

Ein modifizierter PROMETHEE-Ansatz zur Lebenszyklus-orientierten Bewertung der Strom- und Wärmeversorgung

Julia Oberschmidt ⁽¹⁾, Jens Ludwig ⁽²⁾, Jutta Geldermann ⁽³⁾

⁽¹⁾ Fraunhofer Institut System- und Innovationsforschung, Competence Center Energiepolitik und Energiesysteme, Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe, +49(0)721/6809-257, julia.oberschmidt@isi.fraunhofer.de, www.isi.fraunhofer.de

⁽²⁾ Universität Karlsruhe (TH), Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion, Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe, +49(0)721/608-4460, jens.ludwig@wiwi.uni-karlsruhe.de, <http://www-iip.wiwi.uni-karlsruhe.de/IIP>

⁽³⁾ Georg-August-Universität Göttingen, Professur für Produktion und Logistik, Platz der Göttinger Sieben 3, 37073 Göttingen, +49(0)551/39-7257, geldermann@wiwi.uni-goettingen.de, <http://www.produktion.uni-goettingen.de>

Kurzfassung

Bioenergiedörfer gelten als „Baustein für eine zukunftsfähige Energieversorgung im ländlichen Raum“ (Ruppert et al. 2008). Im ersten Bioenergiedorf Jühnde wurde eine weitgehend autarke Strom- und Wärmeversorgung auf Basis regional verfügbarer Biomasse erfolgreich realisiert. Die Durchführung dieses Projektes gilt als Vorbild für andere Gemeinden und Regionen, in denen die regionale Energieversorgung in erster Linie auf die Nutzung Erneuerbare Energien, insbesondere Biomasse, umgestellt werden soll (Ahl et al. 2007; Ruppert et al. 2008). Bei der Umsetzung von Nachfolgeprojekten können multikriterielle Methoden einen Beitrag leisten, indem sie eine Gegenüberstellung alternativer Versorgungskonzepte auf Basis mehrerer Kriterien, wie beispielsweise Kosten und Umweltauswirkungen, ermöglichen. Vor diesem Hintergrund wird eine multikriterielle Methode für den Vergleich alternativer Energieversorgungskonzepte vorgestellt. Der Ansatz beruht auf dem Verfahren PROMETHEE (Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations), das auf Basis einer Lebenszyklus-orientierten Gewichtung der Kriterien modifiziert wird, um variable Präferenzen der Entscheidungsträger zu berücksichtigen. Die Anwendung der vorgeschlagenen Methode wird am Beispiel Jühnde demonstriert.

1 Motivation

Aufgrund des erwarteten Anstieges des Strombedarfs innerhalb der EU auf rund 4.300 TWh im Jahr 2030 sowie infolge der Altersstruktur des Kraftwerksparks in Europa und des

politisch beschlossenen Ausstiegs aus der Kernenergie in Deutschland ergibt sich ein Ersatzbedarf an installierter Stromerzeugungskapazität von etwa 300.000 MW bis zum Jahr 2020 (Theis et al. 2008). Auch in Deutschland besteht aufgrund altersbedingter Stilllegungen und unter Berücksichtigung des Kernenergieausstieges ein hoher Ersatzbedarf bis 2020 (CONSENTEC et al. 2008).

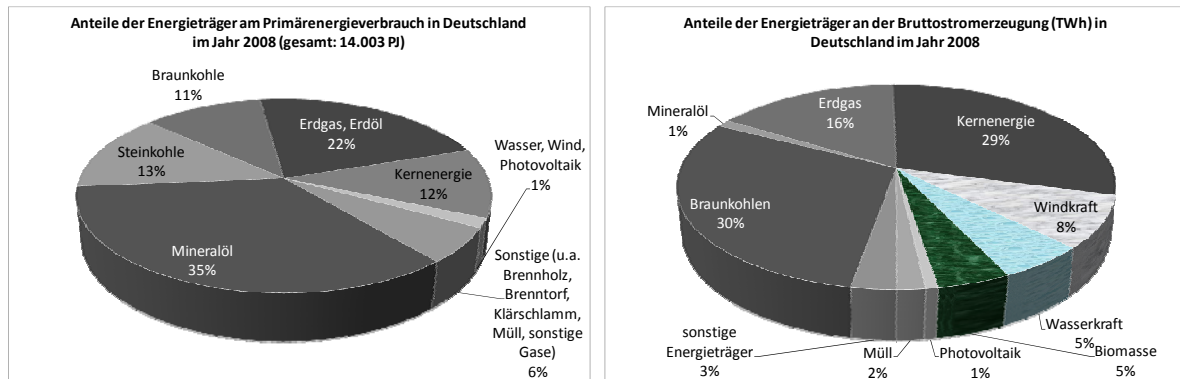


Abbildung 1: Anteile der Energieträger am gesamten Primärenergieverbrauch sowie an der Bruttostromerzeugung in Deutschland im Jahr 2008 (BMW 2009b: Tabelle 4: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern (Stand: 13.02.2009) und Tabelle 22 (Stand: 19.01.2009))

Derzeit stützt sich die Energieversorgung in Deutschland in erster Linie auf die fossilen Energieträger Mineralöl und Kohle (Abbildung 1, links). In der Stromerzeugung, die insgesamt den größten Bedarf an Primärenergien aufweist, machen Braunkohle und Kernenergie den größten Anteil aus (Abbildung 1, rechts). Jedoch sind die Ressourcen dieser Rohstoffe begrenzt, was darüber hinaus einer weltweit steigenden Energienachfrage – vor allem bedingt durch das Wachstum in aufstrebenden Entwicklungs- und Schwellenländern – gegenübersteht. Dabei ist eine steigende Importabhängigkeit Deutschlands bei fossilen und nuklearen Brennstoffen zu beobachten, wobei die Preise fossiler Energieträger in den letzten Jahren tendenziell gestiegen sind (BMW 2009a; Rempel et al. 2007).

Weiterhin wird immer deutlicher, dass die Umweltauswirkungen der Strom- und Wärmeversorgung nicht ignoriert werden können. So bezeichnet bspw. (BMW 2009a) die Umweltverträglichkeit neben der Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit als gleichwertige energiepolitische Zielsetzungen. Insbesondere im Zusammenhang mit dem Klimawandel ist die Energiewirtschaft von sehr hoher Relevanz, da in Deutschland ca. 85 % der Treibhausgasemissionen aus der Erzeugung und Nutzung von Energie stammen. Darüber hinaus weist Deutschland innerhalb der EU die höchsten Treibhausgasemissionen auf und hat sich in besonders hohem Ausmaß zu CO₂-Minderungen verpflichtet (BMW 2009a). Auch in der Gesellschaft und bei industriellen Entscheidungsprozessen gewinnen Umweltaspekte zunehmend an Bedeutung (O.V. 2009).

Zur Strom- und Wärmeversorgung steht hierbei eine Vielzahl technischer Alternativen zur Verfügung. Einige dieser Alternativen gelten zumindest bei heutigen Rahmenbedingungen

als besonders wirtschaftlich, jedoch könnten die mit der Nutzung der gleichen Technologie verbundenen Umweltauswirkungen mittel- und langfristig nicht vertretbar sein. Andere, besonders umweltfreundliche Technologien könnten hingegen Nachteile hinsichtlich der Versorgungssicherheit aufweisen. Daher stellt sich die Frage, welche Energietechniken im Hinblick auf eine zuverlässige und nachhaltige Energieversorgung eingesetzt, entwickelt und gefördert werden sollten. In diesem Zusammenhang wird eine multikriterielle Methode vorgestellt, die das etablierte Outranking-Verfahren PROMETHEE um eine Lebenszyklus-orientierte Bewertung ergänzt, so dass auch dem Entwicklungsstand der Technologie Rechnung getragen wird (vgl. auch Oberschmidt et al. 2009). Die Methode wird am Beispiel des Bioenergiedorfes Jühnde erläutert, indem alternative Energieversorgungskonzepte für diese Gemeinde auf Basis der vorgeschlagenen Methode einander gegenübergestellt werden.

2 Lebenszyklus-orientierte Outranking-Methode

Wie zuvor dargestellt, ist bei der Auswahl von Energietechniken eine Vielzahl an Aspekten zu berücksichtigen, welche insbesondere die Wirtschaftlichkeit, die Versorgungssicherheit und die Umweltauswirkungen der Energiebereitstellung betreffen (vgl. z.B. BMWi 2009a). Der Beitrag unterschiedlicher Energietechniken zur Erreichung der so definierten Ziele kann mit Hilfe unterschiedlicher Kriterien gemessen werden. Daher bieten sich Multi-Attribut-Methoden zum Vergleich der Energietechniken an, da diese eine Bewertung a priori bekannter, diskreter Alternativen auf Basis einer simultanen Betrachtung mehrere Kriterien ermöglichen, die in unterschiedlichen Einheiten ausgedrückt werden (vgl. z.B. Figueira et al. 2005; Belton, Stewart 2002; Zimmermann, Gutsche 1991). Zu unterscheiden sind hierbei die Methoden der amerikanischen Schule und der französischen oder europäischen Schule. Zu ersteren gehören die klassischen Verfahren der Nutzwertanalyse (Dyer 2005; Siskos 2005; Zimmermann, Gutsche 1991) sowie der Analytische Hierarchie-Prozess bzw. der Analytische-Netzwerk-Prozess (Saaty 1980; Saaty 1990; Saaty 2005; Saaty, Vargas 2006). Diese sind durch die Annahme charakterisiert, dass der Entscheidungsträger eine genaue Vorstellung über den Nutzen der Kriterienausprägungen und die Kriteriengewichtungen hat, wobei das Ziel der Entscheidungsunterstützung darin besteht, diese offenzulegen und zu interpretieren. Im Gegensatz dazu hat sich die französische Schule entwickelt, in der davon ausgegangen wird, dass sich der (die) Entscheidungsträger ihrer Präferenzen nicht vollständig bewusst sind. Daher ist eine Entscheidungsunterstützung erforderlich, um die Entscheidungssituation zu strukturieren und die Konsequenzen unterschiedlicher Kriteriengewichtungen aufzuzeigen (Geldermann 1999).

