Nachhaltigkeitsbewertung kommunaler Wärmeversorgungsoptionen

Methodenbeschreibung

Grafik: WERNERWERKE GbR, Berlin

Wärmewende in der kommunalen Energieversorgung (KoWa)

Unterstützung von EVU bei der Erarbeitung intersektoral kombinierter kommunaler Einsatzoptionen regenerativer Energiequellen, KW(K)K, industrieller Abwärme und Effizienzmaßnahmen zur Umsetzung einer dezentralen, ökologischen und bezahlbaren Wärmeversorgung der Zukunft

kowa
...die Wärmewende im Quartier gestalten

Herausgeber

IZES gGmbH - Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (Verbundkoordinator)
Altenkesseler Str. 17 (Geb. A1)
66115 Saarbrücken

Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin (HWR)
Campus Lichtenberg, Haus 5, Alt-Friedrichsfelde 60
10315 Berlin

Hochschule Osnabrück (HSO)
Albrechtstr. 30
49009 Osnabrück

Autor*innen

Prof. Dr. Katharina Gapp-Schmeling (IZES)

Florian Hewelt (HWR)
Melanie Meyer (HSO)
Prof. Dr. Holger Rogall (HWR)
Dr. Christoph Schmidt (IZES)
Christian Waldhoff (HSO)
Dr. Anna Welz (HWR)
Bernhard Wern (IZES)

KoWa-Berichte

Die Zwischenberichte des Forschungsprojektes KoWa dienen als Diskussionspapiere und sollen den jeweiligen Zwischenstand der interessierten Öffentlichkeit zugänglich machen. Sie spiegeln nicht notwendigerweise die Positionen aller Projektpartner wider.

KoWa wird im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms unter der Fördernummer 03EN3007E gefördert.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS IV
RECHTSNORMENVERZEICHNIS IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS V
TABELLENVERZEICHNIS V
ÜBERSICHTENVERZEICHNIS VI
VORBEMERKUNGEN 1

1 Einleitung: Hinweise zur Methodenbeschreibung 1
2 Entwicklung des Bewertungsrahmens 3

BEWERTUNGSKRITERIEN UND OPERATIONALISIERUNG 7

3 Ökologische Dimension 7
3.1 Treibhausgasemissionen 7
3.2 Kumulierter Stoffaufwand 11
3.3 Regenerationsrate erneuerbarer Ressourcen 13
3.4 Schadstoffemissionen 16
3.5 Naturverträglichkeit 18
4 Ökonomische Dimension 20
4.1 Regionale Wertschöpfung 20
4.2 Redundanz der Wärmequelle 22
4.3 Geringe Wärmegestehungskosten 23
4.4 Importquote von Energieträgern und Betriebsstoffen 25
4.5 Finanzielle Planbarkeit 26
5 Sozial-kulturelle Dimension 28
5.1 Erwartete Akzeptanz vor Ort 28
5.2 Reichweite der eingesetzten Ressourcen 29
5.3 Komplexität der Entscheidungsstrukturen 32
5.4 Konfliktpotential der eingesetzten Ressourcen 32
5.5 Risikoeinschätzung: Schadenserwartung und -ausmaß 35

SCHLUSSBEMERKUNGEN 38

6 Ergebnisdarstellung und Interpretationsmöglichkeiten 38

LITERATURVERZEICHNIS 42
ANHANG 47
EXEMPLARISCHE BEWERTUNGSTABELLEN FÜR EIN FIKTIVES CLUSTER 47

Abkürzungsverzeichnis

AP .....Arbeitspaket
BGR .....Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
CPI.....Corruption Perception Index
EE .....Erneuerbare Energien
EJ.....Exajoule
EU ETS..... European Union Emissions Trading System
GEMIS ..... Globales Emissions-Modell integrierter Systeme
KoWa .....Wärmewende in der kommunalen Energieversorgung
KSA.....Kumulierter Stoffaufwand
KUP .....Kurzumtriebsplantagen
LCA.....Life-Cycle-Assessment
nEHS.....nationales Emissionshandelssystem
PEF .....Primärenergiefaktor
SDG .....Sustainable Development Goals
SO2eq .....Schwefeldioxidäquivalenten
TMC .....Total Material Consumption
TMR .....Total Material Requirement
WEBEE-ModellIÖW-Modell zur Ermittlung von Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekten
WGK.....Wärmegestehungskosten

Rechtsnormenverzeichnis

BEHG..... Brennstoffemissionshandelsgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2728), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 3. November 2020 (BGBl. I S. 2291) geändert worden ist
LWaldG ..... Gesetz Nr. 1069 - Waldgesetz für das Saarland

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Boxplot der GEMIS-Prozessdaten in kg CO_{2eq} / MWh für die spezifischen Emissionen der Wärmeversorgungstechnologien. 9
Abbildung 2: Boxplot der GEMIS-Prozessdaten in kg / MWh für den kumulierten Stoffaufwand der Wärmeversorgungstechnologien. 12
Abbildung 3: Boxplot der GEMIS-Prozessdaten für das Versauerungspotential der Wärmeversorgungstechnologien in kg SO_{2eq}/ MWh. 17
Abbildung 4: Bandbreite von Wärmegestehungskosten nachhaltiger Wärmelösungen und Kosten fossiler Versorgung als Vergleichswerte. 24
Abbildung 5: Matrix zur Bewertung des Konfliktpotentials der eingesetzten Energieträger. Eigene Darstellung. 34
Abbildung 6: Konfliktpotential verschiedener Wärmeversorgungslösungen am Beispiel. 35
Abbildung 7: Risikomatrix. Die Zahlen in jedem Feld geben die Bewertungsstufe an. 37
Abbildung 8: KoWa-Stadt. 39
Abbildung 9: Vergleich fiktiver Versorgungsoptionen im Profilliniendiagramm. 40
Abbildung 10: Vergleich der fiktiven Option Zukunftsnetz (Strommix heute vs. 2050 KS 95) 41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spezifische CO_2-Emissionen der Fernwärmeerzeugung. 8
Tabelle 2: Beispielrechnung zur Gewichtung der spezifischen Emissionen 10
Tabelle 3: Beispielrechnung zur Gewichtung des kumulierten Stoffaufwandes 13
Tabelle 4: Beispielrechnung für die Gewichtung des Versauerungspotentials 18
Tabelle 5: Kostenabschätzung für eine beispielhafte Wärmeversorgungsoption mit 33 % Solarthermie und 67 % Gas Brennwert 25
Tabelle 6: statische Reichweite fossiler Energieträger 30
Tabelle 7: statische Reichweite fossiler Energieträger nach dem THGE-Budget. 31
Tabelle 8: Importanteile für Deutschland und Erdgas nach Ländern 2020 33
Tabelle 9: Berechnung des gewichteten Konflikrisikos (Beispiel Erdgas). 33
Tabelle 10: Berechnung des gewichteten Konflikrisikos einer Versorgungslösung. 35

Übersichtenverzeichnis

Übersicht 1: Zentrale Problemfelder (der Energieversorgung). 3
Übersicht 2: Zielsystem, Bewertungskriterien und Indikatoren einer nachhaltigen kommunalen Wärmeversorgung 4
Übersicht 3: Bewertungsstufen und ihre Bedeutung (allgemein) 6
Übersicht 4: Bewertungskriterien in der ökologischen Dimension 7
Übersicht 5: Bewertungsstufen für das Kriterium THG-Emissionen in kg CO_{2eq} / MWh .. 10
Übersicht 6: Bewertungsstufen für das Kriterium kumulierter Stoffaufwand in kg / MWh 12
Übersicht 7: Bewertungsstufen für das Kriterium *Schadstoffemissionen in kg SO_{2eq}/ MWh* 17
Übersicht 8: Bewertungskriterien in der ökonomischen Dimension 20
Übersicht 9: Bewertungsstufen für das Kriterium *Redundanz der Energiequellen* 22
Übersicht 10: Bewertungsstufen für das Kriterium *Wärmegestehungskosten* 24
Übersicht 11: Bewertungsstufen für das Kriterium *Importquote* 26
Übersicht 12: Bewertungsstufen für das Kriterium *Finanzielle Planbarkeit* 27
Übersicht 13: Bewertungskriterien in der sozial-kulturellen Dimension 28
Übersicht 14: Bewertungsstufen für das Kriterium *Erwartete Akzeptanz vor Ort* 29
Übersicht 15: Bewertungsstufen für das Kriterium *Reichweite der eingesetzten Ressourcen* 31
Übersicht 16: Bewertungsstufen für das Kriterium *Konfliktpotential* 34
Übersicht 17: Einstufung des Schadensausmaßes 36
Übersicht 18: Einstufung der Schadenswahrscheinlichkeit 36
Übersicht 19: Idealtypische Wärmeversorgungslösungen für KoWa-Stadt (fiktives Bsp.) . 38

VORBEMERKUNGEN

1 Einleitung: Hinweise zur Methodenbeschreibung

KoWa

Die Wärmewende ist eines der zentralen Themenfelder einer zukünftig klimaneutralen Energieerzeugung und -versorgung in Deutschland. Während erneuerbarer Strom mit rund 40 Prozent den bereits größten Anteil an der deutschen Stromerzeugung stellt, stagnieren die erneuerbaren Anteile in der Wärmeversorgung seit 2010 mit 13 Prozent auf einem konstant niedrigen Niveau. Mit einer flächendeckenden Implementierung von innovativen, nachhaltigen, kommunalen Wärmeversorgungslösungen und den damit verbundenen Investitionen in die notwendigen Wärmeerzeugungs- und Wärmeinfrastrukturen können bedeutende, bisher nicht umgesetze CO2- Reduzierungspotenziale sowie für die Sektorenkopplung notwendige Flexibilisierungskapazitäten erschlossen werden.
Vor diesem Hintergrund verfolgt das Forschungsprojekt KoWa – ‚Wärmewende in der kommunalen Energieversorgung' das Ziel, kommunale Versorgungsunternehmen bei der Entwicklung von nachhaltigen, auf Defossilisierung und Steigerung der Energieeffizienz ausgerichteten Wärmeversorgungssystemen und -kooperationen wissenschaftlich zu begleiten und mit Fachexpertise zu unterstützen. Die Forschungsarbeiten konzentrieren sich dabei auf vier bundesweit verteilte Versorgungsgebiete, die im Projekt als regionale Cluster bezeichnet werden.

Einbettung in KoWa

Diese Methodenbeschreibung dient zur Erläuterung der Nachhaltigkeitsbewertung verschiedener Wärmeversorgungskonzepte im Forschungsprojekt Wärmewende in der kommunalen Energieversorgung. Im Rahmen des vierten Arbeitspaketes werden in KoWa auf Basis der Analysen in den Arbeitspakten 2 (Erhebung) und 3 (Auswertung) für jedes der sechs Untersuchungsgebiete mehrere spezifische Optionen für die künftige Wärmeversorgung entwickelt. Dabei sollen innerhalb eines Untersuchungsgebietes die verschiedenen Wärmeversorgungskonzepte anhand einer Nachhaltigkeitsbewertung verglichen werden. Zu diesem Zweck wurde bereits im Arbeitspaket (AP) 1 Voranalyse ein Bewertungsrahmen im Konsens der Projektpartner erstellt. Diese Vorarbeiten aus dem AP 1, die z.T. bereits in einem internen Bericht zusammengefasst wurden, fließen in diese Methodenbeschreibung ein. Die Bewertung berücksichtigt die drei Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales.

Transparenz und Vergleichbarkeit

Bei dem in KoWa angewendeten Bewertungsverfahren handelt es sich um eine multikriterielle Bewertung (Haase et al. 2021) der verschiedenen Konzeptoptionen, die in den Erfahrungsberichten der jeweiligen Untersuchungsgebiete zusammenfassend präsentiert wird. Ziel dieser Methodenbeschreibung ist es, Transparenz über das Vorgehen der Bewertung herzustellen und zudem ein vergleichbares Vorgehen in allen sechs Untersuchungsgebieten sicherzustellen. In den Erfahrungsberichten für die einzelnen Untersuchungsgebiete werden die Nachhaltigkeitsbewertungen der jeweiligen Wärmeversorgungskonzepte präsentiert. Die Bewertung erfolgt auf Basis der in dieser Methodenbeschreibung dargestellten Erläuterungen. Aufgrund der individuellen Schwerpunkte und Anforderungen in den jeweiligen Untersuchungsgebieten sind ggf. kleinere, regionalspezifische Anpassungen im Vorgehen notwendig. In diesen Fällen werden die Herleitung der Bewertung und die Abweichungen von der hier dargestellten Methodik im jeweiligen Erfahrungsbericht detaillierter erläutert.

1 Einleitung: Hinweise zur Methodenbeschreibung

Ziel der Bewertung

Insgesamt dient die Nachhaltigkeitsbewertung vorrangig dazu, die Stärken und Schwächen der einzelnen Konzeptoptionen innerhalb eines Untersuchungsgebietes zu identifizieren und miteinander vergleichen zu können. Auf Basis dessen soll in einem Folgeschritt eine rationale Entscheidungsfindung herbeigeführt werden. Aufgrund der gebietsspezifischen Anpassungen ist ein gebietsübergreifender Vergleich der Konzepte nur eingeschränkt möglich.

Aufbau des Methodenberichtes

Im Folgenden wird zunächst die Entwicklung des Bewertungsrahmens dargestellt. Anschließend werden die 15 Nachhaltigkeitskriterien, ihre Indikatoren und deren Operationalisierung detailliert beschrieben. Der Methodenbericht ist so aufgebaut, dass er als Nachschlagewerk für die Operationalisierung und Bewertung der einzelnen Kriterien dienen kann. Er kann sowohl bei der Erstellung der Bewertung selbst als auch zum Nachlesen von Details genutzt werden, um eine erfolgte Bewertung nachvollziehen zu können.

2 Entwicklung des Bewertungsrahmens

Kapitel 2

Ziel dieses Kapitels ist es, die Entwicklung eines Rahmens zur Nachhaltigkeitsbewertung von Wärmeversorgungsoptionen darzustellen.

Grundlage

Zur Verwirklichung der Vision einer ökologisch tragfähigen, effizienten und sozial gerechten, also nachhaltigen Energieversorgung bedarf es einer Operationalisierung. Ausgehend von dieser Vision stellt dieses Kapitel die Ableitung von qualitativen Zielkriterien dar und ordnet ihnen Bemessungsindikatoren zu. Diese Operationalisierung wird in den folgenden Kapiteln detailliert erläutert.

Ziele einer nachhaltigen Entwicklung

Eine nachhaltige Entwicklung strebt nach angemessenen ökologischen, ökonomischen und sozial kulturellen Standards für alle heute lebenden Menschen und künftigen Generationen innerhalb der natürlichen Tragfähigkeit. Vor diesem Hintergrund müssen zum Einsatz kommende Instrumente und Maßnahmen wie Wärmeversorgungslösungen nach ihrem Beitrag zu den Zielen einer nachhaltigen Entwicklung und damit zur Lösung der globalen Probleme beurteilt werden (Rogall und Gapp-Schmeling 2021: Kap. 1 & 8).
Zur Entwicklung eines entsprechenden Bewertungskonzepts kann auf den Vorarbeiten des Netzwerks Nachhaltige Ökonomie aufgebaut werden, welches 2009 gegründet wurde (heute über 300 Mitglieder*innen, davon 200 Dozent*innen und Wissenschaftler*innen). Auf der Grundlage der Arbeiten zu mehreren Monographien (Rogall 2008; 2004; 2003; 2002; 2000) wurde 2009 die erste Auflage des Fachbuchs Nachhaltige Ökonomie veröffentlicht. Es diente als Grundlage für die 10 Kernaussagen des zuvor genannten Netzwerks. Die Nachhaltige Ökonomie fasst die globalen Probleme und Megatrends im 21. Jahrhundert modellartig in den drei Nachhaltigkeitsdimensionen (ökologische, ökonomische und sozial-kulturelle Dimension) mit jeweils fünf Problemfeldern zusammen. Diese sind in Übersicht 1 dargestellt.

Übersicht 1: Zentrale Problemfelder (der Energieversorgung).

Ökologische Dimension	Ökonomische Dimension	Sozial-kulturelle Dimension
Klimaerwärmung	Negative Entwicklungen auf dem Arbeitsmarkt	Fehlentwicklungen in Wirtschaft, Politik, Gesellschaft
Materialverbrauch	Unzureichende Befriedigung der Grundbedürfnisse mit nachhaltigen Produkten	Unsicherheit der dauerhaften Energieversorgung
Übernutzung erneuerbarer Ressourcen	Instabilitäten (Geld- & Finanzmärkte, Konzentration, Preisentwicklung), Externalitäten	Zentralisierung der Versorgungsstrukturen
Gefährdung der menschlichen Gesundheit	Globale und außenwirtschaftliche Ungleichgewichte, Abhängigkeiten	Gewaltsame Konflikte
Zerstörung Arten- und Landschaftsvielfalt	Staatsverschuldung; unzureichende Ausstattung mit Infrastruktur	Technische Risiken (z.B. Atomtechnik, Digitalisierung der Wirtschaft)

Quelle:Rogall et al. 2021; Rogall et al. 2018; Rogall et al. 2016; Rogall 2014: 27; Rogall et al. 2014; 2013b; Rogall und Gapp 2016.

Zielsystem

Aus diesen Problemfeldern wurde ein Zielsystem entwickelt, das zur Bewertung des Nachhaltigkeitsgrades von Volkswirtschaften, politischen Strategien und technologischen Optionen geeignet ist. Das für KoWa leicht angepasste Zielsystem wird in Übersicht 2 dargestellt.

Übersicht 2: Zielsystem, Bewertungskriterien und Indikatoren einer nachhaltigen kommunalen Wärmeversorgung

Herausforderung	Qualitätsziel	Kriterien und Indikatoren
Ökologische Dimension		
Klimaerwärmung	Klimaneutralität	THG-Emissionen in kg CO_{2eq}/ MWh
Materialaufwand	Geringer Nutzungsgrad an Primärrohstoffen	Kumulierter Stoffaufwand in kg / MWh
Übernutzung erneuerbarer Ressourcen	Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Ressourcen	Auswirkungen auf die Einhaltung der Regenerationsrate
Gefährdung der menschlichen Gesundheit	Gesunde Lebensbedingungen	Schadstoffemissionen in kg SO_{2eq} / MWh
Zerstörung Arten- und Biotopvielfalt	Naturverträglichkeit	Auswirkungen auf die Naturverträglichkeit
Ökonomische Dimension		
Negative Entwicklungen auf dem Arbeitsmarkt	Existenzsichernde Erwerbsarbeit bei akzeptabler Arbeitsqualität	Beitrag zur regionalen Wertschöpfung
Unzureichende Befriedigung der Grundbedürfnisse mit nachhaltigen Produkten	Unterbrechungsfreie Versorgungssicherheit/ Systemstabilität	Redundanz
Instabilitäten (Geld, Finanzmärkte, Wettbewerbsfähigkeit), Externalitäten	Geringe betriebswirtschaftliche Wärmegestehungskosten	Wärmegestehungskosten (€ / MWh)
globale und außenwirtschaftliche Ungleichgewichte, Abhängigkeiten	Geringe außenwirtschaftlichen Abhängigkeit	Importquote von Energieträgern und Betriebsstoffen
Staatsverschuldung; unzureichende Ausstattung mit meritorischen Gütern	Finanzielle Handlungsfähigkeit	Finanzielle Planbarkeit
Sozial-kulturelle Dimension		
Fehlentwicklungen in Wirtschaft, Politik & Gesellschaft	Good Governance	Erwartete Akzeptanz vor Ort
Unsicherheit der dauerhaften Energieversorgung	Langfristige Versorgungssicherheit	Reichweite der eingesetzten Ressourcen bei gleichbleibendem Verbrauch
Zentralisierung der Versorgungsstrukturen	Angemessene Dezentralisierung und Partizipation	Komplexität der Entscheidungsstrukturen
Gewaltsame Konflikte	Innere und äußere Sicherheit, globale Verträglichkeit	Konfliktpotential der eingesetzten Ressourcen
Technische Risiken (z.B. Atomtechnik, Fracking)	Vermeidung von Risikotechnologien	Risikoeinschätzung

Quelle: Eigene Darstellung.

Bezug zu den UN-Nachhaltigkeitszielen

Die Ziele können dabei zu einem großen Anteil einem oder mehreren UN-Nachhaltigkeitszielen (Sustainable Development Goals - SDG) zugeordnet werden. Dies ist von Vorteil, da durch die SDG alle Staaten, aber auch Bundesländer, Kommunen und Unternehmen angehalten sind, regelmäßig ihre Nachhaltigkeitsbeiträge zu dokumentieren. Daher werden die von jedem Ziel angesprochenen SDG in der folgenden Beschreibung der Kriterien benannt. Durch

die in KoWa durchgeführte Nachhaltigkeitsbewertung kann also auch der Beitrag der einzelnen Wärmeversorgungslösungen zu den SDG dargestellt werden.[1]

Bisherige Anwendungen des Schemas

Das sich aus dem oben genannten Zielsystem ergebende Bewertungsschema wurde in vorangegangenen Projekten für verschiedene Untersuchungen genutzt und hat sich als anpassbar und valide gezeigt. In den regelmäßigen Trendartikeln des Jahrbuchs Nachhaltige Ökonomie wurden Längsschnitt- und Querschnittanalysen des Nachhaltigkeitsgrades der EU-Staaten durchgeführt (Rogall et al. 2021; Rogall et al. 2018; Rogall et al. 2016; Rogall et al. 2014; 2013a; 2013b; Rogall und Gapp 2016). Im Rahmen eines Forschungsprojektes zur nachhaltigen Energieversorgung im Strombereich wurde das Bewertungsschema angepasst und für die Beurteilung verschiedener Technologien genutzt (Rogall 2014). In einem weiteren Forschungsprojekt zur Beurteilung von politisch-rechtlichen Instrumenten wurde ebenfalls eine leicht angepasste Variante des Bewertungsschemas angewendet. Dieses nutzte zur Bewertung der einzelnen Kriterien die Nachhaltigkeitsindikatoren auf Basis der UN-Nachhaltigkeitsziele (Gapp-Schmeling 2020).

Anwendung in KoWa

Aus diesen bisherigen Anwendungen des Bewertungsschemas ergeben sich insbesondere vier Aspekte, die bei der Anwendung in KoWa beachtet werden müssen:

- Die Kriterien und Indikatoren für die einzelnen Qualitätsziele müssen für den Einsatz in konkreten Forschungsprojekten ggf. angepasst werden. Dabei sollte aber das jeweils übergeordnete Qualitätsziel beachtet werden.
- Die Nutzung der Indikatoren auf Basis der UN-Nachhaltigkeitsziele (SDG Indikatoren) ermöglicht es, den Beitrag einzelner Maßnahmen zu den globalen, europäischen und bundesdeutschen Nachhaltigkeitszielen aufzuzeigen.
- Für den Vergleich unterschiedlicher Untersuchungseinheiten (Optionen, Strategien, Länder) wird die Bewertung der einzelnen Kriterien in einem qualitativen Stufenschema operationalisiert.
- Die Stärken und Schwächen der Optionen in den einzelnen Kriterien können in einem Profilliniendiagramm vergleichend dargestellt werden.

Operationalisierungsskala

Um einen Vergleich der Versorgungsoptionen zu ermöglichen, hat sich in den bisherigen Anwendungen eine fünfstufige Operationalisierungsskala zur Bewertung der Qualitätsziele bewährt. Sie wird daher auch in KoWa verwendet. Die Operationalisierung der Kriterien in Form von Bewertungsstufen erfolgte in KoWa durch einen iterativen Diskussionsprozess. Die folgenden Kapitel bieten eine ausführliche Erläuterung der Kriterien und ihrer Operationalisierung.

[1] Die SDG lösten im Jahr 2015 die bereits im Jahr 2000 verabschiedeten Millenium Development Goals ab. Es handelt sich um globale Entwicklungsziel für das Jahr 2030. Sie sind nur mittelbar an den drei Nachhaltigkeitsdimensionen ausgerichtet.

