



HOCHSCHULE OSNABRÜCK
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Energieautarke und ressourcenschonende Gewerbegebiete in der Metropolregion Nordwest

- Projektbericht –

AZ 12-23-01

Gefördert von:



Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten e.V.
Bahnhofstr. 37
27749 Delmenhorst

Antragsteller:

WIGOS Wirtschaftsförderungsgesellschaft
Osnabrücker Land mbH
Am Schölerberg 1
49082 Osnabrück

Projektträger:

Hochschule Osnabrück
Albrechtstr. 30
49076 Osnabrück

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Matthias Reckzügel
Prof. Dr. Tim Wawer
Nils Karschuck M.Sc.
Malte Höppner M.Sc.

Mai 2025

Vorwort

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

die zunehmenden Anforderungen an Nachhaltigkeit, Energieeffizienz und Klimaschutz machen deutlich: auch Gewerbegebiete müssen neu gedacht werden. Das von der Metropolregion Nordwest geförderte Forschungsprojekt „AutaGE – Methoden- und Handlungsset zur Etablierung energieautarker und ressourcenschonender Gewerbegebiete in der Metropolregion Nordwest“ nimmt sich dieser Herausforderung an. Ziel ist es, praxisnahe Grundlagen für die Entwicklung zukunftsfähiger Gewerbestandorte zu schaffen – mit besonderem Fokus auf Sektorenkopplung, Speichertechnologien und intelligente Netze.

Die Idee zum Projekt entstand aus der langjährigen Zusammenarbeit zwischen der WIGOS Wirtschaftsförderungsgesellschaft Osnabrücker Land mbH und der Hochschule Osnabrück im Rahmen verschiedener Innovationsprojekte im Themenfeld Energie. Darauf aufbauend ist es ein logischer nächster Schritt, ein Konzept zu entwickeln, das für Gewerbegebiete in der Metropolregion Nordwest Handlungsempfehlungen für eine resiliente, ressourcenschonende Entwicklung bietet. Denn gerade angesichts steigender Energiepreise und hoher regulatorischer Anforderungen sind solche Lösungen entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit unserer regionalen Wirtschaft.

Unser besonderer Dank gilt der Metropolregion Nordwest, die das Projekt ideell und finanziell gefördert und damit ermöglicht hat. Ebenso danken wir den zahlreichen Unterstützern aus Wirtschaft und Verwaltung – insbesondere der Begleitgruppe, die mit ihrer Bereitschaft zur Mitwirkung eine wichtige Grundlage für den Praxisbezug des Projekts gelegt haben. Nicht zuletzt danken wir allen Projektbeteiligten für ihr Engagement, ihre Ideen und die konstruktive Zusammenarbeit. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse leisten einen wertvollen Beitrag zur nachhaltigen wirtschaftlichen Entwicklung der Metropolregion Nordwest und stärken ihre Rolle als Modellregion für zukunftsorientiertes Wirtschaften.

Ihr



Peter Vahrenkamp

WIGOS-Geschäftsführer

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	I
Kurzfassung	II
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Glossar.....	V
1 Einleitung.....	1
1.1 Vorstellung des Projekts	1
1.2 Untersuchungsgebiet und Stichprobe	5
2 Methodenset.....	7
2.1 Methode I: Energiewirtschaftliche Modellierung.....	7
2.1.1 Das AutAGE-Energiemodell	7
2.1.2 Datenbasis	9
2.1.3 Modellierungsszenarien.....	16
2.1.4 Unsicherheiten des Modells	18
2.2 Methode II: Typisierung der Gewerbegebiete	19
2.2.1 Energetische Typisierung	19
2.2.2 Kulturelle Typisierung	22
2.3 Methodische Empfehlungen	25
3 Handlungsset.....	27
3.1 Perspektive I: Technoökonomische Perspektive	27
3.1.1 Darstellung der Modellierungsergebnisse	27
3.1.2 Sensitivitätsanalyse	45
3.1.3 Handlungsempfehlungen.....	46
3.1.3.1 Typenunabhängige Empfehlungen	47
3.1.3.2 Typenabhängige Empfehlungen	48
3.2 Perspektive II: Governance-Perspektive.....	51
3.2.1 Typenunabhängiges Organisationsschema	52
3.2.2 Typenabhängige Kooperationsmodelle	57
4 Fazit.....	67
Literaturverzeichnis	VIII

Kurzfassung

Eine nachhaltige und kostengünstige Energieversorgung ist für Kommunen und Unternehmen in Gewerbe- und Industriegebieten ein entscheidender Faktor für Standortqualität und Wettbewerbsfähigkeit. Das Projekt "AutaGE" konzentriert sich dabei auf Gebiete mit überwiegend kleinen und mittleren Unternehmen (KMU). Ziel des Projekts ist es, praxisnahe Methoden und Handlungsansätze für verschiedene Akteure wie Kommunen, Wirtschaftsförderer und Unternehmen zu entwickeln. Diese sollen sie befähigen, die Energiewende vor Ort aktiv mitzugestalten. Das entwickelte Set aus Methoden und Handlungsansätzen ermöglicht es, Gewerbegebiete zu typisieren und darauf basierend konkrete Handlungsempfehlungen abzuleiten.