Trotz ihrer Nachteile, wie bspw. der mit der vollständigen Aggregation verbundene Informationsverlust und die Möglichkeit zur Kompensation schlechter mit guten Kriterienausprägungen, werden in der Praxis die klassischen Verfahren aufgrund ihrer leichten Nachvollziehbarkeit und Handhabbarkeit den sogenannten Outranking-Verfahren der französischen Schule häufig vorgezogen. Jedoch weisen die Outranking Verfahren

Vorteile auf, beispielsweise bezüglich des geringeren Informationsbedarfs und hinsichtlich der Möglichkeit zur Einbeziehung unsicherer oder unscharfer Kriterienausprägungen (Geldermann 1999). Zudem können schwache Präferenzen und Unvergleichbarkeiten ausgedrückt werden. Darüber hinaus ist in der Realität tatsächlich häufig zu beobachten, dass die Entscheidungsträger sich ihrer Präferenzen nicht vollständig bewusst sind bzw. diese nicht eindeutig artikulieren können. Daher fällt in dieser Arbeit die Wahl auf das Outranking-Verfahren PROMETHEE (Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations) (Behzadian et al. 2009; Brans et al. 1986; Tsoutsos et al. 2009). Aufgrund der als besser eingeschätzten Transparenz und Nachvollziehbarkeit wurde dieses anderen Outranking-Verfahren wie ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité, vgl. Roy 1980) vorgezogen. Das PROMETHEE-Verfahren basiert auf einer vollständigen Entscheidungstabelle, in der die Kriterienausprägungen für alle zu bewertenden Alternativen hinterlegt sind. Werden m Alternativen a_i unter Berücksichtigung von n Kriterien c_j betrachtet, deren Ausprägungen $f_j(a_i)$ bekannt sind, kann die Auswertung nach PROMETHEE I und II in sechs Schritte erfolgen (Brans et al. 1986; Brans, Mareschal 2005):

1. Zunächst wird für jedes Kriterium c_j eine verallgemeinerte Präferenzfunktion p_j festgelegt, die die Vorziehwürdigkeit einer Alternative a_{i^*} über eine andere Alternative a_i bezüglich dieses Kriteriums anhand der Differenz der Kriterienausprägungen bewertet: $p_j(a_{i^*}, a_i) = p_j(f_j(a_{i^*}) - f_j(a_i))$
2. Die relative Bedeutung der Kriterien zueinander wird durch den Gewichtungsvektor dargestellt: $w^T = [w_1, \dots, w_j, \dots, w_n]$, wobei in der Regel gilt: $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.
3. Die Outranking-Relation π wird bestimmt, die jeweils zwei Alternativen auf Basis aller gewichteten Kriterien vergleicht: $\pi(a_{i^*}, a_i) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot p_j(a_{i^*}, a_i)$ wobei $\pi(a_{i^*}, a_i) \in [0; 1]$
4. Als Maß für die Stärke einer Alternative wird deren Ausgangsfluss berechnet, der sich aus der Summe der Outranking-Relationen dieser Alternative im Vergleich zu allen anderen ergibt: $\phi^+(a_{i^*}) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^m \pi(a_{i^*}, a_i)$. Daraus kann die folgende Präordnung abgeleitet werden:
 - a. $a_{i^*} P^+ a_i$ d.h. a_{i^*} wird a_i vorgezogen, wenn $\phi^+(a_{i^*}) > \phi^+(a_i)$
 - b. $a_{i^*} I^+ a_i$ d.h. a_{i^*} und a_i sind gleichwertig, wenn $\phi^+(a_{i^*}) = \phi^+(a_i)$
5. Als Maß für die Schwäche einer Alternative wird deren Eingangsfluss berechnet, der sich aus der Summe der Outranking-Relationen aller anderen Alternativen im Vergleich zur betrachteten Alternative ergibt: $\phi^-(a_{i^*}) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq i^*}}^m \pi(a_i, a_{i^*})$. Daraus kann

folgende Präordnung abgeleitet werden:

- a. $a_{i^*}P^-a_i$ d.h. a_{i^*} wird a_i vorgezogen wenn $\phi^-(a_{i^*}) < \phi^-(a_i)$
 - b. $a_{i^*}I^-a_i$ d.h. a_{i^*} und a_i sind gleichwertig wenn $\phi^-(a_{i^*}) = \phi^-(a_i)$
6. Die Auswertung kann schließlich nach PROMETHEE I erfolgen. Dabei wird eine partielle Präordnung gebildet, indem die Präordnungen nach ϕ^+ und ϕ^- (vgl. Schritte 4 und 5) gekreuzt werden (set intersection):
- a. a_{i^*} wird a_i vorgezogen, wenn gilt:
 - i. $a_{i^*}P^+a_i$ und $a_{i^*}P^-a_i$ oder
 - ii. $a_{i^*}P^+a_i$ und $a_{i^*}I^-a_i$ oder
 - iii. $a_{i^*}P^-a_i$ und $a_{i^*}I^+a_i$
 - b. a_{i^*} und a_i sind gleichwertig wenn $a_{i^*}I^+a_i$ und $a_{i^*}I^-a_i$
 - c. In allen anderen Fällen sind a_{i^*} und a_i unvergleichbar ($a_{i^*}Ra_i$)
7. Zusätzlich kann nach PROMETHEE II eine vollständige Präordnung abgeleitet werden, indem aus dem Ausgangs- und Eingangsfluss einer Alternative der Nettofluss $\phi(a_{i^*}) = \phi^+(a_{i^*}) - \phi^-(a_{i^*})$ gebildet wird:
- a. a_{i^*} wird a_i vorgezogen, wenn $\phi(a_{i^*}) > \phi(a_i)$
 - b. a_{i^*} und a_i sind gleichwertig, wenn $\phi(a_{i^*}) = \phi(a_i)$

Die Auswertung nach PROMETHEE II hat den Nachteil, dass sich Vorteile und Nachteile rechnerisch vollständig gegeneinander kompensieren können, während bei PROMETHEE I Unvergleichbarkeiten verdeutlicht werden. Daher wird empfohlen, immer beide Auswertungsmethoden anzuwenden.

Als Alternativen stehen im vorliegenden Fall verschiedene Energietechniken zur Verfügung, die durch Umwandlung von Primär- oder Sekundärenergieträgern die Bereitstellung von Strom und Nutzwärme ermöglichen (vgl. auch Oberschmidt 2009). Diese können durch PROMETHEE (oder auch andere Multi-Attribut-Verfahren) bewertet werden, soweit die Kriterien festgelegt und deren Ausprägungen bestimmt sind. Des Weiteren müssen die Kriteriengewichtungen quantifiziert werden, welche die subjektiven Wertvorstellungen hinsichtlich der relativen Bedeutung der Kriterien im Hinblick auf die gesetzten Ziele des Entscheidungsträgers widerspiegeln. Dabei wird grundsätzlich einmalig die Gewichtung für alle Alternativen festgelegt und in der Regel durch Sensitivitätsrechnungen der Einfluss variierender Gewichtungen aufgezeigt.

Jedoch wird hier die Hypothese aufgestellt, dass die Bedeutung der Bewertungskriterien aus Sicht eines Entscheidungsträgers nicht zwangsläufig für alle Alternativen gleich ist. Dies hängt damit zusammen, dass Technologien im Zeitverlauf dynamischen, komplexen und meist diskontinuierlichen Veränderungen unterliegen. Beispielsweise weisen neuere

Technologien zunächst ein geringeres Leistungsniveau, höhere Kosten und höhere Unsicherheiten als etablierte Technologien auf. Dennoch kann es schon zu einem früheren Zeitpunkt im Technologiezyklus, d.h. schon in einem frühen und nicht ausgereiften Entwicklungsstadium, lohnend sein, in diese zu investieren. Denn zu einem späteren Zeitpunkt kann möglicherweise das Leistungsniveau der älteren Technologie, die dann gegebenenfalls keine erheblichen Entwicklungspotenziale mehr aufweist, übertroffen werden (Perl 2007).

Aus Sicht des Entscheidungsträgers, der beispielsweise eine Wahl treffen muss, in welche Energieversorgungstechniken er bevorzugt investieren sollte, bedeutet dies, dass die relative Bedeutung der Ziele und Kriterien in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums einer Technologie variiert. Um die unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Technologien abzugrenzen und somit eine an den Entwicklungsstand angepasste Gewichtung zu ermöglichen, wird hier auf das Konzept des Lebenszyklus bzw. Marktzyklus eines Produktes zurückgegriffen. Der Produktlebenszyklus ist ein zeitbezogenes Marktreaktionsmodell, welches in Analogie zu biologischen Wachstumskurven die Umsatz- oder Gewinnentwicklung eines Produktes im Zeitablauf beschreibt (Abbildung 2). Dabei werden unterschiedliche Phasen unterschieden, die je nach Produkt in ihrer Länge variabel sind, jedoch grundsätzlich die gleiche Reihenfolge aufweisen: Einführung, Wachstum, Reife, Sättigung und/oder Degeneration (Pfeiffer, Bischof 1981; Siegart, Senti 1995).

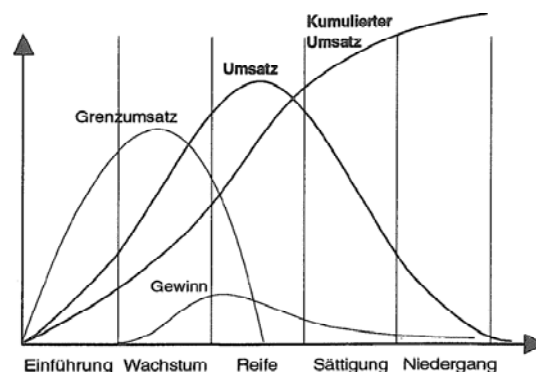


Abbildung 2: Lebenszyklus einer eines Produktes oder einer Technologie (Siegwart, Senti 1995)

Gemäß der zuvor aufgestellten Hypothese der variierenden Bedeutung von Bewertungskriterien in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums einer Technologie, ist dementsprechend nicht nur ein Gewichtungsvektor zu definieren (Schritt 2 des oben beschriebenen PROMETHEE Verfahrens), sondern mehrere Gewichtungsvektoren (je einer pro Phase) bzw. eine Matrix, in der die Gewichtungen je Phase definiert sind. Auf Basis dieser Modifikation des PROMETHEE-Ansatzes wird in dem Sinne eine dynamische Bewertung der Technologien ermöglicht, dass den unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Technologien auf Basis des Lebenszyklus-Konzeptes Rechnung getragen wird. Dadurch soll die Aussagekraft der Ergebnisse verbessert und die Akzeptanz der Methode gesteigert werden.

Im Folgenden wird der modifizierte PROMETHEE-Ansatz zur Bewertung unterschiedlicher Energieversorgungskonzepte für das Bioenergiedorf Jühnde angewendet. Die Ergebnisse der Bewertung werden diskutiert sowie die Vor- und Nachteile der Methode erläutert.