Übersicht 3: Bewertungsstufen und ihre Bedeutung (allgemein)

Bewertung	Bedeutung
Stufe 1	Im Rahmen der betrachteten Versorgungsoption sind besonders positive Auswirkungen auf das Qualitätsziel zu erwarten. Werden durch das Kriterium quantitative Indikatoren betrachtet, erhält i.d.R. die Option mit dem bestmöglichen Wert diese Einstufung.
Stufe 2	Im Rahmen der betrachteten Versorgungsoption sind eher positive Auswirkungen auf das Qualitätsziel zu erwarten. Werden durch das Kriterium quantitative Indikatoren betrachtet, erhalten die Optionen mit überdurchschnittlich guten Werten (bzw. solche, die nahe am Zielwert liegen) diese Einstufung.
Stufe 3	Im Rahmen der betrachteten Versorgungsoption können weder positive noch negative Auswirkungen auf das Qualitätsziel vorhergesagt werden oder es gibt keine Auswirkungen. Werden durch das Kriterium quantitative Indikatoren betrachtet, erhalten die Optionen mit durchschnittlichen Werten diese Einstufung.
Stufe 4	Im Rahmen der betrachteten Versorgungsoption sind eher negative Auswirkungen auf das Qualitätsziel zu erwarten. Werden durch das Kriterium quantitative Indikatoren betrachtet, erhalten die Optionen mit unterdurchschnittlich guten Werten (bzw. solche, die sich vom Zielwert entfernen) diese Einstufung.
Stufe 5	Im Rahmen der betrachteten Versorgungsoption sind besonders negative Auswirkungen auf das Qualitätsziel zu erwarten. Werden durch das Kriterium quantitative Indikatoren betrachtet, erhalten die Optionen mit den schlechtesten Werten diese Einstufung.

Quelle: Eigene Darstellung.

GEMIS-Daten

Für die quantitativen Indikatoren wurde, sofern verfügbar, auf Prozessdaten der bestehenden Datenbank GEMIS[2] zurückgegriffen. Die hierin enthaltenen Prozesse berücksichtigten verschiedene Kombinationen aus typischen Energieträgern, Arten der Wärmebereitstellung, Leistungen und den Installationszeitpunkten.
Für eine Vergleichbarkeit der verwendeten Datensätze, werden nur Prozesse in die Bewertung mit einbezogen, welche ausschließlich auf Basis der Aufteilung der (Umwelt-)Lasten nach Energieäquivalenten berechnet wurden, sowie alleinig der Wärmeerzeugung (Funktionelle Output-Einheit: Raumwärme oder Warmwasser) zuzuordnen sind. Weiterhin werden einzig Prozesse mit einem deutschen Ortsbezug in die Auswertung mit einbezogen. In Summe ergibt sich hieraus eine repräsentative Zusammenstellung von insgesamt 355 Prozessdatensätzen (PDS) für die Wärmeerzeugung bzw. -bereitstellung über die verschiedensten Energieträger.

[2] Das Globales Emissions-Modell integrierter Systeme (GEMIS) umfasst ein Simulationsmodell mit LCA-Datenbank für Energie-, Stoff- und Transportsysteme sowie weiteren speziellen Funktionen, z.B. für Verbrennung in Kraftwerken und Heizungen). Es können somit u.a. Technologievergleiche auf Basis von Ökobilanzen, PEF und Stoffstromanalysen durchgeführt werden. (Fritsche 2016).

BEWERTUNGSKRITERIEN UND OPERATIONALISIERUNG

3 Ökologische Dimension

Überblick

Aus den Herausforderungen (vgl. Übersicht 1) in der ökologischen Dimension ergeben sich fünf übergeordnete Qualitätsziele. Wesentliche Herausforderungen stellen die Klimaerwärmung, der Materialverbrauch und die Übernutzung erneuerbarer Ressourcen dar. Hinzu kommen die Gefährdung der menschlichen Gesundheit durch Schadstoffe in den Umweltmedien sowie die Zerstörung der Arten und Biotopvielfalt. Aus den Herausforderungen lassen sich Qualitätsziele im Rahmen der Bewältigung dieser ableiten. Für jedes dieser Ziele wurden stellvertretende Kriterien und Indikatoren ausgewählt, mit dessen Hilfe eingeschätzt werden kann, welchen Beitrag eine Versorgungsoption zur Zielerreichung erwarten lässt. Übersicht 4 stellt diese Kriterien und Indikatoren der ökologischen Dimension erneut im Überblick dar. Im Anschluss werden sie nacheinander erläutert.

Übersicht 4: Bewertungskriterien in der ökologischen Dimension

Herausforderung	Qualitätsziel	Kriterien und Indikatoren
Ökologische Dimension		
Klimaerwärmung	Klimaneutralität	THG-Emissionen in kg CO_{2eq} / MWh
Materialaufwand	Geringer Nutzungsgrad an Primärrohstoffen	Kumulierter Stoffaufwand in kg / MWh
Übernutzung erneuerbarer Ressourcen	Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Rohstoffe	Auswirkungen auf die Einhaltung der Regenerationsrate
Gefährdung der menschlichen Gesundheit	Gesunde Lebensbedingungen	Schadstoffemissionen in kg SO_{2eq}/ MWh
Zerstörung Arten- und Biotopvielfalt	Naturverträglichkeit	Auswirkungen auf die Naturverträglichkeit

Quelle: Eigene Darstellung.

3.1 Treibhausgasemissionen

Ziel → Indikator

Um die Klimaerwärmung wirksam zu begrenzen, braucht es die Klimaneutralität sämtlicher anthropogener Aktivitäten. Dieses Ziel spiegelt sich auch in SDG 13 *Klimaschutz* wider. Die Klimaerwärmung wird durch anthropogene Treibhausgasemissionen vorangetrieben, die in der Wärmeversorgung vor allem durch die Nutzung fossiler Energieträger entstehen. Um die Versorgungsoptionen in den einzelnen KoWa-Untersuchungsgebieten vergleichen zu können, werden in KoWa vorzugsweise die spezifischen CO_2-äquivalenten Emissionen in kg CO_{2eq} pro MWh als Indikator herangezogen.

Vergleichswerte

Die durchschnittlichen spezifischen CO_2-Emissionen der Fernwärmeerzeugung liegen als Vergleichswerte – nicht in CO_2-Äquivalenten, sondern – in kg CO_2 pro GJ für einzelne Bundesländer vor und müssen in kg CO_2 pro MWh umgerechnet werden. Tabelle 1 zeigt die spezifischen CO_2-Emissionen der Fernwärme in den Bundesländern. Diese Werte bieten eine gute Ausgangsbasis zur Einschätzung der Größenordnungen von CO_2-Emissionen konventioneller netzbasierter Wärmeversorgung.

Tabelle 1: Spezifische CO_2-Emissionen der Fernwärmeerzeugung

Land	Jahr	Anm.	Spezifische CO_2-Emissionen der Fernwärmeerzeugung		Stand
			kg CO_2 / GJ	kg CO_2 / MWh	
Baden-Württemberg	2018	BW5)	59,9	215,8	30.06.2021
Bayern	2018		50,7	182,7	20.08.2019
Berlin	2018		55,5	199,9	
Brandenburg	2018		68,7	247,4	09.03.2021
Bremen	2018	nach NIR 2021)	71,0	255,8	29.06.2021
Hamburg	2018	LAK1)	58,4	210,4	17.05.2021
Hessen	2018	HE1)	62,0	223,3	09.02.2021
Mecklenburg-Vorpommern	2018	nach NIR 2019 und mit UBA-Stromfaktor	...		15.07.2021
Niedersachsen	2018		51,5	185,3	13.01.2021
Nordrhein-Westfalen	2018	NRW2)	69,8	251,2	01.03.2021
Rheinland-Pfalz	2018	RP1)	45,5	163,9	14.07.2021
Saarland	2018		...		
Sachsen	2018		69,4	249,7	06.07.2021
Sachsen-Anhalt	2018	LAK1)	63,8	229,7	13.01.2021
Schleswig-Holstein	2018	LAK1)	60,7	218,5	29.04.2021
Thüringen	2018	p)	46,6	167,8	17.03.2021
Anmerkungen:					
p) Vorläufige Zahl.					
LAK1) Neuberechnung auf Basis geänderter CO_2-Emissionsfaktoren lt. Nationalem Inventarbericht (NIR 2016).					
BW5) Berechnung auf Basis CO_2-Emissionsfaktoren lt. Nationalem Inventarbericht NIR 2021. Nationaler, internat. Flugverkehr nach NIR 2021.					
nach NIR 2021					
HE1) Stand NIR 2020					
nach NIR 2019 und mit UBA-Stromfaktor					
NRW2) Berechnung auf Basis CO2-Emissionsfaktoren lt. Nationalem Inventarbericht NIR 2020.					
RP1) Nationaler, internat. Flugverkehr nach Nationalem Inventarbericht NIR 2021.					

Quelle: Statistisches Landesamt Bremen 2019.

GEMIS Daten & ihre Verteilung

Mit Hilfe der GEMIS-Datenbank wurden, wie zuvor beschrieben, 355 Kombinationen von Energieträgern, Wärmebereitstellung, Leistung und Zeit untersucht.[3] Es liegen Daten über die spezifischen treibhausgasrelevanten Emissionen in der Luft in kg CO_2eq/ MWh vor. Die Werte verteilen sich aber nicht gleichmäßig innerhalb der Spannweite. Zusätzlich wurde auch

[3] Es lagen 203 Datensätze exkl. der Technologien vor, welche direkt fossile Energien nutzen.

die Verteilung der Werte untersucht, wenn Technologien, die direkt die fossilen Energieträger Kohle, Koks, Erdöl und Erdgas als Brennstoff nutzen, ausgeschlossen werden.[4] Während der Median bei Betrachtung inklusive der fossilen Energieträger (207 kg CO_2eq/ MWh) eher in Richtung des oberen Quartils tendiert, ergibt sich bei einer Betrachtung des Boxplots unter Ausschluss direkt genutzter fossiler Energieträger das gegenteilige Bild mit einem um ca. 2/3 verringertem Median von 77 kg CO_2eq/ MWh.

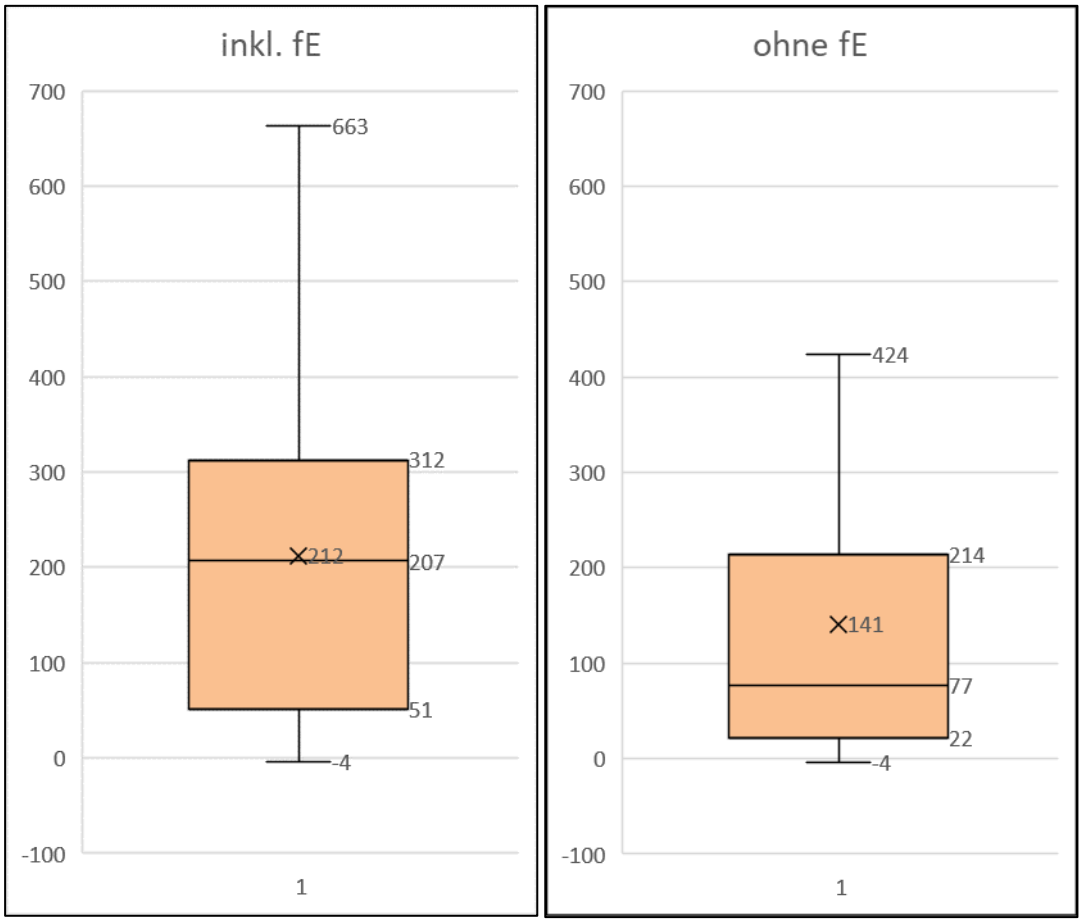

Abbildung 1: Boxplot der GEMIS-Prozessdaten in kg CO_{2eq} / MWh für die spezifischen Emissionen der Wärmeversorgungstechnologien.
Eigene Darstellung (Excel Boxplot).

Bewertungsstufen und Grenzen

Bei der Festsetzung der Klassengrenzen für die Operationalisierung wurde die Verteilung der Werte inklusive und exklusive direkt genutzter fossiler Energieträger berücksichtigt. Für das Kriterium Klimaneutralität wurden folgende Operationalisierungsstufen festgelegt.

[4] Dabei ist zu beachten, dass in die Werte der nach ‚ohne fE' differenzierten Prozessdatensätze weiterhin u.a. der heutige Strommix einfließt. Ebenso sind ggf. die Vorketten der Prozesse mit Emissionen aus fossiler Energie belastet. Die Differenzierung bildet demnach nicht die Umweltwirkungen zukünftiger Versorgunglösungen ab.

Übersicht 5: Bewertungsstufen für das Kriterium THG-Emissionen in kg CO_{2eq} / MWh

Bewertung	Bedeutung: Die spezifischen CO_{2eq}-Emissionen der Versorgungsoption sind größer oder gleich	(aber) kleiner als
Stufe 1	-	50 kg CO_2eq/ MWh
Stufe 2	50 kg CO_2eq/ MWh	100 kg CO_2eq/ MWh
Stufe 3	100 kg CO_2eq/ MWh	150 kg CO_2eq/ MWh
Stufe 4	150 kg CO_2eq/ MWh	200 kg CO_2eq/ MWh
Stufe 5	200 kg CO_2eq/ MWh	-

Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertungs-beispiel

Für die einzelne Versorgungsoption lassen sich in der Regel die spezifischen CO_{2eq}-Emissionen auf Basis der GEMIS-Prozesse abschätzen, indem die technologiespezifischen Emissionen mit ihrem energetischen Anteil an der Wärmeversorgungslösung gewichtet werden.
Beruht die bereitgestellte Wärme z.B. zu 33 % auf Wärme aus solarthermischen Flachkollektoren und zu 67 % auf Wärme aus (Erd-)Gas-Brennwert-Heizkesseln, so ergeben sich spezifische THGE bei der Bereitstellung durch die betrachtete Versorgungslösung von 162 kg CO_{2eq}/ MWh. Dieser Wert liegt noch an der unteren Grenze der vierten Bewertungsstufe. Die Option würde also im Kriterium Klimaneutralität mit Stufe 4 bewertet.

Tabelle 2: Beispielrechnung zur Gewichtung der spezifischen Emissionen

Wärmeversorgung	Zusammensetzung Wärmeversorgung	kg CO_{2eq}/ MWh
SolarKollektor-Flach-DE-2020	33%	20
Gas-Heizung-Brennwert-DE-2020	67%	232
		162

Quelle: Eigene Darstellung (Auswertung Emissionen Wärmeversorgung, GEMIS).

Einschränkungen

Nicht für alle Versorgungsoptionen waren auf Basis der GEMIS-Prozesse Daten verfügbar. In diesem Fall wurden die jeweiligen Emissionen durch das KoWa-Team konzeptspezifisch ermittelt. Auf diese Abweichungen wird in den jeweiligen Berichten eingegangen.

3.2 Kumulierter Stoffaufwand

Ziel → Indikator

In einer begrenzten Welt ist die nachhaltige Nutzung materieller Rohstoffe eine Schlüsselfrage, um den Verbrauch nicht erneuerbarer Ressourcen zu begrenzen. Für das SDG 12 *Nachhaltiger Konsum und Produktion* wird z.B. als Indikator der *Domestic Material Consumption* (DMC) verwendet, welcher die inländische Rohstoffentnahme zuzüglich des Saldo aus Importen und Exporten berücksichtigt.[5] Um verschiedene Technologien miteinander zu vergleichen, ist in den GEMIS Prozessdatensätzen der Indikator kumulierter Stoffaufwand verfügbar (KSA). Der KSA ist eine Maßzahl für den gesamten Aufwand an Primärrohstoffen zur Bereitstellung eines Produkts (Fritsche und Schmidt 2008).

GEMIS-Daten und ihre Verteilung

Aus den 355 GEMIS-Datensätzen liegen Informationen über den KSA vor.[6] Die Werte verteilten sich aber nicht gleichmäßig innerhalb der Spannweite. Zusätzlich wurde auch hier die Verteilung der Werte untersucht, wenn Technologien, die direkt fossile Energieträger nutzen[7], ausgeschlossen werden (Kohle, Koks, Erdöl, Erdgas). Mit Ausnahme des Maximums unterscheiden sich diese beiden Boxplots aber nur marginal.

[5] Ein geeigneterer Indikator für den Stoffverbrauch auf volkswirtschaftlicher Ebene ist der Total Material Consumption (TMC). Der TMC setzt sich zusammen aus der inländische Rohstoffentnahme zuzüglich der Rohstoffimporte abzüglich der Masse der Exporte. Jedoch berücksichtigt er dabei auch die nicht genutzte Extraktion wie beispielsweise entstehenden Abraum in Minen im In- und Ausland. Geteilt durch die Einwohner eines Landes zeigt er auf, wieviel Material jährlich pro Kopf ‚verbraucht' wird. Im Gegensatz zum TMC werden bei der Ermittlung des Total Material Requirement (TMR) die Exporte nicht abgezogen. Er stellt den Materialbedarf für Produktion und Konsum einer Volkswirtschaft dar. Der TMR umfasst damit den gesamten direkten, indirekten und versteckten Materialaufwand einer Gesellschaft (Watari et al. 2019: 92; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie; Dittrich et al. 2013). Auf Produktebene ist der KSA am ehesten mit dem TMR vergleichbar. Auch für den TMR wurden zunächst auf Basis bekannter Studien Vergleichswerte betrachtet, um eine Einschätzung der Größenordnungen zu erhalten. So geben z.B. Watari et al. (2019) für den Stromsektor einen TMR von 2 t/ MWh an (Watari et al. 2019: Fig. 5).

[6] Es lagen 203 Datensätze exkl. der Technologien vor, welche direkt fossile Energien nutzen.

[7] Dabei ist zu beachten, dass beide Auswertungen nicht den zukünftigen Energiemix abbilden, sondern nur die heutigen Technologien ohne direkte Nutzung von fE, aber mit heutigem Strommix und sonstigen heutigen Vorketten.

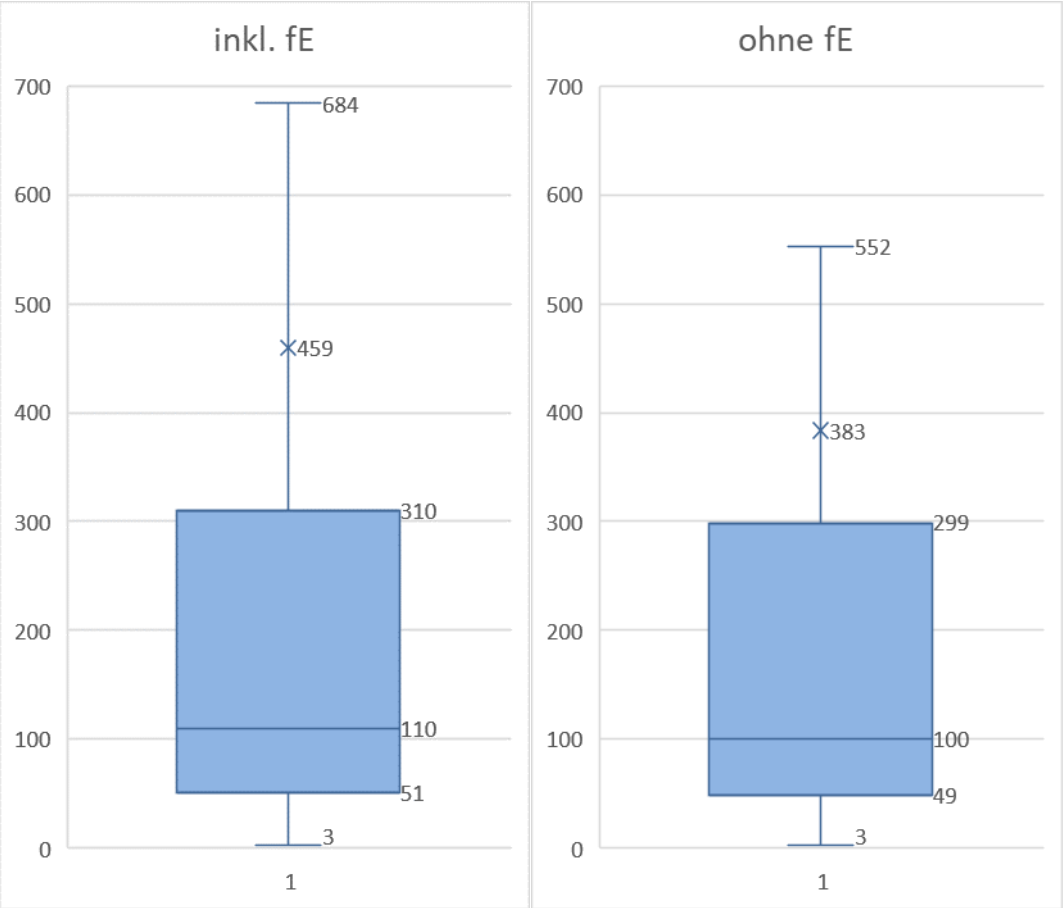

Abbildung 2: Boxplot der GEMIS-Prozessdaten in kg / MWh für den kumulierten Stoffaufwand der Wärmeversorgungstechnologien.
Quelle: Eigene Darstellung (Excel-Boxplot).

Bewertungsstufen und Grenzen

Bei der Festsetzung der Klassengrenzen für die Operationalisierung wurde die Verteilung der Werte inklusive und exklusive fossiler Energieträger berücksichtigt. Es wurden folgende Operationalisierungsstufen für das Kriterium nachhaltige Nutzung materieller Rohstoffe festgelegt.

Übersicht 6: Bewertungsstufen für das Kriterium kumulierter Stoffaufwand in kg / MWh

Bewertung	Bedeutung: Der kumulierte Stoffaufwand der Versorgungsoption ist	
	größer oder gleich	(aber) kleiner als
Stufe 1	-	10 kg / MWh
Stufe 2	10 kg / MWh	80 kg / MWh
Stufe 3	80 kg / MWh	120 kg / MWh
Stufe 4	120 kg / MWh	300 kg / MWh
Stufe 5	300 kg / MWh	-

Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertungs-beispiel

Für die einzelne Versorgungsoption lässt sich in der Regel der kumulierte Stoffaufwand auf Basis der GEMIS-Prozesse abschätzen, indem der technologiespezifische kumulierte Stoffaufwand KSA mit seinem Anteil an der Wärmeversorgungslösung gewichtet wird.
Beruht die bereitgestellte Wärme der Versorgungslösung z.B. zu 33 % auf Wärme aus solarthermischen Flachkollektoren und zu 67 % auf Wärme aus (Erd-)Gas-Brennwert-Heizkesseln,

so ergibt sich ein kumulierter Stoffaufwand i.H.v. 53 kg/ MWh. Dieser Wert liegt im mittleren Bereich der zweiten Bewertungsstufe. Die Option würde also im Kriterium nachhaltige Nutzung materieller Rohstoffe mit Stufe 2 bewertet.

