Vergleiche zu erhalten, sollte sich die Evaluierung auf, für den Energiebereich wichtige Stoffe wie Aluminium, Kupfer, Silizium, Stahl und Zement beschränken oder sogar durch einen Gesamtwert ausgedrückt werden. Ressourcenschonende Energietechnologien sind dabei durch einen geringen Materialintensitätswert gekennzeichnet.

Indikatorgruppe 5: Radioaktive Abfälle

Die Menge an radioaktiven Abfällen aus der Bereitstellung von Energiedienstleistungen gibt einen Anhaltspunkt zum umweltspezifischen und gesundheitlichen Gefährdungspotenzial von Energietechnologien, wenn auch weitergehende Untersuchungen im Einzelfall hier zwingend notwendig sind. Radioaktive Abfälle entstehen vor allem bei der Nutzung von Kernenergie sowie der Bereitstellung, Wiederaufbereitung und Entsorgung von Brennelementen. Auch bei der Förderung von Erdöl, Erdgas und Kohle treten radioaktive Abfälle auf, wohingegen erneuerbare Energien im Betrieb keine radioaktiv belasteten Abfälle produzieren (vgl. Petrovic & Wagner 2006, S. 80). Der Indikator berücksichtigt allerdings auch die Mengen an radioaktivem Abfall, die während des Produktionsprozess (Bau und Errichtung) entstehen.

Radioaktive Abfälle sind nach ihrer Wärmeentwicklung in Stoffe mit starker und vernachlässigbarer Wärmeentwicklung zu differenzieren (vgl. Enquete 2001, S. 47), wobei erstere bei der Wiederaufbereitung von spaltbarem Material und durch verbrauchte Brennelemente entstehen und zweitere aus dem Betrieb und der Stilllegung von Kernkraftwerken sowie der Wiederaufbereitung umfassen (Petrovic & Wagner 2006, S. 78). Das Aufkommen an radioaktiven Abfällen wird in Kubikmetern oder Kilogramm gemessen. Mit Bezug auf die Nettostromproduktion ergibt sich $\text{m}^3/\text{kWh}_{\text{el}}$ bzw. $\text{kg}/\text{kWh}_{\text{el}}$ als Indikatoreinheit. Aufgrund eines technischen Störfalls freigesetzte Mengen an radioaktiven Emissionen und Substanzen sind durch den Indikator nicht erfasst.

Indikatorgruppe 6: Eutrophierungspotenzial

Als Eutrophierung bezeichnet man die Nährstoffübersättigung von Gewässern und Böden aufgrund häuslicher, gewerblicher und industrieller Abwässer bzw. durch Abschwemmen von Dünger aus landwirtschaftlichen Flächen (vgl. Leser 1997, S. 188). Dieser Prozess hat einen Anstieg der Biomasseproduktion zur Folge, was bei Gewässern zu starker Algenbildung und einem Umkippen des

Wassers und bei terrestrischen Ökosystemen zu einer Verschiebung des Artengleichgewichtes mit einhergehender Verringerung der Artenvielfalt führen kann (vgl. Marheineke 2002, S. 48). Das Eutrophierungspotenzial ist somit ein Indikator, der den ökologischen Aspekt der Nachhaltigkeit betrifft und deshalb auch der Leitlinie „Umwelt-, Klima und Gesundheitsverträglichkeit“ zugeordnet ist.

Der Beitrag einer Substanz zur Biomassebildung im Verhältnis zum Biomasse-Bildungspotenzial von Phosphat (PO_4^{3-}) als Referenzsubstanz ist das Eutrophierungspotenzial (vgl. Petrovic & Wagner 2006, S. 65). Zur Bewertung von Energietechnologien werden die wichtigsten Stoffe – hierzu zählen Stickstoff (N), Stickoxide (NO_x) und Ammoniak (NH_3) – direkt oder in PO_4^{3-} -Äquivalente umgerechnet mit Bezug auf die produzierte Nettoenergiemenge angegeben (kg PO_4^{3-} -Äquivalente/ kWh_{el} oder $\text{NO}_x/\text{kWh}_{\text{el}}$). Da sich ein gewisser Grad an z.B. Stickstoffemissionen durchaus positiv auf die Nährstoffversorgung einer Region auswirken kann, ist die Richtungssicherheit des Indikators nicht eindeutig gegeben (vgl. ebs., S. 67). Dennoch stellen die Emissionen künstliche Eingriffe in natürliche Ökosysteme dar, weshalb das Eutrophierungspotenzial aus Naturschutzgründen möglichst gering sein soll.

Indikatorgruppe 7: Gesundheitsrisiken

Unter dieser Indikatorengruppe sind alle Indikatoren subsumiert, die eine Bewertung von Risiken aus der Energiebereitstellung für die menschliche Gesundheit anstreben. Das Risiko kann dabei nicht direkt empirisch gemessen werden sondern muss durch eine Kennziffer ausgedrückt werden, die Rückschlüsse auf das Risiko zulässt (vgl. Petrovic & Wagner 2006, S. 150). Die am häufigsten verwendeten Maßzahlen sind „*verlorene Lebenserwartung*“ (Years of Life Lost, YOLL) und „*Lebenszeit mit beeinträchtigter Gesundheit*“ (Disability Adjusted Life Years, DALY) (vgl. hierzu WBGU 2003, S. 132). Bei YOLL handelt es sich um eine Veränderung der Lebenserwartung eines Bevölkerungskollektivs aufgrund von Auswirkungen aus der Energiebereitstellung (z.B. tödliche Krebserkrankungen aufgrund ionisierender Strahlung oder kanzerogen wirkenden Schadstoffen) (vgl. Marheineke 2002, S. 50). Die Angabe der Lebenszeit mit beeinträchtigter Gesundheit berücksichtigt nicht tödliche Krankheiten (z.B. Belastungen durch Schwefeldioxide), die jedoch Auswirkungen auf die Lebensqualität haben. Dies umfasst den Zeitraum gesundheitlicher Beeinträchtigung ausgedrückt in Jahren vor dem Hintergrund der statistischen Lebenserwartung (vgl. Petrovic & Wagner 2006, S. 152). Die Quantifizierung von Gesundheitsrisiken findet im Rahmen von Lebenszyklusanalysen statt, was bedeutet, dass auch mögliche Folgen während der jeweiligen Anlagenerstellung im Ergebnis enthalten sind. Die Indikatoren basieren auf Durchschnittswerten für eine Bevölkerungsgruppe, sind somit statistische Angaben und haben die Einheit Jahre (a).

Indikator 8: Treibhauspotenzial

Die Menge an Treibhausgasen in der Atmosphäre beeinflusst die Absorption von Wärmestrahlung und somit den Energiehaushalt der Erde. Je mehr solcher klimawirksamer Gase vorhanden sind, desto stärker steigt die globale Durchschnittstemperatur, was mit gravierenden Folgen für den Menschen und die Natur verbunden ist und generell mit dem anthropogen verursachten Klimawandel sichtbar wird (vgl. Kap. II 1.). Aufgrund der vielfältigen globalen wie regionalen Auswirkungen steht eine klimafreundliche bzw. klimaneutrale Energieversorgung weit oben auf der Agenda einer nachhaltigen Energieversorgung. Das Treibhauspotenzial (THP³¹) beschreibt die Wirksamkeit einer Anreicherung eines Spurengases in der Atmosphäre hinsichtlich der atmosphärischen Absorptionsfähigkeit in Bezug auf eine Referenzsubstanz. Den Treibhausgasen (THG) sind durch den IPCC spezifische Treibhausgaspotenziale für verschiedene Zeiträume, meist 100 Jahre, zugewiesen (vgl. hierzu Solomon et al. 2007, S. 210ff.). Wie bereits erwähnt ist CO₂ das am häufigsten emittierte Treibhausgas, weshalb die restlichen THG-Potenziale in CO₂-Äquivalenten je ausgestoßener Menge ausgedrückt und somit auf ihre Wirksamkeit in Relation zu CO₂ gewichtet werden.

Aussagen zur Klimaänderung, einzig gestützt auf das THP, sind wegen des komplexen Klimasystems nicht ausreichend. Eine Fülle an weiteren einflussreichen Parametern wie z.B. astronomische Parameter oder die Ozeanzirkulation sind zu beachten, um klimatologische Schlussfolgerungen treffen zu können (vgl. hierzu Jacobbeit 2007). Die exponierte Stellung von CO₂ in der Klimadiskussion sowie der hohe Beitrag des Energiesektors zu den globalen Treibhausgasemissionen sind ursächlich dafür, dass sich in dreizehn der vierzehn analysierten Arbeiten mindestens ein Indikator für diese Gruppe befindet. Die Erfassung klimarelevanter Emissionen im Energiebereich findet wiederum im Rahmen von Lebenszyklusanalysen mit der Berücksichtigung von vor- und nachgelagerten Prozessen (Abbau, Transport, Herstellung, Verteilung, ...) statt. Daten sowohl zu Energiesystemen als auch zu einzelne Technologien sind in einschlägigen Datenbanken bzw. Statistiken vorhanden. Die spezifische Einheit CO₂-Äquivalent je produzierter Stromeinheit (kg CO₂-Äquivalent/kWh_{el}) lässt einen Vergleich der verschiedenen Produktionsformen zu.

Indikator 9: Versauerungspotenzial

Versauerung bedeutet die Absenkung des pH-Wertes im Boden oder in Wässern durch den Eintrag versauernd wirkender Schadstoffe. Der pH-Wert wiederum gilt als Indikator für die „ökologischen Bedingungen von Standorten und den genetischen Zustand von Böden.“ (Leser 1997, S. 622) Durch einen vermehrten Säureeintrag können folglich sowohl terrestrische als auch aquatische Ökosysteme negativ beeinflusst werden (vgl. dos Santos et al. 2002, S. 37). Die tatsächliche Schadenswirkung von

³¹ engl.: GWP = global warming potential

versauernden Stoffen wird jedoch auch von der Bodenbeschaffenheit, der Sensitivität und der möglichen Abbaurate durch Organismen am Immissionsort beeinflusst (vgl. Petrovic & Wagner 2006, S. 62). Da adäquate Ökosystemmodelle zur Beachtung dieser Faktoren fehlen, wird einzig das Versauerungspotenzial als Nachhaltigkeitsindikator verwendet, um den Einfluss von Energietechnologien auf Ökosysteme zu beschreiben.

Neben Schwefeldioxid (SO_2) gelten u.a. Stickoxide (NO_x) und Ammoniak (NH_3) als versauernd wirkende Schadstoffe. Referenzsubstanz für die Angabe des Versauerungspotenzials ist Schwefeldioxid. Die relativen Wirkungspotenziale der jeweiligen Schadstoffe werden ermittelt, indem das chemische Potenzial dieser Stoffe (H^+ -Ionen zu bilden) in Relation zum H^+ -Inonenbildungspotenzial der Referenzsubstanz gesetzt wird (vgl. dos Santos et al. 2002, S. 37 / Marheineke 2002, S. 46). Zur Bewertung von Energietechnologien wird das Versauerungspotenzial auf die produzierte Energiemenge bezogen und somit spezifisch ausgedrückt (kg SO_2 -Äquivalente/ kWh_{el}).

Indikator 10: Abhängigkeit von Energieimporten und geopolitische Faktoren

Für moderne Gesellschaften ist es wichtig, dass Energie nicht nur in ausreichender Menge sondern auch der Nachfrage angepasst zur Verfügung steht. Mit der Abhängigkeit von Energieimporten und der Art der Importstruktur sollen Fragen der Energieversorgungssicherheit beleuchtet werden (vgl. hierzu Kopfmüller et al. 2000, S. 49). Als Indikatoren können der Importanteil von Energieträgern, der Diversifizierungsgrad der Herkunftsländer oder die Qualität der bilateralen Beziehungen zu diesen Ländern gewählt werden. Die Abhängigkeit von Energieimporten spiegelt das Verhältnis von Importen zum inländischen Gesamtverbrauch eines Energieträgers wider. Sie kann für eine Region schnell zu Problemen führen, wenn sich der Import auf sehr wenige und gegebenenfalls unzuverlässige Versorger konzentriert. Diesen Sachverhalt beschreiben Kennzahlen zum Diversifizierungsgrad der Herkunftsländer oder Einschätzungen zu geopolitischen Faktoren. Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung ist es für eine Region anzustreben, die Abhängigkeit von externen Regionen weitestgehend zu reduzieren oder die Abhängigkeiten breit und auf verlässliche Partner bzw. Partnerregionen zu streuen, um eine möglichst hohe Versorgungssicherheit garantieren zu können.

Indikator 11: Versorgungszuverlässigkeit

Eine sichere Energieversorgung bildet heute eine tragende Säule gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Entwicklung. Im optimalen Fall lassen sich Energietechnologien in ihrer Leistungsabgabe regulieren und erlauben eine Anpassung an vorherrschende Nachfragesituationen. Die Indikatorengruppe Versorgungszuverlässigkeit vereint deshalb Indikatoren zur Zuverlässigkeit

und zur Ausnutzungsdauer einer Technologie, welche sowohl technikbedingt wie umweltbedingt definiert werden können.

Die technische Verfügbarkeit ist dabei die Zeitspanne, wie lange eine Anlage technisch betriebsbereit ist. Sie errechnet sich aus dem Verhältnis der jährlichen Betriebszeit und der Summe aus dieser Betriebszeit plus der Zeit der Nichtverfügbarkeit (Einheit %). Zur Definition beider Zeiten wird auf Petrovic & Wagner (2006, S. 26f.) verwiesen. Mit dieser Größe wird die Störanfälligkeit einer Energieanlage bewertet (vgl. Heimann 2001, S. 31) aber keine Aussage über die Konstanz der Leistungsabgabe und der Ausnutzungsdauer einer Energietechnologie ermöglicht. Zur Gewährleistung einer sicheren Stromversorgung und zur Integration neuer Anlagen in das Versorgungssystem sind diese Parameter jedoch mitentscheidend.

Um eine fluktuierende Energieproduktion erfassen zu können, wird deshalb neben der technischen auch die umweltbedingte Verfügbarkeit beachtet. Gerade hier sind große Unterschiede zwischen den jeweiligen Energieversorgungsoptionen zu verzeichnen. Während Kern-, Kohle- und Wasserkraft durch eine relativ konstante Energieabgabe gekennzeichnet sind und Erdgas- und Biomassekraftwerke sich der Energienachfrage (Lastgang) teils flexibel anpassen können, unterliegen Wind- und Sonnenenergie natürlichen Schwankungen aufgrund meteorologischer Bedingungen. Die Stromerzeugung letzterer erfolgt deshalb stets dargebotsabhängig (vgl. ebs 2001, S. 32). Zur Erfassung der umweltbedingten Verfügbarkeit dient die Ausnutzungsdauer als Parameter. Diese errechnet sich aus dem Quotient von Jahresnettostromerzeugung (Betriebsarbeit) einer Anlage und installierter Nennleistung. Der Wert wird in jährlichen Volllaststunden (h/a) angegeben.

Indikator 12: Schadensausmaß eines Unfalls

Die Indikatorengruppe Schadensausmaß eines Unfalls ist der Leitlinie Risikoarmut und Fehlertoleranz zugeordnet. *„Risiken bezeichnen (...) mögliche Folgen von Handlungen, die im Urteil der überwiegenden Zahl der Menschen als unerwünscht gelten.“* (WBGU 1998, S. 35) Wenn auch hier Fragen zur Definition von unerwünschten Folgen oder zur Risikoakzeptanz noch offen bleiben, ist es im Sinne der Nachhaltigkeit also geboten, Gefahren und Risiken für die Umwelt und den Menschen zu minimieren (vgl. Petrovic & Wagner 2006, S. 150). Um das Risiko als zukünftiges Ereignis bewerten zu können, sind zwei Kategorien, nämlich das Schadensausmaß und die Eintrittswahrscheinlichkeit entscheidend (vgl. WBGU 1998, S. 36), was in einigen Studien mit dem zusätzlichen Indikator der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Unfalls berücksichtigt wird (vgl. u.a. Wietschel et al. 2002, S. 14). Die Enquete-Kommission (2002, S. 74f.) hingegen fordert eine strikte Begrenzung des Risikos dadurch, dass Unfälle mit sehr großem Schadensmaß gänzlich ausgeschlossen werden sollen, was sie mit dem weltweiten Verzicht auf Kernenergie verbindet.

Die Definition des Schadensausmaßes bzw. der Konsequenzen eines Unfalles finden in den Studien, die diesen Indikator verwenden, unterschiedlich statt. So spricht die Enquete-Kommission (2001, S. 49) vom Ausmaß typischer Schäden und bewertet diese monetär, wohingegen der Indikator bei Hirschberg et al. (2004, S. 39) bzw. bei Pretre et al. (2004, S. 14) mit der maximalen Zahl an Todesopfern je Unfall beziffert wird. In dieser Arbeit wird der Indikator in Anlehnung an die zweite Variante mit der maximalen Anzahl an Todesopfern je (größtmöglich plausibel vorstellbaren) Unfall quantifiziert. Die alleinige Beachtung eines Störfalles ergibt sich aus der häufigen Nennung in den Studien sowie aus der übergeordneten Relevanz gegenüber Unfällen im Normalbetrieb. Zur Quantifizierung muss entweder auf historische Ereignisse zurückgegriffen oder eine umfangreiche Risiko- und Sicherheitsanalyse durchgeführt werden (vgl. Hirschberg et al. 2004, S. 21), die stark von den regionalen Gegebenheiten (z.B. Bevölkerungsdichte im Umkreis) abhängig ist. Beides basiert i.d.R. auf Schätzungen, weshalb nur eine Annäherung an die eigentliche Gefahr (tatsächlicher Schadensfall) ermöglicht wird.

Indikator 13: Arbeitskräftebedarf

Die Indikatorengruppe zum Arbeitskräftebedarf umfasst alle Indikatoren, die die Auswirkung auf die Beschäftigung erfassen. Die Indikatoren sind dabei definiert als erforderliche Beschäftigtenzahl zur Erbringung einer Energiedienstleistung oder drücken den Beschäftigungseffekt bei einer Veränderung des Energiesystems aus, welcher seinerseits in einen Brutto- und einen Netto-Effekt zu unterscheiden ist. Die Indikatorengruppe ist der Leitlinie der sozialen Verträglichkeit zugeordnet und soll die Aspekte der Schaffung von Arbeitsplätzen und der ökonomischen Wertschöpfung verdeutlichen. Die Zuordnung zu dieser Leitlinie ergibt sich auch aus der Tatsache, dass speziell erneuerbare Energien zum Erhalt und zur Schaffung neuer Arbeitsplätze beitragen, indem ökonomische Effekte gerade in ländlichen Räumen auftreten. Der aufwendige Bau kleiner dezentraler Anlagen sowie deren Überwachung und Wartung bieten zahlreiche Beschäftigungsfelder und neue Möglichkeiten für Handwerker oder Land- und Forstwirte. Diese Argumente werden stets im gesellschaftlichen Diskurs über die Ausgestaltung zukünftiger Energieversorgungsstrukturen angeführt, um die Akzeptanz für erneuerbare Technologien zu erhöhen, deshalb die Zuweisung zur sozialen Verträglichkeit.

Daten zur Beschäftigungssituation im Energiesektor und auch zu den Auswirkungen von Veränderungen im Energiesystem werden fortlaufend publiziert (vgl. exemplarisch Staiß 2007, S. 34ff. / Lehr et al. 2011). Um die Vergleichbarkeit von verschiedenen Energietechnologien zu sichern, wird der Indikator als spezifischer Arbeitskräftebedarf je erstellter Energiedienstleistung angegeben (Personen/kWh_{el}). Dabei gilt die Alternative mit dem größten Arbeitskräftebedarf und folglich dem höchsten Potenzial, Arbeitsplätze zu schaffen bzw. zu erhalten als die Beste im Hinblick auf

nachhaltige Entwicklung. Aus ökonomischer Sicht bedeutet dies allerdings eine positive Bewertung der schlechtesten Arbeitsproduktivität zur Erstellung einer Dienstleistungseinheit Energie, weshalb die Richtungssicherheit des Indikators nur im Hinblick auf die soziale Dimension gegeben ist. Eine mögliche Aufspaltung des Indikators in Arbeitskräftebedarf zur Herstellung, zum Betrieb oder zum Rückbau einer Anlage (vgl. hierzu Möller 2004, S. 87) wird nicht weiter berücksichtigt.

Indikator 14: Kosten der Energiebereitstellung

Die Angabe von Stromgestehungskosten ist eine wesentliche Kennzahl bei der ökonomischen Bewertung von Energietechnologien und bestimmt aus ökonomischer Sicht in entscheidender Weise die Wettbewerbsfähigkeit von Energietechnologien und somit deren zukünftigen Zubau. Definiert sind sie als Kosten, die betriebswirtschaftlich zur Erzeugung einer Energieeinheit aufgewendet werden müssen (Einheit: €/kWh_{el}) (vgl. Petrovic & Wagner 2006, S. 173). Beachtung finden sämtliche Kosten, die bei der Erzeugung von Elektrizität über die gesamte Lebensdauer eines neuen Kraftwerks anfallen. Im Einzelnen sind dies die Posten: Investitionen, Abschreibungen, Zinszahlungen sowie Betriebs-, Brenn- und Rohstoffkosten. Die Analyse aller genannten Kostenstellen bezieht sich dabei auf die gesamte Planungszeit (Laufzeit) der Anlage. Zweck der Berechnung von Stromgestehungskosten ist es, zu ermitteln, mit welchen durchschnittlichen Kosten je Energieeinheit beim Neubau eines Kraftwerkes zu rechnen sind.

Neben den Aufwendungen sind die Stromgestehungskosten von der produzierten Strommenge jeder Anlage abhängig. Die produzierte Strommenge wiederum kann gerade bei erneuerbaren Energien wegen der unterschiedlichen Potenziale von Region zu Region stark schwanken. Um die Aussagekräftigkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu garantieren, erfolgt die Bestimmung der Stromgestehungskosten bei allen Energietechnologien anhand einer einheitlichen Vorgehensweise. Sie orientiert sich an den gängigen dynamischen, d.h. finanzmathematischen Berechnungsmethodiken der Investitionsrechnung (vgl. hierzu auch Kapitel VI 4.1). Das dynamische Verfahren gewährleistet dabei, die finanziellen Auswirkungen einer Investitionsentscheidung über den gesamten Planungszeitraum (t_0 - t_n) zu analysieren (vgl. Wöhe & Döring 2005, S. 600). In allen Untersuchungen zu Stromgestehungskosten verschiedener Energietechnologien gilt die gleiche Prämisse, dass diejenige Energietechnologie, die die geringsten Kosten zur Erzeugung einer Energieeinheit (kWh) verursacht, ökonomisch zu favorisieren ist. Kraftwerke lassen sich dadurch, unabhängig ihrer Technologieart und verschiedener Größe, miteinander vergleichen.

1.2.6 Hierarchische Strukturierung des Bewertungsmodells

Die Operationalisierung des Nachhaltigkeitsbegriffes zeigt, dass zur ganzheitlichen Bewertung von Energietechnologien ein einziges Kriterium nicht ausreicht, sondern mehrere Ziele und Indikatoren

nötig sind, um alle nachhaltigkeitsrelevanten Aspekte zu erfassen. Dabei entsteht ein komplexes Zielsystem, welches als Kombination von Einzelzielen die Entscheidungsparameter wieder zusammenführt (vgl. Grünig & Kühn 2009, S. 18f.). Zielhierarchien sind sinnvoll, um die komplexe Entscheidungssituation zu strukturieren und anhand der Stufung zu illustrieren, wie die Ziele in Unterziele aufgelöst oder zu Oberzielen zusammengefasst sind (vgl. Einführ & Weber 2003, S. 62).

Um eine Zielhierarchie erstellen zu können, ist eine klare Zielformulierung notwendig. Für das Modell zur Bewertung von Energietechnologien unter dem Nachhaltigkeitsaspekt kann sowohl die Strukturierung als auch die Formulierung der Ziele aus der bisherigen Vorarbeit zur Operationalisierung des Begriffes übernommen werden. So ist das komplexe Entscheidungsproblem bereits in einzelne Teilaspekte (Leitlinien) zerlegt und Messgrößen (Indikatoren) sind identifiziert, die eine Alternativbewertung erlauben. Das übergeordnete Ziel einer nachhaltigen Energieform steht somit an der Spitze der Hierarchieebenen und untergliedert sich in die sechs Handlungsleitlinien, welche zusammen das Zielbündel der zweiten Ebene charakterisieren. Der Leitbildvorgabe entsprechend soll eine Technologie möglichst umwelt- und ressourcenschonend, sicher, risikoarm, sozialverträglich sowie wirtschaftlich sein (siehe Abb. 5). Da diese Eigenschaften noch nicht direkt quantifizierbar sind, werden den einzelnen Handlungsleitlinien die bereits erläuterten Bewertungskriterien (Indikatoren) zugeordnet. Es ergibt sich ein dreistufiges hierarchisches Zielsystem bzw. Bewertungsmodell, was auch die Vorgehensweise des iterativen Verfahrens widerspiegelt.

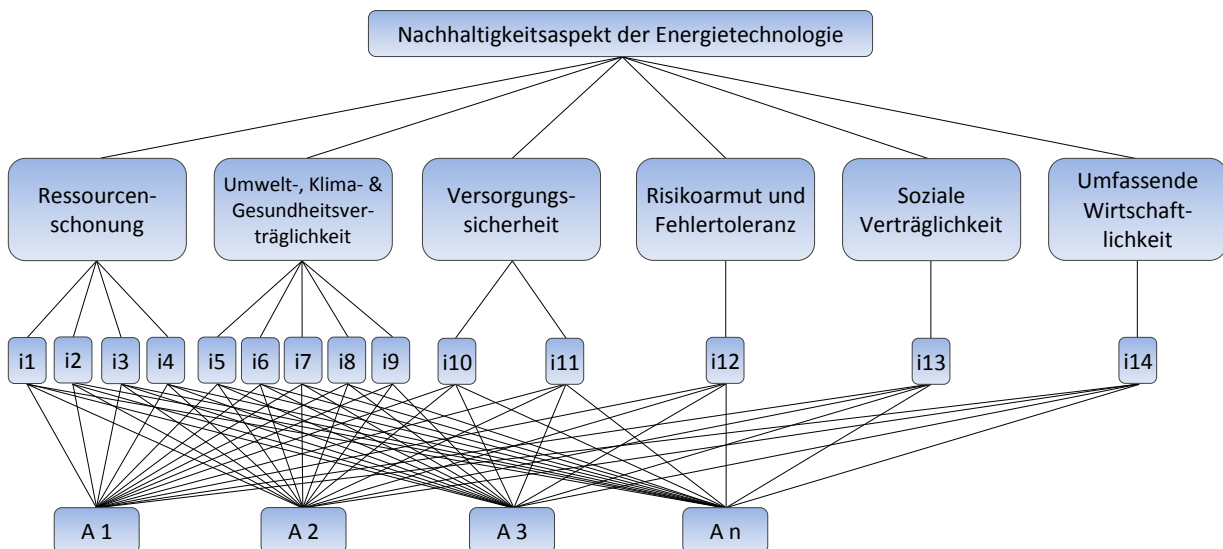


Abb. 5: Hierarchische Strukturierung des Bewertungsmodells (i=Indikator, A=Technologiealternative)

Die Indikatoren erlauben es, wichtige Eigenschaften der verschiedenen Alternativen zu bewerten. Prinzipiell sind beliebig viele Alternativen (A n) analysierbar, mit der Anzahl steigt jedoch der Informationsbeschaffungs- und Bewertungsaufwand. Im Energiesektor werden die Alternativen durch den aktuellen technischen Entwicklungsstand begrenzt. Die Vielzahl an Energietechnologien

macht eine Vorauswahl und Bestimmung von Referenzanlagen allerdings unerlässlich. Anhand der naturräumlichen und sozio-ökonomischen Gegebenheiten der jeweiligen Untersuchungsregion kann dies vollzogen werden. Im empirischen Teil der Arbeit ist die Definition von Referenzanlagen eingehend erläutert.

1.3 Technologiebewertung

1.3.1 Mehrkriterielle Entscheidung

Multi-Attribut-Entscheidungen (engl. Multi Attribute Decision Making, kurz MADM) sind eine Form der mehrkriteriellen Entscheidung, bei denen alle Handlungsalternativen (hier Technologieoptionen) vorbestimmt sind und die Suche nach einer optimalen Entscheidung bzw. eine vollständige Rangordnung aller Alternativen angestrebt wird (vgl. Zimmermann & Gutsche, 1991 S. 25f.), was mit der Aufgabenstellung dieser Forschungsarbeit übereinstimmt. Auch im raumplanerischen Kontext werden mehrkriterielle Entscheidungsverfahren eingesetzt, um raumrelevante Handlungskonzepte oder Investitionsprojekte hinsichtlich einer Verbesserung des Ist-Zustandes oder einer Annäherung an den Soll-Zustand zu bewerten (vgl. Strassert 2005, S. 213). Kennzeichen von mehrkriteriellen Analysen ist die gleichzeitige Beachtung mehrerer Ziele bei der Entscheidungsfindung, wie es auch bei der Bewertung von Energietechnologien der Fall ist.

Die präskriptive Entscheidungstheorie hält eine Fülle an verschiedenen Methodiken zur Unterstützung von derartigen Entscheidungen und zum Auswahlprozess von Alternativen bereit. Wegen der eigenständigen Thematik wird auf eine ausführliche Darstellung unterschiedlicher Entscheidungsverfahren bzw. Bewertungstechnik verzichtet.³² Das Ergebnis einer Technologiebewertung kann jedoch wesentlich vom gewählten Verfahren bestimmt sein. So werden auch am Energiesektor verschiedene Methoden verwendet, um Technologien zu bewerten.³³ Die große Bandbreite resultiert auch aus dem Sachverhalt, dass die hierarchische Ordnung von Energietechnologien mittels mehrerer Kriterien aktuell ein internationaler Trend ist (vgl. La Rovere et al. 2010, S. 428). Ausdifferenzierte Bewertungsverfahren können die Entscheidungsfindung verbessern, führen allerdings auch zu einem größeren Aufwand der Datenerhebung. Mit dieser Arbeit wird ein gewichtetes additives Modell erstellt, wie es in ähnlicher Form auch bei Hirschberg et al. (2004, S. 66ff.) für die Bewertung von Energietechnologien zum Einsatz kommt, um einerseits die

³² Zur allgemeinen Diskussion von Methodiken der komplexen Entscheidungsfindung sei exemplarisch auf Schneeweiß (1991), Schuh (2001) und Bamberg & Coenenberg (2006) verwiesen.

³³ Neben der bereits zitierten Literatur ist auf Oberschmidt, Geldermann & Ludwig (2009) verwiesen. Eine Zusammenstellung von angewendeten Mehrkriteriellen Analysen zur Beurteilung von nachhaltigen Energiesystemen findet sich bei Braune et al. (2009).

Multidimensionalität von Nachhaltigkeit berücksichtigen zu können und andererseits ein praktikables, einfaches und transparentes Vorgehen zu sichern.

Ein additives Modell, auch als Scoring-Modell oder Punktbewertungsverfahren und im Folgenden als Nutzwertanalyse bezeichnet (vgl. Eisenführ & Werber 2003, S. 119), ermittelt die günstigste Alternative durch die Addition aller Einzelkriterien zu einem Gesamtergebnis. Die Nutzwertanalyse ist ein „*Bewertungsverfahren in Planungsabläufen, mit dem bei einer vorgegebenen Zielsetzung mehrere (...) gegebene oder zu entwickelnde Handlungsalternativen in einem komplexen Feld von Bewertungskriterien bezüglich der Zielerreichung zu ordnen sind.*“ (Leist 1989, S. 1260) Sie dient einer strukturierten Bewertung und Ordnung von Alternativen, wofür die Ausprägungen der Kriterien in vergleichbare und addierbare Nutzenpunkte umgewandelt werden müssen. Ziel ist es, diejenige Alternative zu identifizieren, die die meisten Nutzenpunkte auf sich vereint. Anhand der Gesamtpunktzahl ist es schließlich möglich, eine Rangfolge der Alternativen zu bilden. Wegen der leicht verständlichen Methodik sowie der Handhabung, alle relevanten Bewertungskriterien einzubeziehen, ist die Nutzwertanalyse besonders geeignet, die Entscheidungssituation zur Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung zu unterstützen (vgl. Schuh 2001, S. 20). Neben der bereits thematisierten Festlegung von Zielen, Kriterien und Alternativen sind weitere Aspekte bei der Anwendung dieser Entscheidungsvariante wichtig:

- Festlegung der Wertfunktionen der Kriterien bzw. Indikatoren
- Festlegung der Kriteriengewichtung
- Aggregation der gewichteten Einzelwerte zu einem Gesamtergebnis

1.3.2 Wertefunktionen

Wegen der unterschiedlichen Einheiten und Ausprägungen der einzelnen Indikatoren ist es bislang noch nicht möglich, die Kriterien zu einem Gesamtergebnis (Index) zusammenzufassen. Hierzu ist eine Transformation der individuellen Merkmalsausprägungen in abstrakte Nutzenwerte notwendig. Für jeden Indikator ist deshalb eine Wert- bzw. Nutzenfunktion zu definieren, die die Präferenz bzw. den Nutzen in Abhängigkeit zur Kriterienausprägung (Indikatorwert) abbildet (vgl. Eisenführ & Weber 2003, S. 103). Eine Normierung, d.h. eine Vereinheitlichung von heterogenen Indikatorenskalen mit dem Ziel die Attribute vergleichbar zu machen (vgl. Zimmermann & Gutsche 1991, S. 37), erfolgt i.d.R. für den Bereich $[0, 1]$. Aus der Literatur sind zahlreiche Varianten bekannt, Wertefunktionen in Abhängigkeit von den Präferenzen des Entscheidungsträgers zu bilden, so etwa die Direct-Rating-Methode, die Methode gleicher Wertdifferenzen oder die Halbierungsmethode. Des Weiteren sind die lineare Skalen-Transformation und die bandbreitenorientierte Normalisierung als Beispiele zu nennen (vgl. Zimmermann & Gutsche 1991, S. 38ff. / Eisenführ & Weber 2003, S. 105ff.). Die

Gestaltung von Wertfunktionen bietet dabei Potenzial, die Technologiebewertung weiter zu präzisieren. Die vorliegende Forschungsarbeit sieht dies aber nicht als ihr Anliegen an, weshalb im Folgenden auf eine einfache lineare und bandbreitenorientierte Normierung Bezug genommen wird.

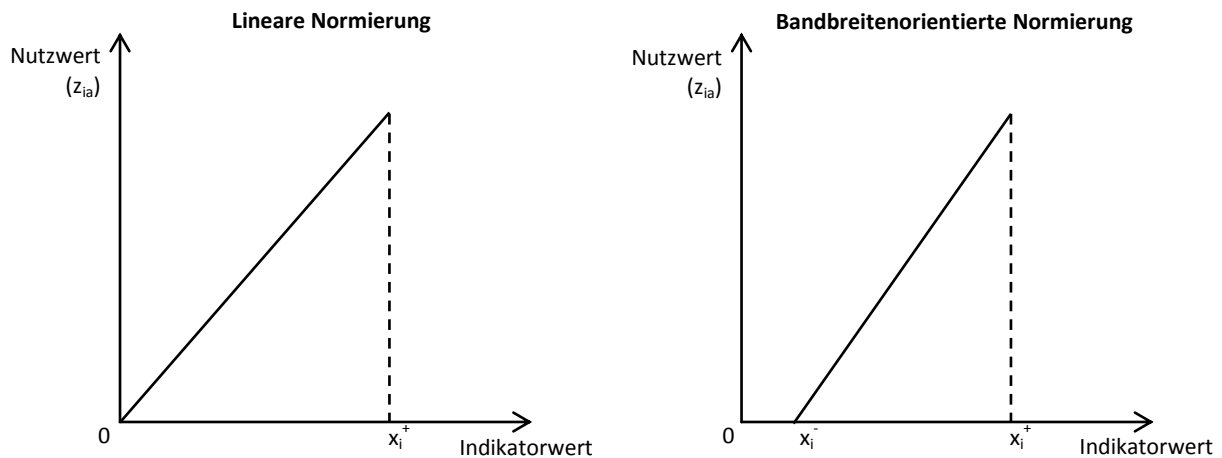


Abb. 6: Wertefunktionen für eine lineare Normierung und eine bandbreitenorientierte Normierung

Der Verlauf der Wertefunktionen wird für alle Indikatoren vereinfachend als monoton steigend/fallend angenommen (vgl. Abb. 6), d.h. zwischen den Punkten der minimalen (x_i^-) und der maximalen Indikatoreausprägung (x_i^+) aller Alternativen wird linear interpoliert. Bei der linearen Normierung ist der minimale Indikatorwert gleich 0 ($x_i^- = 0$) und der maximale Indikatorwert ist durch den höchsten Wert aller Alternativen (x_i^+) gekennzeichnet. Der normierte Zielerreichungskoeffizient (z_{ia}) errechnet sich für den Kriterienwert (x_{ia}) des Indikators (i) und der Alternative (a) sowie der maximalen Kriterienausprägung x_i^+ mittels folgender Formeln (vgl. Zimmermann & Gutsche 1991, S. 38).

$$z_{ia} = \frac{x_{ia}}{x_i^+} \quad \text{für umgekehrte Wertefunktionen gilt} \quad z_{ia} = 1 - \frac{x_{ia}}{x_i^+}$$

Die lineare Transformation behält die Größenverhältnisse zwischen den Kriterienwerten bei. Ist bei einem Indikator (i) der Wert im Sinne der Nachhaltigkeit zu minimieren, ergibt sich $z_i=0$ als bester Zielerreichungsgrad im Hinblick auf die Nachhaltigkeit, der Wert $z_i=1$ charakterisiert entsprechend die schlechteste Alternative mit dem höchsten Indikatorwert (x_i^+). Als Beispiel gilt der Indikator zu den Emissionen von Treibhausgasen. Geringe Emissionen einer Alternative (a) sind durch einen kleinen Zielerreichungsgrad (z_{ia}) gekennzeichnet, was einer positiven Bewertung im Sinne der Nachhaltigkeit entspricht; hohe Emissionen entsprechen einem großen Zielerreichungsgrad. Gleichzeitig führt die Annahme $x_i^-=0$ dazu, dass eine Alternative erst dann den besten Zielerreichungskoeffizienten ($z_{ia}=0$) erhält, wenn die Emissionen komplett vermieden werden.

Die bandbreitenorientierte Normierung orientiert sich neben dem maximalen Indikatorwert zusätzlich auch am minimalen Indikatorwert aller Alternativen. Demzufolge erhält der minimale

Indikatorwert (x_i^-) den Zielerreichungskoeffizienten ($z_i=0$) und der maximale Indikatorwert (x_i^+) den Zielerreichungskoeffizienten ($z_{ia}=1$) (siehe Abb. 6). Diese Vorgehensweise wird gewählt, wenn entweder die minimalen und maximalen Grenzen technisch oder physikalisch vorgeben sind oder eine Festlegung vor Beginn der Bewertung nicht möglich ist. Ein Beispiel hierfür sind die Kosten der Energiebereitstellung, deren Grenzen vorab nicht festlegbar sind. Die Alternative mit den geringsten Gestehungskosten je Energieeinheit (x_i^-) ist folglich die beste Alternative und erhält den im Sinne der Nachhaltigkeit optimalen Zielerreichungskoeffizienten ($z_i=0$), die Alternative mit den höchsten spezifischen Kosten den Wert ($z_i=1$). Die Formel zur bandbreitenorientierten Normierung lautet:

$$z_{ia} = s_u + \frac{s_o - s_u}{x_i^+ - x_i^-} * (x_{ia} - x_i^-)$$

- z_{ia} = normierte Ausprägung des Indikatorenwertes i der Alternative a
- s_u = untere Grenze der normierten Skala (0)
- s_o = obere Grenze der normierten Skala (1)
- x_{ia} = der gemessene Indikatorwert i der Alternative a
- x_i^+ = maximaler Kriterienwert aller Alternativen
- x_i^- = minimaler Kriterienwert aller Alternativen

Für umgekehrte Wertfunktionen gilt:

$$z_{ia} = 1 - s_u + \frac{s_o - s_u}{x_i^+ - x_i^-} * (x_{ia} - x_i^-)$$

Die umgekehrten Wertefunktionen kommen zum Einsatz, wenn der höchste Indikatorwert (x_i^+) den höchsten Beitrag zur Erreichung von Nachhaltigkeit repräsentiert. In diesem Fall wird der höchste Indikatorwert (x_i^+) mit dem besten Zielerreichungskoeffizienten ($z_i=0$) belegt und umgekehrt der geringe Indikatorwert (x_i^-) mit ($z_i=1$). Beispiel hierfür ist der Indikator Arbeitskräftebedarf. Ein hoher Arbeitskräftebedarf (kleiner z_{ia}) wird im Sinne der Nachhaltigkeit und unter dem Aspekt einer sozialen Verträglichkeit positiver bewertet als ein geringer Bedarf an Arbeitskräften (großer z_{ia}).

1.3.3 Festlegung der Kriteriengewichte durch Akteursbefragung

Bei jeder Entscheidung, im Besonderen bei mehrkriteriellen Entscheidungen, ist die Präferenz des jeweiligen Entscheidungsträgers bzw. der jeweiligen Entscheidungsträger zu berücksichtigen, um eine Alternativbewertung durchführen zu können. Eine Mitsprache von Akteuren ist jedoch nicht nur in der Entscheidungslehre sondern auch im allgemeinen HGF-Nachhaltigkeitskonzept begründet, indem eine Regel (Was-Regel 3.2) verlangt, allen Mitgliedern einer Gesellschaft die Teilhabe an den gesellschaftlich relevanten Entscheidungsprozessen zu ermöglichen (vgl. Kopfmüller et al. 2001, S.172 und S. 251ff.). Die Ausgestaltung der zukünftigen Energieversorgung ist zweifellos ein

relevanter Prozess. Das Konzept doppelter Nachhaltigkeit greift diesen Sachverhalt deshalb auf und es wird versucht, verschiedene Akteure aus dem gewählten Untersuchungsraum, welche bereits in den konzeptionellen Ausführungen angesprochenen wurden, mit in die Technologiebewertung zu integrieren. Intention ist es, allen Akteuren die Gelegenheit zu geben, ihre Vorstellungen über die zukünftige Energieversorgung im Rahmen der Technologiebewertung artikulieren zu können.³⁴ Je nach ihrer (kollektiven) Präferenz bestimmen sie somit die Rangfolge von Energietechnologien.

Mehrkriterielle Entscheidungen erlauben anhand der Kriteriengewichte die Kriterien bzw. Indikatoren hinsichtlich ihrer Wichtigkeit zur Erreichung der übergeordneten Zielsetzung zu bewerten. Die Kriteriengewichte geben an, wie wichtig dem Entscheidungsträger ein Kriterium im Vergleich zu einem anderen Kriterium erscheint und beziehen damit Prioritäten in das Entscheidungsmodell mit ein. Das aufgezeigte Zielsystem (vgl. Abb. 5) erfordert auf zwei Ebenen eine derartige Gewichtung. Zum einen ist es erforderlich, die Indikatoren I 1 bis I 4 hinsichtlich ihrer Relevanz für das Kriterium Ressourcenschonung, die Indikatoren I 5 bis I 9 hinsichtlich dem Teilziel Umwelt-, Klima- und Ressourcenschutz sowie die Indikatoren I 10 und I 11 hinsichtlich dem Teilziel bedarfsgerechter Nutzungsqualität und dauerhafter Versorgungssicherheit zu bewerten. Zum anderen müssen die sechs Handlungsleitlinien (Kriterien) zueinander gewichtet werden.

Die Gewichtung der Indikatoren zueinander erscheint für die Einbindung der Akteure wenig geeignet, da die Komplexität des Entscheidungsprozesses im Allgemeinen sowie die gewählten Indikatoren im Speziellen umfangreiche Kenntnisse erfordern, welche von vielen Akteuren – es sollen auch Personen integriert werden, die keine Experten des Energiesektors sind – nicht verlangt werden können. Auf dieser Ebene unterbleibt deshalb eine Integration. Vereinfachend wird auf eine Gewichtung verzichtet, was eine gleiche Wichtigkeit der genannten Indikatoren zur jeweils übergeordneten Handlungsleitlinie bedeutet. Folglich setzt sich z.B. die Bewertung der Handlungsleitlinie Ressourcenschonung aus den vier ebenbürtigen Indikatoren I 1 bis I 4 zusammen. Für jede Leitlinie werden die Indikatorwerte additiv verrechnet und das Ergebnis anschließend durch die Anzahl an Indikatoren geteilt. Damit sinkt allerdings der jeweilige Einfluss der einzelnen Indikatoren (globales Gewicht) im Vergleich zu einem Indikator, der als einzige Messgröße eine Handlungsleitlinie bewertet (z.B. I 14). Trotz dieser ungleichen Indikatorengewichte wird diese Vorgehensweise gewählt, da sich die Zuordnung der Indikatoren zu den Handlungsleitlinien aus dem beschriebenen iterativen Operationalisierungsverfahren zur Erstellung des Indikatorensets ergibt und somit festgelegt ist. Die Vielzahl an Indikatoren im Ressourcenbereich oder im Bereich der Umwelt-, Klima- und Gesundheitsverträglichkeit deuten darauf hin, dass die Bewertung dieser Leitlinien durch einen

³⁴ Gewichtungsschemata zur Bewertung von Energietechnologien liegen zum Teil auch den bereits bei den Indikatoren analysierten Ausführungen zugrunde (vgl. exemplarisch Heimann 2001 / Möller 2004 / Schenler et al. 2009 / Energie-Spiegel 2010)

einigen Indikator nicht aussagekräftig ist. Dieses Argument trifft selbstverständlich auch auf andere Leitlinien zu, nur konnten mit der gewählten Vorgehensweise dementsprechende Indikatoren nicht identifiziert werden. Ebenso ist eine fundierte Gewichtung der Indikatoren innerhalb einer Leitlinie anhand der Literatursichtung nicht möglich, weshalb die Indikatoren als gleichwertig betrachtet werden.

Demgegenüber bietet sich die Ebene der Handlungsleitlinien für eine Integration der verschiedenen Akteure an, da sie eine klare Kategorisierung von Eigenschaften der zukünftigen Energieversorgung vorgeben und für Außenstehende leicht verständlich und somit bewertbar sind. Die Verständlichkeit der Leitlinien wird bei der Befragung zusätzlich durch eine Aussage zu jeder Leitlinie erhöht (vgl. hierzu Abb. 7). Die Akteure erhalten damit eine zusätzliche Orientierung, welche Inhalte den einzelnen Leitlinien zugrunde liegen, ohne die konkreten und vermutlich verwirrenden Begriffe der Indikatoren kennen zu müssen. Mit der Gewichtung der Leitlinien zueinander können die befragten Akteure ihre individuellen Prioritäten zum Ausdruck bringen und aufzeigen, welche Eigenschaften der zukünftigen Energieversorgung ihnen als besonders wichtig erscheinen. Je nach individueller Gewichtung der sechs Leitlinien kann sich eine unterschiedliche Rangfolge der Technologiealternativen ergeben, was den Einfluss der Akteure auf die Bewertung verdeutlicht.

Aus der Literatur sind wiederum vielfältige Methoden zur Bestimmung des Gewichtungsfaktors bekannt. Eisenführ und Weber (2003, S. 124ff.) nennen das Trade-off-Verfahren, das Swing-Verfahren und das Direct-Ratio-Verfahren. Weitere Verfahren sind die direkte oder paarweise Gewichtung sowie diverse rangfolgenbasierte Gewichtungen (vgl. Lifka 2009, S. 61ff.). Die Gewichtungstechniken basieren auf der empirischen Ermittlung von singulären Wertvorstellungen, anhand derer durch Zusammenfassung auf die Zielgewichte geschlossen werden soll. Die einzelnen Wertvorstellungen sind dabei nicht objektiv und müssen „als Ausdruck individueller Einschätzungen und Präferenzen akzeptiert werden.“ (Adam 1996, S. 128) Sie quantifizieren die Bedeutung, die der jeweilige Entscheidungsträger bzw. Akteur dem Kriterium zur Zielerreichung beimisst.

Da die Nutzwertanalyse nicht an ein bestimmtes Gewichtungsverfahren gebunden ist, werden für die Ermittlung der Kriteriengewichte zur Bewertung von Energietechnologien im Konzept doppelter Nachhaltigkeit verschiedene Methoden kombiniert, um methodische Einflüsse auf das Ergebnis weitestgehend zu vermeiden.³⁵ Zum Einsatz kommen eine direkte Gewichtung (Direct Rating) und eine bandbreitenorientierte Gewichtung (Direct Ratio). Zudem kann die in der Direct-Ratio-Methode geforderte Rangfolgenbildung für eine rangfolgenbasierte Auswertung genutzt werden. Die Kombination dieser Gewichtungsverfahren soll zudem die befragten Akteure anregen, sich vertieft mit dem Sachverhalt zu beschäftigen und gegebenenfalls getroffene Entscheidungen auch zu

³⁵ Eine ähnliche Befragungsmethodik zur Ermittlung von Gewichten entscheidungsrelevanter Parameter wird von Lifka (2009) für eine Bewertung des Wohnwertes vorgeschlagen.

reflektieren. Der strukturelle Aufbau der Bewertungsaufgaben hat zum Ziel, die Akteure an den Sachverhalt heranzuführen, um in der Direct-Ratio-Methode zu aussagekräftigen Ergebnissen zu kommen.

Direct-Rating-Verfahren

Die absolute und getrennte Einschätzung der Relevanz eines Kriteriums auf einer vorgegebenen Bewertungsskala wird auch als „Direct Rating“ bezeichnet (vgl. Lifka 2009, S. 65). Dabei muss der Entscheidungsträger seine Präferenz artikulieren, indem er jedem Kriterium einen konkreten Wert bzw. eine Aussage auf der angegebenen Ratingskala zuweist. Die Ratingskala ist eine mehrstufige Skala, mittels der eine befragte Person ihre subjektive Einschätzung zum Ausprägungsgrad eines Merkmals ausdrücken kann (vgl. Micheel 2010, S. 43). Eine, wenn auch vom Umfang und von der Tiefe sehr weitreichende direkte Bewertung von relevanten Indikatoren und Kriterien für Energietechnologien, ist bei Schenler et al. (2009, S. 24ff.) vorgestellt.

Damit ein Akteur seine individuelle Präferenz bezüglich eines Kriteriums wiedergeben kann, ist eine für ihn verständliche Skala zu wählen. Für die vorliegende Problemstellung wird eine siebenstufige Skala mit einer Abstufung von „absolut unwichtig“ < „unwichtig“ < „eher unwichtig“ < „durchschnittlich“ < „eher wichtig“ < „wichtig“ < „absolut wichtig“ verwendet (vgl. Abb. 7). Durch einfaches Ankreuzen auf der Skala erhält der befragte Akteur die Chance, seine Einschätzung für jedes Kriterium zu artikulieren. Die Abstände zwischen den Skalenstufen werden im Sinne einer Intervallskala als identisch angenommen, um eine statistische Auswertung zu ermöglichen (vgl. Paier 2010, S. 64). Dies soll sich durch die symmetrische und gleichmäßige textliche Benennung und graphische Anordnung der Skalen im Fragebogen ausdrücken. Zur Bestimmung der Relevanz einzelner Kriterien werden den Skalenstufen fortlaufende Zahlen von eins bis sieben zugewiesen. Die Zahl eins steht für die Angabe „absolut unwichtig“ die Zahl sieben für „absolut wichtig“. Auf diese Weise wird die Präferenz des Befragten mit einem Rohgewicht versehen. Die relative Wichtigkeit eines Kriteriums im Verhältnis zu den übrigen Kriterien (g_k) ergibt sich aus der Division des jeweiligen Rohgewichtes (rg_k) durch die Summe aller Rohgewichte, die auf alle Kriterien verteilt werden. rg_k ist dabei die Einschätzung eines Akteurs zum entsprechenden Kriterium.

$$g_k = \frac{rg_k}{\sum_{k=1}^n rg_k}$$

k = 1 bis n

n = Anzahl an zu bewertenden Kriterien

Die Methode der direkten Bewertung erlaubt es dem Entscheidungsträger, mehrere Kriterien auf der gleichen Skalenstufe zu bewerten. Werden angenommen alle Kriterien gleich (z.B. Stufe 5 „wichtig“)

eingeschätzt, führt dies mit obiger Formel zu einer Gleichgewichtung der sechs Kriterien. Auf welcher Skalenstufe die einheitliche Bewertung erfolgt ist dabei unerheblich. Das Ergebnis der Gewichtung bleibt identisch. Um die Gewichtung zu präzisieren, müssen die Befragten in einem nächsten Schritt die Kriterien in eine Rangfolge bringen und anschließend einzeln bewerten.

Direct-Ratio-Verfahren

Das Direct-Ratio-Verfahren (vgl. Eisenführ & Weber 2003, S. 130f.) erfordert die Aufstellung einer Rangordnung der Kriterien hinsichtlich ihrer geschätzten Relevanz. Die Reihenfolge umfasst so viele Rangplätze, wie Kriterien zu bewerten sind, mit dem wichtigsten Kriterium auf Platz eins. Diesem Kriterium werden 100 Punkte zugewiesen. Nachdem der Entscheidungsträger seine Rangfolge festgelegt hat, wird ihm die Aufgabe gestellt, das wichtigste Kriterium (Platz eins) mit dem nächstfolgendem Kriterium (Platz 2) zu vergleichen und mit einer Punktzahl zu bewerten. Als Orientierung dienen die 100 Punkten von Platz eins. Der Akteur legt damit fest, wie wichtig ihm das Kriterium auf Platz zwei im Vergleich zu Platz eins ist, wobei der Punktwert von Platz eins größer bzw. gleich dem Punktwert von Platz zwei sein muss. Je geringer die Relevanz des Kriteriums beurteilt wird, desto weniger Punkte sind zu vergeben. Der paarweise Vergleich der Kriterien wird mit den Folgeplätzen weiter fortgeführt. Bei jedem Vergleich (K1 mit K3, K1 mit K4, ..., K1 mit Kn) bleibt dabei das wichtigste Kriterium (100 Punkte) als Referenzwert für die Bewertung bestehen. Die Bestimmung der Relevanz eines Kriteriums (g_k) erfolgt mit einer Normierung anhand der Summe aller vergebenen Punktwerte. Dazu wird der jeweilige Punktwert eines Kriteriums (p_k) durch die Summe der angegebenen Punktwerte aller Kriterien dividiert.

$$g_k = \frac{P_k}{\sum_{k=1}^n P_k}$$

k = 1 bis n

n = Anzahl an zu bewertenden Kriterien

Eisenführ und Weber (2003, S. 130) bescheinigen der Direct-Ratio-Methode große Unsicherheit, da sie weder die Kriterienausprägungen noch die zugehörigen Wertefunktionen berücksichtigt. Aufgrund der leichten Verständlichkeit sowie der Möglichkeit, dieses Verfahren auch in einer schriftlichen Befragung einzusetzen, wird diese Methodik in Kombination mit dem Direct-Rating-Verfahren dennoch zur Bewertung der sechs Kriterien einer nachhaltigen Energietechnologie eingesetzt. Als zusätzliche Prüfung der Gewichtungsergebnisse aus der Direct-Rating- und der Direct-Ratio-Methode erfolgt die Ermittlung von Gewichten mittels eines rangordnungsbasierten Verfahrens. Dieses kann ergänzend angewendet werden, da die Zuweisung von Kriterien zu einer Rangfolge ohnehin Teil der Direct-Ratio-Methode ist. Die akteurspezifisch evaluierten Rangplätze werden für jedes Kriterium aufsummiert und mit Hilfe des folgenden mathematischen

Rechnungsweges die Rangsummenbildung ermittelt (vgl. Lifka 2009, S. 70ff.). Wiederum ist (g_k) das jeweilige Kriteriengewicht.

$$g_k = \frac{n - R_k + 1}{\sum_{k=1}^n RS_k}$$

k = 1 bis n

n = Anzahl an Rängen (stimmt mit der Kriterienanzahl überein)

R_k = Rangplatz des k-ten Kriteriums

RS_k = Summe aller Rangplätze (bei sechs Rängen ist $RS_k=21$)

1.3.4 Schriftliche Befragung und Gruppenentscheidung

Die Erhebung von Präferenzen der verschiedenen Akteure bzw. Akteursgruppen erfolgt mittels einer schriftlichen Befragung. Diese zeichnet sich gegenüber persönlich-mündlichen Befragungen durch den Wegfall des Interviewereinflusses, einem geringeren Gesamtaufwand sowie durch eine höhere Anonymität aus (vgl. Häder 2010, S. 191). Die befragten Personen haben einen Fragebogen auszufüllen, der aus drei aufeinander aufbauenden Schritten besteht. Dies soll einerseits den Befragten veranlassen, sich gründlich und sukzessive vertieft mit dem Sachverhalt zu beschäftigen und andererseits zu einer verbesserten Ermittlung der Gewichte durch die verwendete Methodenvielfalt führen. Im Vordergrund der Überlegung steht allerdings die Sensibilisierung des Befragten an die komplexe Energiethematik. Im Grunde besitzen alle drei Aufgaben die gleiche Intention, nämlich die sechs Leitlinien mit Blick auf die zukünftige Energieversorgung zu bewerten. Die mehrfache Aufforderung zur Bewertung der Leitlinien soll vermeiden, dass die befragten Personen, die vermutlich zum ersten Mal mit den Begrifflichkeiten konfrontiert sind, vorschnelle Entscheidungen treffen. Sie erhalten die Gelegenheit, über ihre Angaben selbst zu reflektieren und müssen sich intensiv mit der Problemstellung beschäftigen. In Anlehnung an die bereits vorgestellten Gewichtungsmethodiken und mit dem Ziel einer mehrmaligen Bewertung lauten die drei Aufgabenstellungen wie folgt:

1. Kreuzen Sie auf der Skala an, wie wichtig Ihnen die einzelnen Kriterien für die zukünftige Energieversorgung sind. Es dürfen auch mehrere Kriterien auf der gleichen Stufe bewertet werden. (Direkte Gewichtung)
2. Bringen Sie die Kriterien in eine Reihenfolge, indem Sie jedem Kriterium einen Rang zuordnen. Schreiben Sie dazu die Kriterien Ihrer Rangfolge entsprechend in die Tabelle 1 (siehe unten). Das Ihnen am wichtigsten erscheinende Kriterium erhält den ersten Rang, das unwichtigste Kriterium den sechsten Rang. (Rangfolgenbasierte Gewichtung)

3. Nun haben Sie die Möglichkeit, die Kriterien in der Spalte „Punkte“ einzeln zu bewerten. Das wichtigste Kriterium erhält 100 Punkte. Vergleichen Sie das wichtigste Kriterium auf Rang 1 mit dem Kriterium auf Rang 2 und geben Sie an, wie viele Punkte Sie diesem Kriterium im Vergleich zu den 100 Punkten von Rang 1 zuweisen. Je weniger Punkte Sie vergeben, desto unwichtiger ist Ihnen das Kriterium. Anschließend vergleichen Sie Platz 3 mit Platz 1, dann Platz 4 mit Platz 1 usw. (Direct-Ratio-Verfahren)

| Kriterien | Skala | | | | | | | |
|---|----------------------|-----------|-------------------|-----------------------|-----------------|---------|--------------------|-----------------|
| Bedarfsgerechte Nutzungsqualität und dauerhafte Versorgungssicherheit Die zukünftige Energieversorgung gewährleistet zu jeder Zeit und dauerhaft den nachgefragten Energiebedarf! | absolut unwichtig | unwichtig | eher unwichtig | durch- schnittlich | eher wichtig | wichtig | absolut wichtig | keine Angabe |
| Ressourcenschonung Die zukünftige Energieversorgung verbraucht möglichst wenig energetische (z.B. Erdöl) und nicht-energetische Ressourcen (z.B. Stahl)! | absolut unwichtig | unwichtig | eher unwichtig | durch- schnittlich | eher wichtig | wichtig | absolut wichtig | keine Angabe |
| Risikoarmut und Fehlertoleranz Die zukünftige Energieversorgung bietet keine Gefahren für Menschen und die Umwelt durch mögliche Unfälle! | absolut unwichtig | unwichtig | eher unwichtig | durch- schnittlich | eher wichtig | wichtig | absolut wichtig | keine Angabe |
| Soziale Verträglichkeit Die zukünftige Energieversorgung schafft Arbeitsplätze und stützt sich auf eine breite gesellschaftliche Akzeptanz! | absolut unwichtig | unwichtig | eher unwichtig | durch- schnittlich | eher wichtig | wichtig | absolut wichtig | keine Angabe |
| Umfassende Wirtschaftlichkeit Die zukünftige Energieversorgung ist bezahlbar und wettbewerbsfähig! | absolut unwichtig | unwichtig | eher unwichtig | durch- schnittlich | eher wichtig | wichtig | absolut wichtig | keine Angabe |
| Umwelt-, Klima- und Gesundheitsverträglichkeit Die zukünftige Energieversorgung weist einen geringen Eingriff in die Umwelt auf und vermeidet klimaschädliche Emissionen und radioaktive Abfälle! | absolut unwichtig | unwichtig | eher unwichtig | durch- schnittlich | eher wichtig | wichtig | absolut wichtig | keine Angabe |

Abb. 7: Auszug aus dem Fragebogen zur Gewichtung der sechs Leitlinien (Kriterien) mit Erläuterung und Bewertungsskala³⁶

Zur Beantwortung der Fragen zwei und drei steht eine weitere Tabelle mit sechs Rangplatzierungen zur Verfügung. Die befragte Person muss die zu bewertenden Kriterien ihrer Einschätzung entsprechend den jeweiligen Rängen zuordnen (Frage 2). Zusätzlich ist in der Tabelle eine dritte Spalte für die Direct-Ratio-Gewichtung vorgegeben.

Da mehrere Personen am Entscheidungsprozess beteiligt sind, handelt es sich um eine Mehrpersonen- oder Gruppenentscheidung. Hierbei besteht die Schwierigkeit, aus mehreren individuellen Urteilen eine kollektive Kriteriengewichtung zu bilden. Für die verwendeten Methodiken des Direct-Rating und Direct-Ratio wird die Aggregation individueller Präferenzen (AIP: Aggregation of Individual Priorities) vorgeschlagen (vgl. Lifka 2009, S. 58). Für jeden Befragten

³⁶ Der vollständige Fragebogen befindet sich im Anhang (Abb. 1).

werden zuerst die Präferenzen separat ermittelt und anschließend durch die Berechnung eines Mittelwertes aus allen individuellen Akteursurteilen zu einem Mehrheitsergebnis zusammengefasst.

1.3.5 Indexbildung

Neben der Möglichkeit, die Alternativen anhand der einzelnen Indikatoren zu vergleichen, ist es bei mehrkriteriellen Entscheidungen häufig notwendig ein Gesamtergebnis zu bilden, was durch Zusammenfassen aller (gewichteten) Einzelelemente erreicht wird. Es entsteht eine neue Variable, die einen abschließenden Gesamtvergleich der Alternativen zulässt und auch als Indexwert bezeichnet wird (vgl. Paier 2010, S. 59). Die Aggregation hilft dabei die Komplexität des Untersuchungsgegenstandes zu reduzieren (vgl. Krallmann 1989, S. 9) und den Sachverhalt mittels einer Kennzahl auszudrücken. Je nach mathematischer Operation sind additive und multiplikative Aggregationsverfahren zu unterscheiden. Bei beiden handelt es sich um kompensatorische Aggregationen, d.h. ein Nachteil einer Alternative in einem Kriterium bzw. bei einem Indikator kann durch einen Vorteil in einem anderen Kriterium ausgeglichen werden. Bei nicht kompensatorischen Verfahren geht dies nicht, weshalb auch keine weitere Aggregation passiert.

Die Bewertung von Energietechnologien im Konzept doppelter Nachhaltigkeit basiert in allen Hierarchieebenen des Zielsystems auf einer additiven Verknüpfung der Einzelergebnisse. Die erste Aggregation erfolgt getrennt innerhalb der Leitlinien eins bis drei, die jeweils aus mehreren Einzelindikatoren bestehen. Die normierten Zielkoeffizienten der jeweiligen Indikatoren (z_{ia}) werden ohne Gewichtung, d.h. unter Annahme einer Gleichwertigkeit, zum Kriterienwert der Leitlinie (w_{ka}) der jeweiligen Handlungsleitlinie (k) für die Alternative (a) zusammengefasst. Um einer Übergewichtung einer Leitlinie aufgrund ihrer Indikatorenanzahl vorzubeugen, wird die Summe durch die Anzahl der aggregierten Indikatoren dividiert. Damit ist der Wert (w_{ka}) im Verhältnis zu den Indikatorenwerten der Leitlinien, die nur durch einen Indikator repräsentiert sind, gleichgestellt und somit anschließend mit den übrigen Leitlinien auf der nächsten Ebene aggregierbar.

$$w_{ka} = \frac{\sum_{A=1}^{X_k} z_{iaA}}{X_k}$$

a = Alternative a

A = 1 bis X_{Lz}

X_k = Anzahl der Indikatoren der Leitlinie k

Das Gesamtergebnis einer Alternative errechnet sich aus der Summe aller Werte der Handlungsleitlinien (w_{ka}) multipliziert mit den jeweiligen Gewichten (g_k), unter der Voraussetzung, dass die Summe der Gewichte gleich 1 ist. Bei den Handlungsleitlinien Risikoarmut und Fehlertoleranz, soziale Verträglichkeit und umfassende Wirtschaftlichkeit ist der Wert der

Handlungsleitlinie (w_{ka}) gleich dem normierten Zielerreichungskoeffizienten des zugehörigen Indikators (z_{ia}) dieser Leitlinie, da immer nur ein Indikator je Leitlinie vorhanden ist.

Eine Alternative (a) wird als optimal (am besten) eingeschätzt, wenn sie den größten Gesamtnutzen aufweist (vgl. Jaeger 1989, S. 1202). Der vorgestellten Methodik entsprechend ist ein großer Nutzen durch eine kleine Zahl gekennzeichnet. Folglich sind Energieformen mit einem niedrigen Wert der Nachhaltigkeit näher als Technologien mit einem hohen Wert. Die Formel zur Berechnung des Indexwertes lautet:

$$N_a = \sum_{k=1}^h w_{ka} * g_k \quad \text{mit der Voraussetzung} \quad \sum_{k=1}^h g_k = 1$$

- N_a = als Indexwert der Alternative [a]
- N_a = als Indexwert der Alternative [a]
- w_{ka} = als Wert des Kriteriums (Handlungsleitlinie) (k)
- h = Anzahl an Handlungsleitlinien (Kriterien)

1.4 Sensitivitätsanalyse

Ziel einer Sensitivitätsanalyse ist es aufzuzeigen, wie empfindlich sich eine Änderung von Umgebungsbedingungen auf das Gesamtergebnis auswirkt. Sensitivitätsanalysen sind an denjenigen Stellen der Entscheidungsfindung sinnvoll, bei denen Unsicherheit über die verwendeten Werte besteht. Durch eine gezielte Variation von Analyseparametern lassen sich derartige Auswirkungen aufzeigen, weshalb Sensitivitätsanalysen zu mehr Transparenz im Entscheidungsprozess beitragen. Im Rahmen des Konzeptes doppelter Nachhaltigkeit kann dies zum einen der empirischen Datengrundlage, zum anderen der Kriteriengewichtung dienlich sein.

Die empirischen Daten (Indikatorenwerte) unterliegen zum Teil komplexen Messverfahren, die selbst auf Annahmen oder Schätzungen beruhen (z.B. umfangreiche Lebenszyklusanalysen mit der Berücksichtigung vor- und nachgelagerter Prozesse). Dieser Sachverhalt wird zusätzlich dadurch verstärkt, dass die Technologiebewertung in einem räumlichen Kontext stattfindet, wodurch i.d.R. weitere regionsspezifische Annahmen erforderlich sind. So können die Indikatorenwerte wegen der Abhängigkeit von physischen und sozio-ökonomischen Eigenschaften der jeweiligen Untersuchungsregion regional stark schwanken. Häufig sind empirische Daten zu den einzelnen Technologien aber nur für einen übergeordneten Raum (z.B. auf nationaler Ebene) verfügbar. Deshalb bietet sich hier die Chance einer Sensitivitätsanalyse, indem neben den regionalisierten Daten auch empirische Basisdaten der jeweiligen Technologien beachtet werden.

Die Sensitivitätsanalyse im Bereich der Kriteriengewichte kann einerseits der Ermittlung dienen, ab wann eine Modifikation der Gewichte zu einer Veränderung des Entscheidungsergebnisses führt.

Andererseits lassen sich verschiedene Gewichtungsverfahren vergleichen und auf ihre Eignung prüfen. Über die Sensitivitätsanalyse hinaus können mittels Szenarioanalysen Rahmenbedingungen und Annahmen gezielt verändert werden (vgl. Grünig & Kühn 2009, S. 127ff.). Hierfür bietet sich wiederum die Stufe der Kriteriengewichte an. Was passiert, wenn ein Kriterium (z.B. die umfassende Wirtschaftlichkeit oder der Umweltaspekt) im Vergleich zu allen übrigen Kriterien stark dominiert oder welche neue Rangfolge an Technologien stellt sich ein, wenn es eine Gleichverteilung der Kriteriengewichte gibt? Die Analyse derartiger Fragen hilft die empirisch erhobenen Präferenzen der Akteure zu vergleichen, um wertvolle Rückschlüsse sowohl auf die Technologien als auch auf die Gewichtung zu erhalten.

1.5 Diskussion der Technologiebewertung

Die Technologiebewertung ist im Konzept doppelter Nachhaltigkeit der erste Schritt zur Modellierung einer nachhaltigen Energieversorgung in einer Region. Wie jede Entscheidung beruht sie auf Annahmen und kann daher kritisch hinterfragt werden. Mit der Orientierung am HGF-Nachhaltigkeitskonzept, der Literaturrecherche zu den Indikatoren sowie den bereits zahlreich verwendeten Bewertungsverfahren wird versucht, den subjektiven Einfluss bzw. willkürliche Annahmen zu vermeiden. Gleichzeitig soll eine logisch strukturierte, transparente und praktikable Modellierung erreicht werden, weshalb die Komplexität und der Detaillierungsgrad des Indikatorensystems bewusst einfach gehalten sind. Dennoch bietet sowohl die Zusammenstellung des Indikatorensets als auch die Technologiebewertung im Allgemeinen Potenzial für verfeinerte Verfahren.

Indikatorensatz

Die Auswahl an praktikablen Indikatoren bedarf einer stetigen Überprüfung und der Berücksichtigung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse, die es z.B. ermöglichen, neue Indikatoren zu erheben oder bestehende Messverfahren für Indikatoren zu verbessern. So ist die Suche nach geeigneten Indikatoren für den Energiebereich sowohl auf internationaler als auch auf nationaler Ebene noch nicht abgeschlossen und wird durch ein stetig verbessertes Verständnis von Systemzusammenhängen in Zukunft zu ergänzen sein. Auch die Integration verschiedener Akteure und gesellschaftlicher Gruppen in die Auswahlentscheidung kann vor allem bei regionalen Untersuchungen notwendig sein. Die vorliegende Auswahl an Indikatoren versteht sich im Hinblick auf die jeweilige Zielsetzung als optimale Lösung, ohne jedoch Anspruch auf allgemeine Gültigkeit zu erheben. Aufgrund der immer zu wertbehafteten Entscheidung ist dies auch nicht möglich (vgl. Wietschel et al. 2002, S. 5). Die praktische Anwendung des Konzeptes kann durchaus zur Streichung oder Neuformulierung von Indikatoren führen (vgl. Nitsch et al. 2001, S. 4). Eine Erweiterung der

Kataloge ist jederzeit möglich (vgl. u.a. Fleury 2005, S. 43), wobei die praktische Anwendung und somit die Kriterien der Indikatoreauswahl im Auge zu behalten sind. Da in allen Studien von keiner endgültigen Auswahl an Indikatoren ausgegangen wird, ist es Konsens, dass sowohl die Art als auch die Anzahl der Indikatoren flexibel sind.

Mehrkriterielle Entscheidung

Eine Schwäche der Technologiebewertung ist nach Zimmermann und Gutsche (1991, S. 26), dass durch teils aufwendige Rechentechniken dem Entscheidungsträger eine Genauigkeit vorgespielt wird, die in Wirklichkeit mangels exakter Ausgangsdaten gar nicht vorhanden sein kann. Zudem führt die Aggregation der Einzelindikatoren bzw. Leitlinien bei kompensatorischen Verfahren zu einem Informationsverlust, indem Defizite einzelner Indikatoren durch positive Werte anderer Indikatoren ausgeglichen werden können. Die Kriteriengewichtung wird ebenfalls kritisch diskutiert, da sowohl in der Auswahl der Bewertungskriterien als auch in der Gewichtung „*bei jeder Bewertungstechnik ein erheblicher Spielraum für subjektive Einflüsse besteht.*“ (Domsch & Reinecke 1989, S. 153)

Die Vielzahl möglicher Bewertungsverfahren führt bereits bei der Wahl des Bewertungsverfahrens zu einem Entscheidungsproblem, für dessen Lösung allerdings kein ethischer „*(Meta-)Maßstab, warum der eine Wert dem anderen, warum die eine Methode der Bewertung der anderen vorgezogen werden soll*“ (Genosko 2005, S. 464) existiert. Mittels komplexer Bewertungs- und Gewichtungsverfahren lassen sich gegebenenfalls zwar exaktere Ergebnisse erzielen, gleichzeitig steigt aber häufig der Erhebungsaufwand. Bei der Festlegung auf eine Methodik müssen deshalb die Bereiche des Aufwandes und der Genauigkeit abgewogen werden.

Weiterhin ist es wichtig, sowohl die gewählten Indikatoren als auch deren Gewichtung bzw. die Gewichtung der Leitlinien nachvollziehbar und transparent zu gestalten, um die erzielten Ergebnisse im Rahmen energiepolitischer Diskussionen und zur Umsetzung von regionaler Energiestrategien als Hilfsmittel einsetzen zu können (vgl. hierzu Energie-Spiegel 2010, S. 3). So sollen entscheidungstheoretische Planungshilfen zwar zu einer rationalen Bewertung von Alternativen führen, aber keine absolute Richtigkeit, sondern „*die systematische, nachvollziehbare und logisch fundierte Auswertung der verfügbaren Informationen, so unvollständig, subjektiv und veränderlich diese auch seien*“ (vgl. Eisenführ 1989, S. 397), anstreben.

Im Rahmen des Konzeptes doppelter Nachhaltigkeit wird versucht, anhand einer inhaltlich reduzierten Art ein nachvollziehbares Entscheidungsverfahren zu präsentieren. Die einfache Modellierungsstruktur soll vor allem dazu dienen, verschiedenen Akteuren – darunter Personen, die keine Experten des Energiesektors sind, aufgrund persönlicher Betroffenheit aber dennoch großes Interesse an einer Mitsprache bei der Gestaltung der zukünftigen Energieversorgung haben – die Gelegenheit zu bieten, sich in den Entscheidungsprozess zu integrieren. Die Ergebnisse geben somit

auch dahingehend Orientierung, welche Technologien im jeweiligen Untersuchungsraum und unter Beachtung sozialer Wertvorstellungen den Ansprüchen der Nachhaltigkeit am meisten gerecht werden.

Im Konzept doppelter Nachhaltigkeit ist mit der Beurteilung der Energietechnologien die Prüfung von Nachhaltigkeitsaspekten noch nicht abgeschlossen. In einem nächsten Schritt besteht die Aufgabe darin, die ermittelte Rangfolge der Technologien aufzugreifen und die „nachhaltigen“ Technologien im Raum – wiederum mittels Nachhaltigkeitskriterien – sinnvoll zu verorten. Zusammenfassend trägt das Bewertungsverfahren den ersten Baustein zu einer möglichst friktionsarmen Umstellung der Energieversorgung hin zu nachhaltigen Strukturen und somit zur Zielsetzung der doppelten Nachhaltigkeit bei, indem es eine Vorauswahl und Ordnung von Technologiealternativen für den Untersuchungsraum zulässt.

2. Nachhaltige Potenzial- und Standortmodellierung

Die bloße Identifikation von nachhaltigen Energietechnologien mit Hilfe von Nachhaltigkeitsindikatoren reicht für die übergeordnete Zielsetzung, ein nachhaltiges Energiesystem für eine Region zu entwickeln, nicht aus. Vielmehr ist es Aufgabe, die in der Technologiebewertung (Teil 1) identifizierten Energietechnologien nun entsprechend nachhaltig einzusetzen. Deshalb erfolgt im nächsten Schritt des Konzeptes doppelter Nachhaltigkeit eine Raumanalyse mit einer Potenzial- und einer Standortmodellierung, welche dezidiert strukturelle, kulturelle, sozio-ökonomische und natürliche Eigenschaften des Untersuchungsraumes berücksichtigt.

Obwohl das prozedurale und dreidimensionale Nachhaltigkeitskonzept der Enquete-Kommission kontrovers diskutiert wird, liefert es mit der gleichrangigen Behandlung sämtlicher Dimensionen eine wichtige theoretische Grundlage. Die Nachhaltigkeitsdimensionen rücken in den Mittelpunkt der Betrachtung und integrieren die Belange verschiedener Akteure gleichberechtigt in die Diskussion um eine nachhaltige Energieversorgung. Dass die Energieversorgung mindestens die Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales umfasst, ist in der Literatur Konsens, womit gleichzeitig die zentralen Handlungsfelder einer zukünftigen Energieversorgung bei der Suche nach geeigneten Standorten verschiedener Energieformen angesprochen sind. Diese dimensionsbezogene Betrachtungsweise bietet damit beachtenswerte Anknüpfungspunkte für die anschließend vorgestellte Modellierungs- bzw. Analyseverfahren zur räumlichen Implementierung nachhaltiger Energietechnologien in einer Region.

2.1 Nachhaltigkeitsdimensionen und Potenzialermittlung

Eine sinnvolle und effiziente Standortplanung mit entsprechender Raumanalyse besitzt bei der Konzeption kommunaler bzw. regionaler nachhaltiger Energieversorgungsstrukturen höchste Priorität, auch unabhängig davon, welche Technologien sich für die jeweilige Untersuchungsregion als nachhaltig erweisen. Grundlage jeder Standortplanung ist die exakte Ermittlung von Energiepotenzialen infrage kommender Technologieoptionen. Darauf aufbauend können für jede Energieform Standortkriterien, die sich am Leitbild der Nachhaltigkeit orientieren, definiert werden. Bei erneuerbaren Energien ist besonders die Bestimmung des jeweiligen Energiepotenzials evident, da deren Potenziale durch die natürlichen Gegebenheiten des Raumes determiniert sind und ein Transport des Rohstoffes bzw. des Primärenergieträgers nicht oder nur eingeschränkt (z.B. bei Bioenergie) möglich ist. Bei fossilen Kraftwerken ist zwar auch die Nähe zu entsprechenden Rohstoffvorkommen entscheidend, aufgrund der aktuell geringen Transportkosten und der Tatsache, fossile Rohstoffe über weite Distanzen transportieren zu können, wird die zur Verfügung stehende Energiemenge an einem Ort durch andere Faktoren, speziell einer günstigen Infrastrukturanbindung bestimmt.

Für die erneuerbaren Energien besitzen Potenzialstudien bereits seit langem eine große Bedeutung und wurden sowohl für verschiedene Regionen als auch für unterschiedliche Technologien durchgeführt. Während ältere Studien ihren Fokus auf den Ausweis globaler und nationaler Potenziale richteten, dominieren heute vermehrt kleinräumige und sehr detaillierte Untersuchungen (vgl. exemplarisch Mittelböck et al. 2006 / Biberacher et al. 2008 / Prinz et al. 2009)³⁷, die hinsichtlich der gewählten Größe des Untersuchungsraumes und folglich auch in ihrer räumlichen Auflösung (Genauigkeit) sowie der getroffenen Annahmen, der Datengrundlage und Aussagekraft variieren. Trotz dieser Unterschiede ist allen bisherigen Potenzialermittlungen jedoch eine ähnliche konzeptionelle Vorgehensweise gemeinsam, welche in einer top-down-Strukturierung zum Ausdruck kommt und für die weitere Vorgehensweise wichtige Anknüpfungspunkte bietet. Von oben nach unten differenziert man nachstehende Potenziale (vgl. u.a. Kaltschmitt et al. 2006, S. 20ff.):

1. Theoretisches Potenzial

Wie der Name bereits andeutet, kennzeichnet dieses Potenzial das maximal mögliche, d.h. theoretisch realisierbare Angebot und ist folglich definiert als *„(...) innerhalb einer gegebenen Region zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. innerhalb eines bestimmten Zeitraumes*

³⁷ Neben der zitierten Literatur, die Energiepotenziale verschiedener Technologien ausweisen, sind exemplarisch weitere Potenzialstudien bzw. Beschreibungen zu den jeweiligen GIS-Methoden für einzelne Energieformen zu nennen (vgl. für Bioenergie: u.a. Kleinschmit et al. 2006 / Schardinger et al. 2010 / Bunzel et al. 2011 / Scherm o.J.; für Geothermie: u.a. StMWIVT 2010a; für Photovoltaik: u.a. Kallmünzer 2008 / Klärle 2008 / Ludwig, Klärle & Lanig 2008 / Günnewig et al. 2009 / Hilling & de Lange 2010; für Wasserkraft: u.a. Haslauer & Biberacher 2009; für Windenergie: u.a. Schaller et al. 2004 / Dällenbach & Schaffner 2005 / Böhner & Kickner 2006).

theoretisch physikalisch nutzbare Energieangebot (...)“ (Kaltschmitt et al. 2006, S. 21). Es ist ausschließlich von den naturräumlichen Gegebenheiten abhängig. Aufgrund des theoretischen Wertes ist es im Hinblick auf die konkrete Umsetzung wenig aussagekräftig und kann wegen vielfältiger technischer, ökologischer und sozialer Einwände meist nur zu einem geringen Teil genutzt werden. Für die Ermittlung der weiteren Potenziale ist das theoretische Potenzial allerdings die notwendige Ausgangsgröße.

2. Technisches Potenzial

Der Anteil am theoretischen Potenzial, welcher mit der aktuell zur Verfügung stehenden Technologie tatsächlich nutzbar ist, wird als technisches Potenzial bezeichnet. Eine weitere Differenzierung hinsichtlich der Bezugsgröße (Primärenergiepotenzial, Sekundärenergiepotenzial, Endenergiepotenzial und Nutzenenergiepotenzial) ist dabei sinnvoll. Häufig finden in dieser Stufe der Potenzialermittlung auch strukturelle und ökologische Restriktionen sowie gesetzliche Vorgaben Beachtung. Bei der Verbindung der Methodik zur Potenzialermittlung mit dem dreigliedrigen Nachhaltigkeitskonzept wird aus terminologischen Gründen davon jedoch abgewichen.

3. Wirtschaftliches Potenzial

Das wirtschaftliche Potenzial wiederum stellt nur einen Teil des technischen Potenzials dar, nämlich denjenigen, *„(...) der im Kontext der gegebenen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen wirtschaftlich genutzt werden kann“* (Kaltschmitt et al. 2006, S. 22). Beeinflusst durch ökonomische Parameter wie z.B. Zinssatz und vorgeschriebene Abschreibungsdauer kann die Wirtschaftlichkeit variieren. Zudem ist sowohl eine volkswirtschaftliche als auch betriebswirtschaftliche Wirtschaftlichkeitsrechnung vorstellbar.

4. Erschließbares Potenzial

In den gängigen Potenzialstudien beschreibt das erschließbare oder auch zu erwartende Potenzial den tatsächlichen Beitrag der jeweiligen Technik, der aufgrund administrativer, juristischer und marktwirtschaftlicher Restriktionen jedoch erst über einen längeren Zeitraum realisierbar ist. Die Differenz zum wirtschaftlichen Potenzial beruht auf der Tatsache, dass das Status-quo-Potenzial der Wirtschaftlichkeitsberechnung z.B. wegen begrenzter Produktionskapazitäten, langwieriger Genehmigungsverfahren, unvollständigen Marktinformationen oder behördlicher Verordnungen nicht sofort umsetzbar ist.

Die einzelnen Potenziale sind in der Literatur nicht trennscharf definiert, weshalb Restriktionen bzw. Kriterien in unterschiedlichen Stufen der Potenzialermittlung beachtet werden. Ebenso ist eine Erweiterung der Potenzialstufen vorstellbar. Der WBGU (2003, S. 48) differenziert demzufolge in ein theoretisches Potenzial, ein Wandlungspotenzial, ein technisches Potenzial, ein wirtschaftliches

Potenzial und schlussendlich in ein nachhaltig nutzbares Potenzial. Unter dem nachhaltig nutzbaren Potenzial sind alle Dimensionen der Nachhaltigkeit zu berücksichtigen, was durch das gegenseitige Abwägen bzw. Bewerten ökologischer und sozio-ökonomischer Aspekte erreicht wird.

Die vorliegende Modellierung greift diese Ansätze auf und verbindet die konzeptionelle Struktur einer Potenzialstudie mit den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit, um eine optimale Implementierung von nachhaltigen Energietechnologien in einer Region zu erzielen. Folglich ist es Ziel der räumlichen Analyse, nachhaltige Standorte für nachhaltige Technologien zu identifizieren. Die Standortmodellierung erfolgt einzeln für jede Technologie und beginnt bei derjenigen Technologieoption, die im ersten Abschnitt des Handlungskonzeptes die Nachhaltigkeitskriterien am besten erfüllt hat. In chronologischer Reihenfolge wird die Modellierung für die Technologien der weiteren Plätze durchgeführt, bis der Energieverbrauch der Region gedeckt ist (vgl. hierzu Kap. V 2.3.4).

Das dreigliedrige Nachhaltigkeitsverständnis spiegelt sich in der Modellierungsstruktur darin wider, indem die Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales mit ihren inhaltlichen Vorgaben als eigenständige Modellierungsschritte berücksichtigt und den jeweiligen Potenzialstufen wie in Abbildung 8 dargestellt zugewiesen werden. Diese drei Kategorien sind dem Drei-Säulen-Modell der Enquete-Kommission entnommen (vgl. Enquete Kommission 1998), finden in zahlreichen Nachhaltigkeitsstrategien Anwendung und werden auch im Zusammenhang mit einer nachhaltigen Energieversorgung oft genannt (vgl. Kapitel III 2.3). Mit der Integration dieser Dimensionen in die Modellierungsstruktur sollen ausschließlich die Kriterien einer nachhaltigen Entwicklung als Basis der einzelnen Modellierungsschritte fungieren, d.h. die Vorgehensweise orientiert sich einerseits am strukturellen Aufbau einer Potenzialstudie und andererseits an den Inhalten der drei Dimensionen. Durch diese Verknüpfung von Nachhaltigkeitsstrategie und Energiepotenzialstudie greift die Modellierung, wie bereits die Auswahl von Technologien, dezidiert auf die Vorgaben und Kriterien einer nachhaltigen Entwicklung zurück. Dabei gilt es, die drei Dimensionen mit entsprechenden Vorgaben für die Auswahl von Standorten zu konkretisieren.

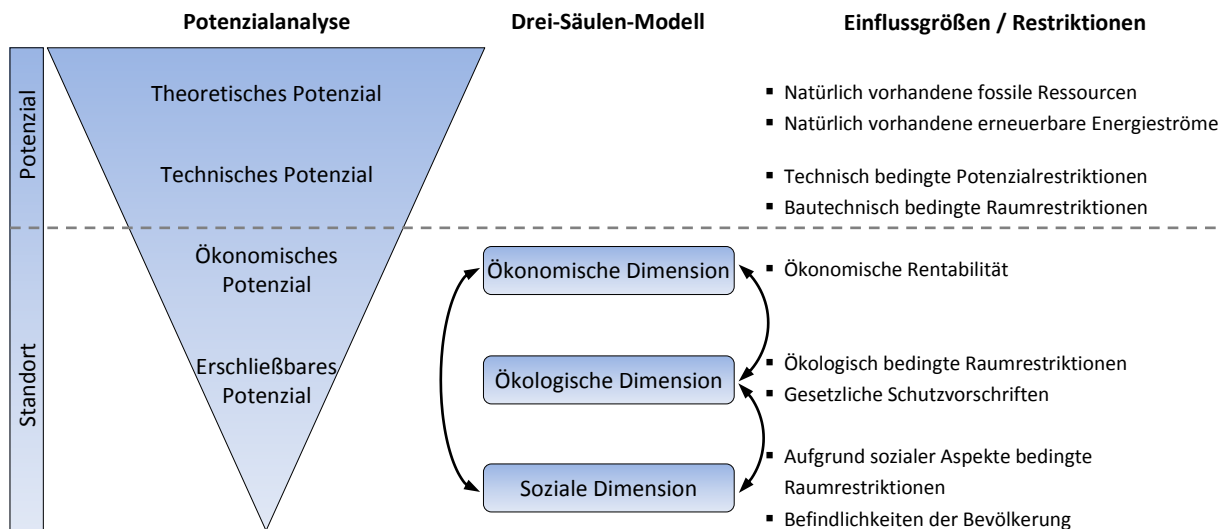


Abb. 8: Potenzialanalyse und Nachhaltigkeitsdimensionen

Obschon die drei Dimensionen mit der Zuweisung zur Methodologie der Potenzialanalyse eine top-down-Strukturierung erfahren, wird auch die von der Enquete-Kommission in ihrer Drei-Säulen-Strategie geforderte Gleichrangigkeit im Modell berücksichtigt. Die aufgezeigte Strukturierung einer Potenzialermittlung legt nämlich keine Wertigkeit sondern lediglich eine Reihenfolge fest. Gleichberechtigt bedeutet in der Drei-Säulen-Strategie, dass sich keine Dimension einer anderen Dimension unter- oder überordnen darf (vgl. Enquete Kommission 1998, S. 32ff.). Eine Priorisierung einer Dimension würde sich also folglich in ihrer Gewichtung ausdrücken. Im vorgestellten Konzept bleibt die Wertigkeit aller Dimensionen zueinander jedoch gänzlich unverändert, was sich in der Gleichbehandlung der gewählten Modellrestriktionen ausdrückt. Die Gleichrangigkeit im Sinne einer gleichgewichtigen Betrachtung bleibt somit stets gewahrt.

Die scheinbar hervorgehobene Funktion der ökonomischen Dimension im Vergleich zu den übrigen Dimensionen beruht auf der Tatsache, dass in einer Potenzialstudie angefangen von einem, aus dem natürlichem Energieangebot resultierenden theoretischen Potenzial restriktiv das technische Potenzial, dann das wirtschaftliche Potenzial und daran anknüpfend das erschließbare Potenzial abgeleitet wird. Ohne eine Dimension bevorzugt zu behandeln, erscheint wegen der Verknüpfung zur Potenzialanalyse die Modellierung nur in dieser Reihenfolge praktikabel. Die vorgestellte Potenzial- und Standortmodellierung anhand nachhaltiger Kriterien behält deshalb diese strukturelle Vorgabe bei. Mittels der Potenzialanalyse können schließlich die verschiedenen Technologien anhand ihres Beitrages zur Energieversorgung verglichen und durch eine konkrete Standortplanung im Verbund optimiert werden.

2.2 Potenzial- und Standortsuche

Um den hochgestellten Ansprüchen einer nachhaltigen Energieversorgung in räumlicher Perspektive gerecht zu werden, sind – ähnlich zur Technologiebewertung – Kriterien notwendig, die klare Standortansprüche sowie raumbedeutsame Aspekte für jede in Betracht kommende Technologie formulieren. Mit Hilfe dieser räumlichen Kriterien, in denen sich die normativen Vorgaben einer nachhaltigen Entwicklung widerspiegeln, wird es möglich, die bereits aufgezeigte Verbindung von Nachhaltigkeit und Potenzialanalyse mit Inhalt zu füllen. Damit gelingt es Flächen auszuweisen, die einerseits hohe Ertragswerte bzw. eine gute ökonomische Rentabilität aufweisen und andererseits ein geringes soziokulturelles wie ökologisches Konfliktpotenzial besitzen.

Zu Beginn erfolgt ein separater und technologiespezifischer Ausweis theoretischer sowie technischer Energiepotenziale. Mit Hilfe dieser Basis können die Nachhaltigkeitskriterien der ökonomischen, ökologischen und sozialen Dimension in den Modellierungsprozess integriert werden. Die Kriterien sind als Restriktionen formuliert und beschreiben räumliche Ausschlussflächen, die vom technischen Energiepotenzial subtrahiert werden. Übrig bleiben Gunstflächen, die im Umkehrschluss Flächen repräsentieren, die für die Errichtung einer Energieanlage in Betracht kommen. Dieser chronologische Aufbau – ausgehend vom Potenzial einer Technologie und anschließend subtrahiert um ökonomische, ökologische und soziale Ausschlussflächen – wird für sämtliche in Betracht kommende Energietechnologien wiederholt, um die jeweils geeigneten Standorte zu identifizieren.

Die notwendigen Restriktionen leiten sich aus den Forderungen der jeweiligen Nachhaltigkeitsdimension ab. Aufgrund der Allgemeingültigkeit der drei Säulen – das Konzept ist auch in anderen Themen- bzw. Aktivitätsfeldern populär – müssen fokussiert auf den Energiesektor deshalb für jede Dimension zuerst relevante Vorgaben definiert werden, welche zusammen mit den technologiespezifischen Standortansprüchen schließlich die Parameter der Modellierung bilden. Manche Restriktionen lassen sich dabei jedoch nur bedingt einer einzigen Nachhaltigkeitsdimension zuweisen. Abhängig von der analysierten Technologie wäre es teils möglich, gewählte Restriktionen auch in einem vor- oder nachgelagerten Modellierungsschritt bzw. einer anderen Dimension zu berücksichtigen (vgl. z.B. Restriktion der Hangneigung³⁸). Um die Energiepotenziale verschiedener Technologien vergleichbar zu machen, wird auf eine einheitliche Zuteilung der Restriktionen zu den jeweiligen Dimensionen geachtet.

³⁸ Die Neigung des Geländes stellt unzweifelhaft eine natürlich-physische Eigenschaft der untersuchten Region dar und bildet in mehrfacher Hinsicht eine Restriktion. So ist der Ausschluss einer Fläche z.B. sowohl wegen technischer als auch wegen ökonomischer Gründe möglich. Je nach modelliertem Aspekt (technisch, ökonomisch, ...) kann der Grenzwert der Geländeneigung dabei variieren. Obwohl der Bau z.B. einer Windkraftanlage bei einer gewissen Steilheit des Geländes aus technischen Gründen durchaus noch machbar ist, ist der dazu erforderliche Mehraufwand aus ökonomischer Sicht vielleicht jedoch nicht mehr gerechtfertigt.

2.2.1 Theoretisches und technisches Potenzial als Basis zur Suche nachhaltiger Standorte

Die Ermittlung des theoretischen Potenzials dient als Basis für die im Anschluss folgende Suche nach geeigneten Standorten neuer Energieanlagen. In Anlehnung an die Potenzialanalyse bei erneuerbaren Energien beinhaltet das theoretische Potenzial definitorisch eine starke räumliche wie zeitliche Komponente und umschreibt das physikalisch maximal nutzbare Energieangebot. Für die vorliegende Modellierung trifft dies nun gleichfalls auf erneuerbare Energien wie auf fossile Energien zu. In beiden Fällen ist die naturräumliche Raumausstattung, unter Berücksichtigung der natürlichen Regenerationsfähigkeit, der limitierende Faktor des regionalen Energieangebots.

Die Größe des Energiepotenzials ist im Bereich erneuerbarer Energien durch die im Untersuchungsgebiet natürlich vorhandenen Energieströme bzw. bei fossilen Energieträgern durch die vorhandenen energetischen Reserven bestimmt. Beispiele für erneuerbare Energieströme sind die natürliche Sonneneinstrahlung, der Zuwachs an Biomasse oder vorhandene Luftströme und für fossile Energien die im Untersuchungsgebiet lokalisierten Erdgasvorkommen. Die Berechnung der jeweiligen Potenzialgröße basiert auf diesen naturräumlichen und physikalischen Gegebenheiten. Einen Überblick über die theoretischen Energiepotenziale sowohl fossiler als auch erneuerbarer Energien gibt Tabelle 3. Die regionspezifisch verfügbare theoretische Energiemenge wird im Laufe der Modellierung aufgrund technologischer Einschränkungen sowie den Vorgaben aus dem Nachhaltigkeitskonzept, wirtschaftlich rentabel, gesellschaftlich konsensfähig und ökologisch vertretbar zu sein, stetig verringert.

Tabelle 3: Regionale theoretische Energiepotenziale

| Technologie | Regionales theoretisches Energiepotenzial |
|----------------------|---|
| Fossile Energien | |
| Atomenergie | Vorhandene Uran-Ressourcen im Untersuchungsgebiet und deren Lokalität (Annahme einer durchschnittlichen jährlichen Fördermenge) |
| Erdgas | Vorhandene Erdgas-Ressourcen im Untersuchungsgebiet und deren Lokalität (Annahme einer durchschnittlichen jährlichen Fördermenge) |
| Kohlekraft | Vorhandene Kohle-Ressourcen im Untersuchungsgebiet und deren Lokalität (Annahme einer durchschnittlichen jährlichen Fördermenge) |
| Erneuerbare Energien | |
| Biomasse | Jährlich zur Verfügung stehende Biomasse und deren Lokalität |
| Sonnenenergie | Jährliche durchschnittliche Globalstrahlungswerte und deren Lokalität |
| Wasserkraft | Durchschnittliche jährliche Abflussmengen, Abflussregime und Gefälle aller fließender Gewässer |
| Windenergie | Durchschnittliche jährliche Windgeschwindigkeiten und deren Lokalität |

Erst die technische Möglichkeit, theoretisch vorhandene Energiepotenziale an einem Standort zu nutzen, wirft die Frage nach ökonomischer Rentabilität sowie ökologischer und sozialer Verträglichkeit auf. Deshalb wird aus den Ergebnissen der theoretischen Potenzialermittlung das technische Potenzial abgeleitet. Dieses beinhaltet in bisherigen Potenzialanalysen neben den

technischen Restriktionen meist auch weitere ökologische, gesetzliche und strukturelle Vorgaben. Abweichend zur Literatur werden in der vorliegenden Modellierung gesetzliche und ökologische Einschränkungen jedoch erst in der sozialen bzw. ökologischen Dimension berücksichtigt. Dies geschieht mit Blick auf die im Anschluss folgende separate Betrachtung der Nachhaltigkeitsdimensionen. Die Restriktionen zur Ermittlung des technischen Energiepotenzials umfassen deshalb nur technische Vorgaben und bautechnische Einschränkungen.

Die technischen Vorgaben einer Anlage geben Auskunft darüber, wie viel des theoretischen Primärenergieangebots durch den Einsatz der jeweiligen Technologie tatsächlich in nutzbare Energie umgewandelt werden kann. Für jede untersuchte Energieform wird dabei ein flächendeckender Ausweis technischer Energiepotenziale angestrebt, um für jeden Standort im Untersuchungsraum eine Aussage bezüglich der potenziell technisch nutzbaren Energiemenge treffen zu können. Wichtige technische Parameter dazu sind Angaben zur Betriebsart, Größe, Leistung und Auslastung sowie zum Wirkungsgrad. Die Parameter werden dabei von den fest definierten Referenzanlagen wie sie bereits bei der Technologiebewertung zum Einsatz kamen übernommen.

Unter bautechnischen Restriktionen sind diejenigen naturräumlichen und soziokulturellen Eigenschaften gemeint, welche die Errichtung einer Produktionsstätte unmöglich machen. Die rasante Entwicklung im Bereich des Bauwesens hat in den vergangenen Jahren den Einfluss räumlicher Gegebenheiten auf die Bauform verringert, so dass bautechnische Grenzen nur mehr vereinzelt bestehen. Die Grenzen sind heute zumeist durch ökonomische oder soziale Vorgaben nicht aber durch die Bautechnik definiert. Dennoch werden bereits an dieser Stelle der Modellierung entsprechende Voraussetzungen, die den Bau von Energieanlagen erheblich beeinflussen, berücksichtigt. Naturräumlich zählen dazu z.B. die Hangneigung oder große Fließgewässer. Die Abtragung steiler Hänge sowie das Aufschütten großflächiger Gewässerflächen werden demnach als technisch nicht möglich angenommen. An dieser Stelle sei nochmals auf die bereits thematisierte Problematik der Zuteilung von Restriktionen zu einzelnen Dimensionen bzw. Modellierungsschritten verwiesen, wonach ein Ausschluss auch bei der Erörterung wirtschaftlich rentabler Standorte gerechtfertigt wäre, da dementsprechende Standorte aufgrund des erhöhten Bauaufwandes benachteiligt sind.

Abhängig von der Energieform und der Anlagengröße wird der Bau von Energieanlagen etwa innerhalb von z.B. Siedlungsflächen, Flächen gemischter Nutzung oder Flächen, die dem Sport, der Freizeit oder der Erholung dienen, ebenso bereits in diesem Modellierungsschritt ausgeschlossen. Die Energieform ist dahingehend entscheidend, da manche Technologien wie etwa die Photovoltaik auf Dachflächen gerade auf diese Bereiche angewiesen sind. Kleine Energieanlagen können ebenfalls innerhalb dieser Flächenkategorien zum Einsatz kommen, so z.B. bei der Bioenergie in Form von

häuslichen „Mini“-Blockheizkraftwerken. Große Biogasanlagen kommen hingegen in einer Wohnbaufläche nicht in Betracht. Die Restriktionen sind individuell für jede Energieform durch die Definition von Referenzanlagen festzulegen. Im empirischen Teil der Arbeit folgt gesondert für alle modellierten Technologien die Beschreibung der Modellierung sowie die darin enthaltenen Parameter zur Ermittlung theoretischer und technischer Energiepotenziale.

2.2.2 Ökonomische Dimension

Die ökonomische Dimension orientiert sich an einer wettbewerbsfähigen Wirtschaftsweise, die Wohlstand generiert und die wesentlichen Zielsetzungen der sozialen Marktwirtschaft verfolgt (vgl. Enquete-Kommission 1998, S. 20ff.). Dabei wird *„die Allokation der Ressourcen, ihre Zuordnung auf die verschiedenen Verwendungen an den geeigneten Standorten mit den effizientesten Verfahren“* (Enquete-Kommission 1998, S. 21) als die Aufgabe der Marktsteuerung gesehen. Der Markt mit seiner Preisbildung erhält eine zentrale Steuerungsfunktion, was nicht selten im Nachhaltigkeitsdiskurs kritisiert wird. Trotz dieser allgemeinen Kritik bleibt die Ökonomie eine tragende Säule, insbesondere auch für den Energiesektor, da der geforderte Umbau der Energieversorgung enorme Investitionen benötigt.