3 Anwendung der Methode auf ein Bioenergiedorf

Bioenergiedörfer gelten als „Baustein für eine zukunftsfähige Energieversorgung im ländlichen Raum“ (Ruppert et al. 2008). Im ersten Bioenergiedorf Jühnde wurde eine weitgehend autarke Strom- und Wärmeversorgung auf Basis regional verfügbarer Biomasse erfolgreich realisiert. Die Durchführung dieses Projektes gilt als Vorbild für andere Gemeinden und Regionen, in denen die regionale Energieversorgung in erster Linie auf die Nutzung Erneuerbare Energien, insbesondere Biomasse, umgestellt werden soll (Ahl et al. 2007; Ruppert et al. 2008). Bei der Umsetzung von Nachfolgeprojekten können multikriterielle Methoden einen Beitrag leisten, da diese eine Gegenüberstellung alternativer Versorgungskonzepte auf Basis mehrerer Kriterien, wie beispielsweise Kosten und Umweltauswirkungen, ermöglichen. Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden die Anwendbarkeit der oben vorgeschlagenen modifizierten PROMETHEE-Methode am Beispiel des Bioenergiedorfes Jühnde gezeigt. Das Ziel besteht darin, eine Methode zur Entscheidungsunterstützung bei Nachfolgeprojekten oder in ähnlichen Entscheidungssituationen bereitzustellen.

3.1 Alternative Energieversorgungskonzepte

Vor der Umsetzung des Bioenergiedorf-Projektes basierte die Energieversorgung in Jühnde in erster Linie auf der Stromversorgung durch die regionalen Energieversorgungsunternehmen und einer Wärmeversorgung der Haushalte auf Basis konventioneller Heizkessel (Ahl et al. 2007; Ruppert et al. 2008). Im Rahmen des Projektes wurde ausgehend von der regionalen Verfügbarkeit alternativer Brennstoffe ein Versorgungskonzept auf Basis von Biomasse entwickelt und umgesetzt (siehe auch Eigner-Thiel, Geldermann 2009). In einer Biogasanlage werden regional verfügbare Gülle und andere feuchte Biomasse (Weizen, Roggen Triticale, Mais, Sonnenblumen, etc.) angeliefert und vergoren. Das so erzeugte Biogas wird in einem Blockheizkraftwerk zur Stromerzeugung eingesetzt. Die erzeugte Strommenge entsprach im Jahr 2006 dem doppelten Bedarf des Dorfes Jühnde. Der erzeugte Strom wird in das Stromnetz des regionalen Energieversorgungsunternehmens eingespeist und nach EEG (Erneuerbarer-Energien-Gesetz) vergütet. Die bei der Stromerzeugung anfallende Wärme wird über ein Nahwärmenetz an die angeschlossenen Haushalte verteilt und ersetzt somit die zuvor in der Regel übliche Wärmebereitstellung durch konventionelle Heizkessel in den Haushalten. Für einen erhöhten Wärmebedarf im Winter steht darüber hinaus ein Holzhackschnitzelheizwerk zur Verfügung, das ebenfalls regional verfügbare Biomasse verbrennt und die erzeugte Wärme ins Nahwärmenetz einspeist. Im Falle, dass die Wärme

aus der Biogasanlage und dem Holzhackschnitzelwerk nicht ausreicht, beispielsweise an sehr kalten Tagen oder bei Wartungsarbeiten an den Anlagen, steht darüber ein Spitzenlastkessel zur Verfügung. Dieser kann mit Heizöl oder Rapsölmethylester (RME) betrieben werden kann (Ruppert et al. 2008).

Neben dem umgesetzten Biomasse-Konzept sind andere Alternativen denkbar, die auf Basis der zuvor dargestellten multikriteriellen Methode beispielhaft einander gegenübergestellt werden sollen (Tabelle 1). Für den Vergleich wird zum einen das bestehende Biomasse-Konzept für Jühnde berücksichtigt (Kombi 1). Zweitens wird ein Konzept betrachtet, das in erster Linie auf erneuerbaren Energien wie Wind und Photovoltaik beruht (Kombi 2). Dieses Konzept beinhaltet weiterhin eine moderne GuD-Anlage (kombiniertes Gas- und Dampfturbinenkraftwerk) auf Erdgas-Basis, die dann zum Einsatz kommen soll, wenn Wind und Sonne als Energieträger nicht zur Verfügung stehen. Dadurch wird die Zuverlässigkeit der Stromversorgung sichergestellt. Für die Wärmeversorgung wird angenommen, dass in den einzelnen Haushalten moderne Gas-Brennwertkessel installiert werden. Als dritte Alternative (Kombi 3) wird angenommen, dass die Stromversorgung auf konventionellen Kohlekraftwerken beruht und dass zur Wärmeversorgung konventionelle Heizölkessel eingesetzt werden.

Zur Gegenüberstellung der alternativen Energieversorgungskonzepte werden zunächst die einzelnen Technologien auf Basis des modifizierten PROMETHEE-Ansatzes bewertet. Darauf aufbauend werden die Gesamtkonzepte einander gegenübergestellt.

Tabelle 1: Alternative Energieversorgungskonzepte (eigene Darstellung)

Versorgungskonzept	Energietechnologien	Kurzbezeichnung	Anteil an Stromversorgung	Anteil an Wärmeversorgung
Kombi 1 (Biomasse-Konzept Jühnde)	Nassfermetierung von Mischsilage und Gülle zur Produktion von Biogas; anschließende Verstromung in BHKW	BioG-BHKW	100%	80%
	Holzhackschnitzel-Heizwerk zur Deckung zusätzlicher Wärmebedarfe	HHS-HW	---	15%
	Öl-Heizkessel zur Deckung von Spitzenlasten bzw. bei Ausfall des BHKW und des HHS-HW	Öl-SpIK	---	5%
Kombi 2 (Erneuerbare + Erdgas)	Windpark mit 10 Windenergieanlagen à 1,8 MW	Wind-Park	22%	---
	Photovoltaik (CIS - Kupfer-Indium-Diselenid CuInSe ₂) Dachanlagen	PV-CIS	10%	---
	Kombiniertes Gas- und Dampfturbinenkraftwerk	GuD-ErdG	68%	---
	Gas-Brennwertkessel für Heizung und Warmwasser	ErdG-Hzg	---	100%
Kombi 3 (Fossile)	Konventionelles Steinkohlekraftwerk	StK-Kw	70%	---
	Konventionelles Braunkohlekraftwerk	BrK-Kw	30%	---
	Öl-Heizung für leichtes Heizöl	Öl-Hzg	---	100%

3.2 Bewertungskriterien

Bei der Bewertung der Technologien soll den Zielen der Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit Rechnung getragen werden. Im Hinblick auf die Versorgungssicherheit ist der Wirkungsgrad der Umwandlung von Interesse, da bei höherem

Wirkungsgrad geringere Mengen an Primärenergieträger benötigt werden, um eine gegebene Menge an Nutzenergie (Strom/Wärme) bereitzustellen. Weiterhin wird die erwartete Verfügbarkeit in Stunden je Jahr als näherungsweise Kriterium für die Zuverlässigkeit und damit auch für die (kurzfristige) Versorgungssicherheit berücksichtigt. Diese kann beispielweise durch Wartungs- und Instandhaltungsintervalle eingeschränkt sein. Bei Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen ist die Verfügbarkeit der Strombereitstellung darüber hinaus durch das zeitlich fluktuierende und nicht regelbare Angebot der Primärenergieträger Wind und Sonne eingeschränkt.

Hinsichtlich der Umweltauswirkungen sind vor dem Hintergrund des Klimawandels insbesondere die Treibhausgasemissionen relevant. Diese werden auf Basis des spezifischen Treibhausgaspotenzials bewertet. Darüber hinaus werden das Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial der entsprechenden Emissionen bewertet. Zur Bewertung des Verbrauchs nicht-regenerativer Ressourcen aufgrund der Herstellung und des Betriebs der Technologien wird des Weiteren der Kumulierte Energie-Aufwand (KEA nicht-regenerativ) hinzugezogen (Guinée et al. 2002).

Die Wirtschaftlichkeit wird durch die spezifischen Gesamtkosten der Strom- bzw. Wärmebereitstellung bewertet. Dabei werden Investitionen sowie fixe und variable Betriebskosten berücksichtigt. Des Weiteren wird der Bedarf an erschöpfbaren Ressourcen aus ökonomischer Sicht für Deutschland bewertet. Dazu wird ein konstruierter Risiko-Indikator abgeleitet (Frondelet et al. 2007), der unterschiedliche Aspekte der mit der Rohstoffversorgung verbundenen Risiken einbezieht. Die durch diesen Indikator berücksichtigten Aspekte haben ebenso einen Einfluss auf die (langfristige) Versorgungssicherheit. Gemäß (Frondelet et al. 2007) werden folgende Teilaspekte berücksichtigt:

- Statische Reichweite der Ressourcen in Jahren
- Nettoimportwert für Deutschland
- Herfindahl-Index H zur Bewertung der Konzentration der Förderung:
$$H = (s_1)^2 + (s_2)^2 + \dots + (s_i)^2 + \dots + (s_n)^2$$
 mit s_i : Anteil des Landes i an der weltweiten Förderung. Bei gleichmäßiger Verteilung auf n Länder geht $H \rightarrow 1/n$. Im Falle der Konzentration der Förderung auf ein einziges Land ergibt sich der Wert 1.
- Konstruierter Indikator zur Bewertung des politischen und wirtschaftlichen Risikos in den Förderländern. Dieser basiert auf dem ungewichteten Mittel von fünf Indikatoren der Weltbank, die politische Korruption, Instabilität und Kriminalität, Effektivität von Behörden, Grad der Bürokratie und Rechtsstaatlichkeit messen. Der kleinste und schlechteste Wert ergibt sich für Somalia mit -2,24, der beste Wert mit 2,04 für Island (Stand 2007).

Zusätzlich wird der Variationskoeffizient der Energieträgerpreise in der Vergangenheit (1973-2007) in die Betrachtungen einbezogen. Die Teilindikatoren werden für alle Energieträger

bestimmt (Tabelle 2), anschließend zwischen 0 und 1 normiert und schließlich durch die Bildung eines ungewichteten Mittelwertes zum Gesamtindikator zusammengeführt (Tabelle 3).