Tabelle 3: Beispielrechnung zur Gewichtung des kumulierten Stoffaufwandes

Wärmeversorgung	Zusammensetzung Wärmeversorgung	kg/ MWh
SolarKollektor-Flach-DE-2020	33%	77
Gas-Heizung-Brennwert-DE-2020	67%	42
		53

Quelle: Eigene Darstellung (Auswertung Emissionen Wärmeversorgung, GEMIS).

Einschränkungen

Nicht für alle Versorgungsoptionen waren auf Basis der GEMIS Prozesse Daten verfügbar. In diesem Fall wurden die jeweiligen Emissionen durch das KoWa-Team auf Basis der Inputfaktoren ermittelt. Auf diese Abweichungen wird in den jeweiligen Berichten eingegangen.

3.3 Regenerationsrate erneuerbarer Ressourcen

Ziel → Indikator

Ressourcen lassen sich unterscheiden in nicht-erneuerbare, erneuerbare, quasi unerschöpfliche Ressourcen und Umweltmedien (Rogall und Gapp-Schmeling 2021: 70-71). Während der Fokus der ersten beiden Kriterien auf den nicht-erneuerbaren Ressourcen lag, fokussiert das dritte Kriterium auf die erneuerbaren Ressourcen. Der Indikator betrachtet also z.B. nachwachsende Rohstoffe oder den Trinkwasserhaushalt, aber keine quasi unerschöpflichen Ressourcen wie die Sonnenenergie. Er nimmt Bezug auf mehrere Einzelindikatoren unterschiedlicher SDG (z.B. auch Landwirtschaft in SDG 2; Wassernutzung in SDG 6; Energie in SDG 7). Eine nachhaltige Energieversorgung zeichnet sich dadurch aus, dass sie die Regenerationsrate einhält. Daher können der Verbrauch erneuerbarer Ressourcen und die Auswirkungen einer Wärmeversorgungsoption auf die Einhaltung der Regenerationsrate als Kriterium bewertet werden. Für die Einschätzung der zu erwartenden Auswirkungen kann kein quantitativer Indikator angegeben werden. Das Kriterium muss dennoch systematisch operationalisiert werden.

Erwägungen und Bewertungsstufen

Aber auch für den Fall, dass kein quantitativer Indikator verfügbar ist, müssen Bewertungsregeln festgelegt werden, um ein vergleichbares Vorgehen in allen Untersuchungsgebieten zu gewährleisten. Daher wurden im Projekt die Auswirkungen einzelner Wärmeversorgungsoptionen zum Teil kontrovers im KoWa-Team diskutiert. Im Folgenden werden die Erwägungen für einzelne Technologien und Energieträger dargestellt und einer Bewertungsstufe zugeordnet.

Bei der ausschließlichen Nutzung von quasi-unerschöpflichen Ressourcen (Solarenergie) wird von positiven Auswirkungen auf die Regenerationsrate ausgegangen. Es erfolgt eine Bewertung mit der **Stufe 1**.

Laut UBA besteht ein energetisches Primärenergiepotential der Abfall-/ Reststoffe von 900 PJ. (= 250 TWh PE; Fehrenbach et al. 2019: 23). Im Jahr 2018 verbrauchten die Haushalte in Deutschland ca. 530 TWh für Raumwärme und Warmwasser (UBA 2020a). Insgesamt wurden im Jahr 2018 in Deutschland ca. 4.802 PJ (1.334 TWh) Endenergie für Wärmeanwendungen verbraucht (AGEB 2020b: 5.1). Abfall- und Reststoffe können also nur einen Anteil des Wärmebedarfs decken, zumal sie nicht nur für die Wärmebereitstellung in den Haushalten, sondern auch für industrielle Prozesse auf hohem Temperaturniveau eingesetzt werden sollten. Dies erfordert eine Transformation von einer Raumwärmenutzung hin zu einer industriellen Nutzung. Diese Transformation muss jedoch vor dem Hintergrund des heutigen hohen

Nutzungsanteils von Biomasse in der Wärme die Möglichkeiten und Grenzen alternativer Lösungen für Raumwärme im Sinne der sozialen Nachhaltigkeit mit integrieren. Für Wärmenetze bedeutet dies z.B. Holz nur als Spitzenlastabdeckung zu verwenden und Biomethan nicht zur Grundlastdeckung, sondern zur Deckung in der Mittellast einzusetzen. Um Brennstoffexergie möglichst vollständig auszuschöpfen, empfiehlt sich die Integration einer KWK-Nutzung (siehe auch Wern et al. 2019).

Bei der hauptsächlichen Nutzung von quasi-unerschöpflichen Ressourcen in Kombination mit bestimmten Biomasse-Reststoffen (z.B. Gülle und Festmist) ist in der Tendenz von positiven Auswirkungen auszugehen. Die Ausbringung der Gülle kann bei nicht regelkonformer Ausführung das Grundwasser belasten (Scholwin et al. 2019: 165-166). Eine energetische Nutzung der Reststoffe Gülle und Festmist führt grundsätzlich in der Tendenz zur Besserung der Belastungssituation in Gewässern und – durch die Nutzung von Methan – zu einem direkten Beitrag zur Treibhausgasreduktion (vgl. Kriterium 3.1 **Treibhausgasemissionen**). Demzufolge wird diese Wärmeversorgungsvariante mit **Stufe 2 bewertet**. Auf dieselbe Weise wird die Nutzung von Abwärme bewertet, die zwar nicht unerschöpflich ist bzw. keine natürliche Regenerationsrate hat, aber vom KoWa-Team in Anlehnung an die RED II und analog zum Bundesförderprogramm Wärmenetzsysteme 4.0 vergleichbar eingeordnet wird. Die vorgelagerten Transport, Erzeugungs- und Prozessketten werden dabei nicht bewertet.

Neben quasi-unerschöpflichen Ressourcen werden auch nachwachsende Rohstoffe für Wärmeversorgungslösungen verwendet. Die energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe führt nicht per se zu negativen Auswirkungen auf die Regenrationsrate, sofern die stoffliche Nutzung, die Nutzung für Futter und Ernährung sowie die Regenerationsrate der Ökosysteme nicht beeinträchtigt werden. Dementsprechend sollte im Rahmen der Möglichkeiten eine Kaskadennutzung ausgeführt werden, also die mehrfache Nutzung des gleichen Stoffes, da sich dies positiv in Bezug auf den Klimaschutz auswirkt (Fehrenbach et al. 2017). Dies ist im Bereich der Holznutzung schon weitgehend eingeführt. Die Änderung der Altholzverordnung kann hierbei weitere Fortschritte bringen (Flamme et al. 2019).

Im KoWa Team existiert Konsens, dass bei Nachwachsenden Rohstoffen die Nutzung als Nahrungsmittel, Futtermittel und die stofflichen Nutzung der energetischen Nutzung vorzuziehen ist. Finden nur Abfall-/ Reststoffe für die energetische Nutzung Verwendung, sind in der Regel neutrale Auswirkungen anzunehmen. Dies ist z.B. bei Pellets mit Reststoffen aus Sägewerken der Fall, da diese i.d.R. als Koppelprodukt im Produktionsprozess anfallen (DEPI 2021). Wichtig ist es jedoch dabei auf Sägewerke zurückzugreifen, welche Holz aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern Mitteleuropas verarbeiten, um nicht-nachhaltige Nutzungen auszuschließen. Da die Verwendung solcher Holzpellets keine zusätzliche Konkurrenz bei der Landnutzung bewirkt, werden diese mit der **Stufe 3** (neutral) bewertet.

In der Forstwirtschaft ist der Hiebssatz das wichtigste Nachhaltigkeitskriterium, das nicht überschritten werden darf (Fehrenbach et al. 2019; Wern et al. 2014). Die Nachhaltigkeit der Waldholznutzung ist in den jeweiligen Landeswaldgesetzen der Bundesländer geregelt (vgl. z.B. LWaldG des Saarlandes). Für die dort genannten und verpflichtenden Betriebspläne wird verlangt, „… die Nachhaltigkeit sicherzustellen…“. Dieser Vorgang wird von der Forstbehörde

geprüft und genehmigt (§13 Abs. 4 LWaldG).[8] Wenn also Waldbesitzer nicht nachhaltig wirtschaften, liegen Verstöße gegen das Waldgesetz vor, die mit Geldbußen belegt sind. Da Nutzungskaskaden bei Holz eingehalten und derzeit sogar verbessert werden, wird bei der Nutzung von Waldholz aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern Mitteleuropas inkl. Energieholz die **Stufe 3** angenommen.

Die Nutzung von holzartiger Biomasse aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) wurde im KoWa-Team sehr kontrovers diskutiert. Sofern die Anforderungen an die gute fachliche Praxis eingehalten werden und KUP (wie es die Regel ist) auf Böden geringerer Qualität angelegt werden, sind in der Gesamtschau keine negativen Auswirkungen zu erwarten. Bei der Nutzung der o.g. Böden für KUP gehen sowohl BUND (2010), FNR (Bärwolff et al. 2012) als auch NABU (2021) von positiven Auswirkungen für Boden und Wasserhaushalt aus. Gleichzeitig werden jedoch landwirtschaftliche Flächen belegt. Nach Erwägung der Chancen und Risiken hält das KoWa Team eine Bewertung mit **Stufe 3** für gerechtfertigt.

Auch die Nutzung anderer Nachwachsender Rohstoffe (v.a. Mais) ist energiepolitisch und gesellschaftlich umstritten. Aus diesem Grund hat der Gesetzgeber den Einsatz von Mais in Biogasanlagen seit 2012 für Neuanlagen begrenzt, in dem die Vergütungen für Biogas aus Mais im EEG 2012 reduziert und ein ‚Maisdeckel' eingefügt wurde (§27 (5) 1. EEG 2012). Dieser wurde mit den nachfolgenden EEG-Novellen für das Repowering von Bestandsanlagen sowie Neuanlagen nochmals verschärft (siehe hierzu Maisdeckel von 40 % in §39i (1) EEG 2021). Somit wird für bei Biogasanlagen sukzessive mit dem Auslaufen der jeweiligen Refinanzierungszeiten des EEG der Maisanbau zurückgehen. Auf dem Acker bestehen jedoch weiterhin Nutzungskonkurrenzen zu Futtermitteln und Nahrungsmitteln. Regional gibt es jedoch große Unterschiede in der Nutzungsintensität von Ackerflächen in Bezug auf Mais. In einigen Regionen Deutschlands erscheint die Flächenbelegung mit Viehwirtschaft und gleichzeitiger Belegung der Fläche mit Biogasanlagen zu hoch (Wern et al. 2018). Aus diesem Grund wird für NaWaRo Biogasanlagen mit Wärmeauskopplung oder Biomethanaufbereitung **die Stufe 4** vergeben.

Die Nutzung von oberflächennaher Geothermie wird in KoWa neutral (**Stufe 3**) bewertet, sofern eine aktive Regenerierung stattfindet. Ohne aktive Regenerierung wird in der Tendenz von negativen Auswirkungen ausgegangen. Dies ist aber abhängig von der technischen Auslegung.

Bei der Förderung des fossilen Energieträgers Erdgas werden in der Regel erneuerbare Ressourcen überbeansprucht. Dies betrifft die Abholzung von Wäldern und die Gefährdung der Wasserressourcen insbesondere bei der Förderung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten, die über Fracking erschlossen werden. Im Fall der überwiegenden Nutzung von Erdgas erfolgt die Bewertung mit **Stufe 4**, da in der Gesamtschau negative Auswirkungen zu erwarten sind.

Die Nutzung von Kohle geht mit noch gravierenderen negativen Auswirkungen einher. So zerstört etwa die großflächige Abholzung zusammenhängender Waldgebiete für Tagebauzwecke Waldbestände vielerorts z.T. vollständig ohne Chance auf Regeneration. Aufgegebene Tagebaue werden zwar nach dem Abbau wieder renaturiert. Dabei wird aber nicht

[8] § 13 Abs. 5 Satz 2 des LWaldG des Saarlandes führt zu den Betriebsplänen und den drei Waldfunktionen (Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktion) näher aus: „Der periodische Betriebsplan und das Betriebsgutachten sollen eine Darstellung des Waldzustandes, eine Herleitung des planmäßigen Einschlags für die kommende Wirtschaftsperiode und Vorschläge für die Begründung und Pflege der Waldbestände sowie Vorschläge für die Sicherung der landschaftspflegerischen Bedeutung des Waldes und für die Verbesserung seiner Erholungswirkung beinhalten."

zwingend der urspüngliche Zustand wieder hergestellt. Zudem können nach der Renaturierung Grundwasserqualität und die Grundwasserpegel weiterhin gefährdet sein, da z.B. Grundwasser dauerhaft abgesenkt werden muss mit zum Teil erheblichen Folgen für den Wasserhaushalt. Auch mit dem Abbau von Steinkohle, die z.B. Australien und Südafrika importiert wird gehen massive Eingriffe einher. Kohlenutzung ist daher mit **Stufe 5** zu bewerten.

Bewertungs-beispiel

Anders als bei den Kriterien mit quantitativen Indikatoren, sind für die Bewertung der Auswirkungen auf die Regenerationsrate erneuerbarer Ressourcen die Rahmenbedingungen der einzelnen Versorgungsoptionen sorgsam abzuwägen. Beruht die bereitgestellte Wärme der Versorgungslösung z.B. zu 33 % auf Wärme aus solarthermischen Flachkollektoren und zu 67 % auf Wärme aus (Erd-)Gas-Brennwert-Heizkesseln, so überwiegen in der Tendenz die negativen Auswirkungen, daher wäre eine Bewertung mit Stufe 4 vorzunehmen. Bei der Bewertung dieses Kriteriums sollten stets die Gesamtumstände der avisierten Wärmeversorgungsoption Erwägung finden.

3.4 Schadstoffemissionen

Ziel → Indikator

Aus der Übernutzung der Senkenfunktion der Umweltmedien (Einteilung der Ressourcen siehe Kap. 3.3) durch Schadstoffemissionen in Luft, Wasser oder Boden resultiert eine zunehmend problematischere Belastung der Biosphäre (und damit der menschlichen Gesundheit). Indikatoren zur Belastung mit Schadstoffen werden daher in den SDG 3 *Gesundheit und Wohlergehen* sowie SDG 11 *Nachhaltige Städte und Gemeinden* verwendet. Das Kriterium zur Bewertung des Eintrags von Schadstoffen in die Umwelt in KoWa sind die *Schadstoffemissionen einer Versorgungsoption pro MWh*. Sie werden in LCA-Analysen anhand des Versauerungspotentials in Schwefeldioxidäquivalenten (SO_{2eq}) ermittelt und verglichen. Schwefel- und Stickstoffverbindungen tragen zu Versauerung von Böden und Gewässern bei. Zu den Emissionen, die versauernd wirken, gehören SO_2, NO_x und H_2S. Um die Umweltwirkungen dieser Stoffe zu beurteilen, dienen SO_{2eq} als anerkanntes Maß in der Wissenschaft (BMI 2021).

Vergleichswerte

Das UBA berechnet die vermiedenen und verursachten säurebildenden Emissionen durch den Einsatz erneuerbarer Energien im Rahmen der regelmäßigen Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Dabei führt z.B. der Einsatz von Biomasse in der Wärmeversorgung zu 7.700 t SO_{2eq} jährlich (UBA 2018: 38).

GEMIS Daten und ihre Verteilung

Aus den GEMIS Datensätzen liegen zu 355 Kombinationen von Energieträger, Wärmebereitstellung, Leistung und Zeit Daten über das Versauerungspotential in kg SO_{2eq}/ MWh vor. Die Werte hatten eine Spannweite von 0,024 kg SO_{2eq}/ MWh (Netz\Nahwärme-Gas-BHKW-DE-2015/en) bis 1,41 kg SO_{2eq}/ MWh (Biogas-Mais/Gülle-BHKW-GM 500-DE-2010-th/en). Der Median aller untersuchten Prozesse liegt bei 0,35 kg SO_{2eq}/ MWh, der Durchschnitt bei 0,37 kg SO_{2eq}/ MWh. Zusätzlich wurde auch die Verteilung der Werte untersucht, wenn Technologien, die direkt fossile Energieträger nutzen, ausgeschlossen werden (Kohle, Koks, Erdöl, Erdgas). Hier zeigten sich keine wesentlichen Abweichungen in der Verteilung der Werte.

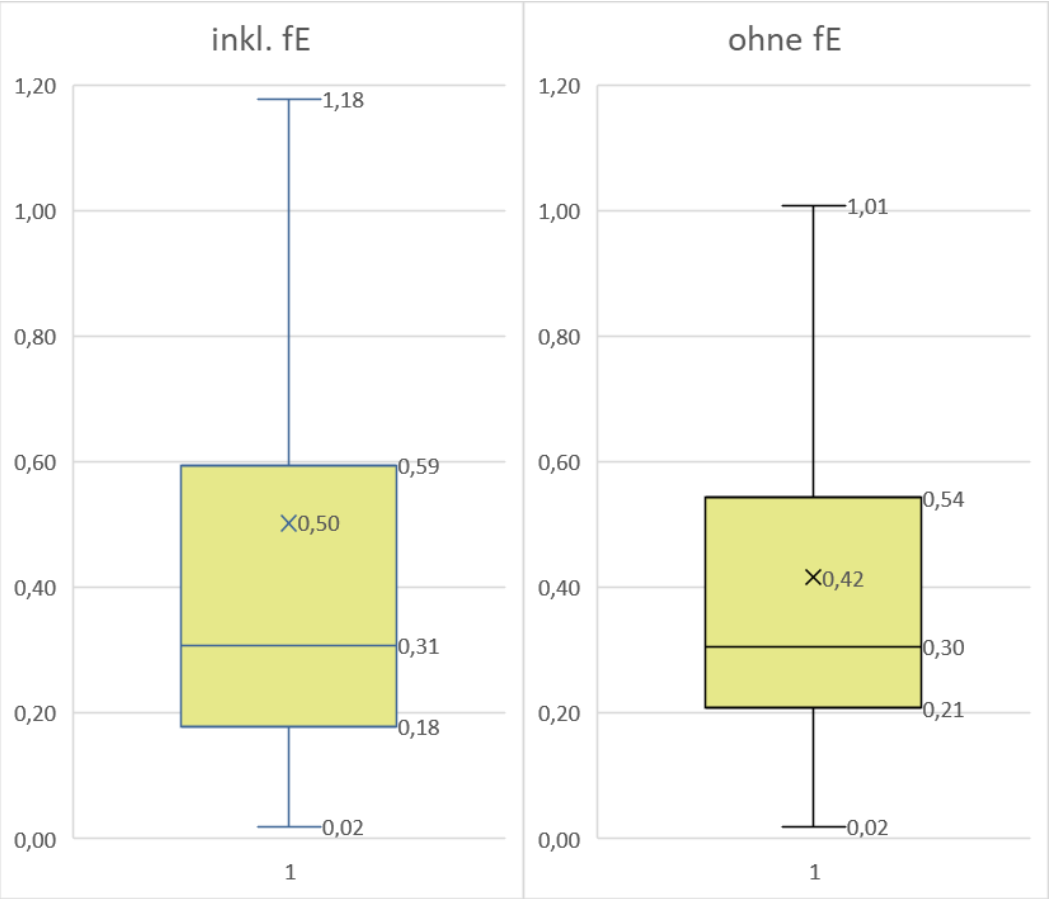

Abbildung 3: Boxplot der GEMIS-Prozessdaten für das Versauerungspotential der Wärmeversorgungstechnologien in kg SO_{2eq}/ MWh.
Quelle: Eigene Darstellung (Excel-Boxplot).

Bewertungsstufen und Grenzen

Unter Berücksichtigung der Werteverteilung verfügbarer Technologien und dem Ziel das Versauerungspotential zu reduzieren, wurden folgende Operationalisierungsstufen für das Kriterium *Gesunde Lebensbedingungen* festgelegt. Dabei wurden die Klassengrenzen so gewählt, dass sich eine typische (Normal-)Verteilung der Klassen ergibt.

Übersicht 7: Bewertungsstufen für das Kriterium *Schadstoffemissionen in kg SO_{2eq}/ MWh*

Bewertung	Bedeutung: Das Versauerungspotential der Versorgungsoption ist	
	größer oder gleich	(aber) kleiner als
Stufe 1		0,05 kg SO_{2eq}/ MWh
Stufe 2	0,05 kg SO_{2eq}/ MWh	0,25 kg SO_{2eq}/ MWh
Stufe 3	0,25 kg SO_{2eq}/ MWh	0,45 kg SO_{2eq}/ MWh
Stufe 4	0,45 kg SO_{2eq}/ MWh	0,55 kg SO_{2eq}/ MWh
Stufe 5	0,55 kg SO_{2eq}/ MWh	

Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertungsbeispiel

Für die einzelne Versorgungsoption lässt sich das Versauerungspotential auf Basis der GEMIS-Prozessdaten abschätzen, indem es technologiespezifisch mit seinem Anteil an der Wärmeversorgungslösung gewichtet wird.
Beruht die Wärmeversorgungslösung z.B. zu 33% der Wärmemenge auf Solarthermie und zu 67 % auf Gas-Brennwert, so ergibt sich ein Versauerungspotential i.H.v. 0,09 kg SO_{2eq}/ MWh.

Dieser Wert liegt innerhalb der zweiten Bewertungsstufe. Die Option würde also im Kriterium *Gesunde Lebensbedingungen* mit Stufe 2 bewertet.

Tabelle 4: Beispielrechnung für die Gewichtung des Versauerungspotentials

Wärmeversorgung	Zusammensetzung Wärmeversorgung	kg SO_2eq/ MWh
SolarKollektor-Flach-DE-2020	33%	0,0618
Gas-Heizung-Brennwert-DE-2020	67%	0,1048
		0,0906

Quelle: Eigene Darstellung (Auswertung Emissionen Wärmeversorgung, GEMIS).

Einschränkungen

Nicht für alle Versorgungsoptionen waren GEMIS Prozessdaten verfügbar. In diesem Fall wurden die jeweiligen Emissionen durch das KoWa-Team auf Basis der Inputfaktoren ermittelt. Auf diese Abweichungen wird in den jeweiligen Berichten eingegangen.

3.5 Naturverträglichkeit

Ziel → Indikator

Um der Zerstörung der Arten- und Biotopvielfalt zu begegnen, muss ein hohes Maß an Naturverträglichkeit eingesetzter Technologien angestrebt werden. Dieses Ziel spiegelt sich auch in den SDG 14 *Leben unter Wasser* und SDG 15 *Leben an Land* wieder. Die Auswirkungen einer Aktivität auf die Naturverträglichkeit und Biodiversität sind sehr vielfältig. Sie können nicht durch einen einzigen Indikator abgebildet werden. Als stellvertretender Indikator für die Naturverträglichkeit einer Wärmeversorgungsoption könnte zwar die Flächeninanspruchnahme genutzt werden; aus Sicht des KoWa -Teams sollten aber auch die Lebensräume am und unter Wasser angemessen berücksichtigt werden. Daher werden bei der Bewertung der einzelnen Versorgungsoptionen die Auswirkungen auf das *Leben an Land* (SDG 15) und das *Leben unter Wasser* (SDG 14) gleichermaßen berücksichtigt.