Jeder Neubau einer Energieproduktionsstätte, egal welcher Bauart oder Technologie, ist mit einem finanziellen Aufwand verbunden. Die Investition ist dann lukrativ, wenn der Investor damit langfristig einen wirtschaftlichen Gewinn erzielt, er diesen (möglichst) maximieren kann und somit seine Rentabilitätsansprüche erfüllt sind (vgl. Wöhe & Döring 2005, S. 583ff.). Aus betriebswirtschaftlicher Sicht sind deshalb alle möglichen Investitionsalternativen, in diesem Fall alle potenziellen Standorte hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit zu prüfen. Ein wettbewerbsfähiger Standort ist demzufolge definiert als Ort, der dem Anspruch eines Investors genügt. Diesem Kredo folgend wird innerhalb der ökonomischen Dimension analysiert, welcher Anteil des technologischen Potenzials unter Annahme der jeweiligen Technologieoptionen und im Kontext der gegebenen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen diese Voraussetzung erfüllt und wo diese Standorte lokalisiert sind. Dies ist wiederum auch Zielsetzung der ökonomischen Potenzialermittlung (vgl. Kaltschmitt et al. 2006, S. 22), wodurch die Verknüpfung beider Verfahren deutlich wird.

Stromgestehungskosten, die bereits bei der Technologiebewertung (Schritt 1) berücksichtigt wurden, sind eine praktikable Maßzahl, um Standorte vergleichen zu können. Sie geben dem Investor einen Anhaltspunkt, welcher finanzielle Aufwand notwendig ist, eine Energieeinheit zu produzieren. Diese Beschränkung auf einen reinen Kostenvergleich der verschiedenen Technologien ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn die Investitionsentscheidung keinen Einfluss auf die Erlösseite hat (vgl. Wöhe & Döring 2005, S. 595). Am Energiesektor würde dies stets gleich bleibende Absatzpreise für eine Stromeinheit

bedeuten. Allerdings unterliegen die Strompreise am Energiemarkt starken Preisverzerrungen, die einen wirtschaftlichen Vergleich gemessen an der Rentabilität einer Technologie erschweren. So garantiert das EEG höhere Einspeisetarife für Strom aus erneuerbaren Energien als unter marktwirtschaftlichen Bedingungen erreicht würden. Für den Betreiber einer Energieanlage, die nach Fördersätzen des EEG vergütet wird, bedeutet dies Mehreinnahmen, ohne dass sich auf der Kostenseite Veränderungen ergeben. Die kostengünstigste Technologie ist deshalb nicht zwingend die gewinnmaximale Investition für den Betreiber.

Neben den Stromgestehungskosten können weitere Kennzahlen wie die Volllaststundenzahl bei der Windenergie oder ein Mindestertrag an Sonneneinstrahlung bei der Photovoltaik als Grenzwerte des wirtschaftlichen Betriebes einer Anlage herangezogen werden. Zusätzlich sind auch infrastrukturelle Gegebenheiten zu beachten. Dies gilt im Besonderen für Energieformen, die auf Rohstofflieferungen angewiesen sind und damit kostengünstige Transportbedingungen benötigen. Modellierungsgegenstand kann hier die Nähe zu einer adäquaten Verkehrsinfrastruktur sein. Bei Wärmekraftwerken (z.B. Bioenergie) ist zudem die Lieferung und Verteilung der Wärme eine bedeutende Größe (Kraft-Wärme-Kopplung). Nah- und Fernwärmenetze sind möglichst effizient und mit kurzen Wegen zwischen Erzeuger und Verbraucher zu planen, um ökonomisch rentabel zu sein. Für Kraft-Wärme-Kopplung ist es daher entscheidend, möglichst viele Wärmeabnehmer im Umkreis des Anlagenstandortes zu haben.

Die Rentabilität einer Anlage ist für den Investor das ausschlaggebende Kriterium. Erst wenn die Aussicht auf ökonomischen Profit besteht, wird er eine konkrete Planung beginnen. Aus Sicht der ökonomischen Nachhaltigkeitsdimension ist es in der Modellierung daher geboten, Standorte zu suchen, die dieses Merkmal aufweisen. Dazu müssen neben den technischen Anlagenparametern auch die ökonomischen Vorstellungen des Investors bekannt sein. Die ökonomische Modellierung reduziert somit das technische Potenzial auf den Anteil, der unter den aktuellen wirtschaftlichen Bedingungen profitabel nutzbar ist.

2.2.3 Ökologische Dimension

Die bereits umweltbezogene Ressourcenabschätzung des theoretischen Potenzials mit der Beachtung natürlicher Energieströme bzw. Energievorkommen wird im Modellierungsschritt der ökologischen Dimension um die Schutzbedürftigkeit natürlicher Systeme ergänzt. Hierfür steht der Begriff Ökologie mit dem heutzutage im Nachhaltigkeitsdiskurs geläufigen Verständnis von Natur- und Umweltschutz. Die Enquete-Kommission benennt als Grundlage zur Formulierung ökologischer Ziele den „*Erhalt bzw. die Wiederherstellung der vielfältigen Funktionen der Natur zum Nutzen der Menschen*“ (vgl. Enquete-Kommission 1998, S. 20). Dieses zentrale Anliegen wird unter Beachtung

einer dauerhaften Sicherung verschiedener natürlicher Eigenschaften auch in zahlreichen gesetzlichen Schutzvorschriften verfolgt (vgl. exemplarisch BNatSchG 2009, § 1 / BayNatSchG 2011, Art. 1), wobei stets die Verbindung zwischen Naturschutz und sozialer, kultureller sowie wirtschaftlicher Entwicklung (Nachhaltigkeit) betont wird (vgl. exemplarisch RICHTLINIE 92/43/EWG 1992 S. 2f.).

Die jeweiligen Schutzbestimmungen sind von den gesellschaftlichen Wertvorstellungen und Wertschätzungen gegenüber der Natur bzw. der Umwelt geprägt, weshalb eine Beachtung im Rahmen der sozialen Dimension ebenfalls gerechtfertigt wäre. Dennoch werden sie der ökologischen Dimension zugeordnet. Die Gründe dafür ergeben sich aus zwei Aspekten: Zum einen stimmen die inhaltlichen Zielsetzungen der ökologischen Nachhaltigkeitsdimension mit den zahlreichen Schutzvorschriften überein. Orientiert an den drei Säulen der Nachhaltigkeitsstrategie wird zum anderen damit eine übersichtliche Modellierungsstruktur gewährleistet, die auch aussagekräftige Vergleiche z.B. zwischen verschiedenen Regionen ermöglicht. Intention innerhalb der ökologischen Dimension ist es folglich, Natur- und Umweltschutzbelange als mögliche Standorteinschränkungen für die jeweiligen Energietechnologien in die Modellierung zu integrieren.

Global wirksame Umweltfolgen, wie die weltweite Temperaturerwärmung aufgrund von Treibhausgasemissionen, oder allgemein durch die Technologieart verursachte Umweltauswirkungen, wie die Menge an radioaktivem Abfall, werden in diesem Modellierungsschritt nicht mehr berücksichtigt. Diese und ähnliche Kriterien wurden für alle Energieformen bereits bei der technologischen Nachhaltigkeitsbewertung (Schritt 1) eingehend beleuchtet und sind für eine konkrete Standortplanung nicht mehr relevant, da die Folgen an jedem Standort auftreten würden. Gleichwohl gilt es die Auswirkungen auf die nahe Umwelt – hierzu zählen z.B. Schadstoffbelastung, visuelle Beeinträchtigung oder Lärmemissionen – bei einer tatsächlichen Realisierung von Standorten selbstverständlich zu beachten.

Die Natur- und Umwelteingriffe sind bei der Errichtung von Kraftwerken im Sinne der Nachhaltigkeit zu minimieren. Speziell naturrechtlich geschützte Gebiete sollten weitestgehend unbeeinflusst bleiben. Da sich die geschützten Gebiete hinsichtlich ihrer Schutzvorschriften erheblich unterscheiden, für sämtliche Energieformen jedoch Bedeutung besitzen, ist eine differenzierte Betrachtung anhand einer kurzen Erläuterung notwendig.³⁹ Die Reihenfolge der genannten Schutzgebiete orientiert sich an den betreffenden Zuständigkeiten. So zählen NATURA 2000-Gebiete (FFH- und SPA-Gebiete), Biosphärenreservate und Feuchtgebiete mit internationaler Bedeutung (Ramsar-Gebiete) zu den internationalen Schutzvorschriften. Nationale Schutzbestimmungen

³⁹ Die Ausführungen beziehen sich auf das Bayerische Landesamt für Umwelt (vgl. LfU 2005) und werden an gekennzeichneten Stellen durch energiewirtschaftlich bedeutsame Anmerkungen ergänzt. Ihre Aussagekraft über den Freistaat Bayern hinaus bedarf einer Überprüfung.

umfassen Naturschutzgebiete (NSG), Nationalparks, Naturparks, Landschaftsschutzgebiete (LSG), Naturdenkmäler, Landschaftsbestandteile und Grünbestände sowie gesetzlich geschützte Biotope (vgl. LfU 2005, S. 1 ff.). Neben den Richtlinien zu den jeweiligen Schutzgebietstypen sind in Deutschland das Bundesnaturschutzgesetz (vgl. BNatSchG 2009) und in Bayern das Bayerische Naturschutzgesetz (vgl. BayNatSchG 2010) wesentliche Rechtsgrundlagen.⁴⁰ Folgende Schutzbestimmungen sind für die Modellierung relevant, wobei sich die Gebiete zum Teil mehrfach räumlich überlagern:

- NATURA 2000-Gebiete

NATURA 2000-Gebiete umfassen die Flora-Fauna-Habitat-Gebiete (FFH), geschützt durch die europäische Richtlinie 92/43/EWG und die Vogelschutz-Gebiete (SPA-Gebiete⁴¹), geschützt durch Richtlinie 79/409/EWG. Die Schutzbestimmungen schreiben vor, dass die Qualität dieser Gebiete bewahrt und erhalten werden muss. Absicht ist es, die Erhaltung der biologischen Vielfalt zu fördern. Dabei gilt ein generelles Verschlechterungsverbot. Für Bauvorhaben innerhalb dieser Schutzgebiete bedeutet dies vorab eine Verträglichkeitsprüfung mit den Erhaltungszielen der Richtlinien durchzuführen. Der Bau einer Energieerzeugungsanlage oder einzelner Komponenten (z.B. Talsperre) in solchen Gebieten erscheint – mit Ausnahme zwingender Gründe des überwiegenden öffentlichen Interesses (vgl. § 34 Abs. 3 BNatSchG) – aufgrund des Eingriffs in den Naturhaushalt schwierig realisierbar.

- Biosphärenreservat

Biosphärenreservate haben zum Ziel, die vom Menschen geschaffene Kulturlandschaft einer Region zu bewahren oder wiederherzustellen. Deshalb sind die Schutzvorschriften vorrangig an der Kulturlandschaft und nicht am Natur- und Landschaftsschutz orientiert. Alle Handlungen, darunter auch Bautätigkeiten, die der Erreichung des Ziels entgegenstehen, sind verboten.

- Ramsar-Gebiete (Feuchtgebiete mit internationaler Bedeutung)

Ramsar-Gebiete⁴² sind Feuchtgebiete mit internationaler Bedeutung und durch die Ramsar-Konvention geschützt. Die Schutzbestimmungen sehen kein generelles Nutzungsverbot vor sondern streben eine nachhaltige, ökologisch ausgewogene Nutzung an. Ziel ist es, die Biodiversität innerhalb der geschützten Fläche zu erhalten. Dennoch steht auch ihre Fläche

⁴⁰ Rechtsgrundlagen der jeweiligen Schutzgebietstypen (BNatSchG 2009 / BayNatSchG 2010):

- Biosphärenreservate: § 25 BNatSchG und Art. 3a BayNatSchG
- Gesetzlich geschützte Biotope: § 30 BNatSchG und Art. 13d BayNatSchG
- Landschaftsbestandteile und Grünbestände: § 29 BNatSchG und Art. 12 BayNatSchG
- Landschaftsschutzgebiete: § 26 BNatSchG und Art. 10 BayNatSchG
- Nationalparks: § 24 BNatSchG und Art. 8 BayNatSchG
- NATURA 2000-Gebiete: § 33 BNatSchG und Art. 13b, c BayNatSchG
- Naturdenkmäler: § 28 BNatSchG und Art. 9 BayNatSchG
- Naturparks: § 27 BNatSchG und Art. 11 BayNatSchG
- Naturschutzgebiete: § 23 BNatSchG und Art. 7 BayNatSchG

⁴¹ SPA steht für Special Protection Area

⁴² Der Name Ramsar geht auf den iranischen Tagungsort zurück, in welcher im Jahr 1971 die Konvention mit dem Namen „The Convention on Wetlands of International Importance especially as Waterfowl Habitat“ unterzeichnet wurde.

der energiewirtschaftlichen Nutzung nicht zur Verfügung. Dies ist nicht einzig auf das Schutzabkommen sondern auch auf die schlechten Standortbedingungen für Bauzwecke in diesen Gebieten zurückzuführen. Zu den Feuchtgebieten im Sinne der Ramsar-Konvention zählen u.a. Feuchtwiesen oder Moor- und Sumpfgebiete⁴³. Wegen ökologischer Bedenken wie auch aus wirtschaftlichen Überlegungen werden diese Gebiete deshalb als energiewirtschaftlich nicht nutzbar betrachtet.

- Naturschutzgebiete (NSG)

Naturschutzgebiete sind die Kerngebiete des Natur- und Landschaftsschutzes. Gebot ist der Erhalt oder die Wiederherstellung von Biotopen oder Lebensgemeinschaften bestimmter wild lebender Tier- und Pflanzenarten (vgl. LfU 2005, S. 4). Jegliche Veränderungen in diesen Gebieten sind untersagt. Naturschutzgebiete sind bei der Ausweisung von Bebauungsplänen zu beachten. Hierbei gelten die Eingriffs-Ausgleichs-Regelungen des BNatSchG und BayNatSchG.

- Nationalparks

Nationalparks haben zum Ziel, in ihrem Gebiet einen möglichst ungestörten Ablauf der Naturvorgänge zu gewährleisten. Wirtschaftliche Tätigkeiten wie z.B. die Nutzung von Rohstoffen oder Land- und Forstwirtschaft sind meist untersagt. Wie bei den Naturschutzgebieten müssen Nationalparks bei der Bauleitplanung berücksichtigt und ausgewiesen werden. Es gelten wiederum die Eingriffs- und Ausgleichsregelungen des BNatSchG und BayNatSchG.

- Naturparks

Naturparks sind geplante und erschlossene Gebiete. Ihr Zweck dient der umweltverträglichen Erholung und der touristischen Vermarktung. Dabei orientiert sich die Bewirtschaftungsform in einem Naturpark an einer nachhaltigen natur- und umweltverträglichen Landnutzung. Verboten sind Eingriffe, welche die Zielerreichung gefährden. Für eine Energieversorgung stehen diese Flächen jedoch unter den genannten Auflagen zur Verfügung.

- Landschaftsschutzgebiete (LSG)

Landschaftsschutzgebiete sind ebenfalls rechtsverbindlich festgeschriebene Gebiete, in denen ein besonderer Schutz von Natur und Landschaft gilt. Ziel ist die Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes zu erhalten oder wieder herzustellen. Die Schutzbestimmungen sind wesentlich geringer als in Naturschutzgebieten und bezwecken eine Bewahrung des „Charakters“ eines Gebietes (vgl. LfU 2005, S. 7). Eingriffe, die den Charakter verändern, sind untersagt. Dennoch gilt kein absolutes sondern ein relatives Veränderungsverbot. Bei Bauvorhaben gelten die Eingriffs- und Ausgleichsregelungen des BNatSchG und BayNatSchG. Als Standorte für nachhaltige Energieformen kommen diese Gebiete technologieabhängig teilweise in Betracht.

⁴³ Zur Definition von Feuchtgebieten siehe Ramsar Convention Secretariat (2011, S. 7f.).

- Naturdenkmäler

Ein Naturdenkmal ist ein unter Naturschutz stehendes Landschaftselement, wie z.B. seltene oder besonders schöne Felsformationen, Quellen und Bäume. Veränderungen sind untersagt. Die Modellierung berücksichtigt Naturdenkmäler, soweit ihr Datenbestand erhoben und fassbar ist, mit technologiespezifischen Schutzzonen (Puffer) um alle Denkmäler. Diese Zonen kommen wie die Denkmäler selbst für eine energiewirtschaftliche Nutzung nicht in Betracht.

- Landschaftsbestandteile und Grünbestände

Landschaftsbestandteile sind Teile der Kulturlandschaft von besonderer Bedeutung, unterliegen jedoch nicht den Kriterien von Naturdenkmälern (z.B. Baumgruppen, Hecken, oder Streuwiesen). Eine Zerstörung, Beschädigung, oder Beseitigung sowie Veränderungen sind verboten. Wie bei den Naturdenkmälern können, soweit die entsprechenden Geodaten vorliegen, Landschaftsbestandteile und Grünbestände mit Pufferzonen berücksichtigt werden.

- Gesetzlich geschützte Biotop- bzw. 13d-Flächen

Gesetzlich geschützte Biotop- bzw. 13d-Flächen erfüllen nicht den Anspruch eines Naturdenkmals. Häufig werden diese Flächen auch als 13d-Flächen bezeichnet. Diese Bezeichnung geht auf den Paragraph 13d im BayNatSchG zurück. Dieser Paragraph verbietet alle Maßnahmen, die eine Zerstörung oder eine erhebliche Beeinträchtigung zur Folge haben. Ausnahmen sind nur dann zulässig, wenn Ausgleichsflächen geschaffen werden und der Eingriff aus Gründen des Gemeinwohls notwendig ist. Als potenzielle Standorte zur Errichtung von Kraftwerken sind diese Flächen aufgrund ökologischer Belange zumeist jedoch auszuschließen.

Abhängig von der Technologie finden über die konkreten Schutzbestimmungen hinaus Landschaftsbestandteile mit sensiblen Ökosystemen Eingang in die Standortmodellierung. Eine bauliche Überprägung dieser Flächen mit der jeweiligen Energietechnologie erscheint aus ökologischer Sicht fragwürdig, weshalb diese keine potenziellen Standorte darstellen. Zu nennen sind unter anderem Sümpfe, Moore und Gewässerflächen, die noch keiner Schutzbestimmung unterliegen.

Wie bereits in der theoretischen Herleitung des Konzeptes doppelter Nachhaltigkeit erläutert, geht es im zweiten Teil ausschließlich darum, die nachhaltigen Technologien ökonomisch rentabel sowie ökologisch und sozial verträglich einzusetzen. Die Errichtung von Energieerzeugungsanlagen hat dabei zumeist nicht nur Einfluss auf den konkreten Standort sondern auch auf die nähere Umgebung z.B. durch Lärm oder Luftbelastung. Dem ökologischen Aspekt entsprechend werden deshalb neben den gesetzlich geschützten Gebieten auch Abstände zu diesen Flächenkategorien modelliert. Die Abstände sind als weitere Modellierungskriterien erfasst und anhand einer intensiven Literaturrecherche für alle Energietechnologien festgelegt. Welche Schutzbestimmungen bei welcher

Technologie zu einem Ausschluss führen und welche Abstände einzuhalten sind, wird im empirischen Teil der Arbeit weiter ausgeführt.

2.2.4 Soziale Dimension

Die Inhalte der sozialen Dimension lassen sich gerade im Spannungsfeld der zukünftigen Energieversorgung nicht auf die normativen Zielsetzungen der Sicherung von Grundbedürfnissen oder inter- und intragenerative Gerechtigkeit begrenzen. Die zunehmende Regionalisierung der Energieversorgung führt vielmehr zur Teilhabe zahlreicher (neuer) Akteure am Gestaltungs- und Planungsprozess einer nachhaltigen Energieversorgung. Ihre möglicherweise unterschiedlichen Interessen bzw. Wertvorstellungen können zu regionalen und lokalen Konflikten führen. Der Analyse dieser Dimension kommt deshalb die Aufgabe zu, Interessenskonflikte aufzugreifen sowie vermittelnde und partizipative Strategien zu entwickeln, um damit den Planungsprozess einer nachhaltigen Energieversorgung aus sozialer Perspektive zu gestalten. Was sozial nachhaltig im Energiebereich bedeutet und welche Konsequenzen sich daraus für die Gestaltung der zukünftigen Energieversorgung ergeben, unterliegt somit einerseits zwar einer normativer Vorgabe andererseits aber auch einem diskursiven gesellschaftlichen Prozess.

Die Ansprüche der lokalen Bevölkerung an eine sozial nachhaltige Energieversorgung sowie die Akzeptanz gegenüber neuen Technologien können regional sehr unterschiedlich repräsentiert sein. Die Rolle der Kohle als zukünftiger Energieträger wird im Ruhrgebiet vermutlich anders bewertet als z.B. im Freistaat Bayern. Dementsprechend kann auch das Erscheinungsbild der Energieversorgung verschieden sein, was sich heute bereits, neben anderen Gründen, in der Verteilung von Windkraftanlagen in Deutschland widerspiegelt. Eine frühzeitige Einbindung der lokalen Bevölkerung und wichtiger Entscheidungsträger in die Entwicklung von regionalen Energieversorgungsstrategien ist somit aus der Nachhaltigkeitsperspektive unerlässlich. Ebenso fordert § 3 des BauGB eine frühzeitige Information und Konsultierung der Bürger über Neugestaltungs- oder Entwicklungsvorhaben von Gebieten (vgl. BauGB § 3). Bei der Entwicklung einer Gesamtstrategie ist jedoch nicht nur die Information über den Planungsprozess sondern die Teilhabe daran entscheidend. Durch einen offenen Informationsfluss und eine Einbindung von Akteuren bereits in die Visions- und Strategieentwicklung sowie den konkreten Planungen können mögliche Konflikte zwischen den Akteuren von Anfang an sichtbar gemacht und entsprechend beachtet werden.

Innerhalb der sozialen Dimension gilt es gewählte Modellierungsparameter und Einschränkungsfaktoren in Abstimmung mit den Akteuren zu definieren. Die Ausschlusskriterien beschreiben, ähnlich der Abbildung ökologischer Belange, Restriktionsflächen, welche einem sozialverträglichen Einsatz der jeweils analysierten Technologie nicht entsprechen. Die, im

konzeptionellen Teil der Arbeit erwähnten Akteure erhalten deshalb ein Mitspracherecht bei der Potenzial- und Standortermittlung. Potenzialstudien, die bereits ähnliche Gelegenheiten zur Integration bereithalten, greifen häufig auf Expertenmeinungen zurück und bewerkstelligen dies durch die Veranstaltung sogenannter Experten-Workshops (vgl. exemplarisch Prinz et al. 2009). Im Konzept doppelter Nachhaltigkeit erfährt der Akteurskreis neben den Experten, die bei der Definition der Akteure als eine Gruppe berücksichtigt sind (vgl. Kap. IV 2.3), eine Erweiterung. Dieser Schritt soll dazu beitragen, die modellierte Energieversorgung noch mehr den sozialen Bedürfnissen und Vorstellungen der lokalen Bevölkerung anzupassen und gleichzeitig zu einer besseren Akzeptanz der Ergebnisse führen.

Die Befragung bietet den Akteuren die Möglichkeit, ihre Meinungen und Befindlichkeiten zu artikulieren. Sie können einerseits bestimmte Flächenkategorien für die Errichtung von Energieanlagen ausschließen und andererseits räumliche Abstände definieren, die z.B. zwischen Siedlungsflächen und einem Windrad oder einer Biogasanlage eingehalten werden müssen. Die Angaben lassen damit räumliche Schlussfolgerung zu und können mit Geographischen Informationssystemen kartographisch abgebildet werden, womit sich die Potenzial- und Standortsuche aus sozialer Perspektive weiter verfeinern lässt.

Die Evaluierung der standortspezifischen Akteursprämissen erfolgt mittels eines standardisierten Fragebogens bzw. eines Kriterienkataloges. Der Fragebogen besitzt eine tabellarische Struktur mit einem zweiteiligen Aufbau (vgl. Tabelle 4). Zuerst können die Befragten angeben, auf welche Flächenkategorien die Errichtung einer Energieanlage erlaubt ist bzw. wo nicht. Anschließend werden die Mindestabstände, d.h. die räumliche Distanz, die sich wenigstens zwischen einem geplanten Standort und einer bestimmten Flächenkategorie befinden soll, erfragt. Wegen der verschiedenen Standortansprüche der einzelnen Energieformen ist es erforderlich, die Bewertung für jede Technologie gesondert durchzuführen. Dabei können die zu bewertenden Parameter (z.B. Flächenkategorien oder Infrastruktureinrichtungen) technologiespezifisch abweichen; die Fragestellung bleibt jedoch bei allen Technologien stets gleich.

Tabelle 4: Abfrage sozialer räumlicher Restriktionen

| Energiegewinnung durch eine Windkraftanlage | | | |
|--|----|------|------------------|
| Sollte die Errichtung einer Windkraftanlage auf den folgenden Flächenkategorien erlaubt sein? | Ja | Nein | |
| Ackerland | | | |
| Ackerland in der Nähe einer bestehenden Vorbelastung (z.B. Autobahn, Bahnlinie oder Industriegebiet) | | | |
| Grünland | | | |
| Wald (Rodung und Anbau von Energiepflanzen) | | | |
| Sollte eine Windkraftanlage in unmittelbarer Nähe zu den folgenden Flächenkategorien errichtet werden dürfen? Falls „nein“, welcher Abstand in Meter ist mindestens einzuhalten? | Ja | Nein | Abstand in Meter |
| Siedlungsfläche | | | |
| Industrie- und Gewerbefläche | | | |
| Sport- und Freizeitfläche | | | |
| Kirche | | | |
| Kulturgut (Schloss, Burg) | | | |
| Bahnlinie | | | |
| Autobahn | | | |
| Bundesstraße | | | |
| Sonstige Straße (Kreis- und Gemeindestraße) | | | |

Die Möglichkeit, Restriktionsflächen und Mindestabstände detailliert für alle Technologien und für verschiedene Flächenkategorien definieren zu können, räumt den Akteuren ein zweites Mal ein zentrales Mitspracherecht ein. Die Akteure haben so unmittelbaren Einfluss auf die Potenzial- und Standortmodellierung, indem ihre Angaben helfen, soziale Interessen im Planungsprozess zu beachten. Die Auswertung des Fragebogens liefert diesbezüglich notwendige und wertvolle Informationen. Neben der Rücksichtnahme auf ökonomische und ökologische Belange ist damit die dritte wesentliche Anforderung zur Ausarbeitung einer nachhaltigen Energieversorgung erfüllt.

Die Auswertung beruht bei „Ja-Nein-Fragen“ auf dem Mehrheitsprinzip, wohingegen Mindestabstände anhand der Bildung von Mittelwerten statistisch berechnet werden. Eine schriftliche Befragung der Akteure wird somit ermöglicht. Diese Vorgehensweise wird für die Analyse größerer Regionen, z.B. eines Regierungsbezirkes vorgeschlagen. Bei kleinräumigen Untersuchungen oder einer stärkeren Einschränkung der Akteurszahl bieten gemeinsame Workshops oder die Konstituierung einer Arbeitsgruppe (Runder Tisch) Potenzial, die Ergebnisse zu verfeinern (vgl. Prinz et al. 2009, S. 25ff. / Zink 2010, S. 957ff.). Individuelle Einzelbewertung von räumlichen Parametern können damit durch z.B. eine Gruppendiskussion ergänzt werden.

Die vorgestellte Befragung vermeidet es, Flächenkategorien zu verwenden, die durch die Akteure nur schwer bewertbar sind. So finden sich im Kriterienkatalog keine Fragen zu Mindestabständen z.B. zu den verschiedenen naturschutzrechtlich geschützten Gebieten oder zu Vorrang- sowie Vorbehaltsgebieten. Eine Nennung dieser schwierigen Begrifflichkeiten (vgl. exemplarisch LfU 2005, S. 2ff.) würde Akteure, die sich inhaltlich nicht eingehend mit der Thematik beschäftigt haben, von

der Evaluierung ausschließen. Bei derartigen Belangen ist es daher anzuraten, Expertenbefragungen durchzuführen oder auf fundierte Literatur zurückzugreifen. Die GIS-Analyse lässt hierfür, soweit noch nicht geschehen, auch in der sozialen Dimension Platz, um gesetzliche oder regionalplanerische Aspekte mit einzubeziehen. Beispiele sind Vorgaben des Baugesetzbuches oder bestehende Flächennutzungskonzepte bzw. -widmungen, die der energetischen Inwertsetzung entgegensteht. Eine nähere Beschreibung zu den berücksichtigten und evaluierten Kriterien folgt in den entsprechenden Kapiteln im empirischen Teil der Arbeit.

2.3 Räumliche Modellierung

2.3.1 Planungsinstrument GIS

Die vielfältigen räumlichen Aspekte, welche bei der Modellierung einer nachhaltigen Energieversorgung zu beachten sind, erfordern den Einsatz eines leistungsstarken Geographischen Informationssystems (GIS). Mit dessen Hilfe gelingt es, eine komplexe Realität modellhaft darzustellen und die notwendigen Sachinformationen mit ihrer räumlichen Lage zu verbinden. In voneinander getrennten Ebenen (Layern) werden unterschiedliche räumliche Eigenschaften bzw. Gegebenheiten abgebildet, die dann für die jeweilige Anwendung, in diesem Fall für die Standortmodellierung von Energietechnologien, gezielt ausgewählt werden können. GIS sind folglich dadurch bestimmt, dass sie als rechnergestütztes System, bestehend aus Hardware, Software und (Geo-)Daten, die Bearbeitung und Modellierung von raumbezogenen Problemstellungen in unterschiedlichsten Anwendungsgebieten ermöglichen (vgl. Bill 2010, S. 8).

Wegen dieser Möglichkeit der Modellierung räumlicher Fragestellungen haben GIS in den vergangenen Jahren einen enormen Aufschwung erfahren und werden heute in den unterschiedlichsten Bereichen eingesetzt. Für Unternehmen sind exemplarisch die Anwendungen in der Logistik oder dem Geomarketing zu nennen. Zudem nutzen immer mehr Branchen, wie etwa die Abfall- oder Versorgungswirtschaft, GIS als Informationsmittel, um Unternehmensprozesse effizienter und Entscheidungen fundierter zu gestalten. Auch aus dem alltäglichen Gebrauch sind GIS heute nicht mehr wegzudenken, verbirgt sich die Technologie doch z.B. in Navigationsgeräten oder zahlreichen interaktiven Web-Karten.

Mit der Transformation am Energiesektor und der Planung neuer Netzstrukturen setzt auch die Energiewirtschaft vermehrt GIS ein. Hierbei ergeben sich verschiedene Anwendungen, die von der Suche nach adäquaten Lagerstätten und deren Erschließungsmöglichkeiten bis zur Projektierung großer Stromleitungen oder der Dokumentation bestehender Versorgungssysteme reichen. In den vergangenen Jahren ist primär die Planung von erneuerbaren Energien in den Vordergrund getreten.

Aufgrund der hohen Abhängigkeit dieser Energieformen von regionalen Gegebenheiten ist es erforderlich, gezielt nach räumlichen Potenzialen zu suchen, die den Bau einer Anlage ermöglichen. Hierzu bieten GIS hervorragende Funktionen, weil Informationen exakt lokalisierbar und räumlich analysierbar sind. Darüber hinaus besitzen GIS einen Mehrwert bei der Erörterung von raumprägenden Folgewirkungen wie sie z.B. bei der Errichtung einer Windkraft- oder Biogasanlage auftreten, indem sie die damit einhergehenden landschaftlichen Veränderungen modellieren und (karto-)graphisch visualisieren können.

Aufgrund dieser Aspekte werden GIS bei der Planung- und Entwicklung von regionalen Energiestrategien zunehmend auch von Kommunen, Landkreisen oder Planungsverbänden eingesetzt. Die Analyse regionaler Flächennutzung, vorhandener Energiepotenziale, bautechnischer Vorgaben oder ökologischer, ökonomischer und sozialer Restriktionen kann zu einer Versachlichung der häufig umstrittenen Entwicklung am Energiesektor beitragen. Sogenannte Energienutzungspläne, welche diese Aspekte vereinen, sind hierzu ein wichtiges Instrumentarium und können künftig Grundlage für die Änderung bzw. Weiterentwicklung von Flächennutzungs- und Bebauungsplänen sein (vgl. hierzu StMWIVT 2010). Zudem besitzt die (karto-)graphische Darstellung sowohl von Erzeugungspotenzialen als auch von Auswirkungen einer Energieanlage auf ihr Umfeld (z.B. Folgen für das Landschaftsbild, Lärmbelastung, Sicherheitsabstände usw.) in der öffentlichen Diskussion große Bedeutung, stellt sie doch ein anschauliches, leicht verständliches und somit wertvolles Kommunikationsmedium dar.

Die vorliegende Forschungsarbeit nutzt diese weitreichenden Vorteile und betrachtet GIS als unabdingbares räumliches Planungsinstrument zur Modellierung einer nachhaltigen Energieversorgung. Weil GIS in zunehmendem Maße bei Energieversorgungsunternehmen und speziell in der kommunalen Verwaltung Anklang findet, ergeben sich bei der Modellierung vielfältige Synergieeffekte. Anknüpfungspunkte bestehen z.B. in der raschen und unkomplizierten Einbindung der erforderlichen Geodaten von Firmen und Institutionen in den Modellierungsablauf. Umgekehrt können die Ergebnisse aus dem Konzept doppelter Nachhaltigkeit zur Verfügung gestellt und in kommunale bzw. unternehmerische Entscheidungsprozesse eingebunden werden. Geoinformation überwindet damit die Grenze zwischen Forschung und Praxis und ist zukünftig ein unverzichtbares Instrument der Energie-, Regional- und Kommunalplanung.

2.3.2 Kriterienkatalog

Der Kriterienkatalog ist das zentrale Medium der räumlichen Modellierung und stellt wie bei anderen Potenzialstudien (vgl. exemplarisch Prinz et al. 2009, S. 79) eine Übersicht über Sachverhalte dar, die bei der Planung von Standorten zu berücksichtigen sind. Aufgrund dieser Kriterien lassen sich

potenzielle, den nachhaltigen Anforderungen entsprechende Standorte identifizieren. Der Kriterienkatalog gliedert sich in Anlehnung an die beschriebene Vorgehensweise der Potenzial- und Standortmodellierung in die beiden übergeordneten Bereiche „*theoretisches und technisches Energiepotenzial*“ sowie „*nachhaltiges Energiepotenzial*“, welche anhand von technischen (z.B. Wirkungsgrade) sowie räumlichen Vorgaben (Ausschluss- oder Eignungsflächen) weiter spezifiziert sind (vgl. Abb. 9). Das nachhaltige Energiepotenzial bezieht sich auf das Drei-Säulen-Modell und unterteilt sich demzufolge in die Dimensionen Ökonomie, Ökologie und Soziales, welche ihrerseits Kriterien beinhalten. Aufgrund der Modellierungsmethodik bleibt die Struktur des verwendeten Kriterienkataloges immer gleich, wobei die Kriterienanzahl und -art innerhalb der einzelnen Dimension variierbar ist. Ein Beispiel eines inhaltlich gefüllten Kriterienkatalogs für verschiedene Energieformen findet sich in tabellarischer Form und unter Bezug zur aktuellen Literatur im empirischen Teil der Arbeit.

| |
|--|
| <p>Theoretisches und technisches Energiepotenzial</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Einflussfaktoren ▪ Bautechnische Restriktionen (Ausschlussflächen) ▪ Bautechnische Vorgaben (Eignungsflächen) ▪ Aus bautechnischer Sicht sinnvolle Abstände zur jeweiligen Flächenkategorie (Abstand) <p>Nachhaltiges Energiepotenzial</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ökonomie <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ökonomische Standortkriterien ▪ Ökologie <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ökologische Restriktionen (Ausschlussflächen) ▪ Aus ökologischer Sicht sinnvolle Abstände zur jeweiligen Flächenkategorie (Abstand) ▪ Soziales <ul style="list-style-type: none"> ▪ Soziale Restriktionen (Ausschlussflächen) ▪ Aus sozialer Sicht sinnvolle Abstände zur jeweiligen Flächenkategorie (Abstand) ▪ Gesetzliche oder gesellschaftliche Vorgaben (Eignungsflächen) |
|--|

Abb. 9: Struktur des Kriterienkatalogs

2.3.3 Modellaufbau und Standortbewertung

Die Ermittlung technologiespezifischer Eignungsgebiete erfolgt stets in flächendeckender Weise, wozu sich das Rasterformat besonderes eignet. Dazu wird ein regelmäßiges Gitternetz über den Untersuchungsraum gelegt. Die kleinste Einheit des Gitternetzes und damit die Basis der Modellierung ist ein Pixel, eine quadratische Rasterzelle, deren relative Lage anhand der Rastermatrix und der damit einhergehenden zeilen- und spaltenbezogenen Einteilung exakt lokalisiert ist. Die absolute Lage im Raum ist durch die Einbindung der Rasterdatei in ein Koordinatensystem festgelegt. Ein so genanntes Grid entsteht durch die Zuweisung von Sachdaten (qualitativ oder quantitativ) zu den einzelnen Rasterzellen. Die Informationen sind folglich mit der Lage des Pixels verknüpft und lassen sich anschließend durch Grau- oder Farbabstufungen visuell darstellen.

Entscheidender Vorteil der Rasteranalyse ist die Vergleichbarkeit verschiedener Sachdaten hinsichtlich eines Standortes. Die geometrische Bezugsform Pixel ist bei allen Informationen exakt identisch, so dass Absolut- und Dichtewerte gleich groß und damit räumlich vergleichbar sind. Die Genauigkeit der Modellierung ist in erster Linie von der gewählten Rastergröße (Auflösung) abhängig. Letztere wiederum ist mit modernen GIS beliebig veränderbar, allerdings bedeutet dies nicht, dass sich mit einer Verkleinerung der Rasterzelle gleichzeitig eine höhere Qualität ergibt. Die Qualität wird allein durch die verwendeten Ausgangsdaten und deren räumliche Exaktheit bestimmt.

Sowohl die Regionalisierung von Energiepotenzialen als auch die Modellierung von Eignungs- und Ausschlussgebieten erfolgt in Rasterform. Hierzu kann es erforderlich sein, z.B. in Vektorform erzeugte Abstandsflächen in ein entsprechendes Rasterformat zu konvertieren. Die Rastermodellierung wird gewählt, da sie eine abschließende Summierung der Einzelergebnisse zulässt und dabei komplexe Sachverhalte reduziert ohne wertvolle Informationen für die Interpretation der Ergebnisse zu verlieren. Für jedes, im Kriterienkatalog ausgewiesene Kriterium und für jede analysierte Technologie wird so eine Rasterdatei erstellt, die den gesamten Untersuchungsraum umfasst. Die Rasterdatei weist positive Flächen als potenziell geeignete Standorte und negative Flächen als nicht geeignete Standorte aus. Um die zahlreichen Teilergebnisse später zu einer Gesamtsicht für jede Technologie verbinden zu können, wird vereinfachend eine Eignungsfläche mit dem Wert 0 und eine Ausschlussfläche mit einem größeren Wert (z.B. 1) belegt. Mit dieser Vorgehensweise kann ein Zahlencode erstellt werden, welcher in der Gesamtschau Rückschlüsse auf die Eignung von Flächen zulässt. Der Zahlenschlüssel weist den übergeordneten Kategorien (theoretisches und technisches Energiepotenzial, Ökonomie, Ökologie und Soziales) eine bzw. mehrere Zahlenstellen zu. Das Schema ist in Abb. 10 dargestellt.

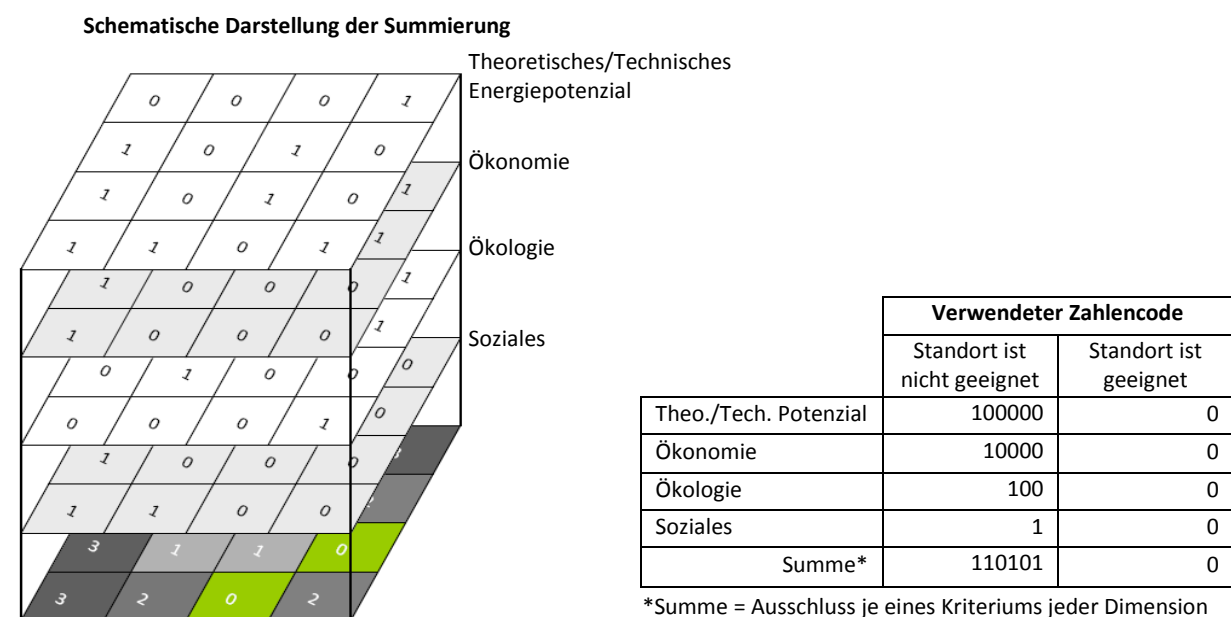


Abb. 10: Rasteranalyse und verwendeter Zahlencode

Die Zahlenkombination (110101) sagt beispielhaft aus, dass je ein Kriterium jeder Dimension den Standort (=Rasterzelle) für die Errichtung einer Energieanlage ausschließt. Da die übergeordneten Bereiche im Kriterienkatalog durch mehrere Kriterien bestimmt sind, können sich sehr unterschiedliche Zahlenkombinationen ergeben. Ein Beispiel für ein summiertes Ergebnis lautet 10410. Obwohl hier kein technischer Einwand besteht, scheidet der Standort aus. So lässt sich kein wirtschaftlicher Betrieb erwarten. Gleichzeitig stehen vier Kriterien aus ökologischer Sicht und zehn Kriterien aus sozialer Sicht dem Bau einer Energieanlage an diesem Ort entgegen.

Die bewusst einfach gehaltene Zusammenfassung soll die Interpretation der Vielzahl an komplexen Vorgaben erleichtern und gleichzeitig eine kartographische Darstellung ermöglichen. Die Summenbildung ist dabei für jede analysierte Energieform separat durchzuführen. Erst nach Vorliegen aller Einzelergebnisse kann daraus – unter Berücksichtigung eventueller Flächenkonkurrenzen – ein Endergebnis gebildet und die kartographische Visualisierung einer regionalen nachhaltigen Energieversorgung präsentiert werden.

2.3.4 Sichere Energieversorgung und energieautarke Regionen

Eine Energieversorgung mit zunehmendem Anteil meteorologisch beeinflusster Energieformen, vorweg die Windenergie und die Sonnenenergie, erfordert neue technologische Konzepte, um den Energiebedarf räumlich aber auch zeitlich decken zu können. D.h. Die Energieversorgung muss zu jeder Zeit gewährleisten, den Bedarf zu decken. Entwicklungen in den Bereichen intelligente Netze, Energiespeicher und virtuelle Kraftwerke sind diesbezüglich zu nennen. So ist ein adäquater, für die neuen Anforderungen am Energiesektor tauglicher Netzausbau mit intelligenten sowie kommunizierenden Verbrauchern und Erzeugern unabkömmlich. Entsprechendes gilt für die weitere Erforschung neuer Speichermedien. Pumpspeicherkraftwerke, als bisher einzige Option, Strom in großem Umfang zu speichern, bieten neben der flexiblen Steuerungsmöglichkeit hierfür großes Potenzial (vgl. hierzu Schmidt, Wiese & Bonneschky 2008, S. 336ff. / Aufleger 2008, S. 328ff.). Gleichwohl zu allen anderen Energieformen hat auch die Pumpspeichertechnologie wesentliche Standortansprüche und stößt an die gleichen Probleme der Akzeptanz sowie Umwelt- und Naturverträglichkeit.⁴⁴ Zur Lokalisierung geeigneter Standorte kann auch bei dieser Technologie das Konzept doppelter Nachhaltigkeit mit einer Technologiebewertung und der anschließenden Potenzialermittlung eingesetzt werden.

⁴⁴ Im Regierungsbezirk Niederbayern, welcher im empirischen Teil als Untersuchungsgebiet dient, laufen die Planungen zu einem Neubau eines Pumpspeicherkraftwerkes in der Gemeinde Untergriesbach (Energiespeicher Riedl) mit einer Größe von 300MW installierter Leistung. Dieses, im südöstlichen Bayerischen Wald in unmittelbarer Nähe zur Donau gelegene Projekt, ist trotz der ökonomischen und energiepolitischen Vorteile sowohl aus naturschutzrechtlichen wie aus sozialen Belangen umstritten (vgl. Zink et al. 2011)

Neben den Speichermöglichkeiten sind virtuelle Kraftwerke bzw. Kombikraftwerke⁴⁵ im Zusammenhang mit erneuerbaren Energien eine weitere beachtenswerte Innovation. Virtuelle Kraftwerke sind kommunikative Verbände von zum Teil räumlich weit verstreuten und unterschiedlichen Energieformen (vgl. hierzu Mackensen et al. 2008). Ziel ist es, über eine koordinierte Steuerung aller Kraftwerke Synergien zu nutzen und eine konstante Energieeinspeisung zu gewährleisten, indem angenommen wird, dass sich unterschiedliche Technologien an unterschiedlichen Standorten in ihrer zeitlichen Energieabgabe ausgleichen. So schaltet sich z.B. eine Biogasanlage ab, wenn genug Windenergie oder Photovoltaikstrom vorhanden ist und beginnt wieder zu produzieren, wenn dies nicht mehr der Fall ist. Viele kleine dezentrale Kraftwerke sollen zudem das Risiko eines Ausfalles einer Produktionsstätte minimieren und durch einen geeigneten Energiemix dazu beitragen, bestehende Großkraftwerke zu ersetzen. Um eine konstante oder sogar der Nachfrage angepasste Energieabgabe zu erreichen, ist ein stetiger und zeitnaher Informationsaustausch über die jeweilige Produktionssituation jeder beteiligten Anlage notwendig. Hierzu ist in Zukunft der Einsatz moderner Kommunikationsformen erforderlich. Ohne auf alle erwähnten Neuerungen weiter eingehen zu können, greift die Modellierung auf deren Ideen zurück und nimmt an, dass diese in Zukunft auch zur Verfügung stehen.

Auf kommunaler Ebene ist die Möglichkeit einer autarken Energieversorgung von Gemeinden bzw. Regionen mit erneuerbaren Energien immer häufiger ein diskutierter Aspekt. Die Autarkie ist einerseits vom Potenzial der eingesetzten Technologien und andererseits vom Energiebedarf sowie den vorherrschenden Verbrauchsstrukturen abhängig. So sind heute Gemeinden, die sich zu 100% mit „eigener“ erneuerbarer Energie versorgen, zwar noch immer Vorzeigegemeinden, aber dennoch keine Seltenheit mehr⁴⁶. Zumeist handelt es sich dabei um ländliche Kommunen mit geringer Bevölkerungszahl und –dichte sowie wenig Industrie, in denen große erneuerbare Energieprojekte realisiert wurden. Hierzu zählen Wasserkraftwerke, Biomasseheizkraftwerke, Photovoltaik-Freiflächenanlagen und Dachanlagen oder ein Mix daraus. Zum Teil übersteigt die erzeugte Energiemenge bilanziell bereits den Eigenverbrauch, wodurch Energie aus der Region exportiert werden kann. Ein derartiger bilanzieller Vergleich von Energiepotenzial und absolutem Energiebedarf, zumeist auf ein Kalenderjahr bezogen, ist jedoch im Hinblick auf eine sichere Energieversorgung nicht aussagekräftig. Wegen der bereits angesprochenen zeitlichen Variationen bei der Stromproduktion durch Windenergie oder Photovoltaik bedeutet eine bilanzielle Autarkie

⁴⁵ Das Kombikraftwerk ist eine gemeinsame Entwicklung des Institutes für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) der Universität Kassel mit den in der erneuerbaren Energienbranche tätigen Unternehmen Solarworld AG (v.a. Photovoltaiktechnologie), Enercon GmbH (Windenergie) und Schmack Biogas AG (Biogasanlagenbau).

⁴⁶ Im Regierungsbezirk Niederbayern erfüllen, bezogen auf den Strombedarf, bereits mehrere Gemeinden die bilanzielle Autarkie. Beispiele sind die Gemeinde Stephansposching, Landkreis Deggendorf (117% EEG Strom durch Photovoltaik und Biomasse) und die Gemeinde Mengkofen, Landkreis Dingolfing-Landau (105% EEG Strom durch Photovoltaik und Biomasse) (vgl. EnergyMap 2011). Ebenso sind Kommunen in denen sich große Laufwasserkraftwerke befinden zu nennen, z.B. Ering.

folglich keine sichere Energieversorgung. Zudem ist bei Autarkiestudien nicht fest definiert, welcher Energieverbrauch (z.B. Haushalte, Industrie, Wärme, Verkehr, usw.) in der Bilanz berücksichtigt wird.

Kennzahlen zum Energiebedarf werden statistisch erfasst und anhand unterschiedlicher Merkmale strukturiert veröffentlicht. Hierzu zählen Differenzierungen hinsichtlich der Energieform (z.B. Primärenergie, Endenergie, Strombedarf, ...), des Energieträgers (Kohle, Öl, Gas, ...) oder hinsichtlich von Verbrauchsstrukturen (z.B. Haushalte, Gewerbe, Industrie oder Mobilität). Das Konzept doppelter Nachhaltigkeit legt seinen Schwerpunkt auf die Potenzialseite und berücksichtigt den Energiebedarf einer Region deshalb nur in Ansätzen und durch eine einfache Orientierung des Energiebedarfes an demographischen und wirtschaftsstatistischen Zahlen. Auf ausdifferenzierte Berechnungsschemata oder die Möglichkeit einer kleinräumlichen Disaggregation von Verbrauchskennzahlen (vgl. exemplarisch Mittelböck et al. 2006, S. 42ff.) wird weitestgehend verzichtet. Der Energiebedarf einer Region wird als variierbare Größe verstanden, so dass künftige Verbesserungen der Energieeffizienz, Energieeinsparungen oder auch Umstrukturierungen im Verbrauch (z.B. Elektromobilität) in das Konzept integrierbar sind.

Obwohl der bilanzielle Vergleich von Energiebedarf und Potenzial mit Mängeln in der Aussagekraft behaftet ist, findet im Konzept doppelter Nachhaltigkeit eine Orientierung am jeweiligen Energieverbrauch der Region statt. Prioeres Ziel der Modellierung ist es eine bilanzielle Autarkie zu erreichen. Hierzu wird mit der Suche nach nachhaltigen Standorten für diejenige Technologie begonnen, die den Nachhaltigkeitsansprüchen am besten genügt. Eine Technologie reicht i.d.R. für eine autarke Versorgung jedoch nicht aus, weshalb im Fortgang der Modellierung sukzessive auf weniger geeignete Technologien und/oder weniger geeignete Standorte zurückgegriffen wird. Wie bereits erwähnt stoppt dieser Suchprozess vorerst bei einem bilanziellen Ausgleich von Potenzial und Verbrauch oder nachdem alle modellierten Energieformen untersucht wurden und noch kein Ausgleich erzielt werden konnte. An dieser Stelle wird erstmals resümiert, wie sich die Gestaltung einer nachhaltigen Energieversorgung präsentiert.

Die Ergebnisse lassen sich dabei sowohl hinsichtlich der bilanziellen Autarkie als auch der strukturellen Zusammensetzung des Energieportfolios unterscheiden. Die strukturelle Zusammensetzung zeigt auf, welchen Anteil fluktuierende, grundlastfähige oder regelbare Energieformen zur Versorgung der Region beitragen. Unter der Annahme, dass in Zukunft die beschriebenen kommunikativen Steuerungselemente und Speichertechnologien vorhanden sind, soll die Struktur des Energieportfolios Auskunft geben, ob der Energiemix dafür geeignet ist, Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Ein geeignetes Portfolio zeichnet sich durch ausreichende Kapazitäten an grundlastfähigen und regelbaren Kraftwerken im Verhältnis zu fluktuierenden

Energieformen aus. Folgende Klassifizierung der Energieformen bezüglich ihrer Energieabgabe kann verwendet werden:

- Fluktuierende Energieformen: Photovoltaik und Windenergie
- Grundlastfähige Energieformen: Atomkraft, Kohlekraft und Wasserkraft
- Regelbare Energieformen: Bioenergie, Erdgas und Pumpspeicher

Die räumliche Modellierung endet entweder durch das Erreichen einer bilanziellen Autarkie oder dann, wenn alle Technologieoptionen modelliert sind. Mittels der Prüfung des Energieportfolios und dem Vergleich von Energiepotenzial und Energieverbrauch lassen sich die Ergebnisse in drei Varianten einteilen (vgl. Abb. 11). Die Varianten bestimmen dabei den Fortgang der weiteren Untersuchungen. Variante 1 ist gekennzeichnet durch die Möglichkeit der autarken Energieversorgung bei gleichzeitig geeigneter Portfoliostruktur. Dieses ideale Ergebnis bescheinigt einer Region eine potenziell mögliche nachhaltige Energieversorgung und zeigt mittels der Standortsuche die dafür benötigte Transformation auf. Sollte die Modellierung nahe legen, dass über die Eigenversorgung hinaus zusätzliche Potenziale vorhanden sind, können diese gegebenenfalls zum Energieexport aus der Region verwendet werden.

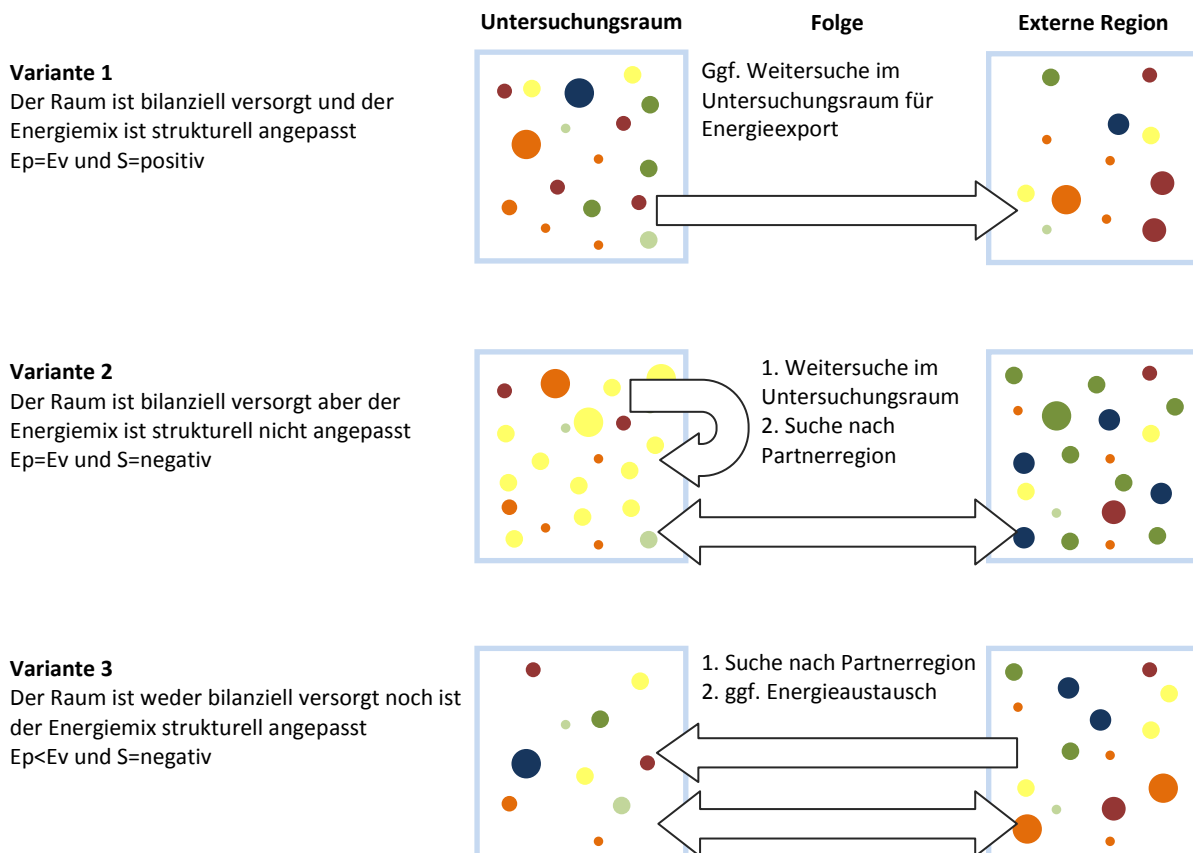


Abb. 11: Ergebnisvarianten der räumlichen Modellierung

In Variante 2 ist ebenfalls eine bilanzielle autarke Energieversorgung möglich, die Anteile der jeweiligen Energieformen am Energiemix lassen jedoch auf keine sichere Versorgung schließen. Nun

sind zwei Schlussfolgerungen vorstellbar. Zum einen wird die Modellierung im Untersuchungsgebiet fortgesetzt, um die entsprechende strukturelle Lücke zu beheben, indem auf weitere, die Nachhaltigkeitsaspekte weniger gut erfüllende Energieformen zurückgegriffen wird. Zum anderen kann es auch sinnvoll sein, sich um eine Partnerregion zu bemühen, die aufgrund anderer Energieformen zum Ausgleich des Energieportfolios der Untersuchungsregion beiträgt. So könnte eine Region, die z.B. vorwiegend nachhaltige Standorte für Windenergie bietet, mit einer anderen Region, deren Stärken bei der Wasserkraft oder Bioenergie liegen, eine Energiepartnerschaft eingehen. Diese Strategie erscheint vor allem dann angebracht, wenn das Energiepotenzial der jeweiligen Untersuchungsregion überwiegend auf einer einzigen Technologie basiert.

Variante 3 beschreibt das vermeidlich schlechteste Ergebnis. Hier ist weder ein bilanzieller Ausgleich anhand aller modellierter Energietechnologien möglich, noch deutet die strukturelle Zusammensetzung der Energieformen auf eine sichere Versorgung hin. In diesem Fall ist die Untersuchungsregion gezwungen, eine Partnerregion zu suchen, aus welcher Energie importiert werden kann. Aufgrund der Struktur des Energiemix ist wie in Variante 2 auch ein Energieaustausch vorstellbar. Variante 3 ist vornehmlich in Regionen mit einem sehr hohen Energieverbrauch und gleichzeitig überschaubarem Energiepotenzial (z.B. verstädtertes Gebiet) zu erwarten. Das Ergebnis der Modellierung ist auch hier bedeutsam, zeigt es doch auf, wie hoch die Energielücke ist und nach welcher Partnerregion mit welchem Technologieportfolio zu suchen ist.

Einschränkend zum beschriebenen Modellabschluss ist zu erwähnen, dass die Modellierung aus Gründen der Praktikabilität stets nur mit einer begrenzten Anzahl an verschiedenen Technologien durchgeführt werden kann. Deshalb ist es in allen drei Varianten natürlich vorstellbar – in den Varianten 2 und 3 sogar geboten – die Modellierung mit weiteren Technologieoptionen zu ergänzen. Die Beachtung dieser Portfoliostruktur beugt denkbaren Ergebnissen vor, die z.B. eine alleinige Versorgung anhand von Photovoltaik empfehlen. Neben der Erörterung von (bilanzieller) regionaler Energieautarkie versucht das Konzept doppelter Nachhaltigkeit auch die Gewährleistung von Energiesicherheit vereinfachend zu berücksichtigen.

3. Zwischenfazit: Nachhaltigkeit ist umsetzbar

Abgeleitet aus der Definition einer nachhaltigen Energieversorgung wird eine Strategie entwickelt, die zeigt, wie das Konzept doppelter Nachhaltigkeit auf eine Region anzuwenden ist. Die zweiteilige Strategie bedient sich dabei den Methoden einer ganzheitlichen Technologiebewertung und einer räumlichen Potenzial- und Standortmodellierung. Um dem Ziel einer nachhaltigen Energieversorgung gerecht zu werden, werden sowohl für die Bewertung als auch die Modellierung Nachhaltigkeitsbezüge hergestellt. Mit der integrativen HGF-Nachhaltigkeitsstrategie konnten

Leitlinien, Kriterien und Indikatoren für die Technologiebewertung unter Nachhaltigkeitsaspekten erörtert werden. Das iterativ entwickelte Indikatorenset bleibt mit 14 Indikatoren übersichtlich und damit handhabbar, bildet gleichzeitig aber die wesentlichen Nachhaltigkeitsaspekte ab. Die Strukturierung der Indikatoren anhand der HGF-Leitlinien lässt einerseits die Bildung einer Zielhierarchie zu und ermöglicht andererseits die wichtige Einbindung von Akteuren in den Bewertungsprozess.

Die räumliche Modellierung geht von der Tatsache aus, dass neben der Technologie an sich auch deren Standort den Ansprüchen der Nachhaltigkeit gerecht werden muss. Hierbei erweist sich das Drei-Säulen-Modell als hilfreich. Darin wird die gleichrangige Beachtung ökologischer, ökonomischer und sozialer Aspekte gefordert, was sich in ähnlicher Weise, aber bisher unabhängig vom Nachhaltigkeitskonzept, im Ablauf einer Potenzialmodellierung bei erneuerbaren Energien wieder findet. Beginnend beim theoretischen Potenzial wird deduktiv ein technisches, ökonomisches und erschließbares Potenzial abgeleitet. Die vorliegende Forschungsarbeit konnte Verbindungen zwischen dem Drei-Säulen-Modell und der Methodik von Potenzialstudien aufzeigen und so den geforderten Nachhaltigkeitsbezug knüpfen. Zentrales Instrument der räumlichen Modellierung ist dabei der entwickelte Kriterienkatalog, der wiederum eine praktische Anwendung an einer Beispielregion sowie die Integration von Akteuren ermöglicht.

Ohne die theoretische Fundiertheit zu verlieren, stellt die Strategie zur Implementierung des Konzeptes doppelter Nachhaltigkeit einen Leitfaden dar, mit dem die praktische Anwendung gelingen kann, um dadurch zu einer gesellschaftsverträglichen und nachhaltigen Gestaltung der zukünftigen Energieversorgung auf regionaler Ebene beizutragen. Der Leitfaden zeigt: Nachhaltigkeit am Energiesektor ist umsetzbar. Dabei bleibt die Strategie offen für künftige Ergänzungen bzw. Optimierungen in den Bereichen der Technologiebewertung und der räumlichen Modellierung. Sowohl der Aufbau als auch die allgemein gehaltenen Bewertungskriterien machen das Konzept doppelter Nachhaltigkeit für verschiedene Räume und Regionen sowie für verschiedene Energieformen universell einsetzbar.

VI Empirische Untersuchung

1. Zur Auswahl des Untersuchungsraumes

Die Auswahl bzw. Definition des Untersuchungsraumes ist auf keine räumlichen Grenzen festgelegt, die Ausdehnung setzt jedoch den Rahmen für die Modellierung. So ist die Gestaltung (Art, Größe, Zuschnitt, ...) des Raumausschnitts für die Anwendung des Konzeptes doppelter Nachhaltigkeit zwar von nachrangiger Bedeutung, beeinflusst allerdings den Datenbeschaffungs- und Modellierungsaufwand, was ihrerseits in bestimmtem Ausmaß auch die Exaktheit (räumliche Auflösung) der Ergebnisse bestimmt. Aus praktischen Überlegungen wird vorgeschlagen, sich an administrativen Grenzen zu orientieren, da die Verfügbarkeit benötigter Daten häufig an diese Abgrenzungen gebunden ist. Das Spektrum möglicher Gebietseinheiten reicht daher von Kommunen oder Landkreisen über Planungsregionen, Bezirke und Bundesländer bis hin zu ganzen Ländern. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Regierungsbezirk Niederbayern untersucht, ein Gebiet, welches nach europäischer Statistik der NUTS 2 Ebene angehört.

1.1 Der Regierungsbezirk Niederbayern

Der Regierungsbezirk Niederbayern umfasst den östlichen Mittelteil Bayerns und grenzt im Norden an die Regierungsbezirke Oberpfalz und im Südwesten an Oberbayern. Im Osten und im Südosten

Tabelle 5: Strukturdaten von Niederbayern

| Landkreise / Städte | Gemeinden | Einwohner | Fläche (qkm) |
|---------------------|------------|------------------|------------------|
| Deggendorf | 26 | 117.005 | 861,29 |
| Dingolfing-Landau | 15 | 91.011 | 877,78 |
| Freyung-Grafenau | 25 | 79.293 | 984,15 |
| Kelheim | 24 | 113.147 | 1.066,26 |
| Landshut | 35 | 148.783 | 1.347,97 |
| Passau | 38 | 187.347 | 1.530,28 |
| Regen | 24 | 78.953 | 974,91 |
| Rottal-Inn | 31 | 117.952 | 1.281,43 |
| Straubing-Bogen | 37 | 97.591 | 1.201,94 |
| Stadt Landshut | 1 | 63.258 | 65,81 |
| Stadt Passau | 1 | 50.594 | 69,57 |
| Stadt Straubing | 1 | 44.450 | 67,58 |
| Niederbayern | 258 | 1.189.384 | 10.328,96 |

finden sich die beiden Nachbarstaaten der Tschechischen Republik und die Republik Österreich (siehe Karte 1). Niederbayern ist administrativ in neun Landkreise (Deggendorf, Dingolfing-Landau, Freyung-Grafenau, Kelheim, Landshut, Passau, Regen, Rottal-Inn und Straubing-Bogen) und drei kreisfreie Städte (Landshut, Passau und

Straubing) untergliedert. Inklusive der drei kreisfreien Städte gibt es 258 Gemeinden in Niederbayern. Der Regierungsbezirk hat eine Fläche von ca. 10.330 qkm und beherbergt nicht ganz 1,2 Mio. Einwohner (siehe Tab. 5⁴⁷).

⁴⁷ Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (2011a und 2011b). Stand 31.12.2010 (Einwohner) bzw. 01.01.2010 (Fläche)

Der niederbayerische Naturraum⁴⁸ ist charakterisiert durch eine Zweiteilung, die in etwa dem Verlauf der Donau folgt. Im Nordosten der Donau befindet sich der Bayerische Wald, eine überwiegend bewaldete Mittelgebirgslandschaft mit Höhen zwischen 500 bis 1458 m (Großer Arber). Niederschlagsmengen von 900 bis 1600 mm pro Jahr sind vorherrschend, womit der Bayerische Wald zu den niederschlagsreichsten Gebieten Bayerns zählt. Der Hauptkamm des Bayerischen Waldes bildet gleichzeitig die Grenze zum anschließenden Böhmischem Wald mit dem Nationalpark Sumava auf tschechischer Seite. Bis auf wenige kleine Bäche, die zur Moldau fließen und damit dem Einzugsgebiet der Elbe angehören, entwässern alle Bäche und Flüsse des Bayerischen Waldes zur Donau. Geologisch ist die Bayerwaldregion Teil des variszischen Grundgebirges mit überwiegend Gneis, Granit und durch starke Deformation geprägte Gesteine. Die Donau, welche von Regensburg beginnend dem Rand des Bayerischen Waldes folgt (Donaurandbruch), fließt ab der Ortschaft Pleinting (Gemeinde Vilshofen, Landkreis Passau) in einem engen und tief eingeschnittenen Tal durch den Grundgebirgsstock.

Südwestlich der Donau befindet sich das niederbayerische Donau-Isar-Hügelland, mit Lockersedimenten aus der im Tertiär nördlich der entstehenden Alpen abgelagerten Molasse (Tertiärhügelland). Markant durchschnitten wird das flachwellige Tertiärhügelland von dem west-östlich verlaufendem Isartal mit einer trichterförmigen Öffnung zur Donauebene. Das breite Donautal von Regensburg über Straubing, Deggendorf-Plattling, dem dazukommenden Isartal bis zur Ortschaft Pleinting bildet den ackerbaulich genutzten Gäuboden bzw. Dungau mit fruchtbaren Lössböden. Großflächige Wälder sind hier nur vereinzelt entlang der Flüsse, speziell im Bereich der Isarmündung, zu finden. Im restlichen Hügelland sind vor allem die Kuppen und Höhenzüge bewaldet. Die Höhen erstrecken sich von knapp über 300 (Gäuboden) bis etwa 500 Meter. Die jährliche Niederschlagsmenge beträgt 600 bis 900 mm. Weitere Naturräume, an denen Niederbayern einen kleinen Anteil hat, sind die Fränkische Alb im nördlichen Teil des Landkreises Kelheim sowie die an der Grenze zu Österreich gelegenen quartären Inn-Isar-Schotterplatten. Während die Kies- und Schotterebenen denselben geologischen Untergrund wie das Tertiärhügelland haben, weist die Fränkische Alb Gesteine der Jura- und Kreidezeit auf. Besonders der zu Tage tretende verwitterungsbeständige und verkarstungsfähige Malm-Kalk prägt dort die Landschaft.

Wirtschaftlich gilt Niederbayern seit einigen Jahren als „Aufstiegsregion“ (vgl. Grunwald 2010, S. 22ff.), was häufig an der geringen Arbeitslosenquote und der jüngst gesteigerten Wertschöpfung festgemacht wird. Die Wirtschaftsstruktur ist durch einen vergleichsweise hohen Anteil der Landwirtschaft geprägt⁴⁹, weist jedoch auch einige Industriezentren speziell im Fahrzeug- und

⁴⁸ Die Ausführungen zum Naturraum beziehen sich auf Keim, Glaser & Lagally (2004, S. 10ff.) und Anhuf (2009, S. 33ff.).

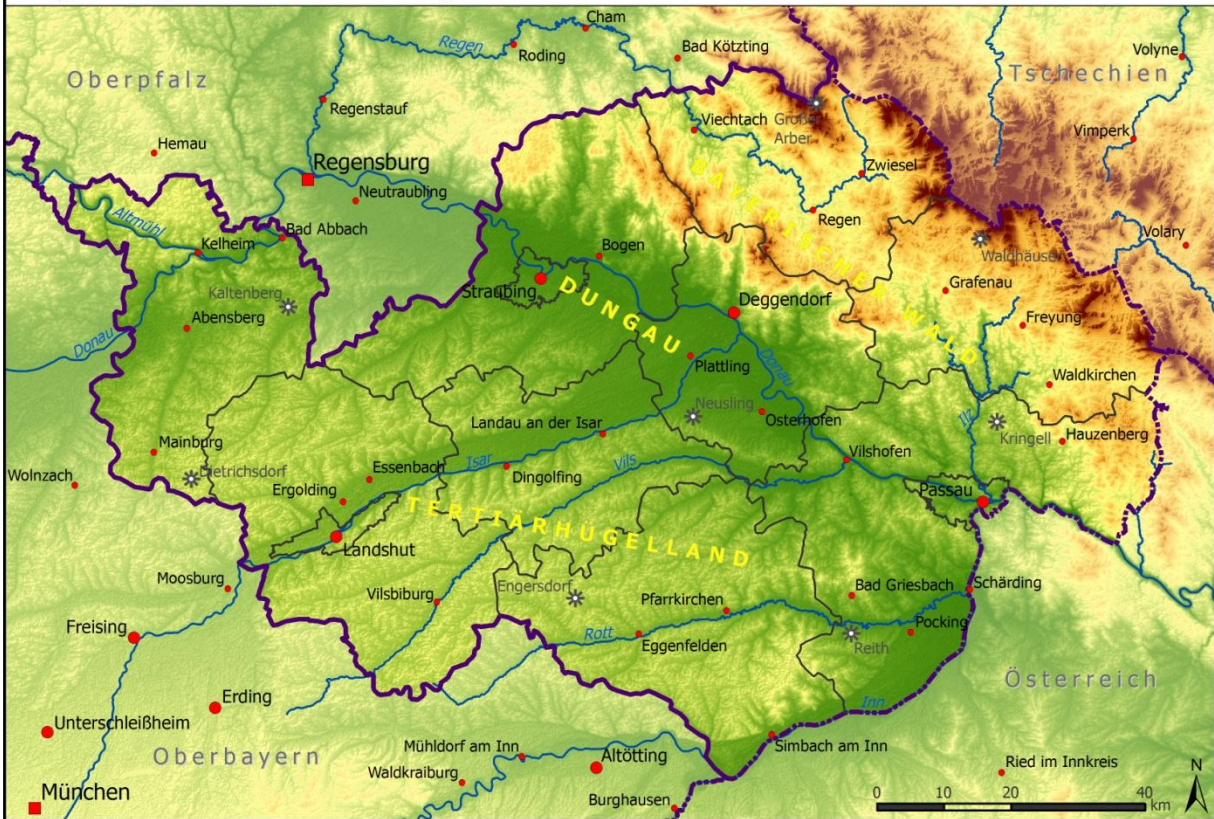
⁴⁹ Der Anteil der Erwerbstätigen in der Land- und Forstwirtschaft beträgt 5,5%, was der höchste Wert aller bayerischen Regierungsbezirke ist und im Vergleich zu Oberbayern (2,1%) mehr als doppelt so groß ist (vgl. StMELF 2010, Karte 3).

Maschinenbau auf. Die naturräumlichen Voraussetzungen unterteilen Niederbayern landwirtschaftlich in drei Regionen: dem Dungaue entlang der Donauebene, dem Tertiärhügelland und dem Bayerischen Wald. Eine sehr ertragreiche Region ist der Dungaue mit seinen fruchtbaren Lössböden, einer intensiven Ackerbaubewirtschaftung – vorwiegend Zuckerrüben-, Weizen-, Kartoffel- und Maisanbau – sowie großen Landwirtschaftsbetrieben. Der landwirtschaftlich bevorzugten Region des Dungaues steht der Bayerische Wald mit ertragsärmeren Böden und schlechteren klimatischen Bedingungen gegenüber. Die dortige Agrarstruktur ist kleinbäuerlich mit hohem Grünlandanteil und verstärkter Milchviehwirtschaft. Aufgrund der großen Waldflächen hat die Forstwirtschaft einen erhöhten Stellenwert. Das Tertiärhügelland nimmt aus landwirtschaftlicher Sicht die Mittelstellung zwischen Dungauregion und Bayerischem Wald ein. Die Böden sind für Ackerbau geeignet, erreichen aber nicht die Güteklassen wie im Gäuboden, so dass neben dem reinen Ackerbau auch Viehhaltung (v.a. Schweinemast) betrieben wird. Überregional bedeutsam sind das europaweit größte zusammenhängende Gurkenanbaugebiet (v.a. Landkreis Dingolfing) sowie die Hopfenproduktion in der Hallertau. Die Hallertau befindet sich an der Grenze zwischen Niederbayern (Landkreise Landshut und Kelheim) und Oberbayern und ist das größte Hopfenanbaugebiet Deutschlands und wegen der landschaftsprägenden Hopfengärten auch touristisch vermarktet.

Neben der Landwirtschaft ist der Regierungsbezirk Niederbayern bekannt als Standort für Maschinen- und Fahrzeugbau. Vor allem die BMW-Standorte in Dingolfing und Landshut mit zahlreichen Ansiedlungen von Zuliefererbetrieben sind bedeutsam, wobei Dingolfing mit Abstand dominiert (vgl. IHK 2005). Weitere große Industriebetriebe finden sich vornehmlich in der Nähe der größeren Städte Straubing, Landshut, Passau und dem Oberzentrum Deggendorf-Plattling. Im Bayerischen Wald sind die Holz-, Bergbau- und Glasindustrie, besonders aber auch die Ausrichtung auf den Tourismus zu nennen (vgl. hierzu Bauriegel 2009, S. 91ff.). Tourismus ist in Niederbayern zu einem bedeutenden Wirtschaftsfaktor geworden, der die Bereiche Natur-, Kultur sowie Sport- und Wellness-tourismus umfasst (vgl. Frank 2010, S. 88ff.). Neben dem vornehmlich im Bayerischen Wald anzutreffenden naturnahen Tourismus ist speziell die gut ausgebaute Infrastruktur für Golf- und Gesundheitstourismus zu nennen⁵⁰. Wegen ihrer Ausrichtung auf Naturerlebnis und Erholung ist die Tourismusbranche jedoch in hohem Maße von einer ästhetisch reizvollen Landschaft und intakter Umwelt abhängig, weshalb sie der Neuerrichtung von Anlagen zur Energieversorgung oftmals skeptisch gegenübersteht. Dies gilt es in der Modellierung als bedeutenden Faktor zu berücksichtigen. Über die Tourismusbranche hinaus erhofft man sich künftig weitere wirtschaftliche Impulse aus einer stärkeren Kooperation mit den beiden Nachbarregionen Oberösterreich und Südböhmen und einem Ausbau der Hochschulausbildung.

⁵⁰ Der Ort Bad Griesbach vermarktet sich als größtes zusammenhängendes Golf-Resort Europas. Überregional bedeutsame Heil- und Thermalbäder sind in Bad Abbach, Bad Gögging, Bad Griesbach, Bad Birnbach und Bad Füssing.

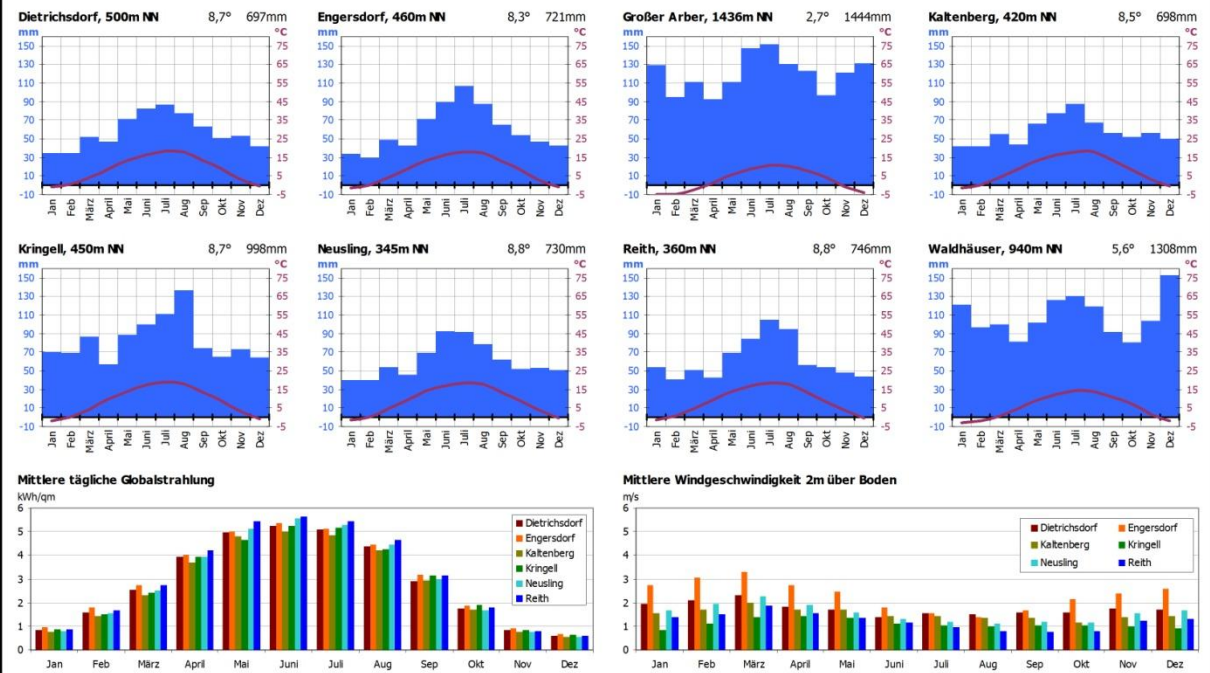
Regierungsbezirk Niederbayern



Legende

- größere Ortschaft
- Stadt größer 25.000 Einwohner
- Stadt größer 100.000 Einwohner
- Staatsgrenze
- Regierungsbezirksgrenze
- Landkreisgrenze
- Fluss
- * Wetterstation
- 1450
- Höhe
- 250 über NN

Klima



Kartengrundlage:
 © Bayerische Vermessungsverwaltung 2011
 DLR 2011
 ESRI 2006

Klimadaten:
 LfL 2011: Agrarmeteorologisches Messnetz Bayern (Dietrichsdorf seit 1989, Engersdorf seit 1990, Kaltenberg seit 1990, Kringell seit 2000, Neusling seit 1989, Reith seit 1989)
 DWD 2011a (Großer Arber und Waldhäuser 1961-1990)

Kartographie: Roland Zink 2011

Karte 1: Regierungsbezirk Niederbayern

Kenntnisse über regionale Gegebenheiten des gewählten Raumes, welche neben den naturräumlich-physischen und sozio-ökonomischen Standortbedingungen auch die bisherige Energieversorgung umfassen, werden vorausgesetzt, um das Konzept erfolgreich anzuwenden. Während die Standortbedingungen Grundlage der räumlichen Modellierung sind, dient die Beschreibung der aktuellen Energieversorgung einerseits dazu, Nachhaltigkeitsdefizite oder auch positive Ansätze aufzuzeigen und andererseits als Vergleich der modellierten Ergebnisse. Damit werden Aussagen zur Eignung bisher verwendeter Energieformen und deren Standorte möglich. Standorte können folglich danach beurteilt werden, ob sie die Ansprüche einer nachhaltigen Energieversorgung bereits erfüllen bzw. nicht erfüllen.

1.2 Status Quo der Stromversorgung in Niederbayern

Ähnlich zum gesamten Bundesland Bayern wird die Stromversorgung in Niederbayern bisher überwiegend durch fossile und nukleare Kraftwerke gedeckt (vgl. hierzu Abb. 12). Im Regierungsbezirk befinden sich die beiden Atomkraftwerke Isar 1 und Isar 2 nahe Landshut, die über den Regierungsbezirk hinaus Strom bereitstellen. Das Werk Isar 1 ist seit dem Atomunfall in Japan stillgelegt und bleibt in Zukunft abgeschaltet. Des Weiteren sind zahlreiche Gas- und Heizölkraftwerke in Betrieb, die vornehmlich dort lokalisiert sind, wo sich energieintensive industrielle Ansiedlungen befinden. Beispiele hierfür sind das Heizölkraftwerk der Südzucker AG in Plattling, das neu errichtete Gaskraftwerk zur Versorgung der Papierindustrie in Plattling, die Gaskraftwerke am BMW-Betriebsgelände in Dingolfing oder die zwei Gaskraftwerke nahe der Raffinerien in Münchsmünster und Neustadt a. d. Donau (beide im Landkreis Kelheim) (vgl. Karte 2). Kohlekraftwerke sind bis auf ein kleineres in Teisnach (Landkreis Regen) nicht vorhanden. Ein großes Heizölkraftwerk nahe der Ortschaft Pleinting (Landkreis Passau) befindet sich in Reserve.

Wegen den günstigen Voraussetzungen zur Energieerzeugung aus Wasserkraft, Biomasse und Sonnenenergie sind im Sektor der erneuerbaren Energien bereits zahlreiche Anlagen vorhanden. Während die Wasserkraft bereits seit langem einen hohen Beitrag zur Energieversorgung in ganz Bayern leistet, sind die Entwicklungen im Bereich der Photovoltaik und Biomassenutzung vergleichsweise neu (vgl. Abb. 12). Ein rascher Zubau dieser Energieformen ist erst seit Beginn deren staatlichen Förderung, im Besonderen seit dem Inkrafttreten des EEG, zu verzeichnen. Gerade die Photovoltaik gilt wegen der Installation zahlreicher Dachanlagen aber auch sehr großer Anlagen auf Freiflächen im gesamten Regierungsbezirk als prosperierende Energieform. Biogasanlagen und Biomassekraftwerke produzieren über den gesamten Regierungsbezirk verteilt Energie, wobei bei Biogasanlagen speziell das Rottal und das südliche Tertiärhügelland eine größere Anzahl an Anlagen aufweisen (vgl. StMUG 2011). Die Windenergie hat im Regierungsbezirk Niederbayern bislang keine

Bedeutung. Nicht nur die dürftige Anzahl an Windrädern sondern auch deren geringe Leistung ist hier auffällig. Im südöstlichen Bayerischen Wald befindet sich lediglich eine einzige größere Anlage mit 600 kW nahe der Ortschaft Thalberg. Südlich von Landau a. d. Isar stehen zwei Windräder mit zusammen 1.500 kW und in der Nähe von Gankofen ein Windrad mit 1.000 kW, was heute gängige bzw. sogar kleine Größen sind. Der politische wie gesellschaftliche Wille, diese Technologie weiter auszubauen, war bisher gering und wurde mit den Argumenten der im Vergleich zu Norddeutschland schlechteren Windverhältnisse sowie dem störenden Eingriff in das Landschaftsbild begründet. Da sich Bayern in Zukunft verstärkt auch dieser Technologie öffnen will, ist der Diskussion um einen forsierten Atomenergieausstieg und mittlerweile auch den politischen Vorschlägen der Staatsregierung geschuldet.

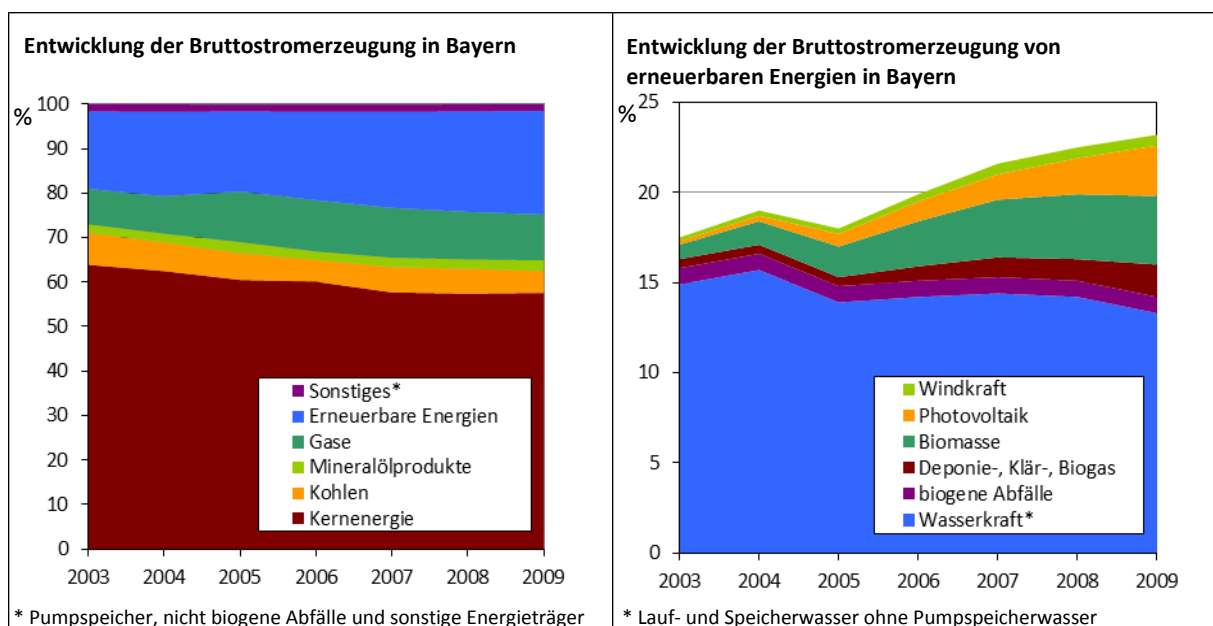


Abb. 12⁵¹: Entwicklung der Bruttostromerzeugung in Bayern

Zusammenfassend hat der Regierungsbezirk Niederbayern in den letzten Jahren bereits einen viel versprechenden Weg eingeschlagen, den Umbau seiner Energieversorgung in Richtung erneuerbare Energien voranzubringen. Dennoch reichen die Anstrengungen noch nicht aus, um von einer nachhaltigen Stromversorgung sprechen zu können. Zum einen ist der Umstieg auf nachhaltige Technologien keinesfalls vollständig gelungen, zum anderen sind die bisherigen Standorte nicht in eine nachhaltige Gesamtstrategie eingebunden, wodurch an verschiedenen Stellen Konflikte entstanden und auch weiterhin entstehen. So sind die bisher realisierten Standorte, gefördert durch die hohen Einspeisevergütungen des EEG, teils willkürlich in der Landschaft verteilt entstanden, was sowohl gesellschaftlich wie politisch skeptisch betrachtet wurde. Eine vertiefte Darstellung der aktuellen Situation und möglicher Konfliktfelder im Regierungsbezirk Niederbayern erfolgt separat

⁵¹ Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (2011c).

die Deckung des Strombedarfs durch erneuerbare Energien stellt dies eine zusätzliche Herausforderung dar, da der Mehrbedarf an Strom bei einer angestrebten autarken Versorgung mit einem weiteren Ausbau der Anlagenkapazität verbunden ist. Gleichwohl befinden sich auch auf der Seite des Energieverbrauchs weiterhin enorme Einsparpotenziale.

1.3 Strombedarf in Niederbayern

Die Erfassung des Energie- bzw. Strombedarfes in einer Region wie dem Regierungsbezirk Niederbayern ist aufgrund mangelnder Daten nur anhand statistischer Mittelwerte für gesamt Bayern und deren Umlage auf das Untersuchungsgebiet möglich. Für Bayern halten die Energiebilanz Bayern (vgl. StMWIVT 2011) sowie das Bayerische Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (2010) aktuelle Kennzahlen und Verbrauchsstrukturen bereit. Demnach betrug der Strombedarf (Endenergieverbrauch) im Jahr 2008 81.246 Mio. kWh, wovon 35.371 Mio. kWh auf das verarbeitende Gewerbe, 20.351 Mio. kWh auf Haushalte und 25.524 Mio. kWh auf sonstige Verbraucher entfielen.

Dieser statistischen Aufteilung des Nettostromverbrauches in verschiedene Verbrauchergruppen folgend basiert die Regionalisierung des Verbrauchs auf drei Modellierungsschritten. Der Strombedarf im verarbeitenden Gewerbe wird anhand der Beschäftigtenzahl in diesem Sektor abgeschätzt. Bezogen auf Bayern ergibt sich ein Pro-Kopf-Stromverbrauch je Beschäftigtem des verarbeitenden Gewerbes von 28.810 kWh/a. Statistisch erfasst sind Zahlen zu den Beschäftigten im verarbeitendem Gewerbe auf Landkreisebene. Anhand der Zuweisung von Beschäftigten zu den jeweiligen Landkreisen ist es möglich, den industriellen bzw. gewerblichen Strombedarf für jeden Landkreis abzuschätzen. Eine direkte Regionalisierung erfolgt durch die Aufteilung der Beschäftigten auf die ATKIS-Flächenkategorien „*Industrie und Gewerbe*“ sowie „*Fläche gemischter Nutzung*“. Da bei der Fläche gemischter Nutzung keine Nutzungsform überwiegt wird angenommen, dass Industrieflächen eine doppelt so hohe Beschäftigtendichte als Flächen dieser Kategorie aufweisen.

Die Regionalisierung des Stromverbrauchs der Haushalte folgt einer ähnlichen Vorgehensweise. Zunächst wird der Pro-Kopf-Verbrauch für Bayern ermittelt (1.626 kWh/Person/a). Anhand der Einwohnerzahlen einer Gemeinde kann wiederum auf deren Strombedarf geschlossen werden. Die räumliche Disaggregation basiert auf der Zuweisung von kommunalen Einwohnerzahlen zu den ATKIS-Flächenkategorien „*Wohnbaufläche*“ sowie „*Fläche gemischter Nutzung*“ separat für jede Gemeinde. Die Aufteilung zwischen Wohnbauflächen und Flächen gemischter Nutzung erfolgt analog zur Modellierung des Stromverbrauchs des verarbeitenden Gewerbes.

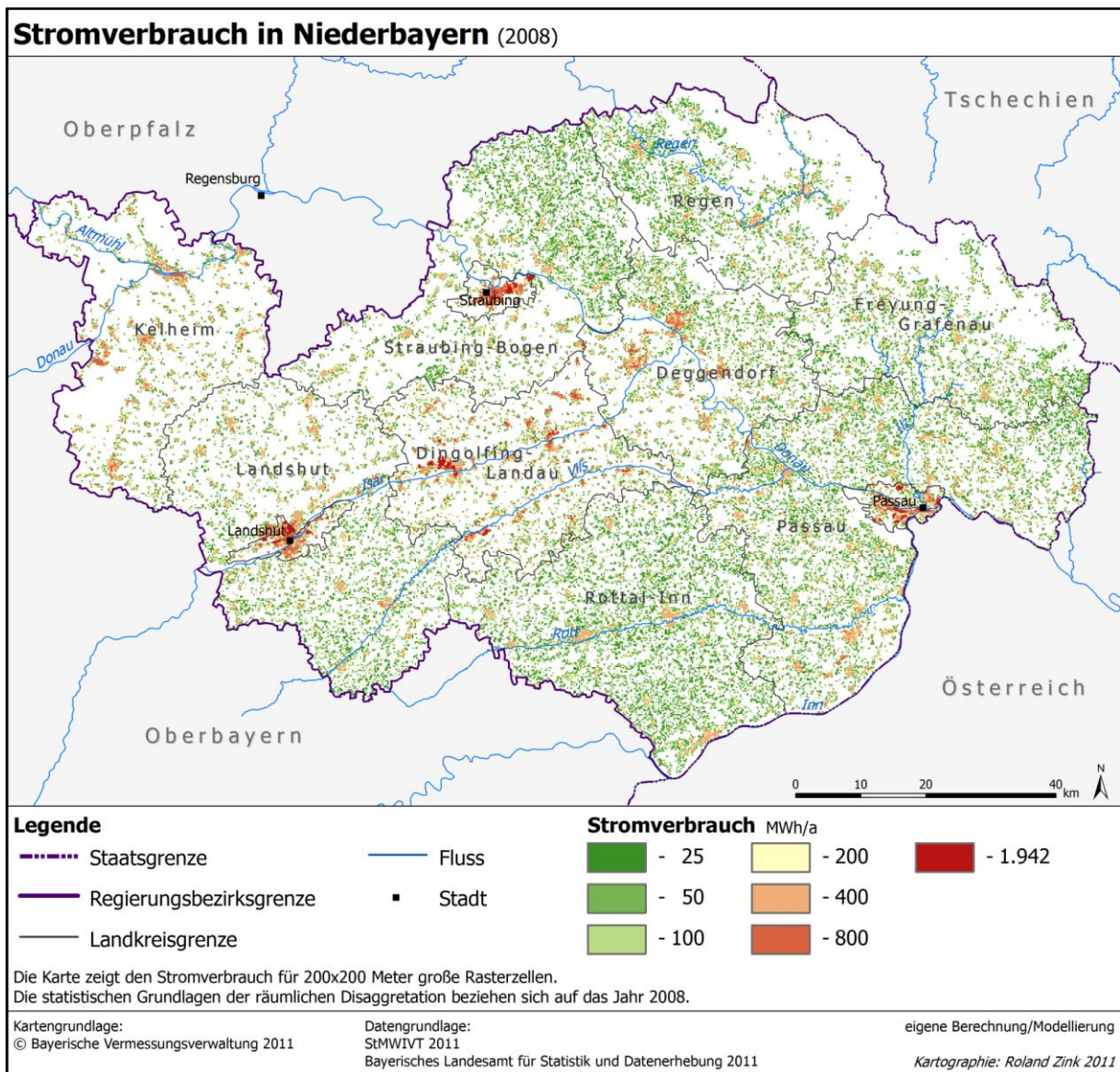
Der restliche Strombedarf der Verbrauchergruppe „*sonstige Verbraucher*“ wird wegen mangelnder statistischer Anknüpfungspunkte zu gleichen Teilen auf die Flächenkategorien „*Fläche mit besonderer*

funktionaler Prägung“, „*Fläche gemischter Nutzung*“, „*Industrie und Gewerbe*“ und „*Wohnbaufläche*“ verteilt. Die Modellierung erfolgt hier auf Ebene des Regierungsbezirkes.

Die Vorgehensweise zur Regionalisierung des Stromverbrauchs beruht auf weit gefassten Annahmen und vernachlässigt z.B., dass Industrien je nach Betätigungsfeld sehr divergierende Stromverbräuche haben können. Da die Modellierung des Energiebedarfs in der Forschungsarbeit allerdings keine Priorität besitzt sondern bei der Aussage zu autarken Energieregionen und sinnvollen Kraft-Wärme-Kopplungsstandorten (bei der Bioenergie) lediglich als Orientierung dienen soll, wird diese Vorgehensweise als ausreichend erachtet. Eine genauere statistische Erfassung von Strombedarfskennzahlen verschiedener Industrien und Personen, deren exakte räumliche Lokalisierung und die Beachtung zeitlicher Lastgänge bieten zukünftig allerdings die Chance, Verbrauchsstrukturen exakt abzubilden. Dies ist vor allem dann notwendig, wenn es um die Ausgestaltung regionaler Versorgungsstrukturen z.B. in Form von kommunalen oder regionalen Versorgern geht, deren Bestreben es sein muss, den Energiebedarf durch einen ggf. virtuell vernetzten Kraftwerkspark zu jeder Zeit bedienen zu können.

Das Ergebnis (vgl. Karte 3) zeigt den räumlichen Zusammenhang von Stromverbrauch und Bevölkerungsdichte bzw. Siedlungsstruktur sowie der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit einer Region. Zu erkennen ist dies unter anderem an den beiden Städten Deggendorf und Plattling. Beide erscheinen in der Karte als Gebiete mit einem erhöhten Energieverbrauch. In der Stadt Plattling ist dafür die hohe Beschäftigung in der Industrie (Zuckerindustrie, Papierindustrie und große Gewerbegebiete) verantwortlich, wohingegen der Strombedarf der Stadt Deggendorf auf die größere Bevölkerungszahl zurückzuführen ist.

Den mit Abstand größten Strombedarf weisen die Kreisfreien Städte Landshut, Passau und Straubing sowie die Stadt Dingolfing auf. Innerhalb der Städte treten wiederum die Industrie- und Gewerbegebiete mit einem vermehrten Strombedarf hervor. Die jeweils größeren Industrieansiedlungen sind in der Karte (rot gekennzeichnet) deutlich zu erkennen. Nennenswert sind das BMW-Werk in Dingolfing im Nordwesten der Stadt gelegen, in Straubing das weitläufige Industriegebiet im Osten sowie der in östlicher Richtung folgende Hafen, im Norden Passaus das Industriegebiet Patriching oder in Landshut die großen Industrieflächen zwischen der Innenstadt und der Nachbarstadt Ergolding (an der nördlichen Stadtgrenze von Landshut).



Karte 3: Räumliche Verteilung und Abschätzung des Stromverbrauchs in Niederbayern

Neben den Industriezentren führt vor allem die Siedlungsstruktur im Regierungsbezirk zu einer regional ungleichmäßigen Konzentration des Energieverbrauches. Zwei Regionen, die sich klar voneinander absetzen, sind zu unterscheiden: Zum einen ein keilförmiges Gebiet im Nordwesten des Regierungsbezirkes in etwa abgegrenzt durch die Donau im Osten sowie der Isar bzw. Vils im Süden. Diese Region, welche das nördliche Tertiärhügelland und den Dungau mit einschließt, kennzeichnet eine Konzentration des Energieverbrauches auf größere Siedlungseinheiten mit weitläufigen Lücken dazwischen (weiß). Zum anderen wird dieser Keil bogenförmig umschlossen von einem Gebiet vermehrt dezentraler Verbrauchsstrukturen. Es umfasst den Bayerischen Wald (nordöstlich der Donau) und reicht über die Landkreise Passau und Rottal-Inn bis in den südlichen Teil des Landkreises Landshut. Ursächlich für den gestreuten Energieverbrauch ist die starke Landschaftszersiedelung mit Gehöften, Weilern und kleinen Dörfern. Der Strombedarf ist zwar durchwegs gering (grün) jedoch weit über die Fläche verteilt.

Die überwiegend ländliche Struktur sowie das Fehlen großer Städte bzw. Ballungsräume führen zusammenfassend dazu, dass sich der jährliche Strombedarf im Regierungsbezirk Niederbayern auf etwa 7.860 Mio. kWh summiert. Diese Kennzahl hilft im Folgenden, die einzelnen Potenziale verschiedener Technologien zu bewerten und deren möglichen Beitrag für eine eigenständige Versorgung darzustellen. Dabei erfolgt ein bilanzieller Vergleich zwischen Bedarf und Potenzial. Zeitliche Variationen der Lastgänge sowie Unterschiede bei der Stromproduktion bleiben unbeachtet. Allerdings wird auf einen ausgewogenen Energiemix von Technologien geachtet, die verschiedene Lastbereiche abdecken können.

Über den Stromverbrauch lassen sich in Ansätzen auch Rückschlüsse auf die räumliche Verteilung des Wärmebedarfs ziehen, da sowohl in der Industrie als auch im Bereich der Haushalte neben Strom vor allem Wärme benötigt wird. Der Wärmebedarf ist besonders bei der Planung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) wichtig, bei denen es aus Effizienz-, Rentabilitäts- und Ökologiegründen anzustreben ist, neben der Stromproduktion auch die überschüssige Abwärme möglichst vollständig zu nutzen.