Tabelle 2: Indikatoren zur Bewertung der mit den Energieträgern verbundenen Risiken (BGR 2009; Frondel et al. 2007; Statistik der Kohlenwirtschaft e.V. 2009) (Basisjahr 2007)

	Statische Reichweite der Ressourcen in Jahren	Nettoimportwert für Deutschland in Mio. €	Herfindahlindex ²⁾	Politische Risiken in den Förderländern	Variationskoeffizient der Energieträgerpreise ³⁾
Mischsilage und Gülle zur Produktion von Biogas ¹⁾	nahezu unbegrenzt	0	0 *)	0 *)	0
Holzhack-schnitzel ¹⁾	nahezu unbegrenzt	0	0 *)	0 *)	0
Heizöl (leicht) ⁴⁾	63	24.632	0,106	0,011	0,449
Wind	unbegrenzt	0	0 *)	0 *)	0
Sonne	unbegrenzt	0	0 *)	0 *)	0
Erdgas	129	10.400	0,166	0,307	0,414
Steinkohle (Kraftwerkskohle)	2.832	1.642	0,258	0,149	0,292
Braunkohle	5.504	<0	0,103	0,591	0,275

Anmerkungen: 1) Annahme fester Lieferverträge mit regionalen Landwirten, daher stabile Preise und kein Import der verwendeten Biomassen. Ausreichende Verfügbarkeit der Biomassen zum Betrieb der Anlagen wurde in Jühnde vorab überprüft und sichergestellt. 2) Basierend auf den Anteilen der Förderländer im Jahr 2007. 3) Basierend auf Preiszeitreihen des Statistik der Kohlenwirtschaft e.V. 2009 (Entwicklung ausgewählter Energiepreise in €/t SKE) von 1973 bis 2007 für Heizöl leicht, Erdgas (Kraftwerke), Drittlandskohle (Kraftwerkskohle) und Braunkohlenbriketts. 4) Reichweite, Importwert, Herfindahl-Index und Risikoindikator für Erdöl.

Tabelle 3: Normierte Indikatoren zur Bewertung der mit den Energieträgern verbundenen Risiken (eigene Berechnungen auf Basis von Tabelle 2)

	Statische Reichweite der Ressourcen	Nettoimportwert für Deutschland	Herfindahlindex	Politische Risiken in den Förderländern	Variationskoeffizient der Energieträgerpreise	Gesamtindikator
Normierung	<i>Linear steigend zwischen 0 und 6.000 Jahren</i>	<i>Linear fallend zwischen 0 und 25 Mio. €</i>	<i>Linear fallend zwischen 0 und 1</i>	<i>Linear steigend zwischen -2,24 und +2,24</i>	<i>Linear fallend zwischen 0 und 1</i>	<i>(gleiche Gewichtung der Teilindikatoren)</i>
Mischsilage und Gülle zur Produktion von Biogas	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,98 *)
Holzhack-schnitzel	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,98 *)
Heizöl (leicht)	0,011	0,015	0,895	0,502	0,552	0,395
Wind	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Sonne	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Erdgas	0,022	0,584	0,834	0,568	0,586	0,519
Steinkohle (Kraftwerkskohle)	0,472	0,988	0,742	0,533	0,708	0,689
Braunkohle	0,917	1,000	0,898	0,631	0,725	0,834

*) Für Biomasse wird ein Abschlag berechnet, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass die langfristige Verfügbarkeit von Biomasse nicht mit der von Wind oder Sonne gleichzusetzen ist und da darüber hinaus unter Umständen Nutzungskonkurrenzen zur Nahrungsmittelproduktion oder anderen Flächennutzungsmöglichkeiten bestehen. Jedoch ist an dieser Stelle kritisch anzumerken, dass in zukünftigen Arbeiten weitere Überlegungen angestrengt werden sollten, um den Rohstoffindikator für Biomasse im Vergleich zu den anderen Energieträgern in adäquater Weise zu quantifizieren, u.a. auch unter Berücksichtigung regional spezifischer Gegebenheiten.

Die Ausprägungen aller Kriterien je Alternative erfolgt schließlich in der Entscheidungsmatrix, die die Basis für die Bewertung der Energietechnologien darstellt (Tabelle 4). Da das Biogas-BHKW sowohl Strom als auch Wärme bereitstellt, werden die Kosten und Emissionen zur Strom- und Wärmeseite mit Hilfe eines exergetischen Allokationsfaktors zugerechnet. Die Exergie beruht auf physikalischen Prinzipien und berücksichtigt die Qualität der energetischen Produkte (Briem et al. 2004). Der Exergiegehalt einer bestimmten Energiemenge ist dabei umso höher je umfangreicher die Weiterverwendungsmöglichkeiten der energetischen Produkte sind. Da Strom prinzipiell in alle anderen Energieformen umgewandelt werden kann entspricht der Exergiegehalt einer Kilowattstunde Strom auch dessen Energiegehalt. Bei Wärme hängt der Exergiegehalt von der Temperatur der abgegebenen Wärme ab (Feddeck 2003; Szargut et al. 1988; WEC 1992). Entsprechend der in Jühnde im Jahr 2006 eingespeisten Strom- und Wärmemengen werden 89 % der Kosten und Emissionen der Biogas-Anlage der Stromseite zugerechnet und nur 11 % der Wärmeseite.

Tabelle 4: Vollständige Entscheidungsmatrix zur Bewertung alternativer Energietechnologien (Bartels et al. 2005; Briem et al. 2004; Reichmuth et al. 2006; Ruppert et al. 2008; Staiß 2007; UBA, Öko-Institut e.V. 2009)

	Allokationsfaktor (Exergie)	Versorgungssicherheit		Wirtschaftlichkeit		Umwelt			
		Wirkungsgrad	Verfügbarkeit	Rohstoff-Risiken	Spez. Gesamtkosten	KEA nicht-regenerativ	Treibhaus-potenzial	Versauerungs-potenzial	Eutrophierungs-potenzial
		%	h/a	·	ct/kWh	MJ/kWh	kg CO ₂ -Äq./kWh	kg SO ₂ -Äq./kWh	kg PO ₄ -Äq./kWh
Stromtechniken									
BioG-BHKW	89	40	5.587	0,980	16,9	1,62E+00	2,13E-01	1,08E-03	1,36E-04
Wind-Park	100	35	1.900	1,000	7,9	1,60E-01	2,46E-02	4,87E-05	6,60E-06
PV-CIS	100	12	900	1,000	39,3	1,14E+00	6,43E-02	4,15E-04	1,13E-05
GuD-ErdG	100	60	8.322	0,519	3,5	6,48E+00	3,85E-01	3,74E-04	5,08E-05
BrK-Kw	100	45	8.322	0,834	3,0	1,02E+01	1,17E+00	9,75E-04	1,00E-04
StK-Kw	100	48	8.322	0,689	6,0	1,01E+01	9,52E-01	1,13E-03	8,66E-05
Wärmetechniken									
BioG-BHKW	11	40	5.587	0,980	2,2	2,09E-01	2,75E-02	1,39E-04	1,75E-05
HHS-Hzw	100	88	8.322	0,980	4,5	3,16E-01	3,51E-02	4,65E-04	6,18E-05
Öl-SplK	100	75	8.322	0,395	7,8	5,08E+00	3,83E-01	6,65E-04	3,39E-05
ErdG-Hzg	100	100	8.322	0,519	5,2	4,10E+00	2,28E-01	1,42E-04	2,33E-05
Öl-Hzg	100	75	8.322	0,395	7,8	4,97E+00	3,77E-01	6,06E-04	3,09E-05

3.3 Lebenszyklus-orientierte Gewichtung der Kriterien

Gemäß der aufgestellten Hypothese reicht die Definition eines einzelnen Gewichtungsvektors entsprechend der traditionellen PROMETHEE-Methode zur Bewertung der Energietechniken nicht aus. Vielmehr sind Gewichtungen in Abhängigkeit

unterschiedlicher Lebenszyklusphasen festzulegen. Die Gewichtungen sind letztlich durch den bzw. die Entscheidungsträger selbst zu wählen und durch dessen subjektive Wertvorstellungen geprägt. Die Gewichtungen je Lebenszyklusphase können hierbei aus unterschiedlichen Gründen variieren. Beispielsweise kann argumentiert werden, dass die spezifischen Gesamtkosten insbesondere in der Reifephase von hoher Bedeutung sind, da eine ausgereifte Technologie nur dann am Markt erfolgreich ist, wenn sie wirtschaftlich wettbewerbsfähig betrieben wird. In der Einführungsphase wird hingegen eher in Kauf genommen, dass eine Technologie noch höhere Kosten aufweist, insbesondere wenn mit fortschreitendem Lebenszyklus zukünftige Kostensenkungen erwartet werden, beispielsweise aufgrund von Skaleneffekten. Vor dem Hintergrund der Ressourcenverknappung und der verschärften Wahrnehmung von Umweltaspekten kann hingegen den Umweltaspekten in der Einführungsphase ein höheres Gewicht beigemessen werden, da umweltfreundliche Technologien auch als zukunftsfähig angesehen werden. Vor dem Hintergrund des Klimawandels wird hierbei dem Treibhauseffekt eine besonders hohe Bedeutung beigemessen. Für das Fallbeispiel werden beispielhaft die Gewichtungen je Lebenszyklusphase in Abbildung 3 zugrunde gelegt.

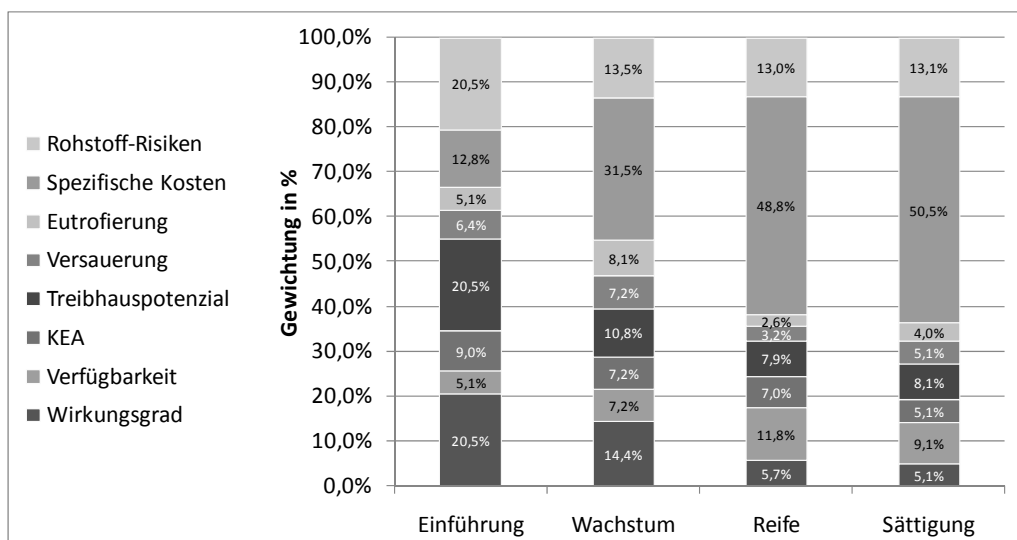


Abbildung 3: Gewichtung der Kriterien in Abhängigkeit der Lebenszyklusphasen (eigene Darstellung in Anlehnung an Oberschmidt 2009)