Erwägungen und Bewertungsstufen

Auch wenn kein quantitativer Indikator verfügbar ist, so müssen Bewertungsregeln festgelegt werden, um ein vergleichbares Bewertungsvorgehen in allen Untersuchungsgebieten zu gewährleisten. Dabei wurden die Auswirkungen einzelner Wärmeversorgungsoptionen zum Teil kontrovers im KoWa-Team diskutiert. Diese Auswirkungen sind stets von der konkreten Ausgestaltung der gesamten Wärmeversorgungslösung abhängig und nicht nur von der genutzten Technologie. Im Folgenden werden die Erwägungsgründe entlang der Technologie dargestellt.

Bei der Nutzung quasi-unerschöpflicher Ressourcen (Solarthermieanlagen) müssen die Auswirkungen am Standort berücksichtigt werden. Wird zusätzliche Fläche für den Bau der Anlagen versiegelt, wären negative Auswirkungen zu erwarten (**Stufe 4**). Wird bisher versiegelte Fläche effizienter genutzt (z.B. durch Dachanlagen) oder erfolgt durch das Gesamtkonzept eine ökologische Aufwertung von Industriebrachen oder artenarmem Ackerland, wäre von positiven Auswirkungen (**Stufe 2** für Dachanalagen, **Stufe 1** für ökologische Aufwertung) auszugehen.

Die Nutzung von industrieller Abwärme oder Abwärme aus Abwasser stellt ebenfalls eine effizientere Nutzung bestehender Flächen und Infrastruktureinrichtung dar. Es erfolgt die Bewertung mit **Stufe 2**, da durch die Abwärme andere Energieträger durch sowieso vorhandene Energie ersetzt werden.

Auch bei der Nutzung von biogenen Reststoffen ist von einer effizienteren Nutzung der Fläche und damit einer Bewertung mit **Stufe 2** auszugehen (wenn die Nutzungskaskade streng

eingehalten wird). Bei der Nutzung von Gülle, Festmist und Klärschlamm erfolgt die Bewertung mit Stufe 1. Bei der Nutzung von Holz aus KUP hängen allerdings die Auswirkungen von der bisherigen Flächennutzung ab. Bei strukturarmen Agrarflächen ist eher von positiven ökologischen Auswirkungen auszugehen (**Stufe 2**). Bei der Verdrängung von ökologisch wertvollen Flächen durch KUP wären negative Auswirkungen zu vermuten (**Stufe 5**).
Bei der Nutzung fossiler Energien sind negative Auswirkungen zu erwarten, da für den Abbau fossiler Energieträger immense Natureingriffe notwendig sind. Diese betreffen die Förderung der Rohstoffe und auch den Bau von Transportleitungen. Hier ist grundsätzlich von negativen Auswirkungen auf die Naturverträglichkeit auszugehen (**Stufe 5**).

Bewertungsbeispiel

Anders als bei den Kriterien mit quantitativen Indikatoren sind hier die Rahmenbedingungen der einzelnen Versorgungsoptionen sorgsam abzuwägen. Beruht die Wärmeversorgungslösung z.B. zu 33 % auf Solarthermie und zu 67 % auf Gas-Brennwert, so erfolgt die Bewertung mit Stufe 4, da mit der Förderung von Erdgas (für die Bohrung) Eingriffe in die natürlichen Lebensräume verbunden sind. Die Bewertung muss dabei in der Gesamtschau des Projektes erfolgen. Häufig liegen mehrere Einflussfaktoren vor, die ggf. auch zu einer insgesamt neutralen Bewertung führen. Dabei sind auch die konzeptspezifischen Natureingriffe durch den Bau von Speichern und Netzen zu berücksichtigen.

4 Ökonomische Dimension

Überblick

Für eine nachhaltige Energieversorgung dürfen die Versorgungsoptionen nicht nur nach ökologischen Kriterien bewertet werden, sondern es müssen auch die Auswirkungen in der ökonomischen und sozial-kulturellen Dimension betrachtet werden. Aus den Herausforderungen (vgl. Übersicht 1) in der ökonomischen Dimension ergeben sich ebenfalls fünf übergeordnete Qualitätsziele.
Für jedes dieser Ziele wurde ein stellvertretender Indikator ausgewählt, mit dessen Hilfe eingeschätzt werden kann, welche Auswirkungen auf das Ziel eine Versorgungsoption erwarten lässt. Übersicht 8 stellt diese Kriterien der ökonomischen Dimension im Überblick dar. Danach werden sie entlang der Kriterien erläutert.

Übersicht 8: Bewertungskriterien in der ökonomischen Dimension

Herausforderung	Qualitätsziel	Kriterien und Indikatoren
Ökonomische Dimension		
Negative Entwicklungen auf dem Arbeitsmarkt	Existenzsichernde Erwerbsarbeit bei akzeptabler Arbeitsqualität	Beitrag zur regionalen Wertschöpfung
Unzureichende Befriedigung der Grundbedürfnisse mit nachhaltigen Produkten	Unterbrechungsfreie Versorgungssicherheit/ Systemstabilität	Redundanz
Instabilitäten (Geld, Finanzmärkte, Wettbewerbsfähigkeit), Externalitäten	Geringe betriebswirtschaftliche Wärmegestehungskosten	Wärmegestehungskosten (€ / MWh)
Globale und außenwirtschaftliche Ungleichgewichte, Abhängigkeiten	Geringe außenwirtschaftlichen Abhängigkeit	Importquote von Energieträgern und Betriebsstoffen
Staatsverschuldung; unzureichende Ausstattung mit meritorischen Gütern	Finanzielle Handlungsfähigkeit	Finanzielle Planbarkeit

Quelle: Eigene Darstellung.

4.1 Regionale Wertschöpfung

Ziel → Indikator

Um negativen Entwicklungen auf dem Arbeitsmarkt zu begegnen, wurde in den o.g. bisherigen volkswirtschaftlichen Quer- und Längsschnittstudien (Rogall et al. 2021; Rogall et al. 2018; Rogall et al. 2016; Rogall et al. 2014; 2013b; 2013a; Rogall und Gapp 2016) das Qualitätsziel *Existenzsichernde Erwerbsarbeit bei akzeptabler Arbeitsqualität* u.a. mit Indikatoren zum Umfang der Beschäftigung, dem Anteil prekärer Beschäftigung, der Anzahl schwerer und tödliche Arbeitsunfälle oder berufsbedingte Krankheiten je 1000 Vollzeitstellen betrachtet.
Eine umfangreiche Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette der verschiedenen Versorgungsoptionen mit diesen Indikatoren ist im Rahmen der Bewertung im KoWa-Projekt nicht praktikabel. Als stellvertretender Indikator werden daher die Auswirkungen auf die regionale Wertschöpfung, die durch diese Versorgungsoption induziert werden, genutzt. Ein positiver Beitrag zur regionalen Wertschöpfung geht auch mit positiven Beschäftigungseffekten einher. Dieses Ziel spiegelt sich auch in SDG 8 *Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum*.

Erwägungen

Zu den Auswirkungen der einzelnen Technologien, die erneuerbare Energien (EE) nutzen, auf die regionale Wertschöpfung liegen einige Untersuchungen vor. So hat das IÖW bereits 2010 ein Modell zur Ermittlung von Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekten (WEBEE-Modell) erarbeitet und 2015 weiter entwickelt (Hirschl et al. 2015). Salecki (2017) untersucht auf Basis dieses WEBEE-Modells die Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekte gängiger EE-Technologien angepasst auf ausgewählte Gemeinden. Er nimmt dabei spezifische Modellanpassungen an die jeweilige Gemeinde (Einkommensniveau, Beschäftigungsintensität, kommunale Steuersätze) vor. Daher können die Angaben von Salecki nicht ohne weiteres hochgerechnet werden (Salecki 2017: 415). Zudem beziehen sich die Werte des IÖW-Modells auf den Status Quo 2012 und ein Szenario für 2020. Sie sind daher nur eingeschränkt verwendbar. Ferner fokussieren sie allein auf EE-Technologien.[9] Nur für einzelne Technologieoptionen sind in den GEMIS-Prozessdaten die Beschäftigungseffekte hinterlegt. Allerdings werden sie nicht nach dem Ort der Wertschöpfung unterschieden. Die zu erwartenden Effekte der Wärmeversorgungslösungen auf die regionale Wertschöpfung sind insgesamt von den Rahmenbedingungen in den Untersuchungsgebieten abhängig und stark individualisiert zu beurteilen.

Bewertungsstufen

Wie bei den übrigen qualitativen Indikatoren müssen bei der Bewertung der regionalen Wertschöpfung die Rahmenbedingungen sorgsam abgewogen werden.[10] Unterstützend dabei können die Beschäftigungseffekte aus den GEMIS-Prozessdaten und die Wertschöpfungseffekte auf Basis des IÖW-WEBEE-Modells herangezogen werden. Im Folgenden werden die Erwägungen für die Bewertungsstufen 1, 3 und 5 dargestellt. Je nach Zusammensetzung der Wärmeversorgungslösung ergeben sich dann die Stufen 2 und 4 als Zwischenstufen.
Die Bewertung erfolgt mit **Stufe 1**, wenn bei Umsetzung der Versorgungsoption positive Beschäftigungseffekte in der Region zu erwarten sind. Von diesen ist auszugehen, wenn der Großteil der Wertschöpfung, die durch diese Versorgungsoption induziert wird, in der Region (Landkreis und/ oder Umkreis von 200 km) stattfindet und an der Umsetzung primär regionale Unternehmen, wie Stadtwerke, beteiligt sind.
Die Bewertung erfolgt mit **Stufe 3,** wenn bei Umsetzung der Versorgungsoption positive Beschäftigungseffekte in Deutschland zu erwarten sind. Der Großteil der Wertschöpfung, die durch diese Versorgungsoption induziert wird, findet überregional, aber in Deutschland statt. An der Umsetzung sind vor allem überregional tätige Unternehmen (EVU) mit Sitz in Deutschland beteiligt.
Die Bewertung erfolgt mit **Stufe 5**, wenn ein Großteil der Wertschöpfung, die durch diese Versorgungsoption induziert wird, im Ausland stattfindet und importiert wird. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn die Energieträger zum weit überwiegenden Teil überregional aus dem Ausland importiert werden.

Bewertungs-beispiel

Anders als bei den Kriterien mit quantitativen Indikatoren, sind hier die Rahmenbedingungen der einzelnen Versorgungsoptionen sorgsam abzuwägen. Beruht die Wärmeversorgungslösung z.B. zu 33 % auf Solarthermie und zu 67 % auf Gas-Brennwert, sind folgende Aspekte abzuwägen: Die Produktion der Solarthermieanlage findet in der Regel nicht in der Region und häufig nicht in Deutschland statt (statista 2018). Mit der Planung und Installation geht

[9] Eine Online Version des Wertschöpfungsrechners ist unter: https://www.unendlich-viel-energie.de/themen/wirtschaft/wertschoepfung/wertschoepfungsrechner verfügbar.

[10] Die Abwägungsgründe werden bei der Bewertung in den jeweiligen Erfahrungsberichten dargestellt.

typischerweise aber eine regionale Wertschöpfung einher. Gas wird zu rund 95 % des inländischen Verbrauchs importiert (BAFA 2021; UBA 2020b). Zudem wird der Betriebsführungsaufwand (der mit regionaler Beschäftigung einhergeht) als gering eingeschätzt. Insgesamt wird das Kriterium für eine solche Wärmeversorgungslösung daher mit der Stufe 4 versehen. Die Bewertung ist dabei u.a. abhängig davon, welche Unternehmen an der Umsetzung beteiligt sind und wo diese ihren Sitz haben. Sie erfolgt daher individuell pro Untersuchungsgebiet.

4.2 Redundanz der Wärmequelle

Ziel → Indikator

Die Herausforderung *Unzureichende Befriedigung der Grundbedürfnisse mit nachhaltigen Produkten* kann in der Energieversorgung am ehesten mit dem Ziel der *Unterbrechungsfreien Versorgungssicherheit* bewältigt werden (Rogall 2014: 38 & 66). Dieses Ziel kann in der Wärmeversorgung durch ein hohes Maß an Resilienz (Widerstandsfähigkeit bei kurzfristigen Veränderungen) des Versorgungssystems gewährleistet werden. Daher wird die *Redundanz der Energiequellen* (inkl. der Versorgungsoption über Speicher) als Bewertungskriterium herangezogen. Die unterbrechungsfreie Versorgungssicherheit steht in Bezug zu den SDG 12 *Nachhaltige Konsum und Produktionsmuster* sowie SDG 7 *Bezahlbare und saubere Energie*.

Erwägungen

Die unterbrechungsfreie Versorgungssicherheit wird primär durch die technische Auslegung der Systeme sichergestellt. Dabei kann in Wärmeversorgungskonzepten für kurzfristige Ausfälle vorgesorgt werden, indem Redundanzen eingeplant werden. Bei der Nutzung von EE ist bei der Auslegung deren kurzfristige Verfügbarkeit zu berücksichtigen. In diesem Kriterium steht nicht die Wahrscheinlichkeit von Störfällen im Vordergrund, sondern die Frage, ob auch im Störfall die Versorgung kurzfristig aufrechterhalten werden kann. So kam es im Winter 2020/2021 zu mehreren Störfällen mit Versorgungseinschränkungen in größeren Fernwärmenetzen (Dpa, Redaktion, Agentur 2021; Mdr.de 2021). Die kurzfristige Versorgungssicherheit ist zumeist dann gegeben, wenn der Ausfall einer Wärmequelle (eines Erzeugers) durch weitere Wärmequellen oder Pufferspeichersysteme kompensiert werden kann.

Bewertungsstufen

Vor der Zielstellung eine unterbrechungsfreie Versorgungssicherheit zu gewährleisten, wird das Kriterium wie folgt operationalisiert:

Übersicht 9: Bewertungsstufen für das Kriterium *Redundanz der Energiequellen*

Stufe	Beschreibung
Stufe 1	Die Versorgungsoption verfügt über ein sehr hohes Maß an Resilienz, der Ausfall einer beliebigen Wärmequelle von mehr als drei Quellen oder Pufferspeichern im System kann für die zu erwartende Dauer der Störung durch andere Wärmequellen oder den Pufferspeicher kompensiert werden.
Stufe 2	Die Versorgungsoption verfügt über ein hohes Maß an Resilienz, der Ausfall einer von drei Wärmequellen oder Pufferspeichern im System kann durch eine weitere, ggf. durch Notaggregate kompensiert werden.
Stufe 3	Die kurzfristige Versorgungssicherheit ist formal gegeben, d.h. der Ausfall einer Wärmequelle von zwei Wärmequellen oder Speichern kann kompensiert werden.
Stufe 4	Die kurzfristige Versorgungssicherheit ist nicht vollständig gegeben, bei Ausfall einer Wärmequelle kann die Versorgung nur teilweise ggf. mit spürbaren Einschränkungen für die Wärmenutzer*innen und durch ein vorhandenes Notfallaggregat (mit schlechteren ökologischen Auswirkungen und höheren Kosten) gewährleistet werden.
Stufe 5	Die unterbrechungsfreie Versorgung kann nicht garantiert werden.

Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertungs-beispiel

Anders als bei den Kriterien mit quantitativen Indikatoren, sind hier die Rahmenbedingungen der einzelnen Versorgungsoptionen sorgsam abzuwägen. Beruht die Wärmeversorgungslösung z.B. zu 33 % auf Solarthermie und zu 67 % auf Gas-Brennwert, so erfolgt die Bewertung mit Stufe 5, da der Ausfall des Gaskessels in den Wintermonaten nicht durch die Solarthermie kompensiert werden könnte.

4.3 Geringe Wärmegestehungskosten

Ziel → Indikator

Die Herausforderung *Instabilitäten (auf den Geld- & Finanzmärkten, durch Konzentrationstendenzen, der Preisentwicklung) und Externalitäten* betrifft mehrere Themenbereiche. Instabilitäten auf den Geld- und Finanzmärkten sind für die Bewertung der Versorgungsoptionen nachrangig, da sie nicht in der Struktur der Versorgungsoption selbst, sondern in der Finanzierung liegen. Sie werden im Folgenden nicht betrachtet. Konzentrationstendenzen und die daraus folgenden Preisimpulse können durch die Abhängigkeit von Rohstoffimporten entstehen. Dies wird im folgenden Kriterium (*Geringe außenwirtschaftliche Abhängigkeit*) konkret betrachtet. Darüber hinaus ergeben sich Preissteigerungen durch die Kostenstruktur innerhalb der Wertschöpfungskette. Das Ziel liegt daher in geringen Wärmegestehungskosten (WGK), um eine bezahlbare Energieversorgung und möglichst geringe volkswirtschaftliche Kosten zu gewährleisten. Damit ist ein Bezug zu SDG 7 *Bezahlbare und saubere Energie* gegeben.

Erwägungen

Neben betriebswirtschaftlichen Kosten existieren zudem externe Kosten, die all jene Kosten einschließen, die bei der Bereitstellung der Energiedienstleistung durch externe Dritte getragen werden. Dies sind z.B. Kosten, die Bürger*innen, künftige Generationen und die Natur als Gemeinlasten tragen (Rogall und Gapp-Schmeling 2021: 66). Die Summe der betriebswirtschaftlichen und der externen Kosten ergibt die volkswirtschaftlichen bzw. gesellschaftlichen Kosten. Die externen Kosten können i.d.R. nicht genau ermittelt werden, da Schäden an der Natur sowie gesundheitliche Belastungen und gesellschaftliche Kosten nur schwer in Geldeinheiten bewertet werden können (BMU 1998: 16). Da die externen Effekte nicht monetarisiert werden können (Rogall und Gapp-Schmeling 2021: 89-94), können sie hier nicht berücksichtigt werden. Sie werden durch unterschiedliche Kriterien in der ökologischen und sozial-kulturellen Dimension umfassend abgebildet (z.B. Natur-und Klimaverträglichkeit). Um den Vergleich der Wärmeversorgungsoptionen in Bezug auf ihren Beitrag zur Bewältigung der Herausforderung und der Erreichung des Qualitätsziels durchzuführen, werden demnach die betriebswirtschaftlichen WGK in € / MWh als Indikator herangezogen. Sofern in den Untersuchungsgebieten möglich und leistbar, werden die WGK mit Grenze ‚Übergabe Hausverteilung' nach der Annuitätenmethode angelehnt an die Richtlinie 2067 des VDI 2067-1/2012 2012 auf Grundlage von gesammelten Erfahrungswerten der Projektpartner zu Einzelpositionen (z.B. Angebote oder Abrechnungen) ermittelt oder aber durch Sekundärdaten für vergleichbare Lösungen abgeschätzt.

Vergleichswerte

Als Vergleichswerte zur Einordnung der ermittelten Werte können die Ergebnisse der Berechnung von WGK zentraler und dezentraler Wärmeversorgung im städtischen Raum der dena Studie ‚Urbane Energiewende' herangezogen werden. Die Bandbreite bewegt sich zwischen 0 €/MWh für Wärme aus EE-Überschussstrom (nach dem Opportunitätskostenprinzip unter der Prämisse der ansonsten alternativlosen Abregelung) und etwa 280 €/MWh als obere Grenze für eine dezentrale Luft-Wasser-Wärmepumpe im urbanen Bereich (dena 2019a: Teil A - 49).

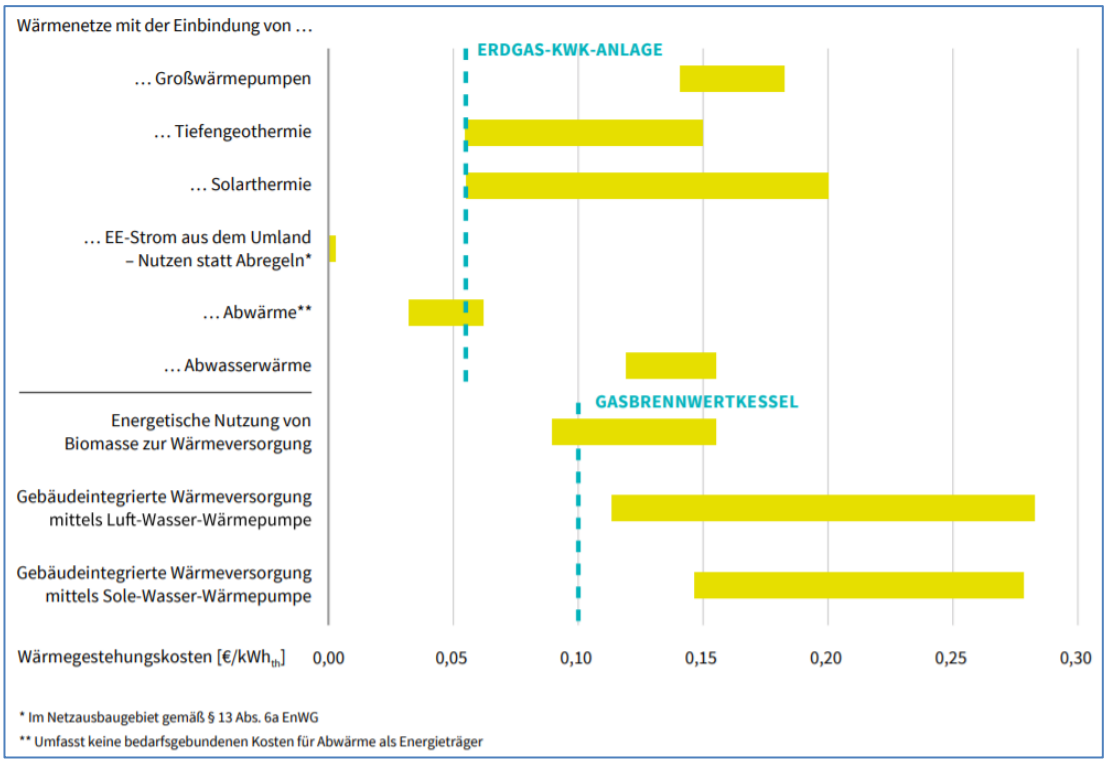

Abbildung 4: Bandbreite von Wärmegestehungskosten nachhaltiger Wärmelösungen und Kosten fossiler Versorgung als Vergleichswerte.
Quelle: dena (2019a).

Bewertungsstufen

Nach der Bandbreite der dargestellten WGK von zentralen und dezentralen Versorgungsoptionen im Gebäudebereich wird das Kriterium *Geringe Wärmegestehungskosten* wie folgt operationalisiert.

Übersicht 10: Bewertungsstufen für das Kriterium *Wärmegestehungskosten*

Bewertung	Bedeutung: Die WGK in € / MWh der Versorgungsoption sind größer oder gleich	(aber) kleiner als
Stufe 1	-	60 € / MWh
Stufe 2	60 € / MWh	120 € / MWh
Stufe 3	120 € / MWh	180 € / MWh
Stufe 4	180 € / MWh	240 € / MWh
Stufe 5	240 € / MWh	-

Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertungs-beispiel

In den Untersuchungsgebieten wurden spezifische Wärmeversorgungslösungen erarbeitet. Dabei werden die WGK durch das KoWa-Team auf Basis der verfügbaren Daten berechnet. Diese Berechnung berücksichtigt dabei auch die künftigen Kosten der CO_2-Bepreisung. Nur falls keine konzeptspezifischen Daten vorliegen, wird die Bandbreite der WGK auf Basis der o.g. Dena-Daten geschätzt.
Beruht die Wärmeversorgungslösung zu 33 % auf Solarthermie und zu 67 % auf einem dezentralen Gas-Brennwertkessel, liegen die Kosten nach dena (2019b) zwischen 86 € und 133 € pro MWh. In dieser Kostenspanne sind allerdings die künftigen Kosten der CO_2-Bepreisung noch nicht berücksichtigt. Kemmler et al. (2020) gehen z.B. für 2030 von 180 €/t CO_2 aus. Unter Berücksichtigung der künftigen Kosten der CO_2-Bepreisung (siehe Tabelle 5) ergibt sich eine Bewertung der Versorgungslösung mit Stufe 3.