2. Zur Auswahl und Definition der Referenzanlagen

Die Fokussierung dieser Arbeit auf die jeweilige Technologieoption einerseits und die Technologievielfalt zur Stromproduktion andererseits sind Gründe dafür, dass der Auswahl bzw. der Definition von Referenzanlagen ein hoher Stellenwert beizumessen ist. Gerade die Technologievielfalt, die wegen einer rasanten Entwicklung im Bereich der neuen erneuerbaren Energien, speziell der Bioenergie, der Windkraft und der Photovoltaik, aktuell zu einer kaum mehr überblickbaren Pluralität an Erzeugungsformen geführt hat, erfordert eine zielgerichtete Auswahl, um die Modellierung handhabbar zu belassen. Die Wahl der Referenztechnologien orientiert sich deshalb an folgenden Kriterien:

- **Untersuchungsraum**

Damit die Modellierung nicht unnötig überladen wird, sollen mit Bezug auf den gewählten Untersuchungsraum nur Optionen gewählt werden, die mit heutigem Wissen einen signifikanten Beitrag zur Stromversorgung in diesem Gebiet beitragen können. Aufgrund logischer struktureller Überlegungen können somit einige Technologieoptionen bereits vorweg ausgeschlossen werden. Für den Untersuchungsraum Niederbayern bedeutet dies, dass z.B. die Form der solarthermischen Stromerzeugung oder Gezeiten- und Wellenkraftwerke ignoriert werden.

- **Aktuelle Technologien**

Ein weiteres Kriterium der Technologieauswahl ist der zeitliche Aspekt. So stehen nur diejenigen Optionen zur Auswahl, die heute bereits zur Stromversorgung eingesetzt werden oder dies in naher Zukunft tun. Diese Prämisse führt dazu, dass bei der Definition von Referenzanlagen auf literarische Angaben, Internetdatenbanken und Herstellerangaben zurückgegriffen und somit eine fundierte Sicht gewährleistet werden kann. Spekulationen über mögliche neue Erzeugungsformen wie etwa die Kernfusion bleiben unbeachtet. Obwohl der Regierungsbezirk Niederbayern stellenweise günstige Bedingungen zur geothermischen Energieversorgung (vor allem Wärme) aufweist (vgl. StMWIVT 2010), fehlen bisher für die Modellierung notwendige Erfahrungswerte, so dass auch die geothermische Stromerzeugung nicht in die Modellierung integriert wird.⁵² Selbstverständlich ist es im Konzept doppelter Nachhaltigkeit möglich, zu einem späteren Zeitpunkt hier Veränderungen vorzunehmen.

- **Technologievarianten**

Wie bereits erwähnt hat die technologische Entwicklung zu einem breiten Spektrum an verschiedenen Formen zur Stromerzeugung geführt. Neben der Differenzierung hinsichtlich der Energiequelle⁵³ (z.B. Windenergie, Wasserkraft oder fossiler Energieträger) und der Art der Verwendung (z.B. Wärme, Strom oder Mobilität), existiert bei den meisten Energieformen eine weitere Unterteilung hinsichtlich der verwendeten Technik. Bei der Bioenergie wird dies am deutlichsten. So kann Biomasse – selbst bereits ein weit gefasster Begriff mit verschiedenartigen Stoffen – z.B. direkt verbrannt oder thermochemisch, physikalisch-chemisch und biochemisch umgewandelt werden (vgl. Kaltschmitt 2009, S. 4). Die dadurch entstehenden Brennstoffe lassen sich nochmals in fest, gasförmig oder flüssig differenzieren, weshalb unterschiedliche Verfahren zu Nutzung von Biomasse resultieren, die jeweils eigener Technologien bedürfen.

- **Anlagengröße**

Neben der Technik ist auch die Größe einer Anlage entscheidend. So sind z.B. der Ertrag und die wirtschaftliche Rentabilität einer Windkraftanlage von deren Höhe abhängig, da die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten mit der Höhe zunehmen. Um bei der Modellierung nicht an der Vielzahl von Technologievarianten und unterschiedlichen Anlagengrößen zu scheitern, ist eine Auswahl an repräsentativen Technologien unerlässlich. Hierbei erscheint es sinnvoll, vor allem hinsichtlich der Energiequelle zu unterscheiden und

⁵² Im Untersuchungsgebiet sind zwei größere Projekte geothermischer Energienutzung zu nennen, Simbach am Inn und Straubing sowie ein neues Projekt in Altdorf bei Landshut (vgl. Homepages der Gemeinden Altdorf, Simbach am Inn und Straubing 2011).

⁵³ Die meisten Energieformen (z.B. auch Wind- und Wasserkraft) sind auf das solare Strahlungsangebot zurückzuführen.

für die in Betracht kommenden Bereiche jeweils repräsentative Technologievarianten mit festgelegten Größen zu wählen.

Mit den genannten Kriterien kann eine praktikable Auswahl und Definition von Referenzanlagen erfolgen, die in dieser Arbeit die fossilen Energieformen Atomkraft, Erdgas (GuD) und Kohle sowie die erneuerbaren Energien Biogas, Biomasse, Photovoltaik, Wasserkraft und Windenergie umfasst. Der Umstand nicht alle Technologievarianten berücksichtigen zu können führt dazu, dass die Modellierung eine Vereinfachung erfährt, die jedoch nicht aus konzeptionellen sondern aus anwendungsorientierten Motiven resultiert, weshalb die Strategie zur Modellierung und Implementierung einer nachhaltigen Energieversorgung davon unberührt bleibt. Es ist dem Anwender überlassen, sowohl die Anzahl als auch die Art an Technologieoptionen und deren Größe zu variieren.⁵⁴ Zusätzlich ermöglicht die Offenheit des Konzeptes moderne Technologievarianten bzw. den technologischen Fortschritt fortlaufend in die Modellierung zu integrieren.

Die Referenzanlagen werden im Anschluss weiter spezifiziert und bilden die Basis sowohl für die Technologiebewertung als auch für die anschließende räumliche Modellierung. Leider ist es zumeist nicht möglich, alle benötigten Modellierungsdaten einer Technologie anhand einer existierenden Referenzanlage abzudecken. Um diese Lücken zu schließen, finden vordefinierte Technologien aus dem GEMIS-Programm (GEMIS 4.6; vgl. Fritsche & Schmidt 2008) Verwendung, deren Prozessketten anschließend den räumlichen Gegebenheiten der Untersuchungsregion weitestgehend angepasst werden. Dadurch entstehen Referenzanlagen, die einerseits durch die technologischen Vorgaben vorbestimmt und andererseits durch die spezifischen Eigenschaften der Untersuchungsregion definiert sind. Fehlende Daten wurden entweder selbst ermittelt oder der aktuellen Literatur entnommen und entsprechend gekennzeichnet. Grundlage für die Modellierung ist ein tabellarischer Steckbrief zu jeder Referenzanlage mit den wesentlichen technischen und ökonomischen Parametern. Bilder zu den einzelnen Energieformen ergänzen diesen und zeigen einerseits die bisherige Verwendung, geben andererseits auch einen Ausblick auf mögliche Landschaftsveränderungen, sollte die jeweilige Technologie in Zukunft vermehrt eingesetzt werden.

2.1 Atomenergie

Die Nutzung von Atomenergie⁵⁵ zur Stromerzeugung ist trotz der Vorfälle in Japan und dem politisch beschlossenen Atomenergieausstieg in der deutschen Gesellschaft höchst umstritten, was durch gesellschaftliche Proteste z.B. gegen Atommülltransporte, Endlagerstandorte oder der Befristung der

⁵⁴ Eine Veränderung der Technologieauswahl kann die Entscheidungsfindung beeinträchtigen, indem z.B. eine Neudefinition von Wertefunktionen aufgrund größerer Bandbreiten zwischen minimalen und maximalen Indikatorwerten notwendig wird, was sich auch auf das Ergebnis der übrigen Technologievarianten auswirken kann (vgl. Kapitel V 1.5).

⁵⁵ Die Begriffe Atomenergie und Kernenergie werden synonym verwendet.

Laufzeiten bestehender Kraftwerke zum Ausdruck kommt. Deutschland nutzt seit den 60er Jahren die Atomenergie und hat vor allem in den 70er und Anfang der 80er Jahre massiv in diese Technologie investiert. Mit der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl im April 1986, den damit einhergehenden gravierenden Folgen nicht nur für die unmittelbare Umwelt sondern für weite Teile Europas⁵⁶ begann die gesellschaftliche Akzeptanz zu schwinden. Der gesellschaftliche Zuspruch zur Atomtechnologie hat sich seither abgeschwächt, wobei die Akzeptanz stets auch durch aktuelle Ereignisse beeinflusst war (vgl. Schulz 2006, S. 34f.). In jüngster Vergangenheit zählen hierzu der Störfall im Atomkraftwerk Krümmel und dessen mediale Berichterstattung (exemplarisch SPIEGEL online 05.07.2009 / WELT online 05.07.2009), die Veröffentlichung von Ergebnissen zum statistisch nachgewiesenen erhöhten Krebsrisiko bei Kindern unter 5 Jahren rund um Atomkraftwerke (vgl. Kaatsch et al. 2007, sog. KiKK-Studie), der Streit um die Laufzeitverlängerung sowie im Besonderen die Reaktorkatastrophe in Japan, welche die Risiken der Atomenergie auf dramatische Weise verdeutlicht hat und so zu einem weiteren Akzeptanzverlust in der Bevölkerung beigetragen hat.

Als Argumente für die Kernenergie gelten ihre geringen Stromgestehungskosten, die meist jedoch externe Kosten wie Endlagerung oder Versicherungskosten vernachlässigen, sowie die geringen direkten CO₂-Emissionen. Der Kernenergie wird der Status der Brückentechnologie zugewiesen, die einerseits Versorgungssicherheit und günstige Strompreise gewährt und andererseits den Ausbau erneuerbarer Energien unterstützen soll (vgl. BMWi & BMU 2010, S. 14ff.). Diese Strategie ist aufgrund systemischer Fragen der Energieversorgung jedoch nicht nur politisch sondern auch wissenschaftlich umstritten (vgl. SRU 2011, S. 8). Unabhängig davon sind die wichtigsten Gegenargumente einer weiteren Nutzung die Problematik der Endlagerung⁵⁷ und die Sicherheit von Atomkraftwerken, welche bereits vor dem Fukushima-Unfall seitens der Bevölkerung skeptisch eingeschätzt wurde (vgl. forsa 2009, S. 3-4). In Deutschland führte im Frühjahr 2011 die Diskussion über die zukünftige Rolle der Kernenergie zu einem beschleunigten Atomenergieausstieg, welcher gesellschaftlich getragen und überparteilich politisch beschlossen wurde. Mit dem Moratorium und der anschließenden Stilllegung älterer Atommeiler ist dieser Weg eingeschlagen und wird auch zukünftig wohl so fortgesetzt (Stand November 2011).

Trotz dieser Diskussion sind in Deutschland aktuell noch neun Anlagen (Stand November 2011) zur Stromerzeugung in Betrieb; darunter sechs Kraftwerke, die gemessen an ihrer jährlichen Stromproduktion zu den zehn größten Anlagen der Welt gehören (vgl. Weßelmann et al. 2010, S. 3ff.). Das Kernkraftwerk Isar 2, ein Druckwasserreaktor, ist das größte Einzelkraftwerk in Deutschland

⁵⁶ vgl. exemplarisch: Rudenko 1993 / Hartung 1996 / Gorlenko et al. 1997. / Krisjane & Churbakova 1997 / Lindauer et al. 2006 / LfU 2006 / Czakainski et al. 2007

⁵⁷ Auf die Problematik der Endlagerung von wärmeentwickelndem radioaktiven Abfall wird aufgrund der eigenständigen Thematik nicht weiter eingegangen. Hinweise dazu finden sich exemplarisch bei Öko-Institut (2007), BGR (2007) und BMU (2010).

(vgl. E.ON Kernkraft GmbH 2005) und dient als Referenzanlage für die Modellierung. Der Kraftwerksstandort liegt im Untersuchungsgebiet nahe der Stadt Landshut auf den Gemarkungen der Gemeinden Essenbach und Niederaichbach. Zusätzlich befinden sich an diesem Standort das schon 1979 kommerzielle in Betrieb genommene Kernkraftwerk Isar I, welches mit Beginn des Atommoratoriums vorübergehend abgeschaltet wurde und seit dem neuen gesetzlich festgelegten Atomenergieausstieg dauerhaft stillgelegt ist, sowie ein Brennelementbehälterlager. Das erste Kernkraftwerk Niederaichbach, eine Versuchsanlage, die von 1973 bis 1974 in Betrieb war, ist bereits vollständig demontiert.

Tabelle 6⁵⁸: Steckbrief Atomenergie

| Atomenergie | | |
|--|--------------------|------------------|
| | Referenzanlage | Einheit |
| Technische Daten | | |
| Nennleistung | 1.485 | MW _{el} |
| Kalkulierte Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer | 30 | a |
| Jährliche Volllaststunden (Auslastung) | 8.100 | h |
| Brennstoff | Uran, angereichert | -- |
| Kosten | | |
| Investitionskosten | 2.303.000 | €/MW |
| Kapitalkosten | 275.623.000 | €/a |
| Fixe Kosten | 102.606.000 | €/a |
| Variable Kosten | 68.921.000 | €/a |
| Brennstoff- und Inputkosten | 157.037.000 | €/a |
| Durchschnittliche Steigerung der jährlichen Rohstoffpreise | 3 | % |
| Sonstige Daten | | |
| Beschäftigte | 262 | Personen |

Im Gesetz zur geordneten Beendigung der Kernenergienutzung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität (Atomkonsens) hatte man sich 2002 auf den Atomausstieg geeinigt. Dazu wurden den Atomkraftwerken je nach Alter gewisse Reststrommengen zugewiesen, nach denen sich dann der Zeitpunkt ihrer Stilllegung ergeben sollte. Mit dem Energiekonzept der aktuellen Bundesregierung wurde dieser Konsens 2010 wieder aufgebrochen und ein verspäteter Ausstieg beschlossen, welcher mit der Fukushima-Katastrophe seinerseits erneut zur Disposition gestellt wurde. Der aufflammende Konflikt zeigt ebenso wie die Suche nach einem geeigneten Endlager, dass erhebliche gesellschaftliche Vorbehalte und Barrieren gegenüber dieser Technologie bestehen. Ein weiterer Ausbau oder Neubau von Kraftwerken erscheint im Untersuchungsgebiet wie in der gesamten Bundesrepublik Deutschland auch aufgrund sehr langer Planungsverfahren daher unmöglich.

⁵⁸ Quellen: GEMIS-Datenbank (U-KW-DWR-DE-2000) / E.ON Kernkraft GmbH (2005) / atw (2010)

Atomkraftwerk Isar II



Das Atomkraftwerk Isar II mit dem kuppelförmigen Reaktorgebäude und dem markanten, 165 Meter hohen Kühlturm. Gemeinden Essenbach und Niederaichbach, Landkreis Landshut
Aufnahmezeit: Februar 2012, eigene Aufnahme

Abb. 13: Atomkraftwerk Isar II

2.2 Bioenergie

Mit dem Oberbegriff Bioenergie sind zahlreiche verschiedene Nutzungspfade bezeichnet, die eine pauschale Bewertung mit Blick auf die Nachhaltigkeit nicht zulassen. Das breite Nutzungsspektrum resultiert aus der Vielfalt von Biomasse, die sämtliche durch Pflanzen oder Tiere anfallende bzw. produzierte organische Substanzen umfasst und letztlich photosynthetisch gebundene Sonnenenergie verkörpert. Hierzu zählen die lebende Phyto- und Zoomasse (Pflanzen und Tiere), deren Rückstände (Exkrememente), abgestorbene aber noch nicht fossile Phyto- und Zoomasse (z.B. Stroh) und Reststoffe, die durch eine technische Umwandlung oder Nutzung entstanden sind (vgl. Kaltschmitt 2009, S. 2). Die unterschiedlichen Stoffeigenschaften und Qualitäten haben differenzierte Bereitstellungsketten zur Folge, d.h. es sind verschiedene Prozesse von der Biomasseproduktion bis zur Bereitstellung der End- und Nutzenergie vorstellbar. Kaltschmitt (2009, S. 3ff.) zeigt dieses umfassende Spektrum auf und verweist darauf, dass die gewählte Bereitstellungskette, bzw. auch Einzelprozesse daraus, „unter den gegebenen Randbedingungen vor Ort ökonomisch tragfähig, genehmigungsfähig sowie sozial akzeptabel sein“ (ebs. 2009, S. 4) müssen. Ferner ist eine umweltverträgliche Flächeninanspruchnahme und agrarische Produktionsweise, eine effiziente und sparsame Biomasseumwandlung sowie eine energieeffiziente Nutzung von Bioenergie zu nennen (vgl. Thrän 2007, S. 67). Die geforderten Kriterien verweisen auf wichtige Nachhaltigkeitsaspekte bei

der Bioenergie und finden sich ebenso in der Argumentation für das Konzept doppelter Nachhaltigkeit wieder.

Obwohl sich in den vergangenen Jahren die Diskurse um Bioenergie vor allem auf die Herstellung von Biokraftstoffen für den Mobilitätssektor und deren weltweite Potenziale und Folgen konzentrierten⁵⁹, hat sich in Deutschland, verursacht durch die ökonomischen Anreize des EEG, speziell seit der Novellierung im Jahr 2004, eine rasante Entwicklung auch im Bereich der Wärme- und Elektrizitätserzeugung ergeben (vgl. hierzu Widmann 2007). Die Zahl an Biomasseheizkraftwerken zur Nutzung von Festbrennstoffen hat mit rund 250 Anlagen und einer installierten Leistung von über 1.200 MWel wie die Zahl an Biogasanlagen mit rund 4.700 Anlagen und einer installierten Leistung von über 1.700 MWel im Jahr 2009 hohe Werte erreicht und ist weiter wachsend, wenn auch bei Biogasanlagen in der Dynamik etwas abgeschwächt (vgl. Witt et al. 2010, S. 4-5, 23ff. und 48). Nach Anlagenzahl und auch installierter Leistung nimmt Bayern sowohl bei den Biomasseheizkraftwerken als auch bei den Biogasanlagen die Spitzenposition innerhalb Deutschlands ein (vgl. ebs. 2010, S. 7f. und 25ff.). Auch im Regierungsbezirk Niederbayern mit der agrarisch geprägten Dungauregion und dem südlich anschließenden Tertiärhügelland sowie dem waldreichen Bayerischen Wald sind in den vergangenen Jahren bereits zahlreiche Anlagen zur Nutzung von Bioenergie entstanden.

Die Argumentation für Bioenergie stützt sich auf zahlreiche Vorteile, die sowohl auf globaler, nationaler und regionaler Ebene zum Tragen kommen (vgl. hierzu WBGU 2009b, S. 23ff). Aus energiepolitischer Sicht ist die Reduzierung von Importabhängigkeit vor allem bei Treibstoffen für den Mobilitäts- und Transportsektor zu nennen. Wirtschaftliche Chancen bietet die Bioenergie in der Schaffung neuer Arbeitsplätze, der Generierung von zusätzlichem Einkommen für die Land- und Forstwirtschaft sowie die Wertschöpfung in ländlichen Regionen im Allgemeinen. Des Weiteren kann die Bioenergie in manchen Varianten zur Minderung von Treibhausgasemissionen beitragen und positive Effekte im Umweltschutz erzielen. Synergien von Naturschutz und Energiepflanzenanbau ergeben sich durch eine mögliche ökologische Ausrichtung der Bewirtschaftungsform (vgl. Karpenstein-Machan 2004, S. 58ff. / Köppel, Peters & Schultze 2004, S. 19f.) oder einer Erweiterung von Fruchtfolgen und neuen Anbau- und Nutzungsverfahren (vgl. Graß & Scheffer 2005, S. 435ff.). Technische Vorzüge bestehen aufgrund der zahlreichen Nutzungsmöglichkeiten (Treibstoff, Wärme, Strom) sowie der einfachen Speichermöglichkeit, wodurch Bioenergie sowohl im Grundlastbereich als auch zum Ausgleich von Lastschwankungen nach Bedarf einsetzbar ist und damit eine tragende Rolle im künftigen Energiemix übernehmen kann. Die Netzintegration von Bioenergie zeichnet sich gerade gegenüber der Wind- und Sonnenenergie durch deutlich bessere Planbarkeit der

⁵⁹ vgl. exemplarisch Breuer et al. 2006 / Hennings & Zeddies 2007 / Kerckow 2007 / Breuer et al. 2008 / Gerling & Gans 2008

Stromerzeugung aus. Plieninger et al. (2006, S. 82) sowie Klohn & Windhorst (2007, S. 4) ergänzen einen psychologischen Aspekt, indem die Agrarwirtschaft hofft, mit der Erzeugung von Bioenergie eine Verbesserung des Bildes der Landwirtschaft in der Öffentlichkeit zu erreichen, um damit eine neue Verankerung und Legitimation in der Gesellschaft zu finden.

Den beschriebenen Vorteilen der Bioenergie stehen jedoch auch Nachteile gegenüber. Konflikte ergeben sich speziell dort, wo die Energieproduktion mit anderen Nutzungsformen von Biomasse wie z.B. der verarbeitenden oder chemischen Industrie, im Besonderen aber mit der Nahrungsmittelproduktion, konkurriert. Der Anbau von Biomasse für energetische Zwecke erhöht den Flächendruck auf begrenzt verfügbare agrarische Nutzflächen (vgl. Rode & Schlegelmilch 2006, S. 58f. / Kaphengst 2007, S. 93ff). Mit Blick auf die globale Hungersituation werden daher Forderungen laut, die Nutzung von Bioenergie auf ein Maße zu begrenzen, bei dem die nicht substituierbaren Nutzungen (Nahrungsmittelproduktion) weiterhin gesichert bleiben (vgl. WBGU 2009b, S. 27). Flächenkonkurrenz ist vor allem dann bedeutsam, wenn der Anbau von Energiepflanzen in Form von z.B. Mais, Raps, Miscanthus oder schnellwachsenden Hölzern auf Flächen mit vormalig anderer agrarischer Nutzungsform stattfindet. In der jüngsten Vergangenheit haben sich diesbezüglich erste Konflikte angedeutet. So klagen Landwirte in Regionen mit verstärktem Anbau von Energiepflanzen über steigende Pachtpreise.

Im Zusammenhang mit der Flächenknappheit kritisierten Umweltverbände auf regionaler Ebene die Wiederverwendung von Stilllegungsflächen, die für den Artenschutz wertvoll sind. Auf globaler Ebene ist die massive Ausdehnung von Agrarflächen auf bislang nicht kultivierte Flächen fragwürdig. Das Roden von Wäldern führt wie das Vordringen auf ungünstigere Standorte und einem starken Dünger- und Pestizideinsatz zu einem Verlust an Biodiversität, welcher durch großflächige Monokulturen von Energiepflanzen weiter verstärkt wird. Hierbei ergeben sich Konflikte zum Natur- und Artenschutz sowie dem Landschaftsbild, wobei abhängig von der Vornutzung neben den negativen Folgen durchaus auch positive Effekte zu verzeichnen sind (vgl. Wiehe & Rode 2007, S. 101ff.). Des Weiteren führt die Verknüpfung zwischen Energie, Nahrungsmittel und stofflichen Rohstoffen zu ökonomischen Wechselwirkungen. Energiepreisänderungen wirken sich damit auch auf die anderen Bereiche aus und beeinflussen in zunehmendem Maße Nahrungsmittel- oder Holzpreise mit einer verstärkten Substitution herkömmlicher Produkte durch Energiepflanzen als Folge steigender Energiepreise (vgl. Heißenhuber et al. 2007, S. 73ff.). Sinnvoll erscheinen Biomasseprodukte, die in Zusammenhang mit einer anderen Verwertung ohnehin anfallen und als Rest- oder Abfallstoffe wie Bioabfall, Klärschlamm, tierische Exkrememente oder Landschaftspflegeholz ergänzend energetisch in Wert gesetzt werden können.

Aus energie- wie umweltpolitischer Sicht ist es geboten, den Nutzungsprozess der Bioenergie so effizient und umweltschonend wie möglich zu gestalten. Für die Stromerzeugung bedeutet dies, auch eine möglichst weitgehende Ausschöpfung des anfallenden Wärmepotenzials anzustreben, was seitens des deutschen EEG gleichfalls zum Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen (z.B. Waldrestholz oder Landschaftspflegeholz) mit einem zusätzlichen Bonus gefördert wird. Bei der Energieproduktion mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist eine wärme- oder stromgeführte Steuerung abzuwägen, was häufig mit der Größe einer Anlage verknüpft ist, indem kleine dezentrale Anlagen wegen des geringeren Wärmepotenzials durchaus wärme gesteuert betrieben werden können und größere Anlagen eher an einer hohen Stromproduktion orientiert sind. Um den Gesamtwirkungsgrad zu steigern sind zukünftig sowohl technisch als auch räumlich intelligente und effiziente Konzepte zur Nutzung von Wärme und Strom erforderlich. Bei der Abwärmenutzung ergibt sich gerade bei Biogasanlagen jedoch ein soziales Konfliktpotenzial. Aus technischen und ökonomischen Gründen ist eine räumliche Nähe zwischen Biogasanlage und Wärmeabnehmer anzustreben, wogegen aus sozialer Sicht die Errichtung in unmittelbarer Nähe zu Wohnhäusern wegen Akzeptanzproblemen und der Befürchtung von Lärm- oder Geruchsbelästigungen meist abgelehnt wird (vgl. Quicker & Faulstich 2007, S. 41 und 55). In einer Standortmodellierung nachhaltiger Produktionsorte ist dies folglich zu berücksichtigen. Die konkurrierenden Interessen um Bioenergie müssen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung auf regionaler wie globaler Ebene ausbalanciert werden. Neben der Etablierung globaler Leitplanken zur Sicherung nachhaltiger Bioenergienutzung fordert der WBGU (2009b, S. 21) auch eine Abwägung von Chancen und Risiken vor Ort. Neben der erforderlichen technologischen Anstrengung Wirkungsgrade zu steigern sind künftig auch Konzepte zur Erschließung weiterer Biomassepotenziale (z.B. Abfälle) nötig.

Das Technologiespektrum ist bei keiner anderen Energieform derart umfangreich wie bei der Bioenergie, weshalb sich die Technologiebewertung wie auch die Potenzial- und Standortermittlung sehr komplex gestalten. Neben den unterschiedlichen Stoffen und Techniken ist das Bioenergiepotenzial ferner von naturräumlichen Einflussfaktoren und sozioökonomischen Faktoren wie Waldbewirtschaftung, Holzindustrie oder der landwirtschaftlichen Struktur abhängig. Dem Konzept doppelter Nachhaltigkeit entsprechend wird die technologiebezogene Modellierung beibehalten, d.h. es wird auf Referenzanlagen mit aktuellen Kennzahlen zur Durchführung der Technologiebewertung und der Standortsuche zurückgegriffen. Im Rahmen dieser Arbeit ist es nicht möglich, die gesamte Bereitstellungskette mit unterschiedlichen Technologievarianten der Bioenergie abzudecken. Eingang in die Modellierung finden die energetische Nutzung von Biogas, gewonnen aus der anaeroben Vergärung von überwiegend Maissilage sowie die Energiegewinnung mittels eines Biomasseheizkraftwerks (BHKW) basierend auf dem ORC-Verfahren (Organic Rankine Cycle) mit Waldrestholz und Landschaftspflegeholz als Substrate.

Biogasanlage

Biogasanlagen⁶⁰ sind in der Regel kleine dezentrale Anlagen mit einer Leistung bis zu 500 kW_{el}, die neben der Erzeugung von elektrischer Energie durch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) auch einen Teil zur Nahwärmeversorgung beitragen können. Das erzeugte Biogas kann entweder vor Ort in entsprechenden Motoren verbrannt und damit zur Stromerzeugung genutzt oder in ein vorhandenes Erdgasnetz eingespeist werden, was vornehmlich für große Anlagenkapazitäten eine Alternative darstellt. Zur Erzeugung des Biogases wird hauptsächlich die Technologie der Nassfermentation angewendet, bei der Verstromung des Biogases kommen zumeist technisch ausgereifte Verbrennungsmotoren mit Wirkungsgraden von 35 bis 40% zum Einsatz. Hohe Betriebs- und Volllaststunden verdeutlichen die Zuverlässigkeit sowie die konstante Stromproduktion, was die Biogastechnologie im Vergleich zu Wind- oder Sonnenenergie auszeichnet. Der Substrateinsatz ist sehr vielfältig und umfasst sowohl tierische Exkreme, nachwachsende Rohstoffe und biologische Reststoffe bzw. Bioabfall, wobei die erstgenannten in ihrem Einsatz dominieren. Bei den nachwachsenden Rohstoffen besitzt Maissilage die größte Bedeutung.



Abb. 14: Biogasanlage Stephansposching

In der Modellierung wird von einem fast vollständigen Betrieb mit nachwachsenden Rohstoffen (94% Mais) ausgegangen. Der Maisanbau findet im Eigenanbau statt, so dass keine externen Zukäufe nötig sind. Die elektrische Nennleistung der Anlage beträgt 500 kW_{el}, die jährlichen Volllaststunden sind mit 7.800 Stunden angesetzt (vgl. Tabelle 7).

⁶⁰ Für eine übersichtliche Darstellung verschiedener Technikvarianten zur Erzeugung von Biogas ist auf FNR (2006) sowie auf Kaltschmitt et al. (2009) verwiesen.

Tabelle 7⁶¹: Steckbrief Biogasanlage

| Biogas aus NaWaRo | | |
|---|---------------------|------------------|
| | Referenzanlage | Einheit |
| Technische Daten | | |
| Nennleistung | 0,500 | MW _{el} |
| Kalkulierte Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer | 25 | a |
| Jährliche Volllaststunden (Auslastung) | 7800 | h |
| Biomasse | Mais (ca. 94%) | |
| Biomassebedarf | ca. 12.000 | t/a |
| Kosten | | |
| Investitionskosten | 4.200.000 | €/MW |
| Personalkosten | 36.000 | €/a |
| Betriebskosten (Reparaturen, Miete, Pacht, Unterhalt Maschinen, Eigenstromverbrauch, ...) | 100.000 | €/a |
| Versicherungskosten | 23.000 | €/a |
| Kosten für Substrat | 27,10 ⁶² | €/t |
| Jährliche Kostensteigerung für Substrat | 2 | % |
| Sonstige Daten | | |
| Direkt Beschäftigte (Vollzeitarbeitskräfte) | 0,5 | Personen |

Biomasseblockheizkraftwerk

Als Referenzanlage dient das im Jahr 2004 errichtete Biomasseheizkraftwerk in Mainkofen (Landkreis Deggendorf), welches in unmittelbarer Nähe zum Bezirksklinikum Mainkofen steht und dessen Wärmeenergiebedarf deckt. Der verwendete Brennstoff umfasst Holzhackschnitzel aus der Waldpflege, Rinde, Säge- sowie Hobelspäne und Landschaftspflegematerial, eine holzartige Biomasseform, die bei landschaftspflegerischen Maßnahmen anfällt, mit 40 bis 50% Wassergehalt. Die Stromerzeugung erfolgt nach dem so genannten ORC-Prozess, welcher auf dem Grundprinzip einer Wasserdampfturbine basiert, anstelle von Wasser allerdings ein organisches Medium mit einer geringeren Siedetemperatur, wie beispielsweise Silikonöl verwendet. Dieses Verfahren eignet sich zur Versorgung von großen Wärmeabnehmern wie Krankenhäusern und Schwimmbädern und regelt den Betrieb daher nach dem jeweiligen Wärmebedarf, weist aber einen geringen elektrischen Wirkungsgrad auf (vgl. Thrän et al. 2010, S. 10ff.).

⁶¹ Quellen: GEMIS-Datenbank (Holz-HS-Waldholz-HKW-ORC-2010/brutto) / C.A.R.M.E.N e.V. (2010) / Thrän et al. (2010, S. 10ff.)

⁶² Die Substratkosten der Maissilage sind hinsichtlich des eigenen Anbaus (27,10 €/t) und des externen Zukaufs (27,30 €/t) zu differenzieren, wobei die Abweichung sehr gering ist (vgl. Witt et al. 2009, S. 72f.).

Tabelle 8⁶³: Steckbrief Biomasseblockheizkraftwerk

| Biomasseblockheizkraftwerk mit Holzbefuerung | | |
|---|--------------------|--------------------|
| | Referenzanlage | Einheit |
| Technische Daten | | |
| Nennleistung | 0,54 | MW _{el} |
| Kalkulierte Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer | 20 | a |
| Jährliche Volllaststunden (Auslastung) | 6.000 | h |
| Brennstoff | Holz hackschnitzel | |
| Brennstoffbedarf (lufttrocken) | ca. 5.800 | t/a |
| Kosten | | |
| Investitionskosten | 5.274.000 | €/MW _{el} |
| Fixe und variable Betriebskosten | 278.000 | €/a |
| Brennstoff- und Inputkosten | 86 | €/t |
| Sonstige Daten | | |
| Direkt Beschäftigte (Vollzeitarbeitskräfte) | 1,5 | Personen |



Abb. 15: Biomasseblockheizkraftwerk Mainkofen

2.3 Erdgas

Erdgas ist der Hoffnungsträger unter den fossilen Energien, gilt es doch im Gegensatz zur Nutzung von Kohle als umweltfreundliche, weil CO₂-ärmer, und im Vergleich zur Atomkraft als risikoarme Energieform. Dabei war dies nicht immer so. Lange Zeit stand Erdgas im Schatten von Erdöl und konnte sich erst spät im 20. Jahrhundert etablieren. Grund hierfür waren der gasförmige Aggregatzustand und der große Volumenbedarf des Rohstoffes, was sowohl den Transport, die Speicherung als auch die energetische Nutzung erschwerte. Oft galt Erdgas deshalb nur als

⁶³ Quellen: GEMIS-Datenbank (Biogas-Mais-BHKW-GM 500-OxKat-2010/brutto) / Witt et al. (2009, S. 72f.) / Thrän et al. (2010, S. 14ff.)

Nebenprodukt bei der Suche nach Erdöl (assoziiertes Erdgas) und wurde teils einfach abgefackelt (vgl. Brücher 2009, S.94ff.).

Heute ist der Energieträger Erdgas technisch beherrschbar und zu einem wichtigen Energieträger geworden. Er kann über weite Strecken transportiert (in Pipelines oder in flüssigem Zustand per Schiff) und in natürlichen Gasspeichern, meist ehemalige Lagerstätten, in großem Umfang eingelagert werden. Mit dem Aufbau der Infrastruktur stieg in Deutschland auch der Anteil an der Bruttostromerzeugung von 6,5% im Jahr 1990 auf 13,6% im Jahr 2010 (vgl. AGE B 2011), in Bayern liegt der Anteil leicht unter dem Bundesschnitt bei 10,3% (Stand 2009) (vgl. StMWIVT 2011, S.83). Neben der Stromerzeugung kommt Erdgas vornehmlich für Heizzwecke im privaten Bereich zum Einsatz. Da die westeuropäischen und heimischen Erdgasvorkommen – in Bayern befinden sich Lagerstätten vorzugsweise in den Schichten der ungefalteten tertiären Vorlandmolasse nördlich der Alpen – weitgehend aufgebraucht sind (vgl. StMWVT 2002, S. 71ff.), ist über ganz Europa ein weit verzweigtes Gasnetz entstanden, welches die großen Fördergebiete in der Nordsee, in Sibirien und am Kaspischen Meer mit den Verbrauchern Westeuropas verbindet (vgl. Götz 2011, S. 22ff.). Damit sind zwei zentrale Nachteile der Energieversorgung mit Erdgas angesprochen, die begrenzte Verfügbarkeit und die Energieabhängigkeit von externen Regionen, Staaten und Unternehmen. Des Weiteren sind ökologische Eingriffe in der gesamten Produktionskette (Förderung, Verarbeitung, Transport, Verbrennung) nicht zu vermeiden.

Die wesentlichen Vorteile von Erdgas zur Energiegewinnung ergeben sich aus den modernen Kraftwerkstechnologien. Erdgaskraftwerke sind sehr flexibel steuerbare Anlagen und können sowohl zur Grundlastversorgung als auch im Bereich der Spitzenlast eingesetzt werden. Aufgrund des vermehrten Einsatzes im Mittel- und Spitzenlastbereich erzielt ein Erdgaskraftwerk meist jedoch eine geringere jährliche Auslastung. Die Kraftwerke zeichnen sich des Weiteren durch hohe Wirkungsgrade aus und gehören zu den effizientesten konventionellen Technologievarianten. Dies trifft vor allem bei der Kombination von Gas- und Dampfturbinen in so genannten Gas- und Dampfkraftwerken (GuD) zu. Hierbei wird eine Gasturbine befeuert, um einen Generator zur Stromerzeugung anzutreiben. Die dabei entstehende Abwärme erhitzt ihrerseits den Wasserkreislauf einer Dampfturbine, die wiederum einen Generator antreibt. Die restliche Abwärme kann zusätzlich für Nah- und Fernwärmeversorgung (Kraft-Wärme-Kopplung) eingesetzt werden.

Tabelle 9⁶⁴: Steckbrief Erdgaskraftwerk

| Erdgaskraftwerk (Gas- und Dampfkraftwerk) | | |
|--|----------------|------------------|
| | Referenzanlage | Einheit |
| Technische Daten | | |
| Nennleistung | 450 | MW _{el} |
| Kalkulierte Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer | 25 | a |
| Jährliche Volllaststunden (Auslastung) | 6.000 | h |
| Brennstoff | Erdgas | -- |
| Kosten | | |
| Investitionskosten | 489.000 | €/MW |
| Kapitalkosten | 18.872.000 | €/a |
| Fixe Kosten | 5.056.000 | €/a |
| Variable Kosten | 30.335.000 | €/a |
| Brennstoff- und Inputkosten | 158.933.000 | €/a |
| Durchschnittliche Steigerung der jährlichen Rohstoffpreise | 3 | % |
| Sonstige Daten | | |
| Direkt Beschäftigte | 27 | Personen |

Im Regierungsbezirk Niederbayern sind mehrere große Gaskraftwerke in Betrieb. Auffällig ist hierbei die räumliche Nähe zu den Industrieansiedlungen mit großem Strom- und Wärmebedarf. Mittels einer bedarfsgerechten Steuerung der Anlagen kann neben der Stromproduktion zudem ein wesentlicher Beitrag zur Nah- und Fernwärmeversorgung ihrer Standortumgebung geleistet werden. Ein modernes Gas- und Dampfkraftwerk, welches sich ebenfalls in unmittelbarer Nähe zu einem Industriegebiet befindet, wurde im Jahr 2010 in Plattling errichtet. Es besitzt eine elektrische Leistung von ca. 125 MW und versorgt die benachbarte Papierindustrie mit Strom- und Wärmeenergie. Die gute Regelbarkeit des Kraftwerkes soll dabei helfen, den Energieverbrauch bei der Papierherstellung zu optimieren.


| Erdgaskraftwerk Plattling | |
|--|--|
| <p>Das moderne Erdgaskraftwerk nahm im Jahr 2010 den Betrieb auf und versorgt das Industriegebiet Plattling, vornehmlich das neu errichtete zweite Papierwerk, mit Elektrizität und Wärme. Der Standort befindet sich in unmittelbarer Nähe zu den Verbrauchern und zur Autobahn A92. Aufnahmezeit: März 2011, eigene Aufnahme</p> |  |

Abb. 16: Erdgaskraftwerk Plattling

⁶⁴ Quelle: GEMIS-Datenbank (Gas-KW-GuD-DE-2010)

2.4 Kohlekraft

Vergleicht man fossile Energieformen untereinander, stellt die Nutzung von Kohlekraft in vielerlei Hinsicht oft das Gegenteil zum Erdgas dar. Während dem Erdgas durchaus eine bedeutende Rolle im zukünftigen Energiemix zugewiesen wird, gilt die Kohle häufig als Auslaufmodell. Im Unterschied zum Erdgas trägt Kohle bereits seit langem zur Energieversorgung bei und war die erste fossile Technologie, die in großem Maßstab zur Energiegewinnung eingesetzt wurde. Der Rohstoff (Braun- und Steinkohle) ist im Vergleich zu Erdöl oder Erdgas reichlich vorhanden, wobei Deutschland nur von geringen Importen (Steinkohle) abhängig ist und auch für die nächsten Jahre auf eigene umfangreiche Vorkommen zurückgreifen kann (vgl. BGR 2010, S. 11, 23ff. und 67). Der Transport von Kohle ist aufwendig und kostenintensiv, die Lagerung dafür allerdings leicht möglich.

Die Argumente gegen Kohle resultieren vornehmlich aus negativen ökologischen Aspekten, die sowohl bei der Gewinnung des Rohstoffes als auch bei der Verbrennung auftreten. So ist der Kohleabbau, im Besonderen beim Kohletagebau, mit immensen ökologischen sowie landschaftlichen Eingriffen und langfristigen Folgen für Natur und Umwelt verbunden (vgl. hierzu Haas & Scharrer 2005c, S. 409ff.). Bei der Verbrennung der Kohle in thermischen Kraftwerken entsteht neben den hohen Schadstoffemissionen zudem so viel klimawirksames CO₂ wie bei keiner anderen Technologie, weshalb Kohlekraft auch als äußerst klimaschädlich gilt und diesbezüglich im Vergleich zu Erdgas ein schlechteres Image besitzt (Klimakiller). Technologische Bestrebungen, das emittierte CO₂ abzuscheiden und zu speichern (CCS), stehen erst am Beginn der Erprobung und sind mit einem höheren Energieaufwand und zusätzlichen Kosten verbunden. Moderne thermische Kraftwerke nutzen Dampfturbinen, weshalb sie sowohl für die Wärme- als auch Stromerzeugung (KWK) einsetzbar sind und elektrische Wirkungsgrade von teils über 40% aufweisen.

Trotz dieser Nachteile ist Kohlekraft heute neben der Atomenergie die tragende Säule der Stromerzeugung in Deutschland. Im Jahr 2010 entfielen 23,7% der Bruttostromerzeugung auf Braunkohle und 18,7% auf Steinkohle. Braunkohle liegt damit knapp vor der Atomenergie (22,6%) und ist der wichtigste Energieträger im Stromsektor (vgl. AGE 2011). Bundesweit befinden sich weitere Kohlekraftwerke in Bau oder sind in Planung. Die fehlenden Kohlevorkommen in Bayern führen jedoch dazu, dass der Anteil der Kohlekraft an der Bruttostromerzeugung im Vergleich zur Bundesrepublik mit ca. 5% wesentlich geringer ist (vgl. Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung 2011c). Aufgrund des geringen Energiegehalts von Braunkohle ist ein Transport des Rohstoffes nur über kurze Distanzen rentabel (Förderbänder), so dass sich die Kohlekraftwerke dort befinden, wo große Lagerstätten vorhanden sind (Ruhrgebiet und Lausitz) oder bei der energiereicheren Steinkohle eine gute Anbindung an den Schwertransport (Bahn oder Schiff)

gegeben ist (vgl. Brücher & Helfer 2004, S. 130f.). In Niederbayern sind mit Ausnahme einer kleinen Anlage keine Kohlekraftwerke in Betrieb.

Tabelle 10⁶⁵: Steckbrief Kohlekraftwerk

| Kohlekraftwerk | | |
|--|--------------------------|------------------|
| | Referenzanlage | Einheit |
| Technische Daten | | |
| Nennleistung | 700 | MW _{el} |
| Kalkulierte Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer | 30 | a |
| Jährliche Volllaststunden (Auslastung) | 6.000 | h |
| Brennstoff | Vollwert Steinkohle (DE) | |
| Kosten | | |
| Investitionskosten | 1.235.000 | €/MW |
| Kapitalkosten | 69.715.000 | €/a |
| Fixe Kosten | 23.594.000 | €/a |
| Variable Kosten | 47.187.000 | €/a |
| Brennstoff- und Inputkosten | 52.386.000 | €/a |
| Durchschnittliche Steigerung der jährlichen Rohstoffpreise | 3 | % |
| Sonstige Daten | | |
| Direkt Beschäftigte | 140 | Personen |

2.5 Photovoltaik

Die direkte Umwandlung von (Sonnen-)Licht in Elektrizität, beruhend auf dem photovoltaischen Effekt, hat in den vergangenen Jahren eine enorme technologische Weiterentwicklung vollzogen. Die Technologie bietet einen vielseitigen Einsatz und ein umfassendes Leistungsspektrum von autarken Systemen in Solarlampen bis hin zu mehrere Megawatt großen netzgekoppelten Kraftwerken, weshalb die Photovoltaik neben anderen erneuerbaren Energien als eine der Säulen für die zukünftige Energieversorgung gilt. Heute tragen dezentrale Photovoltaikanlagen auf Hausdächern (Dachanlagen) oder auf großen Freiflächen (Freiflächenanlagen) bereits zur regionalen Energieversorgung bei. In beiden Segmenten verzeichnete der Zubau von Anlagenkapazität in Deutschland vorwiegend in den Jahren 2008 bis 2010 trotz zwischenzeitlicher Wirtschaftskrise eine sehr dynamische Entwicklung (vgl. BMU 2011b, Tabelle 4). Grund hierfür ist die seit Einführung des EEG gesetzlich garantierte Mindestvergütung für Strom aus erneuerbaren Energien, welche den Photovoltaikstrom besonders stark subventioniert. Dieser massive Zubau an Photovoltaikkapazität ist bisher beispiellos und nur in Ansätzen in anderen Ländern (z.B. Spanien) zu beobachten, welche ebenfalls die Technologie ökonomisch fördern. Die rasante Reduktion von Modulpreisen durch stark verbesserte Produktionsprozesse und die prognostizierte Steigerung der Wirkungsgrade (vgl. EPIA 2009, S. 12 und 44ff. / Brendel et al. 2010, S. 54-55 und 59) lassen vermuten, dass sich der begonnene Ausbautrend in den nächsten Jahren fortsetzt.

⁶⁵ Quelle: GEMIS-Datenbank (Kohle-KW-DT-DE-2010)

Obwohl das EEG für ganz Deutschland gilt, sind sowohl bei der Anzahl an Photovoltaikanlagen als auch bei der installierten Leistung erhebliche regionale Unterschiede erkennbar (vgl. Dewald 2010, S. 85f. und 100). Während in vielen Regionen die Photovoltaik bisher kaum vertreten ist, weisen andere Gebiete bereits eine hohe installierte Photovoltaikleistung auf. Vordergründig besteht ein Zusammenhang zwischen Gegenden mit hoher Sonneneinstrahlung und installierter Photovoltaikkapazität. Der im Bereich der Photovoltaik prosperierende Regierungsbezirk Niederbayern weist eine jährliche Globalstrahlung von ca. 1.000 bis 1.150 kWh – in Gunstlagen des Bayerischen Waldes zum Teil noch mehr – auf (vgl. StMWVT 2001a / StMUG 2011) und zählt damit zu den sonnenreichsten Gebieten in Deutschland. Eine derart hohe Konzentration an Photovoltaikanlagen, wie sie heute bereits in Niederbayern, aber auch in Bayern allgemein vorherrscht, ist jedoch nicht mehr nur alleine auf klimatische Gegebenheiten zurückzuführen (vgl. Mußler 2008, S. 21ff.). Weitere strukturelle Eigenschaften der Region, die im Folgenden für Dach- und Freiflächenanlagen getrennt beschrieben werden, haben die Entwicklung gefördert und bedingen sie auch weiterhin.

Dachanlagen

Mit Beginn der Photovoltaikförderung entstanden im Regierungsbezirk Niederbayern zahlreiche Dachflächenanlagen, deren Entwicklung hinsichtlich Größe und Bauart in drei Phasen zu unterteilen ist (vgl. Abb. 17). So wurden zu Beginn der staatlichen Förderung noch kleine Haus-Dachanlagen (meist unter 15 kWp installierter Leistung) errichtet. Erst mit zunehmender Ausbreitung der Technologie folgte in einer nächsten Phase die Errichtung von Anlagen auf großen Gebäuden, wie z.B. Ställen oder gewerblich bzw. industriell genutzten Hallen. Anlagengrößen von über 100 kWp waren dabei nicht außergewöhnlich. Die erhöhte Förderung von Dachanlagen im Vergleich zu Photovoltaikanlagen am Boden (vgl. EEG § 33) führte in einer dritten Phase dazu, dass Gebäude für die Nutzung von Photovoltaik errichtet wurden. Die Architektur und die Grund- sowie Aufrissgestaltung dieser Gebäude richtet sich nach den speziellen Anforderungen der Photovoltaik, also einer optimalen Ausrichtung zur Sonne ohne Schatteneinwurf, einer optimalen Dachneigung und einer möglichst großen Dachfläche (Pulldächer). Die drei Phasen spiegeln zwar in chronologischer Reihenfolge die Entwicklung von Photovoltaik-Dachanlagen wider, jedoch ist bisher keine dieser Phasen beendet, weshalb der Ausbau auf den genannten Gebäudetypen anhält. Über diese Anwendungsformen hinaus bietet die Photovoltaik ein großes Potenzial, direkt in die Gebäudestruktur integriert zu werden, um dort funktionale oder ästhetische Komponenten zu erfüllen (vgl. Gabler et al. 2002, S. 29ff.).

Photovoltaikanlage auf Hausdächern

Die Nutzung von Photovoltaik auf Hausdächern ist bereits weit verbreitet und heute im Raum Niederbayern keine Besonderheit mehr. Die Stromerzeugung wird aufgrund der staatlichen Förderung fast ausschließlich zur Einspeisung in das öffentliche Netz verwendet. Durch Innovationen im Bereich kleiner dezentraler Energiespeicher sind künftig Insellösungen mit einer autarken Elektrizitätsversorgung durch Photovoltaik im Wohnhausbereich denkbar.

Stadt Deggendorf, Ortsteil Rettenbach, Landkreis Deggendorf

Aufnahmezeit: März 2011, eigene Aufnahme

Photovoltaikanlage auf gewerblichen Gebäuden

Gewerbliche Dachflächen, im Besonderen von landwirtschaftlichen Betrieben, bieten großes Potenzial für die Photovoltaiknutzung. Hier bestehen geringe Nutzungskonflikte und dank des EEG sind diese Anlagen ökonomisch äußerst rentabel, weshalb bereits viele Dächer genutzt werden.

Gemeinde Stephansposching, Landkreis Deggendorf

Aufnahmezeit: März 2011, eigene Aufnahme

Photovoltaikanlage auf zur Nutzung von Sonnenenergie errichteten Gebäuden

Die Architektur von neuen gewerblichen Gebäuden orientiert sich an den Kriterien der Photovoltaiknutzung, um möglichst große Energieanlagen errichten zu können. Charakteristisch hierfür sind in Exposition und Neigung perfekt ausgerichtete Dachflächen sowie stufenförmige Anordnung von Pultdächern. Ökonomisch wiederum begünstigt durch das EEG, ergeben sich wegen der beachtlichen Größe der Gebäude jedoch vermehrt Konflikte zum Landschaftsbild.

Stadt Deggendorf, Ortsteil Natternberg, Landkreis Deggendorf

Aufnahmezeit: März 2011, eigene Aufnahme

Abb. 17: Formen von Photovoltaik-Dachanlagen

Beim Ausbau und der räumlichen Ausbreitung von Photovoltaik-Dachanlagen in Niederbayern konnte anfangs eine skeptische Haltung vieler Menschen gegenüber der Technologie beobachtet werden. Mit der Errichtung erster Anlagen z.B. in einem Dorf und der Kommunikation positiver Erfahrungen durch die Anlagenbetreiber, meist Dorfbewohner, schlägt diese Skepsis häufig in Euphorie um und es entstehen sukzessive zahlreiche Photovoltaikanlagen in der Nachbarschaft. Dieser persönliche Austausch hat dazu geführt, dass in einigen Siedlungen im Regierungsbezirk Niederbayern nahezu alle geeigneten Dachflächen bereits mit Photovoltaikmodulen belegt sind, wogegen in anderen Dörfern Photovoltaik bisher noch nicht oder nur wenig genutzt wird.

Als Referenzanlage dient eine 15 kWp große Dachflächenanlage bestehend aus 67 polykristallinen Modulen mit je 225 Wp Leistung, einer Modulfläche von 1,667 qm und einem Gewicht von 21 kg. Der Modulwirkungsgrad beträgt 13,5%. Die Materialien Glas (74% vom Gewicht), Aluminium (10%) und Silizium (3%) werden bei der Indikatorenberechnung berücksichtigt (vgl. Sander et al. 2007, S. 34; BINE 2010, S. 2). Die Aufständering erfolgt auf einem Dach mit angenommener optimaler Ausrichtung nach Süden und 30° Dachneigung. Der Energieertrag beträgt 1.020 kWh pro kWp, was einem Mittelwert dieser Ausrichtung im Raum Niederbayern entspricht. Die Unterkonstruktion besteht aus Aluminium und Stahl. Deren Materialaufwand bezieht sich auf Monteurangaben.

Tabelle 11⁶⁶: Steckbrief Photovoltaik-Dachanlage

| Photovoltaik-Dachanlage | | |
|--|----------------|----------|
| | Referenzanlage | Einheit |
| Technische Daten | | |
| Nennleistung | 15 | kWp |
| Kalkulierte Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer | 25 | A |
| Jährliche Volllaststunden (Auslastung) | 1020 | H |
| Ausrichtung (Himmelsrichtung, Neigung) | Süd, 30° | -- |
| Kosten | | |
| Investitionskosten (inkl. Module, Wechselrichter, Stromanschluss, Aufständering und Montage) | 2.715 | €/kWp |
| Jährliche Kosten (Wartung, Versicherung, Abgabe für Zähler bzw. Zählermiete) | 230 | €/a |
| Brennstoff- und Inputkosten | 0 | €/a |
| Sonstige Daten | | |
| Direkt Beschäftigte | 0 | Personen |

Freiflächenanlagen

Als Photovoltaik-Freiflächenanlage⁶⁷ bezeichnet man eine Energieform, bei der die Technologie auf großen bisher nicht bebauten Flächen eingesetzt wird. Strebte man in der Grundfassung des EEG noch eine maßvolle Versiegelung von Freiflächen an, indem Photovoltaikanlagen nur bis zu einer Größe von 100 kWp gefördert wurden, werden seit der EEG Novelle aus dem Jahr 2004 (PV-

⁶⁶ Quellen: GEMIS-Datenbank (Solar-PV-multi-Rahmen-mit-Rack-DE-2010) und Mitteilung der Firma Schachtner (Eichendorf)

⁶⁷ Wegen der großen Auswirkungen der Subventionierungspolitik dieser Technologieform ist hier der Auszug aus dem alten EEG wiedergegeben (vgl. EEG 2008 § 32, Hervorhebungen durch den Autor). Diese Form ist heute nicht mehr gültig!

„(2) Sofern die Anlage nicht an oder auf einer baulichen Anlage angebracht ist, die vorrangig anderen Zwecken als der Erzeugung von Strom aus solarer Strahlungsenergie errichtet worden ist, besteht die Vergütungspflicht des Netzbetreibers nur, wenn die Anlage vor dem 1. Januar 2015

1. im **Geltungsbereich eines Bebauungsplans** im Sinne des § 30 des Baugesetzbuches oder

2. auf einer Fläche, für die ein **Verfahren nach § 38 Satz 1 des Baugesetzbuches** durchgeführt worden ist, errichtet worden ist.

(3) Für Strom aus einer Anlage nach Absatz 2, die im Geltungsbereich eines Bebauungsplans errichtet wurde, der zumindest auch zu diesem Zweck nach dem 1. September 2003 aufgestellt oder geändert worden ist, besteht die Vergütungspflicht des Netzbetreibers nur, wenn sie sich

1. auf Flächen befindet, die zum Zeitpunkt des Beschlusses über die Aufstellung oder Änderung des Bebauungsplans **bereits versiegelt** waren,

2. auf **Konversionsflächen aus wirtschaftlicher oder militärischer Nutzung** befindet oder

3. auf **Grünflächen** befindet, die zur Errichtung dieser Anlage im Bebauungsplan ausgewiesen sind und zum Zeitpunkt des Beschlusses über die Aufstellung oder Änderung des Bebauungsplans in den **drei vorangegangenen Jahren als Ackerland genutzt** wurden.“

Vorschaltgesetz Dezember 2003) durch die Aufhebung dieser Förderschranke auch größere Solarparks⁶⁸ subventioniert (vgl. Staiß 2007, S. 131). Mit der Subventionierung begannen die rasante Erschließung des neuen Marktsegmentes und der Trend zu immer größeren Anlagen mit bis zu 150 ha Flächenbedarf. Obwohl die Photovoltaik als innovativer Technologieträger über hohe gesellschaftliche Wertschätzung und Akzeptanz verfügt, sind die mehrere Hektar großen Freiflächenanlagen häufig jedoch umstritten. Bei Photovoltaik-Freiflächenanlagen zeigt sich wie bei der Windenergie im besonderen Maße, dass die (globalen) Vorteile erneuerbarer Energien zunehmend mit den lokalen Interessen der Bevölkerung kollidieren. Einhergehend mit dem stetigen Zubau großer Solarparks treten daher neue Konfliktfelder verstärkt in den Vordergrund. Zu nennen sind exemplarisch die Versiegelung wertvollen Ackerbodens oder visuelle Beeinträchtigungen.

Konkrete Richtlinien zur Ausweisung geeigneter Flächen sollen künftig die Planungs- und Bauvorhaben objektivieren und Konflikte vermeiden. Die Richtlinien umfassen einerseits Vorgaben hinsichtlich des Flächenverbrauchs bzw. der Flächenversiegelung, einer wirksamen Umweltprüfung und der Schaffung von Ausgleichsmaßnahmen, der Bauart (Aufständigung) und Objekthöhe, sowie einer Bewertung der landschaftlichen und kulturlandschaftlichen Situation mit der Vermeidung von Landschaftszersiedelung und einer adäquaten Einbindung in den Landschaftshaushalt, fordern andererseits aber auch z.B. ein Verbot von Chemikalien zur Reinigung der Module (vgl. hierzu NABU & UVS 2005 / Leicht 2006, S. 119ff. / Musiol 2006, S. 116f. / ARGE Monitoring PV-Anlagen 2007 / Fassl 2009, S. 232). Obwohl diese Richtlinien wichtige Empfehlungen vorgeben, gilt es bei Genehmigungsverfahren immer auch spezifische Merkmale der jeweiligen Region zu berücksichtigen. Dieser räumliche Kontext drückt sich in den gesellschaftlichen und politischen Diskussionen rund um Genehmigungs- und Planfeststellungsverfahren aus. So werden regionsspezifische Merkmale sowohl für, als auch gegen Freiflächenanlagen argumentativ gebraucht und zum Teil sogar instrumentalisiert.

In der Untersuchungsregion Niederbayern zeigen sich die gesellschaftlichen Friktionen insbesondere anhand der beiden regionalen Merkmale des ackerbaulich wertvollen Bodens im Dugau sowie dem reizvollen und touristisch attraktiven Landschaftsbild der Bayerwaldregion. Während im Bayerischen Wald vornehmlich naturschutzrechtliche und touristische Aspekte die öffentliche Diskussion zum weiteren Ausbau von Freiflächenanlagen prägen, wird im Dugaugebiet vermehrt der Konflikt zur klassischen Landwirtschaft thematisiert. Landwirte bemängeln die vorübergehende Versiegelung von Ackerböden und steigende Pachtpreise, Tourismusverbände hingegen befürchten eine Beeinträchtigung des Landschaftsbildes und folglich einen Attraktivitätsverlust der Region.

Die skizzierten Konflikte waren speziell im Herbst 2009 und im Frühjahr 2010 Thema, als eine Flut an Neuansuchen zur Errichtung von Solarparks die Kommunen überraschte. Deshalb kam auch aus

⁶⁸ Die Begriffe Solarpark und Photovoltaikpark werden synonym verwendet.

politischen Kreisen die Forderung, klare und strenge Kriterien bei den Genehmigungsverfahren vorzugeben, um den „Solarpark-Wildwuchs“ (PNP 11.12.2009) in der Region eindämmen zu können. Innerhalb der Kommunen wurden verschiedene Konzepte diskutiert, wie der Zubau an Photovoltaik zu begrenzen ist. Hierzu zählten eine flächenbezogene Deckelung (z.B. 2% der Gemeindefläche) oder die Orientierung am Eigenenergie- bzw. Eigenstromverbrauch (z.B. Genehmigung bis zu 120% des Eigenbedarfes). Die Brisanz der dargelegten kontroversen Debatte resultierte zusätzlich aus der Tatsache, dass im Regierungsbezirk Niederbayern sehr große Anlagen realisiert und sogar noch größere Anlagen geplant wurden. So ist unter anderem der, zum Errichtungszeitpunkt 2009 weltweit zweitgrößte Solarpark mit einer Leistung über 53 MWp (ca. 135 ha Fläche) nahe der Ortschaft Straßkirchen (Gemeinde Straßkirchen, Landkreis Straubing-Bogen und Gemeinde Stephansposching, Landkreis Deggendorf) entstanden. Die mediale Berichterstattung über diese und ähnliche Anlagen hat in der Bevölkerung eine hohe Sensibilität für dieses Thema erzeugt.

Das Bayerische Staatsministerium des Inneren hat Ende 2009 weitergehende Anforderungen an die Bauleitplanung aufgestellt (vgl. Bayerisches Staatsministerium des Inneren 2009), konnte damit die Situation allerdings nicht entschärfen. Erst durch die Änderung der Förderrichtlinie im EEG (Jahr 2010) verbunden mit der Streichung der Einspeisevergütung für Photovoltaik auf Ackerflächen hat sich der Streit gelegt. Soll in Zukunft auf diese Technologieform wieder zurückgegriffen werden ist es dringend geboten, eine strategisch sinnvolle Vorgehensweise zu wählen, um derartige Auswüchse zu vermeiden (vgl. hierzu Braun & Lederer 2010 / Zink 2010). An dieser Stelle zeigt sich im Besonderen das Anliegen der doppelten Nachhaltigkeit, dass nicht nur die Technologie selbst sondern auch der jeweilige Standort die Ansprüche der Nachhaltigkeit erfüllen muss. Die nunmehr ausschließliche Förderung von Anlagen entlang von Autobahnen oder Gleisanlagen sowie auf Konversionsflächen ist ein Ansatz, die Standortsuche stärker zu gewichten.



Abb. 18: Photovoltaik-Freiflächenanlage Hettenkofen

Referenztechnologie für die anschließende Modellierung ist ein 3 MWp großer Solarpark. Es werden die gleichen polykristallinen Module wie bei der Photovoltaikdachanlage eingesetzt. Die Modulanbringung erfolgt auf einer ebenen Freifläche mit starrer Aufständerung und optimaler Ausrichtung der Module nach Süden mit 35° Neigung. Der Energieertrag beträgt 1.020 kWh pro kWp. Die Unterkonstruktion besteht aus Erddübeln mit Aluminium- und Stahlmontagegestell. Die verwendeten Angaben bezüglich des Materialverbrauchs beruhen auf Daten von Anlagenprojektieren und werden in der Modellierung berücksichtigt (vgl. Tab. 12).

Tabelle 12⁶⁹: Steckbrief Photovoltaik-Freiflächenanlage

| Photovoltaik-Freiflächenanlage | | |
|--|----------------|----------|
| | Referenzanlage | Einheit |
| Technische Daten | | |
| Nennleistung | 3.000 | kWp |
| Kalkulierte Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer | 25 | a |
| Jährliche Volllaststunden (Auslastung) | 1020 | h |
| Ausrichtung (Himmelsrichtung, Neigung) | Süden, 35° | -- |
| Kosten | | |
| Investitionskosten (inkl. Module, Wechselrichter, Projektierung, Bau; ohne Grundstückskauf) | 2.300 | €/kWp |
| Jährliche Kosten (Wartung und Reparatur (0,65% vom Kaufpreis), Versicherung (0,15%), Sonstiges (0,4%)) | 82.800 | €/a |
| Pacht (3% der Einspeisevergütung) ⁷⁰ | 22.840 | €/a |
| Brennstoff- und Inputkosten | 0 | €/a |
| Sonstige Daten | | |
| Direkt Beschäftigte | 0 | Personen |

2.6 Wasserkraft

Die Nutzung der Wasserkraft ist eine effektive und technologisch ausgereifte Form der Energiegewinnung und wird heute vornehmlich zur Erzeugung von Elektrizität eingesetzt. Vor dem EEG war die Wasserkraft die einzige erneuerbare Energie, die einen nennenswerten Beitrag zur Energieversorgung in Deutschland und verstärkt in Bayern geliefert hat. Sie besitzt mit ihrem emissionsfreien Betrieb und der Grundlastfähigkeit Eigenschaften, welche für die zukünftige Energieversorgung wichtig sind. Wesentliche Standortfaktoren der Wasserkraft sind ausreichend wasserführende Flüsse oder Bäche sowie ein geeignetes nutzbares Gefälle. Beide Faktoren beeinflussen in entscheidender Weise das physikalische Energiepotenzial der Wasserkraft. So gilt: je größer die Wassermenge (Wasserdurchfluss) und je höher das Gefälle (Fallhöhe), desto größer ist das Energiepotenzial (vgl. Giesecke & Mosonyi 2009, S. 27ff.).

⁶⁹ Quellen: GEMIS-Datenbank (Solar-PV-multi-Rahmen-mit-Rack-DE-2010) und Mitteilung der Firma SunPlan GmbH (Mühldorf am Inn)

⁷⁰ Berechnet für die Einspeisevergütung im zweiten Halbjahr 2010 (24,17 Cent).

Gründe, weshalb Wasserkraftwerke eingesetzt werden, sind ihre effektive und ökonomisch rentable Stromerzeugung sowie ihre abflussregulierende Wirkung, wodurch sie mit den Bedürfnissen des Hochwasserschutzes oder einer Verbesserung der Schifffahrt in Einklang stehen. Zugleich leisten die Kraftwerke durch ihre Flussbarriere einen Beitrag zur Säuberung der Flüsse von Treibgut und Müll. Hauptsächlicher Nachteil dieser Technologie ist der massive Eingriff in den regionalen Natur- bzw. Landschaftshaushalt sowie in das Flussökosystem. Bemängelt werden u.a. die Barrierewirkung für die Fischwanderung, Veränderungen der hydrologischen Abflussdynamik oder Schwankungen des pH-Wertes (vgl. exemplarisch Dumont 2006 / Diemel 2006). Allesamt Faktoren, die es seitens des Naturschutzes wirksam zu begrenzen gilt. Wegen der enormen landschaftlichen und gewässerökologischen Eingriffe sind bei der Planung und Genehmigung daher hohe Anforderungen zu stellen. Die Vor- und Nachteile verdeutlichen wiederum das Spannungsfeld der Nachhaltigkeitsdimensionen, welches in der mittlerweile jahrzehntelangen Diskussion zum Donauausbau zwischen Straubing und Vilshofen – im Untersuchungsgebiet gelegen – zum Ausdruck kommt (vgl. u.a. Kestel 2002, S. 63ff.).

Laufwasserkraftwerk

Der Süden Deutschlands bietet durch die wasserreichen Flüsse aus den Alpen und einer hohen Reliefenergie gute Voraussetzungen für die Wasserkraft, weshalb dort das Potenzial groß ist und bereits intensiv genutzt wird (vgl. Horlacher 2003, S. 10ff. / Klein 2004, S. 152f.). Der hohe Beitrag der Wasserkraft zur Energieversorgung in Bayern, nach der Atomenergie die wichtigste Energieform, resultiert überwiegend aus Großkraftwerken, meist Laufwasserkraftwerken. Dies trifft ebenso auf das Untersuchungsgebiet zu, wo zahlreiche Großkraftwerke entlang der Flüsse Donau, Inn, Isar, Regen und Vils stehen. Beispiele einiger Laufwasserkraftwerke in Niederbayern sind Kachlet und Jochenstein an der Donau, die Innkraftwerke Ingling und Töging sowie die Isarstaustufen in der Nähe von Plattling und Ettling. Sowohl der Inn als auch die Isar sind durch eine Vielzahl an Staustufen, die in regelmäßigem Abstand folgen (Staustufentreppe), in ihrem Abfluss nahezu vollständig reguliert, weshalb das Potenzial an geeigneten Standorten für Wasserkraft schon weitestgehend ausgeschöpft ist. Technische Optimierungen und Modernisierungen bieten allerdings noch Spielraum (vgl. Bunge et al. 2001, S. 32 und 69f.), die installierte Kapazität der Wasserkraft zu erhöhen. Als Referenzanlage dient das 1995 fertig gestellte Donaustaukraftwerk bei Straubing. Es ist mit einer installierten Leistung von 21,5 MW größer als die Isar-, Regen- oder Ilzkraftwerke und kleiner als die Kraftwerke am Inn und an der Donau nach dem Zusammenfluss mit der Isar. Der entstandene Stauraum ist ca. 25 km lang.

Tabelle 13⁷¹: Steckbrief Laufwasserkraftwerk

| Laufwasserkraftwerk | | |
|--|----------------|----------|
| | Referenzanlage | Einheit |
| Technische Daten | | |
| Nennleistung | 21,5 | MW |
| Kalkulierte Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer | 50 | a |
| Jährliche Volllaststunden (Auslastung) | 6750 | h |
| techn. Wirkungsgrad | >80 | % |
| Fallhöhe | 6,70 | m |
| Mittlerer Abfluss (MQ) bei Pfelling | 458 | qqm/s |
| Kosten | | |
| Investitionskosten | 3.370.000 | €/MW |
| Jährliche Kosten | 3.262.000 | €/a |
| Brennstoff- und Inputkosten | 0 | €/a |
| Sonstige Daten | | |
| Direkt Beschäftigte | 10 | Personen |



Abb. 19: Laufwasserkraftwerk Straubing

Kleinwasserkraftwerk

Während das vorhandene Wasserkraftpotenzial entlang der großen Flüsse bereits genutzt wird und verbleibende Standorte aufgrund der genannten ökologischen Eingriffe nur geringe Realisierungschancen für weitere Kraftwerke bieten (vgl. E.ON Wasserkraft & Bayerische Elektrizitätswerke 2009, S. 6ff. und 14), gibt es hingegen bei Kleinwasserkraftwerken noch ein Ausbaupotenzial im Bereich des Neubaus aber vor allem bei der Reaktivierung und Modernisierung alter Anlagen (vgl. Bunge et al. 2001, S. 2 / Hennicke & Fishedick 2007, S. 64). So hat sich in Bayern die Zahl an Wasserkraftwerken von 1926 (11.900 Anlagen) bis zum Jahr 2001 auf 4.250 Anlagen erheblich verringert, wobei die mittlere Leistung der Kraftwerke stark angestiegen ist (vgl. Entquete-Kommission des bayerischen Landtages 2001, S. 63), was auf die bessere ökonomische Rentabilität von Großkraftwerken zurückzuführen ist. Eine Reaktivierung stillgelegter Kleinkraftwerke zur Elektrizitätsgewinnung erscheint sinnvoll, da ökologische Folgen durch die bereits vorhandenen

⁷¹ Quellen: GEMIS-Datenbank (Wasser-KW-gross-DE-2000) / RMD Wasserstraßen GmbH 2011 / HND Bayern 2011

Bauteile gering gehalten werden können. Die Beachtung ökologischer Belange ist im Sinne der Nachhaltigkeit auch bei kleinen Wasserkraftanlagen und deren Instandsetzung zwingend geboten (vgl. hierzu Uhrmeister 2002, S. 242ff. / Keite 2004, S. 21ff.). Kleinwasserkraftwerke, die zuvor zur Gewinnung von mechanischer Energie z.B. in Mühlen oder Sägewerke genutzt wurden, bieten neben der Umrüstmöglichkeit zur Stromgewinnung an günstigen Standorten zudem die Chance einer touristischen Inwertsetzung. Als Referenzanlage für die Modellierung dient das Kleinwasserkraftwerk Pankofener Mühle (Stadtgebiet Plattling) am Plattlinger Mühlbach, einem kleinen Nebenbach der Isar (siehe Tab. 14). Die jährliche Betriebszeit in Volllast kann aufgrund des häufig stark schwankenden Wasserabflusses an kleinen Bächen sehr unterschiedlich sein. Der Plattlinger Mühlbach zeichnet sich wegen der Nähe zur Isar durch konstant hohe Werte aus, weshalb dieses Kraftwerk auch Volllaststunden von mehr als 8.500 Stunden erreichen kann. Allerdings ist dieser Wert nicht für alle Kleinwasserkraftanlagen repräsentativ.

Tabelle 14⁷²: Steckbrief Kleinwasserkraftwerk

| Kleinwasserkraftwerk | | |
|--|----------------|----------|
| | Referenzanlage | Einheit |
| Technische Daten | | |
| Nennleistung | 0,043 | MW |
| Kalkulierte Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer | 30 | a |
| Jährliche Volllaststunden (Auslastung) | 6.800 | h |
| techn. Wirkungsgrad | >85 | % |
| Fallhöhe | 1,8 | m |
| Mittlerer Abfluss (MQ) | 3 | qqm/s |
| Kosten | | |
| Investitionskosten | 4.308.000 | €/MW |
| Jährliche Kosten | 4.940 | €/a |
| Brennstoff- und Inputkosten | 0 | €/a |
| Sonstige Daten | | |
| Direkt Beschäftigte | 0 | Personen |

⁷² Quellen: GEMIS-Datenbank (Wasser-KW-klein-DE) und Angaben des Betreibers

Kleinwasserkraftwerk Plattling

Kleinwasserkraftwerk am Plattlinger Mühlbach, einem kleinen Nebenbach der Isar, mit einer Leistung von 43 kW. Die Fallhöhe des Wassers beträgt 1,8 Meter bei 3 Kubikmeter Wasserdurchfluss pro Sekunde. Das Bild links zeigt das Gebäude des Wasserkraftwerks, das Bild in der Mitte den Rechen zur Beseitigung von angeschwemmtem Treibgut mit der Wehranlage für Hochwasser. Im Bild rechts ist das Kraftwerksgebäude von innen mit Turbine (rechts) und Generator (links) zu sehen.

Stadt Plattling, Landkreis Deggendorf

Aufnahmezeit: März 2011, eigene Aufnahme

Abb. 20: Kleinwasserkraftwerk in Plattling

2.7 Windenergie

Die Nutzung der Windenergie hat in der Bundesrepublik Deutschland seit den 90er Jahren einen rasanten Aufschwung genommen. Gestützt durch staatliche Förderprogramme und garantierter Stromeinspeisevergütung, die den Betreibern eine notwendige Planungssicherheit gewähren (vgl. Staiß 2007, S. 99ff.), leistet Windenergie heute den größten Energiebeitrag aller erneuerbarer Energien. Das Maximum der Zubauleistung sowohl hinsichtlich der Anlagenzahl als auch der neu installierten Leistung markiert das Jahr 2002 (vgl. Abb. 21)⁷³. Seither hat die Zahl an Errichtungen abgenommen und stagniert auf mittlerem Niveau von knapp unter 1.000 neuen Windrädern pro Jahr. Gleichzeitig ist eine beständige Steigerung der Anlagengröße, bedingt vor allem durch den technologischen Fortschritt und einer besseren ökonomischen Rentabilität von Großanlagen, zu verzeichnen. So überstieg die Zahl an neuen Windrädern zu Beginn der Entwicklung die installierte Leistung (MW), was einer durchschnittlichen Anlagengröße kleiner 1 MW Leistung entspricht. Im Jahr 2010 wurden 754 neuen Windrädern mit einer Gesamtleistung von 1551 MW errichtet (vgl. BWE 2010a und 2010b). Damit beträgt die durchschnittliche Leistung pro Anlage bereits mehr als 2 MW und ist doppelt so hoch wie in den Jahren 1999 und 2000 (vgl. Abb. 21).

⁷³ Ein Abriss des Entwicklungsprozesses der Windenergie in Deutschland seit den 70er Jahren im Kontext sich ändernder politischer, rechtlicher und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen findet sich bei Ohlhorst (2006, S. 101ff.).

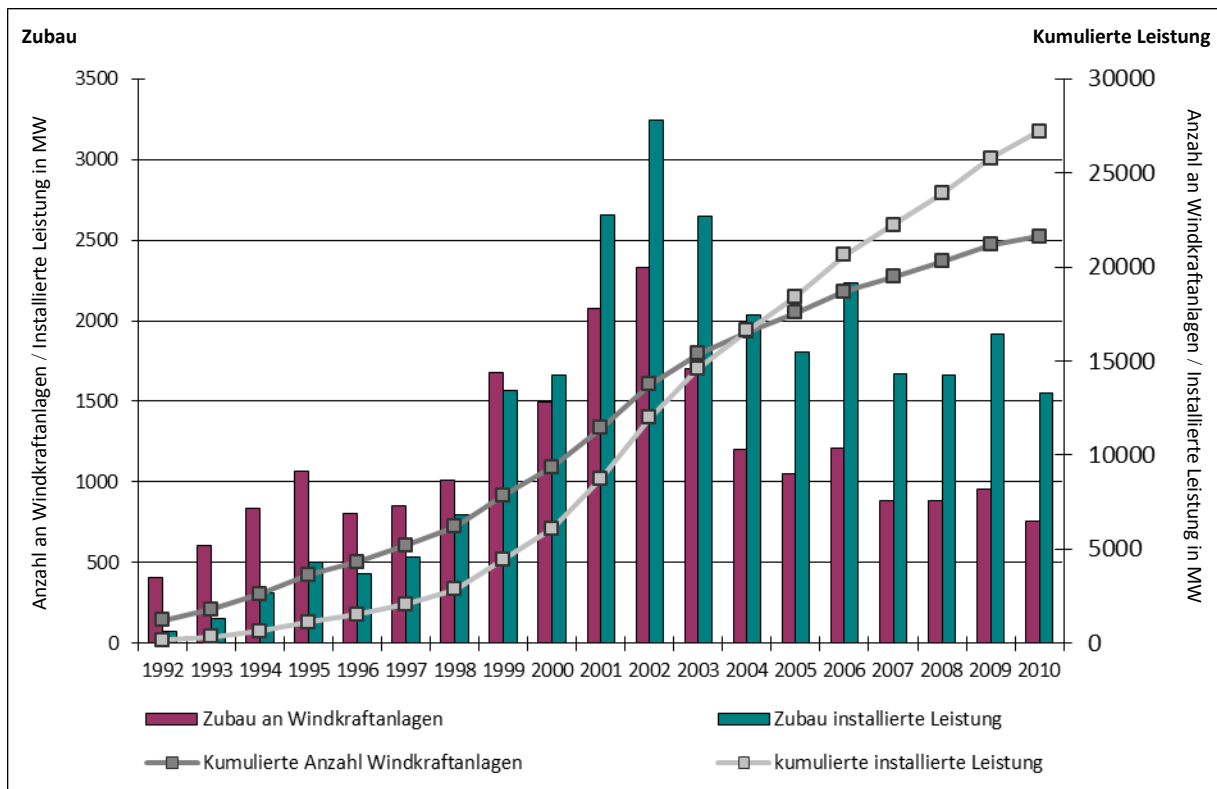


Abb. 21: Entwicklung der Windenergie in Deutschland, eigene Darstellung nach BWE (2010a / 2010b)

Die Stagnation des Zubaus auf einem mittleren Niveau ist Folge verschiedener Ursachen. Zum einen sind die besten Standorte, im Sinne wirtschaftlicher Rentabilität, vielfach bereits mit Anlagen bestückt, zum anderen stößt der weitere Ausbau zunehmend auf Widerstand seitens der lokalen Bevölkerung. Um die politisch gewollte Steigerung der Windenergie in Zukunft aufrecht zu erhalten, ist die Erschließung neuer Standorte und das Ersetzen bestehender Anlagen durch moderne Windkraftträder, bezeichnet als Repowering (vgl. hierzu BWE 2009 / DStGB 2009, S. 24ff.), nötig. Bei der Suche nach neuen Standorten zeigt die regionale Verteilung von bestehenden Windrädern eine starke Häufung im Norddeutschen Raum, im Besonderen an den Küstengebieten, wo gute Standortbedingungen vorherrschen. Zu den Mittelgebirgen hin nimmt die Zahl an Anlagen stetig ab und verzeichnet in Süddeutschland eine nur spärliche Verbreitung (vgl. Hasse & Denzer 2006, S. 150f. / Molly 2010). Da im Norddeutschen Raum neue Standorte nur mehr begrenzt verfügbar sind, konzentriert sich die Suche neben dem Offshore-Gebiet auf die Mittelgebirge und Süddeutschland.

Im Offshore-Bereich geht mit zunehmender Entfernung von der Küste die Hoffnung einher, dass sich die ökonomische Rentabilität aufgrund stetiger Windverhältnisse mit den ökologischen Eingriffen und der sozialen Akzeptanz vereinbaren lassen, um Interessenskonflikte zu vermeiden (vgl. Gregorowius & Zepp 2006, S. 117). Ein umfassender Ausbau ist daher vorgesehen. Es bestehen jedoch Unsicherheiten wie schnell dies möglich sein wird, da die Erschließung mit einem großen technischen Aufwand sowie hohen Kosten verbunden ist. Zudem treten negative ökologische Folgen auf (Barrierewirkung für Zug- und Rastvögel, Auswirkungen auf die belebte Meeresumwelt und den

Meeresboden, Schallemissionen), in Küstennähe wird ein touristischer Attraktivitätsverlust befürchtet. Konflikte bleiben nicht aus, weshalb eine geschickte räumlich-planerische Steuerung bzw. Standortvergabe auch Offshore geboten ist (vgl. Neukirchen 2004, S. 18 / Steinhauer 2006, S. 56).

Im süddeutschen Raum, speziell in Bayern, sind potenzielle Standorte vorhanden. Ursachen für die geringe Nutzung der Windenergie, sind neben den schlechteren Standortqualitäten ein Mangel an gesellschaftlicher Akzeptanz sowie eine politische Ablehnung, welche sich neuerlich jedoch gewandelt hat. Häufig vorgebrachte Argumente, die beim Bau von Windrädern noch immer eine große Bedeutung haben, sind unter anderem Schattenwurf (Discoeffekt) und Lärmbelastung, die permanente Bewegung der Rotoren (Aufmerksamkeit und Ablenkung), die Gefahr (Risiko eines Flügelbruchs oder Eisschlags), ökologische Folgen für die Fauna (v.a. Vögel und Fledermäuse), Wertverlust von Immobilien, Einkommensverluste im Tourismussektor, Verfremdung der Eigenart von Landschaftsräumen und deren Ästhetik sowie der starke Eingriff in das Landschaftsbild.⁷⁴ Auch im Binnenland besteht deshalb seit langem die Forderung, Standorte mit geringem Konfliktpotenzial sowohl hinsichtlich ökologischer als auch sozialer Belange auszuweisen, um den Ausbau voranzubringen und die Akzeptanz der Technologie zu verbessern.⁷⁵ Eine nachhaltige räumliche Steuerung von Windkraftanlagen ist angesichts der Bestrebungen Windkraft in Bayern verstärkt zu nutzen – in den kommenden Jahren sollen 1.500 Windräder gebaut werden – daher aktueller denn je.⁷⁶

Ein erster Anhalt für die räumliche Standortsuche findet sich im Baugesetzbuch (BauGB), indem die Errichtung einer Windkraftanlage im Außenbereich, d.h. außerhalb des Geltungsbereichs eines Bebauungsplanes zwar privilegiert, jedoch nur dann erlaubt ist, wenn keine Beeinträchtigungen öffentlicher Belange bestehen (vgl. § 35 Abs. 1 Satz 5 BauGB). Verstößt z.B. das geplante Windrad gegen die Interessen des Naturschutzes bzw. beeinträchtigt es die natürliche Eigenart der Landschaft und ihren Erholungswert oder verunstaltet es das Orts- und Landschaftsbild, so wird eine Genehmigung untersagt (vgl. § 35 Abs. 3 Satz 5 BauGB). Des Weiteren sind Vorgaben aus dem Bundesimmissionschutzgesetz (BImSchG) sowie Abstände zu bebauten Flächen zu beachten. Im Untersuchungsgebiet ist seit Ende 2011 der Planungsverband Donau-Wald mit der Suche nach Vorrangflächen für Windenergie, welche den genannten Kriterien entsprechen, für sein Zuständigkeitsgebiet⁷⁷ betraut. Abstimmungen mit der vorliegenden Forschungsarbeit fanden dazu statt.

⁷⁴ Mögliche Auswirkungen durch Windkraftanlagen sind in der Literatur seit langem und häufig thematisiert (vgl. u.a. Schwahn 2000, S. 59ff. / Egert & Jedicke 2001, S. 375ff. / Nohl 2001, S. 365 ff. / Hötker et al. 2006, S. 100ff.)

⁷⁵ Konzepte, den Naturhaushalt, das Landschaftsbild und soziale Belange zu berücksichtigen, sind seit den Anfängen der Windenergienutzung publiziert (vgl. u.a. Kleinschmidt et al. 1994, S. 9ff. / Mielke 1996, S. S. 106 / Wieser 2005, S. 364ff.).

⁷⁶ Die Überlegungen, Windenergie in Bayern und speziell im Untersuchungsgebiet gelegenen Bayerischen Wald einzusetzen, sind ebenfalls seit den 90er Jahren diskutiert (vgl. hierzu Heigl & Keller 1995 / StMWVT 1999 und 2001a / Bayerische Landesanstalt für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur 2001).

⁷⁷ Das Zuständigkeitsgebiet des Planungsverbandes Donau-Wald umfasst die Landkreise Deggendorf, Freyung-Grafenau, Passau, Regen, Straubing-Bogen sowie die beiden kreisfreien Städte Passau und Straubing.

Neben den politischen Umwälzungen sind es auch technologische Fortschritte, die vormals unrentable Standorte in Niederbayern nun wirtschaftlich interessant machen und damit Aufmerksamkeit bei Investoren erzeugen. Zu nennen ist im Besonderen die Möglichkeit Anlagen mit großer Höhe zu bauen. Obwohl verschiedene Bauformen von Windkraftanlagen bekannt sind, kommen fast ausschließlich dreiflügelige Windkraftanlagen bestehend aus einem Stahlurm mit Gondel und vertikal angebrachtem Rotor zum Einsatz (vgl. Heier 2007, S. 60ff. / Twele et al. 2007, S. 49ff.). Die beiden wichtigsten Kennzahlen der Anlagengröße sind dabei die installierte Leistung und die Nabenhöhe. Die Nabenhöhe bezeichnet die Höhe der Anlage vom Boden bis zur Nabe, wo der Rotor angebracht ist. Sie erreicht bei modernen Windkraftanlagen mit Leistungen zwischen 2 und 5 MW eine Höhe bis 150m. Mit zunehmender Größe der Anlage steigt zum einen der Energieertrag, da die Windgeschwindigkeiten ebenfalls mit der Höhe über dem Boden zunehmen. Zum anderen können Standorte im Wald nun berücksichtigt werden, da die Windkraftanlagen weit genug über die Bäume hinausragen. Beide Faktoren besitzen gerade für den Regierungsbezirk Niederbayern große Bedeutung, befinden sich die windreichen Gebiete doch überwiegend entlang der Höhenzüge des Bayerischen Waldes. Allerdings sind in diesen Gebieten aufgrund der ökologischen Schutzwürdigkeit (Nationalpark, Naturschutzgebiet und Landschaftsschutzgebiet) die umweltrelevanten Folgen von Windrädern genau zu prüfen. Zudem ist auch auf touristische Belange zu achten, indem der Einfluss auf das Landschaftsbild möglichst gering zu halten ist.

Tabelle 15⁷⁸: Steckbrief Windkraftanlage

| Windkraftanlage | | |
|--|------------------|----------|
| | Referenzanlage | Einheit |
| Technische Daten | | |
| Nennleistung | 2 | MW |
| Kalkulierte Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer | 20 | a |
| Jährliche Volllaststunden (Auslastung) | 2.000 | h |
| Leistungsbeiwert | Enercon, E-82 E2 | % |
| Nabenhöhe | 108 | m |
| Rotordurchmesser | 82 | m |
| Vom Rotor überstrichene Fläche | 5.281 | qm |
| Rauigkeitslänge | 0,2 | |
| Durchschnittliche jährl. Windgeschwindigkeit (10 Meter über Boden) | 3,5 | m/s |
| Kosten | | |
| Investitionskosten | 1.900.000 | €/MW |
| Jährliche Kosten (inkl. Wartung, Versicherung, techn. und kaufm. Betriebsführung, Pacht und Rücklage für Reparaturen bzw. Sonstiges) | 106.000 | €/a |
| Brennstoff- und Inputkosten | 0 | €/a |
| Sonstige Daten | | |
| Direkt Beschäftigte | 0 | Personen |

⁷⁸ GEMIS-Datenbank / Enercon (2010) / Mitteilung der Firma GSW Gold SolarWind Management GmbH 2011

Moderne Windkraftanlagen auf aktuellem technologischen Stand fehlen im Untersuchungsgebiet, weshalb eine Referenzanlage unter Beachtung von Herstellerangaben neu definiert wird. Das Referenzwindrad besitzt eine Größe von 2 MW installierter Leistung und eine Nabenhöhe von 108 Meter. Der Rotordurchmesser beträgt 82 Meter, was einer Rotorfläche von ca. 5.300 qm entspricht (vgl. Tab. 15). Für die Technologiebewertung wird die durchschnittliche jährliche Windgeschwindigkeit mit 3,5 m/s, in 10 Meter über Boden gemessen, angenommen. Die Windgeschwindigkeit entspricht einem Mittelwert für Höhenzüge (Kuppen) des Bayerischen Waldes (vgl. StMWVT 2001a, Karte 1 / StMUG 2011).

| Windkraftanlagen nahe der Ortschaften Thalberg und Kugl | |
|---|---|
|  |  |
| <p>Die Windkraftanlage in Thalberg ist bisher das einzige größere Windrad im südöstlichen Bayerischen Wald. Standort ist der 863m NN hohe Hofmannsberg, der in Hauptwindrichtung (Westen) nicht bewaldet ist und keine größeren Hindernisse aufweist (siehe Bild, Blickrichtung Südost). Das Windrad wurde im Jahr 2000 errichtet und hat eine Leistung von 600 kW, eine Nabenhöhe von rund 70m und einen Rotordurchmesser von 44m. Gemeinde Wegscheid, Landkreis Passau Aufnahmezeit: Januar 2008, eigene Aufnahme</p> | <p>Die beiden Windkraftanlagen nahe der Ortschaft Kugl, Gemeinde Simbach, zählen zu den größten bestehenden Windrädern in der Region. Ihre Leistung beträgt je 750 kW. Sie wurden im Jahr 2000 in Betrieb genommen. Gemeinde Simbach, Landkreis Dingolfing-Landau Aufnahmezeit: Dezember 2011, eigene Aufnahme</p> |

Abb. 22: Windkraftanlagen in Wegscheid und Simbach

3. Befragung

Die subjektiven Einschätzungen über die zukünftige Energieversorgung unterliegen stets Veränderungen und sind gerade im Energiesektor von aktuellen und medial präsenten Ereignissen geprägt (z.B. Störfall in einem Atomkraftwerk, Förderkürzung von Photovoltaik, usw.). Um eine möglichst aktuelle Evaluierung der Motivlagen und Einstellungen der befragten Personen gewährleisten zu können, wurde im Erstellungsprozess der Arbeit ein später Termin anvisiert und die Befragung im März 2011 durchgeführt. Während der Befragung ereignete sich die Reaktorkatastrophe in Japan. Alle Befragten hatten zum Zeitpunkt des Unglücks die Fragebögen bereits ausgehändigt bekommen und zum Teil zurückgesandt. Ca. ein Drittel aller Fragebögen kam erst nach dem Reaktorunglück zurück.⁷⁹ In wie weit die Ereignisse in Japan die Bewertung beeinflusst haben kann nicht aussagekräftig belegt werden. Signifikante Abweichungen zwischen Antworten auf Fragebögen, die vor und Fragebögen, die nach dem Reaktorunglück zugesendet wurden, sind nicht ersichtlich. Die Anzahl an befragten Personen ist hierzu zu gering.

Die Vorfälle in Japan zeigen jedoch deutlich, dass tradierte Wertvorstellungen und Einschätzungen zum einen schnell revidiert und aufgegeben werden können, zum anderen vorhandene Positionen dadurch nochmals gestärkt werden (z.B. Atomkraftgegner). Für das Konzept doppelter Nachhaltigkeit lässt sich ableiten, dass die Befragung von Akteuren nicht nur für jeden Untersuchungsraum neu durchzuführen sondern auch in zeitlichen Intervallen zu wiederholen ist, um den Akteuren stets die Möglichkeit zur Artikulation ihrer eventuell geänderten Vorstellungen bezüglich einer nachhaltigen Energieversorgung bieten zu können. Mit Blick auf die Ausarbeitung von kommunalen und regionalen Energiestrategien erscheint dies als besonders wichtig.

Die Befragung zur Technologiebewertung (Teil 1) und zur Standortsuche (Teil 2) erfolgte anhand eines gemeinsamen Fragebogens (siehe Anhang Abb. 1). Der Definition der Akteursgruppen folgend (vgl. Kapitel IV 2.3), wurden die vier Zielgruppen Entscheidungsträger, Experten, Grundbesitzer und Investoren sowie Meinungsbildner und Interessenvertreter befragt. Die Auswahl von Personen der Gruppen eins, drei und vier geschah zufällig, unter der Vorgabe, dass die Person im Regierungsbezirk wohnhaft ist und eine Verteilung der Befragten über den gesamten Regierungsbezirk gegeben ist. Bei der Akteursgruppe zwei konnte auf Kontakte zu Energieexperten aus der Region zurückgegriffen werden, die sich während der Erstellung der Forschungsarbeit ergeben hatten. Insgesamt wurden 45 Fragebögen verteilt. Folgende Berufsgruppen waren an der Evaluierung beteiligt:

⁷⁹ Der zeitliche Rahmen zur Rücksendung der Fragebögen war mit 21. März festgelegt. Das Tohoku-Erdbeben in Japan mit anschließendem Tsunami fand am 11. März statt, in Folge dessen das Reaktorunglück in Fukushima passierte.

- Entscheidungsträger: 13 Personen, davon ein Landrat, sieben Bürgermeister und fünf Gemeinderäte verschiedener politischer Parteien
- Experten: 10 Personen, davon ein Betriebsleiter von Stadtwerken, ein wissenschaftlicher Vertreter einer Hochschule, ein Energieberater der Industrie und Handelskammer, vier Vorstände von mittelständischen Unternehmen im Energiesektor (Consulting und Planungsfirmen) und drei Handwerker (Heizungsbau, Solar- und Photovoltaikmontage)
- Grundbesitzer und Investoren: 9 Personen, davon fünf Land- bzw. Forstwirte, ein Leiter eines Landwirtschaftsamtes und drei Vertreter regionaler Banken
- Meinungsbildner und Interessensvertreter: 13 Personen, davon fünf Schulleiter (Grundschule, Hauptschule, Berufsschule und Fachoberschule), ein Leiter einer Umweltbildungseinrichtung, ein Vertreter einer kirchlichen Jugendorganisation, ein Pfarrer, ein Gewerkschaftsvertreter, ein Richter, ein Leiter einer Medienanstalt, ein Vorsitzender eines Gartenbauvereins und ein Vertreter des Regionalmanagements

Die Fragebögen wurden den ausgewählten Akteuren persönlich Anfang März 2011 zugestellt mit einer Rücksendefrist von drei Wochen. Die schriftliche Befragung fand anonym und nicht im Beisein des Autors statt. Diese Variante lässt zwar keine Nachfragen zu, vermeidet aber eine Einflussnahme durch den Interviewer. Von den insgesamt 45 ausgehändigten Fragebögen kamen 41 zurück, was einer Rücklaufquote von 91% entspricht. Der hohe Rücklauf ist vermutlich auf die persönliche Kontaktaufnahme sowie auf das strittig diskutierte Energiethema zurückzuführen. Das Durchschnittsalter aller Personen, die geantwortet haben liegt bei 47,8 Jahren. Von den 41 Fragebögen wurden 10 von Frauen und 31 von Männern ausgefüllt. Der hohe männliche Anteil ist auf die Definition der Gruppen, im Besonderen Gruppe zwei und drei, zurückzuführen, in denen sich mit einer Ausnahme ausschließlich Männer befanden. Die Ergebnisse der Befragung sind in den jeweiligen Kapiteln zur Technologiebewertung und zur Standortmodellierung wiedergegeben.

4. Technologiebewertung

4.1 Herkunft und Qualität der Daten

Die Technologiebewertung basiert auf dem entwickelten Set von 14 Indikatoren und wird für die beschriebenen Referenzanlagen durchgeführt. Zur Ermittlung der Indikatorenwerte ist ein umfassender Informationsbestand notwendig, da die Erhebung häufig durch komplexe Mess- und Quantifizierungsverfahren (z.B. Messung von Emissionen aus der Biogasverbrennung oder Beachtung von Lebenszyklusanalysen) gekennzeichnet ist. Soweit wie möglich wird auf eine eigene Messung bzw. Datenerfassung aufgrund der eigenständigen Thematik verzichtet, zumal alle Indikatoren in der Literatur bereits verwendet werden und Daten in ausreichender Qualität zur Verfügung stehen. Mit

Ausnahme zweier Indikatoren können somit Fremddaten aus der aktuellen Literatur und einschlägigen Datenbanken genutzt werden.

Als Hürde bei der Quantifizierung der Indikatoren anhand literarischer Angaben erweist sich die Heterogenität und Vielfältigkeit der Energieanlagen. Faktoren wie etwa die Anlagengröße (installierte Leistung), die Bauart (z.B. Photovoltaik Dach- oder Freiflächenanlage), der verwendete Rohstoff (z.B. Maissilage oder Rindergülle) und die Standortbedingungen (z.B. Windgeschwindigkeiten) beeinflussen die Ergebnisse in entscheidender Weise. So können z.B. Angaben zum spezifischen Materialaufwand eines 60 Meter hohen Windrades nicht für die Bewertung einer Anlage der Größe von 120 Meter verwendet bzw. auch nicht entsprechend umgerechnet werden. Vielmehr hat die Bewertung für jede Referenzanlage im gegebenen räumlichen Kontext neu zu erfolgen. Dies ist einerseits zwar ein konzeptioneller Bestandteil der doppelten Nachhaltigkeit und Grund des Konzeptes, indem z.B. regionale Gegebenheiten die Eignung einer Technologie bestimmen. Andererseits erschwert es den Technologievergleich anhand von literarischen Quellen, da sich diese zumeist entweder auf unterschiedliche Referenzanlagen oder eine andere Region beziehen. Zudem variieren die Daten in ihrer Qualität und sind aufgrund der hohen Aggregation von Werten partiell nicht mehr nachprüfbar.

Tabelle 16: Datenquellen für die Quantifizierung der Indikatoren

| | Leitlinie für die Bewertung | Indikator | Einheit | Datenquelle |
|----|---|---|-----------------------------------|---|
| 1 | Ressourcenschonung | Abfallaufkommen, nicht-radioaktiv | kg/MWh _{el} | GEMIS |
| 2 | | Energieaufwand | MWh/MWh _{el} | GEMIS |
| 3 | | Flächenbedarf | m ² /GWh _{el} | Eigene Erhebung |
| 4 | | Materialeinsatz, nicht energetisch | kg/MWh _{el} | GEMIS |
| 5 | Umwelt-, Klima- und Gesundheitsverträglichkeit | Abfallaufkommen, radioaktiv belastet | kg/MWh _{el} | GEMIS |
| 6 | | Eutrophierung, NO _x -Emissionen | kg/MWh _{el} | GEMIS |
| 7 | | Gesundheitsrisiken | YOLL/MWh | Schenler et al. 2008 / Pretre et al. 2004 |
| 8 | | Treibhausgasemissionen, CO ₂ -Äquivalent | kg/MWh _{el} | GEMIS |
| 9 | | Versauerung, SO ₂ -Äquivalent | kg/MWh _{el} | GEMIS |
| 10 | Bedarfsgerechte Nutzungsqualität und Verteilungsgerechtigkeit | Abhängigkeit von Energieimporten und geopolitische Faktoren | % | BGR 2010 StMWVT 2002 |
| 11 | | Versorgungszuverlässigkeit (Volllaststunden) | h/a | Referenzanlagen |
| 12 | Risikoarmut und Fehlertoleranz | Schadensausmaß eines Unfalls | Pers./Unfall | Schenler et al. 2008 / Pretre et al. 2004 |
| 13 | Soziale Verträglichkeit | Arbeitskräftebedarf | Pers./MWh _{el} | GEMIS |
| 14 | Umfassende Wirtschaftlichkeit | Kosten der Energiebereitstellung | €/kWh _{el} | Eigene Berechnung |

Um den Vergleich zwischen den einzelnen Referenzanlagen zu sichern, wird jeder Indikator durch eine einzige Datenquelle bestimmt (vgl. Tab. 16). Die Indikatoren nicht radioaktives

Abfallaufkommen (I 1)⁸⁰, Energieaufwand (I 2)⁸¹, nicht energetische Materialintensität (I 4)⁸², radioaktiv belastetes Abfallaufkommen (I 5)⁸³, Eutrophierung (I 6)⁸⁴, Treibhausgasemissionen (I 8)⁸⁵, Versauerung (I 9)⁸⁶ und Arbeitskräftebedarf (I 13)⁸⁷ stammen aus der GEMIS-Datenbank (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme) des Öko-Instituts (vgl. Fritsche & Schmidt 2008). Weichen die GEMIS-Stammdaten von den hier definierten Referenzanlagen ab, so erfolgt eine entsprechende Anpassung der Stammdaten durch das GEMIS-Programm 4.6. Dies betrifft z.B. bei erneuerbaren Energien die von regionalen Bedingungen abhängige Auslastung, die Anlagengröße oder bei der Bioenergie die Rohstoffzusammensetzung des verwendeten Gärsubstrates.

Die Daten zu den Indikatoren Gesundheitsrisiko (I 7) und Schadensausmaß eines Unfalls (I 12) sind den Technologiebewertungen von Schenler et al. (2008) sowie der Publikation von Pretre et al. (2004) entnommen. Soweit möglich sind die jeweiligen Werte den analysierten Technologien zugeordnet. Aufgrund fehlender Daten ist beim Kleinwasserkraftwerk der Indikatorwert 7 von der Technologie Laufwasserkraftwerk übernommen und für Indikator 12 geschätzt.

Die Bestimmung des Indikators Flächenbedarf (I 3) erfolgt durch eine Ermittlung von Betriebsgeländeflächen. Wie bereits bei den Ausführungen zum Indikator Flächenbedarf erläutert, kann die benötigte Fläche hinsichtlich der Nutzungsdauer (z.B. temporär oder dauerhaft), der Nutzungsintensität (z.B. Versiegelung, Modifikation oder einfache Nutzung) und der Flächenwertigkeit (z.B. Beanspruchung von ökologisch wertvollen Flächen) weiter differenziert werden. Wegen der Vergleichbarkeit wird der Flächenbedarf in dieser Arbeit als das benötigte Betriebsgelände einer Energieanlage definiert. Für jede zu analysierende Energieform stützt sich die Bestimmung der Betriebsflächen auf eine Sichtung digitaler Planungskarten (DPK 1:5.000) und einer Auswertung von Luftbildern zu den gewählten Referenzanlagen bzw. entsprechender Anlagen im Untersuchungsraum.