Neben der Gewichtung ist darüber hinaus eine Präferenzfunktion je Kriterium festzulegen. Für das Fallbeispiel werden für alle Kriterien Gauss'sche Präferenzfunktionen gewählt, da mit diesen besonders stabile Ergebnisse erzielt werden können (Brans et al. 1986):

$$p_j(a_i^*, a_i) = 1 - e^{-\frac{f_j(a_i^*) - f_j(a_i)}{2\sigma_j^2}}$$

Der Parameter σ_j wird hier festgelegt durch:

$$\sigma_j = \frac{f_j^{\max} - f_j^{\min}}{2}$$

Bevor nun die Auswertung erfolgt, sind die einzelnen Technologien den Lebenszyklusphasen zuzuordnen (Tabelle 5). Der Einführungsphase wird von den betrachteten Technologien nur

die Photovoltaik-CIS-Anlage (CuInSe_2 – Kuper-Indium-Diselenid) zugeordnet, da es sich hierbei um eine relativ neue Variante der Photovoltaik handelt, die derzeit noch im Pilot- bzw. Erprobungsstadium ist (Briem et al. 2004). Bei den Technologien, die in Jühnde derzeit eingesetzt werden, handelt es sich grundsätzlich um hinreichend erprobte und ausgereifte Techniken (Ruppert et al. 2008). Dementsprechend werden der mit Heizöl betriebene Spitzenlastkessel sowie das Holzhackschnitzel-Heizwerk der Reifephase zugeordnet, während das Biogas-BHKW (Blockheizkraftwerk) der Wachstumsphase zugeteilt wird, da bei dieser Technik in Zukunft noch größere Entwicklungsmöglichkeiten gesehen werden. Der Wachstumsphase werden weiterhin die Windkraftanlagen und das GuD-Kraftwerk (kombiniertes Gas- und Dampfturbinenkraftwerk) zugeordnet. Beim Gas-Brennwertkessel und den beiden betrachteten Kohlekraftwerken wird davon ausgegangen, dass die eingesetzten Technologien in der Reifephase sind. Lediglich beim Heizöl-Kessel wird angenommen, dass dessen Entwicklungsstadium der Sättigungsphase entspricht, da diese zunehmend durch andere, bspw. Anlagen auf Basis erneuerbarer Energien, ersetzt werden. Die einzelnen Technologien werden im Folgenden entsprechend der Gewichtung für die Ihnen zugeordnete Lebenszyklusphase durch den PROMETHEE-Algorithmus vergleichend betrachtet.

Tabelle 5: Zuordnung der bewerteten Technologien zu Lebenszyklus-Phasen (eigene Darstellung)

Versorgungskonzept	Kurzbezeichnung	Einführung	Wachstum	Reife	Sättigung
Kombi 1 (Biomasse-Konzept Jühnde)	BioG-BHKW		X		
	HHS-HW			X	
	Öl-SpIK			X	
Kombi 2 (Erneuerbare + ErdG)	Wind-Park		X		
	PV-CIS	X			
	GuD-ErdG		X		
	ErdG-HzG			X	
Kombi 3 (Fossile)	StK-Kw			X	
	BrK-Kw			X	
	Öl-HzG				X

3.4 Ergebnisse aus der Fallstudie

In Abbildung 4 sind die aggregierten Präferenzflüsse der einzelnen Technologien für die Entscheidungsmatrix (Tabelle 4) dargestellt, d.h. ϕ^+ (Phi Plus) als Maß für die Stärken und ϕ^- (Phi Minus) als Maß für die Schwächen im Vergleich zu den anderen Technologien sowie der Nettofluss $\phi = \phi^+ - \phi^-$ (Phi Netto). Bei der Stromerzeugung weist das Braunkohlekraftwerk das höchste Maß an Stärken auf, was insbesondere auf die geringen spezifischen Gesamtkosten zurückzuführen ist, die darüber hinaus aufgrund der Zuordnung der Technologie zur Reifephase besonders hoch gewichtet werden. Jedoch sind hier zukünftig mögliche Brennstoffpreissteigerungen sowie Preise für CO_2 -Zertifikate in Stromgestehungskosten nicht berücksichtigt. Bei der Windkraftanlage und der GuD-Anlage ist das Maß für Stärken nur geringfügig kleiner im Vergleich zum Braunkohle-Kraftwerk. Bei

diesen drei Technologien (Braunkohlekraftwerk, Windkraft und GuD) ist der Nettofluss positiv. Bei PV-CIS und dem Steinkohlekraftwerk gleichen sich Stärken und Schwächen beinahe vollständig aus, so dass nur ein geringfügig positiver Nettofluss resultiert. Beim Biogas-BHKW zur Stromerzeugung überwiegen jedoch die Schwächen die Stärken, so dass ein negativer Nettofluss resultiert.

Dementsprechend steht in der Rangfolge der Technologien zur Stromerzeugung das Braunkohlekraftwerk, gefolgt vom GuD-Kraftwerk und der GuD-Anlage. Bereits nach PROMETHEE I ergibt sich eine eindeutige Rangfolge ohne Unvergleichbarkeiten. An vierter Stelle steht das Steinkohle-Kraftwerk gefolgt von der CIS-Photovoltaik-Technologie und schließlich das Biogas-BHKW.

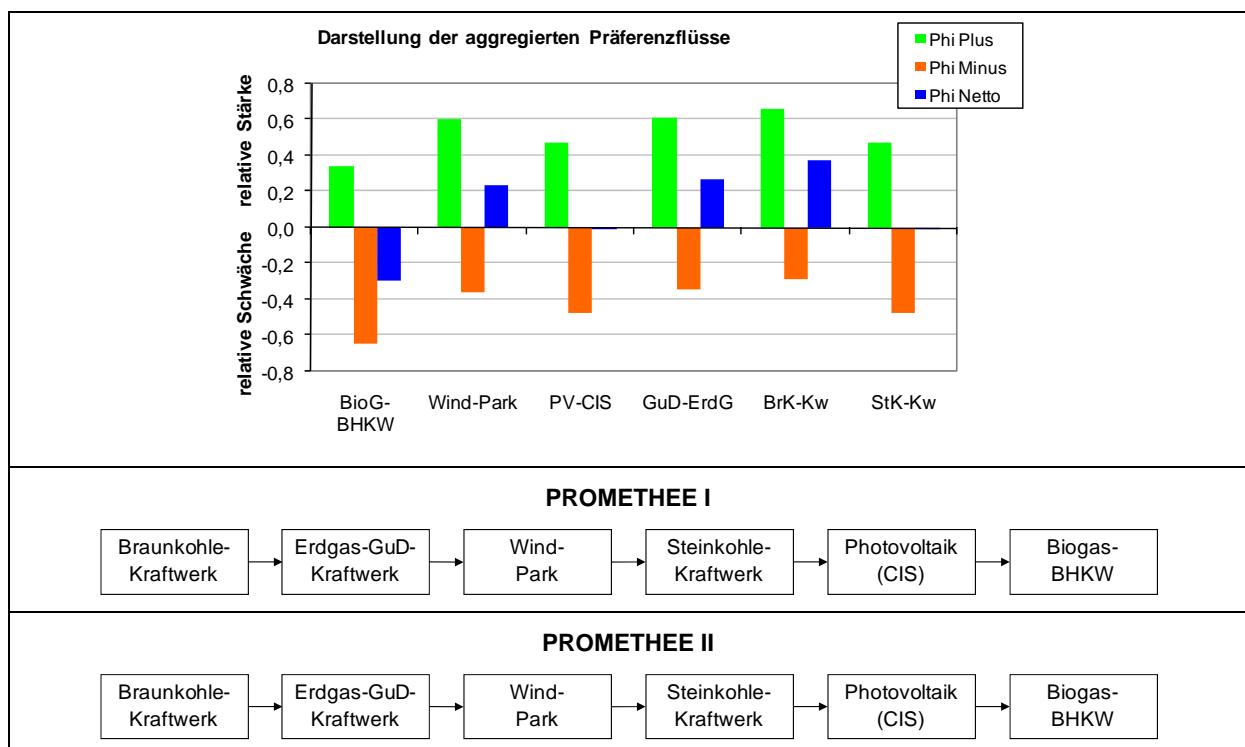


Abbildung 4: Darstellung der aggregierten Präferenzflüsse für Technologien zur Stromerzeugung und resultierende Rangfolge nach PROMETHEE I und II (eigene Darstellung)

Im Gegensatz zur Rangfolge der Technologien der Stromerzeugung steht das Biogas-BHKW in der Rangfolge der Technologien zur Wärmebereitstellung an erster Stelle, da es hier im Vergleich das höchste Maß an Stärken aufweist (Abbildung 5). Die Unterschiede zu den Ergebnissen der Stromerzeugungsseite sind durch den exergetischen Allokationsfaktor zu erklären, durch den der Großteil der Kosten und Emissionen der Biogas-Anlage der Stromseite zugerechnet werden. Nach PROMETHEE I teilt sich die Biogas-Anlage den ersten Rangplatz mit dem Holzhackschnitzel-Heizwerk, das zwar ein geringeres Phi plus aufweist, gleichzeitig aber auch ein etwas geringeres Phi Minus. Die Heizölkessel (Spitzenlastkessel und Haushaltskessel) schneiden bei den Technologien zur Wärmebereitstellung am schlechtesten ab und weisen einen deutlich negativen Nettofluss auf. Die Erdgas-Heizung (Brennwertkessel) liegt mit einem positiven Nettofluss im Mittelfeld

der Bewertung.