Tabelle 5: Kostenabschätzung für eine beispielhafte Wärmeversorgungsoption mit 33 % Solarthermie und 67 % Gas Brennwert

Berechnung	Untere Grenze der WGK	Obere Grenze der WGK
Kostenschätzung nach Dena	85,15 €/ MWh	133,00 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. BEHG 2021 (25 € / t)	90,13 €/ MWh	137,98 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. BEHG 2022 (30 € / t)	91,13 €/ MWh	138,98 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. BEHG 2023 (35 € / t)	92,13 €/ MWh	139,98 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. BEHG 2024 (45 € / t)	94,12 €/ MWh	141,97 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. BEHG 2025 (55 € / t)	96,11 €/ MWh	143,96 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. Prognose 2030 (180 € / t)	121,02 €/ MWh	168,87 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. Prognose 2040 (346 € / t)	154,10 €/ MWh	201,95 €/ MWh

Quelle: Eigene Berechnung; Kosten aus dena 2019a; CO_2-Preisprognose aus Kemmler et al. 2020.

4.4 Importquote von Energieträgern und Betriebsstoffen

Ziel → Indikator

Wirtschaftliche Abhängigkeit, z.B. von Energieträgern für die Wärmeversorgung, kann die langfristige Versorgungssicherheit gefährden. Deutschland importiert 100 % seines Mineralöl-, 95 % seines Erdgas- und 100 % seines Netto-Uranverbrauchs bezogen auf den Primärenergiebedarf (UBA 2020b). Im Jahr 2019 wendete Deutschland 61 Mrd. € für die Energieimporte auf (AGEB 2020a: 8). Diese Importe müssen aus den Einkommen der Deutschen Haushalte und Unternehmen bezahlt werden, diese Gelder fehlen der inländischen Nachfrage und zwingen Deutschland in anderen Sektoren Überschüsse gegenüber den Handelspartnern zu erzielen. Als Kriterium für das Ziel einer *geringen außenwirtschaftlichen Abhängigkeit* werden die Importquoten der Energieträger betrachtet. Die Importquote kann dem SDG 17 *Partnerschaften zur Erreichung der Ziele* zugeordnet werden.

Erwägungen

Werden für die Versorgungslösung Energieträger verwendet, die zu einem hohen Anteil importiert werden müssen und für die keine Alternativen im Inland zur Verfügung stehen, entsteht im großen Maßstab eine außenwirtschaftliche Abhängigkeit. Deutschland müsste ggf. politische Kompromisse eingehen, um die Versorgung der Bevölkerung mit diesen Energieträgern für die Wärmeversorgung nicht zu gefährden. Dies kann durch eine möglichst hohe Unabhängigkeit und Substituierbarkeit der Energieträger durch inländische Alternativen vermieden werden.

Bewertungsstufen

Für das Ziel *Geringe außenwirtschaftliche Abhängigkeit* wird die Importquote von Energieträgern und Betriebsstoffen al Kriterium zur Bewertung herangezogen. Werden für eine Wärmeversorgungslösung verschiedene Energieträger genutzt, so ergibt sich die Importquote aus dem gewichteten Mittel der verwendeten Energieträger. Das Kriterium wird in folgenden fünf Stufen operationalisiert.

Übersicht 11: Bewertungsstufen für das Kriterium *Importquote*

Bewertung	Die gewichtete Importquote der verwendeten Energieträger ist	
	größer oder gleich	(aber) kleiner als
Stufe 1	-	10 %
Stufe 2	10 %	20 %
Stufe 3	20 %	40 %
Stufe 4	40 %	50 %
Stufe 5	50 %	-

Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertungs-beispiel

Beruht die Wärmeversorgungslösung für ein Netz z.B. zu 33 % auf Solarthermie und zu 67 % auf Gas-Brennwert, so erfolgt die Bewertung mit Stufe 5, da die gewichtete Importquote bei über 50 % liegt. Beruht die Wärmeversorgungslösung umgekehrt z.B. zu 30 % der Wärmemenge auf Gas-Brennwert und zu 70 % auf Solarthermie, ergibt sich eine gewichtete Importquote von knapp unter 30 % und es erfolgt die Bewertung mit Stufe 3.

4.5 Finanzielle Planbarkeit

Ziel → Indikator

Um das Problem der ‚Staatsverschuldung und unzureichenden Ausstattung mit meritorischen Gütern' zu lösen, braucht es einen handlungsfähigen Staatshaushalt, der angemessene Investitionen in die Infrastruktur (hier: der Wärmeversorgung) ermöglicht. Im Fall der Wärmeversorgung müssen neben dem Staat auch die Kommunen, Versorgungsunternehmen und die Wärmeabnehmer (Unternehmen und Haushalte) finanziell handlungsfähig bleiben. Dies gelingt mit einer hohen Planbarkeit der Ausgaben und Einnahmen für alle Akteure der Wertschöpfungskette. Im Fall der Wärmeversorgung müssen Preise und Kosten daher für Erzeuger, Versorger, Kommunen, Unternehmen und Haushalte planbar sein. Eine hohe Planbarkeit führt für die Akteure zu einer vorhersehbaren Preis- und Kostenänderung und geht mit einem geringen Risiko unvorhergesehener Preiserhöhungen einher. Das Ziel der finanziellen Planbarkeit weist für Kommunen und kommunale Betriebe einen Bezug zum Indikator ausgeglichene Staatshaushalte des SDG 8 *Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum* auf.

Erwägungen

Für die finanzielle Planbarkeit sind übergreifende technologiespezifische, aber auch cluster-individuelle Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Ein geringer Anteil verbrauchs- und betriebsgebundener Kosten begünstigt grundsätzlich die Planbarkeit. Dahingegen führt ein hoher Anteil verbrauchsabhängiger Kosten insbesondere dann zu einer geringen Planbarkeit, wenn für die Energieträger eine hohe Volatilität im Preis anzunehmen ist und die Kostenbestandteile für den Investitionszyklus nur mit hoher Varianz planbar sind. Dies ist zum Beispiel bei fossilen Energieträgern aufgrund der CO_2-Preise der Fall. Sowohl im EU-Emissionshandel (EU ETS) als auch voraussichtlich ab 2026 im nationalen Emissionshandelssystem (nEHS) erfolgt der Zertifikatehandel anhand einer freien Preisbildung im Auktionsverfahren (EU-KOM 2021; BEHG). Die Entwicklung der CO_2-Preise ist abhängig von einer ambitionierten Klimapolitik. Auch die Verteilung der CO_2-Kosten zwischen Mieter*innen und Wohnungswirtschaft ist derzeit nicht planbar. Der Anteil der verbrauchsabhängigen Kosten ist zunächst technologiespezifisch.
Die Verteilung der Kosten und die Planbarkeit des Vergütungsmodells sind hingegen abhängig von den spezifischen Vereinbarungen und Rahmenbedingungen im Untersuchungsgebiet. Sie werden durch die Vertragsgestaltung beeinflusst und müssen spezifisch pro Untersuchungsgebiet angemessen berücksichtigt werden.

Die *finanzielle Planbarkeit* als Kriterium kann folgendermaßen operationalisiert werden.

Bewertungsstufen

Übersicht 12: Bewertungsstufen für das Kriterium *Finanzielle Planbarkeit*

Stufe	Beschreibung
Stufe 1	sehr hohe Planbarkeit, sehr geringes Risiko für plötzliche Preissteigerung, aufgrund eines sehr geringen Anteils von verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten an den Gesamtkosten und oder konkrete vertraglichen Festpreisen.
Stufe 2	hohe Planbarkeit, geringes Risiko für plötzliche Preissteigerung aufgrund eines eher geringen Anteils von verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten an den Gesamtkosten
Stufe 3	mittlere Planbarkeit, Preis- und Kostenschwankungen bei Veränderung der Rahmenbedingungen möglich.
Stufe 4	geringe Planbarkeit, Preissteigerung aufgrund eines eher hohen Anteils von verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten an den Gesamtkosten oder Änderung der Rahmenbedingungen wahrscheinlich.
Stufe 5	sehr geringe Planbarkeit, sehr hohes Risiko für plötzliche Preissteigerung aufgrund eines sehr hohen Anteils von verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten an den Gesamtkosten.

Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertungs-beispiel

Bei der Einschätzung der finanziellen Planbarkeit sind sowohl von technologiespezifische, als auch von quartiersspezifische Faktoren zu beachten. Beruht die Wärmeversorgungslösung für ein Netz z.B. zu 33 % auf Solarthermie und zu 67 % auf Gas-Brennwert, sind Preissteigerungen aufgrund des hohen Anteils der Brennstoffkosten an den Gesamtkosten wahrscheinlich. Je nach quartiersspezifischen Bedingungen, wäre eine Bewertung mit der Stufe 4 nachvollziehbar.

5 Sozial-kulturelle Dimension

Überblick

Im Rahmen der sozial-kulturellen Dimension werden ebenfalls fünf verschiedene Herausforderungen in Qualitätsziele und Kriterien überführt. Für die Analyse von Versorgungsoptionen müssen diese Kriterien stärker angepasst werden als die Kriterien in der ökologischen und ökonomischen Dimension. Auch hier soll der Beitrag der jeweiligen Versorgungsoption zum Erreichen des Qualitätsziels bewertet werden. Übersicht 13 stellt diese Kriterien der ökonomischen Dimension im Überblick dar. Danach werden sie entlang der Kriterien erläutert.

Übersicht 13: Bewertungskriterien in der sozial-kulturellen Dimension

Herausforderung	Qualitätsziel	Kriterien und Indikatoren
Sozial-kulturelle Dimension		
Fehlentwicklungen in Wirtschaft, Politik, Gesell.	Good governance	Erwartete Akzeptanz vor Ort
Unsicherheit der dauerhaften Energieversorgung	Langfristige Versorgungssicherheit	Reichweite der eingesetzten Ressourcen bei gleichbleibendem Verbrauch
Zentralisierung der Versorgungsstrukturen	Angemessene Dezentralisierung	Komplexität der Entscheidungsstrukturen
Gewaltsame Konflikte, Massenmigration	Innere und äußere Sicherheit/ Globale Verträglichkeit	Konfliktpotential der eingesetzten Ressourcen
Technische Risiken (z.B. Atomtechnik, Fracking)	Vermeidung von Risikotechnologien	Risikoeinschätzung: Schadenerwartung und -ausmaß

Quelle: Eigene Darstellung.

5.1 Erwartete Akzeptanz vor Ort

Ziel → Indikator

Fehlentwicklungen in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft müssen wirksam bekämpft werden. Hinter dem Qualitätsziel der *Good Governance* verbirgt sich die Idee einer Politik und Verwaltung, die Meinungen und Bedürfnisse auch von Minderheiten und Minderprivilegierten in einer Mehrheitsgesellschaft berücksichtigt und respektiert. Eine transparente und rechenschaftspflichtige Exekutive muss daher angemessene und wirksame Eingriffe auch in die Märkte vornehmen, um volkswirtschaftlich gewünschte Ziele zu erreichen, wenn es zu Marktversagen kommt. Diese Eingriffe sollten aber nicht durch den Missbrauch der Entscheidungsmacht für private Zwecke oder persönliche Interessen geleitet sein (EU-KOM 2017: 2). Ein wichtiger Indikator auf volkswirtschaftlicher Ebene ist daher der Corruption Perception Index (CPI). Intransparente Entscheidungen, willkürlich scheinende Vergabeverfahren und geringe Kommunikation können die Akzeptanz (politischer) Entscheidungen in der Bevölkerung beeinträchtigen (Alemann 2007: 3 & 457). Dieses Ziel steht in direktem Zusammenhang mit den SDG 16 *Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen* sowie SDG 17 *Partnerschaften*. Um einen Beitrag zum Ziel *Good Governance* zu leisten, sollte eine Versorgungsoption über ein hohes Maß an Akzeptanz in der lokalen Bevölkerung verfügen. Denn wird eine Versorgungsoption ausgewählt, die in der Bevölkerung nicht akzeptiert ist, kann der Eindruck von Intransparenz und korruptem Vorgehen entstehen, selbst wenn die Entscheidungsträger die aus ihrer Sicht beste, z.B. ökologischste Option ausgewählt haben. Wichtig für die Akzeptanz sind daher ein transparentes Vorgehen und ein ausreichendes Maß verständlicher Kommunikation.

Erwägungen und Bewertungsstufen

Die Bewertung dieses Kriteriums kann sich je nach Situation im Quartier unterscheiden. Ein und dieselbe Versorgungsoption könnte in Quartier A akzeptiert sein, in Quartier B aber auf Ablehnung stoßen.
Zur Einschätzung des Kriteriums werden in AP 4 (Konzeption) zunächst Sekundärdaten zur allgemeinen Akzeptanz verschiedener Versorgungsoptionen genutzt. Zudem werden erste Erkenntnisse aus den Akteursanalysen herangezogen. Diese werden im späteren AP 5 (Erprobung der Konzepte) durch Befragungen in den Quartieren überprüft. In beiden Fällen wird das Kriterium wie folgt operationalisiert.

Übersicht 14: Bewertungsstufen für das Kriterium *Erwartete Akzeptanz vor Ort*

Stufe	Beschreibung
Stufe 1	Für die Versorgungsoption ist im Quartier eine hohe Akzeptanz zu erwarten.
Stufe 2	Für die Versorgungsoption kann im Quartier eine hohe Akzeptanz durch zusätzliche Kommunikations- und Partizipationsmaßnahmen erreicht werden. Es gibt einige Befürworter*innen und auch Skeptiker*innen, aber keine klaren Gegner*innen im Quartier.
Stufe 3	Für die Versorgungsoption gibt es im Quartier Befürworter*innen aber auch kritische Gegenstimmen.
Stufe 4	Für die Versorgungsoption gibt es im Quartier viele kritische Gegenstimmen, es gibt nur wenige Befürworter*innen. Mit sehr viel Aufwand könnte die Akzeptanz verbessert werden. Es ist möglich, dass konkrete Maßnahmen gegen die Option eingeleitet werden (z.B. Proteste, Rechtsmittel).
Stufe 5	Für die Versorgungsoption gibt es im Quartier keine Akzeptanz. Es sind Proteste und weitere Maßnahmen zu erwarten, welche die Realisierung der Option verhindern wollen.

Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertungsbeispiel

Beruht die Wärmeversorgungslösung für ein Netz z.B. zu 33 % der Wärmemenge auf Solarthermie und zu 67 % auf Gas-Brennwert, sollten die Sekundärdaten zur allgemeinen Akzeptanz der verschiedenen Technologien berücksichtigt werden, sofern keine quartiersspezifischen Erkenntnisse vorliegen. Herkel (2018) weist auf eine mittlere Akzeptanz für Wärmenetze hin, die von verschiedenen Faktoren abhängt (z.B. Anschlusszwang/ Anschlussquote). Giovannetti et al. (2018) erkennen eine hohe Akzeptanz für dezentrale solarthermische Anlagen und eine niedrige Akzeptanz für zentrale Anlagen. Für Gasversorgung kann bisher von einer hohen Akzeptanz ausgegangen werden, die aber aufgrund der Klimawirkung und der Preisentwicklung in Zukunft abnehmen dürfte. In der Gesamtschau ist für die hier beschriebene Lösung von einer mittleren Akzeptanz (Stufe 3) auszugehen, d.h. es sind Befürworter*innen, aber auch klare Gegner*innen zu erwarten.

5.2 Reichweite der eingesetzten Ressourcen

Ziel → Indikator

Die langfristige Versorgungssicherheit einer Wärmeversorgungslösung ist abhängig von der Reichweite der eingesetzten Energieträger. Quasi unerschöpfliche Ressourcen sind auch in Zukunft uneingeschränkt verfügbar. Die statische Reichweite fossiler Energieträger ergibt sich aus den Reserven (sicher nachgewiesen und wirtschaftlich gewinnbar) und dem jährlichen Verbrauch. Eine Wärmeversorgungsoption ist in der Regel mit hohen Investitionen in die Infrastruktur verbunden und sollte so ausgelegt sein, dass eine möglichst langfristige Versorgung gewährleistet ist. Trotz seiner Wichtigkeit wird dieses Ziel in den SDG nur durch SDG 7 *Bezahlbare und Saubere Energieversorgung* tangiert.

Als Kriterium kann die *Reichweite der im Betrieb eingesetzten Energieträger* verwendet werden. Laut Energiestudie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) betrugen die Reserven fossiler Energierohstoffe (inkl. Uran) im Jahr 2018 40.769 EJ (Exajoule). Davon wurden im Jahr 2018 insgesamt 556 EJ gefördert, was einer Reichweite von rund 73 Jahren entspricht (BGR 2020: 17). Tabelle 6 enthält Angaben über die statische Reichweite fossiler Energieträger.

Tabelle 6: statische Reichweite fossiler Energieträger

Energieträger	Reserven (EJ)	Reserven (Gt CO_2)	Verbrauch 2018	Statische Reichweite in Jahren
Erdöl*	10.201	843	195	52
Erdgas	7.685	431	147	52
Hartkohle*	18.634	1.763	170	110
Weichkohle*	3.608	364	10	361
Fossile gesamt	40.129	3.402	522	77
Uran*	640	-	34	19

Quelle: BGR 2020: 17 & 97, eigene Berechnung.* = Aufgrund von bestehenden politischen Beschlüssen nicht mehr einsetzbar.

Erwägungen

Bei der Bewertung der statischen Reichweite ergeben sich zumindest zwei Probleme. Erstens ist die statische Reichweite kein fester Wert, sondern verändert sich aufgrund der Dynamik der Faktoren ‚wirtschaftlich gewinnbar' und ‚jährlicher Verbrauch': Je knapper ein Rohstoff ist, desto höher der erzielbare Preis. Die wirtschaftlich gewinnbare Menge und damit die statische Reichweite steigen, da nun auch schwer bzw. unkonventionell erschließbare Lagerstätten Berücksichtigung finden. Wird ein Rohstoff beispielsweise durch politisch-rechtliche Instrumente verknappt, sodass der Verbrauch sinkt, erhöht sich die statische Reichweite ebenfalls. Die Betrachtung der statischen Reichweite suggeriert in diesem Fall eine gestiegene langfristige Versorgungssicherheit. Diese wäre aber mit erheblich höherem Risiko verbunden oder unter dem Aspekt einer politisch-rechtlichen Umfeldanalyse nicht haltbar. Zweitens sind zur Begrenzung der Klimaerwärmung die anthropogenen THGE radikal zu reduzieren, um das Ökosystem und die Überlebensfähigkeit auf dem Planeten zu sichern. Hierzu hat sich die Weltstaatengemeinschaft 2015 in Paris vertraglich verpflichtet. Es spielt also weniger eine Rolle, wie lange ein fossiler Energieträger noch verfügbar ist, sondern wieviel davon höchstens noch verbrannt werden darf.

THGE-Budget

Neben der Reichweite der Reserven muss daher auch der in ihnen gebundene Kohlenstoff bzw. die durch Verbrennung resultierenden CO_2-Emissionen berücksichtigt werden. Laut IPCC dürfen zwischen 2018 und 2050 nur noch 420 Gt (1,5° C-Ziel) bzw. 1170 Gt (2,0° C-Ziel) CO_2 ausgestoßen werden (IPCC 2018: 108).[11] In den fossilen Energieträgern sind 3.402 Gt gebunden. Davon dürfen nach dem Budgetansatz aber nur 12 % (1,5° C-Ziel) bzw. 34 % (2,0° C-Ziel) genutzt werden.[12] Da das Paris-Abkommen die Begrenzung der Klimaerwärmung auf

[11] Diese Budgets berücksichtigen keine Verstärkereffekte, wie das Auftauen von Permafrostböden. Durch diese Verstärkereffekte könnte sich das Budget jeweils um rund 100 Gt. verringern (IPCC 2018: 108). Jährlich werden rund 42 Gt. ausgestoßen. Damit sind seit 2018 bereits rund 120 Gt. des Budgets verbraucht worden.

[12] Dabei wird vereinfachend angenommen, dass das Budget nur durch die Nutzung fossiler Energieträger aufgebraucht wird.

deutlich unter 2,0° C und möglichst 1,5° C festschreibt, ist die Orientierung an der Reichweite nach dem 1,5° C-Ziel-Budget geboten.

Tabelle 7: statische Reichweite fossiler Energieträger nach dem THGE-Budget.

Energieträger	genutztes Budget p.a.	Nutzbarer Anteil (1,5° C)	Reichweite THGE- Budget 1,5° C	Nutzbarer Anteil (2,0° C)	Reichweite THGE Budget 2,0° C
Erdöl*	16	104	6	290	18
Erdgas	8	53	6	148	18
Hartkohle*	16	218	14	606	38
Weichkohle*	1	45	45	125	124
Fossile gesamt	44,25	12%		34%	

Quelle: Eigene Berechnungen, Budget aus IPCC 2018: 108, table 2.2. Eigene Berechnung.
*** = Aufgrund von bestehenden politischen Beschlüssen nicht mehr einsetzbar.**

In Deutschland gelten der Kohle- und der Atomausstieg, auch dürfen ab 2026 Ölheizungen nur noch unter engen Voraussetzungen (Hybridlösungen, keine verfügbaren Alternativen) installiert werden. Für Technologien, die einen dieser drei Energieträger verwenden, muss daher aufgrund der gesetzlichen Bestimmungen von einer Reichweite von null ausgegangen werden.

Basierend auf den genannten Erwägungen ergibt sich folgende Operationalisierung.

Bewertungsstufen

Übersicht 15: Bewertungsstufen für das Kriterium *Reichweite der eingesetzten Ressourcen*

Stufe	Beschreibung
Stufe 1	Es werden fast ausschließlich quasi-unerschöpfliche Ressourcen (z.B. Sonne, Wind) genutzt und bei der ergänzenden Nutzung erneuerbarer Ressourcen wird zwingend die Regenerationsrate eingehalten. Nur zur Sicherstellung der kurzfristigen Versorgungssicherheit werden fossile Energieträger eingesetzt. Die Budget-Reichweite der Versorgungsoption liegt über 300 Jahren.
Stufe 2	Der Energiebedarf wird zum überwiegenden Teil aus quasi unerschöpflichen Ressourcen gedeckt. Ergänzend werden hauptsächlich erneuerbare Ressourcen genutzt. Lediglich in sehr geringem Umfang werden fossile Energieträger eingesetzt, die durch synthetische Kraftstoffe ersetzt werden könnten.
Stufe 3	Der Energiebedarf wird zum überwiegenden Teil aus quasi-unerschöpfliche Ressourcen oder erneuerbaren Ressourcen gedeckt, deren Regenerationsrate eingehalten wird. Ressourcen, deren Budget-Reichweite vor 2050 endet, werden insgesamt zu maximal 20 % eingesetzt.
Stufe 4	Der Energiebedarf wird zum überwiegenden Teil aus Ressourcen gedeckt, deren Budget-Reichweite vor 2050 endet; ergänzend werden erneuerbare und quasi-unerschöpfliche Ressourcen genutzt.
Stufe 5	Der Energiebedarf wird fast ausschließlich aus Ressourcen gedeckt, deren BudgetReichweite vor 2050 endet.

Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertungsbeispiel

Beruht die Wärmeversorgungslösung für ein Netz z.B. zu 33 % der Wärmemenge auf Solarthermie und zu 67 % auf Gas-Brennwert, so erfolgt eine Bewertung mit Stufe 4, da der überwiegende Teil des Energiebedarfes aus Gas gedeckt wird, dessen Budget Reichweit 6 Jahre beträgt und damit vor 2050 endet.

5.3 Komplexität der Entscheidungsstrukturen

Ziel → Indikator

Die Zentralisierung der Entscheidungsstrukturen und Konzentration wird in der Energieversorgung durch das Vorhandensein sog. natürlicher Monopole begünstigt. Das Ziel liegt in einer angemessenen Dezentralisierung der Entscheidungsstrukturen im Sinne einer Partizipationsmöglichkeit für unterschiedliche Akteure. Die Komplexität von Entscheidungsstrukturen wird als Indikator für den Beitrag einer Versorgungsoption zur Zielerreichung herangezogen.