Die Definition des Betriebsgeländes ist ihrerseits mit Annahmen verbunden: So werden bei der Wasserkraft z.B. die Wasserflächen des Stauraumes nicht berücksichtigt. Bei der Windkraft ist die nötige Betriebsfläche mit dem Fundament und dem Platzbedarf zur Errichtung bzw. Wartung der Anlage mittels Kran gleichgesetzt. Photovoltaik-Dachanlagen in der Größenordnung 15 kWp benötigen in der Regel kein eigenes Betriebsgelände in Form eines extra dafür errichteten Bauwerks, weshalb die benötigte Fläche mit Null angenommen wird. Bei einer Freiflächenanlage ist das

⁸⁰ Der Indikator 1 wird mit der GEMIS-Rubrik Produktionsabfall bewertet.

⁸¹ Der Indikator 2 wird mit der GEMIS-Rubrik Kumulierter Energieaufwand nichterneuerbar bewertet.

⁸² Der Indikator 4 wird mit der GEMIS-Rubrik Kumulierter Stoff-Aufwand nichterneuerbar bewertet.

⁸³ Der Indikator 5 wird mit der GEMIS-Rubrik Müll-atomar (hochaktiv) bewertet.

⁸⁴ Der Indikator 6 wird mit der GEMIS-Rubrik NO_x (Emissionen in die Luft) bewertet.

⁸⁵ Der Indikator 8 wird mit der GEMIS-Rubrik CO₂-Äquivalent (Treibhausrelevante Emissionen in die Luft) bewertet.

⁸⁶ Der Indikator 9 wird mit der GEMIS-Rubrik SO₂ (Emissionen in die Luft) bewertet.

⁸⁷ Der Indikator 13 wird mit der GEMIS-Rubrik Summe Beschäftigungseffekte bewertet.

Betriebsgelände durch das umzäunte Areal gegeben, auch wenn sich innerhalb des Zaunes Grünflächen befinden. Zum Betriebsgelände der Biogasanlage und des Biomassekraftwerks sowie der fossil-nuklearen Kraftwerken gehören Nebengebäude und sonstige Einrichtungen, die ersichtlich dem Kraftwerk zuzuordnen sind. Die Aussagekraft des Indikators wird dahingehend eingeschränkt, dass die Form und Größe des Betriebsgeländes bei allen Technologien stets auch von örtlichen Gegebenheiten abhängig ist, weshalb die ermittelten Werte nur für die jeweilige Referenzanlage gelten.

Der Indikator Abhängigkeit von Energieimporten und geopolitische Faktoren (I 10) wird aufgrund der vagen und schwierigen Einschätzung von bilateralen Beziehungen und deren Gewichtung einzig durch die Importabhängigkeit bei den jeweiligen Energieträgern repräsentiert. Je höher der Indikatorwert, umso mehr ist die Region auf Importe angewiesen. Der Wert 100% bedeutet folglich eine vollkommene Abhängigkeit. Für die fossilen Primärenergieträger bestand im Jahr 2009 Bundesweit ein Importbedarf von Erdgas 84%, Steinkohle 72% und Kernenergie von 100% (vgl. BGR 2010, S. 11). Die Analyse für den Regierungsbezirk Niederbayern zeigt, dass neben der Kernenergie auch bei Erdgas und Steinkohle eine vollständige Abhängigkeit von externen Regionen gegeben ist (vgl. StMWVT 2002), weshalb die Bewertung der fossilen bzw. nuklearen Technologien mit 100% erfolgt. Demgegenüber zeichnen sich erneuerbare Energien durch ihre dezentrale Verfügbarkeit aus. Mit dieser räumlichen Eingrenzung auf den Untersuchungsraum werden die regionalen Potenziale gestärkt. Allerdings stößt die Aussagekraft des Indikators bei sehr kleinräumigen Analysen schnell an ihre Grenzen.

Die Versorgungszuverlässigkeit (I 11) wird durch die jährlichen Volllaststunden einer Technologie repräsentiert. Bei erneuerbaren Energien ist die Volllaststundenzahl stark von lokalen Standortbedingungen abhängig. Deren Bestimmung orientiert sich deshalb an den regionalen Bedingungen des Untersuchungsraumes und wird mit durchschnittlich prognostizierten Werten angenommen. Die Angabe der Volllaststunden erfolgte bereits bei der Definition von Referenzanlagen und kann so übernommen werden.

Der Indikator Stromgestehungskosten (I 14) wird mittels der Annuitätenmethode selbst berechnet. Daten zu Investitions-, Wartungs- und Betriebskosten entstammen Angaben von Anlagenbetreibern sowie der einschlägigen Literatur (siehe Definition der Referenzanlagen). Zur Berechnung der Stromgestehungskosten sind weitere Annahmen bezüglich der allgemeinen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen erforderlich (vgl. Abb. 23). Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen werden dabei für alle Technologien gleichbleibend verwendet.

Wirtschaftliche Rahmenbedingungen zur Berechnung von Stromgestehungskosten

- Abschreibung: Die Dauer der Abschreibung beträgt 20 Jahre.
- Bauzeit: Die Bauzeit der einzelnen Kraftwerke ist sehr unterschiedlich. Sie beträgt bei häuslichen Photovoltaikanlagen zumeist nur einige Wochen, bei fossilen Großkraftwerken hingegen einige Jahre. Anfallende Kosten in Form von Zinsen während der Bauzeit werden aufgrund unsicherer Datengrundlage nicht berücksichtigt.
- Brenn- und Rohstoffkosten: Brenn- und Rohstoffe unterliegen teils immensen Preisschwankungen. Tendenziell zeigt sich vor allem bei den fossilen Energieträgern eine zunehmende Verknappung, was zu steigenden Preisen führt. Auch die Bioenergie ist aktuell mit steigenden Biomassepreisen konfrontiert. Eine genaue Vorhersage der Preisentwicklung auf den energetischen Brenn- und Rohstoffmärkten erscheint schwierig, da die Märkte von zahlreichen Parametern wie politischen Entscheidungen, wirtschaftlicher Entwicklung, regionaler Konflikte und Spekulationen beeinträchtigt sind. Dennoch hat die Preisentwicklung der Brenn- und Rohstoffkosten einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis. Die angenommenen jährlichen Preissteigerungsraten betragen bei fossilen Energien 3% und bei Bioenergie 2%.
- Externe Effekte: Investitionsentscheidungen am Energiesektor haben meist vielfältige umweltrelevante Wirkungen. Hierzu zählen sowohl Einflüsse auf die natürliche wie auch auf die anthropogene Umwelt. Externe Effekte, egal ob positiv oder negativ, bleiben bei der Berechnung der Stromgestehungskosten unberücksichtigt.
- Inflationsrate: Die Inflationsrate wird für alle Jahre mit einer Höhe von 2,5% festgesetzt.
- Kalkulatorischer Zinssatz: Der kalkulatorische Zinssatz ist von den Soll- und Habenzinsen sowie von der Inflation abhängig. Je nachdem, welche Mindestverzinsungsansprüche der Investor hat und welche Zinssätze am Kapitalmarkt erzielt werden, kann das Ergebnis stark variieren. Der kalkulatorische Zinssatz besitzt einen hohen Einfluss auf die Stromgestehungskosten und wird bei allen Technologien einheitlich mit 6% angenommen.
- Output: Die Stromproduktion ist über alle Jahre des Planungshorizontes konstant. Eine technologisch bedingte Reduktion der Produktion ist nicht berücksichtigt.
- Preisbasis: Preisbasis aller Berechnungen ist der Euro im Jahr 2011. Daraus ergibt sich, dass die Stromgestehungskosten reale durchschnittliche Kosten während der Betriebszeit auf diese Preisbasis darstellen.
- Rückbaukosten: Es wird angenommen, dass die Erlöse aus den am Ende übrig bleibenden Materialien (Recycling), die Abriss- bzw. Rückbaukosten ausgleichen. Die Rückbaukosten finden somit keine Beachtung.
- Steuern: Eine Berücksichtigung von Steuern findet nicht statt.
- Wirtschaftliches Umfeld: Wirtschaftliche Annahmen bezüglich der Investitionskosten, Betriebskosten und Rohstoffpreise beziehen sich auf den Untersuchungsraum. Ist dies aus Primärdaten nicht zu gewährleisten, werden ergänzend aus der Literatur Kosten herangezogen (siehe Referenzanlagen).
- Zinsen: Zinsen sind ständigen Schwankungen unterworfen und können sich auch innerhalb des Planungszeitraumes verändern. Wie bei allen grundlegenden Investitionsrechnungen wird daher die vereinfachende Annahme getroffen, wonach sich der Investor während des gesamten Planungszeitraumes jeden beliebigen Geldbetrag zu einem einheitlichen Zinssatz ausleihen kann.

Abb. 23: Wirtschaftliche Rahmenbedingungen zur Berechnung von Stromgestehungskosten

4.2 Indikatorenwerte der Referenzanlagen

Eine Matrix ist das typische Hilfsmittel für die Bewertung der einzelnen Kriterien (vgl. Domsch & Reinecke 1989, S. 155). Zur übersichtlichen Präsentation der Ergebnisse wird deshalb eine standardisierte tabellarische Form gewählt. Diese Tabelle, in der Entscheidungslehre als Ergebnismatrix bezeichnet, weist jeder Alternative einen absoluten Indikatorenwert zu. Der Tabellenaufbau sieht vor, Kriterien in Spalten und die analysierten Alternativen in Zeilen anzuordnen, so dass ein Zellenwert den Indikatorwert, d.h. die Attributeigenschaft einer Alternative repräsentiert. Die Spaltenanzahl der Tabelle ist durch die 14 Indikatoren zur Bewertung von Energietechnologien vorgegeben. Die Zeilenanzahl bemisst sich nach der Menge an untersuchten Alternativen, im vorliegenden Fall 10 Referenzanlagen. Die Umrechnung von absoluten Indikatorenwerten in Nutzenwerte sowie die Ermittlung des Gesamtergebnisses erfolgen mit dem Tabellenkalkulationsprogramm MS Excel.

Die Indikatorenwerte (vgl. Tab. 17) sind Grundlage der anschließenden Technologiebewertung. Sie werden den genannten Quellen entnommen und falls vorhanden, mit weiteren Literaturangaben verglichen. Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn sich in der Literatur gleiche oder zumindest ähnlich definierte Referenzanlagen finden, die anhand der hier benutzten Indikatoren bewertet wurden. Durch die zusätzliche Überprüfung sollen mögliche Abweichungen bei der Quantifizierung der Indikatoren kenntlich gemacht werden. Eine auffällige Abweichung besteht bei der Referenzanlage Biomasse, mit den ermittelten Stromgestehungskosten in Höhe von 40 Cent/kWh. Die GEMIS-Datenbank bestätigt dieses Ergebnis weitgehend. Trotzdem erscheint der Wert sehr hoch, finden sich in der Literatur auch Stromgestehungskosten von 17-18 Cent (vgl. Thrän et al. 2010). Aufgrund der Auffälligkeit wird auf diesen Wert bei der Indexberechnung noch weiter eingegangen.

Die tabellarische Zusammenstellung zeigt, dass jede Referenzanlage sowohl Stärken als auch Schwächen besitzt. Die allumfassend nachhaltige Technologie ist nicht zu erkennen. Vielmehr zeichnen sich die einzelnen Technologien jeweils durch unterschiedliche Vorzüge aus. So schneiden die erneuerbaren Energieformen z.B. hinsichtlich ihrer dezentralen Verfügbarkeit und Importabhängigkeit wesentlich besser ab als fossile Energien, die ihrerseits dafür tendenziell günstigere Gestehungskosten aufweisen. Obwohl die mögliche Kompensation von Schwächen bei der Bewertung von Nachhaltigkeit teils umstritten ist (vgl. Kap. V 1.5), soll anhand der Indikatorenwerte diejenige Technologie identifiziert werden, die in der Summe die nachhaltigen Voraussetzungen am besten erfüllt. Um eine Rangfolge der Technologien aufstellen zu können, sind vergleichbare Nutzenwerte nötig, die mittels einer Wertefunktion aus den absoluten Indikatorenwerten ableitbar sind.

Tabelle 17⁸⁸: Indikatorenwerte der Referenzanlagen

| Indikator | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|--------------|------------|------------|-----|------|----------------|---------------|-------|
| | I1 | I2 | I3 | I4 | I5 | I6 | I7 | I8 | I9 | I10 | I11 | I12 | I13 | I14 |
| Einheit | kg/ MWh | MWh/ MWh | qm/ GWh | kg/ MWh | kg/ MWh | kg/ MWh | YOLL/ MWh | kg/ MWh | kg/ MWh | % | h/a | Pers./ Unf. | Pers./ MWh | €/kWh |
| Biogasanlage | 512,88 | 0,48 | 2,42 | 230,13 | 7,59E-05 | 1,04 | 3,60E-04 | 233,96 | 1,05 | 0 | 7800 | 10 | 1,60E-03 | 0,17 |
| Biomasseheizkraftwerk | 230,78 | 0,19 | 0,65 | 38,97 | 4,24E-07 | 1,81 | 2,67E-04 | 65,83 | 0,37 | 0 | 6000 | 10 | 3,65E-03 | 0,40 |
| Photovoltaik-Dachanlage | 4,43 | 0,12 | 0,00 | 18,54 | 1,87E-05 | 0,09 | 1,62E-05 | 51,75 | 0,18 | 0 | 1020 | 5 | 1,88E-03 | 0,25 |
| Photovoltaik-Freiflächenanlage | 11,24 | 0,16 | 40,10 | 28,90 | 1,71E-05 | 0,11 | 1,59E-05 | 61,96 | 0,20 | 0 | 1050 | 5 | 1,58E-03 | 0,23 |
| Wasserkraft Kleinwasserkraftwerk | 0,17 | 0,00 | 0,68 | 1,88 | 5,10E-08 | 0,00 | 1,10E-05 | 1,45 | 0,00 | 0 | 6800 | 100 | 5,24E-04 | 0,08 |
| Wasserkraft Laufwasserkraftwerk | 0,47 | 0,04 | 0,40 | 46,66 | 4,36E-06 | 0,06 | 1,10E-05 | 29,40 | 0,01 | 0 | 6750 | 2000 | 7,93E-04 | 0,07 |
| Windkraftanlage | 1,22 | 0,04 | 0,75 | 34,26 | 1,60E-06 | 0,05 | 6,29E-06 | 22,85 | 0,01 | 0 | 2000 | 10 | 1,91E-03 | 0,12 |
| Atomkraftwerk | 0,20 | 3,14 | 0,02 | 5,80 | 4,04E-03 | 0,13 | 1,76E-05 | 30,75 | 0,10 | 100 | 8100 | 9720 | 5,21E-04 | 0,06 |
| Erdgaskraftwerk | 0,57 | 1,92 | 0,04 | 5,49 | 2,65E-06 | 0,55 | 6,34E-05 | 407,19 | 0,02 | 100 | 6000 | 109 | 4,12E-04 | 0,10 |
| Kohlekraftwerk | 0,45 | 2,31 | 0,09 | 15,01 | 2,42E-06 | 0,43 | 2,11E-04 | 867,27 | 0,29 | 100 | 6000 | 272 | 9,92E-04 | 0,06 |

⁸⁸ Quellen: GEMIS-Datenbank / StMWVT 2002 / Pretre et al. 2004 / Schenler et al. 2008 / BGR 2010 / eigene Erhebungen

4.3 Wertefunktionen der Indikatoren

Um einen Gesamtindex für eine abschließende Bewertung der einzelnen Technologien zu bilden, ist es notwendig, die individuellen Merkmalsausprägungen in abstrakte Nutzenwerte zu transformieren. Hierzu ist für jeden Indikator eine Werte- bzw. Nutzenfunktion zu bestimmen (vgl. Kapitel V 1.3.2). Alle gewählten Wertefunktionen sind linear interpoliert. Für die Indikatoren Abfallaufkommen nicht radioaktiv (I 1), Energieaufwand (I 2), Flächenbedarf (I 3), Materialeinsatz nicht energetisch (I 4), Abfallaufkommen radioaktiv belastet (I 5), Eutrophierung (I 6), Gesundheitsrisiken (I 7), Treibhausgasemissionen (I 8), Versauerung (I 9) und Schadensausmaß eines Unfalls (I 12) wird x^- mit dem Kriterienwert 0 belegt, x^+ ist durch die höchste Ausprägung aller Alternativen gekennzeichnet.

Der Indikator Abhängigkeit von Energieimporten und geopolitische Faktoren (I 10), gemessen in der Importabhängigkeit der Untersuchungsregion, belegt die minimalen und maximalen Werte mit $x^-=0\%$ bzw. $x^+=100\%$ Importanteil, wiederum mit linearer Interpolation zwischen den Extremwerten. Die Wertefunktion für den Indikator Versorgungszuverlässigkeit (I 11), ausgedrückt durch die jährlichen Volllaststunden einer Technologieoption, verläuft linear zwischen den Werten $x^-=0$ und $x^+=8760$, der maximalen Stundenanzahl pro Jahr. Der Verlauf der Wertefunktion ist dabei umgekehrt, d.h. $z=1$ charakterisiert den geringsten Kriterienwert (x^-) und $z=0$ den größten (x^+). Die Wertefunktionen der letzten beiden Indikatoren Arbeitskräftebedarf (I 13) und Kosten der Energiebereitstellung (I 14) orientieren sich sowohl an den maximalen ($x^+=$ maximaler Kriterienwert aller Alternativen) als auch an den minimalen ($x^-=$ minimaler Kriterienwert aller Alternativen) Werten und folgen so der bandbreitenorientierten Normierung. Beim Arbeitskräftebedarf ist der Verlauf der Wertefunktion wiederum umgekehrt, d.h. der höchste Arbeitskräftebedarf hat den Wert 0, der niedrigste Bedarf den Wert 1.

4.4 Gewichtung: Ergebnisse der Akteursbefragung

Für die Gewichtung der einzelnen Handlungsleitlinien fand eine Akteursbefragung statt. Der stufenweise Aufbau mit drei Aufgaben zur gleichen Fragestellung hat sich dabei bewährt. Sowohl die Bewertung der Handlungsleitlinien anhand der vorgegebenen Skala (Direct Ratio) als auch das Bilden einer Rangfolge wurde von allen Teilnehmern erfüllt. Bei der Zuweisung von Punkten zu den einzelnen Handlungsleitlinien haben vier Personen keine Angaben gemacht, so dass 37 Antworten im Ergebnis des Direct Rating-Verfahrens berücksichtigt sind. Die Ermittlung der Gewichte erfolgte zuerst individuell für alle Befragten, woraus im Anschluss ein Mittelwert gebildet wurde. Dieser soll die kollektive Einschätzung der befragten Gruppe repräsentieren.

Das Ergebnis zeigt eine nahezu homogene Verteilung der Gewichte auf die einzelnen Leitlinien. So beträgt die Differenz zwischen der Leitlinie, die am wichtigsten und der Leitlinie, die am unwichtigsten bewertet wurde nur vier Prozentpunkte beim Direct Ratio-Verfahren und drei bei der Direct Rating-Methode (vgl. Tab. 18). Die annähernd gleich wichtige Einschätzung der Handlungsleitlinien bei diesen Verfahren ist zugleich Bestätigung der Leitlinien, sprechen sie doch die zentralen Aspekte einer nachhaltigen Entwicklung am Energiesektor an. Lediglich bei der Gewichtung mittels der Rangsumme ergibt sich eine Differenz von 11 Punkten. Die Unterschiede zwischen den Gewichtungsverfahren sind vor allem darauf zurückzuführen, dass die Befragten beim Direct Ratio und Direct Rating die Möglichkeiten hatten, Handlungsleitlinien als gleich wichtig einzustufen. Die Bildung einer Rangfolge ließ als einzige Aufgabe die Gleichgewichtung zweier Handlungsleitlinien nicht zu, da die Rangplätze eins bis sechs zu vergeben waren.

Tabelle 18⁸⁹: Gewichtung der Handlungsleitlinien

| | in % | Direct Ratio | Rangsumme | Direct Rating |
|---|---|--------------|-----------|---------------|
| 1 | Bedarfsgerechte Nutzungsqualität und dauerhafte Versorgungssicherheit | 17 | 16 | 18 |
| 2 | Ressourcenschonung | 18 | 20 | 17 |
| 3 | Risikoarmut und Fehlertoleranz | 15 | 11 | 17 |
| 4 | Soziale Verträglichkeit | 16 | 15 | 15 |
| 5 | Umfassende Wirtschaftlichkeit | 19 | 22 | 16 |
| 6 | Umwelt-, Klima- und Gesundheitsverträglichkeit | 16 | 16 | 17 |

Obwohl sich die Handlungsleitlinien durch die hohe Wertschätzung gegenüber jeder einzelnen Leitlinie bestätigen lassen, zeigt das Ergebnis einerseits die Abhängigkeit von der verwendeten statistischen Erfassung. Andererseits lassen sich wertvolle Erkenntnisse für den öffentlichen Dialog zur Gestaltung der zukünftigen Energieversorgung gewinnen. Die Bezahlbarkeit der Energieversorgung, abgefragt durch die Leitlinie der umfassenden Wirtschaftlichkeit, wird stets höher bewertet als die soziale Verträglichkeit. Diese Leitlinie ist im Konzept dahingehend spezifiziert, dass eine nachhaltige Energieversorgung zukunftsfähige Arbeitsplätze schafft und zugleich eine breite gesellschaftliche Akzeptanz erfährt. Dementsprechend sind den Befragten die individuellen Folgen, die Bezahlbarkeit der Stromkosten, tendenziell wichtiger als volkswirtschaftliche Aspekte. Ferner nimmt auch die Versorgungssicherheit einen hohen Stellenwert ein, was sich z.B. im Vergleich der Handlungsleitlinien eins oder zwei mit der umweltgerechten und gesundheitsverträglichen Energieversorgung zeigt (vgl. Tab. 18).

Die Tendenz, eigene Belange, wenn auch nur geringfügig höher zu gewichten, legt eine personenbezogene Argumentation in der gesellschaftlichen Diskussion nahe. Auch wenn z.B. die

⁸⁹ Die Summe aller Gewichte ergibt 100%. Abweichende Angaben in der Tabelle sind auf Rundungsfehler zurückzuführen. Für die Indexberechnung wurden die exakten Werte verwendet.

soziale Verträglichkeit als wichtig erachtet wird, ist dem jeweiligen Bürger zuerst das Vertrauen in eine zuverlässige oder bezahlbare Energieversorgung zu geben, um ihn von den erforderlichen Maßnahmen zu überzeugen. Dies bestätigen auch die Erfahrungen des Autors bei der kommunalen Energieberatung oder der Moderation verschiedener Bauprojekte in der Untersuchungsregion. Einzig die Handlungsleitlinie Risikoarmut und Fehlertoleranz lässt diesen Rückschluss aus der Befragung nicht zu. Das Risiko der gesundheitlichen Gefährdung der eigenen Personen durch eine Energieanlage ist häufig nur abstrakt fassbar und erzeugt erst dann eine emotionale Reaktion, wenn die Gefahr konkretisiert wird. So z.B. bei Windkraftanlagen, deren Gefahrenpotenzial für viele Personen erst dann eine Rolle spielt, wenn sich die Anlage im eigenen Lebensumfeld befindet oder dort geplant ist.

4.5 Indexwerte und Gesamtergebnis

Mit Hilfe der Indikatorenwerte, den Wertefunktionen und den Gewichtungsfaktoren kann ein Gesamtindex für jede Referenzanlage gebildet werden. Hierzu ist eine Umwandlung der Indikatorenwerte, orientiert an den Wertefunktionen, in aggregierbare Nutzwerte mit anschließender Gewichtung durchzuführen. Die Gewichtung erfolgt anhand der hierarchischen Struktur des Bewertungsmodells und den ermittelten Gewichten der Handlungsleitlinien. Wegen der unterschiedlichen Gewichtungsvarianten sind mehrere Indexwerte berechnet, darunter auch ein ungewichteter Index (vgl. Tab. 19). Sie sollen einen Vergleich der Berechnungswege erlauben. In allen Fällen handelt es sich um ein additives Verfahren der Indexbildung.

Tabelle 19: Indexwerte und Rangplätze der analysierten Technologien

| Nutzenwerte bzw. Rangplätze | Indexwerte | | | | Rangplatzierungen | | | |
|-------------------------------------|-----------------------------|---|--|--|-------------------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| | additiv unge- wichtet | additiv gewichtet Direct Ratio | additiv gewichtet Rang- summe | additiv gewichtet Direct Rating | Rang additiv unge- wichtet | Rang Direct Ratio | Rang Rang- summe | Rang Direct Rating |
| Biogasanlage | 2,14 | 0,36 | 0,38 | 0,35 | 8 | 8 | 9 | 7 |
| Biomasseheizkraftwerk | 1,76 | 0,32 | 0,35 | 0,29 | 5 | 5 | 6 | 5 |
| Photovoltaik-Dachanlage | 1,66 | 0,29 | 0,30 | 0,27 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Photovoltaik- Freiflächenanlage | 1,97 | 0,34 | 0,35 | 0,32 | 6 | 6 | 8 | 6 |
| Wasserkraft Kleinwasserkraftwerk | 1,01 | 0,16 | 0,16 | 0,15 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Wasserkraft Laufwasserkraftwerk | 1,32 | 0,21 | 0,20 | 0,21 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Windkraftanlage | 1,16 | 0,20 | 0,20 | 0,19 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Atomkraftwerk | 3,01 | 0,48 | 0,44 | 0,50 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Erdgaskraftwerk | 2,15 | 0,36 | 0,35 | 0,35 | 9 | 9 | 7 | 8 |
| Kohlekraftwerk | 2,12 | 0,35 | 0,34 | 0,35 | 7 | 7 | 5 | 9 |

Bei den Rangplätzen der Technologien zeigt sich eine weitgehende Übereinstimmung auf den ersten Plätzen unabhängig der gewählten Gewichtungsmethode. Der additiv ungewichtete Index entspricht dabei einer Gleichverteilung der Gewichte und ist damit ähnlich den Ergebnissen von Direct Ratio- und Direct Rating-Verfahren. Lediglich bei der Rangsumme führen die größeren Gewichtungsunterschiede zu einer abweichenden Rangordnung der Technologien, welche allerdings ebenfalls nur die hinteren Plätze betrifft. So belegen die Technologien Kleinwasserkraftwerk, Windkraftanlage, Laufwasserkraftwerk und Photovoltaik-Dachanlage in allen Indexwerten die ersten vier Plätze, woraus sich auf einen großen Abstand zu den anderen Technologien schließen lässt. In der Summe aller 14 Indikatoren weisen sie die besten Eigenschaften hinsichtlich einer nachhaltigen Entwicklung auf.

Der Vergleich von fossilen bzw. nuklearen Technologien mit erneuerbaren Energien zeigt ein klares Ergebnis zugunsten der Erneuerbaren. Die vorderen Rangplätze werden ausschließlich von diesen Energien eingenommen. Neben der Wasser- und Windkraft sowie der Photovoltaik-Dachanlage ist das Biomasseheizkraftwerk auf Platz fünf zu ergänzen. Bezieht man sich auf das Direct Rating, so folgen die Photovoltaik auf Freiflächen und die Biogasanlage auf den nächsten Plätzen. Erst im Anschluss daran kommen das Erdgas- und Kohlekraftwerk. Atomenergie nimmt den letzten Platz ein, was vor allem auf die Schwächen in den Leitlinien Risikoarmut und Fehlertoleranz sowie sozialer Verträglichkeit zurückzuführen ist.

Das Kleinwasserkraftwerk besitzt bei vielen Indikatoren den Bestwert und ist deshalb unabhängig der Gewichtungsmethode stets als erste Technologie für den Untersuchungsraum zu befürworten. Im Vergleich zu den übrigen Referenzanlagen zeichnet sie sich durch günstige Indikatorenwerte beim Abfallaufkommen, dem kumulierten Energieverbrauch sowie dem Eutrophierungs- und Versauerungspotenzial aus. Zusätzlich werden Stromgestehungskosten auf dem Niveau der Atom- und Kohlekraftwerke erzielt. Einzige Schwäche ist der geringe spezifische Arbeitskräftebedarf, welcher in dieser Analyse aufgrund der geringen Wertschöpfung negativ bewertet wurde, aus technologischer und ökonomischer Sicht jedoch eine effiziente Produktion andeutet.

Windenergie und Laufwasserkraftwerke liegen mit den Plätzen zwei und drei nahezu gleichauf. Beide erzielen gute Werte bei den Indikatoren Energieaufwand, Eutrophierung, Versauerung und Treibhausgasemissionen. Schwächen der Windenergie sind eine geringe Volllaststundenzahl sowie im Mittelfeld liegende Stromgestehungskosten. Das analysierte Laufwasserkraftwerk befindet sich bei fast allen Indikatoren in der Spitzengruppe, mit Ausnahme eines hohen Wertes beim Schadensausmaß eines Unfalls. Die Stromgestehungskosten sind zusammen mit denen des Kleinwasserkraftwerks die geringsten aller erneuerbarer Energien und sind mit fossilen Kraftwerken

vergleichbar. Wie das Kleinwasserkraftwerk bietet das Laufwasserkraftwerk aber geringes Potenzial für Beschäftigung.

Die Photovoltaik und Bioenergie wechseln sich im Mittelfeld ab. Am besten schneidet aus dieser Gruppe die Photovoltaik-Dachanlage ab, nimmt sie doch beim Flächenverbrauch die Spitzenposition ein und besitzt ein geringes Eutrophierungspotenzial. Klare Defizite weist die Dachflächenanlage bei den hohen Stromgestehungskosten und den geringen jährlichen Volllaststunden auf. Gerade im Bereich der Gestehungskosten zeigt die Photovoltaik wegen kostengünstiger Produktion und verbesserten Wirkungsgraden aktuell jedoch große Fortschritte. Die Investitionskosten und mit ihnen die Stromgestehungskosten sinken stärker als erwartet, wodurch die Photovoltaik in diesem Nachhaltigkeitsaspekt zusehends konkurrenzfähiger wird. Die Vorzüge des Biomasseheizkraftwerks sind ein großes Beschäftigungspotenzial und ein geringes radioaktives Abfallaufkommen. Demgegenüber stehen ein hohes nicht radioaktives Abfallaufkommen und ein hohes Eutrophierungspotenzial. Der Stromgestehungspreis ist mit 40 Cent sehr teuer. Wie bereits erwähnt sind in der Literatur diesbezüglich auch wesentlich geringere Zahlen zu finden. Zudem werden Biomasseheizkraftwerke fast ausschließlich in Kraft-Wärme-Kopplung betrieben, so dass die Gesamtenergiegestehungskosten (Strom und Wärme) deutlich niedriger liegen.

Die Photovoltaik-Freiflächenanlagen zeichnen sich durch einen guten Gesamtwert der Leitlinie Umwelt-, Klima- und Gesundheitsverträglichkeit sowie durch ein geringes Risikopotenzial aus. Defizite gegenüber den anderen Referenzanlagen hat die Technologie durch hohe Stromgestehungskosten sowie bei der bedarfsgerechten Bereitstellung von Energie. Die Entwicklung der Stromgestehungskosten ist gleichfalls zur Dachanlage jedoch sehr positiv zu bewerten. Die Biogasanlage, ausschließlich mit nachwachsenden Rohstoffen (v.a. Mais) betrieben, besitzt ausgeprägte Vorzüge aber auch gravierende Nachteile. Zusammen mit der Atomenergie hat sie den besten Indikatorwert bei der Handlungsleitlinie bedarfsgerechte Nutzungsqualität und erzielt gute Werte in den Bereichen Risikoarmut und Wirtschaftlichkeit. Diese Vorteile werden jedoch durch schlechte Werte bei der Ressourcenschonung und Umwelt-, Klima- und Gesundheitsverträglichkeit kompensiert. Zu nennen sind ein hohes Abfallaufkommen, ein großer Flächenbedarf, ein hoher nicht energetischer Materialaufwand sowie ein großes Versauerungspotenzial. Die mannigfachen technologischen Möglichkeiten im Bereich der Biogaserzeugung und -verwendung legen eine Ausweitung der Bewertung auf weitere Techniken nahe. Wesentlich hierbei ist das verwendete Gärsubstrat. Nutzt man anstelle von nachwachsenden Rohstoffen z.B. biotische Reststoffe wie etwa Gülle, so ergeben sich gänzlich neue Indikatorenwerte bzw. veränderte Ökobilanzen.

Fast identische Ergebnisse erzielen die Technologien Erdgaskraftwerk und Kohlekraftwerk. Für beide sprechen die geringen Stromgestehungskosten sowie der geringe Flächenbedarf⁹⁰. Allerdings besitzen sie, im Speziellen die Kohlekraft, die höchsten CO₂-Emissionen je Energieeinheit, die es aufgrund der drohenden Klimaerwärmung zu vermeiden gilt⁹¹. Die Atomenergie polarisiert mit ihren Werten wie keine andere Energieform. Klare Vorteile sind ein geringes nicht radioaktives Abfallaufkommen, wenig Flächenbedarf, geringe Treibhausgasemissionen, hohe Volllaststundenanzahl und günstige Stromgestehungskosten. Bei den genannten Indikatoren befindet sich die Atomkraft stets in der Spitzengruppe oder belegt sogar den besten Platz. Gleichzeitig ist die Atomenergie diejenige Technologie mit dem größten atomaren Abfallaufkommen, dem höchsten kumulierten Energieaufwand und dem größten Risikopotenzial bei einem Unfall. Zusammenfassend zeigt die Analyse somit eine klare Tendenz zugunsten der Wasserkraft, Windenergie, Photovoltaik und Bioenergie.

4.6 Kritische Reflexion der Technologiebewertung

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit waren empirische Untersuchungen in Form von Messungen oder neuen Lebenszyklusanalysen wegen deren eigenständiger Thematik zur Quantifizierung der Indikatoren nicht vorgesehen. Die verwendeten Daten stammen aus entsprechenden Datenbanken oder der einschlägigen Literatur. Diese Vorgehensweise birgt die Schwierigkeit, die geforderten Raum- und Technologiebezüge herzustellen. Die Abhängigkeit der Indikatorenwerte von regionalen Gegebenheiten ergibt sich aus den unterschiedlichen Standortqualitäten und –ansprüchen der Technologien. So ist z.B. die Errichtung einer Windkraftanlage in schwierig zugänglichem Terrain mit einem größeren Aufwand verbunden als in bereits erschlossenen Gebieten. Ebenso hängt das Potenzial – im Beispiel der Windkraft von den Windgeschwindigkeiten – vom jeweiligen Standort ab. Die Bewertung müsste so für alle Alternativen durchgeführt werden, was eine regionale Analyse im Unterschied zu einer konkreten Anlagenplanung nicht leisten kann. Bei der Quantifizierung wurde versucht, diese Raumabhängigkeit soweit als möglich zu beachten, es bleiben aber vielfach Durchschnittsangaben.

Der Technologiebezug der Bewertung ist evident, kann doch erst nach Definition des Bewertungsgegenstandes dessen Analyse durchgeführt werden. Dies birgt jedoch aufgrund der Technologievielfalt im Energiesektor und der Pluralität einzelner Erzeugungsformen (z.B. Bioenergie) Probleme in der praktischen Anwendung. Verändert sich ein Anlagenparameter, muss folglich auch die Bewertung wiederholt werden. Um dieses Problem zu beheben, bedient man sich häufig – so auch in dieser Arbeit – Durchschnittsangaben, welche die jeweils analysierte Technologie

⁹⁰ Analysiert wurde nur der spezifische Betriebsflächenbedarf.

⁹¹ Bei beiden Technologien ist CCS nicht berücksichtigt.

repräsentativ beschreiben. Gleichzeitig sind technische Innovationen zu berücksichtigen. Sinken z.B. wie bei der Photovoltaik die Investitionskosten, so verändern sich auch die Stromgestehungskosten, wodurch sich gegebenenfalls die Rangfolge aller Technologien verändern kann.

Die überschaubare Anzahl an Indikatoren einerseits und die Dokumentation der verwendeten Angaben andererseits sollen zu einer transparenten Darstellung beitragen. Da die Forschungsarbeit zur Quantifizierung – mit Ausnahme der Indikatoren Flächenbedarf und Stromgestehungskosten – keine eigenen Erhebungen durchgeführt hat, ist sie auf die Nutzung bestehender Daten einschließlich deren Annahmen angewiesen. Obwohl die Raum- und Technologiebezüge mit dem Programm GEMIS weitestgehend hergestellt wurden, bleiben Unsicherheiten bestehen. Im Konzept doppelter Nachhaltigkeit ist es daher jederzeit erwünscht, durch die Definition weiterer Indikatoren oder der Neubewertung bereits verwendeter Indikatoren, einen Beitrag zur Optimierung des Konzeptes zu leisten.

4.7 Zwischenfazit: Nachhaltige Technologien für Niederbayern

Erneuerbare Energien, im Besonderen Wasserkraft und Windenergie, schneiden aus technologischer Sicht für den Regierungsbezirk Niederbayern bezüglich einer nachhaltigen Energieversorgung besser ab als dies fossile bzw. nukleare Kraftwerke tun. Obwohl jede Energieform sowohl Stärken als auch Schwächen hat, zeigt die Technologiebewertung, dass die Erneuerbaren in der Summe viele positive Eigenschaften vereinen. Dennoch bleiben auch sie eine Kompromisslösung. Die erzielte Rangfolge der Technologien gilt als wertvolle Orientierung für die weiteren Schritte zur Umsetzung einer nachhaltigen Energieversorgung, die es im politischen wie gesellschaftlichen Dialog zu beachten gilt. Das Ergebnis der Technologiebewertung zeigt hierbei eine hohe Übereinstimmung mit den Wünschen der befragten Personen, gefragt nach den Energietechnologien, die in Zukunft in ihrer Region vermehrt eingesetzt werden sollen.

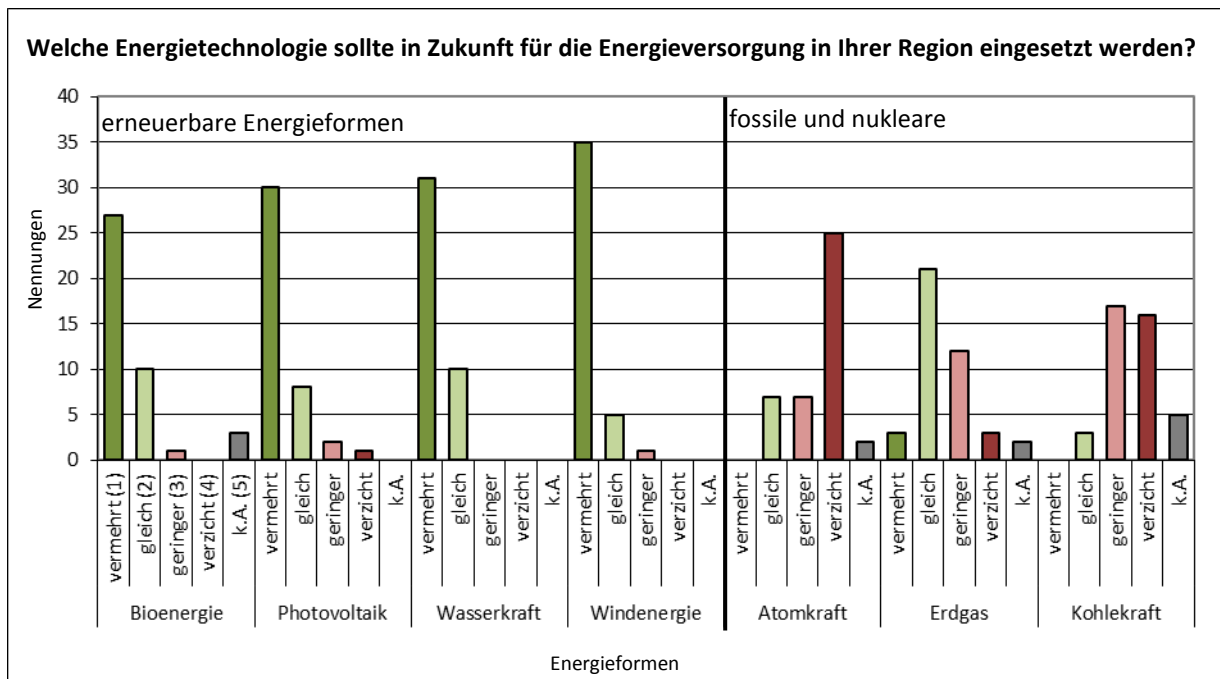


Abb. 24⁹²: Akteursbefragung: Künftiger Einsatz von Energietechnologien

Eine große Mehrheit der Befragten sprach sich bei allen erneuerbaren Energien dafür aus, die Technologien künftig weiter auszubauen (vgl. Abb. 24). Eine vermehrte Nutzung wird am häufigsten bei der Windenergie, gefolgt von der Wasserkraft, gewünscht; also denjenigen Technologien, die sich auch bei der Technologiebewertung ausgezeichnet haben. Folglich ist der umstrittene Ausbau der Windenergie in der Untersuchungsregion nicht nur auf Akzeptanzprobleme zurückzuführen. Antworten zu einer geringeren Nutzung wie heute oder sogar einem gänzlichen Verzicht auf die jeweilige Technologie finden sich bei der Windenergie sowie bei allen anderen erneuerbaren Energien kaum. Das Ergebnis spiegelt so auch die aktuelle gesellschaftliche Diskussion bezüglich der künftigen Energieversorgung wider, indem stets die Forderung nach einer verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien laut wird.

Den positiven Nennungen zu erneuerbaren Energien steht die ablehnende Haltung zur Atomenergie gegenüber. Eine große Mehrheit fordert in Zukunft auf die Atomenergie gänzlich zu verzichten oder sie zumindest in geringerem Umfang einzusetzen. Dieses Ergebnis ist sicherlich geprägt durch den Atomunfall in Fukushima und die einhergehende mediale Berichterstattung. Weniger deutlich aber dennoch mehrheitlich skeptisch wird der Einsatz von Kohlekraftwerken gesehen. Es überwiegt der Wunsch den Kohleanteil zukünftig zu verringern. Erdgas ist die einzige Energieform auf Seiten der fossilen bzw. atomaren Kraftwerke mit einer zustimmenden Bewertung. Das positive Image der Technologie bezüglich Umweltverträglichkeit und die bei Energieexperten hochgeschätzte

⁹² Dieses Ergebnis kann durch eine gleichlautende Befragung im Rahmen des Forschungsprojektes „Energierategie Zellertal“, an welchem der Autor maßgeblich beteiligt ist, in ähnlicher Weise bzw. Deutlichkeit bestätigt werden. Die Energierategie ist ein gemeinsames Forschungsprojekt der HDU Deggendorf und der Universität Passau und wird vom Amt für Ländliche Entwicklung Niederbayern gefördert.

Spitzenlastfähigkeit sorgen dafür, dass die Mehrzahl der Akteure angab, diese Technologie gleichbleibend zu verwenden. Einen weiteren Ausbau bescheinigen sie aber auch der Erdgasnutzung nicht.

Aus der Technologiebewertung bleibt abschließend die Erkenntnis, dass erneuerbare Energien für die Gestaltung einer nachhaltigen Energieversorgung im Regierungsbezirk Niederbayern bessere Eigenschaften aufweisen als fossile oder nukleare Kraftwerke. Mit den Aussagen der Befragten kann dieses Ergebnis zusätzlich gestützt und eine Fokussierung auf erneuerbare Energien gerechtfertigt werden. Die resultierende Reihenfolge der erneuerbaren Energieformen lautet:

1. Wasserkraft Kleinwasserkraftwerk
2. Windenergie
3. Wasserkraft Laufwasserkraftwerk
4. Photovoltaik-Dachanlage
5. Bioenergie Biomasse
6. Photovoltaik-Freiflächenanlage
7. Bioenergie Biogas

Die natürlichen Voraussetzungen zum Einsatz dieser Technologien sind im Untersuchungsgebiet gegeben und die Referenzanlagen bzw. bereits bestehender Anlagen verdeutlicht deren Realisierbarkeit. Obwohl mit der Abhandlung des ersten Teils der doppelten Nachhaltigkeit somit bereits eine wichtige Aussage über die künftige Energieversorgung in Niederbayern möglich ist, bedeutet dies nicht, dass alleine durch den vermehrten Einsatz erneuerbarer Energien den Anforderungen einer nachhaltigen Energieversorgung Genüge getan wird. Vielmehr müssen diese Technologien nun sinnvoll und ebenfalls orientiert an den Vorgaben einer nachhaltigen Entwicklung in der Region verortet werden.

5. Räumliche Potenzial- und Standortmodellierung

Im Anschluss an die Technologiebewertung wird für die geeigneten Energieformen eine Potenzial- und Standortmodellierung im Regierungsbezirk Niederbayern durchgeführt. Dabei gilt es erneut die Vorgaben der Nachhaltigkeit zu berücksichtigen, indem wie in der Konzeptbeschreibung vorgesehen, bautechnische, ökonomische, ökologische und soziale Flächenrestriktionen modelliert werden. Die Reihenfolge der Modellierung ist durch die Rangfolge der Technologien aus Teil eins vorgegeben. Diese aufgreifend wird die Modellierung mit dem Fokus auf erneuerbare Energien wie folgt durchgeführt: Wasserkraft, Windenergie, Photovoltaik und Bioenergie. Intention der technologiespezifischen Potenzial- und Standortermittlung ist es aufzuzeigen, welchen Beitrag die jeweilige Technologie zu einer autarken Energieversorgung im Regierungsbezirk leisten kann und wo sich deren nachhaltige Standorte befinden. Die Analyse wird solange fortgesetzt, bis eine Eigenversorgung möglich ist. Sollten die erneuerbaren Energieformen dafür nicht ausreichen, wird gegebenenfalls auf fossile bzw. schließlich auch auf Atomenergie zurückgegriffen und eine entsprechende räumliche Modellierung durchgeführt.

5.1 Herkunft und Qualität der Geodaten

Geodaten sind Informationen über Gegenstände oder Phänomene an der Erdoberfläche, die als wesentliches Element einen Raumbezug aufweisen und über Koordinaten (direkt) oder Beziehungen (indirekt) georeferenziert bzw. auf der Erde verortet sind (vgl. hierzu Bill 2010 S. 8ff.). Sie bilden die Grundlage jeder Arbeit mit Geographischen Informationssystemen und bestimmen bei einer Modellierung in entscheidender Weise die Qualität der erzielten Ergebnisse. Dem Aufbau eines geeigneten projektbezogenen Datenbestandes mit zielgerichteter Suche und Auswahl kommt daher größte Bedeutung zu.

Die Geodaten müssen bestimmte Gütekriterien erfüllen, wie z.B. eine ausreichende räumliche Exaktheit bzw. Auflösung, um für das Modellierungsvorhaben geeignet zu sein. Zwar hat sich in den vergangenen Jahren der Bestand an Geodaten mit hoher Auflösung stark vergrößert, allerdings ist ihre Verwendung häufig durch kostenpflichtige Nutzungsrechte reglementiert oder kann teils gänzlich verboten sein (z.B. kleinräumige Netzstrukturen). Die Güte der Daten bemisst sich deshalb erstens daran, ob benötigte Daten bereits vorhanden sind oder neu erstellt werden müssen, ob zweitens bestehende Daten in ein GI-System integrierbar bzw. transformierbar sind und drittens auch rechtlich verwendet werden dürfen.

Speziell für den Energiesektor erkennt man in zunehmendem Maße den Mehrwert und die schlichte Notwendigkeit räumlicher Informationen, weshalb sich dieses Segment sehr dynamisch präsentiert.

Dies trifft vor allem auf Informationen für die flächenintensiven und raumprägenden erneuerbaren Energien zu. So gibt es bereits zahlreiche Dienstleistungen, die mittels Geoinformation über das Thema regenerativer Energien umfassend informieren. Exemplarisch sei auf den „Energieatlas Bayern“ (vgl. StMUG 2011) oder das Portal „EnergyMap.info“ (vgl. DGS e.V. 2011) verwiesen, die für das Untersuchungsgebiet Daten bereitstellen. Für die räumliche Potenzial- und Standortmodellierung sind darüber hinaus weitere Informationen nötig (vgl. Tab. 20), die auch technologiespezifische (z.B. Wirkungsgrade) oder sozio-ökonomische Daten (z.B. Wirtschaftsstruktur) einschließen.

Tabelle 20: Daten der Potenzial- und Standortmodellierung

| Daten | Quelle | Einsatz |
|--|--|---|
| ATKIS BASIS DLM | Bayerische Vermessungsverwaltung | Alle Energietechnologien |
| Abflussdaten | Hochwassernachrichtendienst Bayern / Wasserwirtschaftsämter | Wasserkraft |
| Energieatlas Bayern ⁹³ | Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit | Nachschlagewerk |
| Energiestatistik | Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (StMWIVT) 2011 ⁹⁴ | Energieverbrauch |
| Geländemodell (DGM 25) | Bayerische Vermessungsverwaltung | Alle Energietechnologien |
| Geschützte Gebiete | Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) 2010 ⁹⁵ | Alle Energietechnologien |
| Klimadaten (u.a. mittlere Temperaturwerte und Niederschlagswerte) | Bayerisches Landesamt für Umwelt, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) & Deutscher Wetterdienst (DWD) | Bioenergie, Sonnenenergie und Wasserkraft |
| Orthofotos | Bayerische Vermessungsverwaltung | Alle Energietechnologien |
| Regionalpläne der Planungsregionen 11, 12 und 13 | 11 Regensburg ⁹⁶ / 12 Donau-Wald ⁹⁷ / 13 Landshut ⁹⁸ | Nachschlagewerk |
| Sozio-ökonomische Statistiken (u.a. Statistiken zur Arbeit, Bevölkerung oder Wirtschaft) | Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung 2011 ⁹⁹ | Energieverbrauch |
| Topographische Karte 1:10.000 (TK 10) | Landesamt für Vermessung und Geoinformation Bayern & Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2007 | Nachschlagewerk |
| Mittlere Windgeschwindigkeiten | Deutscher Wetterdienst (DWD) (2011b) | Windenergie |

Die Potenzialmodellierung erfolgt in Rasterform mit einer Rastergröße von 25m, bei Windenergie wegen der Datenverfügbarkeit mit 200m. Zur Standortsuche werden die Eignungs- und Ausschlussgebiete zuerst in Vektorform modelliert und anschließend in eine Rasterdatei mit einer Auflösung von 5m konvertiert. Diese sehr hohe Auflösung wird gewählt, um kleinste infrastrukturelle Einrichtungen wie z.B. Straßen berücksichtigen zu können. Die räumliche Qualität der Daten bleibt abhängig von der verwendeten Datengrundlage, in diesem Fall vom ATKIS Basis DLM.

⁹³ Der Energieatlas Bayern gibt Auskunft über die Strukturen der aktuellen Energieversorgung, zeigt Energiepotenziale auf und informiert umfassend über das gesamte Energiethema (<http://www.energieatlas.bayern.de>).

⁹⁴ Aktuelle Daten zum Energiebedarf veröffentlicht das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie in der Energiebilanz Bayern (<http://www.stmwivt.bayern.de/energie-und-rohstoffe/energieversorgung/energiebilanz/>).

⁹⁵ Bayerisches Landesamt für Umwelt (<http://www.lfu.bayern.de/natur/daten/index.htm>; Download der Dateien am 16.11.2010). Die Daten werden jährlich aktualisiert.

⁹⁶ Homepage des Planungsverbandes Regensburg (<http://www.region-regensburg.de/>)

⁹⁷ Homepage des Planungsverbandes Donau-Wald (<http://www.region-donau-wald.de/>)

⁹⁸ Homepage des Planungsverbandes Landshut (<http://www.region.landshut.org/>)

⁹⁹ Das Bayerische Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung stellt umfangreiche Statistiken zu den einzelnen Kommunen und Landkreisen zur Verfügung (<https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/online/logon>)

5.2 Verwendete Software

Für die räumliche Modellierung von Energiepotenzialen ist ein leistungsfähiges Geographisches Informationssystem notwendig, welches sich für die Aufarbeitung und Analyse raumbezogener Daten eignet. Verwendet werden zwei GIS-Softwarelösungen: Zum einen ArcGIS (ArcMap 9.3.1¹⁰⁰) einschließlich der notwendigen Erweiterungen Spatial-Analyst und 3D-Analyst. ArcMap gestattet komplexe Berechnungs- bzw. Modellierungsverfahren durchzuführen und erlaubt die abschließende Verschneidung von Einzelergebnissen der jeweiligen Technologien zu einer Gesamtbetrachtung. Zudem zeichnet sich die Software durch vielfältige Möglichkeiten der anschaulichen Dokumentation von Ergebnissen (Karten) wie auch von durchgeführten Arbeitsschritten (ModelBuilder) aus. Ergänzend dazu kommt zum anderen die Open Source Software gvSIG zum Einsatz. Ihre Stärken liegen im Bereich der Bearbeitung und Analyse von Vektordaten.

5.3 Der Kriterienkatalog

Der Kriterienkatalog bildet die zentrale Grundlage für die Potenzial- bzw. Standortmodellierung und dient zum einen als inhaltliche und methodische Orientierung, in dem Modellparameter strukturiert anhand der Nachhaltigkeitsdimensionen vorgegeben werden. Er gliedert sich in Anlehnung an den Aufbau der Analyse (vgl. Kapitel V 2.2) in zwei große Bereiche (grün), nämlich dem theoretisch/technischen Energiepotenzial sowie dem nachhaltigen Energiepotenzial, welches sich weiter in die drei Dimensionen Ökonomie, Ökologie und Soziales (blau) unterteilt (vgl. Tab. 21). Zum anderen ist er das wesentliche Medium zur Kommunikation und Interpretation der erzielten Ergebnisse. Die räumliche Analyse, durchgeführt mit GIS, und folglich auch die kartographische Umsetzung basieren ausschließlich auf den Inhalten des Katalogs. Bei den ermittelten Standortkarten zu den einzelnen Energieformen handelt es sich deshalb um kartographische Darstellungen der Kriterien, zu deren Bewertung der Kriterienkatalog unerlässlich ist.

In ihm sind die räumlichen Vorgaben, unterschieden in Eignungs-, Ausschluss-, Restriktions- und Abstandsflächen, für alle analysierten Technologien tabellarisch zusammengefasst.¹⁰¹ Die inhaltliche Definition der gewählten Kriterien geschieht in den Nachhaltigkeitsdimensionen Ökonomie und Ökologie auf Basis der Fachliteratur. Weiße Kästchen deuten an, dass der entsprechende Parameter der einschlägigen Literatur entnommen wurde (vgl. Tab. 21). Lücken, für die keine Literaturangaben zu finden waren, werden durch eigene Annahmen gefüllt und sind hellgrau markiert.

¹⁰⁰ ArcGIS ist ein Produkt der Firma ESRI und sowohl in der Wissenschaft als auch in der Wirtschaft und der öffentlichen Verwaltung häufig verwendet.

¹⁰¹ Die gewählten Vorgaben sind stets mit Fußnoten versehen, die Erläuterungen zu den gewählten Kriteriengrößen beinhalten.

Die Vorgaben innerhalb der sozialen Dimension gehen auf die empirische Befragung verschiedener Akteure (dunkelgrau) zurück. Befragt wurden die gleichen Personen wie bei der Technologiebewertung aus Teil eins der doppelten Nachhaltigkeit. Den Akteuren bot sich die Gelegenheit anzugeben, welche Flächenkategorien ihrer Ansicht nach für die jeweilige Technologie geeignet bzw. ungeeignet sind (vgl. Fragebogen, Anhang Abb. 1). Gleichzeitig konnten auf dem Fragebogen metrische Mindestabstände notiert werden, die bei der Planung von Energieanlagen einzuhalten sind. Die Verknüpfung von Kriterienkatalog und Fragebogen zeigt wiederum die Offenheit des Katalogs und kommt der Notwendigkeit der Integration von Akteuren in den Planungsprozess einer nachhaltigen Energieversorgung nach. Die Akteure erhalten so die Wertschätzung am Planungsprozess beteiligt zu sein und die Handhabe, die Planungen auch mitzugestalten, was sich zumeist in einer gesteigerten Akzeptanz gegenüber den späteren Resultaten widerspiegelt.

Die Auswertung der Antworten erfolgt bei der Eignung von Flächen nach einfacher Mehrheit, d.h. hat sich z.B. eine Mehrheit der 41 befragten Personen für die Eignung einer Fläche ausgesprochen, wird dies auch entsprechend in der Modellierung berücksichtigt. Bei den Mindestabständen wird ein Durchschnittswert aller gegebenen Werte errechnet. Dabei können die Akteure angeben, dass sich eine Energieanlage auch in unmittelbarer Nähe zu einer Flächenkategorie befinden darf. Diese Angabe fließt mit dem Wert 0 in die Berechnung des durchschnittlichen Abstandes ein. Ein unpässlich hoher Abstand – eine Person hat z.B. bei den Abständen zu allen Energieformen durchwegs den Wert von 10.000 Meter angegeben – wird aus Plausibilitätsgründen nicht im Mittelwert berücksichtigt. In den Fußnoten ist auf diesen Sachverhalt hingewiesen. Gibt eine befragte Person an, dass sich z.B. eine Photovoltaik-Freiflächenanlage nicht in unmittelbarer Nähe zu einer Siedlungsfläche befinden darf, definiert aber, wie bei dieser Antwort gefordert, keinen Mindestabstand, wird auch die erste Angabe nicht beachtet. Widersprüchliche oder lückenhafte Angaben können so ausgeklammert werden.


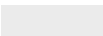
Der vorgeschlagene Kriterienkatalog ist dabei sowohl hinsichtlich der gewählten Kriterien als auch hinsichtlich dessen inhaltlicher Ausgestaltung ausdrücklich offen zu interpretieren. Die Offenheit des Katalogs soll in der Diskussion um eine nachhaltige Energieversorgung die Möglichkeit bieten, z.B. neue Erkenntnisse, technische Innovationen oder veränderte Wahrnehmungsmuster und Befindlichkeiten der Bürger schnell zu erfassen und in die Modellierung zu integrieren. Dadurch wird es möglich, im Sinne der gewählten Kriterien und Inhalte zeitnah optimale Standorte zu erörtern. Der Kriterienkatalog folgt damit der Interpretation von nachhaltiger Entwicklung als ein stets neu zu findender Kompromiss zwischen den verschiedenen Dimensionen.

Tabelle 21: Kriterienkatalog der Potenzial- und Standortmodellierung

| Einflussfaktoren | Technologien | | | | | | | |
|---|---|-------------------|-------------------|-----------------|--|-------------------|--|--------------------------------|
| | Biogas | | Biomasse | | PV-Dach | PV-Fläche | Wasser | Wind |
| | Pot ¹ | StO ² | Pot | StO | | | | |
| Theoretisches und technisches Energiepotenzial | | | | | | | | |
| Energiepotenzial | Maisertrag | | Holzertrag | | Globalstrahlung | Globalstrahlung | Mittlerer Abfluss | Durchschn. Windgeschwindigkeit |
| Ausschlussflächen | Bautechnische Restriktionen | | | | | | | |
| 1 Wohnbaufläche | X | X | X | X | Orientierung am Gebäudebestand und der Gebäudefläche | X | Orientierung am Gewässernetz, Flussprofil und Abflussmenge | X |
| 2 Industrie und Gewerbefläche | X | X | X | X | | X | | X |
| 3 Fläche gemischter Nutzung | X | X | X | X | | X | | X |
| 4 Fläche besonderer funktionaler Prägung ³ | X | X | X | X | | X | | X |
| 5 Sport, Freizeit und Erholung | X | X | X | X | | X | | X |
| 6 Wirtschaftlich genutzte Fläche ⁴ | X | X | X | X | | X | | X |
| 7 Verkehrsinfrastruktur ⁵ | X | X | X | X | | X | | X |
| 8 Gewässerfläche ⁶ | X | X | X | X | | X | | X |
| 9 Sonstige Fläche ⁷ | X | X | X | X | | X | | X |
| 10 Hangneigung | 15° ⁸ | 10° | 35° ⁹ | 10° | | 35° ¹⁰ | | 15° ¹¹ |
| Abstände (in Meter) | Aus bautechnischer Sicht sinnvolle Abstände zur jeweiligen Flächenkategorie | | | | | | | |
| 11 Hohes tech. Bauwerk ¹² (u.a. Freileitung) | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 100 ¹³ | |
| Nachhaltiges Energiepotenzial | | | | | | | | |
| Standortkriterien | Ökonomie | | | | | | | |
| 12 Grenze der Rentabilität | KWK und Transport | KWK und Transport | >950 kWh/kWp | >980 kWh/kWp | >30kW inst. Leistung ¹⁴ | >2000h Vollast | | |
| Eignungsflächen: Orientierung ... | Ökonomische Faktoren | | | | | | | |
| 13 an Straßen (Transport, Zugänglichkeit) | 250/100 | 250/100 | -- | -- | -- | 250/100 | | |
| 14 an Energieverbrauch (KWK) | # | # | -- | -- | -- | -- | | |
| Ausschlussflächen | Ökologie | | | | | | | |
| 15 Biotop / Geschützte Fläche (13d) | X ¹⁵ | X ¹⁶ | (+) ¹⁷ | X ¹⁸ | -- | X ¹⁹ | X ²⁰ | X ²¹ |
| 16 Biosphärenreservat | X ²² | -- | X ²³ | -- | -- | X ²⁴ | X ²⁵ | X ²⁶ |
| 17 FFH-Gebiet | X ²⁷ | X ²⁸ | (+) ²⁹ | X ³⁰ | -- | X ³¹ | X ³² | X ³³ |
| 18 Geschützte Landschaftsbestandteile | + ³⁴ | + ³⁵ | + ³⁶ | + ³⁷ | -- | X ³⁸ | X ³⁹ | X ⁴⁰ |
| 19 Landschaftsschutzgebiet | + ⁴¹ | X ⁴² | + ⁴³ | X ⁴⁴ | -- | X ⁴⁵ | + ⁴⁶ | X ⁴⁷ |
| 20 Nationalpark | X ⁴⁸ | X ⁴⁹ | X ⁵⁰ | X ⁵¹ | -- | X ⁵² | X ⁵³ | X ⁵⁴ |
| 21 Naturdenkmal | X ⁵⁵ | X ⁵⁶ | X ⁵⁷ | X ⁵⁸ | -- | X ⁵⁹ | X ⁶⁰ | X ⁶¹ |
| 22 Naturpark | + ⁶² | + ⁶³ | + ⁶⁴ | + ⁶⁵ | -- | + ⁶⁶ | + ⁶⁷ | + ⁶⁸ |
| 23 Naturschutzgebiet | X ⁶⁹ | X ⁷⁰ | X ⁷¹ | X ⁷² | -- | X ⁷³ | X ⁷⁴ | X ⁷⁵ |
| 24 Ramsar-Gebiet | X ⁷⁶ | X ⁷⁷ | (+) ⁷⁸ | X ⁷⁹ | -- | X ⁸⁰ | X ⁸¹ | X ⁸² |
| 25 SPA-Gebiet | X | X | X | X | -- | X ⁸³ | + ⁸⁴ | X ⁸⁵ |
| Abstände (in Meter) | Aus ökologischer Sicht sinnvolle Abstände zur jeweiligen Flächenkategorie | | | | | | | |
| 26 Biotop / Geschützte Fläche (13d) | -- | 100 | -- | 100 | -- | 100 ⁶⁸ | -- | 100 ⁶⁹ |
| 27 Biosphärenreservat | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 750 ⁷⁰ |
| 28 FFH-Gebiet | -- | 50 | -- | 50 | -- | -- | -- | 1000 ⁷¹ |
| 29 Geschützte Landschaftsbestandteile | -- | 50 | -- | 50 | -- | -- | -- | 250 ⁷² |
| 30 Landschaftsschutzgebiet | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 200 ⁷³ |
| 31 Nationalpark | -- | 100 | -- | 100 | -- | -- | -- | 500 ⁷⁴ |
| 32 Naturdenkmal | -- | 50 | -- | 50 | -- | 50 ⁷⁵ | -- | 100 ⁷⁶ |
| 33 Naturpark | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| 34 Naturschutzgebiet | -- | 100 | -- | 100 | -- | -- | -- | 500 ⁷⁷ |
| 35 Ramsar-Gebiet | -- | 100 | -- | 100 | -- | -- | -- | 1000 ⁷⁸ |
| 36 SPA-Gebiet | -- | 100 | -- | 100 | -- | -- | -- | 1000 ⁷⁹ |
| 37 Fließgewässer (I. Ordnung) | -- | 50 | -- | 50 | -- | 50 ⁸⁰ | -- | 150 ⁸¹ |
| 38 Fließgewässer (II. und III. Ordnung) | -- | 30 | -- | 30 | -- | 30 ⁸² | -- | 50 ⁸³ |
| 39 Stehendes Gewässer | -- | 30 | -- | 30 | -- | 30 ⁸⁴ | -- | 150 ⁸⁵ |
| 40 Wald ⁸⁶ | -- | -- | -- | -- | -- | 30 ⁸⁷ | -- | 200 ⁸⁸ |
| 41 Sonstige Fläche | -- | -- | -- | -- | -- | 25 | -- | 25 |

| Ausschlussflächen | | Soziales | | | | | | | |
|----------------------------|---|---|--------------------|-----------------|----|--------------------|--------------------|---------------------|------------------|
| 42 | Ackerland | + ⁸⁹ | | X ⁹⁰ | -- | -- | X ⁹¹ | -- | + ⁹² |
| 43 | Ackerland nahe bestehender Vorbelastung ⁹³ | -- | | -- | -- | -- | + ⁹⁴ | -- | + ⁹⁵ |
| 44 | Grünland | + ⁹⁶ | | X ⁹⁷ | -- | -- | + ⁹⁸ | -- | + ⁹⁹ |
| 45 | Wald | X ¹⁰⁰ | X | + | X | -- | X ¹⁰¹ | -- | X ¹⁰² |
| 46 | Überschwemmungsgebiet | + | X | + | X | -- | X ¹⁰³ | -- | X ¹⁰⁴ |
| 47 | Sonderanbauformen ¹⁰⁵ | X | | X | | | X | -- | + |
| 48 | Privates Wohngebäude | -- | | -- | | + ¹⁰⁶ | -- | -- | -- |
| 49 | Gewerbl. / industriell genutztes Gebäude | -- | | -- | | + ¹⁰⁷ | -- | -- | -- |
| 50 | Öffentliches Gebäude | -- | | -- | | + ¹⁰⁸ | -- | -- | -- |
| 51 | Kirche | -- | | -- | | + ¹⁰⁹ | -- | -- | -- |
| Abstände (in Meter) | | Aus sozialer Sicht sinnvolle Abstände zwischen Standort des Kraftwerks und jeweiliger Flächenkategorie | | | | | | | |
| 52 | Wohnbaufläche | 960 ¹¹⁰ | 450 ¹¹¹ | -- | -- | 590 ¹¹² | 440 ¹¹³ | 1630 ¹¹⁴ | |
| 53 | Industrie und Gewerbefläche | 20 ¹¹⁵ | 0 ¹¹⁶ | -- | -- | 0 ¹¹⁷ | 0 ¹¹⁸ | 10 ¹¹⁹ | |
| 54 | Fläche gemischter Nutzung | 250 ¹²⁰ | 150 ¹²¹ | -- | -- | 295 ¹²² | 220 ¹²³ | 820 ¹²⁴ | |
| 55 | Sport, Freizeit und Erholung | 510 ¹²⁵ | 190 ¹²⁶ | -- | -- | 100 ¹²⁷ | 200 ¹²⁸ | 560 ¹²⁹ | |
| 56 | Autobahn | 50 | 50 | -- | -- | 25 ¹³⁰ | -- | 130 ¹³¹ | |
| 57 | Bundesstraße | 50 | 50 | -- | -- | 60 ¹³² | -- | 170 ¹³³ | |
| 58 | Sonstige Straße (Kreis- & Gemeindestraße) | 25 | 25 | -- | -- | 70 ¹³⁴ | -- | 230 ¹³⁵ | |
| 59 | Bahninfrastruktur (Gleise und Flächen) | 25 | 25 | -- | -- | 25 ¹³⁶ | -- | 130 ¹³⁷ | |
| 60 | Flugplatz | 500 | 500 | -- | -- | 200 | -- | 1000 ¹³⁸ | |
| 61 | Kulturgut (Schloss, Burg) | 950 ¹³⁹ | 560 ¹⁴⁰ | -- | -- | 750 ¹⁴¹ | 500 ¹⁴² | 1780 ¹⁴³ | |
| 62 | Kirche | -- | -- | -- | -- | -- | -- | 1560 ¹⁴⁴ | |
| 63 | Beschiffbarer Fluss (I. Ordnung) | -- | -- | -- | -- | -- | + ¹⁴⁵ | -- | |
| 64 | Großes Fließgewässer (I. Ordnung LR) | -- | -- | -- | -- | -- | + ¹⁴⁶ | -- | |
| 65 | Kleines Fließgewässer (II. Ordnung) | -- | -- | -- | -- | -- | + ¹⁴⁷ | -- | |
| 66 | Bach (III. Ordnung) | -- | -- | -- | -- | -- | X ¹⁴⁸ | -- | |

- X = Ausschluss
+ = kein Ausschluss
(+) = Restriktion
-- = keine Angabe
= Beachtung

-  = aus der empirischen Befragung
 = Annahme / Berechnung

¹ Pot = Potenzial der Bioenergie, d.h. diese Kategorie bezieht sich auf die Möglichkeiten der Biomassegewinnung

² StO = Standort der Bioenergie, d.h. diese Kategorie bezieht sich auf den Standort der Bioenergiegewinnung

³ Einschließlich der Flächenkategorie Friedhof

⁴ Wirtschaftlich genutzte Flächen: Halde, Hafenbecken, Bergbaubetrieb, Tagebau, Grube und Steinbruch

⁵ Verkehrswege: Autobahn, Bundesstraße, Kreisstraße, Gemeindestraße, Verkehrsflächen (Parkplatz, Gleisanlagen), Bahngleise und Flugplatz

⁶ Gewässerflächen: Fließendes Gewässer, stehendes Gewässer und sonstige Gewässerflächen

⁷ Sonstige Flächen: Gehölz, Heide, Moor, Sumpf, Unland, vegetationslose Fläche, Fläche zur Zeit unbestimmbar

⁸ Mittelböck et al. (2006, S. 37): 35°

⁹ Mittelböck et al. (2006, S. 37): 35°

¹⁰ Mittelböck et al. (2006, S. 37): 45° / Kallmünzer (2008, S. 99): 40°

¹¹ Ehrenreich et al. (2005, S. 19): 15° / Mittelböck et al. (2006, S. 40): 15°

¹² Strommasten, Überlandleitungen und sonstige Masten

¹³ Schaller et al. (2004, S. 21): 100m / Ehrenreich et al. (2005, S. 18): 100m / Planungsverband Donau-Wald (2011, S. 2): 300m

¹⁴ Bezieht sich auf den Neubau eines Kleinwasserkraftwerkes. Bestehende Anlagen bzw. Wiederinstandgesetzte Anlagen können auch bei einer kleineren Leistung bereits wirtschaftlich rentabel sein.

¹⁵ Biotopflächen stehen für den Anbau von Mais nicht zur Verfügung.

- 16 vgl. Photovoltaik-Freiflächenanlagen, Wasserkraft und Windenergie
- 17 Die Bewirtschaftung von Biotop-Gebiet wird nur mit der Hälfte der durchschnittlichen Erträge angenommen.
- 18 vgl. Photovoltaik-Freiflächenanlagen, Wasserkraft und Windenergie
- 19 NABU & UVS (2005) / Leicht (2006, S. 119) / Musiol (2006, S. 116) / ARGE (2007, S. 48) / Günnewig et al. (2009, S. 11)
- 20 Bunge et al. (2001, S. 25f.)
- 21 Ratzbor et al. (2005, S. 28) / Breuer (2006, S.109; Breuer verwendet die Quelle Niedersächsischer Landkreistag 2005) / NLT (2011, S. 8) / Planungsverband Donau-Wald (2011, S. 3)
- 22 Mengel et al. (2010, S. 94)
- 23 vgl. Biogas, Photovoltaik-Freiflächenanlagen, Wasserkraft und Windenergie
- 24 NABU & UVS (2005) / Leicht (2006, S. 119) / Musiol (2006, S. 116) / ARGE (2007, S. 48) / Günnewig et al. (2009, S. 11)
- 25 Bunge et al. (2001, S. 26)
- 26 Ratzbor et al. (2005, S. 28) / Breuer (2006, S.109) / NLT (2011, S. 8)
- 27 FFH Gebiete stehen für eine intensive landwirtschaftliche Nutzung durch Maisanbau nicht zur Verfügung.
Mengel et al. (2010, S. 96)
- 28 vgl. Biogas, Photovoltaik-Freiflächenanlagen, Wasserkraft und Windenergie
- 29 Die Bewirtschaftung im FFH Gebiet wird nur mit der Hälfte der durchschnittlichen Erträge angenommen.
- 30 vgl. Biogas, Photovoltaik-Freiflächenanlagen, Wasserkraft und Windenergie
- 31 NABU & UVS (2005) / Leicht (2006, S. 119) / Musiol (2006, S. 116) / ARGE (2007, S. 48) / Günnewig et al. (2009, S. 11)
- 32 Bunge et al. (2001, S. 15 und 26)
- 33 Ratzbor et al. (2005, S. 28): Restriktionsgebiet / Breuer (2006, S.109) / NLT (2011, S. 8) / Planungsverband Donau-Wald (2011, S. 3) sowohl Restriktions- als auch Ausschlusskriterium
- 34 Mengel et al. (2010, S. 96)
- 35 vgl. Biogas
- 36 NABU & UVS (2005) / Leicht (2006, S. 119) / Musiol (2006, S. 116) / ARGE (2007, S. 48) / Günnewig et al. (2009, S. 11)
- 37 vgl. Photovoltaik-Freiflächenanlagen und Windenergie
- 38 Ratzbor et al. (2005, S. 28) / NLT (2011, S. 8)
- 39 Mengel et al. (2010, S. 95)
- 40 vgl. Biogas
- 41 ARGE (2007, S. 48)
- 42 Bunge et al. (2001, S. 26)
- 43 Ratzbor et al. (2005, S. 28): Restriktionsgebiet / Breuer (2006, S.109) / NLT (2011, S. 8) / Planungsverband Donau-Wald (2011, S. 3)
- 44 Ziel von Nationalparks ist es eine natürliche Entwicklung ohne Eingriffe des Menschen zu ermöglichen. Auch wenn einzelne Gebiete gepflegt werden, erfolgt ein Ausschluss dieser Flächen für den Anbau von Energiemais.
Mittelböck et al. (2006, S. 37) / Mengel et al. (2010, S. 94)
- 45 vgl. Photovoltaik-Freiflächenanlagen, Wasserkraft und Windenergie
- 46 Mittelböck et al. (2006, S. 37)
- 47 NABU & UVS (2005) / Leicht (2006, S. 119) / Musiol (2006, S. 116) / Mittelböck et al. (2006, S. 39) / ARGE (2007, S. 48) / Günnewig et al. (2009, S. 11)
- 48 Bunge et al. (2001, S. 26) / Mittelböck et al. (2006, S. 38)
- 49 Ratzbor et al. (2005, S. 28) / Breuer (2006, S.109) / Mittelböck et al. (2006, S. 40)
- 50 Mengel et al. (2010, S. 95f.)
- 51 vgl. Biogas, Photovoltaik-Freiflächenanlagen und Wind
- 52 Leicht (2006, S. 119) / Musiol (2006, S. 116) / NABU & UVS (2005) / ARGE (2007, S. 48)
- 53 Ratzbor et al. (2005, S. 28) / NLT (2011, S. 8) / Planungsverband Donau-Wald (2011, S. 3)
- 54 Ratzbor et al. (2005, S. 28): Restriktionsgebiet / Breuer (2006, S.109) / NLT (2011, S. 8)
- 55 In Naturschutzgebieten ist eine extensive Bewirtschaftung z.B. in Form von Grünlandnutzung durch Mad oder Beweidung die Regel. In der Modellierung wird der Maisanbau daher ausgeschlossen. Mengel et al. (2010, S. 93)
- 56 vgl. Photovoltaik-Freiflächenanlagen, Wasserkraft und Windenergie
- 57 Die forstwirtschaftliche Nutzung sieht nur notwendige Pflegemaßnahmen vor. Die Flächen stehen der energetischen Holzgewinnung in der Modellierung deshalb nicht zur Verfügung.
- 58 NABU & UVS (2005) / Leicht (2006, S. 119) / Musiol (2006, S. 116) / ARGE (2007, S. 48) / Günnewig et al. (2009, S. 11)
- 59 Bunge et al. (2001, S. 26)
- 60 Ratzbor et al. (2005, S. 28) / Breuer (2006, S.109) / NLT (2011, S. 8) / Planungsverband Donau-Wald (2011, S. 3)
- 61 WBGU (2009b, S. 57)
- 62 Die Bewirtschaftung von Ramsar-Flächen wird nur mit der Hälfte der durchschnittlichen Erträge angenommen.
- 63 Aufgrund ökologischer Aspekte und meist schlechter Böden ausgeschlossen, vgl. Windenergie.
- 64 Aufgrund ökologischer Aspekte ausgeschlossen.
- 65 Ratzbor et al. (2005, S. 28) / Breuer (2006, S.110) / NLT (2011, S. 9)
- 66 Günnewig et al. (2009, S. 11)
- 67 Ratzbor et al. (2005, S. 28) / Planungsverband Donau-Wald (2011, S. 3)
- 68 Kallmünzer (2008, S. 99): 100m

- 69 Schaller et al. (2004, S. 21): 30m / Ratzbor et al. (2005, S. 29): 100-200m
- 70 Breuer (2006, S.110): 1000m / NLT (2011, S. 10): 500m
- 71 Ratzbor et al. (2005, S. 29): 200-1000m / Breuer (2006, S.110): 1000m / NLT (2011, S. 10): mind. 1200m
- 72 Ratzbor et al. (2005, S. 29): 100-500m
- 73 Schaller et al. (2004, S. 21): 1000m / Breuer (2006, S.110): 1000m / NLT (2011, S. 10): mind. 200m
- 74 Ratzbor et al. (2005, S. 29): 200-1000m / Breuer (2006, S.110): 1000m / NLT (2011, S. 10): 500m / Planungsverband Donau-Wald (2011, S. 3): 1000m
- 75 Kallmünzer (2008, S. 99): 50m
- 76 Schaller et al. (2004, S. 21): 30m / Ratzbor et al. (2005, S. 29): 100-200m
- 77 Schaller et al. (2004, S. 21): 200m / Ratzbor et al. (2005, S. 29): 200-1000m / Breuer (2006, S.110): 1000m / NLT (2011, S. 10): mind. 200m
- 78 Ratzbor et al. (2005, S. 29): 200-1000m / Breuer (2006, S.110): 1000m / NLT (2011, S. 10): mind. 1200m
- 79 Schaller et al. (2004, S. 21): 1000m / Ratzbor et al. (2005, S. 29): 200-1000m / Breuer (2006, S.110): 1000m
- 80 Kallmünzer (2008, S. 99): 50m
- 81 Schaller et al. (2004, S. 21): 150m / NLT (2011, S. 10): mind. 1200m wenn > 10ha
- 82 Kallmünzer (2008, S. 99): 50m
- 83 Schaller et al. (2004, S. 21): 10m / Ehrenreich et al. (2005, S. 18): 150m / NLT (2011, S. 10): mind. 1200m wenn > 10ha
- 84 Kallmünzer (2008, S. 99): 50m
- 85 Schaller et al. (2004, S. 21): 150m / Ehrenreich et al. (2005, S. 18): 150m / NLT (2011, S. 10): mind. 1200m wenn > 10ha
- 86 Wald: Laubholz, Nadelholz, Laub- und Nadelholz
- 87 Kallmünzer (2008, S. 99): 50m
- 88 Schaller et al. (2004, S. 21): 200m / Ratzbor et al. (2005, S. 29): 35-200m / Breuer (2006, S.110): 200m / NLT (2011, S. 10): 200m
- 89 Befragung: 26 Personen gaben an, der Anbau von NaWaRos auf einer Ackerfläche soll erlaubt sein
- 90 Der Anbau von Energieholz (z.B. Pappeln oder Weiden) auf einer Ackerfläche ist nicht berücksichtigt
- 91 Befragung: 14 Personen gaben an, die Errichtung einer Photovoltaikanlage auf einer Ackerfläche soll erlaubt sein
- 92 Befragung: 24 Personen gaben an, die Errichtung einer Windkraftanlage auf einer Ackerfläche soll erlaubt sein
- 93 Vorbelastung ist in der Modellierung definiert als Abschlussfläche zu folgenden Flächenkategorien: Autobahn 110m und Bahninfrastruktur 110m (vgl. EEG), Industrie und Gewerbe 150m sowie wirtschaftlich genutzte Flächen 150m.
- 94 Befragung: 32 Personen gaben an, die Errichtung einer Photovoltaikanlage auf einer Ackerfläche in der Nähe zu einer bestehenden Vorbelastung (Autobahn, Bahn oder Industrie) soll erlaubt sein
- 95 Befragung: 38 Personen gaben an, die Errichtung einer Windkraftanlage auf einer Ackerfläche in der Nähe zu einer bestehenden Vorbelastung (Autobahn, Bahn oder Industrie) soll erlaubt sein
- 96 Befragung: 35 Personen gaben an, der Anbau von NaWaRos auf einer Grünlandfläche soll erlaubt sein
- 97 Der Anbau von Energieholz (z.B. Pappeln oder Weiden) auf einer Grünlandfläche ist nicht berücksichtigt
- 98 Befragung: 22 Personen gaben an, die Errichtung einer Photovoltaikanlage auf einer Grünlandfläche soll erlaubt sein
- 99 Befragung: 34 Personen gaben an, die Errichtung einer Windkraftanlage auf einer Grünlandfläche soll erlaubt sein
- 100 Befragung: 7 Personen gaben an, der Anbau von NaWaRos auf einer Waldfläche sollte erlaubt sein
- 101 Befragung: keine Person gab an, dass Wald für die Errichtung einer Photovoltaikanlage gerodet werden darf
- 102 Breuer (2006, S.110) / NLT (2011, S. 9)
- 103 Befragung: 14 Personen gaben an, dass Wald für die Errichtung einer Windkraftanlage gerodet werden darf
- 104 ARGE (2007, S. 48)
- 104 Planungsverband Donau-Wald (2011, S. 3): Überschwemmungs- und Vorranggebiete als Restriktion
- 105 Sonderanbauformen: Streuobstacker, Hopfen, Streuobstwiese, Gartenland, Baumschule, Weingarten, Obstplantage
- 106 Befragung: 38 Personen gaben an, die Errichtung einer Photovoltaikanlage auf privaten Wohngebäuden zu erlauben
- 107 Befragung: 25 Personen gaben an, die Errichtung einer Photovoltaikanlage dürfe auf einer Kirche erlaubt sein
- 108 Befragung: 41 Personen gaben an, die Errichtung einer Photovoltaikanlage auf öffentlichen Gebäuden zu erlauben
- 109 Befragung: 41 Personen gaben an, die Errichtung einer Photovoltaikanlage dürfe auf einem gewerblich oder industriell genutztem Gebäude erlaubt sein
- 110 Befragung: 6 Personen gaben an, eine Biogasanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Wohnbaufläche befinden, der durchschnittliche gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 960 Meter (min. Wert 0, max. Wert 5.000, aus Plausibilitätsgründen wurde ein Wert mit 10.000 nicht berücksichtigt)
- 111 Befragung: 23 Personen gaben an, ein Biomasseheizkraftwerk dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Wohnbaufläche befinden, der durchschnittliche gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 450 Meter (min. Wert 0, max. Wert 5.000)
- 112 Bayerische Staatsministerium des Inneren (2009, S. 5): Vorgabe der Anbindung an eine geeignete Siedlungseinheit.
- Befragung: 15 Personen gaben an, eine Photovoltaik-Freiflächenanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Wohnbaufläche befinden, der durchschnittliche gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 590 Meter (min. Wert 0, max. Wert 2.000, aus Plausibilitätsgründen wurde ein Wert mit 10.000 nicht berücksichtigt)
- 113 Befragung: 23 Personen gaben an, ein Wasserkraftwerk dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Wohnbaufläche befinden, der durchschnittliche gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 440 Meter (min. Wert 0, max. Wert 2.000, aus Plausibilitätsgründen wurde ein Wert mit 10.000 nicht berücksichtigt)

- 114 Schaller et al. (2004, S. 21): 700m / Ehrenreich et al. (2005, S. 18): 500m / Ratzbor et al. (2005, S. 26): 500-1000m / Mittelböck et al. (2006, S. 40): 500m / Prinz et al. (2009, S. 46): 1000m / Planungsverband Donau-Wald (2011, S. 2): 800m / Befragung: 2 Personen gaben an, eine Windkraftanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Wohnbaufläche befinden, der durchschnittliche gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 1630 Meter (min. Wert 0, max. Wert 5.000, aus Plausibilitätsgründen wurden zwei Werte mit je 10.000 nicht berücksichtigt)
- 115 Befragung: 36 Personen gaben an, eine Biogasanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Industrie- und Gewerbefläche befinden, der durchschnittliche gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 20 Meter (min. Wert 0, max. Wert 500, aus Plausibilitätsgründen wurde ein Wert mit 10.000 nicht berücksichtigt)
- 116 Befragung: 40 Personen gaben an, ein Biomasseheizkraftwerk dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Industrie- und Gewerbefläche befinden, eine Person machte keine Angaben
- 117 Empirische Erhebung: 39 Personen gaben an, eine Photovoltaik-Freiflächenanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Industrie- und Gewerbefläche befinden, zwei Personen machten hierzu keine Angabe
- 118 Befragung: 41 Personen gaben an, ein Wasserkraftwerk dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Industrie- und Gewerbefläche befinden
- 119 Schaller et al. (2004, S. 21): 250m / Planungsverband Donau-Wald (2011, S. 2): 300m
Befragung: 40 Personen gaben an, eine Windkraftanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Industrie- und Gewerbefläche befinden, der durchschnittliche gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 10 Meter (min. Wert 0, max. Wert 300)
- 120 Der Mittelwert der beiden Flächenkategorien „Siedlungsfläche“ und „Industrie und Gewerbefläche“ (960+20) beträgt 490. Wegen der Nutzung von Nahwärmeversorgung wird der Abstand nochmals reduziert auf 250 Meter.
- 121 Mittelwert der beiden Flächenkategorien „Siedlungsfläche“ und „Industrie und Gewerbefläche“ (450+0) beträgt 225. Wegen der Nutzung von Nahwärmeversorgung wird der Abstand nochmals reduziert auf 150 Meter.
- 122 Mittelwert der beiden Flächenkategorien „Siedlungsfläche“ und „Industrie und Gewerbefläche“ (590+0)
- 123 Mittelwert der beiden Flächenkategorien „Siedlungsfläche“ und „Industrie und Gewerbefläche“ (440+0)
- 124 Mittelwert der beiden Flächenkategorien „Siedlungsfläche“ und „Industrie und Gewerbefläche“ (1630+10);
vgl. Schaller et al. (2004, S. 21): 450m / Planungsverband Donau-Wald (2011, S. 2): 500m
- 125 Befragung: 10 Personen gaben an, eine Biogasanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Sport- und Freizeitfläche befinden, der durchschnittliche gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 510 Meter (min. Wert 0, max. Wert 2.000, aus Plausibilitätsgründen wurde ein Wert mit 10.000 nicht berücksichtigt)
- 126 Befragung: 32 Personen gaben an, ein Biomasseheizkraftwerk dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Sport- und Freizeitfläche befinden, der durchschnittliche gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 190 Meter (min. Wert 0, max. Wert 2.000)
- 127 Befragung: 30 Personen gaben an, eine Photovoltaik-Freiflächenanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Sport- und Freizeitfläche befinden, der durchschnittliche gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 100 Meter (min. Wert 0, max. Wert 1.000)
- 128 Befragung: 33 Personen gaben an, ein Wasserkraftwerk dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Sport- und Freizeitfläche befinden, der durchschnittlich gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 200 Meter (min. Wert 0, max. Wert 2.000)
- 129 Schaller et al. (2004, S. 21): 700m / Befragung: 26 Personen gaben an, eine Windkraftanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Wohnbaufläche befinden, der durchschnittlich gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 560 Meter (min. Wert 0, max. Wert 5.000)
- 130 Befragung: 37 Personen gaben an, eine Photovoltaik-Freiflächenanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Autobahn befinden, drei Personen machten keine Angaben und eine Person nannte den Abstand von 50 Metern. Aus Plausibilitätsgründen wird der Abstand auf 25 Meter festgesetzt.
- 131 Schaller et al. (2004, S. 21): 150m / Ehrenreich et al. (2005, S. 18): 200m / Prinz et al. (2009, S. 46): 150m / Planungsverband Donau-Wald (2011, S. 2): 150m (überörtliche Straße)
Befragung: 38 Personen gaben an, eine Windkraftanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Autobahn befinden, der durchschnittlich gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 130 Meter (min. Wert 0, max. Wert 5.000)
- 132 Kallmünzer (2008, S. 99): 50m / Befragung: 33 Personen gaben an, eine Photovoltaik-Freiflächenanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Bundesstraße befinden, der durchschnittlich gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 60 Meter (min. Wert 0, max. Wert 1.000)
- 133 Schaller et al. (2004, S. 21): 150m / Ehrenreich et al. (2005, S. 18): 200m / Prinz et al. (2009, S. 46): 150m / Planungsverband Donau-Wald (2011, S. 2): 150m (überörtliche Straße)
Befragung: 34 Personen gaben an, eine Windkraftanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Bundesstraße befinden, der durchschnittlich gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 170 Meter (min. Wert 0, max. Wert 5.000)
- 134 Befragung: 33 Personen gaben an, eine Photovoltaik-Freiflächenanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu sonstigen Straßen (Gemeinde- und Kreisstraßen) befinden, der durchschnittlich gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 70 Meter (min. Wert 0, max. Wert 1.000)
- 135 Schaller et al. (2004, S. 21): 150m / Ehrenreich et al. (2005, S. 18): 200m / Ratzbor et al. (2005, S. 26): 15-50m / Prinz et al. (2009, S. 46): 150m / Befragung: 31 Personen gaben an, eine Windkraftanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu sonstigen Straßen (Gemeinde- und Kreisstraßen) befinden, der durchschnittlich gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 230 Meter (min. Wert 0, max. Wert 5.000)
- 136 Kallmünzer (2008, S. 99): 50m / Befragung: 37 Personen gaben an, eine Photovoltaik-Freiflächenanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Bahnlinie befinden, drei Personen machten keine Angaben und eine Person nannte den Abstand von 50 Metern. Aus Plausibilitätsgründen wird der Abstand auf 25 Meter festgesetzt.
- 137 Schaller et al. (2004, S. 21): 150m / Prinz et al. (2009, S. 46): 150m / Planungsverband Donau-Wald (2011, S. 2): 200m
Befragung: 38 Personen gaben an, eine Windkraftanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einem Bahngleis befinden, der durchschnittlich gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 130 Meter (min. Wert 0, max. Wert 5.000)
- 138 Schaller et al. (2004, S. 21): 1000m / Ehrenreich et al. (2005, S. 18): 1000m / Prinz et al. (2009, S. 46): 1000m
- 139 Befragung: 2 Personen gaben an, eine Biogasanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Sport- und Freizeitfläche befinden, der durchschnittlich gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 950 Meter (min. Wert 0, max. Wert 3.000, aus Plausibilitätsgründen wurden zwei Werte mit je 10.000 nicht berücksichtigt)

- ¹⁴⁰ Befragung: 18 Personen gaben an, ein Biomasseheizkraftwerk dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Sport- und Freizeitfläche befinden, der durchschnittlich gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 560 Meter (min. Wert 0, max. Wert 3.000, aus Plausibilitätsgründen wurde ein Wert mit 10.000 nicht berücksichtigt)
- ¹⁴¹ Befragung: 6 Personen gaben an, eine Photovoltaik-Freiflächenanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einem Kulturgut befinden, der durchschnittlich gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 750 Meter (min. Wert 0, max. Wert 2.000, aus Plausibilitätsgründen wurden zwei Werte mit je 10.000 nicht berücksichtigt)
- ¹⁴² Befragung: 21 Personen gaben an, ein Wasserkraftwerk dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einem Kulturgut befinden, der durchschnittlich gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 550 Meter (min. Wert 0, max. Wert 2.000)
- ¹⁴³ Befragung: 2 Personen gaben an, eine Windkraftanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einem Kulturgut befinden, der durchschnittlich gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 1780 Meter (min. Wert 0, max. Wert 5.000, aus Plausibilitätsgründen wurde ein Wert mit 10.000 nicht berücksichtigt)
- ¹⁴⁴ Befragung: 5 Personen gaben an, eine Windkraftanlage dürfe sich in unmittelbarer Nähe zu einer Kirche befinden, der durchschnittlich gewünschte Abstand aller Befragten beträgt 1560 Meter (min. Wert 0, max. Wert 5.000, aus Plausibilitätsgründen wurde ein Wert mit 10.000 nicht berücksichtigt)
- ¹⁴⁵ Befragung: 37 Personen gaben an, ein Wasserkraftwerk dürfe an einem beschiffbaren Fluss (Gew. I. Ordnung) errichtet werden
- ¹⁴⁶ Befragung: 38 Personen gaben an, ein Wasserkraftwerk dürfe an einem großen Fließgewässer (Gew. I. Ordnung) errichtet werden
- ¹⁴⁷ Befragung: 25 Personen gaben an, ein Wasserkraftwerk dürfe an einem kleinen Fließgewässer (Gew. II. Ordnung) errichtet werden
- ¹⁴⁸ Befragung: 19 Personen gaben an, ein Wasserkraftwerk dürfe an einem Bach (Gew. III. Ordnung) errichtet werden

5.4 Wasserkraft

Die Nutzung von Wasserkraft, allen voran die Kleinwasserkraft, konnte in der Technologiebewertung im Vergleich zu den übrigen Optionen gute Werte erzielen. Ihre Stärken liegen u.a. im Bereich der sehr geringen Schadstoff- und CO₂-Emissionen sowie der zuverlässigen und kostengünstigen Stromproduktion. Für eine sichere Eigenenergieversorgung bieten Wasserkraftanlagen zudem den Vorteil, grundlastfähig zu sein, d.h. die Stromproduktion von Wasserkraftwerken unterliegt in der Regel nur geringen Schwankungen und ist zeitlich gut vorhersagbar. Die Wasserkraft ist bereits heute eine Stütze der Energieversorgung im Regierungsbezirk Niederbayern und wird auch zukünftig eine bedeutende Rolle einnehmen.

5.4.1 Potenzial der Wasserkraft

Das theoretische Wasserkraftpotenzial bemisst sich nach der zur Verfügung stehenden Wassermenge pro Zeiteinheit und der Fallhöhe des Wassers. Als Fallhöhe bezeichnet man die Höhendifferenz zwischen Wassereinfluss und Wasserauslauf des Kraftwerks. Neben der potenziellen Energie des Wassers trägt auch die kinetische Energie, d.h. die Fließenergie (Geschwindigkeit) einen kleinen Teil zum gesamten Energiepotenzial bei. Aufgrund der schwierigen Erfassung von Fließgeschwindigkeiten auf regionaler Ebene – Einzeluntersuchungen sind hier dringend notwendig – wird vereinfachend nur die potenzielle Energie berücksichtigt. Multipliziert mit dem Wirkungsgrad einer Wasserkraftanlage ergibt sich das technische Potenzial. Die Formel dazu lautet (vgl. hierzu auch Kaltschmitt et al. 2006, S. 83ff.):

$$E_{KWtech} = w * h * g * \eta$$

| | |
|--------------|---|
| E_{KWtech} | = Technisches Energiepotenzial Kleinwasserkraftwerk |
| w | = vorhandene Wassermenge (l/s) |
| h | = Fallhöhe des Wassers (m) |
| g | = Fallbeschleunigung (9,80665 m/s ²) |
| η | = Wirkungsgrad der Wasserkraftanlage |

Die Potenzialermittlung zur Wasserkraft wird analog zu dieser Formel berechnet und sowohl für kleine als auch große Fließgewässer durchgeführt. Als Modellierungsgrundlage dienen Daten des Wasserwirtschaftsamtes Deggendorf zum Oberflächenabfluss sowie ein digitales Geländemodell. Die Ermittlung der Fallhöhe erfolgt bei Kleinwasserkraftwerken punktuell in einem Abstand von 500m Gewässerstrecke bei Gewässern 3. Ordnung und 1.000m bei kleinen Gewässern der 1. und 2. Ordnung. Die großen Flüsse im Regierungsbezirk (Altmühl, Donau, Isar und Inn) sind in 2.500m Abschnitte segmentiert (vgl. hierzu Ingenieurbüro Floecksmühle et al. 2010). Die so erstellten Punkte

erhalten anschließend anhand des DGM 25 eine Höheninformation. Die Fallhöhe ist schließlich die Differenz zwischen zwei aufeinander folgenden Punkten entlang der Gewässerachse. Die gewählten Gewässerabschnitte repräsentieren dabei modellhaft den Stauraum eines Kraftwerks, welcher aufgrund morphologischer Bedingungen in der Ausdehnung stark variieren kann, in der Abschätzung des theoretischen und technischen Wasserkraftpotenzials jedoch als gleich bleibend angenommen wird.

Neben der Fallhöhe ist für das Wasserkraftpotenzial das vorhandene Wasserangebot entscheidend. Dieses wird durch die mittlere Abflussmenge der Bäche und Flüsse bestimmt, weshalb saisonale Abflussschwankungen unberücksichtigt bleiben. Soweit die Einzugsgebiete der Fließgewässer vollständig innerhalb des Regierungsbezirkes liegen, werden die linearen Abflussmengen aus den Daten des Wasserwirtschaftsamtes errechnet. Dies trifft vor allem auf Gewässer der 3. Ordnung zu. Für die großen Flüsse, deren Einzugsgebiet über das Untersuchungsgebiet hinausgeht, werden bekannte Abflussmengen von Pegelmessungen herangezogen (vgl. hierzu Tabelle 22). Zusätzlich zu der räumlichen Modellierung mit GIS wird für die Potenzialbestimmung ein Tabellenkalkulationsprogramm verwendet.

Tabelle 22¹⁰²: Mittlerer Abfluss großer Flüsse in Niederbayern

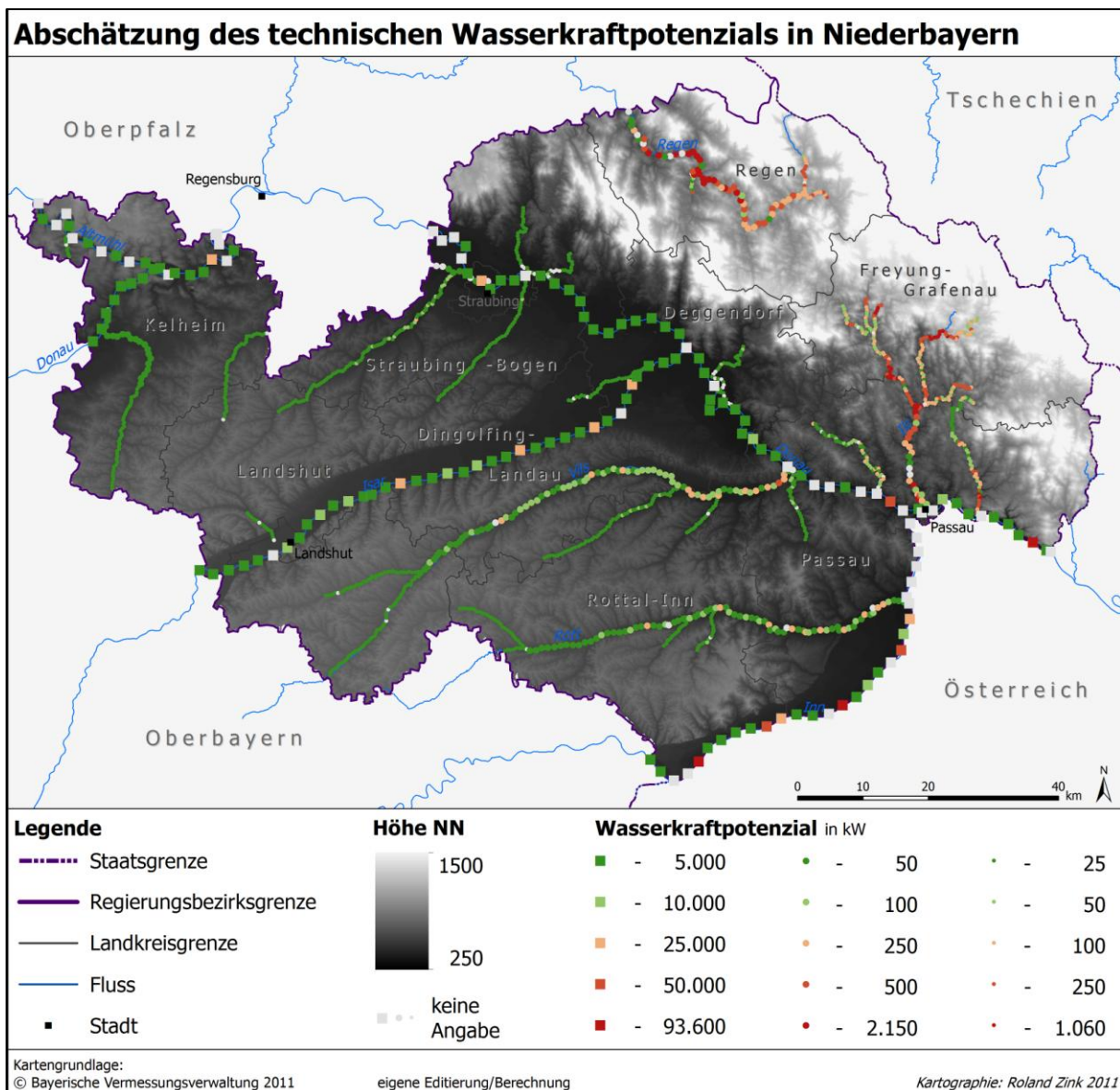
| Fließgewässer | Pegel | MQ (qm/s) |
|---------------|-----------------|-----------|
| Donau | Kelheim | 331 |
| | Oberndorf | 353 |
| | Pfelling | 458 |
| | Hofkirchen | 639 |
| | Achleiten | 1420 |
| Inn | Ingling | 738 |
| Isar | Landshut Birket | 162 |
| | Landau | 168 |
| | Plattling | 174 |

Die Bestimmung des Wasserkraftpotenzials ist aufwendig und bietet nur eine grobe Orientierung, wo sich welche Potenziale befinden. Rückschlüsse auf konkrete Standorte für Wasserkraftwerke sind damit nicht möglich, weshalb auch projektbezogene Untersuchungen für einzelne Anlagen keinesfalls ersetzt werden. Hierzu lässt auch die Datengenauigkeit, z.B. wird die Fallhöhe aus einem DGM25 abgeleitet, keine exakten Aussagen zu. Allerdings ermöglicht die beschriebene Vorgehensweise eine Abschätzung des linearen Wasserkraftpotenzials sowie dessen kartographische Visualisierung, was stets eine wertvolle Kommunikationshilfe für Bürger, Anwohner oder Kommunen darstellt.