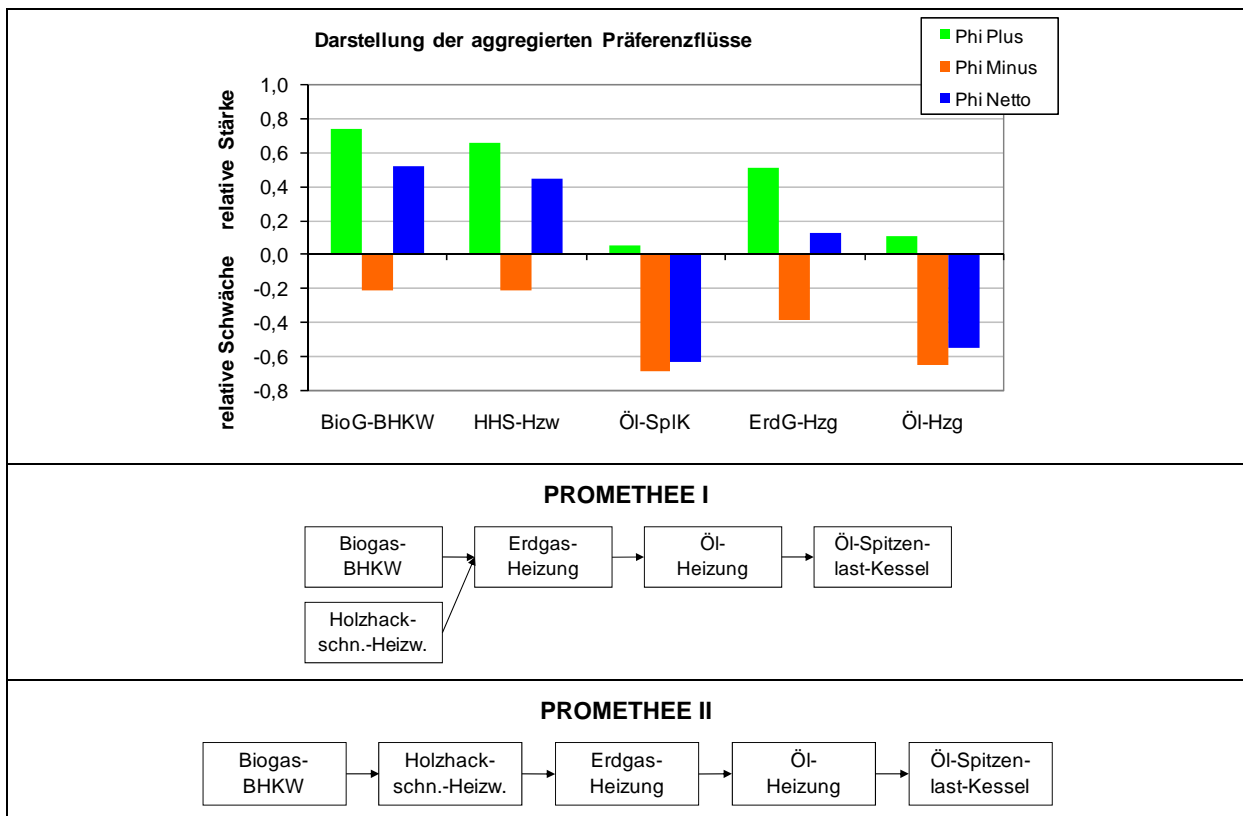


Abbildung 5: Darstellung der aggregierten Präferenzflüsse für Technologien zur Wärmebereitstellung und resultierende Rangfolge nach PROMETHEE I und II (eigene Darstellung)

Von Interesse ist nun, inwieweit die Ergebnisse durch die unterschiedlichen Gewichtungen je Lebenszyklusphase beeinflusst werden. Bezüglich der Technologien zur Wärmeerzeugung (Abbildung 6, rechts) ist zu beobachten, dass die Rangfolge sehr stabil ist, d.h. das Biogas-BHKW schneidet über den gesamten Bereich am besten ab, das Holzhackschnitzelwerk steht an zweiter Stelle, die Erdgas-Heizung an dritter Stelle. Die Öl-Heizung und der Öl-Spitzelastkessel weisen über den gesamten Bereich einen negativen Nettofluss auf.

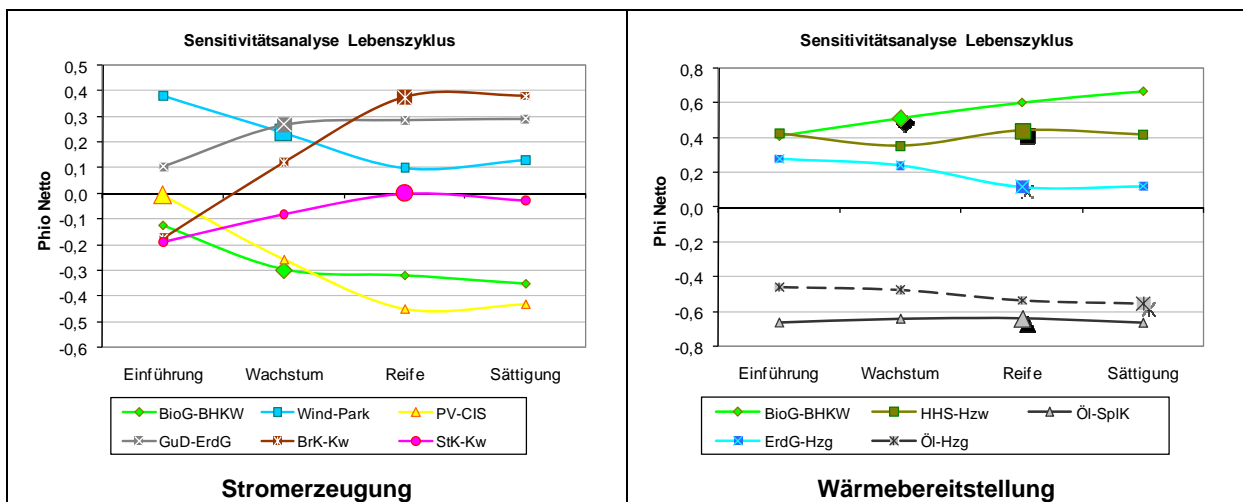


Abbildung 6: Abhängigkeit der Ergebnisse von den Gewichtungen je Lebenszyklusphase (aktuelle

Lebenszyklusphase durch großes Symbol gekennzeichnet) (eigene Darstellung)

Auf der Seite der Stromerzeugung (Abbildung 6, links) hängen die Ergebnisse stärker von der Zuordnung zu den unterschiedlichen Lebenszyklusphasen ab. Wäre das Braunkohlekraftwerk mit den aktuellen Technologiedaten der Einführungsphase zugeordnet, würde es mit am schlechtesten abschneiden. Dies liegt darin begründet, dass für diese Phase die Umweltauswirkungen höher und die Kosten geringer gewichtet werden. Somit reichen bei der relativen Gewichtung der Kriterien entsprechend der Einführungsphase die Vorteile des Braunkohle-Kraftwerkes hinsichtlich der Kosten nicht aus, um dessen Nachteile bezüglich der Umweltauswirkungen zu kompensieren. Nur bei sehr hoher Gewichtung der Kosten (Reife- und Sättigungsphase) schneidet das Braunkohlekraftwerk am besten ab. Das Ergebnis der PV-CIS-Technologie ist schlechter mit fortschreitendem Lebenszyklus. Dies bedeutet, dass bei dieser Technologie in Zukunft Kostensenkungspotenziale realisiert werden müssen, damit diese auch in der Reife- und Sättigungsphase im Vergleich mit den anderen Technologien bestehen kann. Auch das Ergebnis des Biogas-BHKWs ist bei Zuordnung zu früheren Phasen, wenn die Kosten geringer gewichtet werden, tendenziell besser. Die Windkraftanlage und das GuD-Kraftwerk weisen über den gesamten Bereich einen positiven Nettofluss auf, wobei in der Einführungsphase die Windkraftanlage ein deutlich besseres Ergebnis erzielt. Das Ergebnis des Steinkohlekraftwerks liegt über den gesamten Bereich unterhalb des Ergebnisses des Braunkohle-Kraftwerkes.

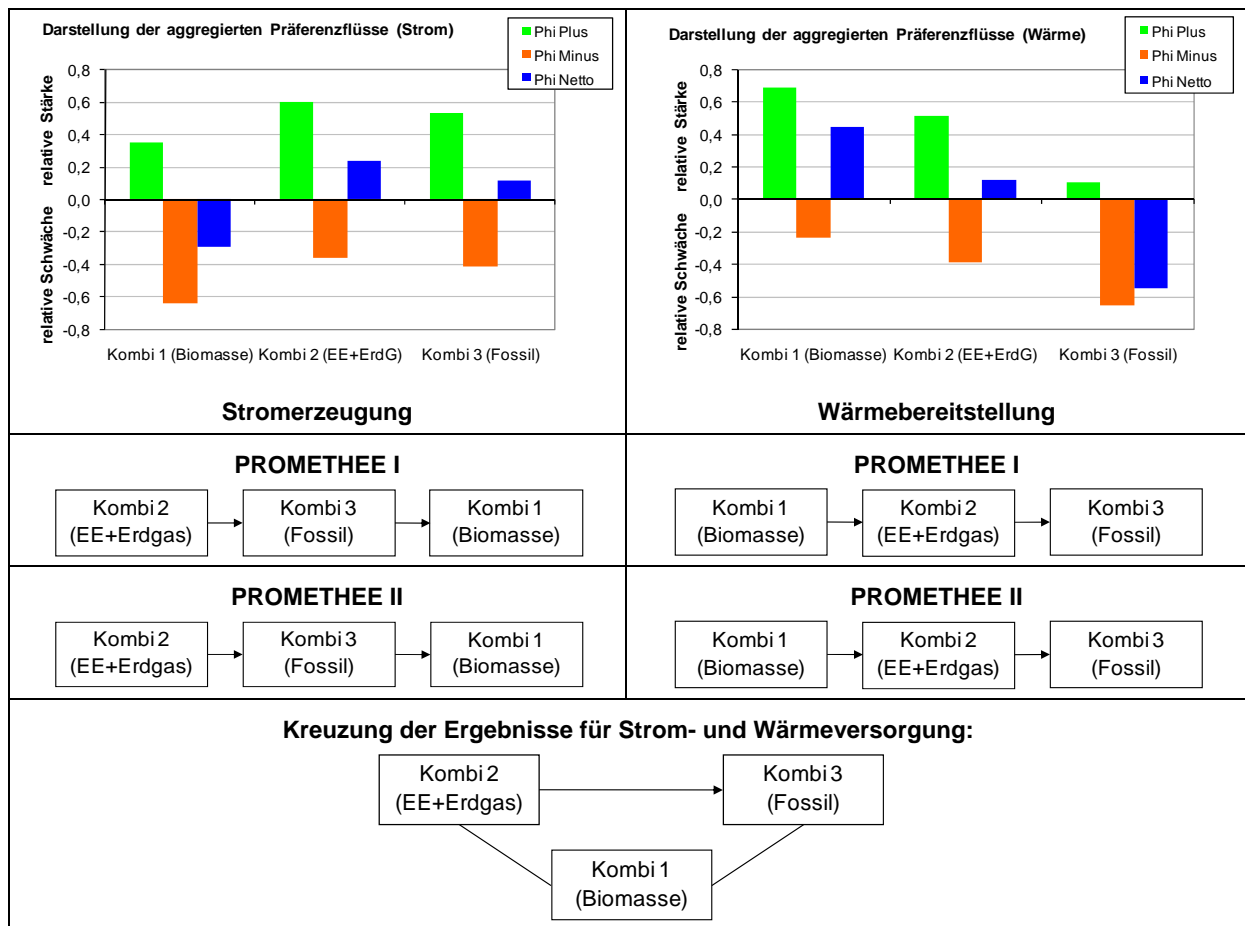


Abbildung 7: Vergleich der Versorgungskonzepte (eigene Darstellung)

Aus dem Vergleich der einzelnen Technologien wird jedoch nicht unmittelbar ersichtlich, welches Versorgungskonzept am besten zu bewerten ist. Daher werden in einem weiteren Auswertungsschritt die Einzelbewertungen entsprechend den zuvor beschriebenen Kombinationen (Tabelle 1) miteinander verknüpft. Dazu wird aus den aggregierten Präferenzflüssen der einzelnen Technologien entsprechend den Anteilen an der Strom- bzw. Wärmeversorgung eine gewichtete Summe gebildet. Als Ergebnis erhält man Phi Plus und Phi Minus für jedes Gesamt-Versorgungskonzept (Abbildung 7).