Erwägungen und Bewertungsstufen

Eine angemessene Dezentralisierung und damit komplexe Entscheidungsstrukturen liegen vor, wenn verschiedene Aspekte und Anforderungen erfüllt werden.
Erstens ist die Anzahl der entscheidungsbefugten Akteure und deren Stellung untereinander zu berücksichtigen. Kann ein Akteur allein Entscheidungen über die künftige Gestaltung der Wärmeversorgung oder wesentliche Änderungen treffen, ist dies eher negativ zu bewerten.
Zweitens ist neben der Zahl der entscheidungsbefugten Akteure auch deren Konstellation zu berücksichtigen. Stehen die Akteure in einem Abhängigkeitsverhältnis zueinander (z.B. Mutterkonzern und Tochtergesellschaft) und/ oder sind sie vertikal integriert, spricht dies eher für zentralisierte Alleinentscheidungen. Sind die Akteure unabhängig voneinander und auf unterschiedlichen Wertschöpfungsstufen tätig, liegen eher komplexe Entscheidungsstrukturen vor. Drittens sind die Partizipationsmechanismen und die demokratische Kontrollierbarkeit bzw. Beeinflussbarkeit der Entscheidungen zu berücksichtigen. Im Folgenden werden die Erwägungen für einzelne Akteurskonstellationen dargestellt und einer Bewertungsstufe zugeordnet.
Treffen ein kommunales Stadtwerk und eine kommunale Wohnungsbaugesellschaft (die demokratischen Kontrollgremien unterliegen) oder eine Wohnungsbaugenossenschaft die Entscheidungen gemeinsam und werden dabei über geeignete Beteiligungsmechanismen (Mieter*innenrat) die Bedürfnisse der Bewohner*innen und ggf. gewerblicher Unternehmen als Stakeholder berücksichtigt, so wäre eine Bewertung mit **Stufe 1** plausibel.
Die **Stufen 2 bis 3** sollten vergeben werden, wenn nur einige der angesprochenen Elemente erfüllt werden oder diese nur teilweise umgesetzt werden, z.B. wenn es keine Partizipationsmechanismen für die Bewohner*innen gibt. Die **Stufe 4** sollte vergeben werden, wenn nur einzelne Aspekte teilweise erfüllt werden. Die **Stufe 5** trifft zu, wenn ein einzelner vertikal integrierter Akteur über wesentliche Änderungen der Versorgung entscheiden kann und die anderen Akteure keine Partizipationsmöglichkeiten haben.

5.4 Konfliktpotential der eingesetzten Ressourcen

Ziel → Indikator

Die Förderung von nicht erneuerbaren Ressourcen führt global zu zahlreichen Konflikten. Eine Nachhaltigkeitsbewertung verschiedener Energieversorgungsoptionen muss daher auch das Konfliktpotential der eingesetzten Rohstoffe berücksichtigen. Hier ist das SDG 16 *Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen* angesprochen.
Im Folgenden werden schwerpunktmäßig die Rohstoffe betrachtet, die als Energieträger im Betrieb genutzt werden. Gegenüber den in der Produktion von konventionellen Anlagen und EE-Technologien eingesetzten mineralischen Rohstoffen macht die Masse von eingesetzten energetischen Rohstoffen im gesamten Lebenszyklus i.d.R. den weitaus überwiegenden Teil aus.

Das Konfliktpotential eines Energieträgers wird im Wesentlichen beeinflusst durch die Konzentration der Herkunftsländer, aus denen der Energieträger importiert (Drei-Länderkonzentration) wird, und deren gewichtetes Konfliktrisiko bestimmt. Ein vergleichbares Vorgehen findet sich bei Bähr und Neligan (2020).
In der amtlichen Außenhandelsstatistik werden die Importmengen pro Land und Produkt ausgewiesen. Die Statistik führt für das Jahr 2020 für die Erdgasimporte die in Tabelle 8 ausgewiesenen Anteile auf. Die Werte aus der amtlichen Außenhandelsstatistik weisen allerdings nur die direkten Importe aus. Kreysel und Fasold (2021) weisen darauf hin, dass aufgrund der indirekten Importe der Anteil russischer Lieferungen deutlich höher sein dürfte. Allerdings liegen keine konsistent ermittelten Daten zu den indirekten Importen anderer Energieträger vor.[13]

Tabelle 8: Importanteile für Deutschland und Erdgas nach Ländern 2020

Land	Anteil der Erdgasimporte in Deutschland
Niederlande	43,78%
Russische Föderation (ab 05/1992)	29,54%
Norwegen	19,37%
Restliche Länder	7,31%

Quelle: Destatis 2021.

Das Konfliktrisiko eines Landes kann anhand des Indikators ‚politische Stabilität und keine Gewalt' der Worldwide Governance Indicators (WGI) verglichen werden (Bähr und Neligan 2020: 55; Kaufmann et al. 2020). Als Maß für die Konzentration wird der Anteil der drei Herkunftsländer mit den größten Importmengen des Energieträgers in Deutschland (sog. Drei-Länderkonzentration) herangezogen. Auf Basis der anteiligen Importmengen und den WGI-Konfliktrisiko der einzelnen Länder ergibt sich das gewichtete Konfliktrisiko der einzelnen Energieträger.

Tabelle 9: Berechnung des gewichteten Konflikrisikos (Beispiel Erdgas).

Land	Anteil Importe	Konfliktrisiko (nach WGI)	Gewichtet
Niederlande	43,78%	24,29	10,64
Russische Föderation (ab 05/1992)	29,54%	74,29	21,94
Norwegen	19,37%	7,62	1,48
Gewichtetes Drei-Länderkonfliktrisiko			34,05

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis Destatis 2021; Kaufmann et al. 2020.

Aus beiden Indikatoren ergibt sich die in Abbildung 5 dargestellte Matrix zur Bewertung des Konflikpotentials der eingesetzten Energieträger. Über 92 % der Erdgasimporte stammen im

[13] Eine umfassende Analyse – wie Kreysel und Fasold sie für Erdgas durchgeführt haben – kann durch das KoWa-Team nicht für alle relevanten Energieträger durchgeführt werden. Damit werden für die Bewertungen in den Erfahrungsberichten die (direkten) Importanteile der amtlichen Außenhandelsstatistik verwendet. Das KoWa-Team wird in der dritten Projektphase im Austausch mit anderen Forschungsprojekten versuchen, konsistente Daten zu den direkten und indirekten Importen der Energieträger im Wärmebereich zu ermitteln.

Jahr 2020 aus den drei Ländern Niederlande (44 %), Russische Föderation (30 %) und Norwegen (20 %). Aus den World Governance Indikatoren ergibt sich eine Konfliktbewertung von 24,29 für die Niederlande, 74,29 für Russland und 7,62 für Norwegen (WGI). Das mit den Importanteilen gewichtete Konfliktpotential für Erdgas beträgt demnach 34,05. Daraus folgt die Einordnung in Rang 5 für Erdgas. Exemplarisch sind die drei fossilen Energieträger Erdgas, Erdöl und Steinkohle in der Matrix in Abbildung 5 eingetragen.

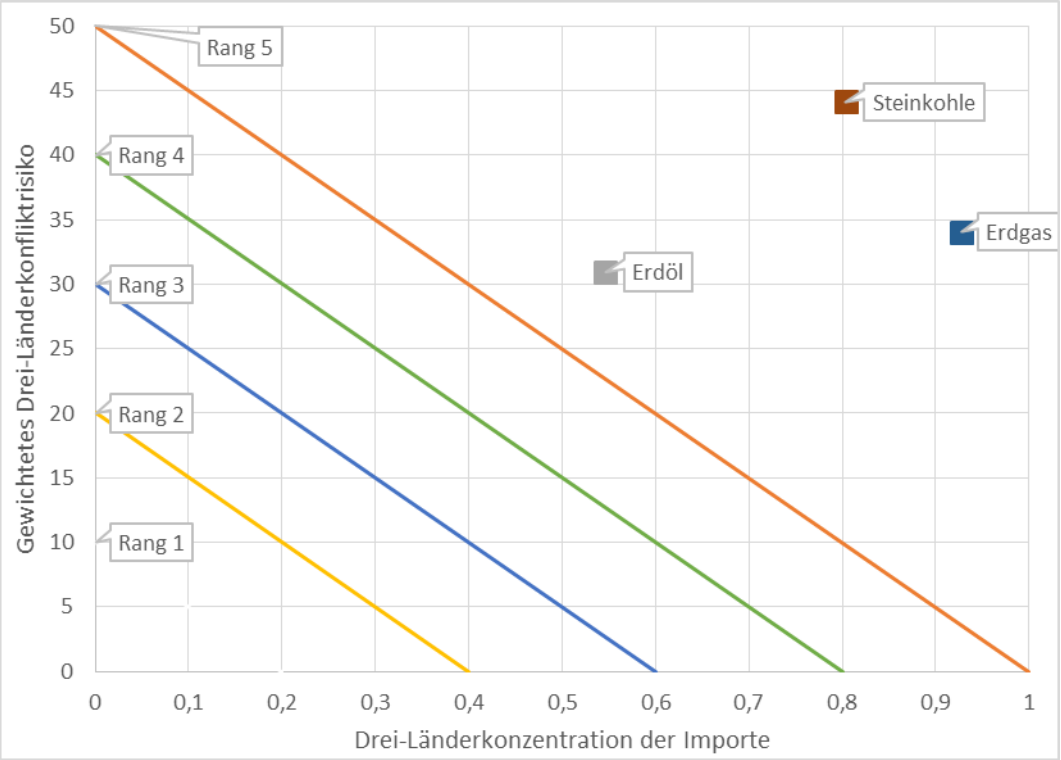

Abbildung 5: Matrix zur Bewertung des Konfliktpotentials der eingesetzten Energieträger. Eigene Darstellung.
Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertungsstufen

Aus der Matrixeinteilung lässt sich folgende Operationalisierung für die hier vorgenommene Bewertung ableiten.

Übersicht 16: Bewertungsstufen für das Kriterium *Konfliktpotential*

Stufe	**Beschreibung** Die verwendeten Rohstoffe für die Versorgungsoption liegen im Durchschnitt …
Stufe 1	… im Matrixfeld für Rang 1. Die Verwendung der Versorgungslösung trägt entscheidend zu einer Verringerung von Konflikten bei.
Stufe 2	… im Matrixfeld für Rang 2. Die Verwendung der Versorgungslösung kann zu einer Verringerung von Konflikten beitragen.
Stufe 3	…im Matrixfeld für Rang 3. Durch die Verwendung der Versorgungslösung kommt es zu keiner grundsätzlich veränderten Lage in Bezug auf Konflikte.
Stufe 4	Für die Versorgungsoptionen, deren verwendete Rohstoffe im Durchschnitt im Matrixfeld für Rang 4 liegen. Die Verwendung der Versorgungslösung kann zu einer Verschärfung von Konflikten beitragen.
Stufe 5	Für die Versorgungsoptionen deren verwendete Rohstoffe im Durchschnitt im Matrixfeld für Rang 5 liegen. Die Verwendung der Versorgunglösung trägt entscheidend zu einer Verschärfung von Konflikten bei.

Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertungs-beispiel

Beruht eine Versorgungslösung zu 67 % auf Erdgas und zu 33 % auf Solarthermie zur Bereitstellung der Wärme, setzt sich die Einstufung anteilig zusammen. Für Solarthermie werden keine Brennstoffe als Energieträger benötigt. Durch die Substitution von fossiler Energie durch quasi-unerschöpfliche und räumlich unbegrenzt verfügbare Sonnenenergie reduzieren sich die Konflikte um fossile Ressourcen. Länderkonzentration und Konfliktpotential sind mit Null zu bewerten.

Tabelle 10: Berechnung des gewichteten Konfliktrisikos einer Versorgungslösung.

Energieträger	Drei-Länderkonzentration	Gewichtetes Konfliktrisiko
Erdgas 67 %	92,7 %	34,05
Solarthermie 33 %	0	0
67 % Erdgas + 33 % Solarthermie	$0{,}67 \cdot 0{,}92 + 0{,}33 \cdot 0$	$0{,}67 \cdot 34 + 0{,}33 \cdot 0$
	$= 0{,}62$	$= 22{,}8$

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis Destatis 2021; Kaufmann et al. 2020.

Die Einstufung der beiden Varianten 67 % Erdgas + 33 % Solarthermie und 33 % + 67 % Solarthermie ist in Abbildung 6 dargestellt.

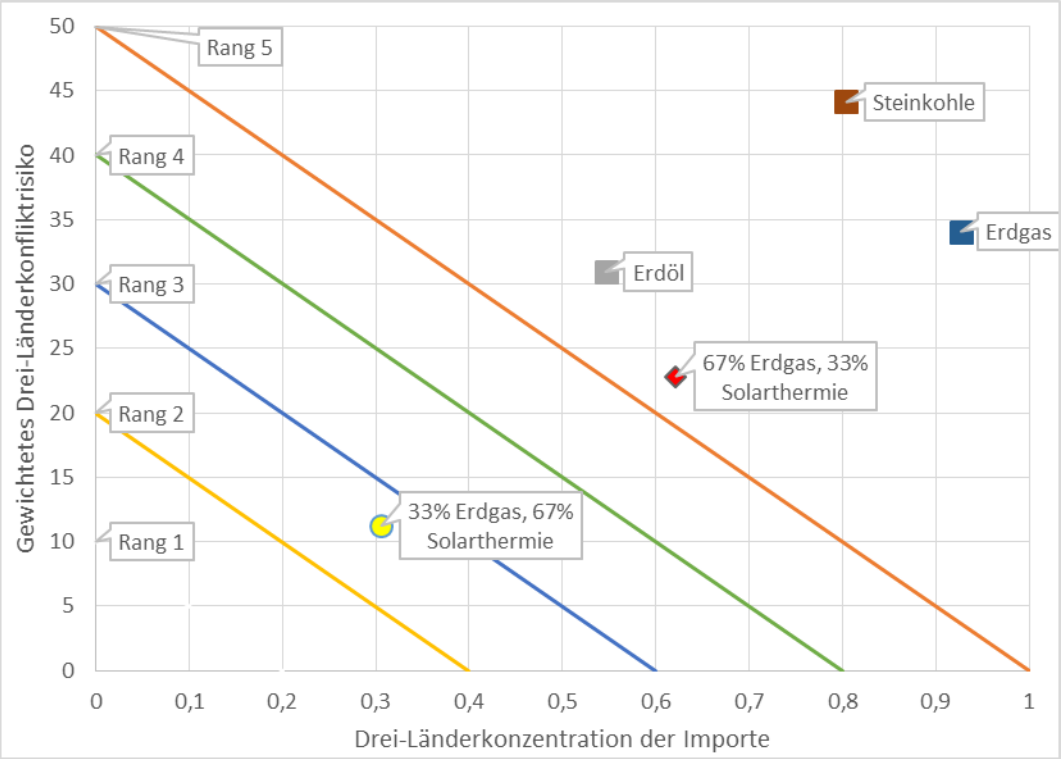

Abbildung 6: Konfliktpotential verschiedener Wärmeversorgungslösungen am Beispiel.
Quelle: Eigene Darstellung.

5.5 Risikoeinschätzung: Schadenserwartung und -ausmaß

Ziel → Indikator

Von einigen Energietechniken gehen bereits im Normalbetrieb (ohne Un- und Störfälle) Risiken aus, die über die Schadstoff- und Treibhausgasemissionen hinausgehen, z.B. ist die dauerhaft sichere Endlagerung von Abfällen aus Atomkraftwerken bis heute nicht geklärt. Von

manchen Energietechniken gehen darüber hinaus, neben den Risiken im Normalbetrieb, zusätzlich besonders große Gefahren im Fall eines Un- oder Störfalls, sowie im Fall von Außeneinwirkungen aus. In der Risikoanalyse wird ein Risiko beschrieben als: „eine Funktion der Wahrscheinlichkeit einer die Gesundheit beeinträchtigenden Wirkung und die Schwere dieser Wirkung als Folge der Realisierung einer Gefahr“ (Art. 3 Nr. 9 VOEG 178/2002)[14]. Das Risiko kann also im Wesentlichen nach der Schadenserwartung (Wahrscheinlichkeit) und dem Schadensausmaß in einer Risikomatrix bewertet werden (Pfeufer 2015; Schabacker o.J.).

Bewertungsstufen

Für die Operationalisierung des Schadensausmaßes werden im KoWa Projekt folgende drei Stufen genutzt.

Übersicht 17: Einstufung des Schadensausmaßes

Stufe	Beschreibung
Stufe 1	unbedeutend: kaum Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung oder die Ökosysteme, im Normalbetrieb und im Störfall.
Stufe 2	kritisch: deutliche negative Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung oder die Ökosysteme im Störfall.
Stufe 3	katastrophal: tödliche Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung oder die Ökosysteme im Störfall; dauerhaft negative Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölkerung im Normalbetrieb.

Quelle: Eigene Darstellung.

Für die Operationalisierung der Schadenserwartung werden im KoWa Projekt folgende drei Stufen genutzt.

Übersicht 18: Einstufung der Schadenswahrscheinlichkeit

Stufe	Beschreibung
Stufe 1	unwahrscheinlich: Es wird eine etablierte Technologie genutzt.
Stufe 2	selten: Bei etablierten Technologien bestehen hinreichend starke wissenschaftliche Hinweise auf Schadwirkungen im Normalbetrieb, die aber noch nicht sicher sind. Oder: Die Technologie ist noch nicht so etabliert, dass es unbekannte Schadenswirkungen im Normalbetrieb ausgeschlossen werden können.
Stufe 3	häufig: Mit dieser Technologie sind bereits Störfälle eingetreten oder Schadenswirkungen im Normalbetrieb bekannt.

Quelle: Eigene Darstellung.

Aus der Bewertung von Schadenserwartung und Schadensausmaß ergibt sich folgende Risikomatrix:

[14] Verordnung (EG) Nr. 178/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. Januar 2002 zur Festlegung der allgemeinen Grundsätze und Anforderungen des Lebensmittelrechts, zur Errichtung der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit und zur Festlegung von Verfahren zur Lebensmittelsicherheit.

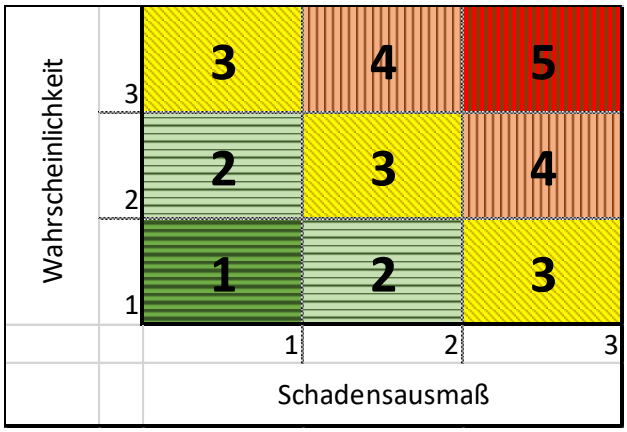

Abbildung 7: Risikomatrix. Die Zahlen in jedem Feld geben die Bewertungsstufe an. Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertungs-beispiel

Dieses Vorgehen sei am Beispiel einer Wärmeversorgungslösung für ein Netz mit 33 % der Wärmemenge aus Solarthermie und 67 % aus Gas-Brennwert beschrieben. Bei einer Gasexplosion kommt es zu katastrophalen Folgen und Todesfällen. Daher ist das Schadensausmaß mit der Stufe 3 zu bewerten. Eine Gasexplosion in Verbindung mit dem Betrieb eines gasbetriebenen BHKW, das ein Wärmenetz versorgt, ist allerdings sehr unwahrscheinlich (Stufe 1) und fände nicht in unmittelbarer Nähe zu Wohnräumen statt. Dieses Risiko fällt daher in die Bewertung 3.

SCHLUSSBEMERKUNGEN

6 Ergebnisdarstellung und Interpretationsmöglichkeiten

Zielstellung

Ziel der Nachhaltigkeitsbewertung ist es die Stärken und Schwächen der einzelnen Wärmeversorgungsoptionen innerhalb eines Untersuchungsgebietes zu identifizieren und miteinander vergleichen zu können. Dies wird in den Erfahrungsberichten dargestellt. Auf Basis dessen soll in einem Folgeschritt eine rationale Entscheidungsfindung herbeigeführt werden. Aufgrund der gebietsspezifischen Anpassungen ist ein gebietsübergreifender Vergleich der Konzepte nur eingeschränkt möglich.

Beispiel KoWa-Stadt

Um die Darstellung der Ergebnisse zu veranschaulichen, wird im Folgenden die beispielhafte Bewertung von fünf idealtypischen kommunalen Wärmeversorgungskonzepten für ein fiktives KoWa-Quartier dargestellt. Wo erforderlich, wurden für diese fiktive Bewertung Annahmen über das Quartier getroffen. Für diese beispielhafte Bewertung wurden fünf idealtypische Wärmeversorgungslösungen skizziert. Die wesentlichen Elemente dieser fünf Lösungen werden in Übersicht 19 benannt.

Übersicht 19: Idealtypische Wärmeversorgungslösungen für KoWa-Stadt (fiktives Bsp.)

70% Solarthermie + 30% Gas+Netz
- Versorgungsnetz mit 70% Solarthermie und 30% Gas - ST-Anlagen auf großen Dachflächen - Erdbeckenspeicher - GEMIS-Prozess: Netz\Wärme-de-KoWa-70ST-30Gas
Gas-Brennwert Einzelfeuerung
- Gas Brennwert (Einzelfeuerung) - Bei kleinen MFH, Stand der Technik 1 Kessel - GEMIS-Prozess: Gas-Heizung-Brennwert-DE-2020
100% Pellets
- 100% Pellets aus Reststoffen - Bei kleinen MFH, Stand der Technik 1 Kessel - Holz-Pellet-Holzwirtsch.-Heizung-10 kW-DE-2020 (Endenergie)
Gas Wärmenetz
- Netz in bereits versiegelten Siedlungsfläche errichtet - Bei Netz redundante Auslegung mit 2. Kessel" - GEMIS-ProzessNetz\Nahwärme-Gas-BHKW-DE-2015/en
Zukunftsnetz
- 25% ST - 60% alternative Wärmequelle/ Abwärme - 15% Pellets/ Biomasse (auf Spitzenlast ausgelegt) - Strom zu 50% aus lokaler PV, Rest Netzmix - Netz in bereits versiegelten Siedlungsfläche errichtet - regionaler Nahwärmeverbund - 'Netz\Wärme-de-KoWa-Zukunft

Quelle: Eigene Darstellung.

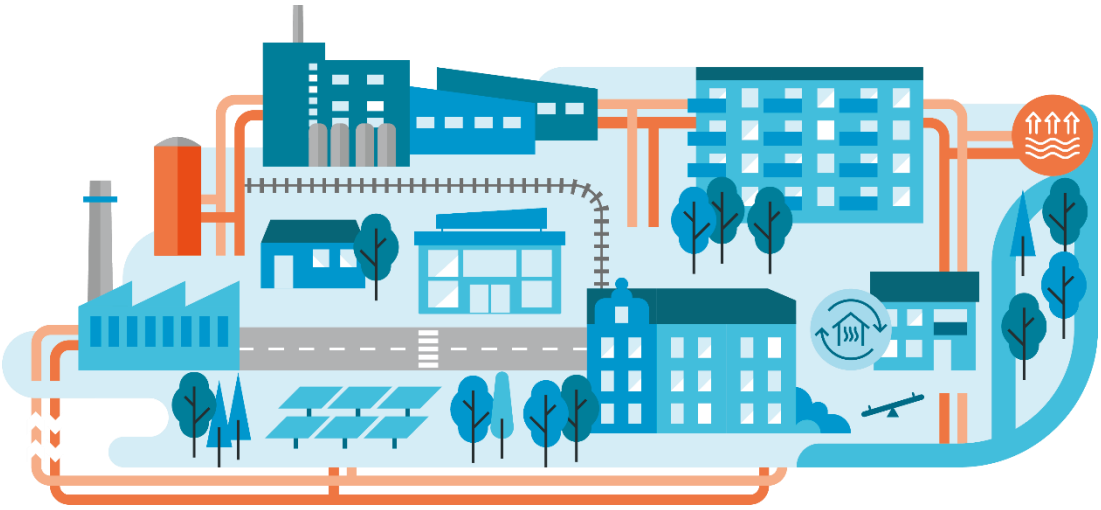

Abbildung 8: KoWa-Stadt.
Quelle: Erstellt für KoWa durch die WERNERWERKE GbR, Berlin.