Die räumliche Verteilung des Wasserkraftpotenzials für Fließgewässer der 1. und 2. Ordnung folgt der naturräumlichen Zweiteilung des Regierungsbezirkes (vgl. Karte 4). So profitiert Niederbayern durch die wasserreichen Flüsse aus dem Alpenraum (v.a. Donau, Inn und Isar), welche das Tertiärhügelland bzw. das Dungauegebiet durchfließen. Die große Wassermenge kompensiert dabei

¹⁰² Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Hochwassernachrichtendienst (HND) (2011)

die oftmals nur geringen Fallhöhen der Kraftwerke (z.B. Kraftwerk Straubing 6,70m). Entlang des Inns ergeben sich die besten Bedingungen, da dort die Fallhöhen größer sind und der Inn gleichzeitig die größte Wassermenge aller Flüsse im Untersuchungsgebiet führt. Aufgrund der Ableitung von Fallhöhen aus dem DGM sind die bestehenden Anlagen dieser Flüsse in der Potenzialabschätzung sichtbar, was besonders bei den großen Flüssen Donau, Inn und Isar auffällig ist. An der Isar oder am Inn erkennt man die treppenförmige Aufstauung, da in nahezu regelmäßigem Abstand ein hohes Potenzial vorhanden ist. Das dargestellte Potenzial resultiert aus dem Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterwasser eines bestehenden Kraftwerkes.



Karte 4: Abschätzung des technischen Wasserkraftpotenzials in Niederbayern

Bei der Nutzung von Wasserkraft entlang kleinerer Fließgewässer ist der Bayerische Wald begünstigt, was sich entlang des Regens oder der Ilz zeigt (vgl. Karte 4). So weisen die Flüsse dort wegen der größeren Reliefenergie und den daraus resultierenden Fallhöhen sowie den höheren Niederschlags- und Abflusswerten im Vergleich zum Tertiärhügelland deutlich größere technische Potenziale auf. Die

Potenziale sind in ihrer Größenordnung allerdings nicht mit denjenigen entlang der Donau, der Isar oder des Inns vergleichbar.

5.4.2 Nachhaltige Standorte für ein Wasserkraftwerk

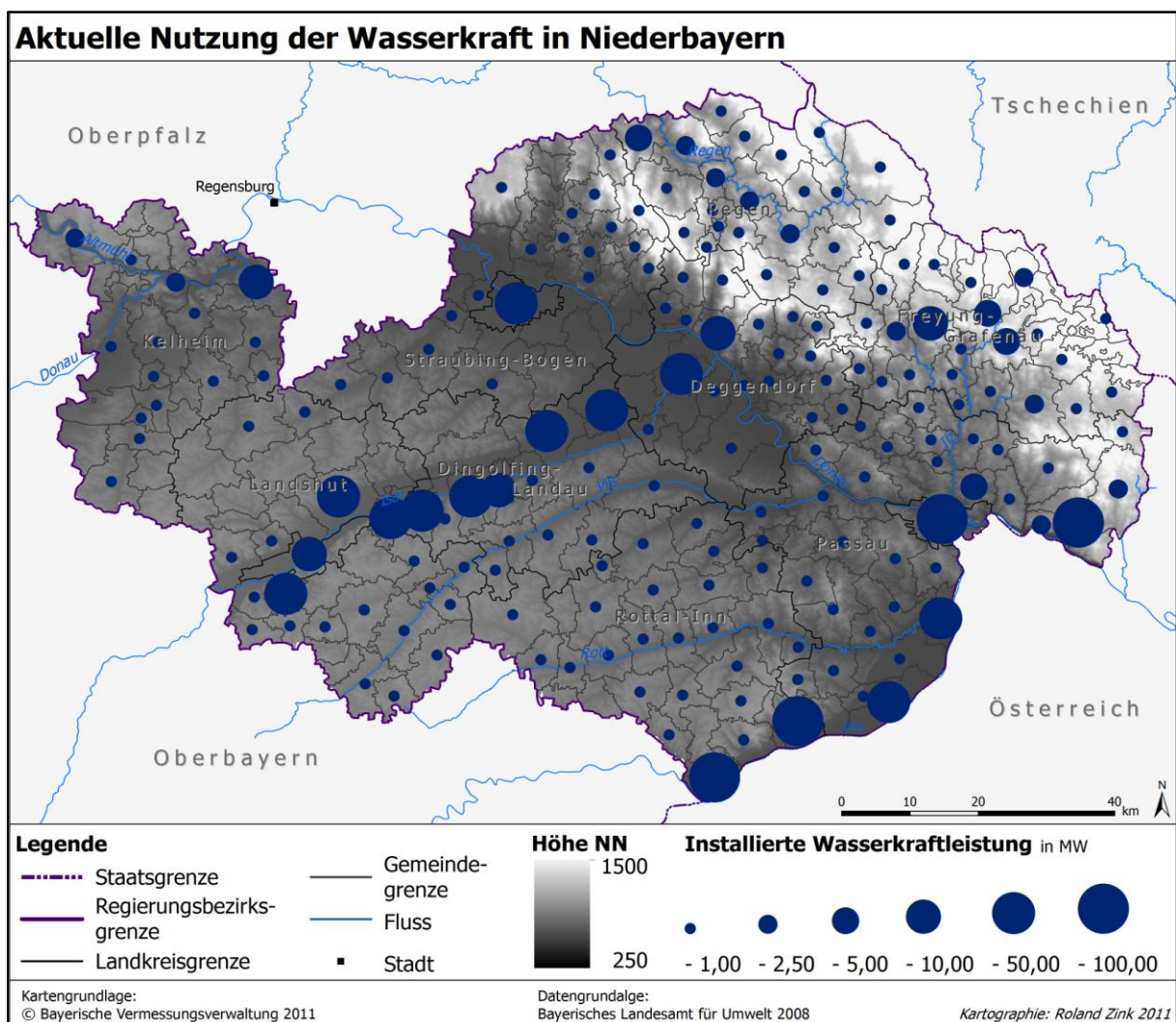
Der Ausbau der Wasserkraft zeigt in besonderer Weise das Spannungsfeld zwischen nachhaltiger Technologie und nachhaltigem Standort, dessen Beachtung durch das Konzept doppelter Nachhaltigkeit zwingend gefordert wird. Obwohl die Technologiebewertung die Vorzüge der Wasserkraft verdeutlicht und gleichzeitig eine hohe Zustimmung der Akteure besteht (vgl. Abb. 24, Kapitel VI 4.7), gestaltet sich die Suche nach weiteren geeigneten Standorten, die den Ansprüchen sämtlicher Dimensionen gerecht werden, schwierig. Die Zustimmung zur Nutzung von Wasserkraft betrifft allerdings nur die Fließgewässer 1. und 2. Ordnung. In der Befragung hat sich eine knappe Mehrheit dafür entschieden, dass Bäche und kleine Fließgewässer (3. Ordnung), die potenziell für Kleinwasserkraftanlagen in Frage kommen, nicht mehr für weitere Kraftwerke erschlossen werden sollen. Mit dieser Einschränkung fällt bereits ein wesentlicher Einsatzbereich der Kleinwasserkraft weg. Übrig bleiben demzufolge lediglich die in Karte 4 abgebildeten Flüsse der 1. und 2. Ordnung. Neubauten von Kleinwasserkraftwerken müssen jedoch nicht kategorisch ausgeschlossen sein, da die Akzeptanz stets von den konkreten Planungen sowie den örtlichen Gegebenheiten beeinflusst ist und zudem eine grundsätzliche Unterstützung für die Technologie besteht. Neben den sozialen Restriktionen wurden in den vergangenen Jahren Baugenehmigungen von Kleinwasserkraftwerken oftmals wegen naturschutzrechtlicher Belange verweigert. Vornehmliche Gründe dafür sind die Eingriffe in das Flussökosystem und deren Auswirkungen auf Flora und Fauna.

Der künftige Ausbau der Wasserkraft ist überdies dadurch eingeschränkt, dass im Regierungsbezirk die Technologie an vielen Stellen bereits genutzt wird. Dies trifft vor allem auf die großen Flüsse zu. Speziell die Isar und der Inn sind im Untersuchungsgebiet entlang des gesamten Flusslaufes energiewirtschaftlich genutzt. Lediglich an der Donau befindet sich ein längerer Abschnitt zwischen Straubing und Vilshofen, in dem sich noch kein Wasserkraftwerk befindet. Der wasserwirtschaftliche Ausbau dieser Strecke ist politisch und gesellschaftlich höchst umstritten, da erhebliche Eingriffe in das Flussökosystem befürchtet werden und der Verlust der besonderen Flusseigenheit droht. Aus energiewirtschaftlicher Sicht ist zudem das geringe Gefälle in diesem Flussabschnitt von Nachteil, weshalb sich auch das energetische Potenzial in Grenzen hält. Bedeutende Wasserkraftpotenziale, die sich durch den Neubau von Anlagen erzielen lassen, erscheinen, mit einzelnen Ausnahmen im Bereich der Kleinwasserkraft, für Niederbayern daher nicht mehr gegeben.¹⁰³

¹⁰³ Pumpspeicherkraftwerke besitzen in der Region durchaus großes Potenzial, sind in der Wasserkraftmodellierung aber nicht berücksichtigt. Ebenso ergeben sich durch Modernisierung bestehender Anlagen Steigerungsmöglichkeiten.

5.4.3 Beitrag der Wasserkraft zur autarken Versorgung

Die guten topographischen sowie naturräumlichen Bedingungen und eine lange Tradition der Wasserkraftnutzung haben zusammen mit der ausgereiften (nachhaltigen) Technologie dazu geführt, dass Wasserkraft in Niederbayern heute schon einen wesentlichen Beitrag zur Energieversorgung leistet. So sind über den gesamten Regierungsbezirk verteilt zahlreiche Kleinwasserkraftwerke – viele Anlagen sind an ehemals handwerklich genutzten Mühlen oder Sägewerken im Zuge von Renovierungs- und Umbauarbeiten entstanden – und auch mehrere große Laufwasserkraftwerke in Betrieb. Für die zukünftige Energieversorgung besitzt die Wasserkraft, auch ohne nennenswerte Neubauten, folglich eine bedeutende Funktion. Nach Auskunft des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (2008) ist im Regierungsbezirk eine elektrische Leistung von ca. 647 MW installiert, wovon etwa 550 MW auf die großen Laufwasserkraftwerke entlang der Donau, der Isar und des Inns entfallen. Insgesamt trägt die Wasserkraft, unter Annahme von durchschnittlich 4.000 bzw. 5.000 Volllaststunden pro Jahr, rund 3.138 Mio. kWh zur Stromversorgung bei, was einen Anteil von 39,9% am gesamten Strombedarf darstellt.



Karte 5: Aktuelle Nutzung der Wasserkraft in Niederbayern

Neben der Vielzahl an kleinen Kraftwerken leisten die Laufwasserkraftwerke an den Flüssen Donau, Isar und Inn mit Abstand den höchsten Beitrag (vgl. Karte 5). Das enorme Wasserkraftpotenzial des Regierungsbezirkes beruht überwiegend auf dieser Anlagenkapazität, wobei es sich an der Donau und am Inn zum Teil um Grenzkraftwerke handelt. Mit Blick auf eine eigenständige Versorgung bietet die Wasserkraft dem Regierungsbezirk Niederbayern gegenüber anderen Regionen damit entscheidende Vorteile. Zum einen stellt das enorme Potenzial eine beachtliche Basis der Stromversorgung dar. Zum anderen kann durch die nahezu permanente Verfügbarkeit von Wasserkraft der Grundlastbereich gesichert werden. Die konstante Stromproduktion ist insbesondere bei einem steigenden Beitrag von Wind- und Sonnenenergie ein relevanter Faktor.

5.5 Windenergie

Die Privilegierung von Windkraftanlagen im Außenbereich durch das BauGB (§ 35 Abs. 1 Nr. 5) steht der baurechtlichen Hoheit einer Gemeinde entgegen, indem die Zustimmung zum Bau eines Windrades seitens der Kommune nicht zwingend notwendig ist. Um Fehlentwicklungen zu vermeiden, ist es daher geboten, raumplanerisch tätig zu werden und eine gezielte Suche von Standorten mit geringem Konfliktpotenzial durchzuführen. Wegen der hohen Raumwirksamkeit von Windkraftanlagen und deren baurechtliche Privilegierung ist hierbei eine überörtliche bzw. interkommunale Flächennutzungsplanung z.B. auf der Ebene eines Planungsverbandes oder – wie in dieser Arbeit – eines Regierungsbezirkes anzuraten. Die politische Vorgabe, Windenergie im Untersuchungsgebiet verstärkt zu nutzen, erzeugt aktuell zusätzliche Spannungen bei der Ausweisung geeigneter Standorte, weshalb auch der zuständige Planungsverband Donau-Wald mit der planerischen Steuerung von Windrädern begonnen hat (vgl. Planungsverband Donau-Wald 2011). Mit dieser Entscheidung wird die Intention der doppelten Nachhaltigkeit bestätigt und gleichfalls eine nachhaltige Standortplanung gefordert.

5.5.1 Theoretisches Potenzial der Windenergie

Das theoretische Potenzial der Windenergie wird primär durch die mittlere Windgeschwindigkeit an einem Standort definiert. Daten zur mittleren Windgeschwindigkeit liegen für Bayern flächendeckend mit einer Rasterauflösung von 200x200m für die Höhen 10, 80 und 140m über Gelände vor und sind im Bayerischen Windatlas publiziert (vgl. StMWIVT 2010b, S. 14ff.)¹⁰⁴. Grundlage dieser Karten sind Winddaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) aus den Jahren 1971 bis 2000 sowie Daten von bestehenden Windenergieanlagen in Bayern der Jahre 2005 bis 2009 (vgl. StMWIVT 2010b, S. 9).

¹⁰⁴ Eine frühere Veröffentlichung mit ausführlichem Kartenmaterial ist der Bayerische Solar- und Windatlas aus dem Jahr 2001. Die darin dargestellten Windverhältnisse beziehen sich auf ein 10jähriges Messverfahren (1980 bis 1989) (vgl. dazu StMWVT 2001a).

Neben dem Bayerischen Windatlas sind überdies im Energieatlas Bayern kartographische Darstellungen zu Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen abrufbar (vgl. StMUG 2011).

Für die Ermittlung des theoretischen Windenergiepotenzials dieser Arbeit werden flächendeckende Daten des DWD mit einer Auflösung von 200x200m und einer Bezugshöhe von 100m über der Erdoberfläche verwendet. Die Werte beruhen auf dem Statistischen Windfeldmodell (SWM) mit 218 Messstationen in Deutschland und beziehen sich auf den Zeitraum 1981 bis 2000. Bei der Interpolation der punktuellen Messwerte fanden unter anderem die Lage, Topographie, Höhe und Landnutzung Berücksichtigung. Kleinräumige Windgegebenheiten wie etwa Berg-Tal-Windsysteme oder Land-Wasser-Systeme sind nicht erfasst. Die Daten geben daher lediglich eine Groborientierung, wo sich geeignete Windverhältnisse für die Nutzung der Windenergie befinden und sind somit für die Modellierung auf Regierungsbezirksebene ausreichend. Allerdings weist der DWD selbst darauf hin, dass bei einer konkreten Standortplanung die Windverhältnisse vor Ort nochmals dezidiert in einem standortspezifischen Windgutachten zu überprüfen sind, um zuverlässige Aussagen zum Energieertrag und zur ökonomischen Rentabilität zu erhalten. Dies trifft umso mehr bei Regionen wie dem Regierungsbezirk Niederbayern zu, wo Vergleichswerte bisheriger Windkraftanlagen weitestgehend fehlen. Gleiches gilt für die Karten des Bayerischen Solar- und Windatlases (vgl. StMWVT 2001a, S. 34 / StMWIVT 2010b, S. 10) und die Angaben im Energieatlas Bayern.

Eine bedeutende Eigenschaft von Wind ist die vertikale Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeiten aufgrund abnehmender Reibung der Luftmassen an der Erdoberfläche. Dieser Umstand macht es erforderlich, in einem ersten Modellierungsschritt die Daten der mittleren Jahreswindgeschwindigkeit auf die jeweilige Nabenhöhe der Windkraftanlage, welche als Berechnungshöhe dient, zu extrapolieren. Die genutzten Winddaten des DWD beziehen sich auf eine Höhe von 100m über der Erdoberfläche, die Nabenhöhe der modellierten Anlage hingegen beträgt 108m. Für die Neuberechnung der Windgeschwindigkeiten auf die Nabenhöhe kommt mit der logarithmischen Höhenformel ein mathematisch-statistisches Verfahren zum Einsatz (vgl. Hau 2003, S. 457):

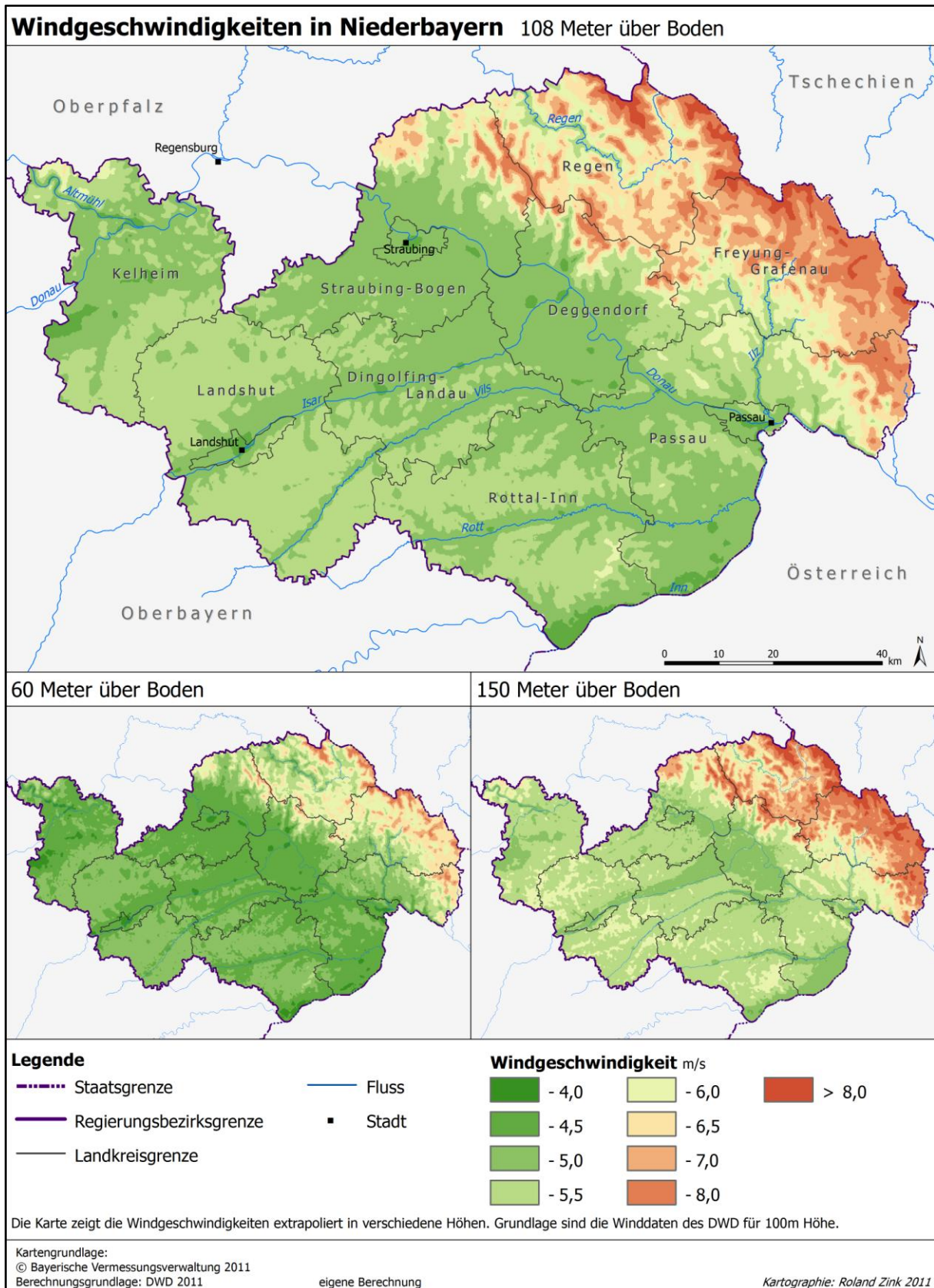
$$v_{h_2} = v_{h_1} * \ln(h_2 \div z) \div \ln(h_1 \div z)$$

- h_1 = Höhe, für die die mittlere Windgeschwindigkeit bekannt ist (m) (100)
- h_2 = Höhe, für die die mittlere Windgeschwindigkeit gesucht wird (m) (108)
- v_{h_1} = Mittlere Windgeschwindigkeit in Referenzhöhe h_1 (m/s)
- v_{h_2} = Mittlere Windgeschwindigkeit in der gesuchten Höhe h_2 (m/s)
- z = Rauigkeitslänge (Bodenrauigkeit der Erdoberfläche) (m)

Die Rauigkeitslänge (z) dient als Maß für die Oberflächenbeschaffenheit des Erdbodens und wird in der Einheit Meter angegeben. Zur Bestimmung der Rauigkeitslängen wird auf die Technische

Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) zurückgegriffen. Darin sind für verschiedene Landnutzungsformen des CORINE land cover entsprechende Werte angegeben. Diese werden möglichst plausibel den, für das Untersuchungsgebiet relevanten ATKIS Flächenkategorien zugewiesen (vgl. hierzu Anhang Tabelle 1), um für den Regierungsbezirk Niederbayern Angaben zur Rauigkeit der Bodenoberfläche zu erhalten.

Zum Ausgleich der Differenz zwischen großräumiger Darstellung und kleinräumigen Abhängigkeiten der Windverhältnisse wird im Bayerischen Windatlas empfohlen, einen Mittelwert aus den Werten benachbarter Rasterzellen zu bilden (vgl. StMWIVT 2010b, S. 10). Diese Empfehlung ist in der Modellierung des theoretischen Windenergiepotenzials dahingehend berücksichtigt, dass aus den extrapolierten Windgeschwindigkeiten ein Mittelwert anhand unmittelbar angrenzender Zellen berechnet wird. Die Ergebnisse der so errechneten mittleren Windgeschwindigkeiten sind in der Karte zu den Windverhältnissen in Niederbayern (vgl. Karte 6) dargestellt. Ein Vergleich mit Windverhältnissen in 60 bzw. 150m Höhe über der Erdoberfläche soll den hohen Einfluss der Anlagengröße (Nabenhöhe) auf die potenziell verfügbaren Windgeschwindigkeiten verdeutlichen. Die Berechnungsmethode der drei Karten ist identisch, nur jeweils auf eine andere Höhe extrapoliert. Deutlich zu erkennen ist der Gegensatz zwischen den Hochlagen des Bayerischen Waldes mit guten Windverhältnissen und dem restlichen Untersuchungsgebiet, wo die Windgeschwindigkeiten in 60 bzw. 100m Höhe i.d.R. keine wirtschaftlich ausreichenden Werte erreichen.



Karte 6: Windgeschwindigkeiten in Niederbayern

Zur Bestimmung des Windenergiepotenzials ist es in einem nächsten Modellierungsschritt nötig, mittels der Windgeschwindigkeiten den potenziell und technisch realisierbaren Jahresenergieertrag zu berechnen. Der Ertrag einer Windkraftanlage ist neben den standortspezifischen Parametern wie

Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe und der Häufigkeit verschiedener Windgeschwindigkeiten auch von technischen Größen abhängig. Hierzu zählen die Nabenhöhe der Anlage, die in entscheidender Weise die potenziellen Windgeschwindigkeiten beeinflusst, die Nennleistung, der technische Wirkungsgrad sowie Ein- und Abschaltgeschwindigkeiten des Windrades.

Die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten kann entweder exakt durch lokale Windgutachten oder anhand von statistischen Berechnungsverfahren ermittelt werden. In dieser Arbeit wird die statistische Weibull-Verteilungsfunktion verwendet (vgl. StMWVT 2001b, S. 8). Die Häufigkeiten der jeweiligen Windgeschwindigkeiten werden für die Windklassen (n) 1 bis 25m/s berechnet. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung ist dabei vom Weibull-Formfaktor (k) beeinflusst, welcher mit dem Wert 2,0 festgelegt wird, da zahlreiche Hersteller von Windkraftanlagen für das Untersuchungsgebiet ebenfalls mit diesem Durchschnittswert kalkulieren.¹⁰⁵

$$f(v) = k \div a * (v \div a)^{(k-1)} * e^{-(v \div a)^k}$$

mit

$$a = v_{Nabenhöhe} \div (0,568 + 0,434 \div k)^{(1 \div k)}$$

- f(v) = Häufigkeit der Windgeschwindigkeit v (%)
- v = Windgeschwindigkeit der Häufigkeitsklasse (m/s)
- a = Weibull-Skalierungsfaktor (m/s)
- k = Weibull-Formfaktor
- e = Eulersche Zahl (e = 2,718281828459)

Anhand der errechneten Häufigkeitsverteilung ist es möglich, die jährliche Stundenzahl je Windgeschwindigkeitsklasse (h_v) zu ermitteln, indem die prozentuale Häufigkeit einer Windstärke mit der Jahresstundenzahl (8760) multipliziert wird. Der Beitrag jeder Windgeschwindigkeitsklasse zum jährlichen Energieertrag resultiert schließlich aus dem Produkt der Leistung einer Windkraftanlage und der jährlichen Stundenzahl je Windgeschwindigkeitsklasse. Im letzten Berechnungsschritt gilt es schließlich die einzelnen Erträge der Windklassen aufzusummieren, um so den Jahresertrag einer Windkraftanlage zu erhalten.

$$E_v = P_v * h_v$$

mit

$$P_v = 1 \div 2 * \rho_L * A * v^3 * \eta_v$$

und

¹⁰⁵ Für die Annahme k=2,0 entspricht die Weibull-Verteilung der, ebenfalls bei Berechnungen zur Häufigkeitsverteilung von Windgeschwindigkeiten eingesetzten Rayleigh-Verteilung (vgl. StMWVT 2001b, S. 8).

$$p_L = \frac{P}{R \cdot T}$$

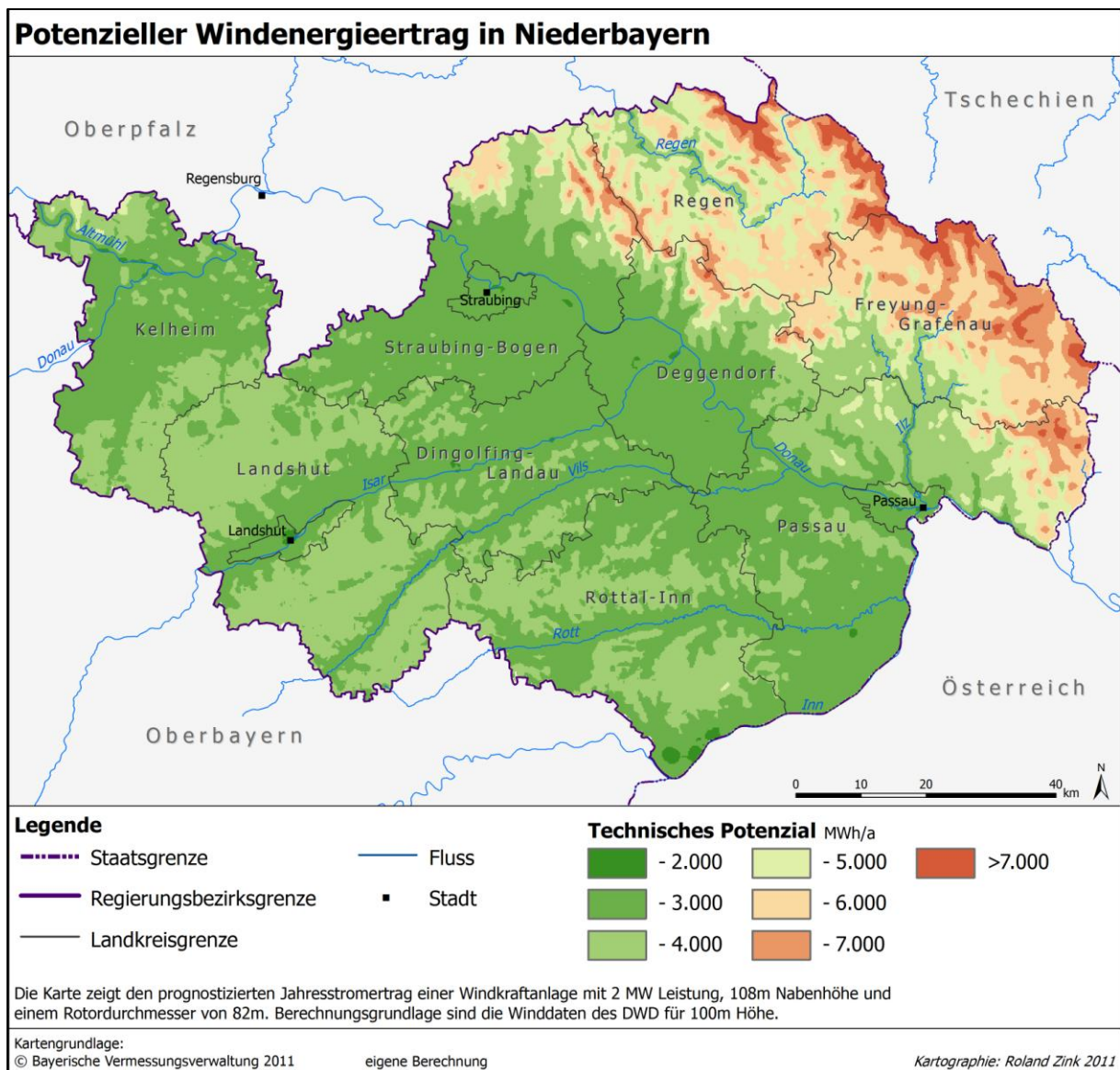
| | |
|----------|---|
| E_v | = Jahresenergieertrag für die jeweilige Windgeschwindigkeitsklasse v (kWh) |
| P_v | = Leistung der Windkraftanlage für die Windgeschwindigkeitsklasse v (W) |
| ρ_L | = Dichte der Luft (kg/qqm) |
| A | = Vom Rotor überstrichene Fläche (qm) |
| v | = Windgeschwindigkeit in der Nabenhöhe (m/s) |
| η_v | = Wirkungsgrad der Anlage bei Windgeschwindigkeit v |
| P | = Luftdruck (Pa) |
| R | = Gaskonstante für trockene Luft ($R = 287,05 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$) |
| T | = Temperatur (K) (= Temperatur in °C + 273,15) |

Die Leistung einer Windkraftanlage resultiert aus der kinetischen Windenergie und dem Wirkungsgrad des Windrades. Bei der Berechnung der kinetischen Windenergie ist die Luftdichte ein wesentlicher Faktor. Diese wiederum ist von der Temperatur, dem Luftdruck und dem Feuchtegehalt der Luft abhängig. Mit Ausnahme der Luftfeuchte berücksichtigt die Modellierung Temperatur- und Druckunterschiede auf vereinfachende Weise unter Verwendung der mittleren jährlichen Temperatur (vgl. LfU et al. 2011a) sowie dem digitalen Geländemodell. Als Grundlage dient die Eigenschaft, dass mit einer Höhenzunahme von je 275m der Druck um den Faktor 1/30 seines vorherigen Wertes sinkt, was in Bodennähe in etwa ein haP Druckabnahme je acht Höhenmeter bedeutet (vgl. Strahler & Strahler 2002, S. 39). Mittels dieser Beziehung lässt sich der barometrische Luftdruck für die gewählten Höhenniveaus berechnen, woraus in Kombination mit der Lufttemperatur schließlich auf die Luftdichte geschlossen werden kann.

Der Wirkungsgrad einer Windkraftanlage ist nicht konstant sondern variiert in Verbindung zu den unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten. So ist bei geringen Windgeschwindigkeiten der Wirkungsgrad des Windrades niedriger als bei mittleren Windgeschwindigkeiten. Bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten nimmt der Wirkungsgrad wieder ab, da die kinetische Windenergie stetig steigt, die Anlage allerdings an ihre Nennleistung stößt. Allgemein lässt sich der Wirkungsgrad aus dem Verhältnis zwischen theoretischer und tatsächlicher Leistung berechnen. In der vorliegenden Modellierung wird die tatsächliche Leistung mit den Angaben des Herstellers gleichgesetzt und die Berechnung des theoretischen Potenzials mit einer Luftdichte von $\rho_L = 1,225 \text{ kg/qqm}$ durchgeführt. Im Anhang (vgl. Tabelle 2) sind die damit erzielten und in der weiteren Modellierung verwendeten Wirkungsgrade dargestellt.

Der Jahresenergieertrag einer Windkraftanlage ergibt sich schließlich aus der Summe aller Energieerträge der jeweiligen Windgeschwindigkeitsklassen. Orientiert an den höheren Windgeschwindigkeiten in den Höhenlagen, im Besonderen der Gipfel des Bayerischen Waldes, sind auch die Energieerträge eines 108m großen Windrades in diesen Regionen am höchsten (vgl. Karte

7). Die geringsten Werte treten in den großen Flusstälern der Donau und der Isar auf sowie in den Tallagen des Tertiärhügellandes. Bei der Technologiebewertung wurde ein Jahresenergieertrag von 4.000 MWh angesetzt. Dieser Wert wird in weiten Teilen Niederbayerns nicht erreicht, so dass zurückblickend die positiven spezifischen Ergebnisse der Windenergie keine flächendeckende Gültigkeit für den Untersuchungsraum besitzen. Dieser Sachverhalt zeigt deutlich, wie stark die Technologiebewertung von den jeweiligen Standortbedingungen an einem Ort abhängig ist und warum das Konzept doppelter Nachhaltigkeit den räumlichen Gegebenheiten eine so große Bedeutung beimisst.



Karte 7: Potenzieller Windenergieertrag in Niederbayern

5.5.2 Nachhaltige Standorte für eine Windkraftanlage

Die Suche nach optimalen Standorten für Windkraftanlagen besitzt im Regierungsbezirk Niederbayern, im Speziellen im Bayerischen Wald, durch die Forderung dort künftig Windräder zu

errichten, eine große Aktualität. Dem Vorgehen der Potenzial- und Standortmodellierung folgend werden im Anschluss an die Bestimmung des technischen Energiepotenzials und nach Abzug von Flächen, die aus bautechnischer Sicht nicht in Betracht kommen, deshalb stufenweise die Restriktionen der drei Nachhaltigkeitsdimensionen angelegt. Bautechnische Einschränkungen ergeben sich auf Flächen, die wegen bestehender Siedlungs-, Nutzungs- und Infrastruktur sowie aus bauphysikalischen Gründen die Errichtung einer Windkraftanlage nicht zulassen. Hierzu zählen Siedlungsflächen ebenso wie Abstandsflächen zu Hochspannungsleitungen oder Wasserflächen. Alle Ausschlussflächen sind im Kriterienkatalog hinterlegt und im Anhang Karte 1 räumlich dargestellt.

Unter ökonomischen Gesichtspunkten ist eine Untergrenze des potenziell erzielbaren Jahresenergieertrages zu definieren, um die Anlage wirtschaftlich rentabel betreiben zu können. Der Mindestertrag wird in der Modellierung mit 2.000 Volllaststunden pro Jahr festgelegt. Ab dieser Größe wird angenommen, dass Investoren bereit sind, eine detaillierte Untersuchung eines Standortes vorzunehmen und bei Werten darüber ggf. auch eine Windkraftanlage zu errichten. Die Windverhältnisse in Niederbayern zeigen bei diesem Kriterium eine strikte Zweiteilung: Einerseits der Bayerische Wald, der durch seine windexponierten Kuppenlagen und Höhenzüge zahlreiche Standorte mit einem entsprechenden Jahresertrag aufweist. Andererseits die Flussniederungen an Donau, Inn und Isar sowie dem Tertiärhügelland, wo dieser ökonomische Schwellenwert mit Ausnahmen im nördlichen Landkreis Kelheim und einer kleinen Fläche im Südosten des Landkreises Rottal-Inn nicht erfüllt wird (vgl. Anhang Karte2).

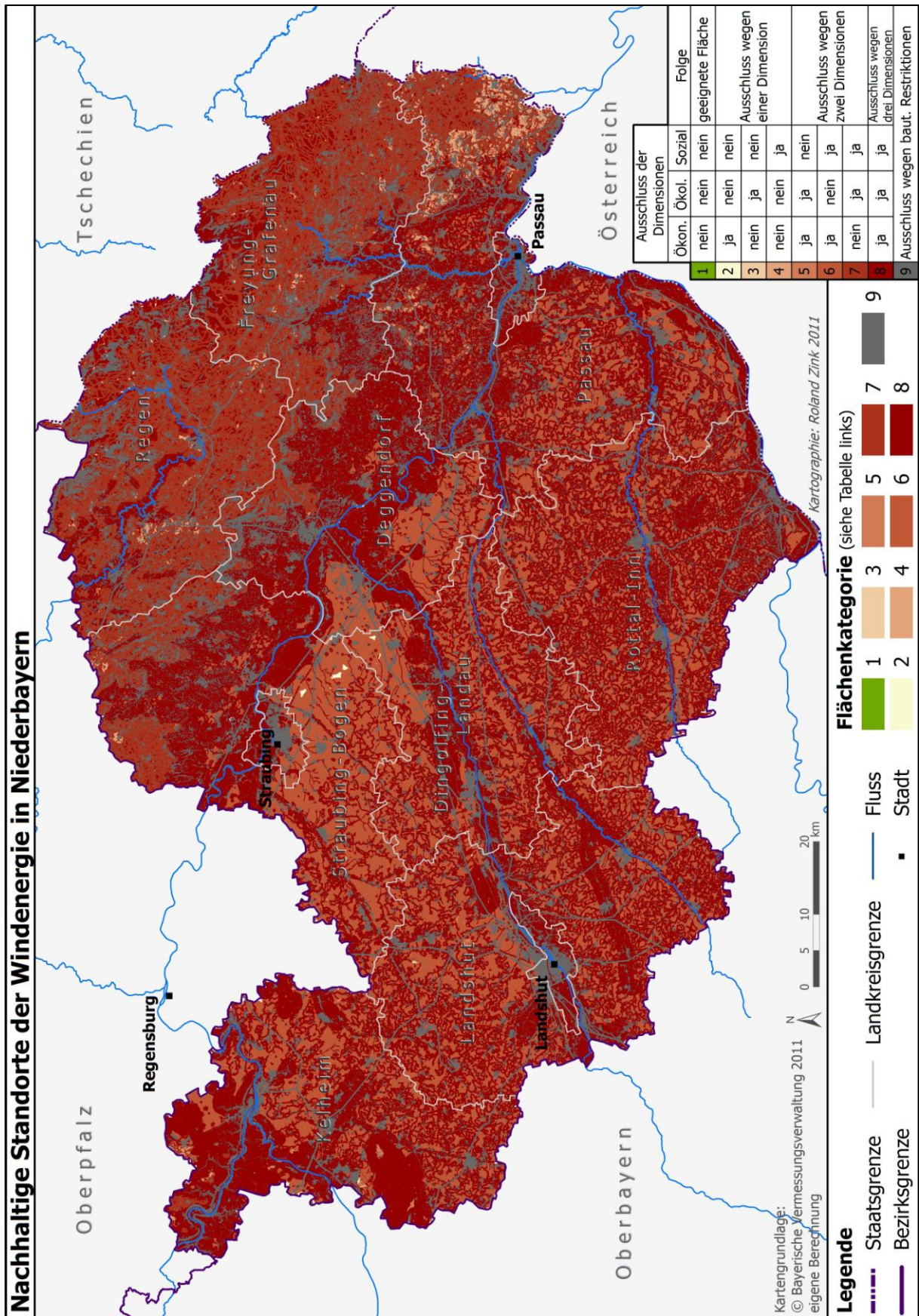
Aufgrund der physikalischen Zusammenhänge sind die Jahreserträge einer Windkraftanlage im Wesentlichen durch die Windverhältnisse an einem Standort bestimmt. Da die mittleren Windgeschwindigkeiten ihrerseits mit der Höhe über Boden zunehmen, ist für die Ausbeute hoher Energieerträge die Nabenhöhe ein entscheidender Faktor. Für den Investor werden durch den Bau höherer Anlagen Standorte, die bei kleinen Nabenhöhen unrentabel waren, plötzlich interessant. Die bautechnische Veränderung betrifft dabei nur die Höhe des Turms; die übrigen Kraftwerkskomponenten bleiben zumeist gleich. Windkraftanlagenhersteller bieten i.d.R. einen Anlagentyp mit unterschiedlicher Nabenhöhe an. Im Kapitel VI 5.5.3 wird deshalb die Suche nach geeigneten Standorten für eine technisch baugleiche Windkraftanlage jedoch mit einer um 30m höheren Naben durchgeführt (Nabenhöhe von 138m). Die angedachten Ausbaupläne zur Windenergie im Bayerischen Wald, in denen aus Investorensicht sogar Windräder mit 150m Nabenhöhe im Gespräch sind, verdeutlichen die Aktualität sehr großer Anlagen.

Eine im Vergleich zu den ökonomischen Einschränkungen umgekehrte Verteilung zeigt sich bei den ökologischen Ausschlussflächen (vgl. Anhang Karte 3). So befinden sich die potenziell geeigneten Flächen aus Sicht des Naturschutzes vor allem in der agrarwirtschaftlich intensiv genutzten Region

des Dungaues und des Tertiärhügellands. Demgegenüber unterliegen die windreichen Gebiete des hinteren Bayerischen Waldes (im Besonderen der Nationalpark) wie die Flächen längs der Flussläufe (v.a. Altmühl, Donau bei Abensberg, Kelheim und Straubing, Donauschlinge bei Mühlham, Isarmündung und Inn) einer Vielzahl ökologischer Schutzbestimmungen. Teilweise stehen hier bis zu zehn Kriterien (rotbraune Flächen in der Karte) dem Bau einer Windkraftanlage entgegen. Auch abseits des Nationalparks sind weite Teile des Bayerischen Waldes naturschutzrechtlich geschützt bzw. befinden sich innerhalb der gewählten Abstandsflächen zu Schutzgebieten (vgl. Kriterienkatalog), weshalb nur vereinzelt Flächen für die Nutzung der Windenergie übrig bleiben. Größere zusammenhängende Gebiete finden sich lediglich im südlichen Bayerischen Wald an der Grenze zu Österreich. Grund hierfür ist das dortige Fehlen von Landschaftsschutzgebieten. Außerhalb des nördlichen Landkreises Passau, in welchem nur das Ilztal, das Gaißatal, die Donauengtäler sowie das Gebiet rund um Lüssen und Bärnloch der Schutzkategorie unterliegen, ist der Bayerische Wald nahezu flächendeckend Landschaftsschutzgebiet, so dass mögliche Standorte stark eingeschränkt werden. In Folge dessen wird aktuell gesellschaftlich und politisch kontrovers diskutiert, ob zukünftig Landschaftsschutzgebiete ganz oder zumindest teilweise (Zonierung) für die Windkraftnutzung in Betracht kommen sollen (vgl. Kapitel VI 5.5.3).

Neben den ökonomischen und ökologischen Einschränkungen sind es bei der Windenergie jedoch vor allem soziale Belange, die der Errichtung von Windkraftanlagen entgegen wirken (vgl. Anhang Karte 4). Die Forderung, abgeleitet aus der Akteursbefragung, nach einem Mindestabstand von über 1.630m bei Wohnbauflächen und von 820m bei gemischter Nutzung erweisen sich als sehr restriktiv. Alleine durch diese Pufferflächen wird nahezu die gesamte Fläche des Regierungsbezirkes ausgeschlossen. Übrig bleiben nur einzelne Flächen, namentlich Bereiche in den Landkreisen Kelheim, Landshut, Straubing-Bogen und Regen, wo genügend Abstand zwischen den besiedelten Gebieten besteht. Die Streusiedlungen im südlichen Regierungsbezirk, speziell im Landkreis Rottal-Inn und im südlichen Landkreis Passau führen dazu, dass bis auf vernachlässigbar kleine Flächen keine Standorte für Windkraftanlagen gegeben sind.

Führt man alle Restriktionen der Dimensionen zu einem Gesamtergebnis zusammen, gibt es keine Flächen mehr, die für die Errichtung einer Windkraftanlage in Betracht kommen (vgl. Karte 8). Obwohl die Windkraft bei der Technologiebewertung im Vergleich zu den anderen Energieformen gut abgeschnitten hat, scheidet sie so aufgrund der gewählten Restriktionen im Rahmen der Standortsuche gänzlich aus. Dieses Ergebnis ist einerseits ernüchternd, bietet andererseits aber auch die Möglichkeit den gesellschaftlichen Diskurs über Windenergie mit wertvollen Informationen zu unterstützen. Wegen der bereits angesprochenen gegenwärtigen Diskussion zur Nutzung der Windenergie im Untersuchungsgebiet soll in einem Exkurs gezeigt werden, wie die erzielten Ergebnisse trotzdem einen Beitrag zum Gestaltungsprozess der Energiewende leisten können.



Karte 8: Nachhaltige Standorte der Windenergie in Niederbayern

5.5.3 Exkurs: Kompromisszenario

Die Windenergie hat sich bei der Technologiebewertung ausgezeichnet und genießt zudem bei den befragten Akteuren große Wertschätzung, indem sie fordern, die Technologie in Zukunft stärker zu nutzen. Aufgrund der getroffenen räumlichen Einschränkungen lassen sich im Untersuchungsraum jedoch keine Standorte identifizieren. Die Vorgaben aus dem Kriterienkatalog erweisen sich hierbei als zu restriktiv. Zwar sind bei einer Einzelbetrachtung jeder Nachhaltigkeitsdimension Standorte vorhanden, in der Summe schließen sie sich aber gegenseitig aus: Handelt es sich um windreiche und somit ökonomisch rentable Standorte, befinden sich diese meist in ökologisch geschützten Gebieten oder kommen aus Gründen sozialer Restriktionen nicht in Betracht. Jede Dimension reduziert so aufgrund ihrer Belange die potenziellen Flächen und schränkt den Ausbau der Windenergie ein.

Sollte das Ziel einer vermehrten Windenergienutzung beibehalten werden, müssen sich die räumlichen Kriterien der Standortsuche ändern. Der Kriterienkatalog lässt aus konzeptioneller Sicht eine Veränderung der Kriterien bzw. Ausschlussparameter jederzeit zu. Vorrangiges Ziel dabei sollte ein Dialog zwischen den Dimensionen sein, was bedeutet, dass jede Dimension durch Zugeständnisse bei den eigenen Kriterien einen Beitrag leistet, um doch noch geeignete Standorte zu finden. Die Änderungen sollen so durch einen gesellschaftlichen und politischen Diskurs begründet sein und müssen ggf. auch rechtlich abgesichert werden.

Die bisherige Aussage, dass sich mit den gewählten Restriktionen keine Standorte für die Windenergienutzung ergeben, dient im gesellschaftlichen Dialog als wertvolles Informations- und Kommunikationsmittel. So zeigt das Ergebnis auf, wo welche und wie viele Kriterien einer Dimension dem Bau einer Windkraftanlage entgegenstehen (vgl. Karte 8). Damit lassen sich Rückschlüsse auf die jeweiligen Kriterien und deren räumliche Ausprägungen gewinnen. Wie sensibel die räumliche Modellierung auf veränderte Kriterien reagiert, zeigt folgendes Beispiel eines Kompromisszenarios, indem einzelne Kriterien jeder Dimensionen modifiziert werden. Die geänderten Parameter betreffen hierbei die wichtigsten aktuellen Diskussionspunkte beim Ausbau der Windenergie in Niederbayern.

Tabelle 23: Veränderte Kriterien im Kompromisszenario

| Kriterium | | Veränderte Parameter/Restriktionen |
|-----------------------|--|------------------------------------|
| Anlagengröße | | Nabenhöhe 138m |
| Ökonomische Dimension | | |
| 12 | Grenze der Rentabilität: Volllaststunden | 1900 |
| Ökologische Dimension | | |
| 19 | Landschaftsschutzgebiet | kein Ausschluss |
| 30 | Abstand zum Landschaftsschutzgebiet | keine Pufferung |
| 40 | Abstand zum Wald | keine Pufferung |
| Soziale Dimension | | |
| 45 | Ausschlussfläche Wald | kein Ausschluss |
| 52 | Abstand zur Wohnbaufläche | Reduzierung auf 828m |
| 53 | Abstand zur Industrie- und Gewerbefläche | Erhöhung auf 207m |
| 54 | Abstand zur Fläche gemischter Nutzung | Reduzierung auf 414m |

Ökonomische Dimension

In dem getroffenen Szenario sind keine zusätzlichen Kriterien berücksichtigt, sondern lediglich acht Kriterien inhaltlich verändert (vgl. Tabelle 23). Die technologischen Parameter der Windkraftanlage bleiben bis auf die Nabenhöhe der Anlage, welche von 108 auf 138m steigt, gleich. Der Investor macht in seiner relevanten ökonomischen Dimension das Zugeständnis, die Rentabilitätsprüfung eines Standortes bereits bei 1.900 Volllaststunden durchzuführen; d.h. er reduziert entweder seine Rentabilitätsansprüche oder versucht die Anlage kostengünstiger zu errichten, um damit eine Kompensation der Mindereinnahmen zu erzielen. Allerdings erlaubt der angenommene Wert aktuell keinen wirtschaftlichen Betrieb, so dass es auch Aufgabe der Politik sein kann, Förderbedingungen für derartige Grenzertragsstandorte anzupassen, damit der gewünschte Ausbau realisierbar wird.

Beide Anpassungen führen dazu, dass im Regierungsbezirk nun größere Flächen dem neuen ökonomischen Grenzwert genügen (vgl. Anhang Karte 5). Der mittlere und hintere Bayerische Wald ist, wie in der Modellierung zuvor, fast flächendeckend für Windenergie geeignet. Aussparungen ergeben sich nur in sehr ungünstigen Tallagen etwa entlang der Flüsse Regen und Ilz oder in schlecht zugänglichen Gebieten, die aufgrund mangelnder Infrastruktur nicht als Standort in Betracht kommen. Zusätzlich zu diesen windgünstigen Gebieten sind nun auch Standorte im vorderen Bayerischen Wald entlang des ersten Höhenzuges aus ökonomischer Sicht positiv zu bewerten. Zu nennen sind der Bereich nördlich von Deggendorf und die nördlichen Gemeindeflächen von Hofkirchen und Windorf im Landkreis Passau. Die Gunstflächen haben sich generell weiter nach Südosten, d.h. in den vorderen Bayerischen Wald hin ausgedehnt.

Vor allem die größere Nabenhöhe der Windkraftanlage ist ferner ausschlaggebend dafür, dass die Nutzung von Windenergie vereinzelt auch in Höhenlagen des Tertiärhügellands ökonomisch interessant wird. Standorte finden sich vom südlichen Passau beginnend bis in den nördlichen Landkreis von Kelheim. Eine größere zusammenhängende Fläche liegt im südöstlichen Landkreis Rottal-Inn in den Gemeinden Kößlarn, Stubenberg, Triftern und Wittibreut. Dort befindet sich ein windexponiertes Gebiet mit einer Höhenlage von über 500m NN. Des Weiteren hat sich in der Fränkischen Alb das Gebiet mit wirtschaftlich rentablen Standorten vergrößert. Potenzielle Standorte liegen zur rechten und zur linken Seite der Altmühl. Hier erreicht die Topographie ebenfalls Höhen von über 500m NN. Da es sich auch bei den übrigen Standorten im Tertiärhügelland durchwegs um Höhenlagen im Bereich größer 500m NN handelt, zeichnet sich dieser Wert als Grenze für einen wirtschaftlichen Betrieb dieser Anlagengröße im Untersuchungsgebiet ab. Die Niederungen sowie das flache Dungauegebiet bleiben trotz größerer Nabenhöhe und geringerem Rentabilitätsanspruch weiterhin für die Windenergie ungeeignet. Dies betrifft weite Teile der Landkreise Deggendorf, Dingolfing-Landau und Straubing-Bogen.

Ökologische Dimension

Die weitläufigen Landschaftsschutzgebiete im Bayerischen Wald stellen zweifellos eine Barriere für den Ausbau der Windenergie dar. Zwar ist der Bau von Windkraftanlagen innerhalb dieses Schutzgebietes gesellschaftlich und naturschutzrechtlich umstritten, doch zeigen gerade die jüngsten Entwicklungen, dass hier Veränderungen stattfinden. Die neuen Bestrebungen manifestieren sich in dem politischen Willen, gesetzliche Anpassungen bei Landschaftsschutzgebieten vorzunehmen, um Windkraftnutzung dort zu ermöglichen oder Ausnahmeregelungen im Sinne einer Zonierung des Schutzgebietes einzuführen. In Anlehnung an die aktuellen Entwicklungen stellen in dem Kompromisszenario Landschaftsschutzgebiete keine Ausschlussflächen mehr da. Dementsprechend entfällt auch die Abstandsfläche zu dieser Schutzkategorie.

Die Änderung bei den Landschaftsschutzgebieten hat einen großen Einfluss auf die räumliche Verteilung potenzieller Standorte (vgl. Anhang Karte 6) und zeigt deutliche Abweichungen zur ursprünglichen Modellierung (vgl. Anhang Karte 3). Betroffen sind hiervon im Besonderen der Bayerische Wald und die Fränkische Alb, also genau jene Gebiete, die sich in der ökonomischen Modellierung als positive Standorte ergaben. Eine räumliche Überschneidung von ökonomisch rentablen mit ökologisch verträglichen Flächen wird damit erheblich wahrscheinlicher.

Zusätzlich sind in dem Kompromisszenario Waldflächen als potenzielle Standorte für Windkraftanlagen vorgesehen (siehe hierzu auch soziale Dimension), weshalb ferner die bewaldeten Kuppen im Tertiärhügelland nun geeignet sind. In der ökologischen Modellierung ist dies bereits durch das Wegfallen der 200m Waldpufferfläche berücksichtigt. Die naturrechtlich hoch geschützten Gebiete wie der Nationalpark, das Altmühltal oder die Isarmündung bleiben weiterhin für Windkraftstandorte ausgeschlossen, sodass wichtige Erfordernisse seitens der ökologischen Dimension auch in diesem Szenario gewahrt bleiben.

Soziale Dimension

Die größten räumlichen Veränderungen ergeben sich in der sozialen Dimension. Waldflächen, die in der Befragung noch mit einer knappen Mehrheit¹⁰⁶ ausgeschlossen wurden, werden nun als potenzielle Standorte für Windkraftanlagen zugelassen. Diese Entscheidung findet im aktuellen gesellschaftlichen Diskurs immer mehr Zustimmung, da zum einen viele Kommunen in ihren eigenen Planungen auf diese Standorte zurückgreifen und zum anderen diese Standorte sich meist durch eine große Entfernung zu Siedlungsflächen auszeichnen.

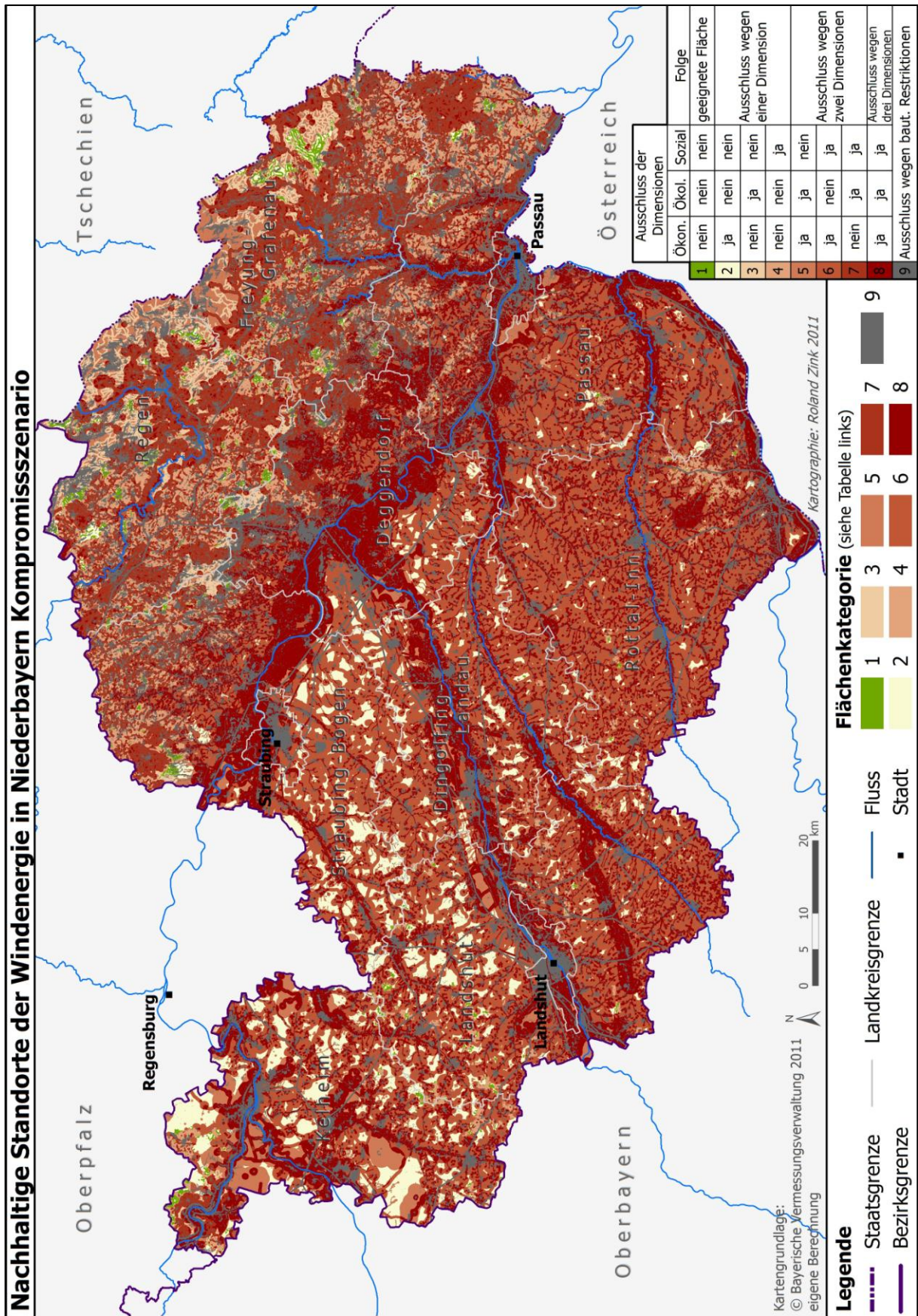
Neben der Akzeptanz von Waldflächen betreffen die geänderten Kriterien aber vor allem die Abstandsflächen zu bebauten Gebieten. Hierbei wird nun die Höhe der Windkraftanlage als

¹⁰⁶ In der Akteursbefragung sprachen sich 14 Personen für Wald als einen geeigneten Standort für eine Windkraftanlage aus.

Orientierung herangezogen. Dies erscheint sinnvoll, da die Größe einer Anlage den Mindestabstand zur z.B. nächsten Siedlungsfläche entscheidend mitbestimmt. So ist es im Falle der visuellen Beeinträchtigung durch das Bauwerk oder einem möglichen Schattenwurf selbsterklärend, dass es bei einer Windkraftanlage mit 150m Höhe einen größeren Abstand bedarf als für eine Anlage mit z.B. 60m Nabenhöhe. Hiervon ausgenommen ist die Beeinträchtigung durch Lärmemissionen, welche auf Grundlage der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA-Lärm) zu beurteilen ist.

Für Wohnbauflächen wird im Kompromisszenario ein Mindestabstand in Höhe der sechsfachen Nabenhöhe (828m) festgelegt, für Flächen gemischter Nutzung entsprechend die dreifache Nabenhöhe (414m). Aus Sicherheitsgründen erfolgt bei Industrie- und Gewerbefläche sogar eine, im Vergleich zum ursprünglichen Abstand, Erhöhung auf 207m, was der eineinhalbfachen Nabenhöhe entspricht. Der bayerische Windenergieerlass, welcher Hinweise zur Planung und Genehmigung von Windkraftanlagen zusammenstellt und somit Kriterien für die Suche nach geeigneten Standorten vorgibt, schlägt ebenfalls Mindestabstände vor (vgl. Bayerisches Staatsministerium des Inneren et al. 2011, S. 19): 800m zu allgemeinen Wohngebieten, 500m zu Misch- und Dorfgebieten oder Außenbereichsanwesen und 300m zu Wohnnutzungen in Gewerbegebieten. Hier zeigt sich eine weitgehende Übereinstimmung der getroffenen Annahmen, wobei es sich nicht um festgelegte Größen handelt. Vielmehr ist es anzuraten, die Mindestabstände auch an lokalen Bedingungen auszurichten und in einem gesellschaftlichen Dialog vor Ort weiter zu konkretisieren. Vorstellbar ist dies z.B. durch eine erneute Befragung von Akteuren und Bürgern, die auf den bereits erzielten Ergebnissen und der Information, dass die Mindestabstände in der Befragung zu restriktiv gewählt wurden, aufbauen.

Die Neudefinition der Mindestabstände führt zu einer gänzlich anderen Situation der Nutzung von Windenergie aus sozialer Perspektive. Waren zuvor Windkraftstandorte komplett ausgeschlossen (vgl. Anhang Karte 4), so finden sich nun über den gesamten Regierungsbezirk verteilt zahlreiche Standorte (vgl. Anhang Karte 7). Schwerpunkte der potenziell gesellschaftsverträglichen Flächen finden sich in den Landkreisen Dingolfing-Landau, Kelheim, Landshut und Straubing. Ursächlich hierfür sind die weitläufigen agrarischen Nutzflächen sowie die geringe und kompakte Zersiedelung der Landschaft. Im Bayerischen Wald ist vor allem der Umstand, dass auch Waldflächen für Windkraftanlagen in Frage kommen, entscheidend. So weist die Modellierung nun auch großflächige Waldgebiete als mögliche Standorte aus, die zumeist den Vorteil bieten, weit abseits von Ortschaften zu liegen. Erkennbar ist dies besonders im hinteren Bayerischen Wald, dem walddreichen Höhenzug entlang der Landkreisgrenze zwischen Regen und Deggendorf bzw. Straubing-Bogen, am Neuburger Wald südlich von Passau oder am Dürnbucher Forst südlich von Neustadt an der Donau (Landkreis Kelheim).



Karte 9: Nachhaltige Standorte der Windenergie in Niederbayern Kompromisszenario

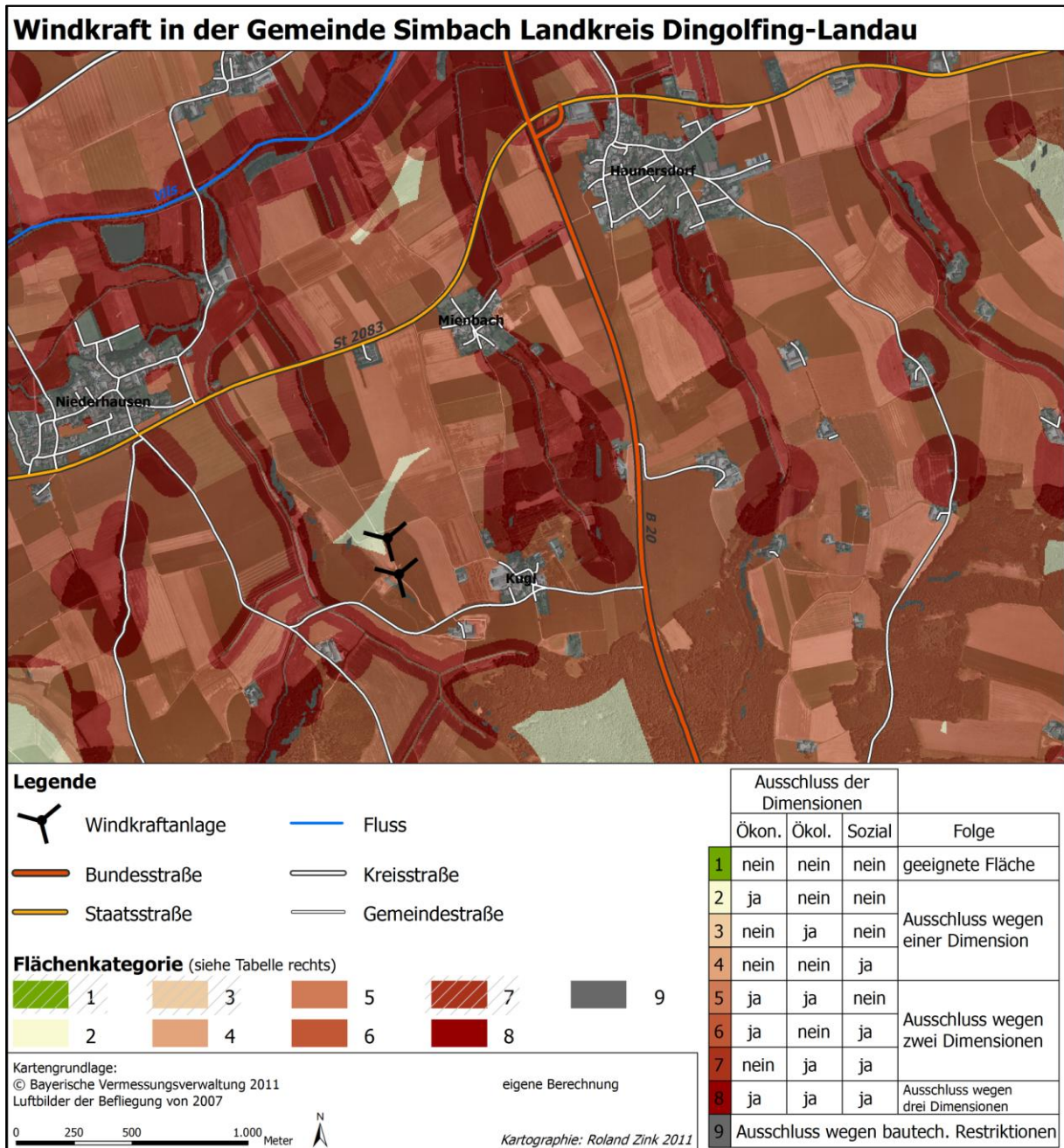
Nachhaltige Standorte

Das Gesamtergebnis der räumlichen Modellierung für das Kompromisszenario zeigt vielfältige Möglichkeiten zum Ausbau der Windenergie in Niederbayern auf (vgl. Karte 9). Neben der Tatsache, dass sich nun überhaupt potenzielle Standorte finden lassen, zeichnet auch deren räumliche Verteilung ein überraschendes Bild. Wegen der höheren Windgeschwindigkeiten bleibt zwar der Bayerische Wald für Windenergie die bevorzugte Region, allerdings sind ebenso nachhaltige Standorte in den Landkreisen Kelheim, Landshut, Rottal-Inn und im südlichen Landkreis Passau vorhanden. Nennenswert hierbei ist die Größe der als geeignet identifizierten Flächen, die in zahlreichen Fällen auch die Installation mehrerer Windkraftanlagen (Windparks) zulassen würde. Damit könnte eine flächendeckende „Verspargelung“ der Landschaft, wie sie häufig von Bürgern oder Kommunalpolitikern kritisiert wird, vermieden und die Nutzung der Windenergie auf wenige erörterte Flächen (Konzentrationsflächen) begrenzt werden.

Die Dungauregion sowie die Flussniederungen und weite Teile des Tertiärhügellandes bieten weiterhin keine geeigneten Standorte. Dies ist überwiegend auf die dort vorherrschenden geringen Windgeschwindigkeiten und somit fehlender ökonomischer Rentabilität zurückzuführen. Sollte die technologische Entwicklung in der Windbranche den Weg der letzten Jahre fortschreiten und den Bau noch größerer Anlagen ermöglichen, könnte ggf. ein weiteres Potenzial erschlossen werden. So sind im Tertiärhügelland wie im Dugau weiträumige Gebiete vorhanden, die nur aufgrund der ökonomischen Einschränkung als nicht geeignet erscheinen (vgl. Karte 9, Flächenkategorie 2). Allerdings wirkt sich eine größere Nabenhöhe, wie im Beispiel des Kompromisszenarios vorgeschlagen, auch auf die Mindestabstände aus, wodurch potenzielle Standorte wegen höherer sozialer Restriktionen wieder geschmälert werden.

Die Angabe der mittleren Windgeschwindigkeiten ist selbst mit großen Unsicherheiten verbunden (vgl. DWD 2011 und Kapitel VI 5.5.1). Daher ist es beim weiteren Ausbau der Windenergie dringend nötig, exakte Windmessungen für potenzielle Standorte durchzuführen oder soweit möglich auf vorhandene Windertragswerte bereits bestehender Windräder zurückzugreifen. Beispielhaft ist hier die Überprüfung der Ergebnisse aus dem Kompromisszenario anhand der beiden bestehenden Windräder nahe der kleinen Ortschaft Kugl (Gemeinde Simbach, Landkreis Dingolfing-Landau) anzuführen. Die Modellierung weist angrenzend zu dem nördlichen Windrad eine trichterförmige Eignungsfläche aus, die allen getroffenen ökologischen und sozialen Kriterien genügt (vgl. Karte 10). Die beiden Windräder besitzen nicht die Höhe der analysierten Referenzanlage (138m), weshalb der Abstand zu den nächsten Ortschaften als ausreichend zu beurteilen ist. Allerdings ist der Standort in der Modellierung wegen fehlender ökonomischer Rentabilität ausgeschlossen. Wie der Bau von Windkraftanlagen in vermeintlich unrentablen Gebieten verdeutlicht, können sich dort jedoch

ebenso windhöfliche Bereiche z.B. aufgrund günstiger Anströmungsbedingungen oder lokaler Windsysteme befinden. Standortsspezifische Windgutachten bleiben daher unerlässlich.



Karte 10: Windkraft in der Gemeinde Simbach Landkreis Dingolfing-Landau

Das Kompromisszenario gibt einen Einblick, wie sich Kriterien verändern lassen und welche zum Teil erheblichen räumlichen Veränderungen der potenziellen Eignungsflächen damit verbunden sind. Die Dialogfähigkeit der einzelnen Dimensionen erscheint hier als entscheidend. In wie weit sind die Vertreter der jeweiligen Dimension bereit, Zugeständnisse und Kompromisse einzugehen? Um bereits in der Planungsphase diesbezüglich Konflikte zu vermeiden, ist die Integration von Akteuren, Interessensvertretern und Bürgern in den Standortsuchprozess eine grundlegende Voraussetzung. Kommunikatives Hilfsmittel für den Dialog zwischen den Dimensionen kann dabei das vorgelegte

Ergebnis sein. Es gibt Orientierung, wo sich nachhaltige Standorte befinden und lässt eine Abschätzung zu, welchen Beitrag die Windenergie unter den getroffenen Annahmen zur Energieversorgung leisten kann. Damit können Rückschlüsse gezogen werden, ob für den Regierungsbezirk weiterhin die Notwendigkeit besteht, anhand einer nochmaligen Anpassung der Kriterien zusätzliche Potenziale zu erschließen.

5.5.4 Beitrag der Windenergie zur autarken Versorgung

Der mögliche Beitrag der Windenergie für eine bilanziell autarke Stromversorgung ist hinsichtlich der beiden Modellierungen differenziert zu bewerten. Anhand der ursprünglichen Definition der Kriterien, wie sie im Kriterienkatalog hinterlegt sind, lassen sich keine Standorte für die Nutzung der Windenergie im Regierungsbezirk finden, weshalb die Technologie auch keinen Beitrag zur Energieversorgung leisten kann. Nimmt man allerdings das Kompromisszenario, welches die wesentlichen Streitpunkte aufgreift und sich an den aktuell diskutierten Vorgaben orientiert, dann zeigt die Windenergie im Raum Niederbayern durchaus Potenzial. So konnte durch das Kompromisszenario eine nutzbare Gesamtfläche von ca. 6.700ha – eine einzelne geschlossene Fläche beträgt mindestens 5.000qm – ermittelt werden. Alle Standorte sind dadurch charakterisiert, dass dort keine modellierten Nachhaltigkeitskriterien dem Bau entgegenstehen, weshalb sie für eine vertiefte Untersuchung hinsichtlich der Windkraftnutzung als prädestiniert erscheinen.

Entsprechend dieser großen Bandbreite von Verzicht bis zur umfassenden Nutzung auf der ermittelten potenziellen Fläche, variiert auch der Beitrag zur Energieversorgung stark. Setzt man den Flächenbedarf einer Windkraftanlage mit dem Radius des dreifachen Rotordurchmesser gleich (vgl. hierzu Heier 2007, S. 105) und nimmt die technologische Parameter der modellierten 138m hohen Anlage als Grundlage, so beläuft sich der Jahresstromertrag der Windenergie auf 1.341 Mio. kWh. Damit könnte die Windenergie neben der Wasserkraft einen wesentlichen, wenn auch kleineren Anteil zur Versorgung des Regierungsbezirkes Niederbayern beitragen. Wie viele Windräder schließlich errichtet werden ist von rechtlichen Hürden, lokalen Gegebenheiten sowie der gesellschaftlichen Akzeptanz vor Ort abhängig. Deshalb müssen weitere Parameter, die bei der vorliegenden Modellierung wegen der Fokussierung auf eine Region noch nicht berücksichtigt werden konnten, einzelfallbezogen näher geprüft werden. Hierzu zählen z.B. die Vorschriften aus dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG 2007) wie Lärmbelästigung oder Schattenwurf, welche erst begutachtet werden können, wenn ein konkreter Standort vorliegt. Bei Windparks kann ggf. eine Umweltverträglichkeitsprüfung erforderlich sein. Des Weiteren ist z.B. auch die Vorgabe der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, die eine seismologische Station im Landkreis Freyung-Grafenau betreibt und einen Bau von Windrädern im Umkreis von 15km aufgrund

befürchteter Störungen ablehnt, zu nennen (vgl. BGR 2011). Daher ist es weder absehbar noch aufgrund der mangelnden Einzelfallprüfung sinnvoll, alle ermittelten Standorte auch tatsächlich zu nutzen. Mit Blick auf das Potenzial weiterer Technologien sowie der Netzstabilität – Windenergie ist nicht grundlastfähig – ist eine derart umfangreiche Nutzung vielleicht auch nicht zwingend notwendig.

5.6 Sonnenenergie

Die Nutzung von Sonnenenergie durch Photovoltaik ist die räumlich dezentralste Form der Stromerzeugung und hat sich im Regierungsbezirk Niederbayern bereits als umfangreich genutzte Energieform etabliert. In der Technologiebewertung belegt die Photovoltaik die Mittelplätze, wobei die Installation kleiner Anlagen auf Haus- bzw. Gebäudedächern (Platz 4) den weitläufigen Photovoltaik-Freiflächenanlagen (Platz 6) vorzuziehen ist. Wie bei den anderen untersuchten Technologien ist es Intention der folgenden Modellierung, nachhaltige Standorte für die beiden Anlagenformen (Hausdach und Freifläche) zu finden, um dadurch den möglichen Beitrag der Photovoltaik für eine eigenständige Energieversorgung der Region abschätzen zu können.

5.6.1 Theoretisches und technisches Sonnenenergiepotenzial

Die Berechnungen des theoretischen und technischen Energiepotenzials sowohl bei Photovoltaik-Freiflächenanlagen als auch bei Dachanlagen basieren auf den regionalen Globalstrahlungswerten Niederbayerns. Die flächenspezifische Ermittlung dieser jährlichen Einstrahlungswerte (kWh/qm) wird zuerst mittels GIS für jeden Landkreis separat durchgeführt. Danach folgt ein Abgleich der berechneten Werte mit langjährig gemessenen Globalstrahlungsmittelwerten aus dem Bayerischen Agrarmeteorologischen Messnetz (vgl. LfL 2011). Der Vergleich dient zur Überprüfung der Ergebnisse und gleichzeitig auch zur Anpassung der Berechnungsparameter, wodurch schließlich eine hohe Übereinstimmung gemessener und berechneter Mittelwerte erreicht werden kann (vgl. Abb. 25). Nicht für alle Stationen des Agrarmeteorologischen Messnetzes sind langjährige Mittelwerte vorhanden. Allein die Werte der Stationen Dietrichsdorf (1¹⁰⁷) Engersdorf (3), Feistenaich (5), Frieding (6), Kaltenberg (7), Neusling (9), Reding (11), Reith (12), Steinbeißer (17) und Uttenkofen (18) basieren auf mindestens 20 Jahren, weshalb nur diese 10 Stationen für den Vergleich Relevanz besitzen. Aufgrund der hohen Wetterabhängigkeit von Sonnenscheindauer und Einstrahlung können die maximal bzw. minimal gemessenen jährlichen Werte stark von den langjährigen Mittelwerten abweichen (vgl. Abb. 25). Ähnlich zur Windenergie mit windarmen und windreichen Jahren können

¹⁰⁷ Die Nummern beziehen sich auf die Angaben in Karte 11.

bei der Photovoltaiknutzung Jahre mit höherem bzw. niedrigerem Ertrag auftreten. Die Standorte der Messstationen sind in Karte 11 eingetragen.

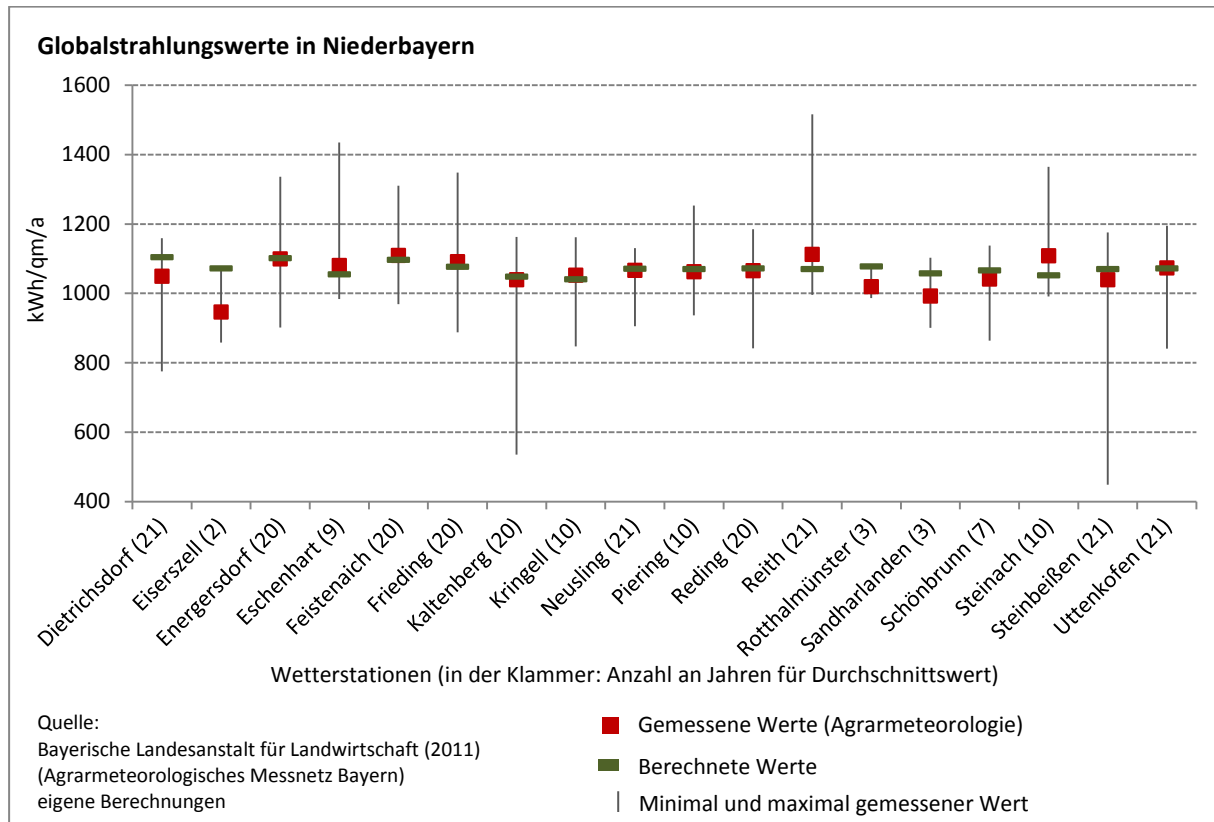


Abb. 25: Gemessene und berechnete Globalstrahlung ausgewählter Standorte in Niederbayern

Der Regierungsbezirk Niederbayern besitzt durchwegs hohe Globalstrahlungswerte, was die weite Verbreitung der Photovoltaik mit begründet. Die günstigsten Einstrahlungswerte verzeichnen der südöstliche Bayerische Wald sowie die Höhenzüge im hinteren Bayerischen Wald. Demgegenüber weisen die steilen nordexponierten Hänge, z.B. entlang des Donaudurchbruchs bei Kelheim oder die Hänge rechts der Donau von Pleinting bis nach Jochenstein geringe Werte auf. Im Tertiärhügelland wechseln sich aufgrund des bewegten Reliefs Gebiete mit mittlerer bis hoher Einstrahlung ab. Die ausgedehnte Dungauebene besitzt mit Werten zwischen 1050 und 1100 kWh/qm pro Jahr ebenfalls günstige Voraussetzungen (vgl. hierzu auch StMWVT 2001a / StMUG 2011).

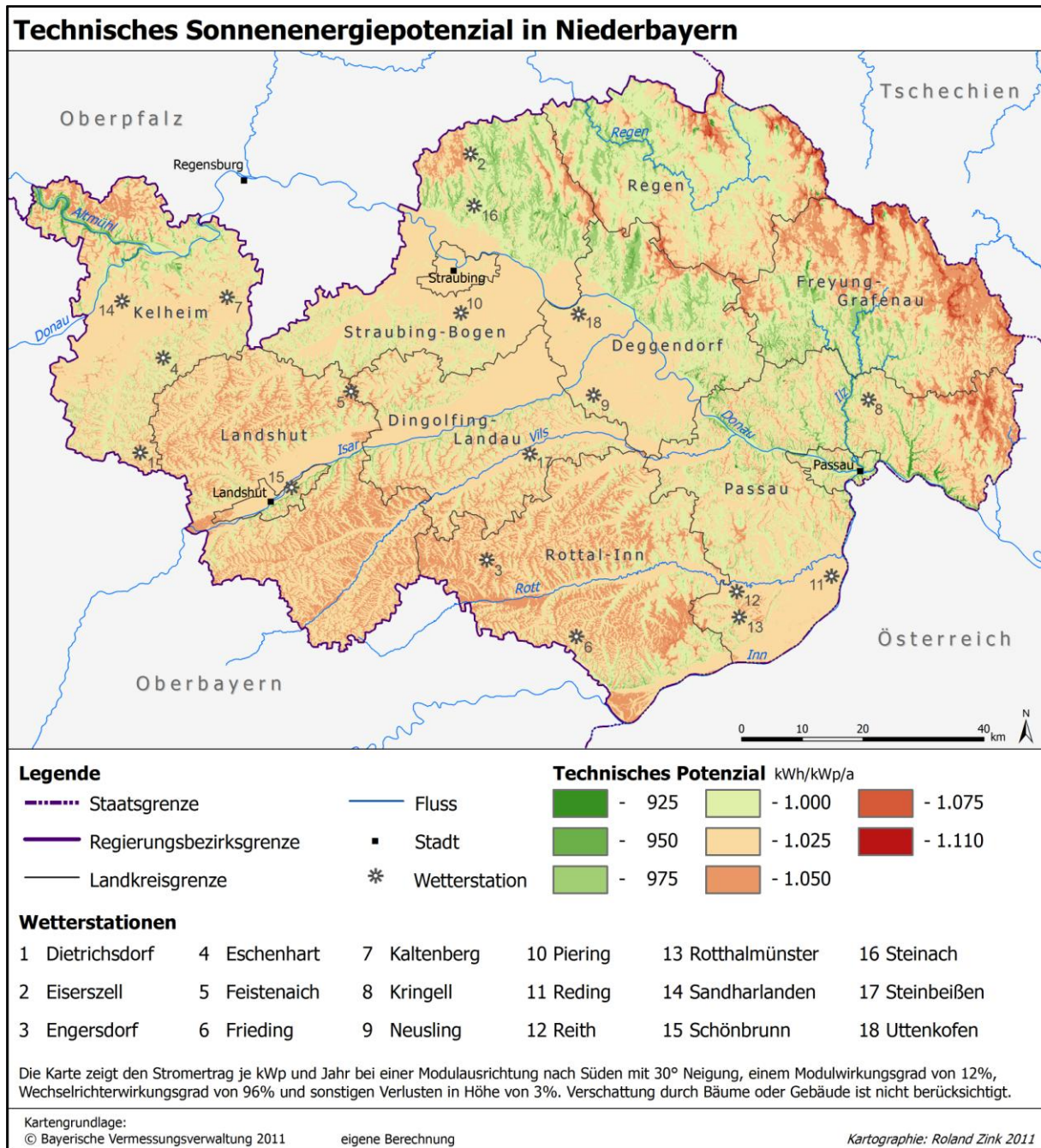
Um eine Aussage zur Rentabilität möglicher Anlagen an einem Standort treffen zu können, werden die theoretischen Globalstrahlungswerte flächendeckend in, für Wirtschaftlichkeitsprognosen grundlegende, potenzielle Ertragswerte (kWh/kWp) umgerechnet. Hierbei berücksichtigt das Modell die Parameter der exemplarisch definierten Photovoltaikanlage (30° Neigung, Ausrichtung nach Süden, 225W-Module, usw.). Zusätzlich werden für den Wechselrichter ein Wirkungsgrad von 96% (europäischer Wirkungsgrad), für die Module ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 12% und sonstige Wirkungsgradeinbußen mit 3% (z.B. Kabelwiderstand) angenommen. Die Bedeckung von Photovoltaikmodulen mit Schnee führt im Winter zu einem kompletten Ausfall der Stromproduktion.

Deshalb sind in Anlehnung an die Dauer einer geschlossenen Schneedecke (vgl. hierzu Schneider & Schönbein 2003) die entsprechenden Tage vom Ertrag subtrahiert. Lokale externe Einflüsse auf die Anlage wie eine mögliche Verschattung durch Bäume oder umliegende Gebäude sind aufgrund der Größe des Untersuchungsgebietes im technischen Potenzial allerdings nicht berücksichtigt.

Das Ergebnis (vgl. Karte 11) zeichnet im Wesentlichen die räumliche Verteilung der Globalstrahlung nach, mit ebenfalls hohen Ertragswerten im südöstlichen Bayerischen Wald und den Höhenlagen des Tertiärhügellandes. Werte unter 1.000 kWh/kWp sind lediglich entlang enger oder tiefeingeschnittener Flusstäler und dort im Besonderen an nordexponierten Hängen zu verzeichnen. Beispiele hierfür sind wiederum der Donaudurchbruch und das Altmühltal im Landkreis Kelheim, das Donautal von Pleinting bis Jochenstein oder das nord-süd verlaufende Graflinger Tal nördlich von Deggendorf bzw. das tiefe Erlautal östlich von Passau. Aus ökonomischer Sicht sind bis auf diese wenigen Ausnahmen im gesamten Regierungsbezirk gut geeignete Standorte für die Nutzung der Photovoltaik (bei optimaler Ausrichtung) vorhanden, die unter den gegebenen Fördersätzen (Stand 2011) und den aktuellen Investitionskosten wirtschaftlich rentabel sind.

Die Darstellung des technischen Photovoltaikertragspotenzial für Niederbayern (vgl. Karte 11) gibt eine Orientierung, wo sich mögliche Standorte für Photovoltaikanlagen befinden. Die Potenziale beziehen sich auf die Referenzanlage mit optimaler Ausrichtung der Module, weshalb die allgemeine Gültigkeit der Ertragswerte eingeschränkt wird. Zumeist weichen bei konkreten Anlagenplanungen die technischen Parameter und/oder die Exposition von den hier getroffenen Annahmen ab. Anlagenspezifische Ertragsprognosen verlangen daher exakte Angaben zu den technischen Parametern (Modultyp, Hersteller, Leistung, Wirkungsgrad, ...) sowie zur Ausrichtung bzw. Neigung und den lokalen Gegebenheiten (z.B. Verschattung).

Die dargestellten Ertragswerte wurden anhand bestehender Photovoltaikanlagen im Untersuchungsgebiet, die ähnliche Parameter wie die Referenzanlage aufweisen, überprüft. Dabei konnten sowohl die ermittelten Werte als auch die wirtschaftliche Rentabilität der Anlagen bestätigt werden. In einigen Fällen sind die Ertragswerte eher konservativ modelliert. Dies liegt größtenteils an dem angenommenen Modulwirkungsgrad von 12%, der bei modernen Anlagen zumeist übertroffen wird, wodurch der Jahresenergieertrag steigt. Da die meisten Photovoltaikanlagen in Niederbayern erst nach dem Jahr 2006 errichtet wurden, fehlen allerdings aussagekräftige und langjährige Ertrags- bzw. Mittelwerte.



Karte 11: Technisches Sonnenenergiepotenzial in Niederbayern

5.6.2 Nachhaltiges Potenzial von Photovoltaik-Dachanlagen

Die weite Verbreitung von Photovoltaik auf Hausdächern ist in Niederbayern wie im übrigen Bundesgebiet auf die hohe staatliche Förderung zurückzuführen. Obwohl damit vornehmlich wirtschaftliche Interessen dominieren, bescheinigt die Technologiebewertung den Dachanlagen darüber hinaus Eigenschaften für eine nachhaltige Versorgung, was einerseits den begonnenen Ausbauprozess bestätigt und ihn andererseits weiter fordert. Neben den technologischen Vorzügen ist ein zusätzlicher Aspekt die hohe gesellschaftliche Akzeptanz von Photovoltaik-Dachanlagen. In der

Untersuchungsregion betreiben heute viele Bürger eine eigene Photovoltaikanlage und sind daher für diese Technologie sensibilisiert. Die aufgrund der Förderung gute wirtschaftliche Rentabilität sowie der wartungsarme und weitgehend zuverlässige Betrieb sorgen dabei für positive Erfahrungen und ein gutes Image der Technologie.

Die durchgeführte Befragung wichtiger Akteure bestätigt diese hohe Wertschätzung gegenüber der Photovoltaik. So sprachen sich alle befragten Personen dafür aus, Photovoltaikanlagen auf öffentlichen Gebäuden (z.B. Rathaus oder Verwaltungsgebäude) und auf gewerblich bzw. industriell genutzten Gebäuden zu errichten. Gerade Industriegebäude oder große Ställe in der Land- und Forstwirtschaft bieten ein hohes Dachflächenpotenzial. Gleichzeitig bestehen geringe Einwände, diese Gebäude wegen architektonischer bzw. ästhetischer Gesichtspunkte nicht zu nutzen. Ebenfalls mit großer Mehrheit (38 der 41 eingegangenen Fragebögen) wurde die Installation von Photovoltaik auf privaten Häusern befürwortet. Dass die Photovoltaik heute keine Besonderheit mehr ist und bereits zum Landschaftsbild der Region bzw. zur Architektur der Gebäude gehört, zeigt am deutlichsten die mehrheitliche Zustimmung zu Photovoltaikanlagen auch auf Kirchendächern. Bei keiner anderen erneuerbaren Energieform sind die lokalen sozialen Widerstände derart gering wie bei Photovoltaik-Dachanlagen. Im Sinne einer nachhaltigen, gesellschaftsverträglichen und konfliktvermeidenden Entwicklung ist es deshalb anzustreben, die Potenziale der Photovoltaik auf Hausdächern weitestgehend auszuschöpfen.

5.6.3 Beitrag von Photovoltaik-Dachanlagen zur autarken Versorgung

Der potenzielle Beitrag der Photovoltaik auf Dächern ist wegen der regionalen Modellierung und der damit verbundenen Größe des Untersuchungsgebietes schwer abschätzbar, kommen den Angaben der Befragten doch nahezu sämtliche Gebäude, die entsprechende Voraussetzungen (Dachfläche, Neigung, Gebäudestabilität usw.) aufweisen, in Betracht. Für die näherungsweise Bestimmung des nachhaltigen Dachflächenpotenzials ist es daher notwendig, repräsentative Kennzahlen über geeignete Dachflächen zu entwickeln, die dann als Grundlage für die Berechnung auf Regierungsbezirksebene verwendet werden können. Die Kennzahlen sollen Auskunft darüber geben, welchen Anteil nutzbare Dachflächen an der jeweiligen Grundfläche der ATKIS-Flächenkategorien einnehmen. Hierzu werden geeignete Dachflächen anhand einer Dachflächenkartierung von Gebäuden erörtert, die sich innerhalb der Kategorien „Wohnbaufläche“, „Fläche gemischter Nutzung“, „Industrie- und Gewerbeflächen“ sowie „Flächen funktionaler Prägung“ befinden und anschließend in Bezug zur jeweiligen Grundfläche gesetzt. Die Kartierung erfolgt auf Grundlage digitaler Orthophotos (DOP) im Maßstab 1:1.000. Eine Betrachtung bestehender Anlagen im Untersuchungsgebiet zeigt, dass eine Ausrichtung der Dächer von Osten bis Westen (180°) möglich

ist. Die Exposition der Dächer wird in der Kartierung verzeichnet und anschließend auf äquivalente südexponierte Dachflächen umgerechnet, damit eine Potenzialabschätzung mit Hilfe des technischen Potenzials (vgl. Karte 11) möglich wird. Zudem werden die horizontal kartierten Flächen anhand durchschnittlicher Dachneigungswinkel in tatsächliche Dachflächen umgerechnet.

In dem so erstellten Modell zur Abschätzung des Photovoltaikbeitrages auf Dächern können weitere Parameter definiert werden, die die Berücksichtigung technischer oder sozialer Restriktionen zulassen. Technische Restriktionen betreffen z.B. Flachdächer, auf denen die Module mittels einer Unterkonstruktion schräg nach Süden hin aufgeständert sind, um bessere Einstrahlungsbedingungen zu erzielen. Wegen der daraus resultierenden gegenseitigen Verschattung der Module muss zwischen den Modulreihen jedoch ein Abstand eingehalten werden, wodurch sich die nutzbare Modulfläche reduziert. Zudem finden Störfaktoren innerhalb der Dachflächen (Dachfenster, Kamine oder Gauben) durch eine entsprechende Potenzialreduktion Beachtung. Verschattungen, die von nebenstehenden Gebäuden oder umstehenden Bäumen resultieren, bleiben hingegen unberücksichtigt.

Sozio-ökonomische Faktoren spielen insoweit eine Rolle, da es trotz der technischen Möglichkeit und der wirtschaftlichen Rentabilität nicht absehbar ist, alle potenziellen Dächer für Photovoltaik zu nutzen. Beispiele sind landwirtschaftliche Hofstellen, im besonderen Vierseithöfe, die meist hohe technische und wirtschaftliche Potenziale aufweisen, da sie mehrere geeignete Dachflächen besitzen. Die Nutzung sämtlicher Dächer ist jedoch mit hohen Investitionskosten verbunden, weshalb Landwirte häufig nur einen Teil der möglichen Dachflächen für Photovoltaik verwenden oder die Photovoltaik erst über mehrere Jahre hinweg sukzessive auf andere Dachflächen erweitern. Durch Befragung von Solarmonteuren konnten technische und soziale Einschränkungen geschätzt werden. Hieraus ergab sich, dass die positiv kartierten Dächer bei „Wohnbauflächen“ zu 30%, „Flächen gemischter Nutzung“ zu 42%, „Flächen funktionaler Prägung“ zu 19% und „Industrie- und Gewerbeflächen“ zu 36% zur Verfügung stehen.

Die Ermittlung von Kennzahlen zur potenziellen Süddachfläche wird mit dem beschriebenen Modell für jede Flächenkategorie mehrfach durchgeführt, mindestens eine Analyse je Landkreis bzw. je kreisfreier Stadt. Die Auswahl der untersuchten Flächen erfolgt per Zufall.¹⁰⁸ Insgesamt wurde eine Fläche von 376ha kartiert, wovon 58ha auf die Kategorie „Wohnbaufläche“, 67ha auf „Fläche gemischter Nutzung“, 201ha auf „Industrie- und Gewerbeflächen“ und 50ha auf „Flächen funktionaler Prägung“ entfallen. Aus den erzielten Teilergebnissen wird anschließend für alle Flächenkategorien ein, an der kartierten Fläche gewichteter Mittelwert gebildet, welcher dann für das gesamte Untersuchungsgebiet zur Abschätzung des möglichen Beitrages der Photovoltaik auf Dachflächen

¹⁰⁸ In folgenden Kommunen fand eine Kartierung statt: Abensberg, Arnbruck, Ascha, Bad Griesbach, Dingolfing, Landshut, Passau, Plattling, Schalkham, Stephansposching, Stubenberg, Vilsbiburg und Waldkirchen.

verwendet wird. Die räumliche Verschneidung mit den Einstrahlungswerten (vgl. Karte 11) lässt schließlich eine Abschätzung des Beitrages der Photovoltaik auf Dachflächen zu (vgl. Tabelle 24).

Tabelle 24: Potenzieller Stromertrag von Photovoltaik-Dachanlagen in Niederbayern

| Flächenkategorie | Potenzieller jährlicher Stromertrag (Mio. kWh) |
|------------------------------|---|
| Fläche funktionaler Prägung | 49,75 |
| Fläche gemischter Nutzung | 1.662,47 |
| Industrie- und Gewerbefläche | 341,52 |
| Wohnbaufläche | 795,49 |
| Summe | 2.849,23 |

Die dargelegten Zahlen sind eine Abschätzung des möglichen Beitrages und beruhen auf zahlreichen Annahmen. Detaillierte, aber räumlich stark begrenzte Analysen können durch spezielle Verfahren wie etwa der Auswertung von Laserscandaten exaktere Aussagen liefern (vgl. exemplarisch Klärle 2008), erweisen sich aber in dieser Arbeit mit einem derart großen Untersuchungsraum als nicht praktikabel. Dennoch soll das Ergebnis verdeutlichen, welchen Stellenwert diese Technologie trotz ihrer wetterabhängigen Produktion zur Versorgung einnehmen kann und welche zusätzlichen Potenziale zu der ohnehin bereits weitverbreiteten Nutzung bestehen. Nach Zahlen der Datenbank „EnergyMap“ beläuft sich der jährliche Stromertrag bestehender Anlagen im Regierungsbezirk, die nach EEG vergütet sind, bereits auf über 1.700 Mio. kWh¹⁰⁹ (vgl. DGS 2012). Das unter restriktiven Annahmen modellierte Potenzial erscheint daher als erreichbar und lässt ggf. sogar eine weitere Steigerung vermuten. Neue Speichertechnologien vor allem bei privaten Ein- und Mehrfamilienhäusern bieten zudem heute schon die Möglichkeit Sonnenenergie dezentral zu speichern, wodurch das oftmals kritisch angeführte Argument der einstrahlungsbedingten Produktionsschwankungen von Photovoltaikanlagen abgeschwächt wird.

5.6.4 Nachhaltige Standorte für eine Photovoltaik-Freiflächenanlage

Photovoltaik-Freiflächenanlagen haben im Regierungsbezirk Niederbayern seit der wirtschaftlichen Förderung durch das EEG für großes Aufsehen gesorgt. Speziell in den Jahren 2009 und 2010 sind zahlreiche große Solarparks entstanden, was bei Politikern und Bürgern teils zu heftigen Protesten führte. Mit der Subventionsbeschränkung auf Konversions- und vorbelastete Flächen entlang von Autobahnen und Bahnlinien durch die Novellierung des EEG hat sich der Boom an Neubauten rapide abgeschwächt bzw. auf diese Flächen konzentriert. Durch die Erörterung nachhaltiger Standorte für Photovoltaik-Freiflächenanlagen werden zum einen weitere potenzielle Standorte im Untersuchungsraum aufgezeigt. Zum anderen lässt die Analyse eine nachträgliche Bewertung bereits realisierter Freiflächenanlagen zu, womit eine objektive Aussage zur Qualität der, von Gemeinden und Städten bisher angewendeten unterschiedlichen räumlichen Steuerungsinstrumente möglich

¹⁰⁹ Beitrag des Solarstroms aus Photovoltaik-Dachanlagen und Photovoltaik-Freiflächenanlagen (vgl. DGS 2012).

wird. Darüber hinaus liefert das Modell wichtige Erkenntnisse zum Ausbau der Photovoltaik in anderen Regionen, die noch nicht so weit fortgeschritten sind wie der Regierungsbezirk.

Wie bei den anderen Energieformen erfolgt zu Beginn der Standortsuche der Ausschluss von Flächen, die sich aus bautechnischen Gründen nicht eignen (vgl. Anhang Karte 8). Derartige Restriktionsflächen sind z.B. Siedlungsflächen, Wasserflächen oder Gebiete mit einer Hangneigung größer 35°. Ebenfalls ausgeschlossen sind Gruben, Tagebaugebiete und sonstige Flächen, die wirtschaftlichen Zwecken dienen, obwohl diese Kategorien vereinzelt für die Errichtung einer Photovoltaikanlage in Betracht kommen können. Beispiel hierfür ist ein weiterhin wirtschaftlich genutztes, zum Teil jedoch bereits ausgebeutetes Kiesabbaugebiet in der Gemeinde Stephansposching (Landkreis Deggendorf). Auf vier neuerrichteten großen Pultdächern mit optimaler Exposition zur Sonne wird dort Photovoltaik als Alternative bei der Nachnutzung offengelassener Abbaustätten eingesetzt.

Eignung von Kiesgruben zur Photovoltaiknutzung



Das Bild zeigt große Pultdächer als neue Form der Photovoltaiknutzung in Kiesgruben. Drei Pultdächer sind in der rechten Bildhälfte und ein viertes Pultdach am linken Bildrand zu erkennen.