Das Versorgungskonzept, in dem Erneuerbare Energien wie Wind und Photovoltaik mit Erdgas-basierten Technologien (GuD-Anlagen für Strom) kombiniert werden (Kombi 2), weist bei der Stromerzeugung insgesamt die größten Stärken und die wenigsten Schwächen auf. Die für dieses Konzept gewählte Wärme-Technologie (Gas-Brennwertkessel) kommt im Vergleich der Wärmetechnologien auf den zweiten Platz. An zweiter Stelle steht bei der Stromerzeugung das fossile Versorgungskonzept, das jedoch bei der Wärmeerzeugung am schlechtesten abschneidet (Kombi 3). Das Biomasse-Konzept (Kombi 1) schneidet zwar hinsichtlich der Stromerzeugung am schlechtesten ab, zeigt aber auf der Wärmeseite das beste Ergebnis.

In Analogie zur Generierung der PROMETHEE I Ordnung im sechsten Schritt des PROMETHEE-Ablaufschemas kann durch Kreuzung (set intersection) der Ergebnisse für die

Strom- und für die Wärmeseite eine Gesamttrangfolge für die Strom- und Wärmeversorgung abgeleitet werden:

- Kombi *a* wird Kombi *b* vorgezogen wenn:
 - Kombi *a* für die Strom- und für die Wärmebereitstellung der Kombi *b* vorgezogen wird, oder
 - Kombi *a* für die Stromversorgung vorgezogen wird und Kombi *a* und *b* für die Wärmeversorgung als gleichwertig angesehen werden, oder
 - Kombi *a* und *b* für die Stromversorgung als gleichwertig angesehen werden und Kombi *a* für die Wärmeversorgung vorgezogen wird.
- Kombi *a* und *b* sind gleichwertig, wenn sie sowohl für die Strom- als auch für die Wärmeversorgung als gleichwertig angesehen werden.
- In allen anderen Fällen sind Kombi *a* und *b* unvergleichbar.

Im vorliegenden Fallbeispiel lassen sich daraus folgende Rangordnungen ableiten (Abbildung 7, unten):

- Kombi 1 (Biomasse) und 2 (Erneuerbare + Gas) sind unvergleichbar, da für die Stromversorgung Kombi 2, für die Wärmeversorgung hingegen Kombi 2 vorgezogen wird.
- Kombi 1 (Biomasse) und 3 (Fossil) sind unvergleichbar, da für die Stromversorgung Kombi 3, für die Wärmeversorgung hingegen Kombi 2 vorgezogen wird.
- Kombi 2 (Erneuerbare) wird 3 (Fossil) eindeutig vorgezogen, da ersteres Konzept sowohl für die Strom- als auch für die Wärmeversorgung besser abschneidet.

Werden die Präferenzflüsse für die Strom- und Wärmeseite je Versorgungskonzept addiert, erhält man die in gezeigte vollständige Rangfolge, in der Kombi 2 (Erneuerbare + Gas) an erster, Kombi 1 (Biomasse) an zweiter und das fossile Konzept (Kombi 3) an letzter Stelle steht (Abbildung 8).

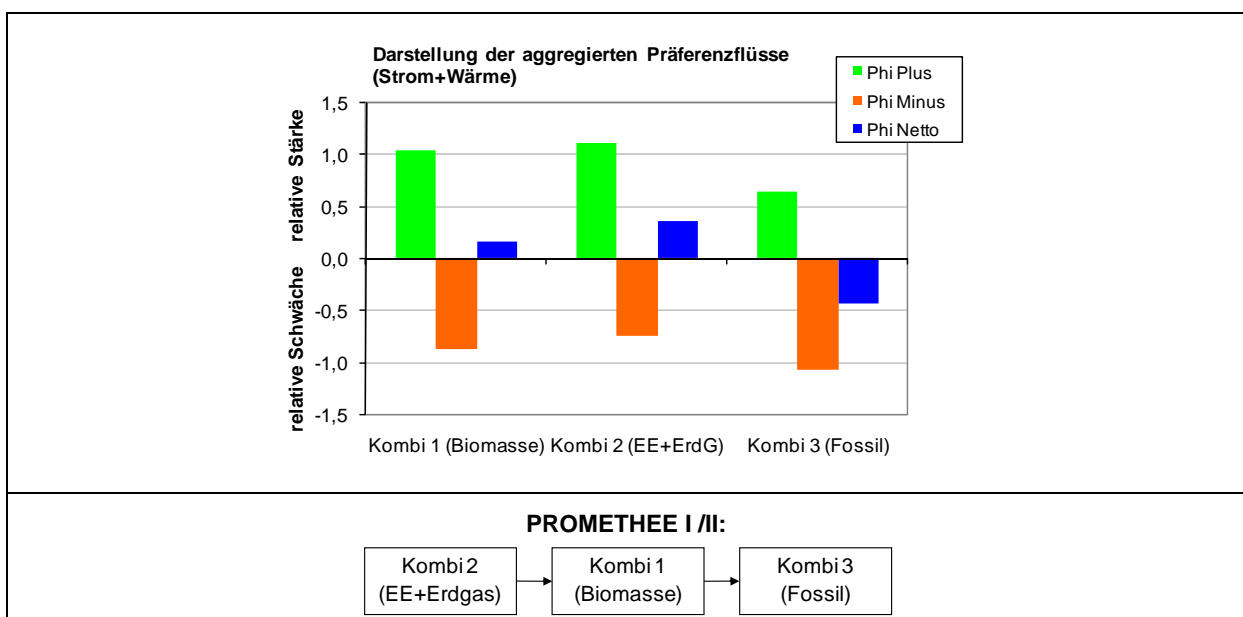


Abbildung 8: Rangfolge der Gesamtversorgungskonzepte bei Addition der Präferenzflüsse für die Strom- und Wärmeseite (eigene Darstellung)

4 Zusammenfassung

Eine Methode zur Lebenszyklus-orientierten multikriteriellen Bewertung wurde vorgestellt und auf ein Beispiel der Energieversorgung angewendet. Der modifizierte PROMETHEE-Ansatz ermöglicht die Berücksichtigung variierender Präferenzen aufgrund unterschiedlicher Entwicklungsstadien von Technologien. Die Ergebnisse des Fallbeispiels zeigen, dass Versorgungskonzepte basierend auf Erneuerbaren Energien konkurrenzfähig zu Konzepten basierend auf fossilen Brennstoffen sind. Eine multikriterielle und Lebenszyklus-orientierte Bewertungsmethode ermöglicht zum einen eine über die reine Wirtschaftlichkeit hinaus gehende Bewertung und trägt zum anderen den unterschiedlichen Entwicklungsstadien der zur Verfügung stehenden Technologien Rechnung.

Zwar schneidet im Fallbeispiel das Braunkohlekraftwerk zur Stromerzeugung insbesondere aufgrund der geringen spezifischen Gesamtkosten besonders gut ab, jedoch sind in den Berechnungen Preise für CO₂-Zertifikate sowie mögliche Preissteigerungen für fossile Brennstoffe in der Zukunft nicht berücksichtigt. Unter den Erneuerbaren zeigt im Vergleich Wind zur Stromerzeugung das beste Ergebnis sowie die Biogas-Anlage und das Holzhackschnitzel-Heizwerk das beste Ergebnis für die Wärmeerzeugung. Würde man zukünftige Kostensenkungen insbesondere hinsichtlich der Investitionen bei Erneuerbaren beispielsweise aufgrund von Lern- und Skaleneffekten zusätzlich berücksichtigen, könnte dies das Ergebnis der Erneuerbaren im Vergleich zu den fossilen Brennstoffen weiter verbessern. Hinsichtlich der Umweltauswirkungen ist offensichtlich, dass Technologien auf Basis erneuerbarer Energieträger bereits heute wesentliche Vorteile aufweisen und auch in Zukunft aufweisen werden.

In zukünftigen Arbeiten sollte zum einen hinsichtlich der Methodik die Hypothese zeitlich veränderlicher Präferenzen in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums einer Technologie überprüft werden. Darüber hinaus sollten die mathematischen Implikationen der gleichzeitigen Anwendung unterschiedlicher Gewichtungen genauer analysiert werden. Des Weiteren scheint eine Gegenüberstellung zu anderen Methoden sinnvoll, mit denen zeitlich veränderliche Präferenzen im Rahmen eines (multikriteriellen) Entscheidungsprozesses modelliert werden können. Gegenstand weiterer Forschungen könnte zudem die Akzeptanz der Entscheidungsträger bei der Umsetzung der Methode in die Praxis sein. Zum anderen sollte im Zusammenhang mit den zu evaluierenden Energietechniken der Einfluss zukünftig erwarteter Brennstoffpreisentwicklungen sowie der Preise für CO₂-Zertifikate auf das Ergebnis genauer untersucht werden, beispielsweise auf der Grundlage einer Szenario-basierten Analyse. Zudem ist die explizite Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungspotenziale, zum Beispiel auf Basis erwarteter Leistungssteigerungs- und Kostensenkungspotenziale, von Interesse.