Profilliniendiagramm

Das Profilliniendiagramm in Abbildung 9 zeigt die Auswertung für das fiktive Beispiel KoWa-Stadt. Zu erkennen ist z.B., dass die Option ‚100 % Pellets' Stärken bei den Kriterien Treibhausgasemissionen, Beitrag zur regionalen Wertschöpfung, Importquote und Konfliktpotential aufweist. Als Schwäche zeigt sich bei der Option die fehlende Redundanz der Wärmequelle, da von nur einem Kessel ausgegangen wird.
Für die Option ‚Zukunftsnetz' sind überdurchschnittlich hohe THGE als Schwäche zu erkennen. Ein wesentliches Element dieser fiktiven Lösung ist die Nutzung von Umweltwärme mittels Wärmepumpe. Hier wirkt sich der derzeit noch hohe Anteil fossiler Energieträger im Stromnetz auf die THGE /MWh aus. Hier wurden zusätzlich eine Bewertung unter Berücksichtigung des künftigen Strommix im Klimaschutzszenario KS 95 (GEMIS-PDS) durchgeführt. In Abbildung 10 ist erkennbar, dass es sich beim Zukunftsnetz um eine klimafreundliche Wärmeversorgungslösung handelt, wenn der Strommix zu nahezu 100% aus EE besteht.

Kurzbegründung im Anhang

Eine Kurzbegründung für die einzelnen Bewertungen findet sich im Anhang ab Seite 47. Dort werden in einer Tabelle pro Kriterium knapp die wichtigsten Fakten zur Begründung der Bewertungsstufe angeführt. Eine solche erläuternde Tabelle findet sich auch im Anhang der Erfahrungsberichte. In der Erläuterung der Bewertung im Text der Erfahrungsberichte erfolgt lediglich die Darstellung der Stärken und Schwächen. Zudem werden Abweichungen zum hier beschriebenen Vorgehen detailliert erläutert.

Aussagekraft

Die Bewertung der Wärmeversorgungsoptionen lässt grundsätzlich die Stärken und Schwächen der einzelnen Optionen erkennen. Bei der Angabe der quantitativen Werte auf Basis der GEMIS-PDS handelt es sich um plausible Abschätzungen durch GEMIS. Die tatsächlichen Emissionen sind allerdings von der konkreten Umsetzung und Ausgestaltung vor Ort abhängig.
Die Einschätzung der qualitativen Kriterien beruht auf den im KoWa-Team im Diskurs erarbeiteten Bewertungsregeln. Sie ist aber subjektiven Einflüssen unterworfen. Die Ergebnisse der Nachhaltigkeitsbewertung werden in der dritten Projektphase aktiv mit den Akteuren in den Untersuchungsgebieten diskutiert. Damit könnte eine Validierung der Bewertung aus Akteursperspektive erfolgen.

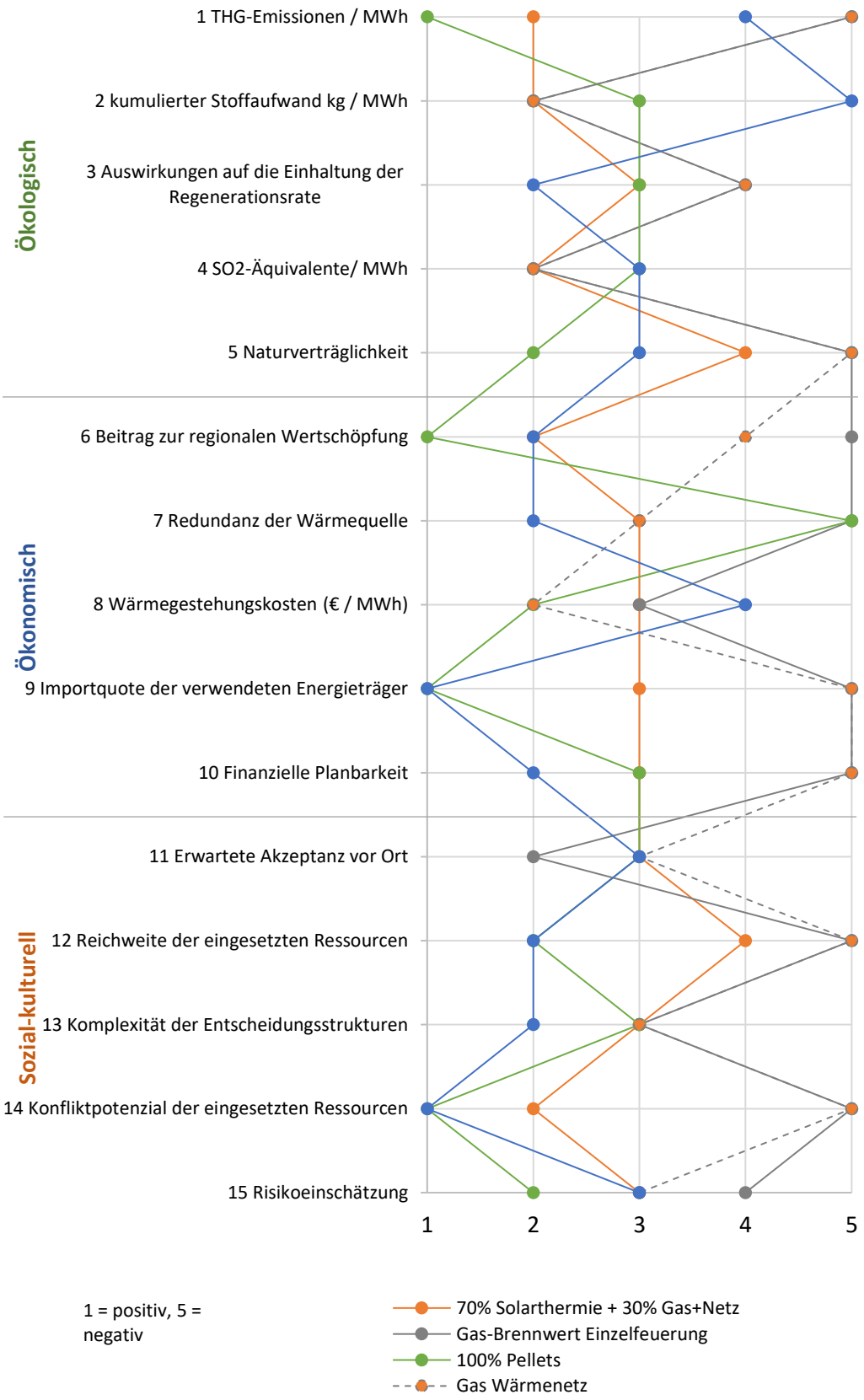

Abbildung 9: Vergleich fiktiver Versorgungsoptionen im Profilliniendiagramm. Eigene Darstellung.

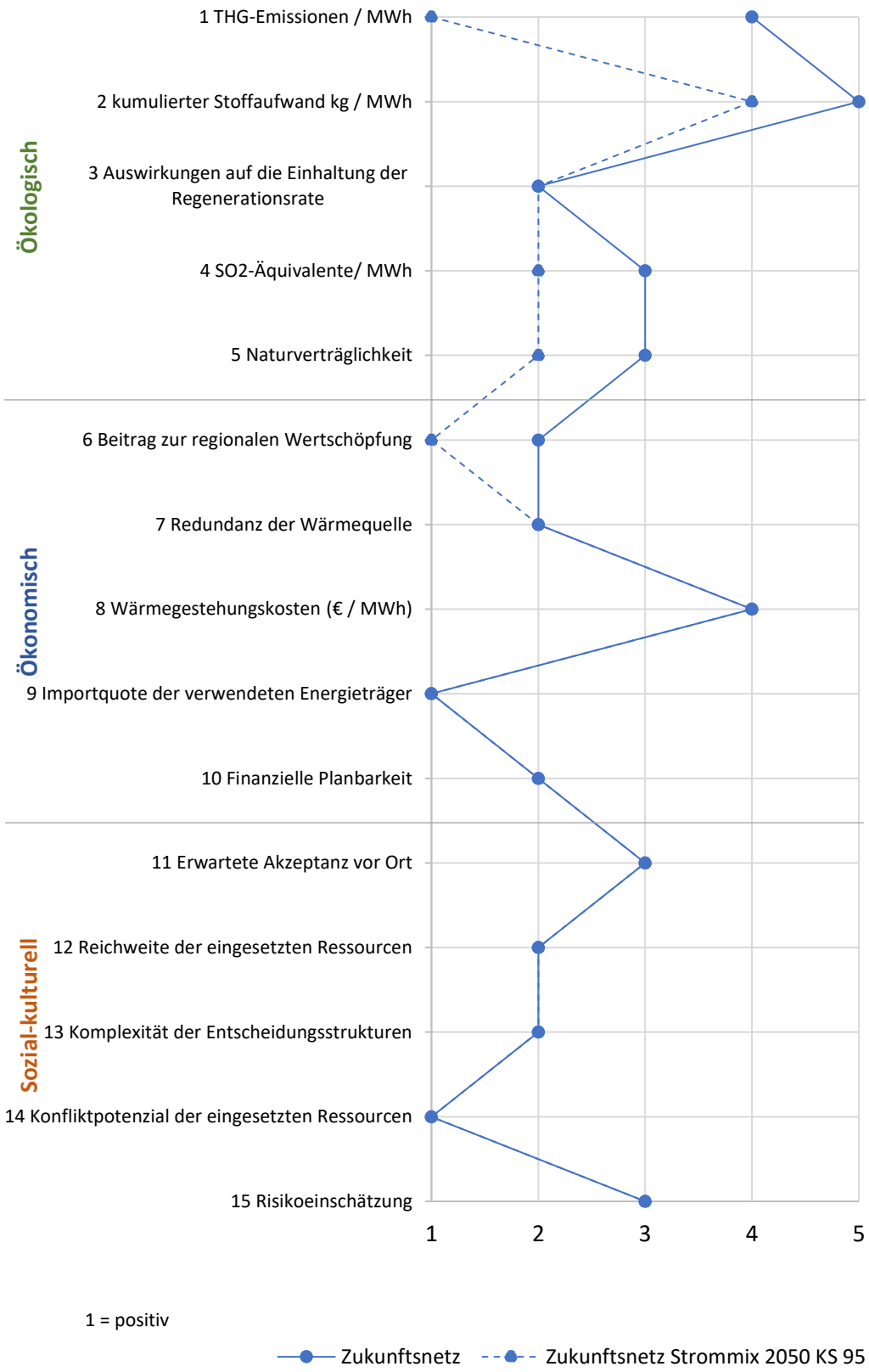

Abbildung 10:Vergleich der fiktiven Option Zukunftsnetz (Strommix heute vs. 2050 KS 95) Eigene Darstellung.

LITERATURVERZEICHNIS

AGEB - Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (2020a): Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2019. Berlin.

AGEB - Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (2020b): Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland.

Alemann, U. von (2007): Studie zur Korruption innerhalb des staatlichen Bereiches der EU-Mitgliedstaaten. Düsseldorf.

BAFA - Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2021): Entwicklung des deutschen Gasmarktes (monatliche Bilanz 1998-2021).

Bähr, C., Neligan, A. (2020): Versorgungssicherheit mit Energierohstoffen. Köln.

Bärwolff, M., Hansen, H., Hofmann, M., Setzer, F. (2012): Energieholz aus der Landwirtschaft.

BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2020): BGR Energiestudie 2019 - Daten und Entwicklungen der deutschen und globalen Energieversrogung. BGR Energiestudie. 23. Aufl. Hannover.

BMI - Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (2021): Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB).

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (1998): Umweltökonomische Gesamtrechnungen.

BUND - Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (2010): Kurzumtriebsplantagen für die Energieholzgewinnung - Chancen und Risiken.

dena - Deutsche Energie-Agentur GmbH (2019a): Abschlussbericht Urbane Energiewende. Berlin.

dena - Deutsche Energie-Agentur GmbH (2019b): dena-Gebäudereport kompakt 2019. „Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand“. Berlin.

DEPI - Deutsches Pellets Institut GmbH (2021): Pelletproduktion. URL: https://www.depi.de/pelletproduktion (gesehen am: 18.06.2021).

Destatis - Statistisches Bundesamt (2021): 51000-0007: Aus- und Einfuhr (Außenhandel): Deutschland, Jahre, Länder, Warensystematik. URL: https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=previous&levelindex=3&levelid=1632290976112&levelid=1632290957169&step=2#abreadcrumb (gesehen am: 22.09.2021).

Dittrich, M., Giljum, S., Lutter, S., Polzin, C. (2013): Aktualisierung von nationalen und internationalen Ressourcenkennzahlen. UBA Texte. 07. Aufl.

Dpa, Redaktion, Agentur (2021): Nach Kraftwerksbrand in Nürnberg: Fernwärme für 15.000 Menschen wieder sichergestellt. In: inFranken.de, 15.02.2021.

EU-KOM - Europäische Kommission (2021): EU Emissions Trading System (EU ETS). URL: https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_en (gesehen am: 19.07.2021).

EU-KOM - Europäische Kommission (2017): Themenblatt zum Europäischen Semester Korruptionsbekämpfung. Brüssel.

Fehrenbach et al. (2017): BIOMASSEKASKADEN - Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis. Dessau-Roßlau.

Fehrenbach, H., Giegrich, J., Köppen, S., Wern, B., Pertagnol, J., Baur, F., Hünecke, K., Dehoust, G., Bulach, W., Wiegmann, K., Kümmerer, K., Schuster, A., Haiß, A., Günther, A., Jacobs, J., Mohring, S., Hamscher, G., Simon, D. (2019): BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor) Abschlussbericht. UBA Texte. Dessau-Roßlau (Umweltbundesamt): 249 S.

Flamme, S., Hamr, S., Bischoff, J., Fricke, C. (2019): Evaluierung der Altholzverordnung im Hinblick auf eine notwendige Novellierung. Dessau-Roßlau.

Fritsche, U. (2016): Globales Emissions-Modell integrierter Systeme (GEMIS). GdW-Workshop „Praxis Wohnungswirtschaft: CO2-Emissionen: Bilanzierung, Monitoring, Strategien“. Berlin.

Fritsche, U., Schmidt, K. (2008): GEMIS Handbuch.

Gapp-Schmeling, K. (2020): Faktoren nachhaltigen Stromkonsums in Europa und seine Förderung durch politisch-rechtliche Instrumente. Baden-Baden (Nomos)420 Seiten.

Giovannetti, F., Kastner, O., Lampe, C., Reineke-Koch, R., Park, S., Steinweg, J. (2018): Technologiebericht 1.4 Solare Wärme und Kälte. In: WI - Wuppertal Institut, ISI - Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, IZES - Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Haase, M., Baumann, M., Wulf, C., Rösch, C., Zapp, P. (2021): Multikriterielle Analysen zur Entscheidungsunterstützung in der Technikfolgenabschätzung. In: Böschen, S., Grunwald, A., Krings, B.-J., Rösch, C. (Hrsg.): Technikfolgenabschätzung. Handbuch für Wissenschaft und Praxis. Baden-Baden (Nomos): 306-320.

Herkel, S. (2018): Technologiebericht 3.2 Wärmetransport und -verteilung. In: WI - Wuppertal Institut, ISI - Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, IZES - Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (Hrsg.): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Hirschl, B., Heinbach, K., Prahl, A., Salecki, S., Schröder, A., Aretz, A., Weiß, J. (2015): Wertschöpfung durch Erneuerbare Energien. Schriftenreihe des IÖW 210. Berlin (Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW))240 Seiten.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Chance (2018): Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. New York.

Kaufmann, D., Kraay, A., Matruzzi, M. (2020): The Worldwide Governance Indicators (WGI).

Kemmler, A., Kirchner, A., Auf der Maur, Ess, F., Kreidelmeyer, S., Piégsa, A., Spillmann, T., Wünsch, M., Ziegenhagen, I. (2020): Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050.

Kreysel, M.-A., Fasold, H.-G. (2021): Status und Struktur der deutschen Erdagsimporte - eine Bestandsaufnahme. 1-2/2021. Essen (Vulkan-Verlag GmbH).

Mdr.de (2021): Leck in Jena repariert - Tausende waren ohne Heizung | MDR.DE. URL: https://www.mdr.de/nachrichten/thueringen/ost-thueringen/jena/havarie-heizung-repariert-fernwaerme-warmwasser-100.html (gesehen am: 29.06.2021).

NABU - Naturschutzbund Deutschland e.V. (2021): Was sind Kurzumtriebsplantagen? - NABU. URL: https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/nachhaltiges-wirtschaften/biooekonomie/biomasse/kup.html (gesehen am: 21.06.2021).

Pfeufer, H.-J. (2015): FMEA - Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse. Pocket Power 64. München (Hanser): 115 S.

Rogall, H., Gapp-Schmeling, K., Welz, A. (2021): D. Trends der globalen Herausforderungen. In: Rogall, H., Gapp-Schmeling, K., Grothe, A., Michaelis, N., Ekardt, F., Hasenclever, W.-D., Hauchler, I., Jänicke, M., Müller, M., Nutzinger, H. (Hrsg.): Jahrbuch Nachhaltige Ökonomie 2020/2021. Im Brennpunkt: Nachhaltiges Wirtschaften und Innovation. Weimar (Lahn) (Metropolis).

Rogall, H., Gapp-Schmeling, K. (2021): Nachhaltige Ökonomie. Grundlagen der Wirtschaftswissenschaft Bd. 15. 3. Aufl. Marburg (Metropolis-Verl.).

Rogall, H., Gapp, K., Goergens, K. (2018): Trends der globalen Herausforderungen. In: Rogall, H., Binswanger, H., Ekardt, F., Grothe, A., Hasenclever, W.-D., Hauchler, I., Jänicke, M., Kollmann, K., Michaelis, N., Nutzinger, H., Scherhorn, G. (Hrsg.): Im Brennpunkt: Zukunft des nachhaltigen Wirtschaftens in der digitalen Welt. Marburg (Metropolis Verlag).

Rogall, H., Gapp, K., Brüning-Pfeiffer, A., Hewelt, F. (2016): Globale Trends. In: Rogall, H., Binswanger, H., Ekardt, F., Grothe, A., Hasenclever, W.-D., Hauchler, I., Jänicke, M., Kollmann, K., Michaelis, N., Nutzinger, H., Scherhorn, G. (Hrsg.): Im Brennpunkt: Ressourcenwende - Transformation zu einer ressourcenleichten Gesellschaft. Marburg (Metropolis Verlag): 347-408.

Rogall, H., Gapp, K. (2016): Trends einer nachhaltigen Entwicklung in Europa und Deutschland. In: Rogall, H., Binswanger, H., Ekardt, F., Grothe, A., Hasenclever, W.-D., Hauchler, I., Jänicke, M., Kollmann, K., Michaelis, N., Nutzinger, H., Scherhorn, G. (Hrsg.): Im Brennpunkt: Ressourcenwende - Transformation zu einer ressourcenleichten Gesellschaft. Marburg (Metropolis Verlag): 409-431.

Rogall, H. (2014): 100%-Versorgung mit erneuerbaren Energien. Marburg (Metropolis-Verl.): 494 S.

Rogall, H., Klausen, M., Haberland, R. (2014): Trends der globalen Herausforderungen. In: Rogall, H., Binswanger, H., Ekardt, F., Grothe, A., Hasenclever, W.-D., Hauchler, I., Jänicke, M., Kollmann, K., Michaelis, N., Nutzinger, H., Scherhorn, G. (Hrsg.): Im Brennpunkt: Die

Energiewende als gesellschaftlicher Transformationsprozess. Marburg (Metropolis): 31-100.

Rogall, H., Klausen, M., Haberland, R. (2013a): Trends der globalen Herausforderungen. In: Binswanger, H.-C., Ekardt, F., Grothe, A., Hasenclever, W.-D., Hauchler, I., Jänicke, M., Kollmann, K., Michaelis, N., Nutzinger, H., Rogall, H., Scherhorn, G. (Hrsg.): Jahrbuch 2013| 2014 Nachhaltige Ökonomie. Im Brennpunkt: Nachhaltigkeitsmanagement. Marburg (Metropolis): 57-117.

Rogall, H., Klausen, M., Haberland, R. (2013b): 2011: Trends der globalen Herausforderungen. In: Binswanger, H.-C., Ekardt, F., Grothe, A., Hasenclever, W.-D., Hauchler, I., Jänicke, M., Kollmann, K., Michaelis, N., Nutzinger, H., Rogall, H., Scherhorn, G. (Hrsg.): Jahrbuch 2011| 2012 Nachhaltige Ökonomie. Im Brennpunkt: Wachstum. 2. Aufl. Marburg (Metropolis-Verl.): 27-53.

Rogall, H. (2008): Ökologische Ökonomie. 2. Aufl. Wiesbaden (VS, Verl. für Sozialwiss)372 S.

Rogall, H. (2004): Ökonomie der Nachhaltigkeit. Wiesbaden (VS Verlag für Sozialwissenschaften).

Rogall, H. (2003): Akteure der nachhaltigen Entwicklung. 2. Aufl. München (ökom-Verl.): 342 S.

Rogall, H. (2002): Neue Umweltökonomie - ökologische Ökonomie. Lehrtexte: Umweltökonomie. Opladen (Leske und Budrich)352 S.

Rogall, H. (2000): Bausteine einer zukunftsfähigen Umwelt- und Wirtschaftspolitik. Studien zu Umweltökonomie und Umweltpolitik 5. Berlin (Duncker & Humblot): 565 S.

Salecki, S. (2017): Wertschöpfung vor Ort.

Schabacker, M. (o.J.): Risikobewertung von Technologieprojekten in der Produktentwicklung. Magdeburg.

Scholwin, F., Grope, J., Clinkscales, A., Daniel-Gromke, J., Rensber, N., Denysenko, V., Stinner, W., Richter, F., Raussen, T., Kern, M., Turk, T., Reinhold, G. (2019): Aktuelle Entwicklung und Perspektiven der Biogasproduktion aus Bioabfall und Gülle. UBA Texte. Dessau.

statista (2018): Marktanteile der größten Hersteller von Solarzellen und -modulen weltweit im Jahr 2017. URL: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/164196/umfrage/marktanteile-an-der-weltweiten-photovoltaikproduktion-im-jahr-2009/ (gesehen am: 19.07.2021).

Statistisches Landesamt Bremen (2019): Energiebilanzen / CO2-Bilanzen: LAK Länderarbeitskreis Energiebilanzen. URL: https://www.lak-energiebilanzen.de/.

UBA - Umweltbundesamt (2020a): Energieverbrauch privater Haushalte. URL: https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#hochster-anteil-am-energieverbrauch-zum-heizen (gesehen am: 03.07.2021).

UBA - Umweltbundesamt (2020b): Primärenergiegewinnung und -importe. URL: https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergiegewinnung-importe (gesehen am: 15.06.2020).

UBA - Umweltbundesamt (2018): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Climate Change 37/2019. Dessau-Roßlau (Umweltbundesamt).

VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2012): VDI 2067-1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen: Grundlagen und Kostenberechnung. Düsseldorf.