Gemeinde Stephansposching, Landkreis Deggendorf, Aufnahmezeit: August 2011, Foto: Michael Burghart

Abb.26: Eignung von Kiesgruben zur Photovoltaiknutzung

Die ökonomische Untergrenze der Modellierung orientiert sich an aktuellen Fördersätzen der Bundesregierung und wird mit einem durchschnittlichen Ertragswert von 980 kWh/kWp festgesetzt. Wie bei Photovoltaik-Dachanlagen gilt der Ertragswert je kWp als wesentliche Kenngröße zur Wirtschaftlichkeit einer Anlage. Auch Banken kalkulieren mit einem Mindestertragswert, um entstehende Investitionskosten zu finanzieren. Eine Fremdfinanzierung ist i.d.R. bei allen Freiflächenanlagen der Fall. Die bei Freiflächenanlagen stets gegebene Möglichkeit, Module optimal zur Sonne auszurichten, führt in Kombination mit den günstigen Einstrahlungsbedingungen in Niederbayern dazu, dass der Wert von 980 kWh/kWp nahezu flächendeckend erreicht wird (vgl. Anhang Karte 9). Lediglich im vorderen Bayerischen Wald nordöstlich der Donau von Straubing bis nach Passau sind vermehrt Gebiete, die unterhalb der definierten wirtschaftlichen Ertragsgrenze liegen. Hierbei handelt es sich um die kleinen und engen Fluss- bzw. Bachtäler, die zur Donau entwässern (vgl. hierzu auch Karte 11).

Eine deutlich größere Einschränkung der potenziellen Flächen resultiert aus der Beachtung ökologischer Belange (vgl. Anhang Karte 10). Aus Sicht der ökologischen Dimension ist es

anzustreben, mit Ausnahme des Naturparks, alle geschützten Flächen für den Bau von Photovoltaik-Freiflächenanlagen auszuschließen. Neben den ökologisch sensiblen Gebieten wie etwa der Isarmündung, dem Altmühltal, dem Inntal oder dem Nationalpark, die durch mehrere Gesetze geschützt sind, handelt es sich folglich bei weiten Teilen des Bayerischen Waldes ebenfalls um nicht nachhaltige Standorte. Trotz dieser umfassenden ökologischen Restriktionen hält der Regierungsbezirk Niederbayern ein großes Potenzial bereit, da im Tertiärhügelland und speziell im Dungau sehr viele Flächen zur Verfügung stehen.

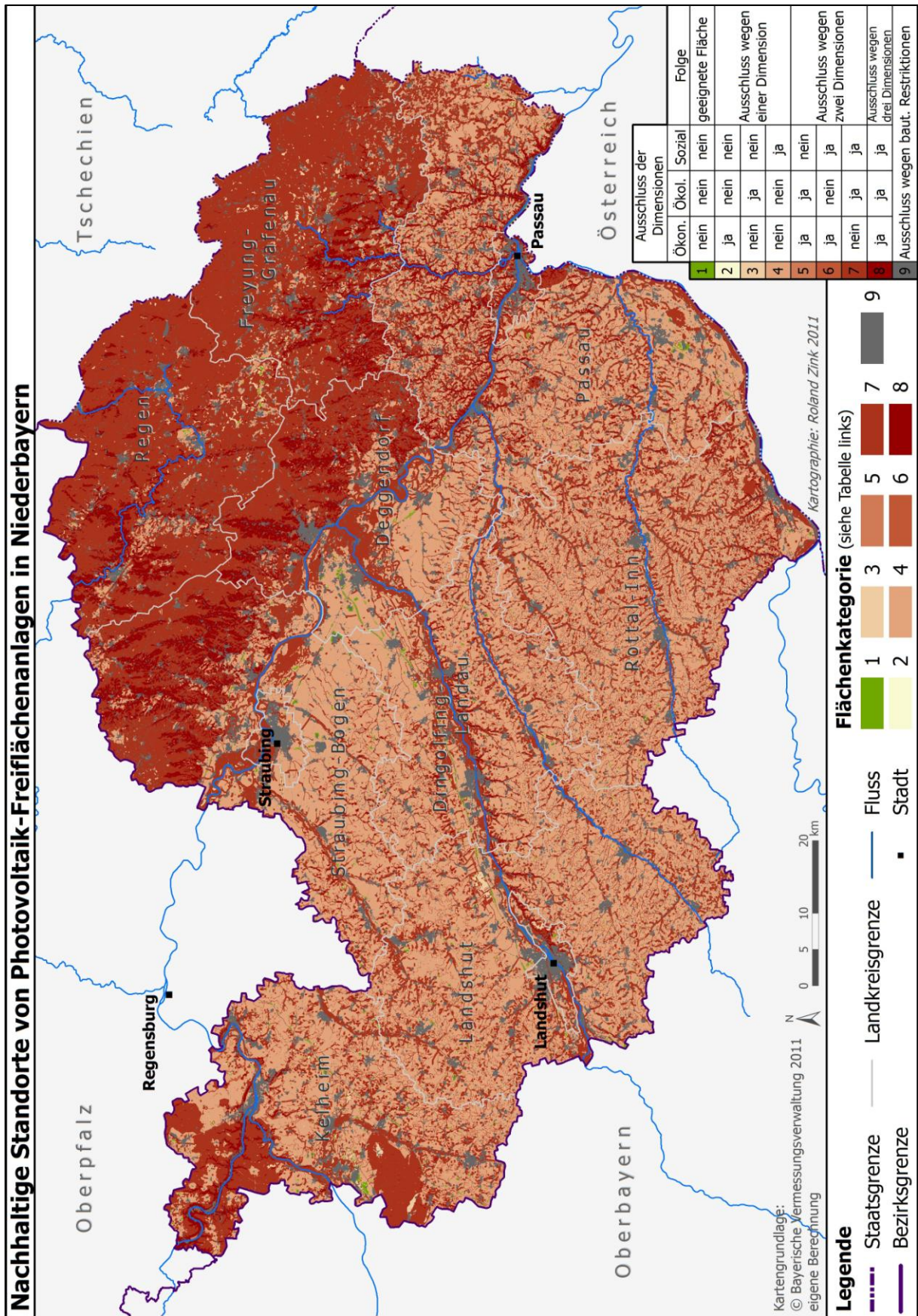
Dieser Sachverhalt ändert sich, wenn auch die Vorstellungen, Befindlichkeiten und Wünsche der Bürger in die räumliche Modellierung integriert werden. Die gewählten Flächennutzungs- und Abstandskriterien führen dazu, dass nur mehr wenige Eignungsflächen übrig bleiben. Die räumliche Einengung ist Folge zweier unterschiedlicher Argumentationen. Erstens werden bestimmte Flächen wie etwa Wald oder Ackerland, mit Ausnahme in Nachbarschaft zu einer bestehenden Vorbelastung, durch die befragten Akteure gänzlich ausgeschlossen. Ein eindeutiges Votum zeigt hierbei der Ausschluss von Waldgebieten, indem sich alle Personen dafür aussprachen, Wald zugunsten einer Photovoltaik-Freiflächenanlage nicht zu roden. Bei den landwirtschaftlichen Flächen gab die Minderheit der Befragten (14 Personen) an, Ackerflächen auch ohne Anschluss an eine Vorbelastung zu nutzen. Alleine mit der Ablehnung dieser beiden Flächenkategorien (Wald und Ackerland ohne Vorbelastung) geht bereits eine starke räumliche Eingrenzung potenzieller Flächen einher.

Zweitens fordern die Akteure hohe Mindestabstände zwischen einer Freiflächenanlage und einem bewohnten Gebiet (590m bzw. 295m), wodurch sich die möglichen Standorte weiter reduzieren. Schließlich bleiben zumeist nur kleine geeignete Flächen übrig, die über den gesamten Regierungsbezirk verstreut sind. Größere zusammenhängende Gebiete sind in der Nähe zu bestehenden Vorbelastungen (z.B. entlang der Autobahn A92 oder den Tagebauten im Dungau) und auf Grünlandflächen¹¹⁰, die von den Akteuren als potenziell geeignet definiert wurden (z.B. in den Gemeinden Kirchberg im Wald, Kirchdorf im Wald und Eppenschlag oder das größere Gebiet nordöstlich der Stadt Landshut), zu verzeichnen (vgl. Anhang Karte 11). Die weitläufige Eignungsfläche im südwestlichen Landkreis Passau umfasst das Areal der ehemaligen Kaserne in Pocking, welches bereits als Photovoltaik-Freiflächenstandort genutzt wird. Im Westen des Landkreises Kelheim weist die Modellierung zudem einen Truppenübungsplatz sowie die Anschlussflächen an ein Autotestgelände bzw. an bestehende Industrieanlagen als positive Flächen aus. Photovoltaikanlagen in Nachbarschaft zu Industriegebieten bedürfen in kommunalen Entscheidungsprozessen stets der Abwägung zwischen potenzieller Sonnenenergienutzung und einer möglichen Erweiterung des Industriegebietes. Die Anbindung an Industriegebiete erscheint

¹¹⁰ Grünlandflächen sind durch das aktuelle EEG allerdings nicht gefördert.

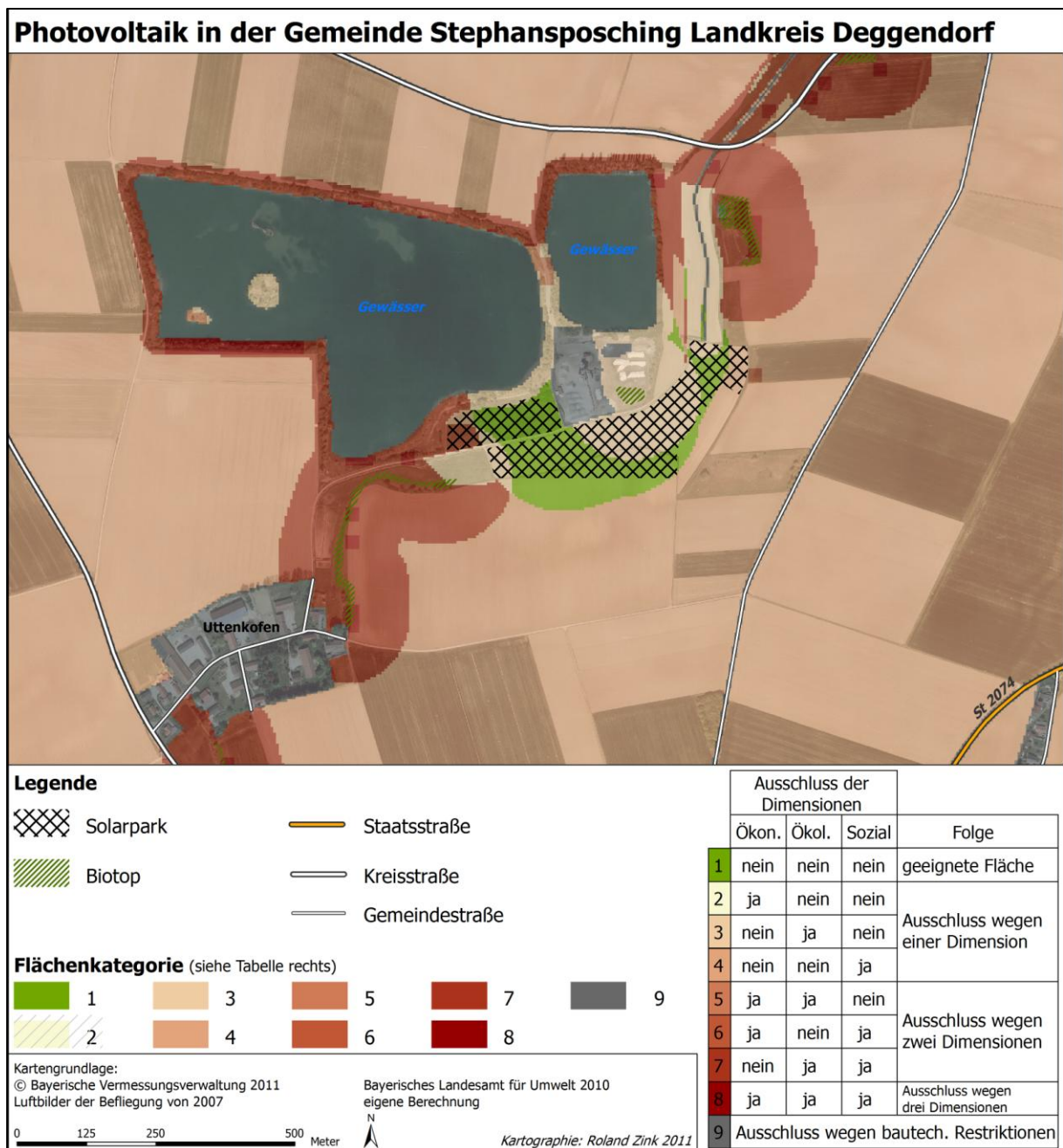
dahingehend sinnvoll, um die Zersiedelung der Landschaft sowie die Auswirkungen der Photovoltaiknutzung auf die Landschaftsästhetik zu begrenzen.

Trotz der vielfältigen Restriktionen ergeben sich in der Gesamtbetrachtung aller Dimensionen zahlreiche Gebiete zur Nutzung von Photovoltaik auf Freiflächen. Die Eignungsflächen sind über den gesamten Regierungsbezirk verteilt, mit einer räumlichen Konzentration in den Landkreisen Deggendorf, Dingolfing-Landau und Straubing-Bogen (vgl. Karte 12). In diesen Landkreisen sind neben der hohen Anzahl an möglichen Standorten auch große zusammenhängende Flächen vorhanden, da aufgrund der Siedlungsstruktur einerseits ausreichende Abstände zu Siedlungseinheiten gegeben sind und andererseits die nötigen Vorbelastungen im Sinne von Autobahnen, Bahnlinien oder wirtschaftlich genutzten Gebieten (vor allem Industriegebiete und Tagebaugruben) bestehen. Große zusammenhängende Flächen beugen ebenfalls einer Zersiedelung der Landschaft vor und sind für Investoren wirtschaftlich interessant. Der Bayerische Wald kann wegen der hohen ökologischen und sozialen Einschränkungen wenige geeignete Standorte aufweisen. Größere Areale sind nur im südöstlichen Landkreis Passau sowie im Süden des Landkreises Regen zu finden.



Karte 12: Nachhaltige Standorte von Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Niederbayern

Wie bereits erwähnt lassen sich mit den Ergebnissen auch bestehende Photovoltaik-Freiflächenanlagen auf ihre Standortgüte überprüfen. Ein Beispiel aus der Gemeinde Stephansposching (Landkreis Deggendorf) zeigt einen Solarpark, dessen Lage sich in der Modellierung ebenfalls als nachhaltig erwiesen hat (vgl. Karte 13). Die Freiflächenanlage befindet sich auf einer Ackerfläche in räumlicher Nähe zu einer bestehenden Vorbelastung (Asphaltmischwerk). Einzig die Abstandsfläche zu einem nahegelegenen Biotop, im Kriterienkatalog mit 100m festgelegt, ist nicht eingehalten. Deshalb reicht von Norden ein kreisförmiges Ausschlussgebiet in das Areal des bestehenden Solarparks hinein (vgl. Karte 13).



Karte 13: Photovoltaik in der Gemeinde Stephansposching Landkreis Deggendorf

Trotz dieser geringen Abweichung ist die räumliche Übereinstimmung zwischen modelliertem und tatsächlichem Standort gegeben. Das Ergebnis verdeutlicht allerdings auch, dass in der Modellierung keine Flurgrundstücke bzw. Parzellenzuschnitte berücksichtigt wurden. Aufgrund von Eigentümerstrukturen orientiert sich die Grundrissgestaltung einer Photovoltaik-Freiflächenanlage vornehmlich an den jeweiligen Grenzverläufen von Fluren bzw. von Grundstücken. Anliegen der vorliegenden Suche nach nachhaltigen Standorten für die Photovoltaik – wie auch bei den übrigen Technologien – ist es, potenziell geeignete Orte und Flächen zu identifizieren, nicht jedoch eine konkrete Planung im Sinne der technischen und architektonischen Gestaltung der Anlage vorwegzunehmen. Die erörterten Eignungsflächen müssen daher in einem Planungs- und Genehmigungsprozess weiter konkretisiert und den lokalen Grundstücks- sowie Eigentumsverhältnissen soweit als möglich angepasst werden. Dabei liefert die detaillierte Betrachtung der vorgestellten Ergebnisse (vgl. z.B. Karte 13) eine Orientierungshilfe, welche Flächen grundsätzlich für eine nachhaltige Nutzung in Betracht kommen und sie gibt zudem wertvolle Anhaltspunkte für entsprechende Planungsverfahren.

5.6.5 Beitrag von Photovoltaik-Freiflächenanlagen zur autarken Versorgung

In der räumlichen Modellierung sind teils fragmentierte Standorte ausgewiesen, die aufgrund ihrer Größe für eine Photovoltaik-Freiflächenanlage nicht geeignet sind. Als Mindestgröße wird deshalb ein Hektar festgelegt. Kleinere Areale werden im Fortgang nicht weiter beachtet. Die größte zusammenhängende Fläche (74ha) befindet sich auf dem Areal des ehemaligen Bundeswehrgeländes in Pocking, Landkreis Passau. Die Summe aller potenziellen Flächen beträgt 3.383ha. Mit dem Richtwert, dass die Modulfläche eines Solarparks rund 40% der jeweiligen Grundfläche entspricht, ergibt sich eine installierte Leistung von 1.353 MWp. Der durchschnittlich prognostizierte Jahresstromertrag aller Eignungsflächen beträgt 1.013 kWh/kWp, was in der Summe eine jährliche Stromerzeugung von 1.371 Mio. kWh bedeutet. Damit ließe sich der Strombedarf des Regierungsbezirkes bilanziell zu ca. 17% bedienen.

5.7 Bioenergie

Die beiden Referenzanlagen der Bioenergie haben in der Technologiebewertung durchschnittlich abgeschnitten und rangieren auf den Plätzen fünf und sieben. Die unterschiedlichen Techniken zur Gewinnung von Energie aus biologischem Material lassen jedoch keine allgemeine Aussage zu. Hierbei ist sowohl die Variation des verwendeten Substrates, z.B. biologische Reststoffe, Gülle oder Mist anstelle von nachwachsenden Rohstoffen, als auch das Umwandlungsverfahren, z.B. Holzvergasung statt Holzverbrennung, ausschlaggebend. Die Bewertung muss für jede Technologievariante stets separat durchgeführt werden.

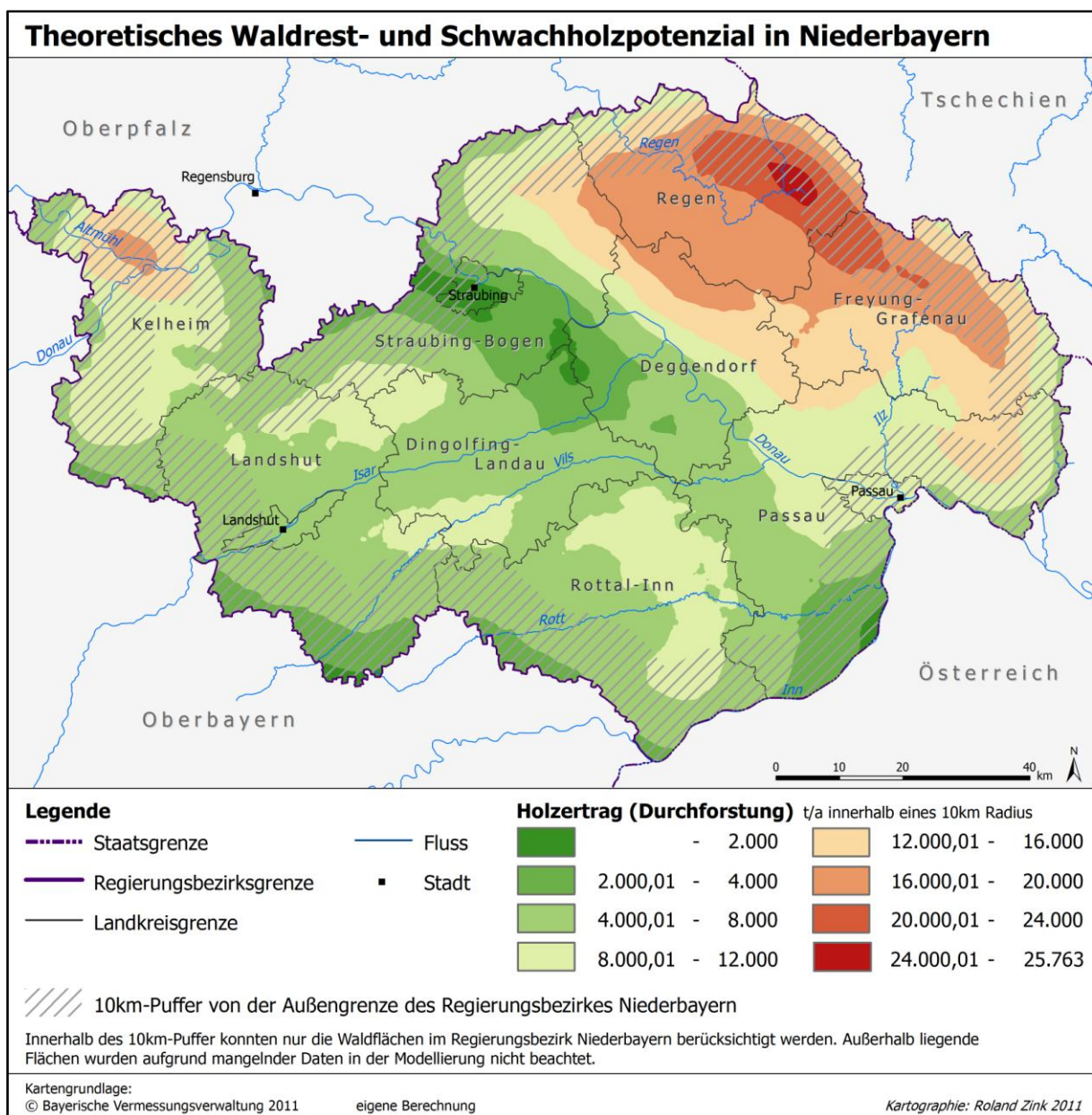
5.7.1 Theoretisches und nachhaltiges Biomassepotenzial Holz

Holz ist ein wichtiger Energierohstoff, der vor allem zur Gewinnung von Wärme im Gewerbe und in Haushalten eingesetzt wird. Wichtige Rohstofflieferanten sind die Forstwirtschaft, die Landschaftspflege oder die Holzindustrie bzw. die Holzverarbeitende Industrie (z.B. Papierindustrie). Entsprechend dieser unterschiedlichen Rohstoffquellen liegt das Holz in verschiedener Form (z.B. Scheitholz, Hackschnitzel, Sägespäne usw.) und Qualität (v.a. Feuchtegehalt) vor. Für das exemplarisch definierte Biomasseheizkraftwerk wird Holz in Form von Hackschnitzel verwendet. Hackschnitzel bezeichnet eine lose Schüttgutform, das Holz, je nach Qualität des Holzhackers, in groben oder feinen Holzsplittern beinhaltet (vgl. hierzu Hartmann & Höldrich 2007, S. 31ff.). Hackschnitzel fallen in der industriellen Produktion als Abfall bzw. Verarbeitungsrückstände sowie in der Forstwirtschaft und der Landschaftspflege an.

In der Potenzialmodellierung für den Regierungsbezirk Niederbayern wird nur das Durchforstungs- und Waldrestholzaufkommen beachtet. Als jährlich gewinnbare Holzmenge (Schwachholz) werden bei der Durchforstung 550kg Holzhackschnitzel für Weichholz und 800kg für Hartholz pro Hektar angenommen (vgl. hierzu und zu den nächsten Angaben Hartmann & Höldrich 2007, S. 18ff. / TFZ 2011). Dies entspricht einem Holzertrag von 70 Schüttraummeter (Srm) bei einem Durchforstungszyklus von 25 Jahren. Zusätzlich zum Durchforstungsholz wird ein Waldrestholzaufkommen von 400kg/ha angenommen. Anhand dieser Ertragskennzahlen und den bestehenden Waldflächen im Regierungsbezirk erfolgt eine Regionalisierung des potenziellen Holzertrages. Für das Biomasseheizkraftwerk wird zudem ein Einzugsgebiet von 10km festgesetzt. Dies bedeutet, dass zum Betrieb der Anlage nur auf Holz innerhalb dieses Radius zurückgegriffen wird.

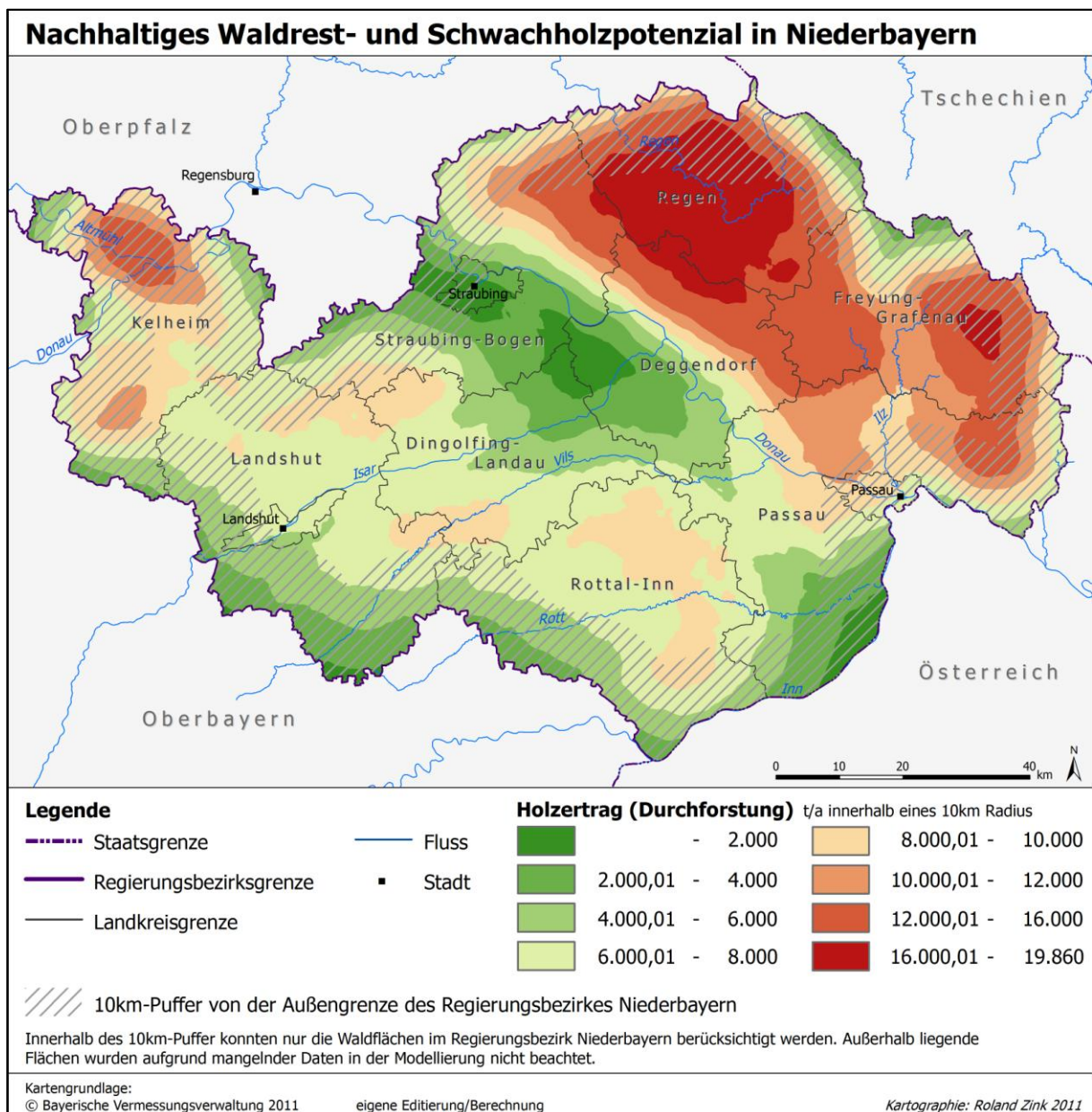
Das mit Abstand höchste theoretische Potenzial, bezogen auf den 10km Radius, besitzt der Bayerische Wald mit seinen ausgedehnten Wäldern (vgl. Karte 14). Demgegenüber führt der geringe

Waldflächenanteil in Gebieten intensiver ackerbaulicher Nutzung zu einem geringen Holzpotenzial, was sich insbesondere im Dungau und den breiten Flusstälern der Isar und des Inns (südlicher Teil des Landkreises Passau) zeigt. Wegen der zumeist bewaldeten Kuppen und Höhenlagen nimmt das Tertiärhügelland eine Mittelstellung ein. Bei der Potenzialberechnung ist einzuschränken, dass Waldflächen außerhalb des Regierungsbezirkes nicht berücksichtigt sind, weshalb z.B. zu dem sehr geringen Potenzial am Inn ein mögliches Holzaufkommen in Oberösterreich hinzugezählt werden muss, um einen Vergleich mit dem restlichen Untersuchungsgebiet ziehen zu können. Dies trifft auf den gesamten Randbereich des Regierungsbezirkes in der Größenordnung des gewählten Einzugsgebietes (10km) zu und ist in der Karte entsprechend gekennzeichnet (vgl. Schraffur in Karte 14).



Karte 14: Theoretisches Waldrest- und Schwachholzpotenzial in Niederbayern

Nicht alle Waldflächen stehen einer energiewirtschaftlichen Nutzung zur Verfügung und sind aus naturschutzrechtlichen Gründen nur extensiv bzw. gar nicht zu bewirtschaften. Diese Einschränkungen, resultierend aus ökologischen oder nachhaltigen Bewirtschaftungsformen beeinflussen den potenziellen Holzertrag erheblich, unterliegen doch viele Wälder wie etwa im Bayerischen Wald oder die Auenwälder entlang der großen Flüsse (z.B. das bewaldete Isarmündungsgebiet im Landkreis Deggendorf) umfassenden Naturschutzbestimmungen. Deshalb wird angenommen, dass Naturdenkmäler, Naturschutzgebiete und der Nationalpark Bayerischer Wald keinen Beitrag zum Energieholzertrag liefern. Bei den übrigen Schutzkategorien (Biotop, FFH und Ramsar) erfolgt eine extensive Nutzung mit einem zur Hälfte geminderten Holzertrag.



Karte 15: Nachhaltiges Waldrest- und Schwachholzpotezial in Niederbayern

Folge dieser Einschränkungen ist ein weiträumiger Ausschluss von Waldflächen zur Gewinnung von Rest- bzw. Schwachholz für Energiezwecke. Dies gilt besonders für den Nationalpark an der Grenze

zur Tschechischen Republik. Trotz der großen Waldflächen ist dort das nachhaltige Potenzial nun gering. Die Regionen mit dem höchsten Holzpotenzial im Umkreis von 10km befinden sich nun im Landkreis Regen, dem nördlichen Landkreis Deggendorf und dem östlichen Landkreis Freyung-Grafenau (vgl. Karte 15). Allgemein bleibt der Bayerische Wald weiterhin die bevorzugte Region, gefolgt vom Tertiärhügelland und den ackerbaulichen Gunstgebieten.

5.7.2 Nachhaltige Standorte für ein Biomasseblockheizkraftwerk

Die bautechnischen und ökologischen Restriktionen zur Standortsuche sind im Kriterienkatalog für das Biomasseblockheizkraftwerk und die analysierte Biogasanlage identisch definiert. Neben den, bei anderen Energieformen bereits angeführten Ausschlussflächen wie Gewässerflächen oder Verkehrswegen, ist es dabei die bautechnische Vorgabe von kleiner 10° Hangneigung, die die potenziellen Standorte vor allem im Bayerischen Wald reduziert (vgl. Anhang Karte 12). Aus ökologischer Perspektive sind es wiederum mehrere Schutzgebietskategorien, die der Errichtung eines Blockheizkraftwerks entgegenstehen, was abermals stark den Bayerischen Wald und die Flussläufe betrifft (vgl. Anhang Karte 13). Teils ist es zwar möglich, in den hier ausgeschlossenen Schutzgebieten (z.B. Landschaftsschutz- oder FFH-Gebiet) entsprechende Anlagen zu errichten. Damit eine Baugenehmigung erteilt wird, müssen jedoch spezielle Auflagen erfüllt werden, die es im Einzelfall und nicht auf regionaler Ebene zu prüfen gilt. Im Vergleich zu den anderen Technologien sind zudem die geringen Abstände zum jeweiligen Schutzgebiet nennenswert. Aufgrund mangelnder Vorgaben wurden diese im Kriterienkatalog geschätzt.

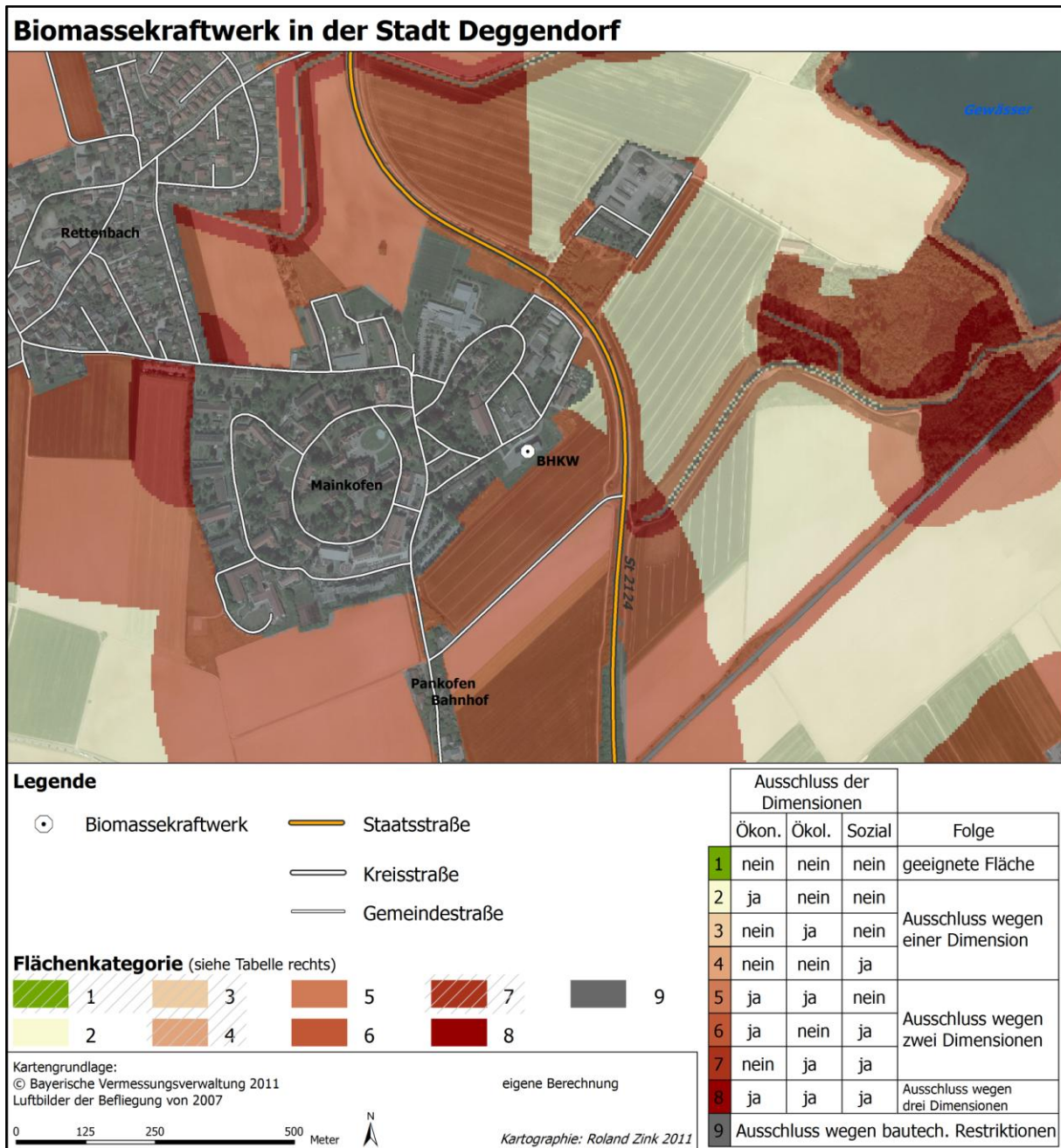
Die ökonomischen Parameter zum Betrieb des Biomasseheizkraftwerkes umfassen ein ausreichendes Holzpotenzial innerhalb des festgelegten Einzugsgebietes, eine adäquate Verkehrsanbindung an geeignete Straßen und entsprechend große Wärmeabnehmer in der Nachbarschaft, um die Anlage mit Kraft-Wärme-Kopplung ökonomisch und energieeffizient betreiben zu können. Hierbei wirkt besonders die umfassende Nutzung der Abwärme restriktiv, da durch die hohe Leistung der Anlage ein enormes Wärmepotenzial vorhanden ist, welches nur in größeren Siedlungseinheiten oder Industrie- und Gewerbegebieten abgesetzt werden kann. Deutlich ist dies an den als geeignet deklarierten Standorten zu erkennen, die sich allesamt in der Nähe von großen Wärmekonsumenten befinden (vgl. Anhang Karte 14). Folglich sind z.B. die Städte (z.B. Passau, Dingolfing, Landshut oder Kelheim) wirtschaftlich interessant, da dort auf begrenztem Raum viel Energie nachgefragt wird. Eine Ausnahme hiervon bilden die Städte im Gäuboden (z.B. Straubing, Plattling oder Osterhofen), die mangels Holzrohstoff in der Umgebung keinen geeigneten Standort bieten. Ebenfalls auf Rohstoffmangel ist der Ausschluss von Randgebieten des Regierungsbezirkes zurückzuführen, gut zu erkennen an der südlichen Regierungsbezirksgrenze (vgl. Anhang Karte 14). Wegen der fehlenden

Daten der angrenzenden Bezirke bzw. Länder sind diese Gebiete allerdings nicht aussagekräftig erfasst. Die Modellierung geht davon aus, dass nur Holz aus dem Regierungsbezirk zur Verfügung steht. Für einen Standort an der Grenze bedeutet dies ggf. eine Halbierung des potenziellen Einzugsgebietes, was in der Realität nicht gegeben ist.

Die Modellierung der gewünschten Abstände zwischen Siedlungsflächen und einem Blockheizkraftwerk innerhalb der sozialen Dimension weist auf den ersten Blick zahlreiche geeignete Standorte aus (vgl. Anhang Karte 15). Erneut dominieren jene Orte in den intensiv ackerbaulich geprägten Gebieten, die sich weit entfernt von Weilern, Dörfern oder Städten befinden. Gleichzeitig besitzt jede Gemeinde des Regierungsbezirkes mindestens einen sozial akzeptierten Standort, was einerseits die hohe Anzahl an positiven Flächen und andererseits ihre verstreute Verteilung verdeutlicht. Obwohl zahlreiche Standorte vorhanden sind, verbirgt sich hinter den gewünschten Abständen ein räumliches Dilemma bei der Realisierung von Blockheizkraftwerken, welches ebenso bei Biogasanlagen auftritt. Der Anlagenbetreiber ist bestrebt, den Standort möglichst nahe am Wärmeverbraucher zu platzieren, um die teils mit hohen Kosten verbundenen Wärmetransportwege kurz zu halten. Die Menschen wünschen sich aufgrund befürchteter Beeinträchtigungen (z.B. Lärm und Geruch) hingegen eine große Distanz. In der Gesamtschau stehen beide Restriktionen, gewünschter Abstand und Nähe zu Verbraucher, konträr zueinander, was schließlich dazu führt, dass nur mehr wenige Standorte als nachhaltig erscheinen (vgl. Karte 16).

Erstaunlich ist die geringe Anzahl an potenziellen Standorten für die Referenzanlage im wald- und holzreichen Bayerischen Wald. Neben den räumlichen Kriterien ist hierfür die analysierte Technologie ein weiterer Grund. Aufgrund der hohen Leistung der Anlage sind große Wärmeabnehmer in der unmittelbaren Umgebung nötig, um einen energetisch wie wirtschaftlich effizienten Betrieb zu ermöglichen. Derart große Wärmeabnehmer sind rar, weshalb bei kleiner dimensionierten Anlagen durchaus neue Standorte z.B. zur Versorgung eines Dorfes oder eines Weilers denkbar wären. Eine räumliche Häufung geeigneter Flächen findet sich im Isartal nahe den großen Energieverbrauchern und im südlichen Landkreis Dingolfing-Landau. Geographisch nahe zusammenliegende Eignungsflächen haben bei der Bioenergie den Nachteil, dass die Standorte in gegenseitiger Rohstoffkonkurrenz liegen. Ist ein Blockheiz- bzw. Heizkraftwerk, welches ebenfalls Holz nutzt, bereits vorhanden, so muss die konkrete Planung einer neuen Anlage den bestehenden Rohstoffbedarf als entsprechende Potenzialminderung berücksichtigen.

Da sich nur wenige Standorte finden lassen, die alle gewählten Kriterien erfüllen, ist man ähnlich zur Windenergie ggf. darauf angewiesen, einzelne Kriterien neu zu bewerten. In den jeweiligen Dimensionen müssen Abstriche in Kauf genommen werden, um Kompromisslösungen zu finden. Ein Beispiel dafür ist der Standort des als Referenzanlage verwendeten Biomassekraftwerkes in Mainkofen. Der Modellierung zufolge bietet das Umland wegen des geringen Waldbestandes im Dungsau nicht ausreichend Holzmaterial. Der Betreiber muss somit längere Lieferwege akzeptieren oder auf andere Rohstoffquellen (z.B. Industrieholz) zurückgreifen. Ebenso sind die Abstandswünsche der Bürger nicht ganz erfüllt. Störend wirkt sich nicht die Nähe zum Bezirksklinikum Mainkofen aus, was aus ökonomischer und energetischer Sicht sogar äußerst positiv zu bewerten ist, sondern die Entfernung zu den Wohngebieten Rettenbach und Pankofen Bahnhof (vgl. Karte 17). Insoweit ist der Standort des Biomassekraftwerkes geschickt gewählt, da er sich auf der von Rettenbach abgewandten Seite des Bezirksklinikums befindet – das Kraftwerk ist aufgrund der Barrierewirkung der dazwischenliegenden Gebäude sowie der Topographie von dort nicht sichtbar – und gleichzeitig den Abstand zum Ort Pankofen Bahnhof zu maximieren versucht, ohne die Nähe zum Wärmeabnehmer zu verlieren. Den Modellergebnissen zufolge bestehen an diesem Standort keine ökologischen Einwände.



Karte 17: Biomassekraftwerk in Mainkofen Stadt Deggendorf

5.7.3 Theoretisches und nachhaltiges Biomassepotenzial Mais

Der Betrieb der modellierten Biogasanlage findet mit nachwachsenden Rohstoffen statt. Als Energiepflanze wird ausschließlich Mais (Silomais) verwendet. In der Literatur werden gängige Silomaiserträge (TM-Gehalt 35%) bei einem niedrigen Ertragsniveau mit 35-45t FM/ha, bei mittlerem Ertragsniveau mit 45-55t FM/ha und bei hohem Niveau mit 55-65t FM/ha angeben (vgl. Eckel et al. 2006, S. 100). Neben den saisonalen Schwankungen variieren die flächenbezogenen Maiserträge auch aufgrund der naturräumlichen Vielfalt des Untersuchungsraumes, weshalb für jeden Landkreis bzw. jede kreisfreie Stadt separat ein Durchschnittswert aus den Jahren 1990 bis 2009 ermittelt

wurde. In Niederbayern schwanken die Durchschnittswerte von maximal 51,3t/ha im Landkreis Deggendorf bis minimal 45,8t/ha im Landkreis Regen. Der Ertrag liegt somit im mittleren Niveau, wobei die letzten Jahre eine leichte Tendenz hin zu höheren Erträgen deuten lassen (vgl. Abb. 27). Bei der Ermittlung des theoretischen Energiepotenzials sind diese Durchschnittswerte der verschiedenen Landkreise sowie die vorhandenen Ackerflächen berücksichtigt.

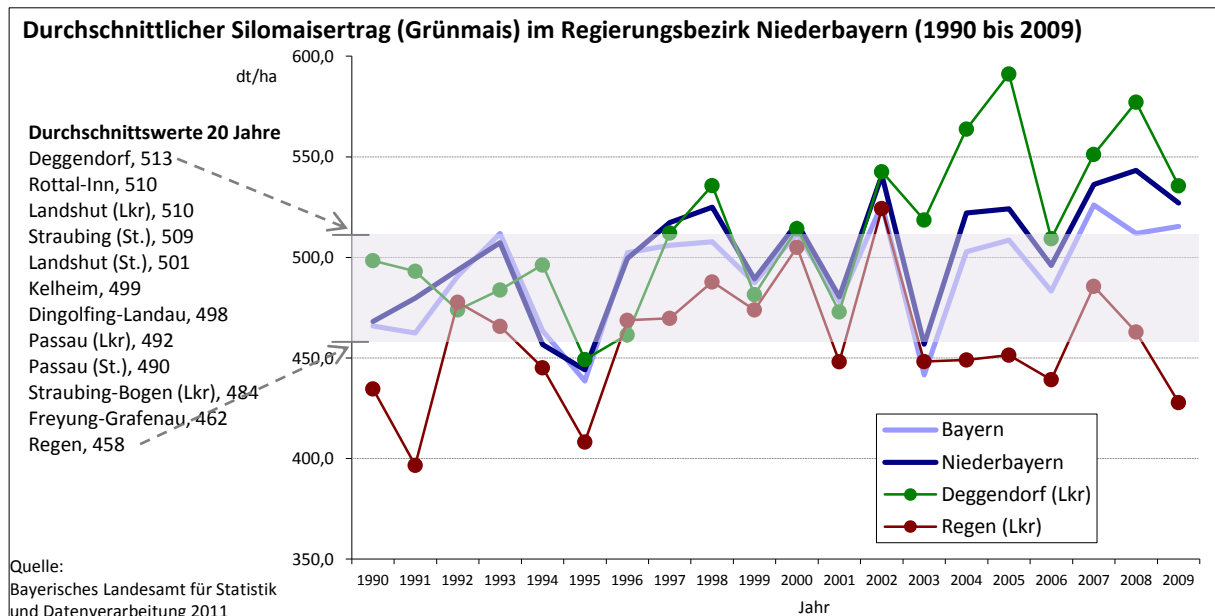
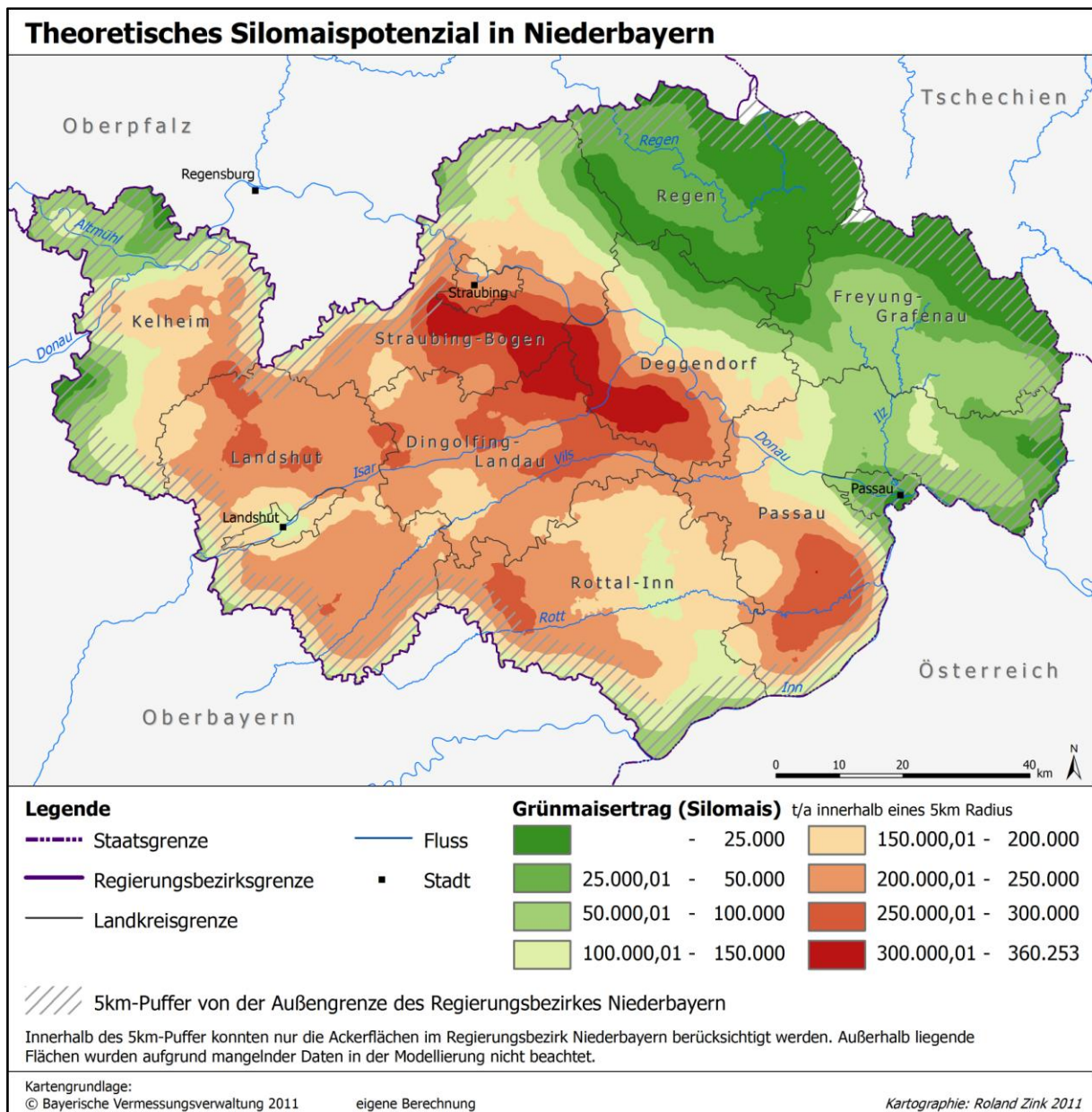


Abb. 27: Silomaisertrag in Niederbayern

Des Weiteren fließen natürliche Standortvoraussetzungen zum Maisanbau in die Erörterung des theoretischen Silomaisertrages mit ein. So sind folgende minimale Niederschlagssummen für ein Maiswachstum in der Modellierung beachtet: in den Monaten Mai und Juni sind mindestens 50mm Niederschlag erforderlich, im Juli und August mindestens 100mm und von Mai bis September mindestens 250mm (vgl. Eckel et al. 2006, S. 95). Als Datengrundlage dienen hierbei Klimakarten der monatlichen Niederschlagssummen in Bayern (vgl. LfU et al. 2011b). Die Bodengüte bzw. die Bodenart wird nicht als Restriktion herangezogen, da Mais auf vielen Böden anbaufähig ist (vgl. Diepenbrock et al. 2005, S. 238).

Das theoretische Silomaisertragspotenzial ist wie beim Holzpotenzial wiederum an das Einzugsgebiet der Biogasanlage gekoppelt und zeigt die summierten Erträge innerhalb eines angenommenen 5km Radius (vgl. Karte 18). Wegen der guten ackerbaulichen Bedingungen sowie den weitläufigen Ackerflächen besitzt die Dungauebene das größte Ertragspotenzial. Zusätzlich bietet auch das Tertiärhügelland günstige Voraussetzungen für Maisanbau. Hohe theoretische Maispotenziale sind folglich im gesamten Landkreis Dingolfing-Landau, im südwestlichen Landkreisteil von Deggendorf und Straubing-Bogen, im südlichen Landkreis Passau, im Westen des Landkreises Rottal-Inn sowie im Landkreis Landshut mit Ausnahme der kreisfreien Stadt selbst zu verzeichnen. Demgegenüber bietet der Bayerische Wald deutlich geringere Potenziale. Das theoretische Silomaispotenzial spiegelt

damit einerseits die naturräumliche Zweiteilung des Regierungsbezirkes bzw. die verschiedenen Standortqualitäten wider und lässt andererseits die unterschiedliche agrarwirtschaftliche Struktur mit vermehrter Nutzung von Ackerflächen im Dungau und Grünland im Bayerischen Wald erkennen.

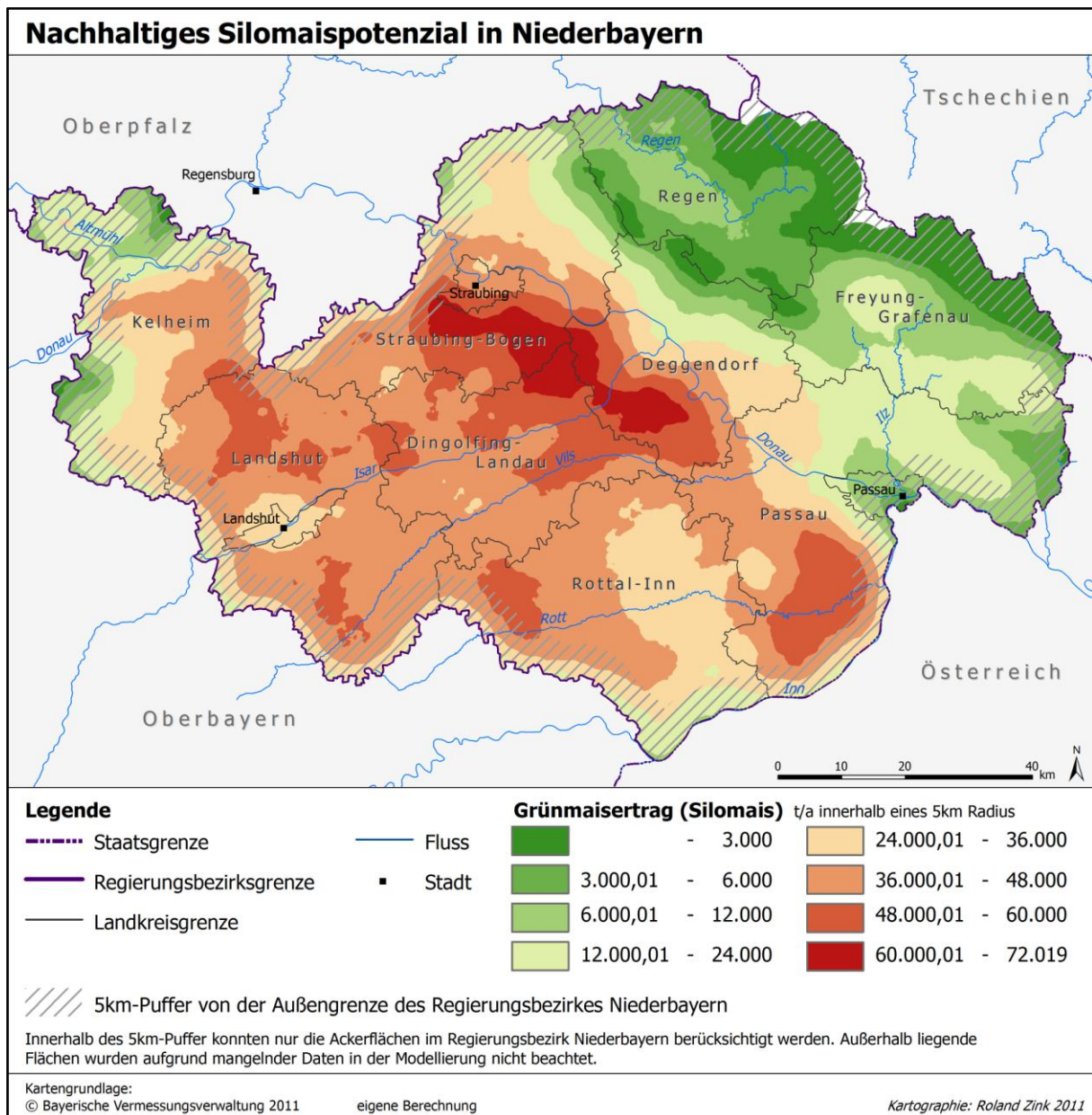


Karte 18: Theoretisches Silomaispotenzial in Niederbayern

Nicht nur der Standort einer Biogasanlage muss ökologischen, ökonomischen oder sozialen Vorgaben entsprechen sondern auch die Gewinnung des Rohstoffes, wodurch die verfügbare Anbaufläche und somit das Potenzial begrenzt werden. In einem nächsten Modellierungsschritt erfolgt deshalb eine weitere Konkretisierung, indem entsprechende Restriktionen berücksichtigt werden. Hierzu zählt der Ausschluss von Flächen, die naturschutzrechtlichen Schutzbestimmungen unterliegen (Biotop, FFH, Nationalpark, Naturschutzgebiet, Naturdenkmal und Ramsar-Gebiete) und einem intensiven Maisanbau i.d.R. entgegenstehen. Obwohl mit dieser Vorgabe großräumige Gebiete wegfallen, ist der Einfluss auf das Maispotenzial gering, da sich nur wenige ackerbaulich genutzte Flächen des

Regierungsbezirkes, welche vorrangig das Maispotenzial bestimmen, innerhalb der Schutzgebiete befinden. Wegen erhöhter Bodenerosionsgefahr beim Maisanbau ist weiterhin eine Hangneigung von maximal 15° vorgegeben. Flächen mit größerer Steilheit sind für den Anbau von Silomais somit ausgeschlossen.

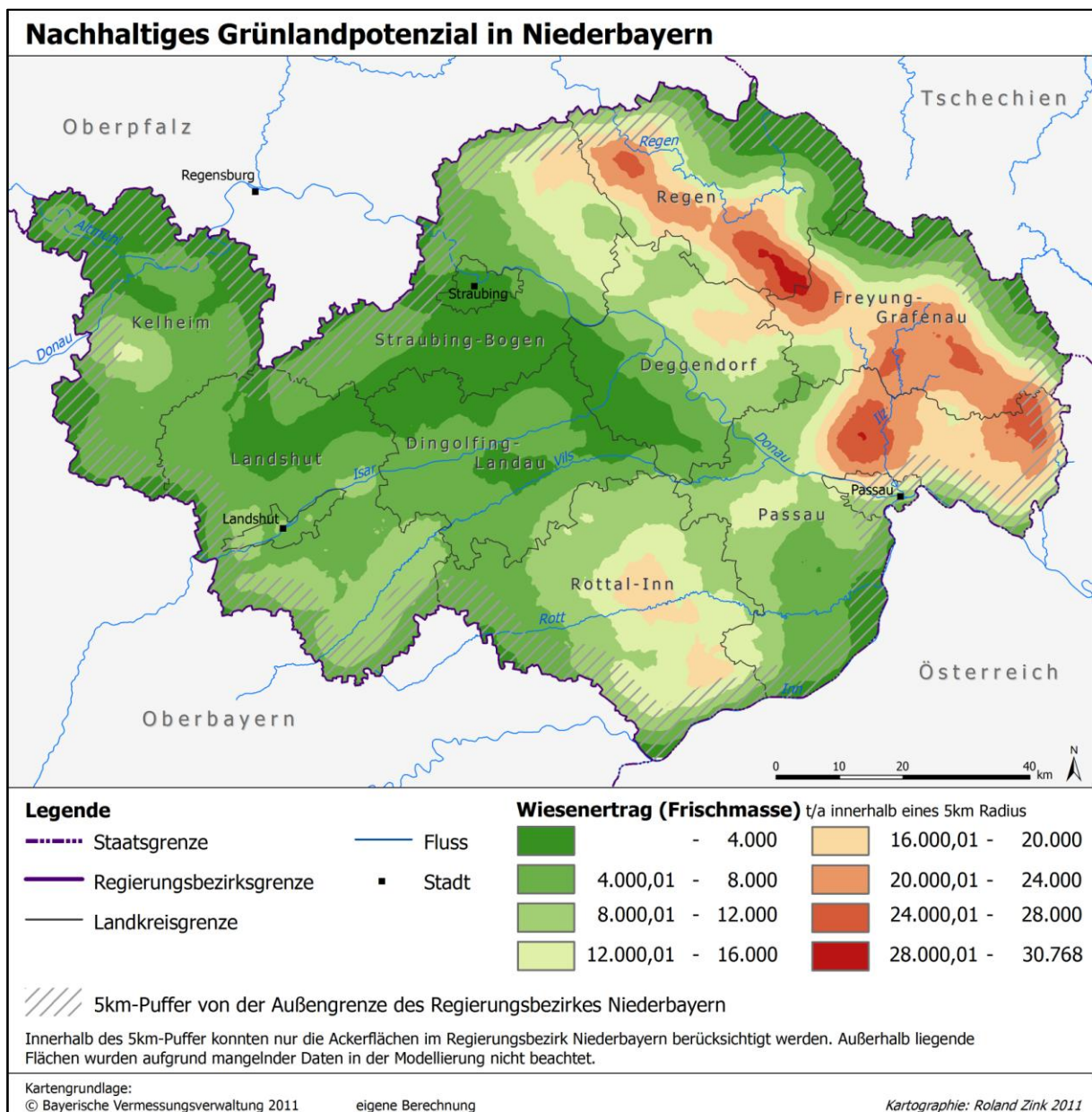
Eine flächenbezogene Einschränkung ergibt sich aufgrund von Fruchtfolgen, der Konkurrenz des Anbaus von Energiepflanzen zu anderen landwirtschaftlichen Produkten sowie dem Vorbeugen vor Monokulturen, weshalb angenommen nur 20% der Ackerfläche für Maisanbau zur Verfügung stehen. Im Unterschied zu den naturschutzrechtlichen Einschränkungen wird damit das Ergebnis in entscheidender Weise beeinflusst. Je nach Standort, ökonomischen Bedingungen oder dem Willen der Bevölkerung kann diese Vorgabe variieren und entsprechend im Modell geändert werden. Eigentumsstrukturen und Besitzverhältnisse der landwirtschaftlichen Flächen bleiben wegen der Größe des Untersuchungsgebietes unbeachtet, sind bei einer tatsächlichen Anlagenplanung jedoch wesentliche Planungsaspekte. An der räumlichen Verteilung des Silomaispotenzials ändert sich unter Beachtung der aufgezählten Einschränkungen wenig, allerdings verändert sich das absolute Potenzial im Vergleich zum theoretischen Maispotenzial erheblich (vgl. Karte 19). Die Dungauregion und das Tertiärhügelland bieten weiterhin ausreichend und teils mehrfaches Potenzial, den jährlichen Biomassebedarf der Referenzanlage mit 12.000 t innerhalb eines 5km Einzugsgebietes zu decken.



Karte 19: Nachhaltiges Silomaispotenzial in Niederbayern

Die Möglichkeit, Biogasanlagen mit sehr unterschiedlichen Ausgangsstoffen zu betreiben, stellt für die Potenzialermittlung eine Herausforderung dar. Weitere Stoffe wie Gülle, Mist, andere Energiepflanzen oder pflanzliche Reststoffe sind unterstützend oder alternativ vorstellbar und deshalb zu beachten. So können Regionen, die ein geringes Maispotenzial haben, aufgrund anderer landwirtschaftlicher oder sozio-ökonomischer Strukturen durch alternative Biomassen ggf. ein besseres bzw. zusätzliches Potenzial generieren. Beispiel hierfür ist das Potenzial der Grünlandwirtschaft, welches speziell den Bayerischen Wald und den Landkreis Rottal-Inn begünstigt (vgl. Karte 20). Ähnlich zur Berechnung des Maispotenzials sind durchschnittliche Grünlanderträge der letzten 20 Jahre berücksichtigt und anhand der Landkreise verräumlicht. Als potenzielle Anbaufelder gelten aktuell genutzte Grünlandflächen abzüglich Flächen mit einer Hangneigung größer 30°, die für eine intensive Bewirtschaftung nicht mehr in Frage kommen. Des Weiteren gehen

die naturschutzrechtlich geschützten Gebiete Biotop, FFH und Ramsar nur mit der Hälfte des durchschnittlichen Ertrages in die Modellierung ein und die Schutzgebiete Nationalpark, Naturdenkmal und Naturschutzgebiete sind gänzlich ausgeschlossen. Der Potenzialberechnung liegt wiederum ein 5km-Radius als Einzugsgebiet der Biogasanlage zugrunde. Gebiete, die im Maisertrag vergleichsweise schlecht abgeschnitten haben (vor allem der Bayerische Wald), können durch das Grüngut einen möglichen Fehlbedarf an Biomasse ausgleichen. Der dargelegte Sachverhalt sowie die vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten der Bioenergie verdeutlichen die Notwendigkeit, je nach Ertragspotenzial der jeweiligen Region unterschiedliche Biomasserohstoffe einzusetzen, um das Energiepotenzial möglichst umfassend auszuschöpfen.

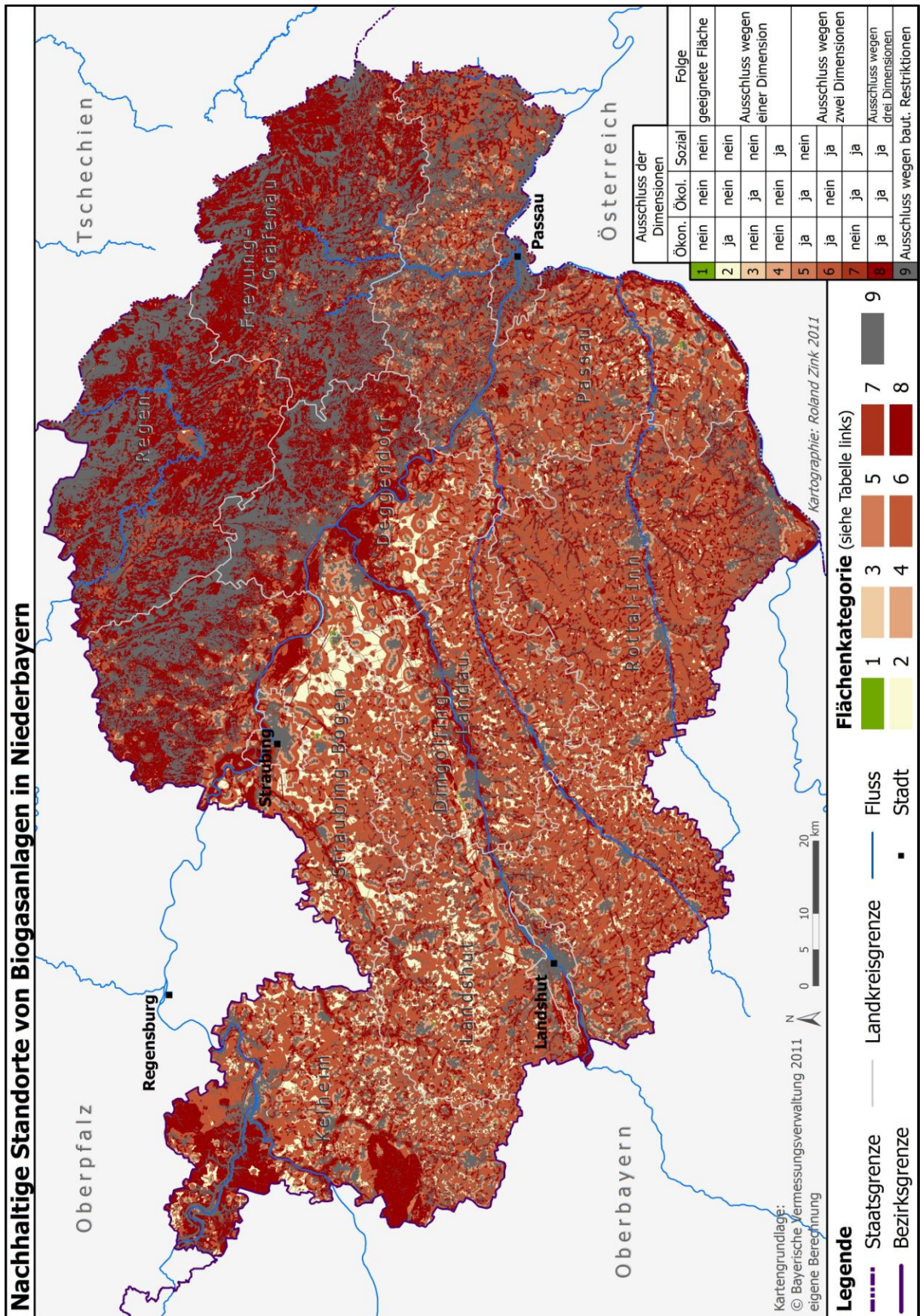


Karte 20: Nachhaltiges Grünlandpotenzial in Niederbayern

5.7.4 Nachhaltige Standorte für eine Biogasanlage

Die bautechnischen und ökologischen Einschränkungen von Biogasanlagen sind identisch zu jenen der Biomasseblockheizkraftwerken definiert, weshalb im Folgenden nicht mehr näher darauf eingegangen wird (vgl. hierzu Anhang Karte 12 und 13). Die ökonomischen Gunstflächen für Biogasanlagen orientieren sich am Maispotenzial und sind demzufolge über das gesamte Tertiärhügelland einschließlich der Dungauregion verteilt (vgl. Anhang Karte 16). Dabei übersteigt das Potenzial an manchen Orten den Bedarf der Referenzanlage um ein vielfaches. Auch der vordere Bayerische Wald (nördliche Bereiche der Landkreise Straubing-Bogen, Deggendorf und Passau) besitzt für den Betrieb von Biogasanlagen ausreichend Maispotenzial (innerhalb des 5km-Puffers). Im südöstlichen Regierungsbezirk reichen die ökonomischen Eignungsgebiete sogar weit in den Bayerischen Wald hinein. Potenzielle Standorte finden sich in der Stadt Grafenau, den Gemeinden Hohenau und Ringelai sowie an der südlichen Grenze des Landkreises Freyung-Grafenau (Gemeinden Röhrnbach, Jandelsbrunn und Neureichenau sowie Stadt Waldkirchen). Dort reicht das Ackerland – unter den getroffenen Modellannahmen – gerade aus, um die nötige Biomasse zu erzeugen. Einziger der Landkreis Regen bietet kein ausreichendes Maispotenzial für den Betrieb der Referenzanlage, weshalb andere Biomassen (z.B. Gras) ergänzend notwendig sind. Grund für die zerstreute Verteilung der ökonomischen Flächen ist die möglichst vollständige Abwärmenutzung. Die Eignungsflächen gruppieren sich deshalb räumlich um die entsprechenden Verbraucher, vor allem Städte sowie Industrie- und Gewerbegebiete. Aufgrund der fehlenden Biomasse ist die Stadt Passau hiervon eine Ausnahme.

Die größten Standortrestriktionen für eine Biogasanlage hält die soziale Dimension bereit (vgl. Karte Anhang 17). In der Umfrage sprachen sich viele Akteure für einen weiten Abstand zu Siedlungsflächen aus. Ähnlich zu den Ergebnissen zur Windenergie sind Gebiete mit einer stark zersiedelten Landschaft und großen Waldflächen, die ebenfalls ausgeschlossen wurden, davon besonders betroffen. Beispiele sind der Bayerische Wald sowie der Landkreis Rottal-Inn, die nur wenige potenzielle Standorte bereithalten. Geeignete Gebiete finden sich abermals hauptsächlich im Dugau und im Tertiärhügelland zwischen Donau und Isar mit Schwerpunkt im südlichen Landkreis Straubing-Bogen an der Grenze zu den Landkreisen Deggendorf und Dingolfing-Landau. Standorte, die alle drei Nachhaltigkeitsaspekte erfüllen, sind folglich nur sehr spärlich vorhanden und konzentrieren sich räumlich im Dugau und dem Landkreis Dingolfing Landau (vgl. Karte 21).

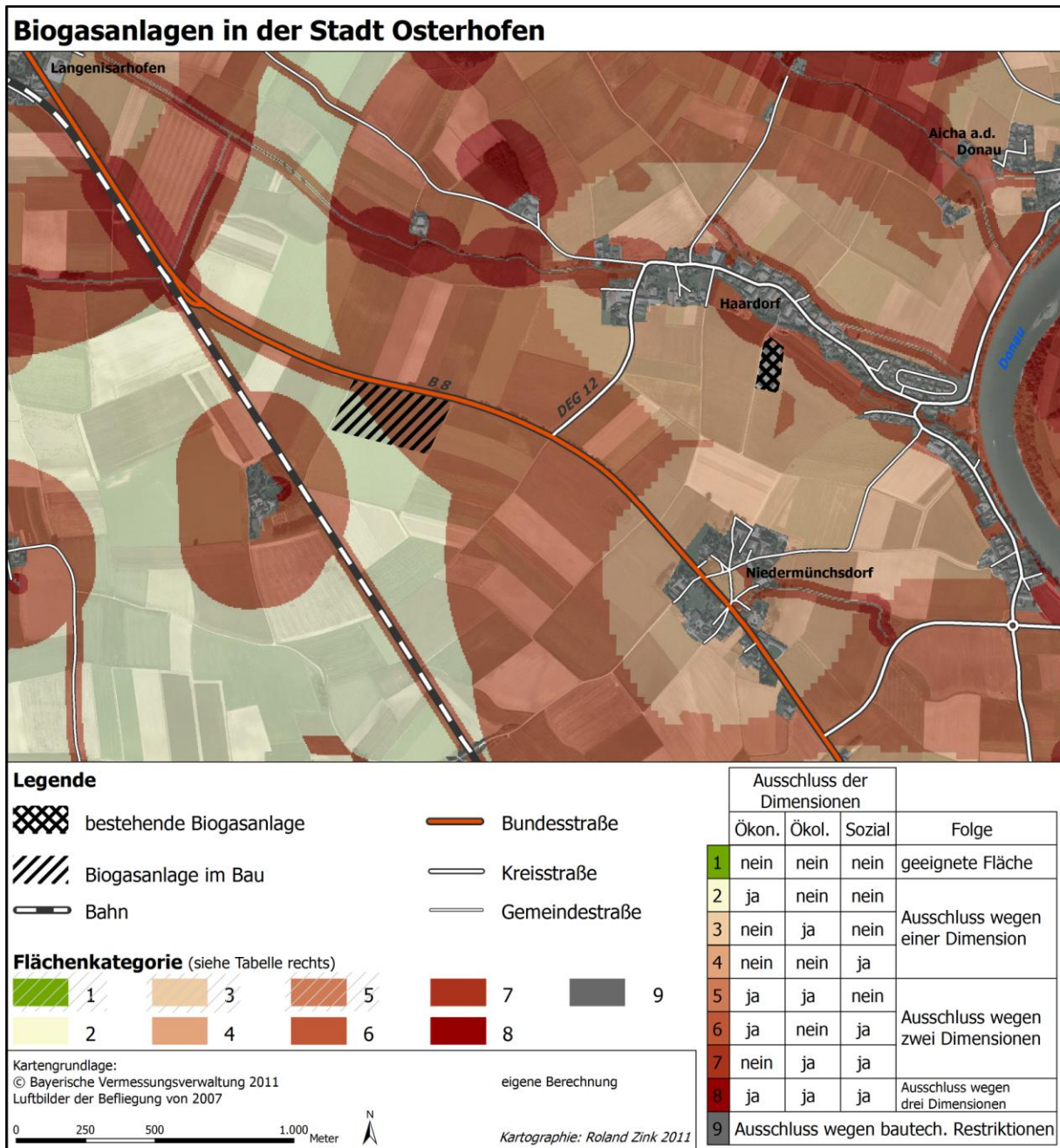


Karte 21: Nachhaltige Standorte für Biogasanlagen in Niederbayern

Die hohen Abstandswünsche der sozialen Dimension zeigen die teils großen Vorbehalte gegenüber dieser Technologie, welche besonders die Furcht vor Geruchs- und Lärmbelästigung sowie dem Medium Gas betreffen. Ähnlich zur Windenergie ist es vorstellbar, die Standortansprüche der Biogastechnologie ebenfalls in einem gesellschaftlichen Dialog weiter zu optimieren. Eine Verringerung der gewünschten Abstände, gegebenenfalls in Kombination mit einer Leistungsreduktion der Anlage, durch die Befragten erscheint hier besonders nennenswert. Zahlreiche bestehende Biogasanlagen in der Region verdeutlichen, dass wesentlich kleinere Abstände sozialverträglich realisierbar sind (vgl. Karte 22). Die Nähe zu Ortschaften ist dabei in zweifacher Hinsicht anzustreben: Zum einen beugt sie einer weiteren Zersiedelung der Landschaft vor und ist zum anderen aus Gründen der Energieeffizienz, z.B. um Kraft-Wärme-Kopplung nutzen zu können, zwingend geboten.

Die Modellergebnisse zeigen für die Stadt Osterhofen, wie die Standortplanung einer Biogasanlage vor Ort gelingen kann. In Osterhofen sind bereits seit längerem Biogasanlagen in Betrieb und werden aktuell weiter ausgebaut. Der Standort der Biogasanlage in Haardorf entspricht den Modellergebnissen zufolge den ökonomischen und ökologischen Voraussetzungen, befindet sich aber sehr nahe an der Ortschaft (vgl. Karte 22). Damit wird die angesprochene Zersiedelung der Landschaft vermieden und gleichzeitig der Transportweg für die Wärmeversorgung kurz gehalten, was aus Effizienzgründen zu befürworten ist. Des Weiteren verdeutlicht der Standort die Berücksichtigung sozialer Belange, indem sich die Anlage nicht unmittelbar im Ort befindet sondern etwas davon abgesetzt ist, obwohl sich den ermittelten Ergebnissen nach der Abstand als zu gering darstellt. Die Anlagenplanung sowie die Grundrissgestaltung lassen jedoch auf keine störenden Auswirkungen für den Ort schließen. Gleichwohl wird mit der Anlage die Siedlungsentwicklung in Richtung Süden eingeschränkt.

Anders gestaltet sich die Situation bei der Biogasanlage entlang der Bundesstraße 8. Die Großanlage befindet sich in Bau (Stand Dez. 2011) und soll über eine Gesamtleistung von 7 MW verfügen. Hier sind sowohl die ökologischen als auch die strengen sozialen Kriterien der Modellierung erfüllt (siehe Karte 22). Der Standort ist aber wegen ökonomischer Vorgaben ausgeschlossen. Zwar ist ein ausreichendes Biomassepotenzial (für die wesentlich kleinere Referenzanlage) vorhanden, der Anschluss an einen entsprechend großen Energieverbraucher fehlt jedoch. Grund für die Errichtung der Biogasanlage trotz vermeintlich mangelnder Rentabilität ist die Produktion von aufbereitetem Biomethan (vgl. Schmack Biogas 2011). Dieses Gas erfüllt die Qualitätsstandards von Erdgas und kann deshalb in das vorbeiführende Erdgasnetz eingespeist werden. Damit entfällt der Standortanspruch möglichst nahe am (Wärme-)Verbraucher zu sein, da keine Verbrennung des Gases vor Ort stattfindet.



Karte 22: Biogasanlagen in der Stadt Osterhofen

5.7.5 Beitrag der Bioenergie zur autarken Versorgung

Zur Abschätzung des Beitrages der Biomassen Mais sowie Waldrest- und Schwachholz zur Stromversorgung im ländlich geprägten Niederbayern muss wegen der Komplexität der Bioenergiemodellierung auf das jeweilige technische Potenzial zurückgegriffen werden. Die Zahlen beziehen sich dabei auf die nachhaltigen Potenziale des Untersuchungsgebietes (vgl. hierzu Karte 15 und Karte 19) sowie auf die technologischen Parameter der Referenzanlagen. Das Maispotenzial würde demzufolge für ca. 340 Biogasanlagen ausreichen, die eine jährliche Stromproduktion von 1.321 Mio. kWh liefern könnten. Für etwas mehr als 50 Blockheizkraftwerke steht genügend

Waldrest- und Schwachholz zur Verfügung. Damit ließen sich rund 173 Mio. kWh Strom erzeugen, im Vergleich zu Mais ein wesentlich geringerer Beitrag. Grund hierfür sind zum einen die alleinige Beachtung von Waldrest- und Schwachholz. Alternative Holzrohstoffe sind nicht berücksichtigt. Zum anderen ist auch der spezifische Flächenertrag von Mais wesentlich höher als der potenzielle Flächenertrag von Waldrestholz. Summiert beträgt die mögliche jährliche Stromproduktion der beiden Biotechnologien 1.494 Mio. kWh.

Das tatsächliche Biomassepotenzial ist damit aber nicht erfasst. Einerseits ist nicht absehbar, dass z.B. das gesamte anfallende Waldrest- und Schwachholz auch energetisch genutzt wird, wodurch das Potenzial tendenziell geringer ausfällt. Andererseits sind neben Mais und Waldrestholz auch noch andere Biomassen wie z.B. Gülle, Mist, Klärschlamm, Grüngut oder Industrieholz vorhanden, deren Potenzial nicht untersucht wurde. Der Beitrag der Bioenergie zur Energieversorgung in Niederbayern könnte dadurch weiter gesteigert werden.

6. Kritische Reflexion der Potenzial- und Standortmodellierung

Intention der Potenzial- und Standortmodellierung in dieser Arbeit ist nicht die detaillierte Planung einzelner Produktionsanlagen sondern das Aufzeigen möglicher Ansatzpunkte zur Gestaltung einer regionalen und nachhaltigen Energieversorgung. Auch wenn die Analyse mit hoher Auflösung durchgeführt wird und zum Teil auf die Ebene der Anlagenstandorte vordringt, was die Beispiele zu ausgewählten Energieanlagen in der Region verdeutlichen sollen, sind ihre Ergebnisse im Hinblick auf eine regionale Energiestrategie zu bewerten. Eine rechtlich und gesetzlich abgesicherte Standortplanung ist damit bei keiner Technologieform gegeben. Die Modellierung basiert diesbezüglich auf zu vielen, für die Umsetzung aber zwingend notwendigen Annahmen. Gleichzeitig können nicht alle Aspekte der rechtlichen Genehmigung berücksichtigt werden, weil manche vorgeschriebenen Prüfungen erst dann durchführbar sind, wenn ein konkreter Standort gefunden wurde. Zu nennen sind z.B. Umweltverträglichkeitsprüfungen oder Lärmgutachten (BImSchG). Zudem muss die Akzeptanz der Bürger und Entscheidungsträger stets vor Ort ermittelt werden, da, wie bei der Bioenergie gezeigt, geringe Abstände nicht zwingend mit einer Beeinträchtigung verbunden sein müssen.

Weiterhin ist eine konkrete Anlagenplanung auch aufgrund fehlender bzw. unsicherer Daten nicht möglich. Beispiele aus dem Bereich der Windenergie sind hierfür die Angaben zu durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten. Für die fundierte Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Windkraftstandorten – wichtig für die Finanzierung – sind deshalb i.d.R. lokale Langzeitmessungen durchzuführen, die es dann in der weiteren Planung zu beachten gilt. Für Niederbayern ist auch die Nähe zur seismologischen Messstation im Landkreis Freyung-Grafenau zu nennen, zu welcher

abschließende Aussagen bisher fehlen und in der Modellierung deshalb nicht berücksichtigt wurde. Bezüglich der Bioenergie ist das Fehlen von Geodaten außerhalb des Regierungsbezirkes zu erwähnen, wodurch die Aussagekraft der Ergebnisse zu den Grenzgebieten hin schwindet.

Neben den Einschränkungen aufgrund der Datenverfügbarkeit kann es auch zu einer Fehlallokation innerhalb des Datenbestandes kommen. Bestehende und im Datenbestand kartierte Solarparks werden z.B. als Industrieflächen ausgewiesen. Da Industriegebiete bei einigen Technologien als vorbelastete Gebiete definiert wurden, kann es hier zu fragwürdigen Ergebnissen kommen. So erscheint in der Modellierung die Umgebung eines Solarparks aufgrund der Vorbelastung für eine weitere Photovoltaik-Freiflächenanlage geeignet. Zwar kann es durchaus sinnvoll sein, mehrere Solarparks in unmittelbarer Nachbarschaft zu errichten, um die Zersiedelung und den Eingriff in das Landschaftsbild gering zu halten, doch ist dies nur begrenzt durchführbar. Weiterhin ist auch die Evaluierung von gewünschten Mindestabständen sowie Befindlichkeiten und Präferenzen der Menschen vor Ort im Rahmen der sozialen Dimension etwa anhand mehrmaliger und umfassender Befragungen von Akteuren (z.B. in Form von Workshops¹¹¹) zu optimieren.

Ein wesentlicher Nachteil der Modellierung ist der enorme Zeitaufwand. Zwar führt die vorgestellte Methodik der Rastermodellierung zu anschaulichen Ergebnissen, bedarf aber einer umfassenden GIS-Arbeit und Datenorganisation. Im Themenfeld Energie mit sich ständig und sehr schnell verändernden Rahmenbedingungen, z.B. Novellierung des EEG oder Neubewertung von Landschaftsschutzgebieten für Energieanlagen, besitzen Ergebnisse deshalb nur eine begrenzte zeitliche Gültigkeit. Da zudem das Konzept doppelter Nachhaltigkeit diese stetige Anpassung fordert, indem viele Modellierungskriterien einem gesellschaftlichen Diskussionsprozess unterliegen, muss der Modellierungsablauf stets aktuell gehalten sowie gegebenenfalls auch mehrmals wiederholt werden. Grenzen der Modellierung existieren zudem in der Auflösung bzw. der Größe des Untersuchungsgebietes (z.B. bei Photovoltaik-Dachanlagen). Des Weiteren stellen sowohl der Technologiebezug, indem für jede Technologievariante der Modellierungsprozess neu gestartet werden muss (z.B. Bioenergie), als auch die unterschiedliche Eignung der Energieformen für eine räumliche Modellierung aufgrund differenter Standortansprüche und verschiedener Raumwirksamkeiten zentrale Herausforderungen an die Modellierung. Ist ein adäquater Datenbestand für die Untersuchungsregion allerdings erst einmal aufgebaut und der Modellierungsablauf festgelegt, kann flexibel und zügig auf Änderungen reagiert werden.

Der Kriterienkatalog bildet dabei das zentrale Instrument der räumlichen Standortsuche und ist sowohl hinsichtlich der Anzahl als auch der inhaltlichen Definition offen für Veränderungen bzw. Ergänzungen. Anpassungen können sich aus der Weiterentwicklung von Technologien (z.B. die Größe

¹¹¹ In Anlehnung an den vorgestellten Fragebogen wurde eine derartige Vorgehensweise bei dem Forschungsprojekt „Energiesstrategie Zellertal“ empirisch erprobt.

einer Windkraftanlage) und ebenso aus geänderten Wertvorstellungen seitens der Akteure ergeben. Die Möglichkeit, den Kriterienkatalog auch zur Abstimmung eines gesellschaftlichen Diskurses zu verwenden sollte dabei nicht unberücksichtigt bleiben. Wie bei der Windenergie, wo aktuelle Konfliktfelder mit dem Szenario aufgegriffen wurden, kann durch die inhaltliche Füllung des Kriterienkatalogs ein Kompromiss zur nachhaltigen und gesellschaftsverträglichen Gestaltung der Energieversorgung erzielt werden.

Trotz der Einwände zeigen die vorgelegten Ergebnisse, dass sich die praktische Anwendung des Konzeptes doppelter Nachhaltigkeit bewährt hat. Die angesprochenen Optimierungsmöglichkeiten betreffen stets die jeweilige Modellierungsmethodik, nicht jedoch das Konzept an sich. Wie bereits in der Erläuterung zur Zieldefinition (vgl. Kapitel IV 2.2) dargelegt, sollen neue Modellierungsverfahren gleichfalls zur Neuformulierung von Kriterien, soweit diese mit dem Leitbild der Nachhaltigkeit vereinbar sind, in das Konzept integriert werden, wenn sie zu einer Verbesserung der Ergebnisse und einer nachhaltigen Transformation der Energieversorgung beitragen.

7. Fazit: Nachhaltige Energieversorgung für Niederbayern

Die Bayerische Staatsregierung hat den Ausstieg aus der Atomenergie zum Anlass genommen, die Energiewende aktiv zu gestalten und sich das ambitionierte Energiekonzept „*Energie innovativ*“ verordnet. Zwei wesentliche Kernziele darin lauten (vgl. Bayerische Staatsregierung 2011, S. 1ff.): Erstens eine möglichst schnelle Umstellung auf erneuerbare Energieträger („*Weg vom Öl und weg vom Atom*“), was durch die Zielsetzung einer 50 prozentigen Deckung des bayerischen Strombedarfs durch erneuerbare Energien bis zum Jahr 2021 verfolgt wird. Zweitens soll das Zieldreieck „*sicherer, bezahlbarer und umweltverträglicher Energieversorgung*“ realisiert werden, um die Wirtschafts- und Lebensstandards zu erhalten. Nachhaltigkeit mit all ihren Dimensionen kann hierfür die Leitlinie sein.

Die vorliegende Forschungsarbeit hat durch das Konzept doppelter Nachhaltigkeit eine Strategie beschrieben, wie eine nachhaltige Energieversorgung regional zu erörtern ist und dies exemplarisch am Regierungsbezirk Niederbayern durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse bestätigen dabei die Zielsetzungen von „*Energie innovativ*“. Zum einen haben sich erneuerbare Energien in der Technologiebewertung als sinnvolle Lösungen für die zukünftige Energieversorgung herausgestellt. Trotz individueller Schwächen vereinen sie im Vergleich zu fossilen und nuklearen Technologien viele positive Eigenschaften. Dabei sind alle Energieformen (Wasserkraft, Windenergie, Photovoltaik und Bioenergie) künftig für den Regierungsbezirk relevant und unverzichtbare Bausteine einer nachhaltigen Energieversorgung.

Zum anderen konnten durch die räumlichen Potenzial- und Standortmodellierungen konkrete Standortmuster für die verschiedenen nachhaltigen Energieformen erarbeitet werden. Niederbayern

besitzt bei allen erneuerbaren Energien große Potenziale, welche zum Teil bereits genutzt werden, künftig aber noch stärkerer Beachtung bedürfen. Gerade die Windenergie zeigt dabei, dass der Umstieg auf erneuerbare Energien ohne den gesellschaftlichen Willen und ohne einen Kompromiss zwischen ökologischen, ökonomischen und sozialen Belangen nicht stattfinden kann. Die erarbeitete Strategie zur räumlichen Modellierung bietet hier den Mehrwert, Akteure und Bürger bereits in den Gestaltungsprozess der zukünftigen Energieversorgung einzubinden, um damit sowohl die Wahl der Energieform als auch die Standortsuche zu objektivieren, wertvolle Informationen für die jeweilige Region zu liefern und so zur sinnvollen Umsetzung der Energiewende beizutragen.

Die unterschiedlichen naturräumlichen und sozio-ökonomischen Gegebenheiten in Niederbayern bestimmen dabei das Erscheinungsbild der modellierten nachhaltigen Energieversorgung (vgl. Karte 23). So benötigen die verschiedenen erneuerbaren Energietechnologien individuelle Standortfaktoren, um sie optimal bzw. nachhaltig nutzen zu können. Ein Standort ist für die jeweilige Energieform in unterschiedlichem Maße geeignet und besitzt folglich verschiedene energie-spezifische Standortqualifikationen. Eine nachhaltige Energieversorgung verlangt deshalb denjenigen Standort zu identifizieren, welcher optimale Voraussetzungen bietet und das Zieldreieck aus ökonomischer Rentabilität und ökologischer wie sozialer Verträglichkeit am besten zu verbinden vermag.

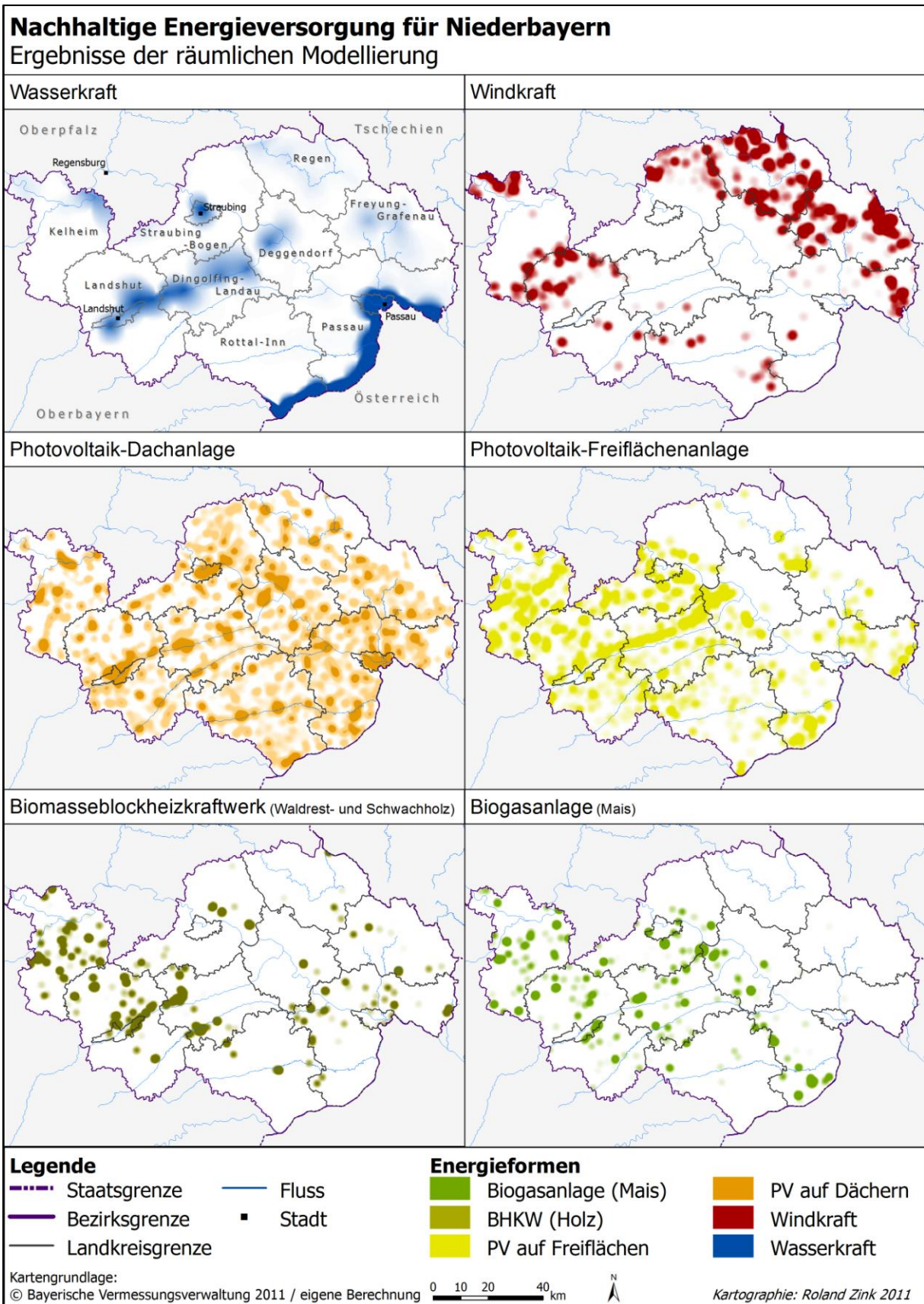
Die Wasserkraft hat sich bei der Technologiebewertung ausgezeichnet und wird im Regierungsbezirk bereits vielfach eingesetzt. Sie bildet die zentrale Stütze der Energieversorgung. Niederbayern profitiert dabei von den wasserreichen Flüssen, weshalb sich die großen Potenziale vor allem entlang des Inns und der Isar befinden. Beide Flüsse besitzen mit Abstand die besten Voraussetzungen für leistungsstarke Laufwasserkraftwerke. Daneben sind Standorte an der Donau und speziell für Kleinwasserkraftwerke im Bayerischen Wald zu nennen. Obwohl die Wasserkraft in Niederbayern ein sehr hohes Potenzial besitzt, sind die weiteren Entwicklungschancen gering, da zusätzliche Standorte kaum mehr realisierbar sind. Eine Steigerung sollte primär durch den Ausbau bzw. der technologischen Modernisierung bestehender Anlagen oder der Reaktivierung abgeschalteter (vornehmlich Kleinwasser-) Kraftwerke verfolgt werden.

Windenergie wird seit dem Bekanntwerden der politischen Zielsetzungen von 1.000 bis 1.500 zusätzlichen Windrädern in Bayern sehr kontrovers diskutiert, zeigt sich bei ihr doch ein umgekehrtes Bild zur Wasserkraft. Zum einen sind bisher kaum Standorte genutzt, weshalb ein großes Steigerungspotenzial vermutet wird. Zum anderen fehlen dringend notwendige Erfahrungen im Umgang mit der Technologie, insbesondere im Bayerischen Wald. Ausgelöst durch die Ereignisse im japanischen Atomkraftwerk Fukushima und dem anschließenden Atomenergieausstieg in Deutschland hat im Untersuchungsgebiet ein Bewusstseinswandel zugunsten der Windenergie eingesetzt. Vormalig postulierte Vorbehalte wie etwa der hohe Eingriff ins Landschaftsbild oder

Lärmbelästigungen treten in den Hintergrund. Gleichzeitig begreifen speziell ländliche Kommunen Windenergie nun vielfach als Chance, um Wertschöpfung und neue wirtschaftliche Impulse zu generieren. Dabei bescheinigt die vorliegende Modellierung dem Regierungsbezirk und speziell dem Bayerischen Wald durchaus großes Potenzial. Mit dem Kompromisszenario lassen sich Standorte finden, die den definierten nachhaltigen Kriterien entsprechen. Geeignete Standorte bieten vor allem die Landkreise Regen und Freyung-Grafenau, wo aufgrund der Höhenlagen ausreichende Windgeschwindigkeiten für einen wirtschaftlichen Betrieb vorhanden sind. Des Weiteren eignen sich Gebiete im nördlichen Landkreis Straubing und an der Grenze zwischen den Landkreisen Landshut und Kelheim. Die Ergebnisse belegen, dass Windenergie in Zukunft für den Regierungsbezirk eine richtungsweisende Option bietet.

Neben der Wasserkraft könnte künftig die Photovoltaik die zweite tragende Säule der Energieversorgung darstellen. Photovoltaik wird in Niederbayern heute sowohl auf Hausdächern als auch auf Freiflächen schon vielfach eingesetzt. Der Ausbau von Photovoltaik-Dachanlagen bietet ein sehr geringes gesellschaftliches Konfliktpotenzial, was durch die Befragung von Akteuren bestätigt wurde, und trägt umfassend zur regionalen Wertschöpfung bei. Davon könnte der gesamte Regierungsbezirk profitieren, da das Potenzial dezentral über die Region verteilt ist. Freiflächenanlagen sind wegen des vorübergehenden Wegfalls von Ackerflächen umstritten. Durch die vorgestellte Definition von Kriterien und der Regelung des EEG, nur mehr Konversions- und vorbelastete Gebiete zu fördern, bleiben jedoch ausreichend potenzielle Standorte übrig, die auch gesellschaftlich konsensfähig sind und akzeptiert werden. Für Freiflächenanlagen prädestiniert ist das Dungauegebiet zwischen Deggendorf und Straubing, sowie das Tertiärhügelland mit Schwerpunkten im Landkreis Kelheim, entlang der Isar und im südlichen Landkreis Passau (vgl. Karte 23). Diese Regionen zeichnen sich heute bereits durch eine intensive Nutzung der Photovoltaiktechnologie aus. Trotz der wetterabhängigen Stromproduktion – entsprechende Speichersysteme erreichen zusehend Markreife – bietet Photovoltaik für den Regierungsbezirk daher weiterhin große Chancen.

Seitens der Bioenergie qualifiziert sich vor allem der Landkreis Dingolfing-Landau mit günstigen Standorten (vgl. Karte 23). Allerdings weist die Modellierung der Bioenergie eine hohe technologische Einschränkung auf, indem nur zwei Referenzanlagen, eine Biogasanlage mit Mais und ein Blockheizkraftwerk mit Hackschnitzel, beachtet wurden. Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der Bioenergie führen sicherlich dazu, dass sich auch abseits der erörterten Eignungsflächen nachwachsende Rohstoffe sowie biologische Abfälle und Reststoffe nutzen lassen. Für den ländlich geprägten Regierungsbezirk Niederbayern besitzt die Bioenergie daher große Bedeutung, bietet sie doch für viele Landwirte ein neues Betätigungsfeld, was auch durch die hohe Wertschätzung gegenüber der Bioenergie (z.B. Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe und BioCampus in Straubing) zum Ausdruck kommt.



Karte 23: Nachhaltige Energieversorgung für Niederbayern

Das aufgezeigte Potenzial erneuerbarer Energien reicht mit den ermittelten Standorten aus, den aktuellen Strombedarf des Regierungsbezirkes zu decken (vgl. Abb. 28), ohne dass dabei ebenso notwendige Energieeinsparungen oder Effizienzmaßnahmen berücksichtigt wurden. Zentrale Stütze ist die Wasserkraft, ohne die eine bilanziell autarke Versorgung kaum zu erreichen wäre. Durch die hohe Volllaststundenzahl und einer guten technischen Verfügbarkeit gewährt sie Energiesicherheit und erweist sich als konstant produzierende Basis, auf der die anderen Energieformen aufbauen können. Neben der Wasserkraft kann Photovoltaik einen wesentlichen Beitrag zur Versorgung liefern, wobei Dachflächen bevorzugt aber nicht ausschließlich verwendet werden sollen. Trotz der hohen Modellrestriktionen und der Fokussierung auf Mais und Durchforstungsholz ist die Bioenergie beachtenswert. Die Möglichkeit einer bedarfsgerechten Steuerung zeichnet sie gegenüber der Wind- oder Photovoltaikenergie aus und trägt zu Netzstabilität bei. Abschließend ist die Windenergie zu nennen. Obwohl diese Energieform bisher nur spärlich genutzt wird, sollte ihr Anteil an der künftigen Stromversorgung durch den Bau von Windrädern an raumplanerisch sinnvollen und nachhaltigen Standorten in Maßen gesteigert werden.