Literatur

- Ahl, C.; Eigner-Thiel, S.; Girschner, W.; Karpenstein-Machan, M.; Roland, F.; Ruppert, H.; Ruwisch, V.; Sauer, B.; Scheffer, K.; Schmuck, P. (2007): Bioenergiedörfer - Dörfer mit Zukunft. Projektgruppe Bioenergiedörfer der Georg-August-Universität Göttingen; Interdisziplinäres Zentrum für Nachhaltige Entwicklung (IZNE) der Universität Göttingen (Hrsg.).
- Bartels, M.; Gatzen, C.; Lindenberger, D.; Müsgens, F.; Peek, M.; Seeliger, A.; Steuber, D.; Wissen, R.; Hofer, P.; Kirchner, A.; Scheelhaase, M.; Schlesinger, M. (2005): Energiereport IV: Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030. Energiewirtschaftliche Referenzprognose. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit. Schlussbericht. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI); Prognos AG Basel (Hrsg.). Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit.
- Behzadian, M.; Kazemzadeh, R.B.; Albadvi, A.; Aghdasi, M. (2009): PROMETHEE: A Comprehensive Literature Review on Methodologies and Applications. In: European Journal of Operational Research, (accepted manuscript).
- Belton, V.; Stewart, T.J. (2002): Multiple Criteria Decision Analysis: an integrated approach. Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers.
- BGR (2009): Bundesrepublik Deutschland Rohstoffsituation 2007. Bundesanstalt für Geowissenschaften (BGR) (Hrsg.), Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien, Band XXXVII.
- BMWi (2009a): Energie in Deutschland. Trends und Hintergründe zur Energieversorgung in Deutschland. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hrsg.).
- BMWi (2009b): Energiedaten - nationale und internationale Entwicklung. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Online: <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/energiestatistiken.html> (Stand: 29.05.2009b).
- Brans, J.P.; Vincke, P.; Mareschal, B. (1986): How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. In: European Journal of Operational Research, 24 (2), S. 228-238.
- Brans, J.-P.; Mareschal, B. (2005): PROMETHEE Methods. In: Figueira, J.; Greco, S.; Ehrgott, M. (Hrsg.): Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surevys. New York: Springer, S. 163-195.
- Briem, S.; Blesl, M.; Fahl, U.; Ohl, M.; Moerschner, J.; Eltrop, L.; Voß, A.; Viebahn, P.; Krewitt, W.; Gürzenich, D.; Tryfonidou, R.; Wagner, H.-J.; Corradini, R.; Richter, S. (2004): Lebenszyklusanalysen ausgewählter zukünftiger Stromerzeugungstechniken. Ein Forschungsvorhaben mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieverwendung (IER) Universität Stuttgart; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Stuttgart; Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft (LEE) Ruhr-Universität Bochum; Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) München (Hrsg.). Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI) e.V.
- CONSENTEC; EWI; IAEW (2008): Analyse und Bewertung der Versorgungssicherheit in der Elektrizitätsversorgung, Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Abschlussbericht vom 30.05.2008.

CONSENTEC Consulting für Energiewirtschaft und -technik GmbH;
Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI); Institut für
Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der RWTH Aachen (IAEW) (Hrsg.).

Dyer, J.S. (2005): MAUT - Multi Attribute Utility Theory. In: Figueira, J.; Greco, S.; Ehrgott, M.
(Hrsg.): Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. New York:
Springer, S. 265-295.

Eigner-Thiel, S.; Geldermann, J. (2009): Planungswerkstätten zur
Entscheidungsunterstützung bei der Realisierung eines Bioenergiedorf-Konzeptes.
Workshop der Arbeitsgruppen "Entscheidungstheorie und -praxis" und "OR im
Umweltschutz" der Gesellschaft für Operations Research (GOR) e.V., 11.-
13.03.2009, Göttingen, Gesellschaft für Operations Research (GOR) e.V.

Feddeck, P. (2003): Was ist Energie. basisEnergie 15, BINE Informationsdienst -
Fachinformationszentrum (FIZ) Karlsruhe - Gesellschaft für wissenschaftlich-
technische Information mbH. Bonn, Eggenstein-Leopoldshafen.

Figueira, J.; Greco, S.; Ehrgott, M. (2005): Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art
Surveys. New York: Springer.

Frondel, M.; Grösche, P.; Huchtemann, D.; Oberheitmann, A.; Peters, J.; Angerer, G.;
Sartorius, C.; Buchholz, P.; Wagner, M. (2007): Trends der Angebots- und
Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Endbericht, Forschungsprojekt Nr.
09/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Rheinisch-
Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI) Essen; Fraunhofer Institut für
System- und Innovationsforschung (ISI) Karlsruhe; Bundesanstalt für
Geowissenschaften (BGR) (Hrsg.).

Geldermann, J. (1999): Entwicklung eines multikriteriellen
Entscheidungsunterstützungssystems zur integrierten Technikbewertung.
Dissertation, Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) /
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU) Universität Karlsruhe
(TH). Düsseldorf: VDI.

Guinée, J.B.H.; de Bruijn, H.; van Duin, R.; Huijbregts, M.A.J.; Lindejer, E.; Roorda, A.A.H.;
van der Ven, B.L.; Weidema, B.P. (2002): Handbook on Life Cycle Assessment.
Operational Guide to the ISO Standards, Guinée, J.B. (Hrsg.). Dordrecht, Boston,
London: Kluwer Academic Publishers.

O.V. (2009): Konkurrenz im Heizungskeller. In: energiespektrum (1-2), S. 26-27.

Oberschmidt, J. (2009): Multikriterielle Entscheidungsunterstützung zur Identifikation
aussichtsreicher Techniken für die zukünftige Energieversorgung. Workshop der
Arbeitsgruppen "Entscheidungstheorie und Praxis" und "OR im Umweltschutz" der
Gesellschaft für OperationsResearch e.V., Gesellschaft für Operations Research
(GOR) e.V.: Shaker.

Oberschmidt, J.; Geldermann, J.; Ludwig, J. (2009): Entscheidungsunterstützung zur
Auswahl von Energietechnologien unter Berücksichtigung zeitlich veränderlicher
Präferenzen. 6. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien: Energie,
Wirtschaft und technologischer Fortschritt in Zeiten hoher Energiepreise, Institut für
Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der TU Wien (EAEW); Austrian
Association for Energy Economics (AAEE).

Perl, E. (2007): Grundlagen des Innovations- und Technologiemanagements. In: Strebel, H.
(Hrsg.): Innovations- und Technologiemanagement. Wien: Facultas Verlags- und

Buchhandels AG, S. 17-52.

- Pfeiffer, W.; Bischof, P. (1981): Produktlebenszyklen - Instrument jeder strategischen Produktplanung. In: Planung und Kontrolle - Probleme der strategischen Unternehmensführung. München: Verlag Vahlen, S. 133-165.
- Reichmuth, M.; Bohnenschäfer, W.; Daniel, J.; Fröhlich, N.; Lindner, K.; Müller, M.; Weber, A.; Witt, J.; Seefeldt, F.; Kirchner, A.; Michelsen, C. (2006): Auswirkungen der Änderungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes hinsichtlich des Gesamtvolumens der Förderung, der Belastung der Stromverbraucher sowie der Lenkungswirkung der Fördersätze für die einzelnen Energiearten. Endbericht. Institut für Energetik und Umwelt (IE) gGmbH Leipzig; Prognos AG Basel (Hrsg.). Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi).
- Rempel, H.; Schmidt, S.; Schwarz-Schampera, U. (2007): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2006. Jahresbericht 2006. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hrsg.).
- Roy, B. (1980): Selektieren, Sortieren und Ordnen mit Hilfe von Prävalenzrelationen: Neue Ansätze auf dem Gebiet der Entscheidungshilfe für Multikriterien-Probleme. In: Schmalenbachs Zeitschrift für Betriebswirtschaftliche Forschung, 32, S. 465-497.
- Ruppert, H.; Eigner-Thiel, S.; Girschner, W.; Karpenstein-Machan, M.; Roland, F.; Ruwisch, V.; Sauer, B.; Schmuck, P. (2008): Wege zum Bioenergiedorf. Leitfaden für eine eigenständige Wärme- und Stromversorgung auf Basis von Biomasse im ländlichen Raum. Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e.V.(FNR) (Hrsg.).
- Saaty, T.L. (1980): The Analytic Hierarchy Process. New York: McGraw-Hill.
- Saaty, T.L. (1990): The Analytic Hierarchy Process. In: European Journal of Operational Research, 48, S. 9-26.
- Saaty, T.L. (2005): The Analytic Hierarchy and Analytic Network Process for the Measurement of Intangible Criteria and for Decision Making. In: Figueira, J.; Greco, S.; Ehrgott, M. (Hrsg.): Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. New York: Springer, S. 345-407.
- Saaty, T.L.; Vargas, L.G. (2006): Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with benefits, Opportunities, Costs and Risks. International Series in Operations Research & Management Science, Hillier, F.S. New York: Springer.
- Siegwart, H.; Senti, R. (1995): Product Life Cycle Management. Die Gestaltung eines integrierten Produktlebenszyklus. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- Siskos, Y. (2005): UTA Methods. In: Figueira, J.; Greco, S.; Ehrgott, M. (Hrsg.): Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. New York: Springer, S. 297-343.
- Staiß, F. (2007): Jahrbuch Erneuerbare Energien 2007 (Ausgabe auf CD-ROM), Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg (SEf) (Hrsg.). Radebeul: Bieberstein.
- Statistik der Kohlenwirtschaft e.V. (2009): Entwicklung ausgewählter Energiepreise – Jahreswerte Euro. Statistik der Kohlenwirtschaft e.V. Online: <http://www.kohlenstatistik.de/home.htm> (Stand: 28.05.2009).
- Szargut, J.; Morris, D.R.; Steward, F.R. (1988): Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes. Berlin u.a.: Springer.

- Theis, K.A.; Langnickel, U.; Meier, H.-J.; Mohrbach, L.; Weßelmann, C. (2008): Zahlen und Fakten zur Stromversorgung 2008. VGB PowerTech e.V. (Hrsg.).
- Tsoutsos, T.; Drandaki, M.; Frantzeskaki, N.; Iosifidis, E.; Kiosses, I. (2009): Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete. In: Energy Policy, 37 (5), S. 1587-1600.
- UBA; Öko-Institut e.V. (2009): PROBAS: Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente. Umweltbundesamt (UBA), Dessau Roßlau; Institut für angewandte Ökologie (Öko-Institut e.V.). Online: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php?> (Stand: 18.05.2009).
- WEC (1992): Energiewörterbuch. Jouve Systemes d'information, World Energy Council (WEC) (Hrsg.).
- Zimmermann, H.-J.; Gutsche, L. (1991): Multi-Criteria Analyse: Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen, Heidelberger Lehrtexte Wirtschaftswissenschaften, Berlin, Heidelberg: Springer.