Watari, T., McLellan, B., Giurco, D., Dominish, E., Yamasue, E., Nansai, K. (2019): Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity. In: Resources, Conservation and Recycling 148: 91-103.

Wern, B., Lenz, V., Sperber, E., Saadat, A., Schmidt, D., Engelmann, P., Hering, D., Xhonneux, A., Giovanetti, F., Schmidt, F., Jordan, M., Strunz, S., Ebert, H.-P. (2019): Wärmebereitstellung in Privathaushalten - Lösungen für eine CO2-freie Energiebereitstellung. In: FVEE - Forschungsverbund Erneuerbare Energien (Hrsg.): Forschung für die Herausforderungen der Energiewende: 28-32.

Wern, B., Noll, F., Müller-Riester, G., Peters, W. (2018): Naturschutzfachliche Optimierung der Rohstoffbereitstellung für Biogasanlagen. In: Nelles, M. (Hrsg.): 12. Rostocker Bioenergieforum. Am 28. und 29. Juni 2018 an der Universität Rostock: Tagungsband. Rostock (Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät Universität).

Wern, B., Kay, S., Vogler, C., Baur, F., Gärtner, S., Hienz, G., Keller, H., Müller-Lindenlauf, M., Stockmann, F., Wenzelides, M., Hagemann, H., Schulte, A., Bernhard Wern, Sonja Kay, Cornelia Vogler, Frank Baur, Sven Gärtner, Gunnar Hienz, Heiko Keller, Maria Müller-Lindenlauf, Florian Stockmann, Marcus Wenzelides, Heiko Hagemann, Andreas Schulte (2014): Regionale Konzepte zum Ausbau der Bioenergieerzeu-gung aus Holz –nachhaltige und energieeffiziente Stra-tegieentwicklung unter besonderer Berücksichtigung der Holzkaskadennutzung // Regionale Konzepte zum Ausbau der Bioenergie-erzeugung aus Holz – nachhaltige und energieeffiziente Strategieentwicklung unter besonderer Berücksichtigung der Holzkaskadennutzung. Saarbrücken, Heidelberg, Münster (Unpublished).

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie: MFA Material Flow Analyses. Wuppertal.

ANHANG

Exemplarische Bewertungstabellen für ein fiktives Cluster

Ökologische Dimension

Laufende Nummer	1
Herausforderung	Klimaerwärmung
Qualitätsziel	Klimaneutralität
Indikator	THG-Emissionen / MWh

70% Solarthermie + 30% Gas+Netz - 71,415E-3 kg CO_{2eq}/MWh	2
Gas-Brennwert Einzelfeuerung - 232,31 kg CO_{2eq}/MWh	5
100% Pellets - 18,853 kg CO_{2eq}/MWh	1
Gas Wärmenetz -204,24 kg CO_{2eq}/MWh	5
Zukunftsnetz - Strommix 2020 + 50% PV: 158,05 kg CO_{2eq}/ MWh	4
Zukunftsnetz Strommix 2050 KS 95 - Strommix 2050 KS 95: 41 kg CO_{2eq}/ MWh	1

Ökologische Dimension

Laufende Nummer	2
Herausforderung	Materialaufwand
Qualitätsziel	geringer Nutzungsgrad an Primärrohstoffen
Indikator	kumulierter Stoffaufwand kg / MWh

70% Solarthermie + 30% Gas+Netz - 75,313 kg/ MWh		2			
Gas-Brennwert Einzelfeuerung - 41,963 kg/ MWh		2			
100% Pellets - 81,819 kg / MWh			3		
Gas Wärmenetz - 59,293 kg/ MWh		2			
Zukunftsnetz - Strommix 2020 + 50% PV: 815,33 kg/ MWh					5
Zukunftsnetz Strommix 2050 KS 95 - Strommix 2050 KS 95: 267 kg/ MWh				4	

Ökologische Dimension

Laufende Nummer	3
Herausforderung	Übernutzung erneuerbarer Rohrstoffe
Qualitätsziel	nachhaltige Nutzung erneuerbarer Rohstoffe
Indikator	Auswirkungen auf die Einhaltung der Regenerationsrate

70% Solarthermie + 30% Gas+Netz — 3

- 70% Solarthermie = quasi unerschöpflich
- 30% Gas = fossil

Gas-Brennwert Einzelfeuerung — 4

- Gas mit tendenziell negativen Auswirkungen auf Wasserhaushalt, keine Einhaltung der Regenerationsrate

100% Pellets — 3

- Bei Pellets aus Restholz

Gas Wärmenetz — 4

- Gas

Zukunftsnetz — 2

- hoher Anteil quasi unerschöpflicher und alternativer Wärmequellen

Zukunftsnetz Strommix 2050 KS 95 — 2

- hoher Anteil quasi unerschöpflicher und alternativer Wärmequellen

Ökologische Dimension

Laufende Nummer	4
Herausforderung	Gefährdung der menschlichen Gesundheit
Qualitätsziel	gesunde Lebensbedingungen
Indikator	SO_2-Äquivalente / MWh

70% Solarthermie + 30% Gas+Netz — 2

- 0,102 kg SO_{2eq}/MWh

Gas-Brennwert Einzelfeuerung — 2

- 0,10483 kg SO_{2eq} /MWh

100% Pellets — 3

- 0,31048 kg SO_{2eq} / MWh

Gas Wärmenetz — 2

- 0,17945 kg SO_{2eq} / MWh

Zukunftsnetz — 3

- Strommix 2020 + 50% PV: 0,32 kg SO_{2eq} /MWh

Zukunftsnetz Strommix 2050 KS 95 — 2

- Strommix 2050 KS 95: 0,16 kg SO_{2eq} / MWh

Ökologische Dimension

Laufende Nummer	5
Herausforderung	Zerstörung Arten- und Landschaftsvielfalt
Qualitätsziel	Naturverträglichkeit
Indikator	Auswirkungen auf die Naturverträglichkeit

70% Solarthermie + 30% Gas+Netz — 4

- effizientere Nutzung der Dachflächen
- zusätzliche Flächenversiegelung und Natureingriffe durch Erdbeckenspeicher
- Eingriffe durch Gas

Gas-Brennwert Einzelfeuerung — 5

- 100% fossil

100% Pellets — 2

- Pellets aus Reststoffen

Gas Wärmenetz — 5

- 100% fossil

Zukunftsnetz — 3

- Nutzung von alternativer Wärmequelle/ Abwärme
- Netz in bereits versiegelten Flächen
- PV Dachanlagen
- Strommix mit negativen Auswirkungen (2050 in der Tendenz besser)

Zukunftsnetz Strommix 2050 KS 95 — 2

- Nutzung von alternativer Wärmequelle/ Abwärme
- Netz in bereits versiegelten Flächen
- PV Dachanlagen
- Strommix mit negativen Auswirkungen (2050 in der Tendenz besser)

Ökonomische Dimension

Laufende Nummer	6
Herausforderung	negative Entwicklungen auf dem Arbeitsmarkt
Qualitätsziel	existenzsichernde Erwerbsarbeit bei akzeptabler Arbeitsqualität
Indikator	Beitrag zur regionalen Wertschöpfung

70% Solarthermie + 30% Gas+Netz — 2

- Summe Beschäftigungseffekte laut GEMIS 1,86E-06 Personen
- Produktion der ST eher nicht in der Regio
- Installation und Betriebsführung der ST mit mehr regionaler Wertschöpfung
- Gas eher außerhalb der EU
- Betriebsführungsaufwand mittel
- Seitz et al. 2018: Speicher = große inländische Wertschöpfungspotentiale
- Giovannetti et al. 2018: Solare Wärme = steigende inländische Wertschöpfung
- Herkel 2018: Netz hoher Marktanteil in D

Gas-Brennwert Einzelfeuerung — 5

- Summe Beschäftigungseffekte laut GEMIS 3,88E-07 Personen
- Wertschöpfung Gaspreis: etwa 30% gehen aufgrund der Brennstoffbeschaffung ins Ausland

100% Pellets — 1

- Summe Beschäftigungseffekte laut GEMIS 460,47E-9 Personen
- eher hoher Betriebsführungsaufwand
- Annahme, Pellets aus der Region

Gas Wärmenetz — 4

- Summe Beschäftigungseffekte laut GEMIS 128,84E-9 Personen
- Wertschöpfung Gaspreis: etwa 30% gehen aufgrund der Brennstoffbeschaffung ins Ausland, Netz und Vertrieb in Region
- geringer bis mittlerer Betriebsführungsaufwand für das Gesamtsystem
- Herkel 2018: Netz hoher Marktanteil in D

Zukunftsnetz — 2

- 2020: Summe Beschäftigungseffekte laut GEMIS 2,89E-06 Personen
- Produktion ST/WP eher nicht in Region, mittlerer bis hoher Betriebsführungs-aufwand (eher regional)
- Herkel 2018: Netz hoher Marktanteil in D

- Herkel et al 2018: Umwelwärme: hohe lokale Wertshöpfung (30-50% Handwerkerleistung), steigende inländische Wertschöpfung, hoher einheimischer Marktanteil (80-90% bei Kompressionswärmepumpen)

Zukunftsnetz Strommix 2050 KS 95

1				

- KS 95: Summe Beschäftigungseffekte laut GEMIS 2,82E-06 Personen
- Sonst wie Zukunftsnetz

Ökonomische Dimension

Laufende Nummer	7
Herausforderung	unzureichende Befriedigung der Grundbedürfnisse mit nachhaltigen Produkten
Qualitätsziel	unterbrechungsfreie Versorgungssicherheit
Indikator	Redundanz der Wärmequelle

70% Solarthermie + 30% Gas+Netz — 3

- Bei 70% ST großer Speicher, der den Ausfall des Gaskessels temporär überbrücken könnte, ggf. Versorgungseinschränkungen (dann 4).

Gas-Brennwert Einzelfeuerung — 5

- Wenn nur 1 Kessel (kleines MFH: 5, wenn 2 Kessel 3-4, Unterbrechung des Gasversorgung nicht kompensierbar)

100% Pellets — 5

- Wenn nur 1 Kessel = 5
- Wenn 2 Kessel = 4

Gas Wärmenetz — 3

- Da für das Netz 2. Kessel vorgesehen

Zukunftsnetz — 2

- drei Erzeuger, Pelletkessel auf Spitzenlast ausgelegt,
- Pufferspeicher (ST) können kurzfristigen Ausfall kompensieren.

Zukunftsnetz Strommix 2050 KS 95 — 2

- drei Erzeuger, Pelletkessel auf Spitzenlast ausgelegt,
- Pufferspeicher (ST) können kurzfristigen Ausfall kompensieren.

Ökonomische Dimension

Laufende Nummer	8
Herausforderung	Instabilitäten (Geld, Finanzmärkte, Wettbewerbsfähigkeit), Externalitäten
Qualitätsziel	geringe betriebswirtschaftliche Wärmegestehungskosten
Indikator	Wärmegestehungskosten (€ / MWh)

70% Solarthermie + 30% Gas+Netz | | | 3 | | |

Aus Gemis:

Investitionskosten: 36,5000*10^6€ | 365,000*10^3€/km nicht zugeordnet

Summe: 36,5000*10^6€ |365,000*10^3€/km

Kapitalkosten: 2,33644*10^6€/a |9,3457466€/MWh

Transportkosten: 147,413*103€/a |589,65*10-3€/MWh

Brennstoff-/Inputkosten (WW): 43,7112*10^6€/a | 174,84463€/MWh

Summe: 46,1950*10^6€/a | 184,78003€/MWh + BEHG

Kostenschätzung nach Dena: 56,50 €/ MWh bis 158,00 €/ MWh

Kostenschätzung inkl. BEHG 2021 (25 € / t): 58,29 €/ MWh bis 159,79 €/ MWh

Kostenschätzung inkl. BEHG 2022 (30 € / t): 58,64 €/ MWh bis 160,14 €/ MWh

Kostenschätzung inkl. BEHG 2023 (35 € / t): 59,00 €/ MWh bis 160,50 €/ MWh

Kostenschätzung inkl. BEHG 2024 (45 € / t): 59,71 €/ MWh bis 161,21 €/ MWh

Kostenschätzung inkl. BEHG 2025 (55 € / t): 60,43 €/ MWh bis 161,93 €/ MWh

Kostenschätzung inkl. Prognose 2030 (180 € / t): 69,35 €/ MWh bis 170,85 €/ MWh

Kostenschätzung inkl. Prognose 2040 (346 € / t): 81,21 €/ MWh bis 182,71 €/ MWh

Gas-Brennwert Einzelfeuerung | | | 3 | | |

Aus Gemis:

Investitionskosten: 7,10000*10^3 € | 710,000*103 €/MW nicht zugeordnet

Summe: 7,10000*10^3 € | 710,000*103 €/MW

Kapitalkosten: 638,58181 €/a | 39,911363 €/MWh

Fixe Kosten: 250,00000 €/a | 15,625000 €/MWh nicht zugeordnet

Brennstoff-/Inputkosten (Erdgas-DE-HH/KV-2020) 1,09534*10^3 €/a| 68,458812 €/MWh

Summe: 1,98392*10^3 €/a | 123,99518 €/MWh + BEHG

Kostenschätzung nach Dena 100,00 €/ MWh bis 100,00 €/ MWh

Kostenschätzung inkl. BEHG 2021 (25 € / t): 104,98 €/ MWh bis 104,98 €/ MWh

Kostenschätzung inkl. BEHG 2022 (30 € / t): 105,98 €/ MWh bis 105,98 €/ MWh

Kostenschätzung inkl. BEHG 2023 (35 € / t): 106,98 €/ MWh bis 106,98 €/ MWh

Kostenschätzung inkl. BEHG 2024 (45 € / t): 108,97 €/ MWh bis 108,97 €/ MWh

Kostenschätzung inkl. BEHG 2025 (55 € / t): 110,96 €/ MWh bis 110,96 €/ MWh

Kostenschätzung inkl. Prognose 2030 (180 € / t): 135,87 €/ MWh bis 135,87 €/ MWh

Kostenschätzung inkl. Prognose 2040 (346 € / t): 168,95 €/ MWh bis 168,95 €/ MWh

Ökonomische Dimension

Laufende Nummer	8
Herausforderung	Instabilitäten (Geld, Finanzmärkte, Wettbewerbsfähigkeit), Externalitäten
Qualitätsziel	geringe betriebswirtschaftliche Wärmegestehungskosten
Indikator	Wärmegestehungskosten (€ / MWh)

100% Pellets — 2

Aus Gemis:

Investitionskosten: 8,35603*10^3 €| 835,603*10^3 €/MW nicht zugeordnet
Kapitalkosten: 751,55065 €/a | 46,971915 €/MWh
Fixe Kosten: 258,40500 €/a | 16,150313€/MWh nicht zugeordnet
Transportkosten: 21,571395€/a | 1,3482122€/MWh
Brennstoff-/Inputkosten (Holz-DE-Pellets-2020) | 460,80000€/a |28,800000 €/MWh
Hilfsenergie- und –produktkosten: 51,716952 €/a | 3,2323095 €/MWh
Summe: 1,54404*103 €/a| 96,502750 €/MWh
Kostenschätzung nach Dena 85 bis 155 € (keine Veränderung durch BEHG)

Gas Wärmenetz — 2

Kosten aus Gemis nicht plausibel
Kostenschätzung nach Dena: 60,00 €/ MWh bis 60,00 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. BEHG 2021 (25 € / t): 65,11 €/ MWh bis 65,11 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. BEHG 2022 (30 € / t): 66,13 €/ MWh bis 66,13 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. BEHG 2023 (35 € / t): 67,15 €/ MWh bis 67,15 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. BEHG 2024 (45 € / t): 69,19 €/ MWh bis 69,19 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. BEHG 2025 (55 € / t): 71,23 €/ MWh bis 71,23 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. Prognose 2030 (180 € / t): 96,76 €/ MWh bis 96,76 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. Prognose 2040 (346 € / t): 130,67 €/ MWh bis 130,67 €/ MWh

Zukunftsnetz — 4

Aus Gemis:

Investitionskosten: 36,5000*10^6€
Kapitalkosten: 2,33644*10^6€/a | 9,3457466€/MWh
Transportkosten: 147,413*10^3€/a | 589,65*10-3€/MWh
Brennstoff-/Inputkosten (Warmwasser)67,6388*10^6€/a | 270,55502 €/MWh
Summe: 70,1226*10^6€/a | 280,49042€/MWh
Kostenschätzung Dena (60% Abwärme = 30 % Abwärme + 30% WP)
Kostenschätzung nach Dena: 79,00 €/ MWh bis 173,75 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. BEHG 2021 (25 € / t): 82,95 €/ MWh bis 177,70 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. BEHG 2022 (30 € / t): 83,74 €/ MWh bis 178,49 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. BEHG 2023 (35 € / t): 84,53 €/ MWh bis 179,28 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. BEHG 2024 (45 € / t): 86,11 €/ MWh bis 180,86 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. BEHG 2025 (55 € / t): 87,69 €/ MWh bis 182,44 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. Prognose 2030 (180 € / t): 107,45 €/ MWh bis 202,20 €/ MWh
Kostenschätzung inkl. Prognose 2040 (346 € / t): 133,69 €/ MWh bis 228,44 €/ MWh

Zukunftsnetz Strommix 2050 KS 95 — 4

wie Zukunftsnetz

Ökonomische Dimension

Laufende Nummer	9
Herausforderung	globale und außenwirtschaftliche Ungleichgewichte, Abhängigkeiten
Qualitätsziel	geringe außenwirtschaftlichen Abhängigkeit
Indikator	Importe von Ressourcen (Brennstoffe und kritische Rohstoffe) (Lebenszyklus) / MWh

70% Solarthermie + 30% Gas+Netz — 3

- Gasanteil nur teilweise substituierbar
- gewichtete Importquote= 0,95*0,3 = 28,5%

Gas-Brennwert Einzelfeuerung — 5

- Abhängigkeit von Gas

100% Pellets — 1

- Bei Pellets aus der Region (D ist insgesamt Nettoexporteur)

Gas Wärmenetz — 5

- Gas

Zukunftsnetz — 1

- keine importierte Brennstoffe (Pellets aus D)

Zukunftsnetz Strommix 2050 KS 95 — 1

- keine importierte Brennstoffe (Pellets aus D)

Ökonomische Dimension

Laufende Nummer	10
Herausforderung	Staatsverschuldung; unzureichende Ausstattung mit meritorischen Gütern
Qualitätsziel	finanzielle Handlungsfähigkeit
Indikator	finanzielle Planbarkeit

70% Solarthermie + 30% Gas+Netz — 3

- Kosten Gasanteil wenig planbar

Gas-Brennwert Einzelfeuerung — 5

- Gas wenig planbar, BEHG Anteil steigt
- Brennstoffkosten mehr als die Hälfte der jährlichen Kosten

100% Pellets — 3

- Kostensteigerungen bei Pellets möglich

Gas Wärmenetz — 5

- Gas

Zukunftsnetz — 2

- Abhängig von Vertraggestaltung für Abwärme

Zukunftsnetz Strommix 2050 KS 95 — 2

- Abhängig von Vertraggestaltung für Abwärme

Sozial-kulturelle Dimension

Laufende Nummer	11
Herausforderung	Fehlentwicklungen in Wirtschaft, Politik, Gesell.
Qualitätsziel	good governance
Indikator	erwartete Akzeptanz vor Ort

70% Solarthermie + 30% Gas+Netz — 3

- Netz mittlere Akzeptanz (Herkel 2018)
- Giovanetti et al.
- ST bei zentralen Anlagen, niedrige Akzeptanz
- hohe sozio-politische Akzeptanz
- Gas: bisher hohe Akzeptanz, Tendenz abnehmend

Gas-Brennwert Einzelfeuerung — 2

- Bisher hohe Akzeptanz, gelegentliche Bedenken aufgrund der Sicherheit

100% Pellets — 3

- Netz mittlere Akzeptanz (Herkel 2018)
- Bioenergie (Dotzauer): mittlere Akzeptanz

Gas Wärmenetz — 3

- Netz mittlere Akzeptanz (Herkel 2018)
- Gas zunehmend kritisch?

Zukunftsnetz — 3

- Netz mittlere Akzeptanz (Herkel 2018)
- Umweltwärme: Herkel et al 2018: hohe sozialpolitische Akzeptantz aber Risiken für die lokale Akzeptanz (Akustik, Umweltrisiken)

Zukunftsnetz Strommix 2050 KS 95 — 3

- Netz mittlere Akzeptanz (Herkel 2018)
- Umweltwärme: Herkel et al 2018: hohe sozialpolitische Akzeptantz aber Risiken für die lokale Akzeptanz (Akustik, Umweltrisiken)

Sozial-kulturelle Dimension

Laufende Nummer	12
Herausforderung	Unsicherheit der dauerhaften Energieversorgung
Qualitätsziel	langfristige Versorgungssicherheit
Indikator	Reichweite der eingesetzten Ressourcen bei gleichbleibendem Verbrauch

70% Solarthermie + 30% Gas+Netz — 4

- Gasanteil 30%, sonst quasi unerschöpfloche Ressourcen

Gas-Brennwert Einzelfeuerung — 5

- Reichweite 18 Jahre

100% Pellets — 2

- 100% EE, keine quasi unerschöpflichen

Gas Wärmenetz — 5

- Gas

Zukunftsnetz — 2

- 60% quasi unerschöpfliche

Zukunftsnetz Strommix 2050 KS 95 — 2

- 60% quasi unerschöpfliche

Sozial-kulturelle Dimension

Laufende Nummer	13
Herausforderung	Zentralisierung der Versorgungsstrukturen
Qualitätsziel	angemessene Dezentralisierung
Indikator	dezentralisierte Entscheidungsstrukturen

70% Solarthermie + 30% Gas+Netz — 3

- Annahme: Stadtwerke, demokratisch kontrolliert

Gas-Brennwert Einzelfeuerung — 3

- Annahme: Stadtwerke, demokratisch kontrolliert

100% Pellets — 3

- Annahme: Stadtwerke, demokratisch kontrolliert

Gas Wärmenetz — 3

- Annahme: Stadtwerke, demokratisch kontrolliert

Zukunftsnetz — 2

- Annahme: gemeinsames Entscheidungsgremium

Zukunftsnetz Strommix 2050 KS 95 — 2

- Annahme: gemeinsames Entscheidungsgremium

Sozial-kulturelle Dimension

Laufende Nummer	14
Herausforderung	gewaltsame Konflikte, Massenmigration
Qualitätsziel	innere und äußere Sicherheit, globale Verträglichkeit
Indikator	Konfliktpotential der eingesetzten Ressourcen

70% Solarthermie + 30% Gas+Netz — 2

Bei 30% Gas 3LK = 0,27 & GLR = 10,21

Gas-Brennwert Einzelfeuerung — 5

- Gas

100% Pellets — 1

- Pellets aus D

Gas Wärmenetz — 5

- Gas

Zukunftsnetz — 1

- ggf. Betriebsstoffe ?

Zukunftsnetz Strommix 2050 KS 95 — 1

- ggf. Betriebsstoffe ?

Sozial-kulturelle Dimension

Laufende Nummer	15
Herausforderung	Technische Risiken (z.B. Atomtechnik, Digitalisierung der Wirtschaft)
Qualitätsziel	Vermeidung von Risikotechnologien
Indikator	Risikoeinschätzung

70% Solarthermie + 30% Gas+Netz — 3

- Gasexplosion katastrophal aber sehr unwahrscheinlich

Gas-Brennwert Einzelfeuerung — 4

- Gasexplosion katastrophal und bei Einzelfeuerung höhere Wahrscheinlichkeit als zentral HKW

100% Pellets — 2

- ggf. unbekannte Schäden durch Reststoffverbrennung, Beeinträchtigung der Ökosysteme möglich

Gas Wärmenetz — 3

- Gas

Zukunftsnetz — 3

- Gewässerschäden bei Wärmepumpen

Zukunftsnetz Strommix 2050 KS 95 — 3

- Gewässerschäden bei Wärmepumpen