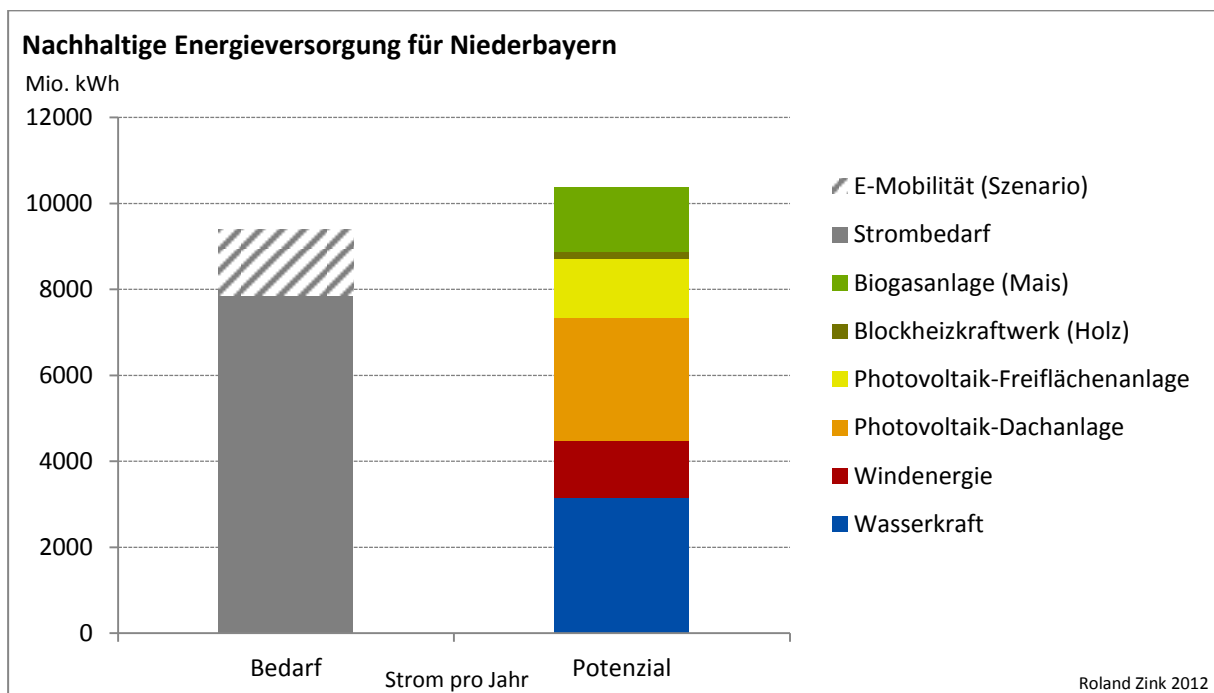


Abb. 28: Nachhaltige Energieversorgung für Niederbayern

Die Ergebnisse zeigen, dass es für den Regierungsbezirk nicht nur möglich ist sondern auch dessen Ziel sein muss, die Vorgaben aus dem Konzept „Energie innovativ“ zu überbieten. Für die Region Niederbayern bedeutet dies kurzfristig, den Ausbau erneuerbarer Energien anhand einer sinnvollen Regionalplanung weiter fortzuführen, um schnellstmöglich den Umstieg auf eine nachhaltige Energieversorgung zu schaffen. Langfristig bietet sich für den Regierungsbezirk das Potenzial zur Energieexportregion aufzusteigen und/oder den Bereich der Elektromobilität verstärkt zu verfolgen.

VII Schlussbetrachtungen: Das Potenzial der doppelten Nachhaltigkeit als regionale Energiestrategie

Die aktuelle Energieversorgung ist weder zukunftsfähig noch nachhaltig! Auf dieser Aussage (vgl. hierzu Kapitel II 1) gründet die vorliegende Arbeit. Aufbauend auf der Suche nach nachhaltigen Strukturen der Energieversorgung wird in der Arbeit ein Konzept entwickelt und vorgestellt, wie sich die Energieversorgung auf regionaler Ebene wandeln kann bzw. muss, um den vielfältigen Ansprüchen der Nachhaltigkeit gerecht zu werden. Nachhaltigkeit, so unpräzise definiert und zum Teil vage verklausuliert sie auch sein mag, kann dabei als ganzheitliches Leitbild die Richtung der Transformation am Energiesektor vorgeben. Ihre normativen Grundlagen sind bekannt und weitgehend akzeptiert, so dass Nachhaltigkeit neben der Wahrung ökonomischer, ökologischer und sozialer Belange zu einer gerechteren und zukunftsfähigeren Energieversorgung beitragen kann.

Die Transformation der Energiesysteme in Richtung nachhaltiger Strukturen wird jedoch in politischen wie gesellschaftlichen Diskussionen häufig auf die Parole „*weg von fossil-atomaren hin zu erneuerbaren Energieformen*“ reduziert. Dies allein wird dem Leitbild allerdings nicht zwingend gerecht. Zum einen erfüllen auch erneuerbare Energien nicht in jeder Region die Kriterien der Nachhaltigkeit und zum anderen gibt die bloße Forderung nach mehr erneuerbaren Energien noch keine Orientierung bezüglich der konkreten Umsetzung. Wo die neuen Energieformen gebaut werden sollen und wie die Technologien Bioenergie, Geothermie, Photovoltaik, Wasserkraft oder Windenergie in bestehende Versorgungsstrukturen eingebunden werden können, bleibt folglich unbeantwortet. Die Forschungsarbeit will deshalb einen wissenschaftlich fundierten und zugleich praktikablen Weg zur Gestaltung einer regionalen nachhaltigen Energieversorgung aufzeigen. Nachhaltigkeit ist demzufolge bereits in die konzeptionelle Entwicklung der Energiestrategie zu integrieren und anschließend für die praktische Anwendung zu operationalisieren.

Aufbauend auf der Definition von Krewitt et al. (2007, S. 27) wonach die Energiebereitstellung dann als nachhaltig zu bezeichnen ist, „*wenn sie auf einer ausreichenden und dauerhaften Verfügbarkeit von geeigneten Energieressourcen basiert und zugleich die negativen Auswirkungen von Energiebereitstellung, -transport und -nutzung begrenzt*“ wurde in der Forschungsarbeit eine neue und ganzheitliche Zieldefinition erarbeitet, deren Anliegen es ist, eine Verbindung aus Technologie, Standortwahl und regionalem Bezug herzustellen (vgl. Kap. IV 2.1): ***Ziel einer nachhaltigen Energieversorgung ist es, den Energiebedarf einer Region langfristig, sozial- und umweltverträglich sowie ökonomisch rentabel mit nachhaltigen Energietechnologien bereit zu stellen.***

Wie in der Arbeit aufgezeigt reicht es dabei weder aus, Technologien gesondert hinsichtlich ihres Nachhaltigkeitsaspektes zu bewerten, noch über geeignete bzw. nachhaltige Standorte zu

diskutieren, ohne zuvor die Energieformen definiert und hinsichtlich ihrer Eignung für den Untersuchungsraum überprüft zu haben. Erst mit der Definition von Technologien ist es möglich, Standorte dafür zu suchen; denn ohne zu wissen was gebaut wird, ist jegliche Standortsuche sinnlos. Vorgabe der Zieldefinition ist es deshalb, die Bereiche der Technologiebewertung und der Potenzial- bzw. Standortsuche in einem räumlichen Kontext gemeinsam zu betrachten, um sinnvolle Lösungen zu erzielen.

Abgeleitet aus der Zieldefinition wurde das Konzept doppelter Nachhaltigkeit entwickelt, welches eine Strategie zur Modellierung einer regionalen nachhaltigen Energieversorgung beschreibt. Die Doppelfunktion von Nachhaltigkeit resultiert aus der Überlegung, dass das Leitbild sowohl für die Eignungsprüfung von Technologien als auch für die räumliche Standortsuche notwendige Kriterien und Indikatoren bereithält. Das erarbeitete Konzept stellt, orientiert am integrativen HGF-Nachhaltigkeitskonzept (vgl. Kopfmüller et al. 2001) sowie am Drei-Säulen-Modell (vgl. Enquete-Kommission 1998), einerseits erforderliche theoretische Bezüge zum Paradigma einer nachhaltigen Entwicklung her und dient andererseits im Fortgang der Arbeit als anwendungsorientierter Leitfaden zur Umsetzung nachhaltiger Versorgungsstrukturen in einer Region. Kern des Konzeptes ist die chronologische Abfolge von Technologiebewertung und Standortmodellierung im Kontext einer räumlichen Betrachtung.

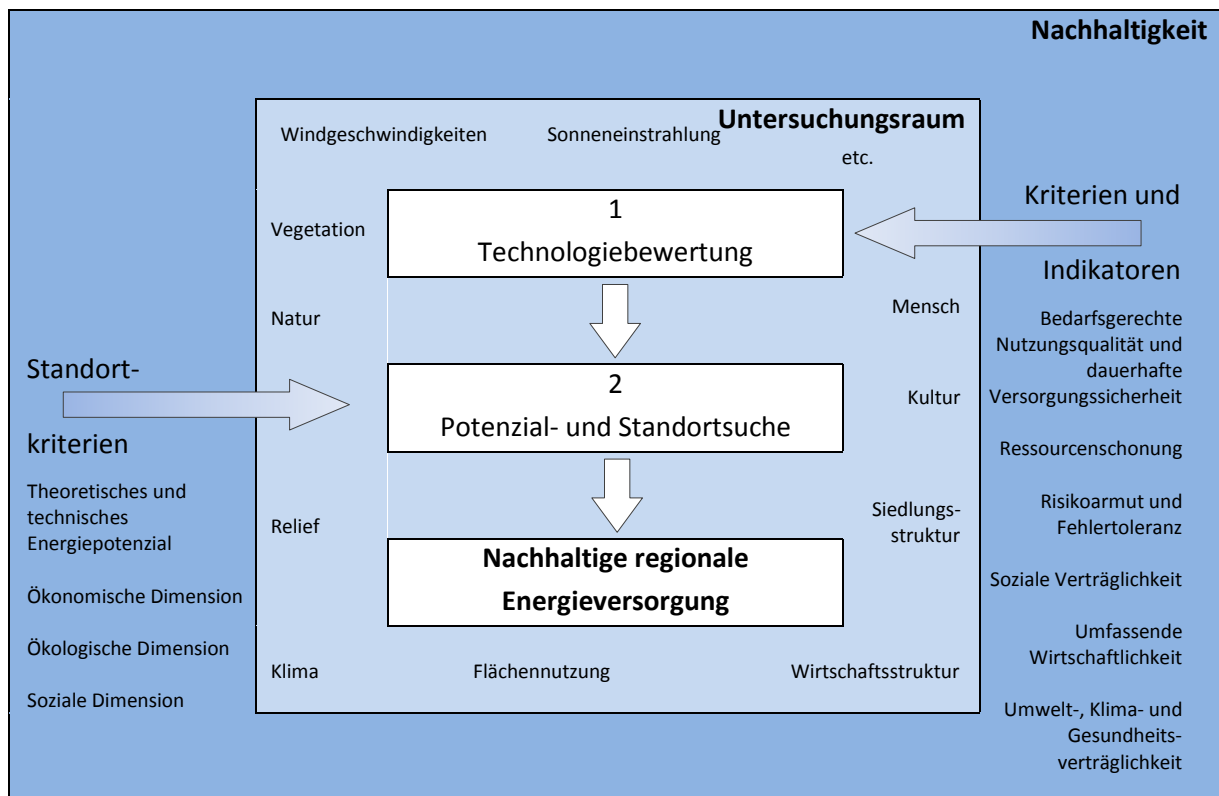


Abb. 29: Doppelte Nachhaltigkeit

Eine Verknüpfung aus Technologiebewertung und Standortsuche eingebunden in eine räumliche Perspektive, wie sie durch das Konzept doppelter Nachhaltigkeit verfolgt wird, hat bisher nur in Ansätzen stattgefunden. Die einzelnen Bausteine bzw. Aspekte haben sich zwar in der energiebezogenen Forschung etabliert, werden zumeist jedoch nur in fragmentierter Form betrachtet bzw. separat analysiert. Das Konzept doppelter Nachhaltigkeit ordnet die Bereiche Nachhaltigkeit, Raum, Technologie und Potenzial und fügt sie neu zusammen. Der Nachhaltigkeitsbezug setzt bildlich gesprochen den Rahmen des Konzeptes (vgl. Abb. 29) und gibt sowohl für die Technologiebewertung als auch für die Standortwahl entsprechende Kriterien und Indikatoren vor. Der Untersuchungsraum bildet die Klammer von Technologie- sowie Potenzial- bzw. Standortanalyse und lässt darüber hinaus eine regionale Fokussierung zu. Die vorherrschenden natürlichen, sozio-kulturellen und sozio-ökonomischen Standortgegebenheiten ermöglichen es, die Nachhaltigkeitskriterien und Nachhaltigkeitsindikatoren mit Inhalt zu füllen. Dieser Aspekt ist gerade mit Blick auf die Anwendung und die konkrete Umsetzung des Konzeptes bedeutend.

Das Fehlen einer allumfassenden Nachhaltigkeitsdefinition macht es notwendig, sowohl für die Technologiebewertung als auch für die Potenzial- und Standortsuche geeignete Kriterien und Indikatoren auszuwählen. Die Auswahl unterliegt dabei einer subjektiven Entscheidung. Um diesen Einfluss möglichst gering zu halten, wurde sich im Bereich der Technologiebewertung einem iterativen Verfahren bedient. Zum einen fand eine Orientierung am integrativen Nachhaltigkeitskonzept (vgl. Kopfmüller et al. 2001) statt, zum anderen wurden mittels einer Literaturrecherche und -analyse 13 Studien bzw. Forschungsarbeiten, welche Indikatoren zur Bewertung von Technologien oder Energiesystemen verwenden, ausgewertet. Aus diesem Korpus vorgegebener Indikatoren (Gesamtzahl an Indikatoren: 444) konnten schließlich aufgrund der Häufigkeit ihrer Verwendung 14 relevante Indikatoren identifiziert werden.

Es bleibt jedoch künftig die Aufgabe ganzheitlicher Technologiebewertung, sowohl die Quantität als auch die Qualität der Indikatoren und deren Erhebungsverfahren permanent zu überprüfen und ggf. zu verändern, ohne dabei den Bezug zur Nachhaltigkeit zu verlieren. Dieser Sachverhalt resultiert einerseits aus dem beständigen technologischen Fortschritt und andererseits aus der Entwicklung neuer Erhebungsmethoden. Dabei muss der Spagat zwischen umfassender Bewertung (möglichst hohe Anzahl an Indikatoren) und praktikabler Anwendung (möglichst übersichtliche Indikatorenanzahl) überwindbar bleiben. Das Konzept doppelter Nachhaltigkeit ist gegenüber einer weiteren Konkretisierung der Technologiebewertung z.B. durch das Hinzunehmen neuer Indikatoren, exakteren Erhebungsverfahren zu verwendeten Indikatoren oder alternativer Bewertungsverfahren (Indexbildung, Gewichtung) aufgeschlossen. Die stetige Anpassung und Weiterentwicklung wird vielmehr konzeptimmanent gefordert, wenn es der Operationalisierung von Nachhaltigkeit am Energiesektor dient.

Um in der Standortplanung von Energietechnologien, dem nächsten konzeptionellen Schritt, ebenfalls einen Nachhaltigkeitsbezug herzustellen, benennt das vorgestellte Konzept wiederum Kriterien, die nun eine räumliche Konkretisierung von Standorten zulassen. Hierzu wird in der Arbeit eine Verbindung zwischen der Methodik von Potenzialstudien erneuerbarer Energien (vgl. hierzu Kaltschmitt et al. 2006) und den Aspekten einer nachhaltigen Regional- und Standortplanung hergestellt. Das theoretische Potenzial sowie das daraus abgeleitete technische Potenzial dienen dabei als Grundlage für die anschließende Standortsuche und werden aus der Potenzialermittlung übernommen. Dem ökonomischen bzw. dem erschließbaren Potenzial werden schließlich die drei Nachhaltigkeitsdimensionen der ökonomischen Rentabilität, der ökologischen Verträglichkeit und der sozialen Akzeptanz zugeordnet (vgl. Enquete Kommission 1998), welche ihrerseits mit Standortkriterien hinterlegt sind.

Die Kriterien können anschließend mit Geographischen Informationssystemen räumlich abgebildet, modelliert und analysiert werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht für unterschiedliche Energieformen eine Identifikation von Standorten, die den Nachhaltigkeitsaspekten entsprechen bzw. nicht entsprechen. Als Kriterien sind exemplarisch die Erreichung gewisser Rentabilitätsansprüche (z.B. ausreichende Windgeschwindigkeiten an einem Ort), das Einhalten von Mindestabständen (z.B. Sicherheitsabstände zu einer Windkraftanlage) oder der Ausschluss von naturrechtlich geschützten Gebieten (z.B. Nationalpark) zu nennen. Da die Energiethematik in der Regionalplanung und Kommunalentwicklung eine zunehmende Bedeutung erlangt, ist die diesbezügliche Zusammenstellung geeigneter Kriterienkataloge mit entsprechenden räumlichen Eignungs-, Restriktions- und Ausschlussparametern aktuell ein großes wie brisantes Aufgabenfeld. Dementsprechend ist der entwickelte Kriterienkatalog offen für Ergänzungen oder Anpassungen (z.B. an gesetzliche Veränderungen oder gesellschaftlichen Wertvorstellungen) und versteht sich als Vorschlag und Orientierungshilfe zur weiteren Präzisierung von nachhaltigen Standortkriterien.

Mit dem vermehrten Einsatz erneuerbarer Energien und der Hinwendung zu dezentralen Versorgungsstrukturen, wie es im Untersuchungsgebiet und in ganz Deutschland bereits der Fall ist, entstehen nicht selten gesellschaftliche Friktionen. Vor allem die erneuerbaren Energieformen Windkraft, Bioenergie und Photovoltaik rücken näher an das Lebensumfeld der Bürger heran und sind in wachsendem Ausmaß in deren Alltag präsent. Große Photovoltaik-Freiflächenanlagen, Biogasanlagen oder Windräder verändern und prägen zusehend das Landschaftsbild. Eine nachhaltige Energieversorgung verlangt daher, Bürger am Planungsprozess und ggf. auch bei der konkreten Umsetzung, z.B. in Form von Bürgersolarparks oder Bürgerwindräder, umfassend partizipieren zu lassen und muss bestrebt sein, eine in hohem Maße konfliktarme, gesellschaftsverträgliche, transparente und akzeptierte Lösung der Energiewende anzubieten. Das Konzept doppelter Nachhaltigkeit sieht deshalb an zentralen Stellen der Strategie umfassende

Möglichkeiten der Mitsprache vor, wodurch Bürger bzw. Akteure die Handhabe erhalten, ihre Wünsche, Einstellungen, Empfindungen sowie Bedürfnisse zu artikulieren und diese – damit auch sich selbst – in den Planungsprozess zu integrieren. Das Konzept gibt den Befragten damit hohe Wertschätzung und vermittelt bereits in der Planungsphase aktive Beteiligungsmöglichkeit. Ohne eine derartige Partizipation von Bürgern besteht die Gefahr, dass eindimensionale bzw. subjektive Prämissen dominieren, die selten zu nachhaltigen Strukturen beitragen. Die Schaffung effektiver Beteiligungsmöglichkeiten von Bürgern und Akteuren sowohl im planerischen Gestaltungsprozess als auch in der Umsetzung der Transformation bieten jedoch weiterhin großen Handlungsbedarf, sind es doch gerade die Aspekte von Bürgernähe und Bürgerbeteiligung, welche zukünftig über den weiteren Ausbau erneuerbarer Energien und somit über das Gelingen einer nachhaltigen Energiewende entscheidend mitbestimmen werden.

Sowohl die definitorischen Überlegungen als auch die Konzeptgestaltung der doppelten Nachhaltigkeit geschehen stets vor dem Hintergrund einer räumlichen Betrachtung. Diese vollzogene Integration der räumlichen Dimension in die Zieldefinition erweist sich rückblickend als wertvoll, da hiermit die zwingende Notwendigkeit zur Beachtung räumlicher Komponenten und Prozesse bereits in der theoretischen Konzepterarbeitung ermöglicht wird. Der Raum, verstanden als eine geographische Region mit unterschiedlich möglichen Abgrenzungen, besitzt für das Konzept in mehrfacher Weise eine zentrale Funktion. Er bestimmt mit den physischen Voraussetzungen (natürliche Energieströme) das Potenzial der jeweiligen Energietechnologien, im Speziellen von erneuerbaren Energien aber auch von fossilen Energieträgern, da Rohstoffe einerseits fest lokalisiert sind und andererseits natürliche Voraussetzungen (z.B. das Vorhandensein von Kühlwasser) gegeben sein müssen. Ebenso beeinflussen u.a. die wirtschaftliche Struktur, die Flächennutzung, bestehende Siedlungs- und Infrastruktur, wirtschaftliche Förderbedingungen oder die lokale gesellschaftliche Akzeptanz von Energieformen die Gestaltung der künftigen Energieversorgung in entscheidender Weise. Folglich sind sowohl die Güte der Technologien – das theoretische und technische Potenzial wird durch die Standortbedingungen festgelegt – als auch deren Einsatzmöglichkeiten und Standorte durch die physischen, sozioökonomischen und soziokulturellen Raumeigenschaften und den in der untersuchten Region stattfindenden Prozessen bestimmt (vgl. Abb. 29). Gleichzeitig wirken sich die einzelnen Energieformen unterschiedlich auf die Umwelt aus und besitzen ihrerseits eine hohe Raumwirksamkeit (vgl. Bosch & Peyke 2010a, S. 11), deren subjektive Einschätzung bzw. Wahrnehmung wiederum mit der räumlichen Distanz variiert und somit die Akzeptanz von Baumaßnahmen beeinflusst.

Die Geographie wird damit von einer „strategisch bedeutsamen Variable“ (Strobel 2006, S. 16) zur bestimmenden Variable. Im Konzept doppelter Nachhaltigkeit wird dieser Aspekt umfassend beachtet und in den Mittelpunkt gerückt, indem die raumgebundene Eignung einzelner

Energieformen gemessen an Nachhaltigkeitsaspekten sowohl hinsichtlich der Technologie als auch hinsichtlich des Standortes erörtert wird. Die jeweils natürlichen sowie sozialen Gegebenheiten und deren mögliche Veränderungen in einer Region sind es, die das künftige Erscheinungsbild der Energieversorgung maßgeblich prägen. In Anbetracht der hohen Raumabhängigkeit und der gleichzeitig hohen Raumwirksamkeit von Energieformen bzw. von Energieinfrastruktureinrichtungen, zeichnet sich deshalb gerade die integrative Raumwissenschaft Geographie aus, einen grundlegenden Beitrag zur konzeptionellen Entwicklung von regionalen Energiestrategien zu leisten, um eine sinnvolle wie nachhaltige Gestaltung der zukünftigen Energieversorgung auf regionaler Ebene zu gewährleisten.

Kommunale bzw. regionale Energiestrategien, hierzu zählt auch das Konzept doppelter Nachhaltigkeit, sind ein höchst präsent und wegweisendes Betätigungsfeld, um den Transformationsprozess am Energiesektor hin zu nachhaltigen Strukturen richtungssicher gestalten zu können. Energiestrategien, die sich dabei auf Nachhaltigkeit beziehen, lassen häufig einen notwendigen Praxisbezug vermissen, wohingegen bei einer Dominanz regionaler Aspekte (z.B. Gutachten zur Nutzung der Photovoltaik in einem Gemeindegebiet) zumeist normative bzw. klar definierte Nachhaltigkeitskriterien fehlen. Die vorliegende Arbeit präsentiert mit dem Konzept doppelter Nachhaltigkeit einen Ansatz, der theoretische Nachhaltigkeitskonzepte für den Energiebereich operationalisieren lässt und gleichzeitig praxisorientiert umgesetzt werden kann. Sie verknüpft damit normative Vorgaben mit praktischer Anwendung, um nachhaltige Strukturen in der Energieversorgung zu erreichen.

Mit der exemplarischen Anwendung des Konzeptes konnte seine Umsetzbarkeit getestet und ein Mehrwert für die regionale Planung bestätigt werden. Obwohl die empirische Untersuchung durch administrative Gebietseinheiten räumlich eingegrenzt war, bleibt das Konzept doppelter Nachhaltigkeit und die Strategie zur Umsetzung weder auf die betrachtete Ebene (Regierungsbezirk, NUTS 2) noch auf die untersuchte Region (Niederbayern) beschränkt. Die räumliche Perspektive lässt vielmehr eine individuelle Abgrenzung, z.B. Region, Landkreis oder Kommune zu, welche für die praktische Umsetzung des Konzeptes als unerlässlich erscheint. Der geographische Raum, in dessen Kontext die Technologiebewertung stattfindet und in welchem die Energieinfrastruktur schließlich verortet werden soll, sowie die räumliche Abgrenzung erhalten somit auch im Hinblick auf die praktische Anwendung des Konzeptes eine wichtige Funktion. Der zuvor weitgefaste Begriff Raum kann – im vorliegenden Fall mit der Auswahl des Regierungsbezirkes Niederbayern – geographisch weiter konkretisiert werden.

Für den Regierungsbezirk Niederbayern liefert die empirische Anwendung des Konzeptes doppelter Nachhaltigkeit samt Strategie in zweifacher Weise stichhaltige Ergebnisse. Zum einen kann der

begonnene Ausbau erneuerbarer Energien bestätigt werden, in dem diese Energieformen im Vergleich zu fossilen Energieträgern mit Bezug zur Nachhaltigkeit besser geeignet sind und zudem von den befragten Akteuren favorisiert werden. Zum anderen zeigt die regionale Nutzungsverteilung der verschiedenen Energieformen, wo sich welche Technologien unter den gegebenen Standortbedingungen und den getroffenen Nachhaltigkeitsrestriktionen sinnvoll einsetzen lassen. Unterschiedliche Raumqualifikationen konnten so hinsichtlich verschiedener Technologien erarbeitet und räumlich lokalisiert werden. Der Regierungsbezirk Niederbayern profitiert dabei im Wesentlichen durch die enormen Wasserkraftpotenziale. Aber auch die Energieformen Windenergie, Photovoltaik auf Dach- und Freiflächen sowie die analysierten Bioenergieformen bieten zukünftig weitere Ausbaupotenziale. Besonders die Photovoltaiktechnologie hält für den Regierungsbezirk Niederbayern aufgrund geringer sozialer Widerstände vor allem bei Dachanlagen bedeutende Energiepotenziale bereit und trägt zu einer hohen Wertschöpfung in ländlichen Gebieten bei.

Die Ergebnisse und deren Interpretation lassen zudem Modellparameter identifizieren, die gegebenenfalls eine weitere Optimierung der räumlichen Steuerung von Energieanlagen ermöglichen. Ein Beispiel hierzu ist das entwickelte Kompromisszenario für Windenergie, mit welchem die aktuellen Konfliktthemen beim Ausbau der Windenergie im Regierungsbezirk Niederbayern (v.a. Abstand zu Siedlungsflächen und Nutzung des ausgedehnten Landschaftsschutzgebietes im Bayerischen Wald) aufgegriffen werden. Für den derzeitigen gesellschaftlichen Diskurs können die vorgelegten Ergebnisse sowie die kartographischen Ausarbeitungen somit ein wertvolles Informations- und Kommunikationsmittel sein und zu einer objektiven sachdienlichen Diskussion beitragen. Anhand der Überprüfung bestehender Energieanlagen im Untersuchungsgebiet beschreibt die Arbeit zudem die Nachhaltigkeitsaspekte verschiedener Energieformen und Anlagenstandorte an konkreten Beispielen und gibt damit einen Einblick in die Verwendung der erzielten Ergebnisse zum Zweck der kommunalen und regionalen Flächennutzungs- bzw. sogar Bauleitplanung.

Zusammenfassend bestätigt die empirische Untersuchung für den Regierungsbezirk Niederbayern zwar die begonnene Transformation hin zu erneuerbaren Energien, zeigt aber auch Verbesserungsmöglichkeiten und zusätzliche Nutzungspotenziale in der Region auf. Gleichwohl sollen die politischen Ziele der Bayerischen Staatsregierung im Konzept „Energie innovativ“ (vgl. Bayerische Staatsregierung 2011) Anlass sein, den eingeschlagenen Weg weiter voranzuschreiten. Die vorgelegten Ergebnisse bescheinigen Niederbayern hierfür das nötige Potenzial und zeigen entsprechende regionalplanerische Maßnahmen für verschiedene Energieformen bzw. ausgewählte Technologien auf.

Die Ausarbeitung nachhaltig sinnvoller und regional angepasster Energieversorgungssysteme bleibt ein dynamischer Prozess. Sich verändernde politische oder ökonomische Rahmenbedingungen, eine stetige technologische Weiterentwicklung sowie sich wandelnde gesellschaftliche Wahrnehmungen, Befindlichkeiten und Wertvorstellungen können das räumliche Erscheinungsbild der zukünftigen Energieversorgung maßgeblich bestimmen. Die genannten Aspekte der Technologiebewertung und der räumlichen Planung sind folglich nicht einmalig sondern fortlaufend zu beachten. Hier bietet das Konzept doppelter Nachhaltigkeit einen zusätzlichen Mehrwert. So lassen sich mögliche Veränderungen sowohl durch die Kriterien der Technologiebewertung und Standortmodellierung als auch mit der Einbindung von Akteuren in den Planungsprozess berücksichtigen, ohne dass dadurch die konzeptionelle Gestaltung sowie die Intention der doppelten Nachhaltigkeit berührt wird. Die Umsetzung des vorgestellten Konzeptes beschreibt damit einen dynamischen Suchprozess, in welchem Veränderungen durch eine zeitlich versetzte Wiederholung der Konzeptanwendung stets integrierbar sind. Gleichzeitig bleibt das Konzept in den Bereichen der Technologiebewertung, der Standortplanung und der Bürgerbeteiligung offen für weitere Ergänzungen. Die erzielten Ergebnisse sind deshalb keinesfalls als endgültige Musterlösung zu betrachten, zeigen aber zusammen mit dem Konzept doppelter Nachhaltigkeit einen Weg auf, eine nachhaltige Energieversorgung auf regionaler Ebene zu verwirklichen.

Bibliographie

- Adam, D. (1996): Planung und Entscheidung, Modelle-Ziele-Methoden mit Fallstudien und Lösungen. Wiesbaden.
- Alt, F. (2009): Die Sonne schickt uns keine Rechnung, neue Energie, neue Arbeit, neue Mobilität. München, Zürich.
- Amelung, N., Mayer-Scholl, B., Schäfer, M. & Weber, J. (2008): Nachhaltige Entwicklung als Leitbild für Gesellschaft und Forschung, in: Amelung, N., Mayer-Scholl, B., Schäfer, M. & Weber, J. (Hrsg.) (2008): Einstig in Nachhaltige Entwicklung. Frankfurt am Main, S. 5-20.
- Anhuf, D. (2009): Passau: Naturraum und Nutzung, in: Bauriegel, G. (Hrsg.) (2009): Ostbayern und seine Nachbarregionen, Exkursionsführer zum 13. Bayerischen Schulgeographentag in Passau vom 26. bis 28. September 2008. Passau, S. 33-42.
- Aspinall, R. (2010): Geographical Perspectives on Climate Change, in: Annals of the Association of American Geographers, 2010, Vol. 100, No. 4, S. 715-718.
- Aufleger, M. (2008): Strom fließt – Wasserkraft 2020, in: Bauingenieur, 2008, Band 83/7-8, S. 324-332.
- Bamberg, G. & Coenenberg, D.G. (2006): Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre. München.
- Bauriegel, G. (2009): Wirtschaftlicher Strukturwandel im Bayerischen Wald: von Bergbau und Industrie zum Fremdenverkehr, in: Bauriegel, G. (Hrsg.) (2009): Ostbayern und seine Nachbarregionen, Exkursionsführer zum 13. Bayerischen Schulgeographentag in Passau vom 26. bis 28. September 2008. Passau, S. 91-102.
- Bayerische Landesanstalt für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur (LBA) (Hrsg.) (2001): Wirtschaftlichkeit der Windenergienutzung in Bayern. München.
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (StMUG), Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (StMWIVT) & Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren (OBB) (Hrsg.) (2010): Leitfaden Energienutzungsplan, Teil 1: Bestands- und Potenzialanalyse. München. – Web: http://www.stmi.bayern.de/imperia/md/content/stmi/bauen/rechtundtechnikundbauplanung/_stae_dtebau/veroeffentlichungen/oeko/leitfaden_energienutzungspl_1.pdf (Abruf am 22.03.2011).
- Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie (StMWVT) (Hrsg.) (1999): Hinweise zur Windenergienutzung in Bayern. München.
- Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie (StMWVT) (Hrsg.) (2001a): Bayerischer Solar- und Windatlas. München.
- Best, U. (2007): Definitions of Security in German and Polish Debates about Russian Gas Pipelines, in: Geographische Rundschau International Edition, 2007, H. 1, S. 36-42.
- Bell, D., Gray, T. & Haggett, C. (2005): The “Social Gap” in Wind Farm Siting Decisions: Explanations and Policy Responses, in: Environmental Politics (4/2005), Vol. 14, S. 460-477.
- Biberacher, M., Dorfinger, N., Gadocha, S., Gluhak, S., Haslauer, E., Mittelböck, M. & Zocher, D. (2008): EnergieRegion Rhein-Sieg, Bericht zur Modellstudie für erneuerbare Energien und autarke Regionen im Rhein-Sieg-Kreis – räumliche Analyse für eine nachhaltige Energieversorgung. Salzburg.
- Bill, R. (2010): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Berlin.
- Bitzer, K. (2006): Erdölwirtschaft im Mittleren Osten, wie lange noch?, in: Geographische Rundschau, 2006, H. 11, S. 22-28.

- Böhner, J. & Kickner, S. (2006): Woher der Wind weht, in: *GeoBIT* 5/2006, S. 22-25.
- Born, K.M. (2011): Ländliche Räume in Deutschland, Differenzierungen, Entwicklungspfade und –brüche, in: *Geographische Rundschau*, 2011, H. 2, S. 4-10.
- Borsig, A. & Kriszan, M. (2008): Ölfelder der Zukunft – wie ländliche Räume von erneuerbaren Energien profitieren können, in: *Leibnitz-Institut für Länderkunde (Hrsg.) (2008): Brücken, Barrieren, Bilder, Entwicklungsprozesse in europäischen Regionen*. Leipzig, S. 6-15.
- Bosch, St. & Peyke, G. (2009): Energiewende durch GIS, in: *GIS.Business*, 2009, H. 8, S. 44-46.
- Bosch, S. & Peyke, G. (2010a): Raum und Erneuerbare Energien, Anforderungen eines regenerativen Energiesystems an die Standortplanung, in: *STANDORT, Zeitschrift für angewandte Geographie*, 2010, Vol. 34, H. 1, S. 11-19.
- Bosch, St. & Peyke, G. (2010b): Nachhaltige Energieversorgung am Scheideweg – wachsende Ansprüche an GIS zur Korrektur von Fehlentwicklungen beim Ausbau Erneuerbarer Energien, in: *Strobl, J., Blaschke, Th., Griesebner, G. (Hrsg.) (2010): Angewandte Geoinformatik 2010, Beiträge zum 22. AGIT-Symposium Salzburg*. Berlin, S. 924-929.
- Bossel, U. (2010): Nachhaltigkeit ist nicht „Sustainability“, in *Solarzeitalter*, 2010, H. 3, S. 26-27.
- Bradshaw, M.J. (2010): Global energy dilemmas: a geographical perspective, in: *The Geographical Journal*, 2010, Vol. 176, No. 4, S. 275-290.
- Brand, K.-W. & Jochum, G. (2000): Der deutsche Diskurs zu nachhaltiger Entwicklung, Abschlussbericht eines DFG-Projekts zum Thema „Sustainable Development/Nachhaltige Entwicklung – Zur sozialen Konstruktion globaler Handlungskonzepte im Umweltdiskurs“. München.
- Brandl, V., Jörissen, J., Kopfmüller, J. & Paetau, M. (2001): Das integrative Konzept: Mindestbedingungen nachhaltiger Entwicklung, in: *Grundwald, A., Coenen, R., Nitsch, J., Sydow, A. & Wiedemann, P. (Hrsg.) (2001): Forschungswerkstatt Nachhaltigkeit, Wege zur Diagnose und Therapie von Nachhaltigkeitsdefiziten*. Berlin, S. 79-101.
- Braun, F. & Lederer, B. (2010): Reizthema Solarpark: Ein Appell für eine objektive Standortsuche, in: *Zeitschrift für öffentliches Recht und öffentliche Verwaltung*, 2010, H. 4, S. 97-101.
- Brendel, R., Harder, N.-P., Schmidt, J., Glunz, S., Preu, R., Reber, S., Korte, & Kunz, Th. (2010): Silizium-Wafer-Solarzellen – neue Horizonte, in: *Forschungsverbund Erneuerbare Energien (Hrsg.) (2010): Forschen für das Zeitalter der erneuerbaren Energien, Themen 2010*. Berlin, S. 54-60.
- Breuer, T., Delzeit, R. & Becker A. (2008): Biofuels: Die globale Renaissance der „Kraftstoffe vom Acker“, in: *Geographische Rundschau*, 2008, H. 1, S. 58-65.
- Breuer, T. & Holm-Müller, K. (2006): Entwicklungschancen für den ländlichen Raum: Standortfaktoren der Produktion biogener Kraftstoffe in Deutschland, in: *Informationen zur Raumentwicklung*, 2006, H. 1/2, S. 55-65.
- Breuer, W. (2001): Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen für Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes, Vorschläge für Maßnahmen bei Errichtung von Windkraftanlagen, in: *Naturschutz und Landschaftsplanung*, 2001, H. 8, S. 237-245.
- Breuer, W. (2006): Anforderungen des Naturschutzes und der Landschaftspflege an den Ausbau der Windenergie, in: *Deutscher Rat für Landschaftspflege e.V. (DRL) (Hrsg.) (2006): Die Auswirkungen erneuerbarer Energien auf Natur und Landschaft*. Meckenheim, S. 109-115.
- Brücher, W. (2008): Erneuerbare Energien in der globalen Versorgung aus historisch-geographischer Perspektive, in: *Geographische Rundschau*, 2008, H. 1, S. 4-12.

- Brücher, W. (2009): Energiegeographie, Wechselwirkungen zwischen Ressourcen, Raum und Politik. Stuttgart.
- Brücher, W. & Helfer, M. (2004): Energienachfrage und Angebotsdifferenzierung, in: Leibnitz Institut für Länderkunde (Hrsg.) (2004): Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, Unternehmen und Märkte, Band 8. München, S. 130-133.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hrsg.) (1997): Umweltpolitik, Agenda 21, Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung im Juni 1992 in Rio de Janeiro, Dokumente. Bonn.
- Bunge, T., Dirbach, D., Dreher, B., Fritz, K., Lell, O., Rechenberg, B. Rechenberg, J., Schmitz, E., Schwermer, S., Steinhauer, M., Steudte, C. & Voigt, T. (2001): Wasserkraftanlagen als erneuerbare Energiequellen – rechtliche und ökologische Aspekte. Berlin.
- Bunzel, K., Thrän, D., Seyfert, U., Zeller, V. & Buchhorn, M. (2011): Forstwirtschaftliche Biomassepotenziale und Reststoffpotenziale in Deutschland, in: Informationen zur Raumentwicklung, 2011, H. 5/6, S. 297-308.
- Carlowitz, von H.C. (2000): *Sylvicultura oeconomica*, Anweisung zur wilden Baum-Zucht, Reprint der Ausgabe Leipzig: Braun 1713. Bearbeitet von Klaus Irmer und Angela Kießling mit einer Einleitung von Ulrich Grober. Freiberg.
- Coenen, R., Brandl, V., Jörissen, J., Kopfmüller, J. & Sarderemann, G. (2001): Das System der Nachhaltigkeitsindikatoren, in: Grundwald, A., Coenen, R., Nitsch, J., Sydow, A. & Wiedemann, P. (Hrsg.) (2001): Forschungswerkstatt Nachhaltigkeit Wege zur Diagnose und Therapie von Nachhaltigkeitsdefiziten. Berlin, S. 103-126.
- Coenen, R. & Grunwald, A. (Hrsg.) (2003): Nachhaltigkeitsprobleme in Deutschland, Analyse und Lösungsstrategien. Berlin.
- Conrad, S. (2007): Nachhaltige Regionalentwicklung durch Erneuerbare Energien?, in: Kratz, S. (Hrsg.) (2007): Energie der Zukunft, Bausteine einer nachhaltigen Energieversorgung. Marburg, S. 73-100.
- Coy, M. & Geipel, F. (2004): Staudämme in Brasilien, Energiegewinnung im Spannungsfeld von Wirtschaft und Gesellschaft, in: Geographische Rundschau, 2004, H. 12, S. 28-35.
- Curtis, F. (2007): Climate Change, Peak Oil, and Globalization: Contradictions of Natural Capital, in: Review of Radical Political Economics, 2007, Vol. 39, No. 3, S. 385-390.
- Daly, H.E. (1999): Wirtschaft jenseits von Wachstum, die Volkswirtschaftslehre Nachhaltiger Entwicklung. Salzburg, München.
- Denhardt, A. & Petschow, U. (2004): Nobody ist perfect! Erneuerbare Energien, externe Effekte und ökonomische Bewertung, in: Ökologisches Wirtschaften, 2004, H. 5, S. 24-25.
- Deutscher Rat für Landschaftspflege e.V. (DRL) (Hrsg.) (2006): Die Auswirkungen erneuerbarer Energien auf Natur und Landschaft. Meckenheim.
- Dewald, U. (2010): Wechselwirkungen von Politik und Markt: Entwicklungen der Photovoltaik in Deutschland, in: Schüssler, F. (Hrsg.) (2010): Geographische Energieforschung. Frankfurt am Main, S. 83-105.
- Diemel, R. (2006): Perspektiven für die Nutzung der Wasserkraft in Übereinstimmung mit Leitbildern der Landschaftspflege, in: Deutscher Rat für Landschaftspflege e.V. (DRL) (Hrsg.) (2006): Die Auswirkungen erneuerbarer Energien auf Natur und Landschaft. Meckenheim, S. 125-130.
- Diepenbrock, W., Ellmer, F. & Léon, J. (2005): Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung. Stuttgart.

- Domsch, M. & Reinecke, P. (1989): Bewertungstechniken, in: Szyperski, N. (Hrsg.) (1989): Handwörterbuch der Planung. Stuttgart, S. 143-155.
- Dörrenbacher, H.P., Soyez, D. & Schäfer, K. (1997): Stromerzeugung im Saarland, die Nutzung heimischer Steinkohle im Spannungsfeld zunehmender Maßstabsverflechtungen, in: Geographische Rundschau, 1997, H. 6, S. 336-340.
- dos Santos Bernardes, M., Briem, S., Krewitt, W., Nill, M., Rath-Nagel, S. & Voß, A. (2002): Grundlagen zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen in Baden Württemberg. Stuttgart. – Web: <http://bwplus.fzk.de/berichte/SBer/BWA99001SBer.pdf> (Abruf am 24.03.2011).
- Dumont, U. (2006): Räumliche Dimension der Wasserkraft und ihre Auswirkungen aus naturschutzfachlicher Sicht, in: Deutscher Rat für Landschaftspflege e.V. (DRL) (Hrsg.) (2006): Die Auswirkungen erneuerbarer Energien auf Natur und Landschaft. Meckenheim, S. 122-124.
- Eckel, H., Grube, J. & Zimmer, E. (2006): Energiepflanzen, Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus. Darmstadt.
- Egan-Krieger, T. von, Ott, K., & Voget, L. (2007): Der Schutz des Naturerbes, in APUZ, 2007, H. 24, S. 10-17.
- Egert, M. & Jedicke, E. (2001): Akzeptanz von Windenergieanlagen, Ergebnisse einer Anwohnerbefragung unter besonderer Berücksichtigung der Beeinflussung des Landschaftsbildes, in: Naturschutz und Landschaftsplanung, 2001, 33, H. 12, S. 373-381.
- Eichelbrönner, M. & Henssen, H. (1998): Langfristige Aspekte der Energieversorgung, Ergebnisse eines Diskussionsprozesses, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 1998, H. 8, S. 496-500.
- Eisenführ, F. (1989): Entscheidungstheoretische Planungshilfen, in: Szyperski, N. (Hrsg.) (1989): Handwörterbuch der Planung. Stuttgart, S. 397-406.
- Eisenführ, F. & Weber, M. (2003): Rationales Entscheiden. Berlin, Heidelberg, New York.
- Endlicher, W. (2007): Das Unbeherrschbare Vermeiden und das Unvermeidbare Beherrschen – Strategien gegen die gefährlichen Auswirkungen des Klimawandels, in: Endlicher, W. & Gerstengarbe, F.W. (Hrsg.) (2007): Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Potsdam, S. 119-131.
- Endres, A. & Radke, V. (1998): Zur theoretischen Struktur von Indikatoren einer nachhaltigen Entwicklung, in: Zeitschrift für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, 1998, H. 1, S. 295-313.
- Enquete-Kommission des Bayerischen Landtages (Hrsg.) (2001): „Mit neuer Energie in das neue Jahrtausend“. München.
- Enquete-Kommission des 13. Deutschen Bundestages (1998): Konzept Nachhaltigkeit, vom Leitbild zur Umsetzung. Bonn.
- Enquete-Kommission des 14. Deutschen Bundestages (2002): Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung. Berlin.
- Enzensberger, N., Wietschel, M. & Rentz, O. (2001): Konkretisierung des Leitbildes einer nachhaltigen Entwicklung für den Energieversorgungssektor, in: Zeitschrift für Energiewirtschaft, 2001, H. 2, S. 125-136.
- Fassl, P. (2009): Landschaftsveränderungen durch großflächige Photovoltaikanlagen, in: Schöner Heimat, Erbe und Auftrag, 2009, H. 4, S. 229-232.
- Fishedick, M. & Nitsch, J. (2002): Langfristszenarien für eine nachhaltige Energienutzung in Deutschland. Berlin. (UBA Forschungsbericht 200 97 104).
- Fleury, A. (2005): Eine Nachhaltigkeitsstrategie für den Energiesektor, dargestellt am Beispiel der Stromversorgung in Frankreich. Dissertation. Karlsruhe.

- Frank, M. (2010): Tourismus in Niederbayern, in: Brunner, M. (Hrsg.) (2010): Wirtschaftsregion Niederbayern, Economic Region Lower Bavaria. Oldenburg, S. 88-91.
- Frankenberg, K.-W. J. (1980): Regenerative Energiequellen – auch ein Thema für die Bundesrepublik?, in: Geographische Rundschau, 1980, H. 2, S. 77-78.
- Friedlein, G. (1997): Die Tschernobyl-Katastrophe, Auswirkungen auf den geographischen Raum in Osteuropa, in: Europa Regional, 1997, H. 3, S. 2-4.
- Friedrichs, J. (2010): Global energy crunch: How different parts of the world would react to a peak oil scenario, in: Energy Policy, 2010, S. 4562-4569.
- Gabler, H., Bendel, Ch., Tegtmeyer, D. & Voss, K. (2002): Photovoltaik am Gebäude – Stromversorgung mit Solarzellen, in: Forschungsverbund Sonnenenergie (Hrsg.) (2002): Integration Erneuerbarer Energien in Versorgungsstrukturen, Themen 2001. Berlin, S. 29-35.
- Gabriel, E. (2004): Das schwarze Gold: die Ölprovinz Persisch-Arabischer Golf, in: Meyer, G. (Hrsg.) (2004): Die Arabische Welt im Spiegel der Kulturgeographie. Mainz, S. 308-316.
- Gebhardt, H. & Ingenfeld, E. (2011): Die Arktis im Fokus geoökonomischer und geopolitischer Interessen, in: Geographische Rundschau 2011, H. 12, S. 26-32.
- Geiß, J. (2006): Erneuerbare-Energien-Contracting, auf dem Weg zur solaren Weltwirtschaft – Chancen einer nachhaltigen Entwicklung durch systemische Dienstleistungen. München.
- Genosko, J. (2005): Indikatoren, in: Ritter, E.H. (Hrsg.) (2005): Handwörterbuch der Raumordnung. Hannover, Braunschweig. (ARL: Akademie für Raumforschung und Landesplanung), S. 457-465.
- Gerling, K. & Gans, P. (2008): Biokraftstoffboom, Segen oder Fluch für die Agrarländer des Südens?, in: Geographische Rundschau, 2008, H. 4, S. 58-65.
- Gerling, P. (2002): Fossile Energiestoffe: Wachsender Bedarf – Begrenzte Verfügbarkeit, in: Wefer, G. (Hrsg.) (2002): Expedition Erde, Beiträge zum Jahr der Geowissenschaften. Bremen, S. 76-80.
- Gerloff, J.U. (2008): Ölsande und Ölschiefer – Reserven des globalen Ölmarktes?, in: Geographische Rundschau, 2008, H. 1, S. 42-49.
- George, W., Bonow, M., Hoppenbrock, C. & Moser, P. (2009): Regionale Energieversorgung, Chancen für eine zukunftsfähige Ziel- und Ressourcensteuerung in der Energiewirtschaft, in: in: STANDORT, Zeitschrift für angewandte Geographie, 2009, Vol. 33, H. 1, S. 13-21.
- Giesecke, J. & Mosonyi, E. (2009): Wasserkraftanlagen, Planung, Bau und Betrieb. Heidelberg, London, New York.
- Gore, A. (2007): An Inconvenient Truth: The Crisis of Globale Warming and what we can do about it. New York.
- Gorlenko, I., Starostenko, A. & Friedlein, G. (1997): Die Tschernobyl-Katastrophe in der Ukraine – Soziale und wirtschaftliche Folgen, in: Europa Regional, 1997, H. 3, S. 5-11.
- Götz, R. (2011): Erdgas für Europa vom „Ende der Welt“, Russland Gasförderung verlagert sich auf die Jamal-Halbinsel, in: Geographische Rundschau, 2011, H. 1, S. 20-27.
- Graß, R. & Scheffer, K. (2005): Alternative Anbaumethoden: Das Zweikulturnutzungssystem, in: Natur und Landschaft 80, 2005, H. 9/10, S. 435-439.
- Graßl, H. (2005): Das Klima und seine Änderungen, in: Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft (Hrsg.) (2005): Wetterkatastrophen und Klimawandel, sind wir noch zu retten?. München, S. 18-23.
- Gregorowius, D. & Zepp, H. (2006): Offshore-Windenergienutzung in der Deutschen Bucht, was denken die Akteure, in: Europa Regional, 2006, H. 2. S. 117-131.

- Grill, K.D. (2004): Nachhaltige Energiepolitik – preiswert, versorgungssicher und umweltverträglich, in: Grewe, J., Flandrich, D. & Ellwanger, N. (Hrsg.) (2004): *Energiewirtschaft im Wandel: Dieter Schmitt zum 65. Geburtstag*. Münster, S. 213-224.
- Grober, U. (2002): Konstruktives braucht Zeit. Über die langsame Entdeckung der Nachhaltigkeit, in *APUZ*, 2002, H. 31-32, S. 3-7.
- Grünig, R. & Kühn, R. (2009): *Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme, ein heuristischer Ansatz*. Heidelberg, London, New York.
- Grünreich, D. (2005): Kartographische Grundlagen, in: Ritter, E.H. (Hrsg.) (2005): *Handwörterbuch der Raumordnung*. Hannover, Braunschweig. (ARL: Akademie für Raumforschung und Landesplanung), S. 489-495.
- Grunwald, H. (2010): Niederbayern – die Aufstiegsregion, in: Brunner, M. (Hrsg.) (2010): *Wirtschaftsregion Niederbayern, Economic Region Lower Bavaria*. Oldenburg, S. 22-25.
- Grunwald, A. & Kopfmüller, J. (2006): *Nachhaltigkeit*. Frankfurt am Main.
- Günnewig, D., Püschel, M., Rohr, A., Götze, R., Löscher, L., Müller, W. & Mack, M. (2009): *Erarbeitung von Grundlagen zur regionalplanerischen Steuerung von Photovoltaik-Freiflächenanlagen am Beispiel der Region Lausitz-Spreewald*. Hannover, Leipzig.
- Gust, D. & Pohle, H. (2007): Räumliche Aspekte des energiepolitischer Wandels in Deutschland – Einführung, in: Gust, D. (Hrsg.) (2007): *Wandel der Stromversorgung und räumliche Politik*. Hannover, S. 1-6.
- Haas, H.D. & Scharrer, J. (2005a): Die Rolle der Rohstoffe im Entwicklungsprozess – energiewirtschaftlicher Wertewandel, in: Schenk, W. & Schliephake, K. (Hrsg.) (2005): *Allgemeine Anthropogeographie*. Gotha, S. 402-403.
- Haas, H.D. & Scharrer, J. (2005b): Die Energiewirtschaft und ihre räumliche Wirkungen, in: Schenk, W. & Schliephake, K. (Hrsg.) (2005): *Allgemeine Anthropogeographie*. Gotha, S. 427-437.
- Haas, H.D. & Scharrer, J. (2005c): Bergbau – Umwelt als Ressource, in: Schenk, W. & Schliephake, K. (Hrsg.) (2005): *Allgemeine Anthropogeographie*. Gotha, S. 403-427.
- Häder, M. (2010): *Empirische Sozialforschung, eine Einführung*. Wiesbaden.
- Hake, J.-F. & Eich, R. (2005): Anforderungen an einen in die Zukunft gerichtete Energieforschung, in: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 2005, H. 1/2, S. 8-11.
- Hamhaber, J. (2010): Humangeographische Zugänge in der Geographischen Energieforschung vom euklidischen Raum zu sozial konstruierten Raumbezügen, in: Schüssler, F. (Hrsg.) (2010): *Geographische Energieforschung*. Frankfurt am Main, S. 9-19.
- Hartmann, H. & Höldrich, A. (2007): Bereitstellung von Festbrennstoffen, in: Fachagentur *Nachwachsende Rohstoffe (FNR)* (Hrsg.) (2007): *Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen*. Gülzow.
- Hartmuth, G., Huber, K. & Rink, D. (2006): Downscaling von Nachhaltigkeit, das Integrative Nachhaltigkeitskonzept als Bauplan für kommunale Indikatorensysteme, in: Kopfmüller, J. (Hrsg.) (2006a): *Ein Konzept auf dem Prüfstand, das integrative Nachhaltigkeitskonzept in der Forschungspraxis*. Berlin, S. 99-114.
- Hartung, A. (1996): Ökologische Auswirkungen des Reaktorunglücks von Tschernobyl in Weißrußland, in: *Europa Regional*, 1996, H. 2, S. 29-37.

- Haslauer, E. & Biberacher, M. (2009): Entwicklung eines Modells zur Berechnung von jahreszeitlich verfügbaren Wasserkraftpotenzialen unter Berücksichtigung von Verdunstung und Wasserrückhalt am Beispiel des Landes Salzburg, in: Strobl, J., Blaschke, T., Griesebner, G. (Hrsg.) (2009): *Angewandte Geoinformatik 2009*. Heidelberg, 452-457.
- Hasse, J. & Denzer, V. (2006): Windkraftanlagen und der Kampf um die Landschaft, in: Leibniz-Institut für Länderkunde (Hrsg.) (2006): *Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, Leben in Deutschland*, Band 12. München, S. 150-151.
- Hau, E. (2003): *Windkraftanlagen, Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*. Berlin, Heidelberg.
- Hauff, V. (1987): *Unsere Gemeinsame Zukunft, der Brundlandt-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung*. Greven.
- Hausladen, G. & Hamacher, Th. (2011): *Leitfaden Energienutzungsplan*. München. (Hrsg. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (StMUG), Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (StMWIVT) & Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren (OBB)).
- Heier, Siegfried (2007): *Nutzung der Windenergie*. Berlin.
- Heigl, J. & Keller, E. (1995): *Windenergie in Bayern*, in: Bund Naturschutz in Bayern e.V. (Hrsg.) (1995): *Der Wind, das himmlische Kind, Windkraft im Binnenland. Aspekte einer Kontroverse zwischen Naturschutz, Landschaftsästhetik und dem Einsatz regenerativer Energie*. Regensburg, S. 48-54.
- Heimann, M. (2001): *Methodik zur technisch-ökologischen Bewertung regenerativer Energiequellen zur Erzeugung elektrischer Energie*. Bochum.
- Heißenhuber, A., Berenz, S. & Rauh, St. (2007): *Ökonomische Aspekte der Energiegewinnung aus Biomasse*, in: Bayerische Akademie der Wissenschaften (Hrsg.) (2007): *Energie aus Biomasse. Rundgespräche der Kommission für Ökologie*, Band 33. München, S. 73-86.
- Helfer, M. (2008): *Perspektiven der Steinkohle im 21. Jahrhundert*, in: *Geographische Rundschau*, 2008, H. 1, S. 32-41.
- Hennicke, P. (2003): *Nachhaltigkeitsforschung zwischen Anspruch und Wirklichkeit, Geleitwort*, in: Geiß, J., Wortmann, D. & zuber, F. (Hrsg.) (2003): *Nachhaltige Entwicklung – Strategie für das 21. Jahrhundert? Eine interdisziplinäre Annäherung*. Opladen, S. 9-14.
- Hennicke, P. & Bodach, S. (2010): *Energierévolution, Effizienzsteigerung und erneuerbare Energien als neue globale Herausforderung*. München.
- Hennicke, P. & Fishedick, M. (2007): *Erneuerbare Energien*. München.
- Henniges, O. & Zeddies, J. (2007): *Biofuels – experiences and perspectives in industrialized and developing countries*, in: *Quarterly Journal of International Agriculture* 46, 2007, No. 4, S. 349-371.
- Hilling, F. & de Lange, N. (2010): *Webgestützte interaktive Solardachkataster, ein Instrument zur Darstellung der Nutzungseignung von Dächern für Photovoltaikanlagen am Beispiel der Stadt Lage*, in: *STANDORT, Zeitschrift für angewandte Geographie*, 2010, Vol. 34, Nr. 4, S. 104-109.
- Hirschberg, S., Dones, R., Heck, Th., Burgherr, P., Schenler, W. & Bauer, Ch. (2004): *Sustainability of Electricity Supply Technologies under German Conditions: A Comparative Evaluation*. Villingen.
- Hötker, H., Jeromin, H. & Thomson, K.-M. (2006): *Räumliche Dimension der Windenergie und Auswirkungen aus naturschutzfachlicher Sicht am Beispiel der Vögel und Fledermäuse – eine Literaturstudie*, in: Deutscher Rat für Landschaftspflege e.V. (DRL) (Hrsg.) (2006): *Die Auswirkungen erneuerbarer Energien auf Natur und Landschaft*. Meckenheim, S. 100-108.

- Humrich, Ch. (2011): Ressourcenkonflikte, Recht und Regieren in der Arktis, in: APUZ, 2011, H.5-6, S. 6-13.
- Ingimundarson, V. (2011): Die Kartierung der Arktis: Bodenschätze, Großmachtpolitik und multilaterale Governance, in: APUZ, 2009, H.5-6, S. 14-23.
- Jacobeit, J. (2007): Zusammenhänge und Wechselwirkungen im Klimasystem, in: Endlicher, W. & Gerstengarbe, F.W. (Hrsg.) (2007): Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Potsdam, S. 1-16.
- Jaeger, A. (1989): Multikriterien-Planung, in: Szyperski, N. (Hrsg.) (1989): Handwörterbuch der Planung. Stuttgart, S. 1199-1205.
- Joos, F. (2006): Technische Verbrennung, Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen. Berlin, Heidelberg, New York.
- Kalina, H., Löffler, S., Krautz, H.J. & Möller, J. (2005): Gesamtbewertung für erneuerbare Energien möglich und sinnvoll, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 2005, H. 7, S. 467-471.
- Kallmützer, B. (2008): Planungshilfe Photovoltaik-Freiflächenanlagen, energiewirtschaftliche und planungsrechtliche Rahmenbedingungen und GIS-gestützte Standortsuche. Hamburg.
- Kaltschmitt, M. (2009): Einleitung und Zielsetzung, in: Kaltschmitt, M., Hartmann, H. & Hofbauer, H. (Hrsg.) (2009): Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren. Heidelberg, S. 1-40.
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H. & Hofbauer, H. (Hrsg.) (2009): Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren. Heidelberg.
- Kaltschmitt, M., Streicher W. & Wiese, A. (Hrsg.) (2006): Erneuerbare Energien, Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Berlin, Heidelberg.
- Kaphengst, T. (2007): Nachhaltige Biomassennutzung in Europa, in: GIAI 16, 2007, H. 2, S. 93-97.
- Karpenstein-Machan, M. (2004): Neue Perspektiven für den Naturschutz durch einen ökologisch ausgerichteten Energiepflanzenanbau, Chancen und Methoden einer integrativen Ackernutzung, in: Naturschutz und Landschaftsplanung 36, 2004, H. 2, S. 58-64.
- Keeney, R. L. (1988): Structuring objectives for problems of public interest, in: Operations Research, 1988, No. 3, S. 396-405.
- Keim, G., Glaser, St. & Lagally, U. (2004): Geotope in Niederbayern. München. (Hrsg. Bayerischen Geologischen Landesamtes).
- Keite, B. (2004): Ein Fisch auf dem Trockenen? Konfliktfeld kleine Wasserkraft, in: Ökologisches Wirtschaften, 2004, H. 5, S. 21-22.
- Kemfert, C. & Müller, F. (2006): Die Energiepolitik zwischen Wettbewerbsfähigkeit, Versorgungssicherheit und Nachhaltigkeit, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 2006, H. 9, S. 27-31.
- Kemfert, C. & Müller, F. (2007): Die Energiepolitik zwischen Wettbewerbsfähigkeit, Versorgungssicherheit und Nachhaltigkeit – Chancen und Perspektiven für die Energieversorgung, in: Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforschung, 2007, Jg. 76, H. 1, S. 5-16.
- Keppler, E. (2002): Die Energiefrage: Wie lässt sich Nachhaltigkeit erreichen?, in: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (Hrsg.) (2002): Entwicklungslinien der Energietechnik, VDI-Berichte 1714. Düsseldorf, S. 3-14.
- Kerckow, B. (2007): Competition between agricultural and renewable energy production, in: Quaterly Journal of International Agriculture 46, 2007, No. 4, S. 333-347.

- Kestel, G. (2002): Der Donauausbau zwischen Straubing und Vislhofen im Spannungsfeld zwischen Naturschutz und Wirtschaftlichkeitserwägungen, in: Ratusny, A. (Hrsg.) (2002): Flusslandschaften an Inn und Donau. Passau, S. 63-77.
- Klärle, M. (2008): SUN-AREA - Ein Beitrag der Fernerkundung gegen den Klimawandel, in: Schiewe, J. & Michel, U. (Hrsg.) (2008): Geoinformatics paves the Highway to Digital Earth (On the occasion of the 60th birthday of Professor Manfred Ehlers). Osnabrück, S. 55-60. – Web: http://www.igf.uni-osnabrueck.de/gi_reports_igf8.pdf (Abruf am 12.05.2011).
- Klauer, B. (1999): Was ist Nachhaltigkeit und wie kann man eine nachhaltige Entwicklung erreichen?, in: Zeitschrift für angewandte Umweltforschung, 1999, H. 1, S. 86-97.
- Klein, R. (2004): Einsatz und Entwicklung regenerativer Energien, in: Leibnitz Institut für Länderkunde (Hrsg.) (2004): Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, Unternehmen und Märkte, Band 8. München, S. 152-153.
- Klein, V. (2007): Die ukrainische Energiewirtschaft 21 Jahre nach Tschernobyl, in: Geographische Rundschau, 2007, H. 12, S. 20-27.
- Kleinschmit, B., Förster, M., Korte, B. & Ross, L. (2006): Energie vom Acker, in: GIS-BUSINESS, 2006, H. 8, S. 25-27.
- Kleinschmidt, V., Schauerte-Lüke, N. & Bergmann, R. (1994): Rahmenkonzept für Windkraftanlagen und –parks im Binnenland, ein Beispiel aus Nordrhein-Westfalen, in: Natur und Landschaft, 1994, 69 Jg., H. 1, S. 9-18.
- Klohn, W. & Windhorst, H.-W. (2007): Kampf um die Fläche? Landwirtschaft im Spannungsfeld zwischen Energie- und Nahrungsmittelproduktion, in: Geographie und Schule, 2007, H. 170, S. 4-10.
- Köpf, E.U. (2003): Nachhaltigkeit – ein Prinzip der Forstwirtschaft, in: Zeitschrift für Sozialökonomie, 2003, 137. Folge, S. 3-11.
- Kopfmüller, J. (Hrsg.) (2006): Ein Konzept auf dem Prüfstand, das integrative Nachhaltigkeitskonzept in der Forschungspraxis. Berlin.
- Kopfmüller, J., Brandl, V., Jörissen, J., Paetau, M., Banse, G., Coenen, R. & Grunwald, A. (2001): Nachhaltige Entwicklung integrativ betrachtet, konstitutive Elemente, Regeln, Indikatoren. Berlin.
- Kopfmüller, J., Coenen, R., Jörissen, J., Fleischer, T., Rösch, C., Sarderemann, G., Schulz, V., Langniß, O. & Nitsch, J. (2000): Konkretisierung und Operationalisierung des Leitbildes einer nachhaltigen Entwicklung für den Energiebereich. Karlsruhe. – Web: <http://www.itas.fzk.de/deu/Itaslit/koua00a.pdf> (Abruf am 17.03.2011).
- Köppel, J., Peters, W. & Schultze, Ch. (2004): Naturschutzaspekte beim Anbau von Biomasse, den Boom naturverträglich gestalten, in: Ökologisches Wirtschaften, 2004, H. 5, S. 19-20.
- Koziol, M. (2010): Energetische Stadterneuerung – Aufgabe für die Gesamtstadt, in: Informationen zur Raumentwicklung, 2010, H. 9, S. 651-663.
- Krallmann, H. (1989): Aggregation und Desaggregation, in: Szyperski, N. (Hrsg.) (1989): Handwörterbuch der Planung. Stuttgart, S. 8-14.
- Kreutzmann, H. (2005): Ölinteressen in der Region des Persischen Golfes, politisch-territoriale Transformationen vom Osmanischen Reich zum „Greater Middle East“, in: Geographische Rundschau, 2005, H. 11, S. 4-11.
- Kreutzmann, H. (2007): Politische Konflikte um Erdölressourcen, in: Gebhardt, H., Glaser, R., Radtke, U. & Reuber, P. (Hrsg.) (2007): Geographie, physische Geographie und Humangeographie. München, S. 1014-1027.

- Krewitt, W., Nitsch, J., Langniß, O. & Fishedick, M. (2007): Leitlinien für eine nachhaltige Energieversorgung, in: Forschungsverbund Sonnenenergie (Hrsg.) (2007): Forschung und Innovation für eine nachhaltige Energieversorgung, Themen 2006. Berlin, S. 27-31.
- Krewitt, W., Nitsch, J. & Reinhardt, G. (2004): 100 Prozent sind machbar, Herr Nachbar! Wege für einen ausgewogenen Ausbau erneuerbarer Energien, in: Ökologisches Wirtschaften, 2004, H. 5, S. 12-14.
- Krisjane, Z. & Churbakova, E. (1997): Soziale Auswirkungen der Tschernobyl-Katastrophe in Lettland, in: Europa Regional, 1997, H. 3, S. 16-20.
- Lehr, U., Lutz, Ch., Edler, D., O'Sullivan, M., Nienhaus, K., Nitsch, J., Breitschopf, B., Bickel, P. & Ottmüller, M. (2011): Kurz- und langfristige Auswirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien auf den deutschen Arbeitsmarkt. Osnabrück, Berlin, Karlsruhe, Stuttgart. – Web: http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_arbeitsmarkt_bf.pdf (Abruf am 04.04.2011).
- Leicht, H. (2006): Perspektiven für die Nutzung der Solarenergie aus der Sicht des Naturschutzes, in: Deutscher Rat für Landschaftspflege e.V. (DRL) (Hrsg.) (2006): Die Auswirkungen erneuerbarer Energien auf Natur und Landschaft. Meckenheim, S. 118-121.
- Leist, G. (1989): Nutzwertanalyse, in: Szyperski, N. (Hrsg.) (1989): Handwörterbuch der Planung. Stuttgart, S. 1259-1266.
- Lenz, S. (2004): Akzeptanz von Windenergieanlagen in der Erholungslandschaft, Hintergrund und Ergebnisse einer empirischen Untersuchung in der Eifel, in: Naturschutz und Landschaftsplanung, 2004, Jg. 35, H. 4, S. 120-126.
- Leser, H. (Hrsg.) (1997): Wörterbuch Allgemeine Geographie. München.
- Lifka, S. (2009): Entscheidungsanalysen in der Immobilienwirtschaft. München.
- Ludwig, D., Klärle, M. & Lanig, S. (2008): Automatisierte Standortanalyse für die Solarnutzung auf Dachflächen über hochaufgelöste Laserscanningdaten, in: Strobl, J., Blaschke, T. & Griesebner, G. (Hrsg.) (2008): Angewandte Geoinformatik 2008, Beiträge zum 20. AGIT-Symposium Salzburg. Heidelberg, 466 - 475.
- Marheineke, T. (2002): Lebenszyklusanalyse fossiler, nuklearer und regenerativer Stromerzeugungstechniken. Stuttgart. – Web: http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2002/1144/pdf/Dissertation_Marheineke_Torsten.pdf (Abruf am 23.03.2011).
- Marheineke, T. / Krewitt, W. / Neubarth, J. / Friedrich, R. & Voß, A. (2000): Ganzheitliche Bilanzierung der Energie- und Stoffströme von Energieversorgungstechniken. Stuttgart.
- Meadows, D., Meadows, D., Randers, J. & Behrens, W. (1972): The limits to growth, a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind. New York.
- Mengel, A., Reiß, A, Thömmes, A., Hahne, U. & von Kampen, S. (2010): Steuerungspotenziale im Kontext naturschutzrelevanter Auswirkungen erneuerbarer Energien, Abschlussbericht des F+E-Vorhabens (FKZ 806 82 110) „Naturschutzrelevanz raumbedeutsamer Auswirkungen der Energiewende“. Bonn, Bad Godesberg.
- Micheel, H.-G. (2010): Quantitative empirische Sozialforschung. München, Basel.
- Miehling, A. (2006): Zukunftsfähige Energietechnologien für ein künftiges Energiesystem – ihre Bedeutung für die Regionalentwicklung am Beispiel der Energieregion Nürnberg. Erlangen.

- Mielke, B. (1996): Räumliche Steuerung bei der Planung von Windenergie-Anlagen, Berücksichtigung von Naturhaushalt und Landschaftsbild, in: Naturschutz und Landschaftsplanung, 1996, H. 4, S. 101-107.
- Mittelböck, M., Biberacher, M., Prinz, Th., Rieder, W., Strobl, J., Zocher, D., Blaschke, Th., Brunner-Maresch, B., Griesebner, G. & Pospischil, W. (2006): Virtuelle Kraftwerke für Autarke Regionen. Wien. – Web: http://www.nachhaltigwirtschaften.at/nw_pdf/0658_virtuelle_kw_autarke_regionen.pdf (Abruf am 01.03.2011)
- Möller, J. (2004): Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung erneuerbarer Energieträger am Beispiel des Landes Brandenburg. Cottbus. – Web: http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=971436673&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=971436673.pdf (Abruf am 23.03.2011).
- Moriarty, P. & Honnery, D. (2009): What energy levels can the Earth sustain?, in: Energy Policy, 2009, S. 2469-2474.
- Müller, F. (2006): Erdölwirtschaft im Kaspischen Raum, Ressourcen, Erschließung, Unternehmensstrategien, in: Geographische Rundschau, 2006, H. 3, S. 50-56.
- Musiol, F. (2006): Räumliche Dimension der Solarenergienutzung und Auswirkung aus naturschutzfachlicher Sicht, in: Deutscher Rat für Landschaftspflege e.V. (DRL) (Hrsg.) (2006): Die Auswirkungen erneuerbarer Energien auf Natur und Landschaft. Meckenheim, S. 116-117.
- Mußler, P. (2008): Standortfaktoren für den Ausbau der Photovoltaik in Bayern: Eine Analyse der politischen Steuerungsinstrumente im Mehrebenensystem. Stuttgart.
- Neukirchen B. (2004): Quantensprung oder Störenfried? Windkraft vor der Küste, in: Ökologisches Wirtschaften, 2004, H. 5, S. 17-18.
- Nissen, F. (2007): Nachhaltigkeit, Kapitalismus und Demokratie, über die politischen und ökonomischen Realisierungsbedingungen einer nachhaltigen Entwicklung. Hamburg.
- Nitsch, J., Nast, M., Pehnt, M., Trieb, F., Rösch, Ch. & Kopfmüller, J. (2001): Schlüsseltechnologie Regenerative Energien, Teilbericht im Rahmen des HGF-Projektes „Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland. Stuttgart, Karlsruhe. – Web: http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/HGF-Text_TeilA.pdf (Abruf am 23.03.2011).
- Nitsch, J. & Rösch, Ch. (2001): Perspektiven für die Nutzung regenerativer Energien, in: Grundwald, A., Coenen, R., Nitsch, J., Sydow, A. & Wiedemann, P. (Hrsg.) (2001): Forschungswerkstatt Nachhaltigkeit, Wege zur Diagnose und Therapie von Nachhaltigkeitsdefiziten. Berlin, S. 291-323.
- Nohl, W. (2001): Ästhetisches Erlebnis von Windkraftanlagen in der Landschaft, empirische Untersuchungen mit studentischen Gruppen, in: Naturschutz und Landschaftsplanung, 2001, 33, H. 12, S. 365-372.
- Ohlhorst, D. (2006): Windenergie – eine Innovationsbiographie aus interdisziplinärer Perspektive, in: Bechberger, M. & Reiche, D. (Hrsg.) (2006): Ökologische Transformation der Energiewirtschaft, Erfolgsbedingungen und Restriktionen. Berlin, S. 101-118.
- Oppermann, B. (2005): Mediation, in: Ritter, E.H. (Hrsg.) (2005): Handwörterbuch der Raumordnung. Hannover, Braunschweig. (ARL: Akademie für Raumforschung und Landesplanung), S. 631-634.
- Ott, K. (2006): „Friendly Fire“, Bemerkungen zum integrativen Konzept nachhaltiger Entwicklung, in: Kopfmüller, J. (Hrsg.) (2006): Ein Konzept auf dem Prüfstand, das integrative Nachhaltigkeitskonzept in der Forschungspraxis. Berlin, S. 63-81.

- Ott, K. (2009): Leitlinien der starken Nachhaltigkeit, ein Vorschlag zur Einbettung des Drei-Säulen-Modells, in: GAIA, 2009, H. 1, S. 25-28.
- Ott, K. & Döring, R. (2004): Theorie und Praxis starker Nachhaltigkeit. Marburg.
- Pachauri, R. & Reisinger, A. (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. Valencia.
- Pachner, H., Kersting, M.O., Samain, M. (2002): Die Erdölwirtschaft Venezuelas, in: Geographische Rundschau, 2002, S. 58-64.
- Paier, D. (2010): Quantitative Sozialforschung, eine Einführung. Wien.
- Palmer, B. (2010): Tübingen macht blau – Erfolgsstrategien für eine gesamtstädtische Klimakampagne, in: Informationen zur Raumentwicklung, 2010, H. 12, S. 919-927.
- Patlitzianas, K.D., Doukas, H., Kagiannas, A.G. & Psarras, J. (2008): Sustainable energy policy indicators: Review and recommendations, in: Renewable Energy, 2008, 33, S. 966-973.
- Petrovic, T.J. & Wagner, H.-J. (2005): Nachhaltigkeit am Beispiel regenerativer Energiesysteme zur Stromerzeugung. Bochum.
- Petrovic, T.J. & Wagner, H.-J. (2006): Nachhaltigkeit am Beispiel regenerativer Energiesysteme zur Stromerzeugung - Anhang. Bochum.
- Piepjohn, K. (2011): Vorkommen und Potenziale geologischer Ressourcen in der Arktis, in: Geographische Rundschau, 2011, H. 12, S. 34-39.
- Plieninger, T., Bens, O. & Hüttl, R.F. (2006): Bioenergie-Nutzung und Kulturlandschaftsentwicklung – Kompatibilitäten, Synergien, Unverträglichkeiten, in: Deutscher Rat für Landschaftspflege e.V. (DRL) (Hrsg.) (2006): Die Auswirkungen erneuerbarer Energien auf Natur und Landschaft. Meckenheim, S. 81-87.
- Porsche, L. (2010): Stadtentwicklung voller erneuerbarer Energie, in: Informationen zur Raumentwicklung, 2010, H. 9, S. 665-673.
- Prinz, Th., Biberacher, M., Gadocha, S., Mittelböck, M., Schardinger, I., Zocher, D., Riedler, W., Strasser, H. Fackler, A., Dorfinger, N. & Obersteiner, M. (2009): Energie und Raumentwicklung, räumliche Potenziale erneuerbarer Energieträger. Wien.
- Quennet-Thielen (1996): Nachhaltige Entwicklung: Ein Begriff als Ressource der politischen Neuorientierung, in: Kastenholz, H.G., Erdmann, K.-H. & Wolff, M. (Hrsg.) (1996): Nachhaltige Entwicklung, Zukunftschancen für Mensch und Umwelt. Berlin, Heidelberg, S. 9-21.
- Quicker, P. & Faulstich, M. (2007): Technologische Aspekte der Energiegewinnung aus Biomasse, in: Bayerische Akademie der Wissenschaften (Hrsg.) (2007): Energie aus Biomasse. Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Band 33. München, S. 39-58.
- Rahmstorf, S. & Schellnhuber, H.J. (2006): Der Klimawandel. München.
- Rebhan, E. (2002): Prinzipielles zur Energie, zu ihren Formen, ihrer Umformung und Nutzung, in: Rebhan, E. (Hrsg.) (2002): Energiehandbuch, Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie. Berlin, Heidelberg, S. 1-65.
- Reinhardt, G., Gärtner, S. & Pehnt, M. (2005): Flächen- und Nutzungskonkurrenzen in der Biomassenutzung, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 2006, Jg. 55, H. 6, S. 410-415.
- Rempel, H. (2008): Globale Verfügbarkeit nicht-erneuerbarer Energierohstoffe, in: Geographische Rundschau, 2008, Jg. 60, H. 1, S. 22-31.

- Renn, O. (1996): Ökologisch denken – sozial handeln: Die Realisierbarkeit einer nachhaltigen Entwicklung und die Rolle der Kultur- und Sozialwissenschaften, in: Kastenholz, H.G., Erdmann, K.-H. & Wolff, M. (Hrsg.) (1996): Nachhaltige Entwicklung, Zukunftschancen für Mensch und Umwelt. Berlin, Heidelberg, S. 79-117.
- Rochlitz, J. (1998): Gefahr der Relativierung, beschreiben die ökonomischen Regeln der Enquete-Kommission nachhaltiges Wirtschaften?, in: Ökologisches Wirtschaften, 1998, H. 6, S. 14-15.
- Rode, M. & Schlegelmilch, S. (2006): Räumliche Dimension und Auswirkungen des Biomasseanbaus aus landschaftspflegerischer Sicht, in: Deutscher Rat für Landschaftspflege e.V. (DRL) (Hrsg.) (2006): Die Auswirkungen erneuerbarer Energien auf Natur und Landschaft. Meckenheim, S. 58-66.
- Rogall, H. (2008): Essentiales für eine nachhaltige Energie- und Klimaschutzpolitik. Working Paper of the Institute of Management Berlin at the Berlin School of Economics (FHW Berlin), Paper No. 38, 05/2008.
- Rudenko, L. (1993): Das Kernkraftwerksunglück von Tschernobyl, geographische Aspekte der Folgen in der Ukraine, in: Europa Regional, 1993, H. 1, S. 31-37.
- Ruschkowski, von E. (2002): Lokale Agenda 21 in Deutschland – eine Bilanz, in: APUZ, 2002, H. 31-32, S. 17-24.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (Hrsg.) (1994): Umweltgutachten 1994, für eine dauerhaft-umweltgerechte Entwicklung.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (Hrsg.) (2011): Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung, Sondergutachten. – Web: http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2011_Sondergutachten_100Prozent_Erneuerbare.pdf?__blob=publicationFile (Abruf am 21.03.2011).
- Sauer, H.D. (2002): Das Drei-Schluchten-Projekt: Jahrhundertwerk oder Größenwahn?, in: Meyer, G., Pütz, R. & Thimm, A. (Hrsg.) (2002): Wasserkonflikt in der Dritten Welt. Mainz, S. 147-170.
- Schäfer, M. (2008): Wissenschaft, die sich den Herausforderungen der Zukunft stellt: Charakteristika der Nachhaltigkeitsforschung, in: Amelung, N., Mayer-Scholl, B., Schäfer, M. & Weber, J. (Hrsg.) (2008): Einstig in Nachhaltige Entwicklung. Frankfurt am Main, S. 21-37.
- Schaller, J., Bäumer, O., Michalk, J., Gehrke, Th., Qual, W. & Mack, A. (2004): Gutachten über raumbedeutsame Standorte für Windenergieanlagen in der Region Donau-Iller. Kranzberg, Wiesbaden.
- Schardinger, I., Botzenhart, F., Hamacher, Th. & Biberacher, M. (2010): Ansätze einer räumlichen Optimierung regionaler Energiesysteme, in: Strobl, J., Blaschke, Th. & Griesebner, G. (Hrsg.) (2010): Angewandte Geoinformatik 2010, Beiträge zum 22. AGIT-Symposium Salzburg. Berlin, S. 948-953.
- Scheer, H. (2005): Energieautonomie, eine neue Politik für erneuerbare Energien. München.
- Scherm, K. (o.J.): GIS – gestützte Ermittlung des nutzbaren Biomassepotenzials zur Biogasgewinnung im Landkreis Straubing-Bogen. München.
- Schidler, S. (2006): Interdisziplinäre Bildung von Nachhaltigkeitskriterien, Fallbeispiel Nachwachsende Rohstoffe – Grüne Bioraffinerie, in: Kopfmüller, J. (Hrsg.) (2006): Ein Konzept auf dem Prüfstand, das interdisziplinäre Nachhaltigkeitskonzept in der Forschungspraxis. Berlin, S. 157-169.
- Schliephake, K. (2005): Internationale Energiewirtschaft – Messgrößen und Daten, in: Schenk, W. & Schliephake, K. (Hrsg.) (2005): Allgemeine Anthropogeographie. Gotha, S. 439-444.
- Schliephake, K. (2008): Energiewirtschaft weltweit – ein Ausblick auf Potenziale und Engpässe, in: Schliephake, K. & Schulze, B. (Hrsg.) (2008): Energie – Globale Probleme in lokaler Perspektive. Würzburg, S. 4-12.

- Schmidt, R., Wiese, A. & Bonneschky, A. (2008): Energie – Zusammenspiel von Wind- und Wasserkraft, in: Bauingenieur, 2008, Band 83/7-8, S. 333-342.
- Schneeweiß, Ch. (1991): Planung 1, systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen. Berlin, Heidelberg, New York.
- Schneider, C. & Schönbein, J. (2003): Die Schneedecke – Segen für Natur und Wintersport, in: Leibnitz-Institut für Länderkunde (Hrsg.) (2003): Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, Klima, Pflanzen- und Tierwelt, Band 3. München, S. 48-49.
- Schönwandt, W. (2006): Handlungsansätze und Planung, in: Schönwandt, W. & Jung, W. (Hrsg.) (2006): Ausgewählte Methoden und Instrumente in der räumlichen Planung, kritische Sondierung als Beitrag zur Diskussion zwischen Planungswissenschaft und –praxis. Hannover, S. 26-34.
- Schönwiese, Ch. (2005): Klimaänderung im Industriezeitalter – Beobachtungen, Ursachen und Signale, in: Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft (Hrsg.) (2005): Wetterkatastrophen und Klimawandel, sind wir noch zu retten?. München, S. 32-41.
- Schönwiese, Ch. (2009): Klimawandel im Industriezeitalter: Fakten und Interpretation der Vergangenheit, in: Geographische Rundschau, 2009, H.9, S. 4-11.
- Schulz, R. (2006): Die Akzeptanz der Kernenergie in Deutschland in längerfristiger Perspektive, in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 2006, H. 10, S. 34-37.
- Schüssler, F. (2008): Energy partnership Africa – Europe, concentrated solar power between technical realization and ethic responsibility, in: ERDKUNDE, 2008, Vol. 62, No. 3, S. 221-230.
- Schüssler, F. (2009): A historical review of energy topics in german geographical literature from 1950 to 2008, in: ERDKUNDE, 2009, Vol. 63, No. 3, S. 269-282.
- Schüssler, F. (2010): Geographische Energieforschung im Spannungsfeld zwischen Ökonomie, Ökologie und Versorgungssicherheit, Vorwort zum Tagungsband, in: Schüssler, F. (Hrsg.) (2010): Geographische Energieforschung. Frankfurt am Main, S. V-VII.
- Schwahn, Ch. (2000): Zur landschaftspflegerischen Begleitplanung für Windenergieprojekte im Mittelgebirgsraum, in: Natur und Landschaft, 2000, 75. Jg. H. 2, S. 59-63.
- Sebaldt, M. (2002): 'Von den Zinsen leben, nicht von der Substanz': Problemhintergrund und Entwicklung der Idee der Nachhaltigkeit, in: Sebaldt, M. (Hrsg.) (2002): Sustainable Development – Utopie oder realistische Vision? Karriere und Zukunft einer entwicklungspolitischen Strategie. Hamburg, S. 23-48.
- Sims, R.E.H., Schock, R.N., Adegbululge, A., Fenhann, J., Konstantinaviciute, I., Moomaw, W., Nimir, H.B., Schlamadinger, B., Torres-Martínez, J., Turner, C., Uchiyama, Y., Vuori, S.J.V., Wamukonya, N. & Zhang, X. (2007): Energy supply, in: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R. & Meyer, L.A. (2007): Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York, S. 251-322.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge, New York.
- Solow, R.M. (1974): The economics of resources or the resources of economics, in: The American Economic Review, 1974, Vol. 64, S. 1-14.
- Spehl, H. (2005): Nachhaltige Raumentwicklung, in: Ritter, E.H. (Hrsg.) (2005): Handwörterbuch der Raumordnung. Hannover, Braunschweig. (ARL: Akademie für Raumforschung und Landesplanung), S. 679-685.

- Staiß, F. (2007): Jahrbuch Erneuerbare Energien. Radebeul.
- Steger, U., Achterberg, W., Blok, K., Bode, H., Frenz, W., Gather, C., Hanekamp, G., Imboden, D., Jahnke, M., Kost, M., Kurz, R., Nutzinger, H.G. & Ziesemer, Th. (2002): Nachhaltige Entwicklung und Innovation im Energiebereich. Berlin, Heidelberg, New York.
- Steinhauer, I. (2006): Offshore-Windenergie: Umweltpolitische Steuerung zur Minimierung von Interessenkonflikten und Stärkung der Akzeptanz, in: Bechberger, M. & Reiche, D. (Hrsg.) (2006): Ökologische Transformation der Energiewirtschaft, Erfolgsbedingungen und Restriktionen. Berlin, S. 41-59.
- Stelzer, V., Rösch, Ch. & Raab, K. (2006): Regionalstudie zur Nachhaltigkeit der Energiegewinnung aus dem Grünland, erste Ergebnisse, in: Kopfmüller, J. (Hrsg.) (2006a): Ein Konzept auf dem Prüfstand, das integrative Nachhaltigkeitskonzept in der Forschungspraxis. Berlin, S. 235-249.
- Stern, N. (2006): The Economics of Climate Change, the Stern Review. Cambridge.
- Strahler, A.H. & Strahler, A.N. (2002) Physische Geographie. Stuttgart.
- Strassert, G. (2005): Entscheidungsverfahren, multikriterielle, in: Ritter, E.H. (Hrsg.) (2005): Handwörterbuch der Raumordnung. Hannover, Braunschweig. (ARL: Akademie für Raumforschung und Landesplanung), S. 213-220.
- Streffler, Ch., Gethmann, C.F., Heinloth, K., Rumpff, K. & Witt, A. (2005): Ethische Probleme einer langfristigen globalen Energieversorgung. Berlin.
- Strobl, J. (2006): Energie wird räumlicher, in: GeoBIT, 2006, H. 1/2, S. 16-18.
- Struck, E. (2002): Das südostanatolienprojekt (GAP, Türkei): Idee und Wirklichkeit eines Wassernutzungs- und Entwicklungsprojektes, in: Meyer, G., Pütz, R. & Thimm, A. (Hrsg.) (2002): Wasserkonflikt in der Dritten Welt. Mainz, S. 125-145.
- Struck, E. (2003): Die Türkei und das Wasser, Nachbarschaftskonflikte an Euphrat und Tigris, in: Geographische Rundschau, 2003, H. 4, S. 18-25.
- Tischer, M., Stöhr, M., Lurz, M. & Karg, L. (2006): Auf dem Weg zur 100% Region, Handbuch für eine nachhaltige Energieversorgung von Regionen. München.
- Thrän, D. (2007): Perspektiven und Szenarien für eine nachhaltige Biomassenutzung, in: Bayerische Akademie der Wissenschaften (Hrsg.) (2007): Energie aus Biomasse. Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Band 33. München, S. 59-68.
- Tremmel, J. (2003): Nachhaltigkeit als politische und analytische Kategorie, der deutsche Diskurs um nachhaltige Entwicklung im Spiegel der Interessen der Akteure. München.
- Twele, J., Heilmann, C. & Schubert, M. (2007): Konstruktiver Aufbau von Windkraftanlagen, in: Gasch, R. & Twele, J. (Hrsg.) (2007): Windkraftanlagen, Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb. Wiesbaden.
- Uhrmeister, B. (2002): Der Endausbau unserer Flüsse droht – Kritische Gedanken zur Wasserkraft!, in: Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt, 2002, 67. Jg., S. 241-244.
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (1997): VDI-Richtlinien: Kumulierter Energieaufwand, Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden. Düsseldorf.
- Voß, A. (2000): Nachhaltige Entwicklung, effiziente Ressourcennutzung und Energiepreise, in: Zeitschrift für angewandte Umweltforschung, 2000, H.3/4, S. 265-280.
- Voß, A. (2004): Energiewende: Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung?, in: Grewe, J., Flandrich, D. & Ellwanger, N. (Hrsg.) (2004): Energiewirtschaft im Wandel: Dieter Schmitt zum 65. Geburtstag. Münster, S. 241-258.

- Wagner, H.-J. (2007): Was sind die Energien des 21. Jahrhunderts? Der Wettlauf um die Lagerstätten. Frankfurt am Main.
- Walker, G., Devine-Wright, P., Barnett, J., Burningham, K., Cass, N., Devine-Wright, H., Speller, G., Barton, J., Evans, B., Heath, Y., Infield, D., Parks, J. & Theobald, K. (2011): Symmetries, expectations, dynamics and context: A framework for understanding public engagement with renewable energy projects, in: Devine-Wright, P. (Hrsg.): Renewable energy and the public: from NIMBY to participation. London, Washington, S. 1-14.
- Widmann, B. (2007): Biomasse für die Erzeugung von Wärme, Kraftstoffen und Strom, in: Bayerische Akademie der Wissenschaften (Hrsg.) (2007): Energie aus Biomasse. Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Band 33. München, S. 27-38.
- Wiechmann, T. (2004): Ansätze nachhaltiger Regionalentwicklung, in: Leibnitz-Institut für Länderkunde (Hrsg.) (2004): Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, Unternehmen und Märkte, Band 8. München, S. 158-159.
- Wieser, J. (2005): Windenergie und Flächennutzungsplanung, die Ausgestaltung der restriktiven Planvorbehaltsregelung zur Standortsteuerung gemäß § 35 Abs. 3 S. 3 BauGB, in: Naturschutz und Landschaftsplanung, 2005, Jg. 35, H. 12, S. 364-368.
- Wiegand, K. (2007): Handeln aus Einsicht und Verantwortung (Vorwort), in: Jill, Jäger (2007): Was verträgt unsere Erde noch? Wege in die Nachhaltigkeit. Frankfurt am Main, S. 9-19.
- Wiehe, J. & Rode, M. (2007): Auswirkungen des Anbaus von Pflanzen zur Energiegewinnung auf den Naturhaushalt und andere Raumnutzungen, in: Bayerische Akademie der Wissenschaften (Hrsg.) (2007): Energie aus Biomasse. Rundgespräche der Kommission für Ökologie, Band 33. München, S. 101-113.
- Wietschel, M., Enzensberger, N. & Dreher, M. (2002): Zur Gestaltung einer Nachhaltigen Energieversorgung, in: Wietschel, M., Fichtner, W. & Rentz, O. (Hrsg.) (2002): Regenerative Energieträger, der Beitrag und die Förderung regenerativer Energieträger im Rahmen einer Nachhaltigen Energieversorgung. Landsberg, S. 4-29.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (1993): Welt im Wandel: Grundstruktur globaler Mensch-Umwelt-Beziehungen, Jahresgutachten 1993. Bonn.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (1998): Welt im Wandel: Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken, Jahresgutachten 1998. Berlin, Heidelberg, New York.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2003): Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit. Berlin, Heidelberg, New York.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2009a): Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz. Berlin.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2009b): Welt im Wandel: Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung. Berlin.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2010): Klimapolitik nach Kopenhagen, Auf drei Ebenen zum Erfolg (Politikpapier Nr. 6). – Web: http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/politikpapiere/pp2010-pp6/wbgu_pp2010.pdf (Abruf am 15.03.2011).
- Wöhe, G. & Döring, U. (2005): Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. München.
- Zhao, L., Feng, L. & Hall, Ch.A.S. (2009): Is peakoil coming?, in: Energy Policy, 2009, S. 2136-2138.

Zimmermann, H.-J. & Gutsche, L. (1991): Multi-Criteria Analyse, Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen. Berlin, Heidelberg, New York.

Zink, R. (2010): Einbindung von GIS in einen nachhaltigen Planungsprozess von Photovoltaik-Freiflächenanlagen auf kommunaler Ebene, in: Strobl, J., Blaschke, Th. & Griesebner, G. (Hrsg.) (2010): Angewandte Geoinformatik 2010, Beiträge zum 22. AGIT-Symposium Salzburg. Berlin, S. 954-963.

Zink, R., Struck, E., Scheffer, J., Lindinger, V., Klueter, Ch. & Diepold, F. (2011): Regionalstudie Energiespeicher Riedl, Evaluierung von erwarteten Chancen und Risiken durch den Bau des Energiespeichers seitens der Landwirte, der Anbieter im Bereich Tourismus und der betroffenen Bevölkerung. Passau.

Internetquellen

ARGE Monitoring PV-Anlagen (Hrsg.) (2007): Leitfaden zur Berücksichtigung von Umweltbelangen bei der Planung von PV-Freiflächenanlagen. – Web: http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/pv_leitfaden.pdf (Abruf am 21.04.2011).

Baranek, E., Walk, H., Fischer, C., Dietz, K., Hoffmann, E., Gruner, S., Jonuschat, H., Kruse, S., Schlussmeier, B. & Scurrill, B. (2005): Partizipation und Nachhaltigkeit, Reflektionen über Zusammenhänge und Vereinbarkeiten, Diskussionspapier. – Web: [http://www.sozial-oekologische-forschung.org/_media/Q-AG_Partizipation-Diskussionspapier3_05\(1\).pdf](http://www.sozial-oekologische-forschung.org/_media/Q-AG_Partizipation-Diskussionspapier3_05(1).pdf) (Abruf am 22.03.2011).

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (Hrsg.) (2005): Schutzgebietstypen des Naturschutzes und der Landschaftspflege in Bayern. Web: http://www.lfu.bayern.de/natur/fachinformationen/schutzgebiete_einfuehrung/doc/schutzgebietstypen_bayern.pdf (Abruf am 16.12.2011)

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (Hrsg.) (2006): Tschernobyl – Bayern 20 Jahre danach. Augsburg. – Web: <http://www.lfu.bayern.de/strahlung/tschernobyl/doc/tschernobyl.pdf> (Abruf am 12.04.2011).

Bayerisches Staatsministerium des Inneren (2009): Freiflächen-Photovoltaikanlagen. – Web: http://www.innenministerium.bayern.de/imperia/md/content/stmi/bauen/rechtundtechnikundbauplanung/_baurecht/rundschreiben/photovoltaik.pdf (Abruf am 21.04.2011).

Bayerisches Staatsministerium des Inneren / Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst / Bayerisches Staatsministerium der Finanzen, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie / Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit & Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.) (2011): Hinweise zur Planung und Genehmigung von Windkraftanlagen (Windenergieerlass). – Web: http://www.stmug.bayern.de/umwelt/oekoenergie/windenergie/doc/windenergie_erlass.pdf (Abruf am 17.02.2012).

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (StMWIVT) (Hrsg.) (2006): Landesentwicklungsprogramm Bayern 2006. München. – Web: <http://www.landentwicklung.bayern.de/uploads/media/s014.pdf> (Abruf am 01.03.2011).

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (StMWIVT) (Hrsg.) (2010a): Bayerischer Geothermieatlas, hydrothermale Energiegewinnung. – Web: http://www.verwaltung.bayern.de/Anlage4003942/Bayerischer_Geothermieatlas2010neu.pdf (Abruf am 12.04.2011).

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (StMWIVT) (Hrsg.) (2010b): Bayerischer Windatlas. München. Web: <http://www.verwaltung.bayern.de/egov-portal/xview/Anlage/4015428/BayerischerWindatlas.pdf> (Abruf am 12.04.2011).

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie (StMWVVT) (Hrsg.) (2001b): Wirtschaftlichkeit der Windkraftnutzung in Bayern. München. – Web: Link nicht mehr gültig (Abruf am 24.06.2008).

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie (StMWVVT) (Hrsg.) (2002): Rohstoffe in Bayern, Situation, Prognose, Programm. München. – Web: http://www.stmwivt.bayern.de/fileadmin/Web-Dateien/Dokumente/energie-undrohstoffe/Rohstoffe_in_Bayern.pdf (Abruf am 12.04.2011).

Bayerische Staatsregierung (2011): Bayerisches Energiekonzept „Energie innovativ“. – Web: www.bayern.de/Anlage10344945/BayerischesEnergiekonzeptEnergieinnovativ.pdf (Abruf am 18.12.2011).

BINE Informationsdienst (2010): Recycling von Photovoltaik-Modulen. – Web: http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2010/Projektinfo_02-2010/projekt_0210_internetx.pdf (Abruf am 14.04.2011).

Bohenschäfer, W., Hirschhausen, von Ch., Ströbele, W., Treusch, J. & Wagner, U. (2005): Nachhaltige Energiepolitik für den Standort Deutschland, Anforderungen an die zukünftige Energiepolitik. Berlin. – Web: http://www.tu-dresden.de/wwbwleeg/publications/Bohenschaefer_Hirschhausen_Stoebele_etal_2005_BDI_Studie.pdf (Abruf am 16.03.2011).

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hrsg.) (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland, Untersuchungen und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. Hannover, Berlin. – Web: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/B/bgr-studie-kurzfassung.property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf> (Abruf am 12.04.2011).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hrsg.) (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. – Web: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/sicherheitsanforderungen_endlagerung_bf.pdf (Abruf am 12.04.2011).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hrsg.) (2011a): Kommunaler Klimaschutz, Möglichkeiten für die Kommunen. Berlin. – Web: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/kommunaler_klimaschutz_bf.pdf (Abruf am 22.04.2011).

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) & Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hrsg.) (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin. – Web: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung.pdf (Abruf am 12.04.2011).

Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI) (Hrsg.) (2007): Jahresbericht 2006/2007. – Web: http://www.bdi-online.de/BDIONLINE_INEAASP/iFILE.dll/X427F633AEA244A55886A1B350644BEC4/2F252102116711D5A9C0009027D62C80/PDF/Jahresbericht.PDF (Abruf am 16.03.2011).

Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI) (Hrsg.) (2009): Jahresbericht 2009. – Web: http://www.bdi.eu/download_content/Publikation_BDI-Jahresbericht_2009.pdf (Abruf am 16.03.2011).

- Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE) (Hrsg.) (2009): Repowering von Windenergieanlagen, Effizienz, Klimaschutz, regionale Wertschöpfung. – Web: http://www.windenergie.de/sites/default/files/download/publication/repowering-von-windenergieanlagen/bwe_repowering-broschuere_05-2011.pdf (Abruf am 12.04.2011).
- Czakainski, M., Kinzelmann, Th., Pretsch, G. & Wasgindt, V. (2007): Der Reaktorunfall in Tschernobyl, Unfallursachen, Unfallfolgen und deren Bewältigung, Sicherung und Entsorgung des Kraftwerks Tschernobyl. Berlin. (Hrsg. Informationskreis KernEnergie). – Web: http://www.kernfragen.de/kernfragen/documentpool/025reaktorunfall_tschernobyl2007.pdf (Abruf am 12.04.2011).
- Dällenbach, F. & Schaffner, B. (2005): Alpine Windharvest, GIS Analysis Methodology. Bern. (Alpine Windharvest Report Series published by the Alpine Windharvest Partnership Network Report No. 7-3). – Web: http://www.alpine-space.org/uploads/media/AWH_WP7_Report_gis_methodology_18P_EN.pdf (Abruf am 12.05.2011).
- Deutscher Städte- und Gemeindebund (DStGB) (Hrsg.) (2009): Repowering von Windenergieanlagen – Kommunale Handlungsmöglichkeiten, Ersetzen von Altanlagen durch moderne Windenergieanlagen als Chancen für die gemeindliche Entwicklung (DStGB Dokumentation N° 94). Berlin. – Web: http://www.stmwivt.bayern.de/fileadmin/Web-Dateien/Dokumente/energie-und-rohstoffe/Rohstoffe_in_Bayern.pdf (Abruf am 12.04.2011).
- Döring, R. (2004): Wie stark ist schwache, wie schwach starke Nachhaltigkeit?. Diskussionspapier 08/2004. – Web: http://www.rs.uni-greifswald.de/fileadmin/mediapool/Fakult_t/Lenz/Diskussionspapiere/08_2004.pdf (Abruf am 16.03.2011).
- Ehrenreich, M., Frühwald, O., Praßl, H. & Truhetz, H. (2005): Alpine Windharvest, GIS analyses 'Aineck' and 'Brenner', Austria and Italy. Alpine Windharvest Report Series published by the Alpine Windharvest Partnership Network, Report No. 7-4. – Web: http://stratus.meteotest.ch/windharvest/report_gis_austria_italy.pdf (Abruf am 12.04.2011).
- Energie-Spiegel, Facts für die Energiepolitik von Morgen (2000): Nachhaltigkeit ist messbar. Nr. 3, September 2000. – Web: <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/eserv/eth:22990/eth-22990-03.pdf> (Abruf am 23.03.2011).
- Energie-Spiegel, Facts für die Energiepolitik von Morgen (2010): Nachhaltige Elektrizität, Wunschdenken oder bald Realität? Nr. 20, Juni 2010. – Web: http://gabe.web.psi.ch/pdfs/Energiespiegel_Nr20_072010_d.pdf (Abruf am 23.03.2011).
- E.ON Kernkraft GmbH (Hrsg.) (2005): Isar, Informationen zum Kernkraftwerk. Hannover. – Web: http://www.eon-kernkraft.com/pages/ekk_de/Standorte/_documents/Info_Standort_KKI.pdf (Abruf am 12.04.2011).
- E.ON Wasserkraft GmbH & Bayerische Elektrizitätswerke GmbH (Hrsg.) (2009): Potenzialstudie „Ausbaupotenziale Wasserkraft in Bayern“. – Web: <http://www.lfu.bayern.de/wasser/wasserkraft/anlagenstatistik/doc/potentialstudie.pdf> (Abruf am 26.04.2011).
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA) (Hrsg.) (2009): Set for 2020, Solar Photovoltaic Electricity: A mainstream power source in Europe by 2020. – Web: <http://www.setfor2020.eu/uploads/EPIA%20SET%20For%202020%20-%20copyright%20EPIA%202010.pdf> (Abruf am 14.04.2011).
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (Hrsg.) (2009): Biogas-Messprogramm II, 61 Biogasanlagen im Vergleich. Gülzow. – Web: groengas.nl/wp-content/uploads/2011/09/messdaten-biogasmessprogramm.pdf (Abruf am 12.04.2011).

- Fritsche, U. R. & Schmidt, K. (2008): Handbuch zu GEMIS 4.5. Darmstadt. – Web: http://www.oeko.de/service/gemis/files/doku/g45_handbuch.pdf (Abruf am 12.04.2011).
- Hartmuth, G. (2004): Nachhaltige Entwicklung im lokalen Kontext – Schritte zur Entwicklung eines kommunalen Nachhaltigkeits-Indikatorensystems. (UFZ-Diskussionspapiere). – Web: <http://www.ufz.de/data/ufz-disk6-20041406.pdf> (Abruf am 24.03.2011).
- Hauff, V. (2003): Nachhaltigkeit – Verantwortung für die Zukunft. Vortrag im Rahmen der 2. Heidelberger Agenda-Tage am 15.09.2003 in Heidelberg. – Web: www.nachhaltigkeitsrat.de/service/download/pdf/Vortrag_Hauff_Agenda-Tage_15-09-03.pdf (Abruf am 29.08.2007, Link heute nicht mehr gültig).
- Hirschberg, S., Bauer, Ch., Burgherr, P., Dones, R., Simons, A., Schenler, W., Bachmann, T. & Gallego Carrera, D. (2008): Deliverable n° D3.2. – RS 2b, „Final set of sustainability criteria and indicators for assessment of electricity supply options“. – Web: http://gabe.web.psi.ch/pdfs/Needs/NEEDS_RS2b_D3-2.pdf (Abruf am 22.03.2011).
- Hirschberg, S. & Voß, A. (1998): Nachhaltigkeit und Energie: Anforderungen der Umwelt. – Web: http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/1999/460/pdf/460_1.pdf (Abruf am 16.03.2011).
- Horlacher, H.-B. (2003): Globale Potenziale der Wasserkraft (Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten 2003 „Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit“. Berlin, Heidelberg. – Web: http://www.wbgu.de/fileadmin/templates/dateien/veroeffentlichungen/hauptgutachten/jg2003/wbgu_jg2003_ex03.pdf (Abruf am 12.04.2011).
- Ingenieurbüro Floecksmühle, Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen der Universität Stuttgart (IHS), Hydrotec Ing.-Ges. für Wasser und Umwelt mbH, Fichtner GmbH & Co. KG (2010): Potenzialermittlung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung in Deutschland als Grundlage für die Entwicklung einer geeigneten Ausbaustrategie. – Web: http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/potential_wasserkraft_lang_bf.pdf (Abruf am 28.05.2011).
- International Energy Agency (IEA) (2010b): Energy poverty, how to make modern energy access universal?. – Web: http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2010/weo2010_poverty.pdf (Abruf am 13.12.2011).
- Kaatsch, P., Spix, C., Schmiedel, S., Schulze-Rath, R., Mergentahler, A. & Blettner, M. (2007): Epidemiologische Studie zu Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken (KiKK-Studie), Vorhaben 3602S04334. – Web: http://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-20100317939/4/BfS_2007_KiKK-Studie.pdf (Abruf am 12.04.2011).
- Lehr, U., Lutz, C., Distelkamp, M., Ulrich, P., Khoroshun, O., Edler, D., O’Sullivan, M., Nitsch J., Nienhaus, K., Breitschopf, B., Bickel, P. & Ottmüller M. (2011): Erneuerbar beschäftigt! Kurz- und langfristige Wirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien auf den deutschen Arbeitsmarkt. (Hrsg. BMU). – Web: http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_erneuerbar_beschaeftigt_bf.pdf (Abruf am 18.12.2011).
- Lindauer, E., Apostolakis, G., Birkhofer, A., Carnino, A., Chevallon, J.-C., Fischer, H.D., Gustafsson, B., Hacken, W., Kröger, W., Pretre, S. & Tamminen, A. (2006): ILK-Stellungnahme zu den Auswirkungen des Unfalls von Tschernobyl – Eine Bestandsaufnahme nach 20 Jahren. – Web: <http://www.stmug.bayern.de/umwelt/reaktorsicherheit/ilk/doc/26.pdf> (Abruf am 12.04.2011).

- Mackensen, R., Rohrig, K. & Emanuel, H. (2008): Das regenerative Kombikraftwerk, Abschlussbericht. – Web: http://www.kombikraftwerk.de/fileadmin/downloads/2008_03_31_Ma__KombiKW_Abschlussbericht.pdf (Abruf am 16.12.2011).
- Molly, J. P. (2010): Status der Windenergienutzung in Deutschland – Stand 31.12.2010. (Hrsg. DEWI GmbH Deutsches Windenergie-Institut). – Web: http://www.dewi.de/dewi/fileadmin/pdf/publications/Statistics%20Pressemitteilungen/31.12.10/Folienansatz_2010.pdf (Abruf am 26.04.2011).
- Naturschutzbund (NABU) & Unternehmensvereinigung Solarwirtschaft (UVS) (Hrsg.) (2005): Kriterien für naturverträgliche Photovoltaik-Freiflächenanlagen. – Web: http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/kriterien_solarparks_nabu_uvs.pdf (Abruf am 21.04.2011).
- Niedersächsischer Landkreistag (NLT) (2011): Naturschutz und Windenergie, Hinweise zur Berücksichtigung des Naturschutzes und der Landschaftspflege sowie zur Durchführung der Umweltprüfung und Umweltverträglichkeitsprüfung bei Standortplanung und Zulassung von Windenergieanlagen (Stand: Januar 2011). – Web: <http://www.nlt.de> (Abruf am 12.04.2011).
- Oberschmidt, J., Geldermann, J. & Ludwig, J. (2009): Entscheidungsunterstützung zur Auswahl von Energietechnologien unter Berücksichtigung zeitlich veränderlicher Präferenzen. – Web: http://www.eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at_pages/events/iewt/iewt2009/papers/1C_4_OBERSC HMIDT_J_P.pdf (Abruf am 05.04.2011).
- Ökoinstitut e.V. (Hrsg.) (2007): Positionspapier, Anforderungen an eine künftige Endlager-Sicherheitsverordnung. Darmstadt. – Web: <http://www.oeko.de/oekodoc/599/2007-145-de.pdf> (Abruf am 12.04.2011).
- Planungsverband Donau-Wald (2011): Windkraftnutzung in der Region Donau-Wald, Sitzung des Planungsausschusses am 11. Oktober 2011, Anlage zu TOP 2. – Web: <http://www.region-donau-wald.de/rpv12/upload/Sitzungen/PA%2011.10.11/Windkraft.pdf> (Abruf am 20.10.2011).
- Pretre, S., Apostolakis, G., Birkhofer, A., Carnino, A., Eibl, J., Fischer, H.D., Gustafsson, B., Hacker, W., Kröger, W., Lindauer, E., Roos, E. & Weiß, F.P. (2004): ILK-Stellungnahme zur Bewertung der Nachhaltigkeit der Kernenergie und anderer Technologien zur Stromerzeugung. – Web: <http://www.stmug.bayern.de/umwelt/reaktorsicherheit/ilk/doc/16.pdf> (Abruf am 29.03.2011).
- Ramsar Convention Secretariat (2011): The Ramsar Convention Manual, a Guide to the Convention on Wetlands (Ramsar, Iran, 1971). Gland. – Web: <http://www.ramsar.org/pdf/lib/manual5-2001-e.pdf> (Abruf am 16.12.2011).
- Ratzbor, G., Brandt, U. & Butenschön, S. (2005): Grundlagenarbeit für eine Informationskampagne „Umwelt- und naturverträgliche Windenergienutzung in Deutschland (onshore)“, Analyseteil. – Web: [http://www.naturschutzstandards-erneuerbare-energien.de/images/literatur/DNR_Analysebericht_2005\[1\].pdf](http://www.naturschutzstandards-erneuerbare-energien.de/images/literatur/DNR_Analysebericht_2005[1].pdf) (Abruf am 12.04.2011).
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (Hrsg.) (2002): Umweltgutachten 2002, für eine neue Vorreiterrolle. – Web: http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2002_Umweltgutachten_Bundestagsdrucksache.pdf?__blob=publicationFile (Abruf am 16.03.2011).
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (Hrsg.) (2009): Weichenstellungen für eine nachhaltige Stromversorgung. – Web: http://www.umweltrat.de/cae/servlet/contentblob/581556/publicationFile/34408/2009_Thesen_Weichenstellungen_Stromversorgung_Hohmeyer.pdf (Abruf am 01.03.2011).

- Sander, K., Schilling, St., Wambach, K., Schlenker, S., Müller, A., Springer, J., Fouquet, D., Jelitte, A., Stryi-Hipp, G. & Chrometzka, Th. (2007): Studie zur Entwicklung eines Rücknahme- und Verwertungssystems für photovoltaische Produkte. – Web: http://www.pvcycle.org/fileadmin/pvcycle_docs/documents/publications/Studie_PVCycle_Download_17_de_270808.pdf (Abruf am 14.04.2011).
- Schenler, W., Hirschberg, S., Burgherr, P., Makowski, M. & Granat, J. (2009): Deliverable D10.2 – RS2b, „Final report on sustainability assessment of advances electricity supply options“. – Web: http://gabe.web.psi.ch/pdfs/Needs/NEEDS_RS2b_D10-2.pdf (Abruf am 23.03.2011).
- Schuh, H. (2001): Entscheidungsverfahren zur Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung. Dresdner Beiträge zur Betriebswirtschaftslehre Nr. 45/01. – Web: <http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/877/1004080356265-1991.pdf> (Abruf am 22.03.2011).
- Thrän, D., Bunzel, K., Viehmann, C., Büchner, D., Fischer, E., Fischer, E., Gröngroft, A., Henning, Ch., Müller-Langer, F., Oehmschen, K., Rönsch, S & Scholwin, F. (2010): Bioenergie heute und morgen – 11 Bereitstellungskonzepte, Sonderheft zum DBFZ Report. Leipzig. – Web: http://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/Userupload_Neu/bereitstellungskonzepte_dlweb.pdf (Abruf am 13.04.2011).
- United Nations (UN) (1987): Report of the World Commission on Environment and Development. – Web: <http://daccess-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N87/184/67/IMG/N8718467.pdf?OpenElement> (Abruf am 14.12.2011).
- United Nations (UN) (1998): Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. – Web: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf> (Abruf am 16.03.2011).
- United Nations (UN) (2009): The Millennium Development Goals Report 2009. New York. – Web: http://www.un.org/millenniumgoals/pdf/MDG_Report_2009_ENG.pdf (Abruf am 16.03.2011).
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2010): Report of the Conference of the Parties on its fifteenth session, held in Copenhagen from 7 to 19 December 2009. – Web: <http://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/eng/11a01.pdf> (Abruf am 15.03.2011).
- Walter, F., Gubler, F., Brodmann, U. & Heer, L. (2001): Nachhaltigkeit: Kriterien und Indikatoren für den Energiebereich. – Web: <http://www.bfe.admin.ch/dokumentation/energieforschung/index.html?lang=de&publication=7094> (Abruf am 29.03.2011).
- Weßelmann, Ch., Tromm, W., Linnemann, Th. & Koch, M.K. (2010): Kernenergie, Jahresrückblick 2009, in: BWK – Das Energie-Fachmagazin, Bd. 62 (2010) Nr. 5, S. 37-50, Hrsg. VDI - Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf. – Web: <http://www.kernenergie.de/kernenergie/documentpool/Service/bwk-kernenergie-2009.pdf> (Abruf am 12.04.2011).
- Witt, J., Henning, Ch., Rensberg, N., Schwenker, A., Scheftelowitz, M., Krautz, A., Schaubach, K., Thrän, D., Scholwin, F., Kutne, T., Hilse, A., Vetter, A., Graf, T. & Reinhold, G. (2010): Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse, Zwischenbericht. – Web: http://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/Userupload_Neu/3330002_Stromerzeugung_aus_Biomasse_3_Zwischenbericht_Kapitel_1-5_fuer_Veroeffentlichung_final.pdf (Abruf am 12.04.2011).

Statistiken, Geodaten und Karten

AG Energiebilanzen e.V. (AGEB) (2011): Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2010 nach Energieträgern. – Web: <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=1> (Abruf am 13.04.2011).

atw – International Journal for Nuclear Power (2010): Kernkraftwerke in Deutschland, Betriebsergebnisse 2009. Berlin. – Web: <http://www.kernenergie.de/kernenergie/documentpool/Service/604atw-betriebsergebnisse-kkw2010.pdf> (Abruf am 12.04.2011).

Bayerisches Landesamt für Landwirtschaft (LfL) (2011): Agrarmeteorologisches Messnetz Bayern. – Web: <http://www.lfl.bayern.de/agm/> (Abruf am 16.12.2011).

Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (2010): Netto- und Bruttostromverbrauch in Bayern nach Verbrauchergruppen (Stand 2008 und 2009). – Web: <https://www.statistikdaten.bayern.de/> (Abruf am 16.12.2011).

Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (2011a): Volkszählung und Bevölkerungsfortschreibung: Gemeinden, Bevölkerung, Stichtag (Stand 31.12.2010). – Web: <https://www.statistikdaten.bayern.de/> (Abruf am 16.12.2011).

Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (2011b): Fläche: Gemeinden, Stichtag (Stand 01.01.2010). – Web: <https://www.statistikdaten.bayern.de/> (Abruf am 16.12.2011).

Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung (2011c): Elektrizitätserzeugung der Stromerzeugungsanlagen für die allgemeine Versorgung in Bayern (Stand 2010). – Web: <https://www.statistik.bayern.de/statistik/energie/> (Abruf am 16.12.2011).

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2008): Summe der elektrischen Ausbauleistung von Wasserkraftanlagen je Gemeinde im Regierungsbezirk Niederbayern. (Mitteilung auf schriftliche Anfrage).

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2010): Naturschutzgebiete. – Web: <http://www.lfu.bayern.de/natur/daten/index.htm> (Abruf am 16.11.2010).

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) & Deutscher Wetterdienst (DWD) (2011a): Klimakarten Bayern monatliche Lufttemperatur, CD-Dom.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) & Deutscher Wetterdienst (DWD) (2011b): Klimakarten Bayern monatliche Niederschlagssumme, CD-Dom.

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) (Hrsg.) (2010): Bayerischer Agrarbericht. – Web: <http://www.agrarbericht-online.bayern.de/> (Abruf am 26.04.2011).

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (StMUG) (2011): Energie-Atlas Bayern. – Web: <http://www.energieatlas.bayern.de> (Abruf am 16.12.2011).

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (StMWIVT) (Hrsg.) (2011): Energiebilanz Bayern – Daten, Fakten, Tabellen. – Web: http://www.stmwivt.bayern.de/uploads/energiebilanz/Energiebilanz_gesamt.pdf (Abruf am 13.04.2011).

Bayerische Vermessungsverwaltung (2011): ATKIS-Basis-DLM.

Bayerische Vermessungsverwaltung (2011): Digitale Orthofotos (DOP).

- Bayerische Vermessungsverwaltung (2011): Digitale Planungskarten (DPK) (Maßstab 1:5.000).
- BP p.l.c. (2011): BP Statistical Review of the World Energy, June 2011. – Web: http://www.bp.com/assets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2011/STAGING/local_assets/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2011.pdf (Abruf am 13.12.2011).
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hrsg.) (2010): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. Hannover. – Web: http://www.bgr.bund.de/nn_322848/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie-Kurzstudie2010,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Energiestudie-Kurzstudie2010.pdf (Abruf am 15.03.2011).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2011b): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. – Web: http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_zeitreihe.pdf (Abruf am 14.04.2011).
- Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE) (Hrsg.) (2010a): Anzahl der Windenergieanlagen in Deutschland. – Web: <http://www.wind-energie.de/de/statistiken/> (Abruf am 26.04.2011).
- Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE) (Hrsg.) (2010b): Installierte Windenergieleistung in Deutschland. – Web: <http://www.wind-energie.de/de/statistiken/> (Abruf am 26.04.2011).
- C.A.R.M.E.N. e.V. (2010): Preisentwicklung bei Waldhackschnitzel – der Energieholzindex. – Web: <http://www.carmen-ev.de/dt/energie/bezugsquellen/hackschnippreise.html> (Abruf am 13.04.2011).
- Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS): EnergyMap.info. – Web: <http://www.energymap.info/> (Abruf am 17.01.2012).
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2011a): Klimadaten. – Web: http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&pageLabel=dwdwww_klim_umwelt_klimadaten_deutschland&activePage=&nfls=false (Abruf am 16.12.2011).
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2011b): Mittlere jährliche Windgeschwindigkeiten in 100 Meter Höhe für den Regierungsbezirk Niederbayern, CD-Rom.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (2011): SRTM-Daten. – Web: http://www.dlr.de/caf/desktopdefault.aspx/tabid-5515/9214_read-17716/ (Abruf am 16.12.2011).
- Energy Information Administration U.S. (EIA) (2010): International Energy Outlook 2010. – Web: [http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484\(2010\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484(2010).pdf) (Abruf am 15.03.2011).
- Eurostat (2011): Energy, transport and environment indicators. – Web: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-DK-10-001/EN/KS-DK-10-001-EN.PDF (Abruf am 15.03.2011).
- ESRI (2006): ArcGIS 9, Data & Maps. Redlands.
- GEMIS-Datenbank verwendete Prozesse (z.T. abgeändert):
- Biogas-Mais-BHKW-GM 500-OxKat-2010/brutto
 - Gas-KW-GuD-DE-2010
 - Holz-HS-Waldholz-HKW-ORC-2010/brutto
 - Kohle-KW-DT-DE-2010
 - Solar-PV-multi-Rahmen-mit-Rack-DE-2010
 - U-KW-DWR-DE-2000
 - Wasser-KW-gross-DE-2000
 - Wasser-KW-klein-DE
 - Wind-KW-Park-gross-DE-2010

Industrie und Handelskammer für Niederbayern (IHK) (2005): Regierungsbezirk Niederbayern Industriestandortkarte. – Web: <http://www.ihk-niederbayern.de/uploads/media/Industriestandortkarte.pdf> (Abruf am 11.04.2011).

International Energy Agency (IEA) (2009): World Energy Outlook 2009, executive summary. – Web: http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2009/WEO2009_es_english.pdf (Abruf am 03.03.2011).

International Energy Agency (IEA) (2010a): Key World Energy Statistics. – Web: http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2010/key_stats_2010.pdf (Abruf am 15.03.2011).

Landesamt für Vermessung und Geoinformation Bayern & Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2007): Amtliche Topographische Karten, TOP 10. CD-Rom.

Regierung von Niederbayern (2010): Aktualisierte Daten zu Freiflächen-Photovoltaikanlagen in Niederbayern. (Mitteilung auf schriftliche Anfrage).

Technologie und Förderzentrum (TFZ) (2011): Durchschnittlicher Holzzuwachs in Bayern. – Web: <http://www.tfz.byern.de/festbrennstoffe/17363/> (Abruf am 16.12.2011).

Gesetze

Baugesetzbuch (BauGB) (2011). – Web: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bbaug/gesamt.pdf> (Abruf am 15.03.2011).

Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) (2007). – Web: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bimschg_071023.pdf (Abruf am 12.04.2011).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2002): Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft). – Web: <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/taluft.pdf> (Abruf am 12.04.2011).

Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG) (2008) (zum 14.03.2011 aktuellste verfügbare Fassung der Gesamtausgabe). – Web: <http://juris.de/jportal/portal/page/homerl.psml/screen/FcJWPDFScreen?doc.id=BJNR207410008> (Abruf am 15.03.2011)

Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz – BNatSchG) (2009). – Web: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bnatschg_2009/gesamt.pdf (Abruf am 16.12.2011).

Gesetz über den Schutz der Natur, die Pflege der Landschaft und die Erholung in der freien Natur (Bayerisches Naturschutzgesetz - BayNatSchG) (2011): <http://www.gesetze-bayern.de/jportal/?quelle=jlink&docid=jlr-NatSchGBY2011rahmen&psml=bsbayprod.psml&max=true&aiz=true> (Abruf am: 16.12.2011).

Richtlinie 79/409/EWG Des Rates vom 2. April 1979 über die Erhaltung der wildlebenden Vogelarten (Vogelschutzrichtlinie). – Web: <http://berlin.nabu.de/Downloads/Naturschutzrecht/vogelschutzrichtlinie.pdf> (Abruf am 16.12.2011).

Richtlinie 92/43/EWG Des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen (Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie) (1992). – Web: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/de/consleg/1992/L/01992L0043-20070101-de.pdf> (Abruf am 16.12.2011)

Sonstige Quellen

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2011): Verteilung der Seismometerstationen in Deutschland. – Web: http://www.seismologie.bgr.de/cgi-bin/sta_info.pl (Abruf am 20.10.2011).

ENERCON GmbH (2010): ENERCON Windenergieanlagen, Produktübersicht. – Web: http://www.enercon.de/p/downloads/EN_Produktuebersicht_0710.pdf (Abruf am 27.04.2011).

Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbH (forsa) (2009): Meinungen zum Ausstieg aus der Atomkraft. – Web: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/forsa_atomenergie_april2009.pdf (Abruf am 12.04.2011).

Hochwassernachrichtendienst Bayern (HND) (2011): Pegel im Donaugebiet: Pfelling/Donau, Abfluss. – Web: <http://www.hnd.bayern.de/> (Abruf am 26.04.2011).

Firma GSW Gold SolarWind Management GmbH, Straubing (2011): Mitteilung über aktuelle Preise und Kosten einer Windkraftanlage.

Firma Schachtner, Eichendorf (2011): Mitteilung über Preise, Installation und Materialverbrauch einer Photovoltaik-Dachanlage für eine Referenzanlage der Firma Solar World.

Firma SunPlan GmbH, Mühldorf am Inn (2011): Mitteilung über Preise, Installation und Materialverbrauch einer Photovoltaik-Freiflächenanlage.

KlimaKom (2011) – Web: <http://klimakom.de/> (Abruf am 01.03.2011).

Markt Altdorf (2011). – Web: <http://www.altdorf-ndb.de/> (Abruf am 12.04.2011)

Passauer Neue Presse (PNP) (2009): Front gegen den Wildwuchs bei der Photovoltaik (11.12.2009).

Regionaler Planungsverband Donau-Wald (Planungsregion 12) (2011). – Web: <http://www.region-donau-wald.de/> (Abruf am 12.05.2011)

Regionaler Planungsverband Landshut (Planungsregion 13) (2011). – Web: <http://www.region.landshut.org/> (Abruf am 12.05.2011).

Regionaler Planungsverband Regensburg (Planungsregion 11) (2011). – Web: <http://www.region-regensburg.de/> (Abruf am 12.05.2011)

RMD Wasserstrassen GmbH (2011): Technik und Natur im Einklang: Die Stauhaltung Straubing. – Web: <http://www.rmd-wasserstrassen.de/technik.php> (Abruf am 26.04.2011).

Schmack Biogas GmbH (2011): http://www.schmack-biogas.com/wDeutsch/schmacknews/kompakt/kompakt_0710.php (Abruf am 10.12.11).

SPIEGEL online (2009): Störfall im Kraftwerk Krümmel, Vattenfall nach AKW-Panne in Erklärungsnot. – Web: <http://www.spiegel.de/politik/deutschland/0,1518,634416,00.html> (Abruf am 12.04.2011).

Stadt Simbach am Inn (2011). – Web: <http://www.simbach.de/> (Abruf am 12.04.2011)

Stadt Straubing (2011). – Web: <http://www.straubing.de/de/startseite/> (Abruf am 12.04.2011)

WELT online (2009): Störfall in Krümmel heizt Atom-Debatte an. – Web: <http://www.welt.de/politik/deutschland/article4063039/Stoerfall-in-Kruemmel-heizt-Atom-Debatte-an.html> (Abruf am 12.04.2011).

Windkraftgegner (2011). – Web: <http://www.windkraftgegner.de/> (Abruf am 22.03.2011)

Anhang**Inhalt**

| | | | Seite |
|-------|----|--|-------|
| | | Abbildungen | |
| Abb. | 1 | Fragebogen | 293 |
| | | Karten | |
| Karte | 1 | Bautechnische Standortkarte der Windenergie in Niederbayern | 297 |
| Karte | 2 | Ökonomische Standortkarte der Windenergie in Niederbayern | 297 |
| Karte | 3 | Ökologische Standortkarte der Windenergie in Niederbayern | 298 |
| Karte | 4 | Soziale Standortkarte der Windenergie in Niederbayern | 298 |
| Karte | 5 | Ökonomische Standortkarte der Windenergie in Niederbayern Kompromisszenario | 299 |
| Karte | 6 | Ökologische Standortkarte der Windenergie in Niederbayern Kompromisszenario | 299 |
| Karte | 7 | Soziale Standortkarte der Windenergie in Niederbayern Kompromisszenario | 300 |
| Karte | 8 | Bautechnische Standortkarte bei Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Niederbayern | 301 |
| Karte | 9 | Ökonomische Standortkarte bei Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Niederbayern | 301 |
| Karte | 10 | Ökologische Standortkarte bei Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Niederbayern | 302 |
| Karte | 11 | Soziale Standortkarte bei Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Niederbayern | 302 |
| Karte | 12 | Bautechnische Standortkarte der Bioenergie in Niederbayern | 303 |
| Karte | 13 | Ökologische Standortkarte der Bioenergie in Niederbayern | 303 |
| Karte | 14 | Ökonomische Standortkarte bei Biomasse (Holz) in Niederbayern | 304 |
| Karte | 15 | Soziale Standortkarte bei Biomasse (Holz) in Niederbayern | 304 |
| Karte | 16 | Ökonomische Standortkarte bei Biogas (Mais) in Niederbayern | 305 |
| Karte | 17 | Soziale Standortkarte bei Biogas (Mais) in Niederbayern | 305 |
| | | Tabellen | |
| Tab. | 1 | Zuweisung von Rauigkeitslängen (z) zu CORINE land cover- und ATKIS- Flächenkategorien | 306 |
| Tab. | 2 | Kenndaten zur Windkraftanlage | 307 |

Anhang Abb. 1: Fragebogen

Dissertation Roland Zink M.A.
Lehrstuhl für Anthropogeographie



Welche Eigenschaften der zukünftigen Energieversorgung sind Ihnen wichtig?

1. Kreuzen Sie auf der Skala an, wie wichtig Ihnen die einzelnen Kriterien für die zukünftige Energieversorgung sind. Es dürfen auch mehrere Kriterien auf der gleichen Stufe bewertet werden.

| Kriterien | Skala | | | | | | | |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | absolut unwichtig | unwichtig | eher unwichtig | durchschnittlich | eher wichtig | wichtig | absolut wichtig | keine Angabe |
| Bedarfsgerechte Nutzungsqualität und dauerhafte Versorgungssicherheit Die zukünftige Energieversorgung gewährleistet zu jeder Zeit und dauerhaft den nachgefragten Energiebedarf! | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Ressourcenschonung Die zukünftige Energieversorgung verbraucht möglichst wenig energetische (z.B. Erdöl) und nicht-energetische Ressourcen (z.B. Stahl)! | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Risikoarmut und Fehlertoleranz Die zukünftige Energieversorgung bietet keine Gefahren für Menschen und die Umwelt durch mögliche Unfälle! | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Soziale Verträglichkeit Die zukünftige Energieversorgung schafft Arbeitsplätze und stützt sich auf eine breite gesellschaftliche Akzeptanz! | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Umfassende Wirtschaftlichkeit Die zukünftige Energieversorgung ist bezahlbar und wettbewerbsfähig! | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Umwelt-, Klima- und Gesundheitsverträglichkeit Die zukünftige Energieversorgung weist einen geringen Eingriff in die Umwelt auf und vermeidet klimaschädliche Emissionen und radioaktive Abfälle! | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

2. Bringen Sie die Kriterien in eine Reihenfolge, indem Sie jedem Kriterium einen Rang zuordnen. Schreiben Sie dazu die Kriterien Ihrer Rangfolge entsprechend in die Tabelle 1 (siehe unten). Das Ihnen am wichtigsten erscheinende Kriterium erhält den ersten Rang, das unwichtigste Kriterium den sechsten Rang.

3. Nun haben Sie die Möglichkeit, die Kriterien in der Spalte „Punkte“ einzeln zu bewerten. Das wichtigste Kriterium erhält 100 Punkte. Vergleichen Sie das wichtigste Kriterium auf Rang 1 mit dem Kriterium auf Rang 2 und geben Sie an, wie viele Punkte Sie diesem Kriterium im Vergleich zu den 100 Punkten von Rang 1 zuweisen. Je weniger Punkte Sie vergeben, desto unwichtiger ist Ihnen das Kriterium. Anschließend vergleichen Sie Platz 3 mit Platz 1, dann Platz 4 mit Platz 1 usw.

Tabelle 1

| Rang | Kriterium | Punkte |
|------|-----------|--------|
| 1 | | 100 |
| 2 | | |
| 3 | | |
| 4 | | |
| 5 | | |
| 6 | | |

Welche Faktoren sind beim Bau eines Energiekraftwerkes zu beachten?

Erneuerbare Energien

| Energiegewinnung durch eine Biogasanlage und einem Biomasseheizkraftwerk (Holz) | | | |
|---|----|------|-------------------|
| Sollte der Anbau nachwachsender Energierohstoffe bzw. Energiepflanzen auf den folgenden Flächenkategorien erlaubt sein? | Ja | Nein | |
| Ackerland | | | |
| Grünland | | | |
| Wald (Rodung und Anbau von Energiepflanzen) | | | |
| Sollte eine Biogasanlage in unmittelbarer Nähe zu den folgenden Flächenkategorien errichtet werden? Falls „nein“, welcher Abstand in Metern ist mindestens einzuhalten? | Ja | Nein | Abstand in Metern |
| Siedlungsfläche | | | |
| Industrie- und Gewerbefläche | | | |
| Sport- und Freizeitfläche | | | |
| Kulturgut (Schloss, Burg) | | | |
| Sollte ein Biomasseheizkraftwerk (Holz) in unmittelbarer Nähe zu den folgenden Flächenkategorien errichtet werden? Falls „nein“, welcher Abstand in Metern ist mindestens einzuhalten? | Ja | Nein | Abstand in Metern |
| Siedlungsfläche | | | |
| Industrie- und Gewerbefläche | | | |
| Sport- und Freizeitfläche | | | |
| Kulturgut (Schloss, Burg) | | | |

| Energiegewinnung durch eine Photovoltaikanlage | | | |
|--|----|------|-------------------|
| Sollte die Errichtung einer Photovoltaik-Dachanlage auf folgenden Gebäuden erlaubt sein? | Ja | Nein | |
| Privates Wohngebäude | | | |
| Gewerblich oder industriell genutztes Gebäude | | | |
| Öffentliches Gebäude | | | |
| Kirche | | | |
| Sollte die Errichtung einer Photovoltaik-Freiflächenanlage (Solarpark) auf folgenden Flächenkategorien erlaubt sein? | Ja | Nein | |
| Ackerland | | | |
| Ackerland in der Nähe einer bestehenden Vorbelastung (z.B. Autobahn, Bahnlinie oder Industriegebiet) | | | |
| Grünland | | | |
| Wald (Rodung und Bau der Anlage) | | | |
| Sollte eine Photovoltaik-Freiflächenanlage in unmittelbarer Nähe zu den folgenden Flächenkategorien errichtet werden? Falls „nein“, welcher Abstand in Metern ist mindestens einzuhalten? | Ja | Nein | Abstand in Metern |
| Siedlungsfläche | | | |
| Industrie- und Gewerbefläche | | | |
| Sport- und Freizeitfläche | | | |
| Kulturgut (Schloss, Burg) | | | |
| Bahngleise | | | |
| Autobahn | | | |
| Bundesstraße | | | |
| Sonstige Straße (Kreis- und Gemeindestraße) | | | |

Welche Faktoren sind beim Bau eines Energiekraftwerkes zu beachten?

Erneuerbare Energien (Fortsetzung)

| Energiegewinnung durch ein Wasserkraftwerk | | | |
|---|----|------|-------------------|
| Sollte die Errichtung eines Wasserkraftwerkes entlang der folgenden Flusskategorien erlaubt sein? | Ja | Nein | |
| Beschiffbarer Fluss, z.B. Donau (Gewässer I. Ordnung) | | | |
| Großes Fließgewässer z.B. Isar, Inn, Rott und Vils (Gewässer I. Ordnung) | | | |
| Kleines Fließgewässer, z.B. Bogenbach, Kleine Laaber (Gewässer II. Ordnung) | | | |
| Bach (Gewässer III. Ordnung) | | | |
| Sollte ein Wasserkraftwerk in unmittelbarer Nähe zu den folgenden Flächenkategorien errichtet werden? Falls „nein“, welcher Abstand in Metern ist mindestens einzuhalten? | Ja | Nein | Abstand in Metern |
| Siedlungsfläche | | | |
| Industrie- und Gewerbefläche | | | |
| Sport- und Freizeitfläche | | | |
| Kulturgut (Schloss, Burg) | | | |

| Energiegewinnung durch eine Windkraftanlage | | | |
|--|----|------|-------------------|
| Sollte die Errichtung einer Windkraftanlage auf den folgenden Flächenkategorien erlaubt sein? | Ja | Nein | |
| Ackerland | | | |
| Ackerland in der Nähe einer bestehenden Vorbelastung (z.B. Autobahn, Bahnlinie oder Industriegebiet) | | | |
| Grünland | | | |
| Wald (Rodung und Bau der Anlage) | | | |
| Sollte eine Windkraftanlage in unmittelbarer Nähe zu den folgenden Flächenkategorien errichtet werden? Falls „nein“, welcher Abstand in Metern ist mindestens einzuhalten? | Ja | Nein | Abstand in Metern |
| Siedlungsfläche | | | |
| Industrie- und Gewerbefläche | | | |
| Sport- und Freizeitfläche | | | |
| Kirche | | | |
| Kulturgut (Schloss, Burg) | | | |
| Bahngleise | | | |
| Autobahn | | | |
| Bundesstraße | | | |
| Sonstige Straße (Kreis- und Gemeindestraße) | | | |

Welche Faktoren sind beim Bau eines Energiekraftwerkes zu beachten?

Fossil-atomare Energien

| Energiegewinnung durch ein Atomkraftwerk | | | |
|---|----|------|-------------------|
| Sollte ein Atomkraftwerk in unmittelbarer Nähe zu den folgenden Flächenkategorien errichtet werden? Falls „nein“, welcher Abstand in Metern ist mindestens einzuhalten? | Ja | Nein | Abstand in Metern |
| Siedlungsfläche | | | |
| Industrie- und Gewerbefläche | | | |
| Sport- und Freizeitfläche | | | |
| Kulturgut (Schloss, Burg) | | | |

| Energiegewinnung durch ein Gaskraftwerk (Erdgas) | | | |
|--|----|------|-------------------|
| Sollte ein Gaskraftwerk in unmittelbarer Nähe zu den folgenden Flächenkategorien errichtet werden? Falls „nein“, welcher Abstand in Metern ist mindestens einzuhalten? | Ja | Nein | Abstand in Metern |
| Siedlungsfläche | | | |
| Industrie- und Gewerbefläche | | | |
| Sport- und Freizeitfläche | | | |
| Kulturgut (Schloss, Burg) | | | |

| Energiegewinnung durch ein Kohlekraftwerk | | | |
|--|----|------|-------------------|
| Sollte ein Kohlekraftwerk in unmittelbarer Nähe zu den folgenden Flächenkategorien errichtet werden? Falls „nein“, welcher Abstand in Metern ist mindestens einzuhalten? | Ja | Nein | Abstand in Metern |
| Siedlungsfläche | | | |
| Industrie- und Gewerbefläche | | | |
| Sport- und Freizeitfläche | | | |
| Kulturgut (Schloss, Burg) | | | |

Welche Energietechnologie sollte in Zukunft für die Energieversorgung in Ihrer Region eingesetzt werden?

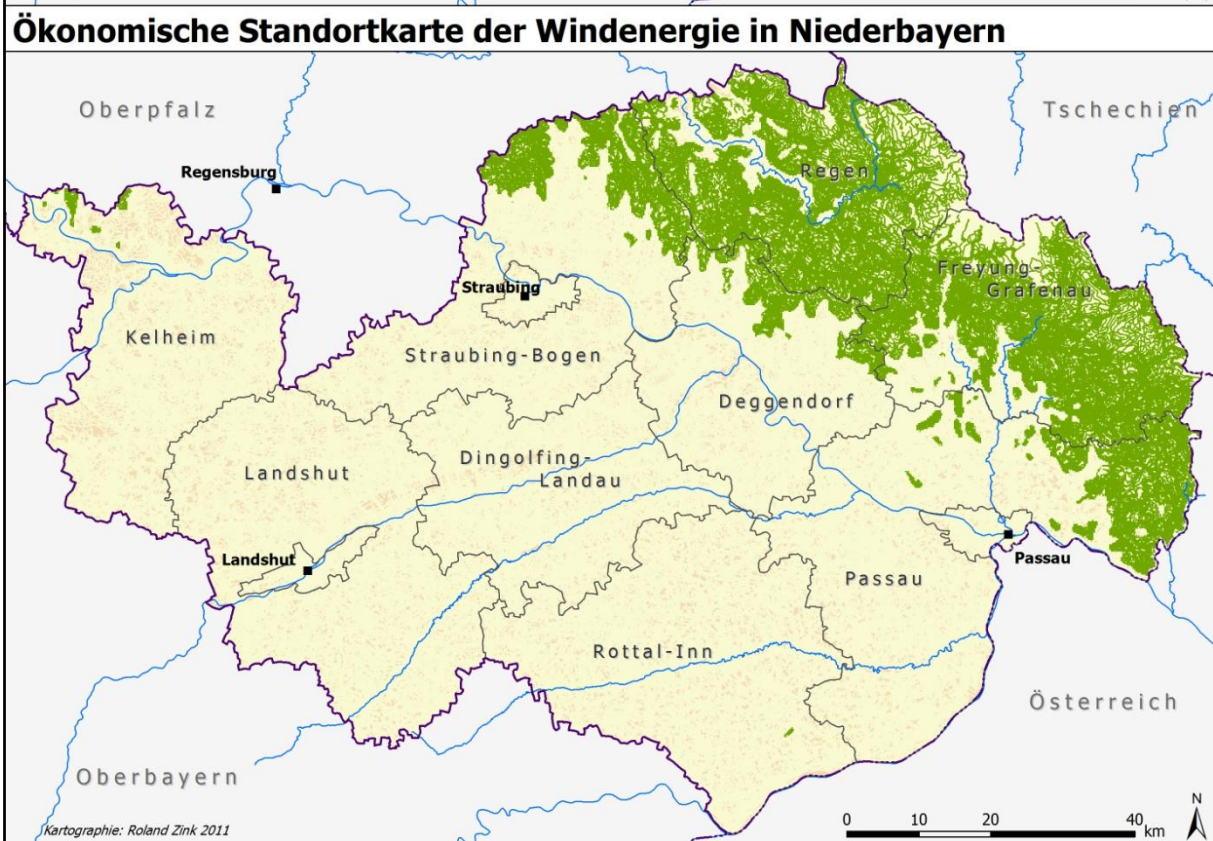
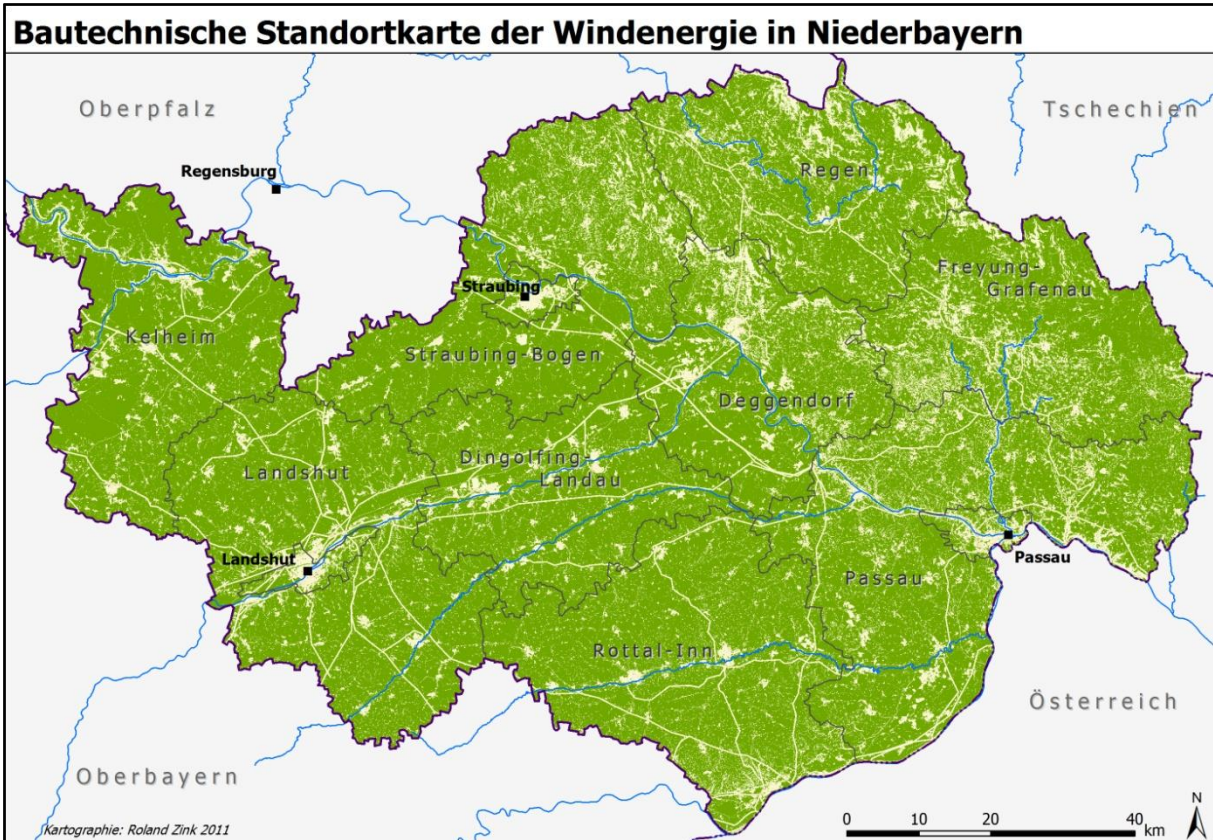
| Technologie | vermehrte Nutzung | gleich wie heute | geringere Nutzung | Verzicht | Keine Angabe |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Atomkraft | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Bioenergie | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Erdgas | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Geothermie (Erdwärme) | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Kohlekraft | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Photovoltaik | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Wasserkraft | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Windenergie | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

Alter: _____

Geschlecht: weiblich männlich
im Energiesektor tätig ja neinBeruf: Angestellter
 Bankangestellter
 Beamter Landwirt
 Selbstständig/Handwerker
 _____Amtstätigkeit: Mitglied eines Gemeinderates
 Vorstandsmitglied eines Vereines
 Person des öffentl. Lebens
(Lehrer/-in, Behördenleiter/-in, Kirche, Gewerkschaft, ...)

Ort (PLZ) Ihrer beruflichen Tätigkeit: _____

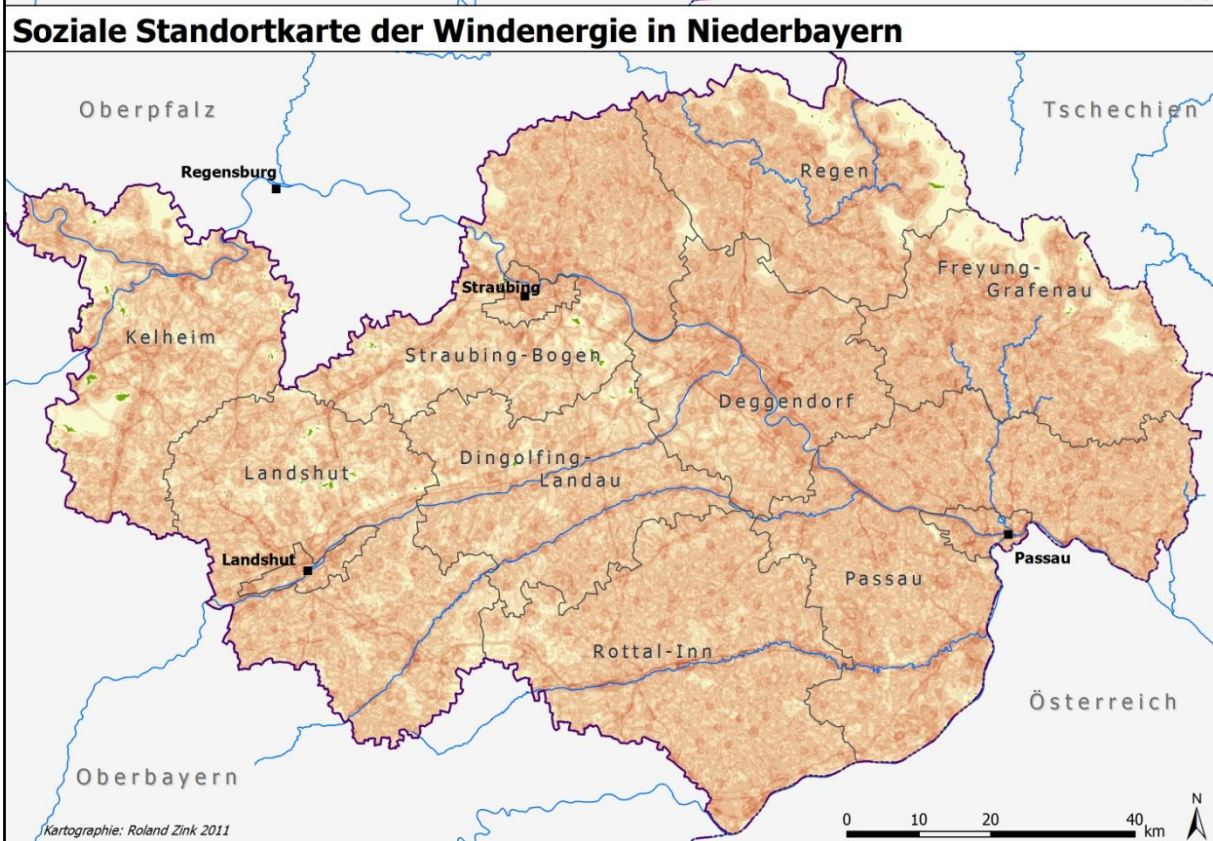
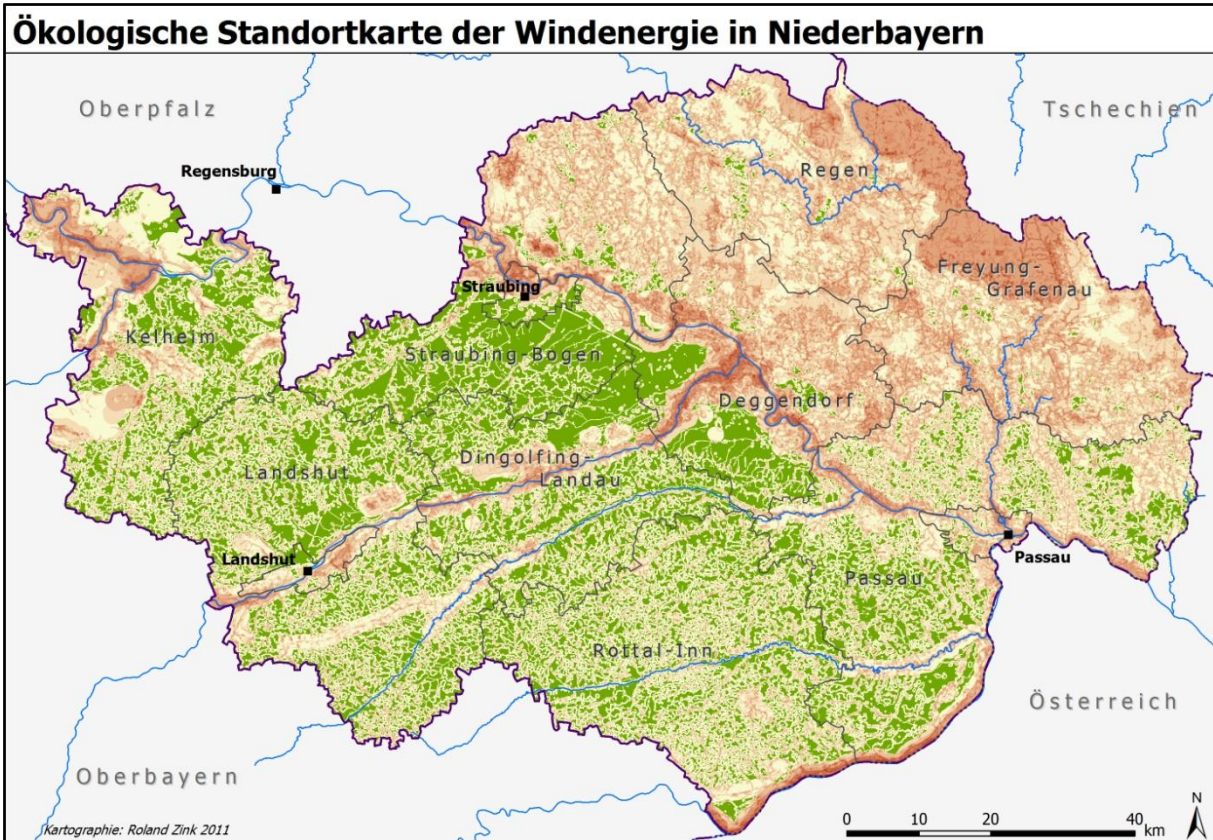
Vielen Dank für Ihre Mühe!



| Legende | | Ausschlusskriterien | | | | Standort |
|-----------------|-------|---------------------|---|---|----|-----------------|
| Staatsgrenze | Fluss | 1 | 4 | 7 | 10 | Positive Fläche |
| Bezirksgrenze | Stadt | 2 | 5 | 8 | | |
| Landkreisgrenze | | 3 | 6 | 9 | | |

Kartgrundlage:
© Bayerische Vermessungsverwaltung 2011
eigene Berechnung

Anhang Karte 1: Bautechnische Standortkarte der Windenergie in Niederbayern
 Anhang Karte 2: Ökonomische Standortkarte der Windenergie in Niederbayern

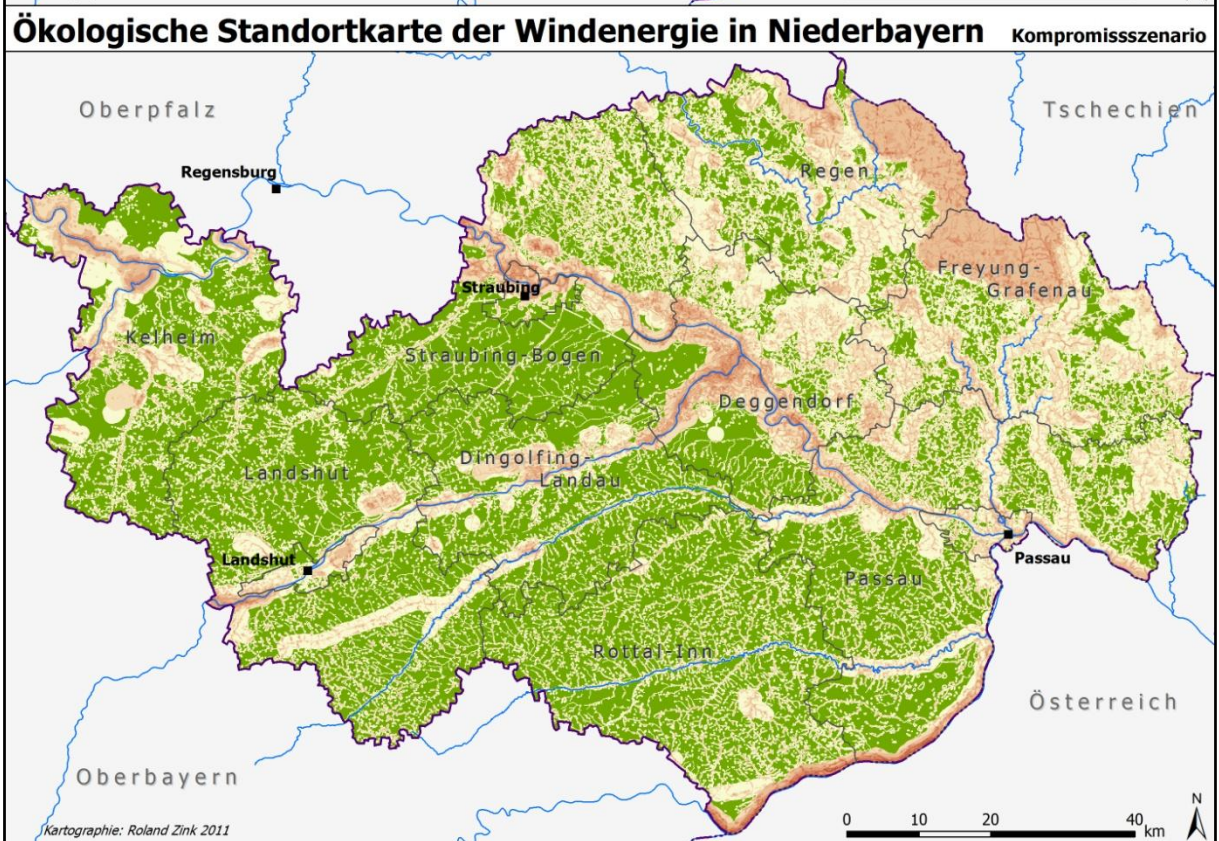
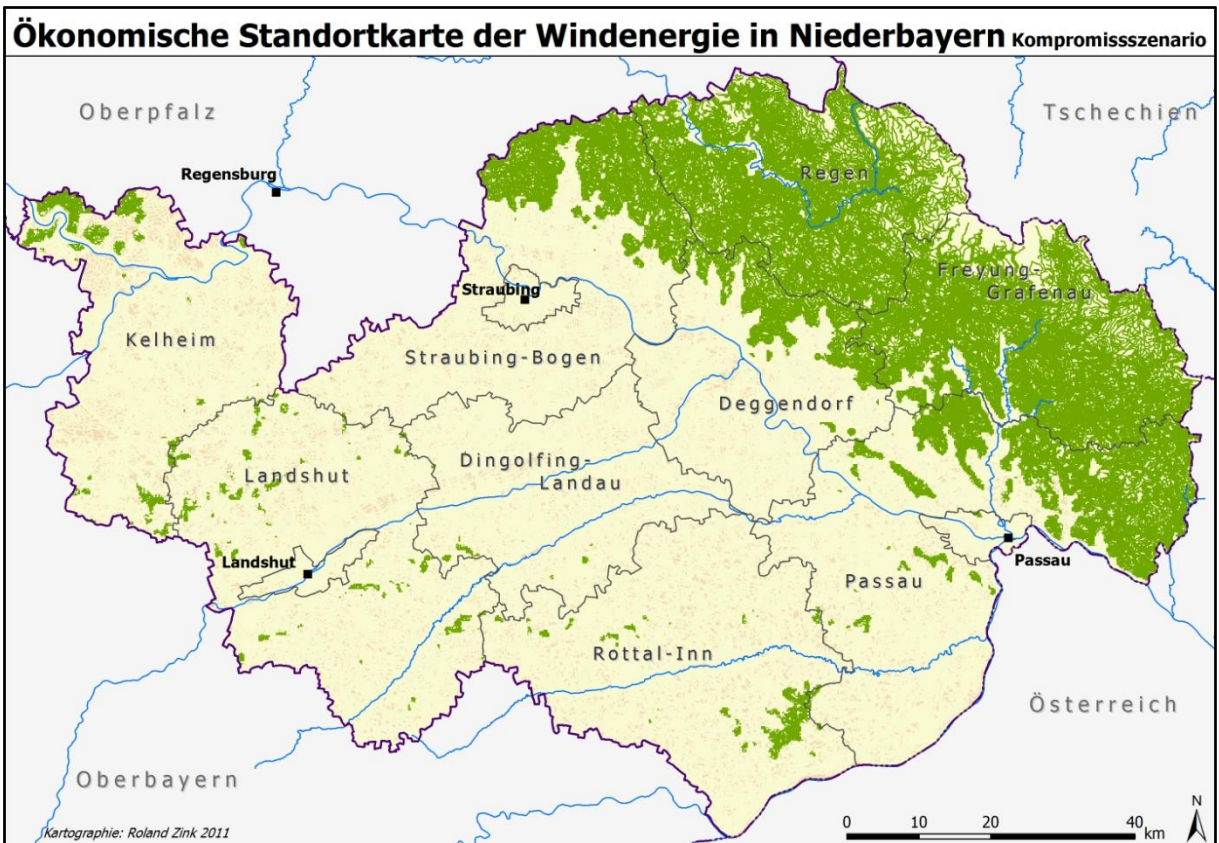


| Legende | | Ausschlusskriterien | | | | Standort |
|-----------------|-------|---------------------|---|---|----|-----------------|
| Staatsgrenze | Fluss | 1 | 4 | 7 | 10 | Positive Fläche |
| Bezirksgrenze | Stadt | 2 | 5 | 8 | | |
| Landkreisgrenze | | 3 | 6 | 9 | | |

Kartengrundlage:
© Bayerische Vermessungsverwaltung 2011
eigene Berechnung

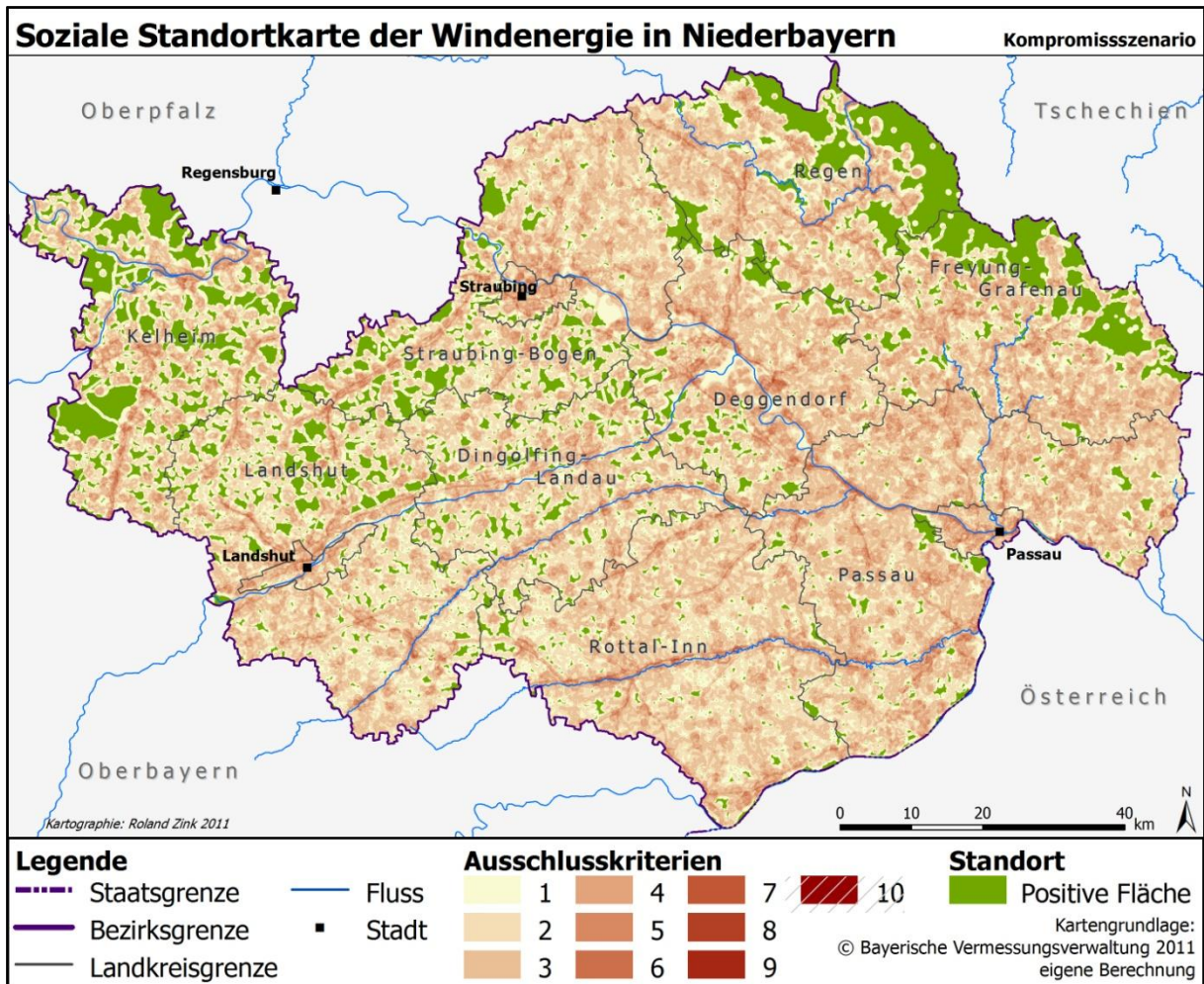
Anhang Karte 3: Ökologische Standortkarte der Windenergie in Niederbayern

Anhang Karte 4: Soziale Standortkarte der Windenergie in Niederbayern

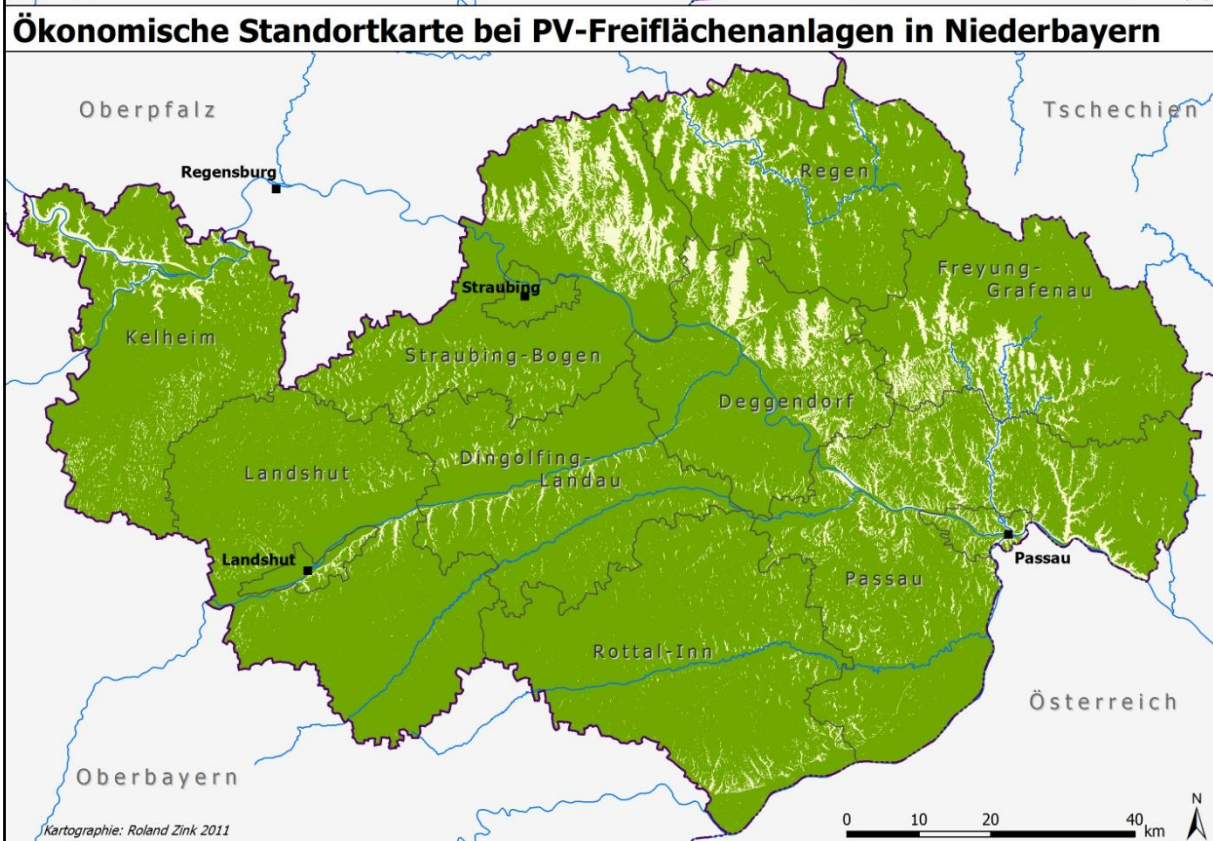
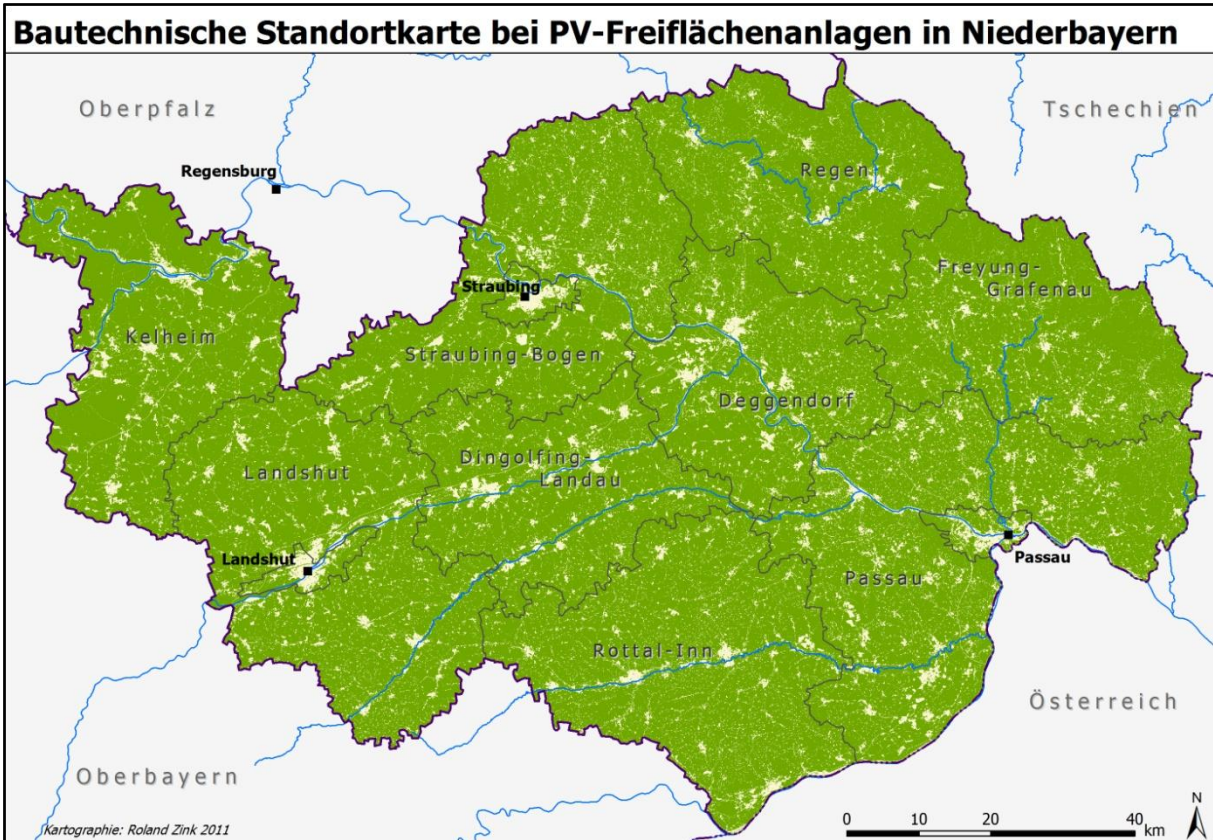


| Legende | | Ausschlusskriterien | | | | Standort |
|---------|-----------------|---------------------|---|--|----|--|
| | Staatsgrenze | | 1 | | 4 | |
| | Bezirksgrenze | | 2 | | 5 | |
| | Landkreisgrenze | | 3 | | 6 | |
| | Fluss | | 7 | | 8 | |
| | Stadt | | 9 | | 10 | |
| | | | | | | Positive Fläche |
| | | | | | | Kartgrundlage: © Bayerische Vermessungsverwaltung 2011 eigene Berechnung |

Anhang Karte 5: Ökonomische Standortkarte der Windenergie in Niederbayern Kompromisssszenario
 Anhang Karte 6: Ökologische Standortkarte der Windenergie in Niederbayern Kompromisssszenario

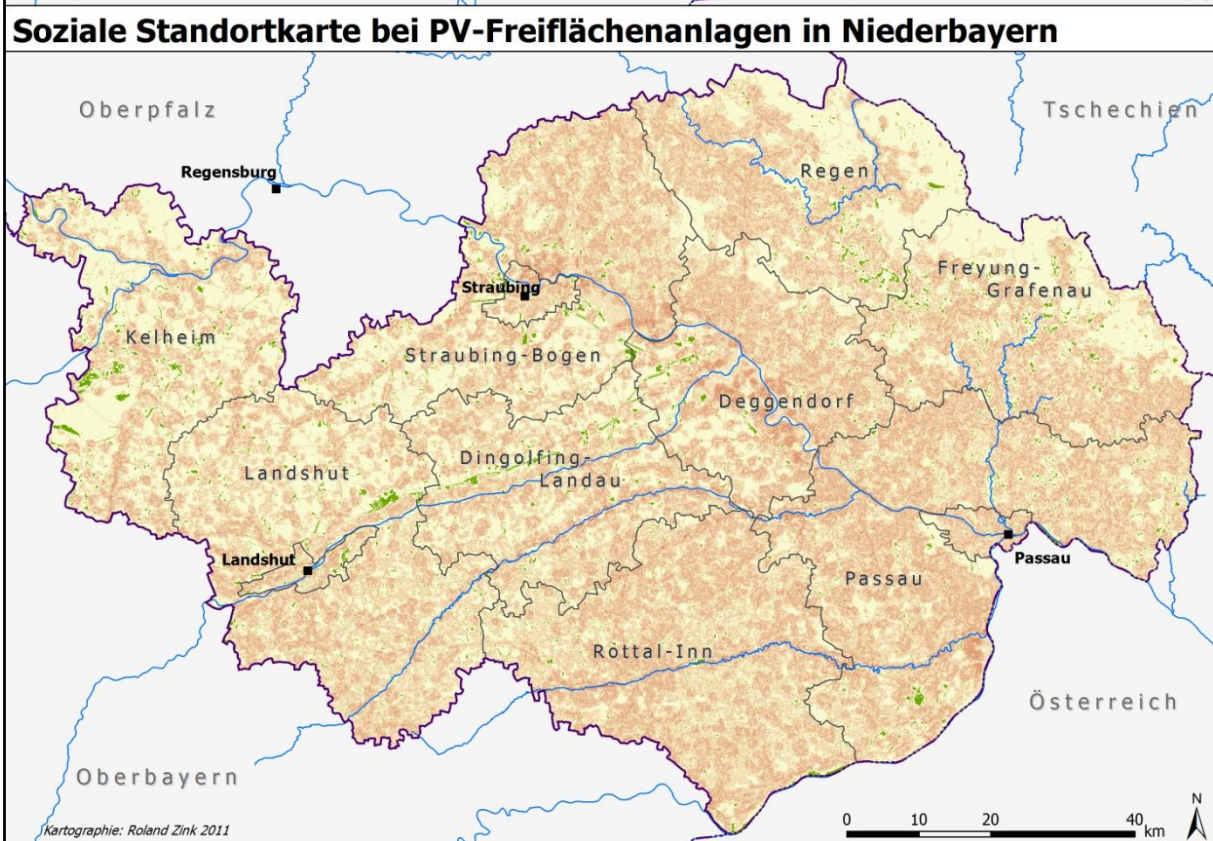
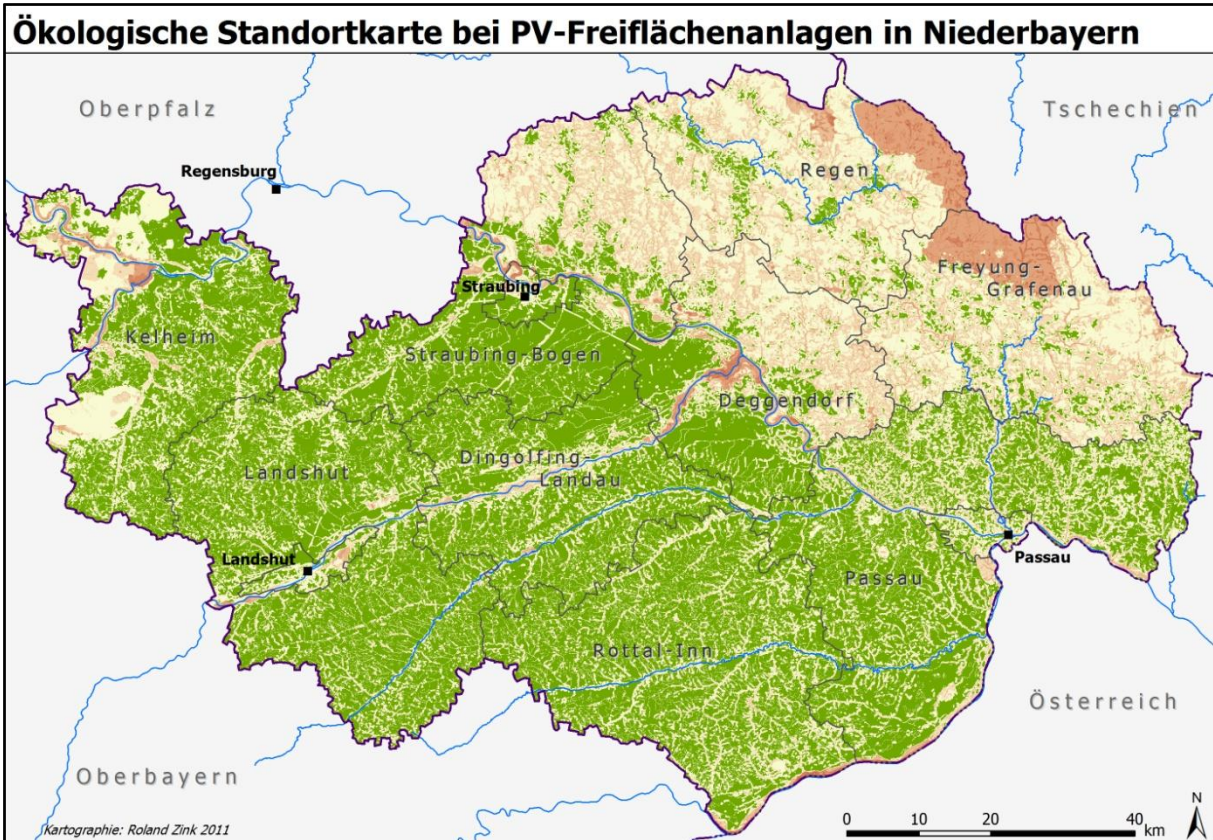


Anhang Karte 7: Soziale Standortkarte der Windenergie in Niederbayern Kompromisszenario



| Legende | | Ausschlusskriterien | | | | Standort |
|-----------------|-------|---------------------|---|---|----|--|
| Staatsgrenze | Fluss | 1 | 4 | 7 | 10 | Positive Fläche |
| Bezirksgrenze | Stadt | 2 | 5 | 8 | | Kartgrundlage: © Bayerische Vermessungsverwaltung 2011 eigene Berechnung |
| Landkreisgrenze | | 3 | 6 | 9 | | |

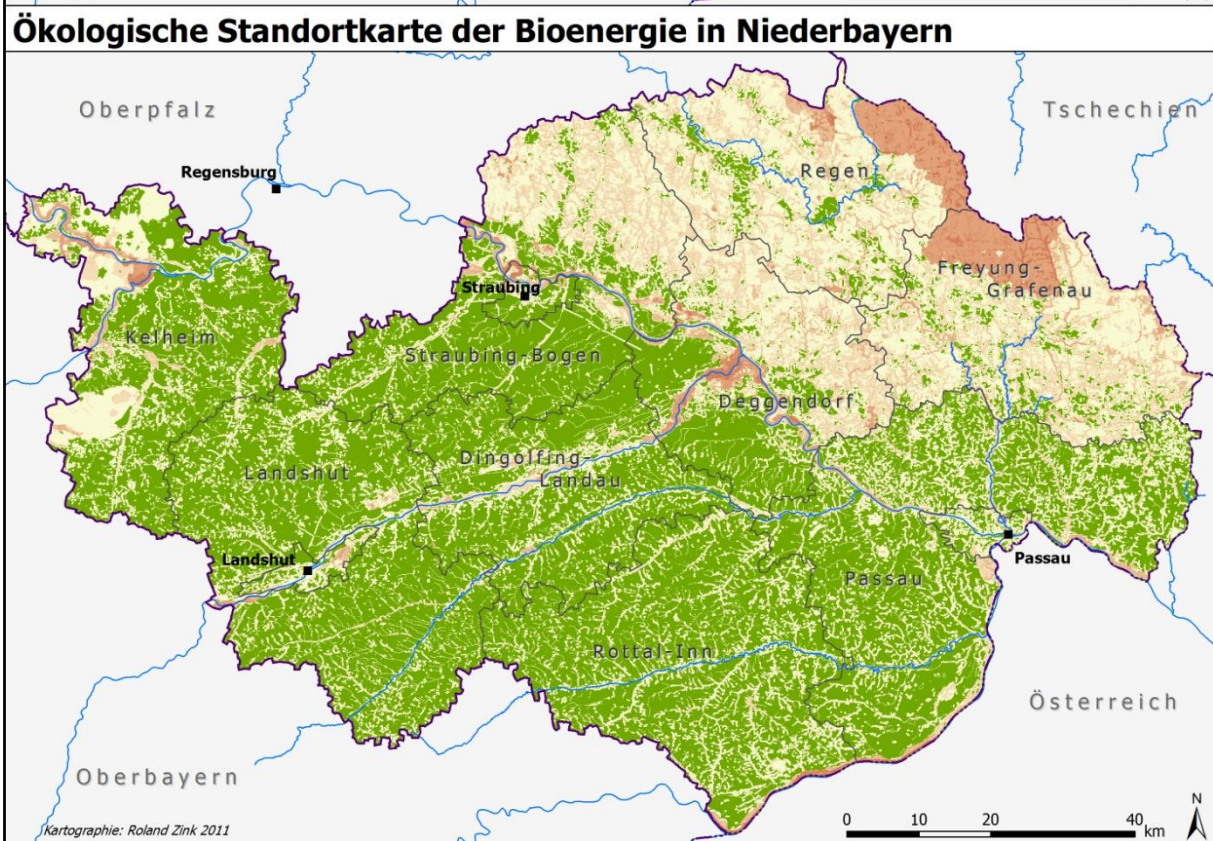
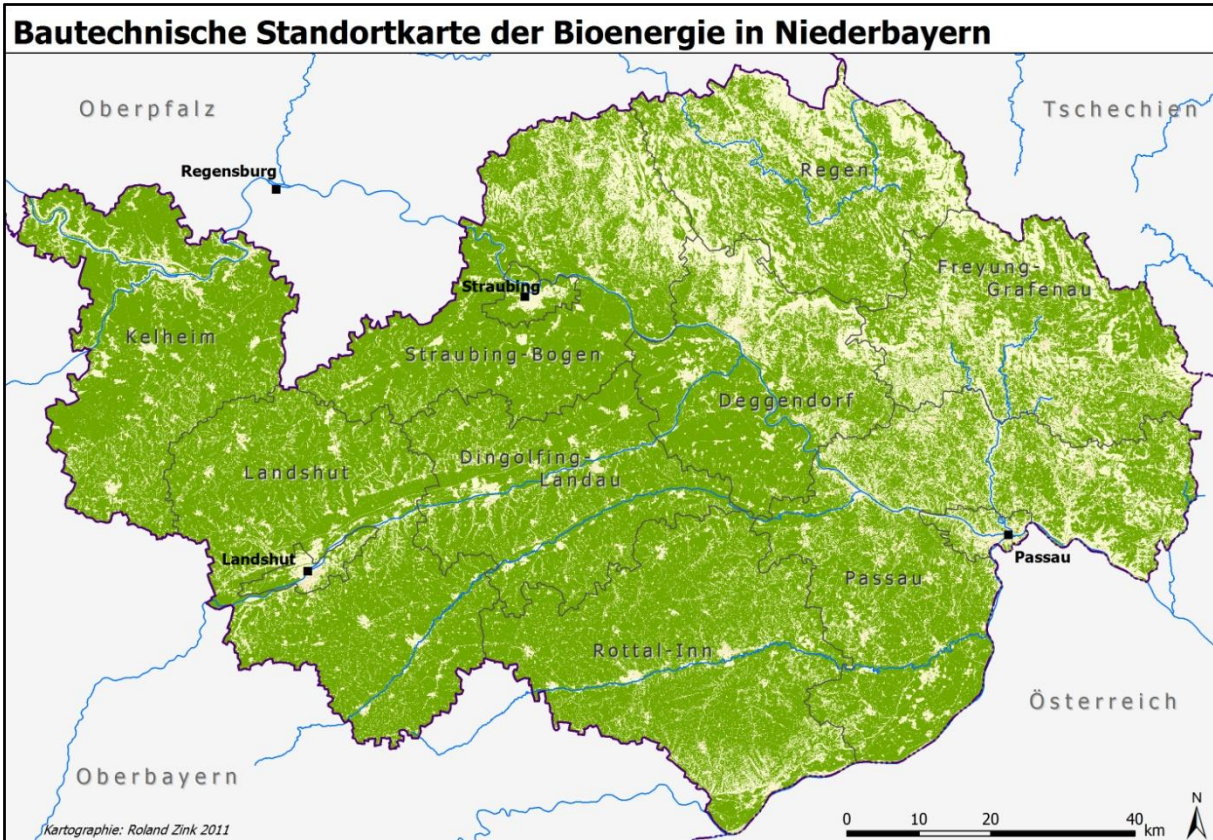
Anhang Karte 8: Bautechnische Standortkarte bei Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Niederbayern
 Anhang Karte 9: Ökonomische Standortkarte bei Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Niederbayern



| Legende | | Ausschlusskriterien | | | | Standort |
|-----------------|-------|---------------------|---|---|----|-----------------|
| Staatsgrenze | Fluss | 1 | 4 | 7 | 10 | Positive Fläche |
| Bezirksgrenze | Stadt | 2 | 5 | 8 | | |
| Landkreisgrenze | | 3 | 6 | 9 | | |

Kartengrundlage:
© Bayerische Vermessungsverwaltung 2011
eigene Berechnung

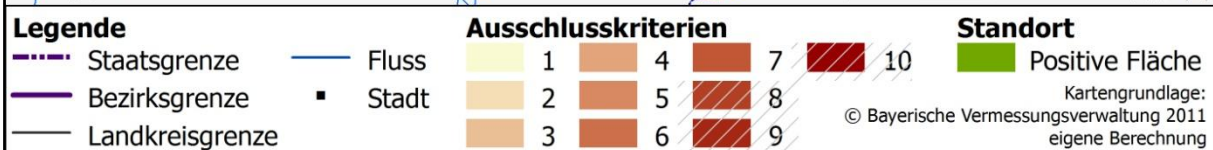
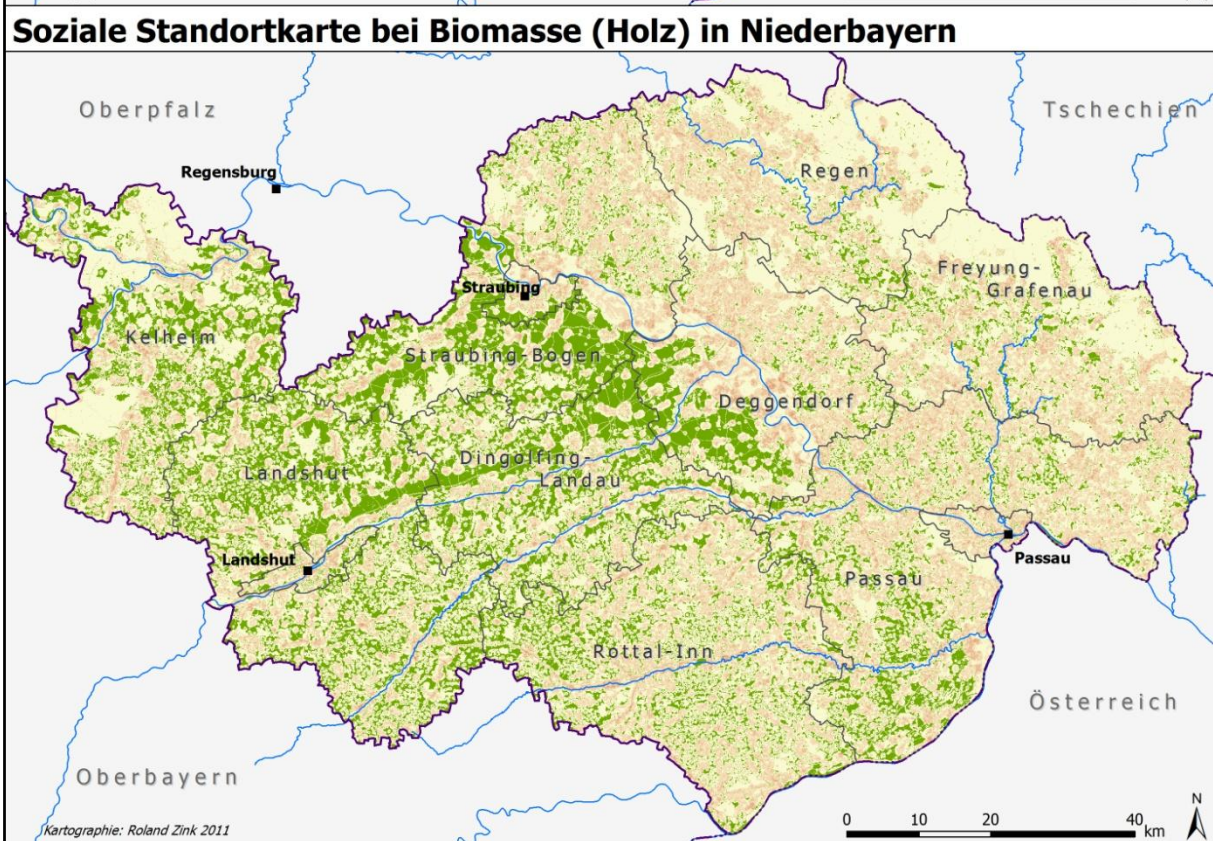
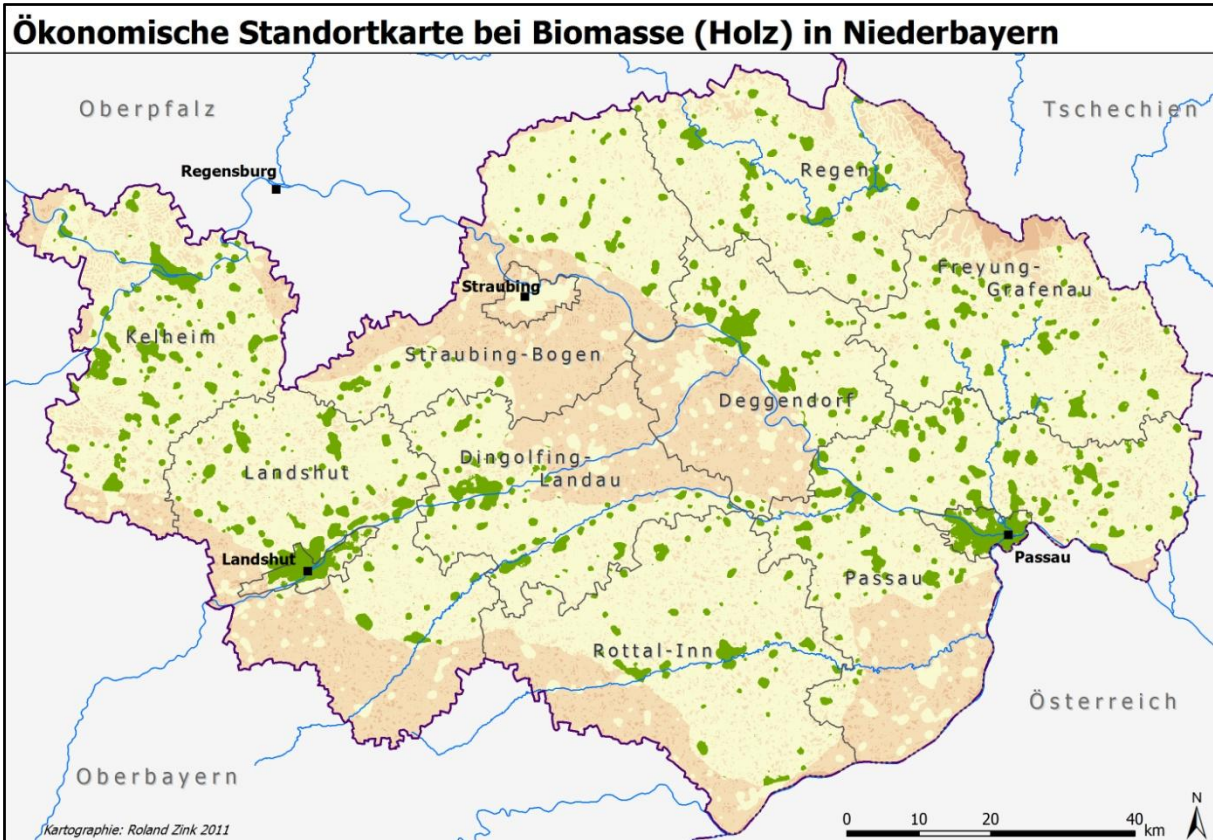
Anhang Karte 10: Ökologische Standortkarte bei Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Niederbayern
Anhang Karte 11: Soziale Standortkarte bei Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Niederbayern



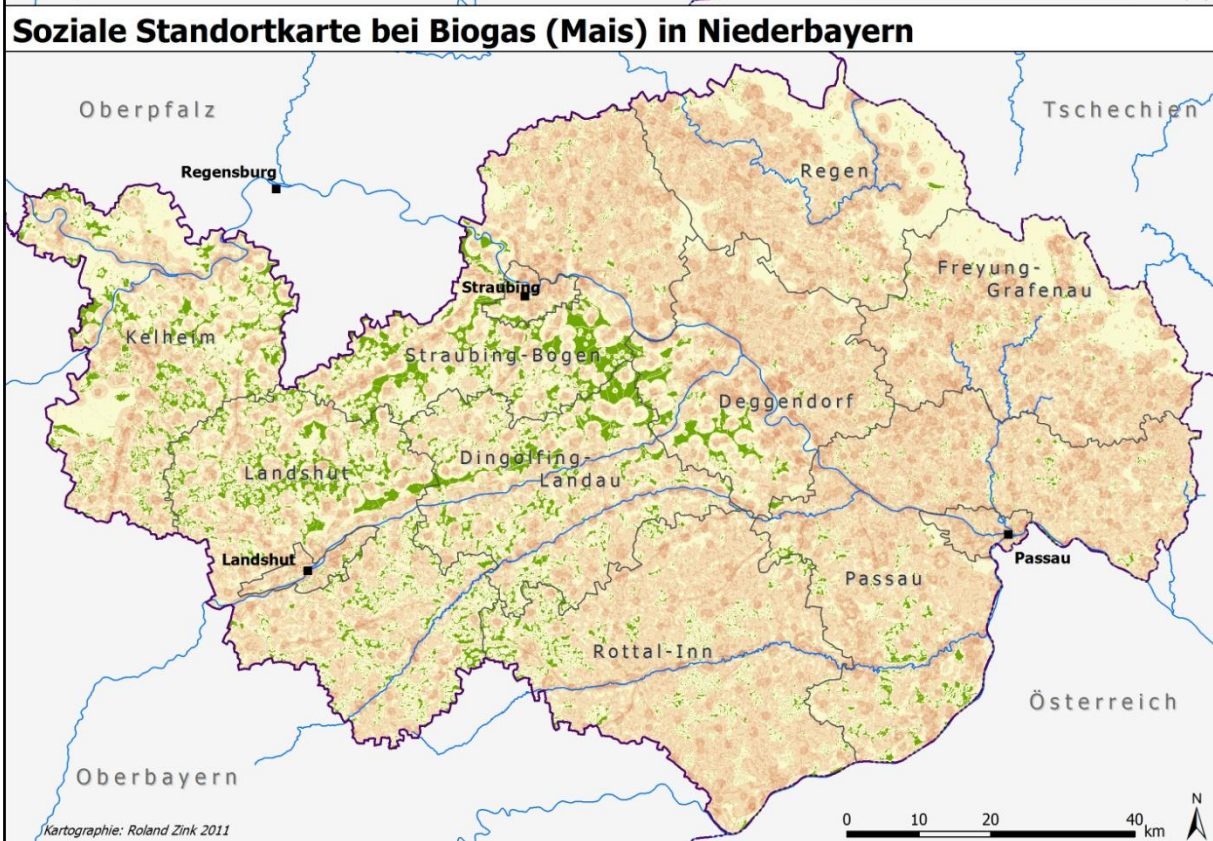
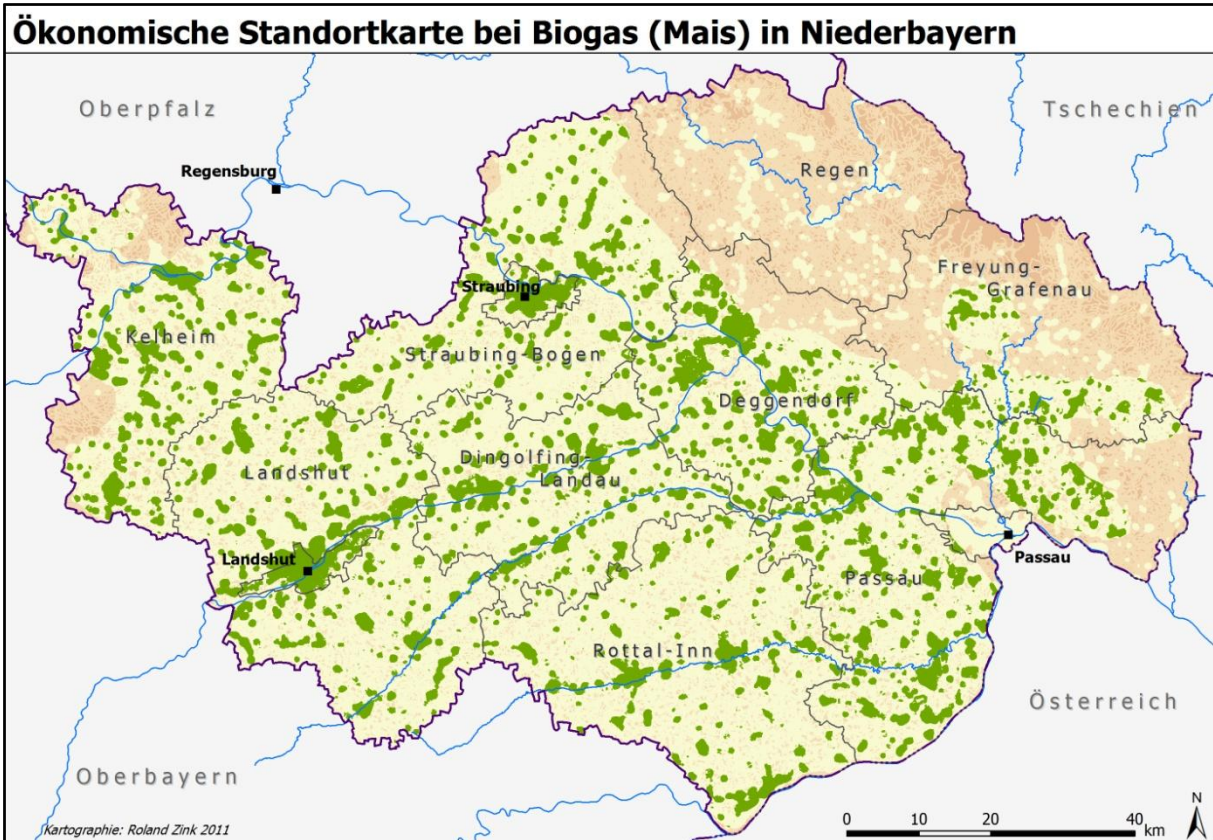
| Legende | | Ausschlusskriterien | | | | Standort |
|-----------------|-------|---------------------|---|---|----|-----------------|
| Staatsgrenze | Fluss | 1 | 4 | 7 | 10 | Positive Fläche |
| Bezirksgrenze | Stadt | 2 | 5 | 8 | | |
| Landkreisgrenze | | 3 | 6 | 9 | | |

Kartgrundlage:
© Bayerische Vermessungsverwaltung 2011
eigene Berechnung

Anhang Karte 12: Bautechnische Standortkarte der Bioenergie in Niederbayern
 Anhang Karte 13: Ökologische Standortkarte der Bioenergie in Niederbayern



Anhang Karte 14: Ökonomische Standortkarte bei Biomasse (Holz) in Niederbayern
 Anhang Karte 15: Soziale Standortkarte bei Biomasse (Holz) in Niederbayern



| Legende | | Ausschlusskriterien | | | | | Standort |
|-----------------|-------|---------------------|---|---|----|-----------------|----------|
| Staatsgrenze | Fluss | 1 | 4 | 7 | 10 | Positive Fläche | |
| Bezirksgrenze | Stadt | 2 | 5 | 8 | | | |
| Landkreisgrenze | | 3 | 6 | 9 | | | |

Kartgrundlage:
© Bayerische Vermessungsverwaltung 2011
eigene Berechnung

Anhang Karte 16: Ökonomische Standortkarte bei Biogas (Mais) in Niederbayern
Anhang Karte 17: Soziale Standortkarte bei Biogas (Mais) in Niederbayern

Anhang Tabelle 1: Zuweisung von Rauigkeitslängen (z) zu CORINE land cover- und ATKIS-Flächenkategorien (vgl. BMU (TA Luft) 2002, S. 219)

| CORINE land cover | ATKIS Basis DLM | z (m) |
|---|---|-------|
| Deponien und Abraumhalden (132) | Halde (41003); Bergbaubetrieb (41004); Tagebau, Grube, Steinbruch (41005) | 0,02 |
| Flächen mit spärlicher Vegetation (333) | Unland, vegetationslose Fläche (43007); Fläche zur Zeit unbestimmbar (43008) | 0,02 |
| Flughäfen (124) | Flugverkehr (42015); Flugverkehrsanlage (53007) | 0,10 |
| Heiden und Moorheiden (322) | Heide (43004); Moor (43005) | 0,20 |
| Industrie- und Gewerbeflächen (121) | Industrie- und Gewerbeflächen (41002) | 1,00 |
| Landwirtschaft und natürliche Bodenbedeckung (243) | Ackerland (1010) | 0,20 |
| Laubwälder (311) | Laubholz (1100) | 1,50 |
| Mischwälder (313) | Laub- und Nadelholz (1300) | 1,50 |
| Nadelwälder (312) | Nadelholz (1200) | 1,00 |
| Nicht durchgehend städtische Prägung (112) | Wohnbaufläche (41001); Fläche gemischter Nutzung (41006); Fläche besonderer funktionaler Prägung (41007) | 1,00 |
| Obst- und Obstbeerenbestände (222) | Streuobstäcker (1011); Streuobstwiese (1021); Gartenland (1030); Baumschule (1031); Obstplantage (1050) | 0,50 |
| Sport- und Freizeitanlagen (142) | Sport-, Freizeit und Erholungsflächen (41008) | 0,05 |
| Städtische Grünfläche (141) | Friedhof (41009) | 0,20 |
| Straßen, Eisenbahn (122) | Straßenverkehr (42001); Platz (42009); Bauwerk im Verkehrsbereich (53001); Bahnverkehrsanlage (53004); Bauwerk im Gewässerbereich (53009) | 0,20 |
| Sümpfe (411) | Sumpf (43006) | 0,10 |
| Wald-Strauch-Übergangsstadien (324) | Hopfen (1012); Gehölz (43003) | 0,50 |
| Wasserflächen (512) | Fliesgewässer (44001); Hafenbecken (44005); Stehendes Gewässer (4406) | 0,01 |
| Wiesen und Weiden (231) Natürliches Grünland (321) | Grünland (1020) | 0,02 |

Anhang Tabelle 2: Kenndaten zur Windkraftanlage (vgl. hierzu auch Enercon 2010)

| Windstärke (m/s) | Theoretische Leistung (kW) | Leistungsangabe des Herstellers (kW) | Wirkungsgrad (%) |
|---------------------|-------------------------------|---|---------------------|
| 1 | 3,23 | 0 | 0 |
| 2 | 25,88 | 3 | 11,59 |
| 3 | 87,33 | 25 | 28,63 |
| 4 | 207,02 | 82 | 39,61 |
| 5 | 404,33 | 174 | 43,03 |
| 6 | 698,68 | 321 | 45,94 |
| 7 | 1109,47 | 532 | 47,95 |
| 8 | 1656,12 | 815 | 49,21 |
| 9 | 2358,03 | 1180 | 50,04 |
| 10 | 3234,61 | 1580 | 48,85 |
| 11 | 4305,27 | 1810 | 42,04 |
| 12 | 5589,41 | 1980 | 35,42 |
| 13 | 7106,44 | 2050 | 28,85 |
| 14 | 8875,78 | 2050 | 23,10 |
| 15 | 10916,82 | 2050 | 18,78 |
| 16 | 13248,97 | 2050 | 15,47 |
| 17 | 15891,65 | 2050 | 12,90 |
| 18 | 18864,26 | 2050 | 10,87 |
| 19 | 22186,21 | 2050 | 9,24 |
| 20 | 25876,90 | 2050 | 7,92 |
| 21 | 29955,75 | 2050 | 6,84 |
| 22 | 34442,15 | 2050 | 5,95 |
| 23 | 39355,53 | 2050 | 5,21 |
| 24 | 44715,28 | 2050 | 4,58 |
| 25 | 50540,82 | 2050 | 4,06 |