Um technoökonomische Handlungsempfehlungen zu erarbeiten, werden die Gewerbegebiete in fünf energetische Typen eingeteilt. Grundlage hierfür ist die Untersuchung einer Zufallsstichprobe von 44 Gewerbegebieten in der Metropolregion Nordwest. Aus der Analyse dieser Stichprobe und einem eigens entwickelten Energiemodell ergibt sich die energetische Typisierung. Zusätzlich werden drei kulturelle Gebietstypen identifiziert. Diese helfen dabei, Empfehlungen für Organisations- und Koordinationsstrukturen innerhalb der Gewerbegebiete zu formulieren.

Das Projekt schafft somit eine strategische Basis, die technische, wirtschaftliche und organisatorische Aspekte integriert und maßgeblich zur Dekarbonisierung von Gewerbegebieten beitragen kann. Eine praxisnahe Überprüfung der entwickelten Methoden und Handlungsansätze ist geplant, um deren Tragfähigkeit und Wirksamkeit empirisch zu testen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fokus und Ziele des Projektes AutaGE	2
Abbildung 2: Schema der praxisorientierten Handreichung als anvisiertes Projektergebnis	3
Abbildung 3: Projektablaufplan AutaGE.....	4
Abbildung 4: Untersuchungsgebiet (grün) innerhalb der geografischen Einheiten der Metropolregion Nordwest (blau)	5
Abbildung 5: Gebietsgrößen der Stichprobe (n=44).....	6
Abbildung 6: Schematische Darstellung des AutaGE-Energiemodells.....	8
Abbildung 7: Sekundärdatenquellen für die Energiebedarfsschätzung	11
Abbildung 8: beispielhafte Berechnungsmethode des Energiebedarfs eines Unternehmens.....	11
Abbildung 9: Eigenschaften des „Durchschnittsgebietes“ der Stichprobe	12
Abbildung 10: beispielhafte Berechnungsmethode des Abwärmepotenzials eines Unternehmens.....	13
Abbildung 11: Struktur der Umfrage zur Validierung der Schätzungsmethodik	13
Abbildung 12: Mögliche Fehlerquellen der Schätzungsmethodik.....	15
Abbildung 13: Koordinatensystem zur Typisierung anhand des Wärme-Strom-Verhältnis	20
Abbildung 14: Typisierung anhand des prozentualen Anteils der Energiearten am Gesamtenergiebedarf.....	21
Abbildung 15: Herleitung von Unterscheidungskriterien der archetypischen Gewerbegebiete anhand von Kulturdimensionen und Wertelogiken	22
Abbildung 16: Matrix mit drei archetypischen Gewerbegebieten.....	24
Abbildung 17: Jahresdauerlinien Service Park	32
Abbildung 18: Jahresdauerlinien Hybrid Park	34
Abbildung 19: Jahresdauerlinien Industrial Park.....	36
Abbildung 20: Jahresdauerlinien Power Park	38
Abbildung 21: Jahresdauerlinien Thermo Park	40
Abbildung 22: Erreichbare Autarkiegrade je Gewerbegebietstyp und Modellierungsszenario	41
Abbildung 23: jährliche Kosten der Lastdeckung im Vergleich zum Status Quo für den Typ „Industrial Park“ nach Szenarien	42
Abbildung 24: Investitionsquoten je Gebietstyp und Modellierungsszenario	44
Abbildung 25: Sensitivität der Dimensionierung der Technologien	45
Abbildung 26: Sensitivität der Dimensionierung der Speicher.....	46
Abbildung 27: Organisationsschema für nachhaltige Gewerbegebiete nach Betker	52
Abbildung 28: Aufgaben zur Etablierung einer Energie-Kooperation nach Kooperationsphasen	55
Abbildung 29: Maßnahmen zur Schaffung einer günstigen Ausgangssituation für Energiekooperationen in Gewerbegebieten.....	56
Abbildung 30: Kooperationsmodell für innovative Individualisten (schematisch).....	60
Abbildung 31: Kooperationsmodell für fortschrittliche Kollektivisten (schematisch).....	63
Abbildung 32: Kooperationsmodell für sicherheitsorientierte Kollektivisten (schematisch).....	65
Abbildung 33: schematische Darstellung der Projektergebnisse.....	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Temperaturniveaus der Wärme im Modell	9
Tabelle 2: Sekundärdatenbasis für das Energiemodell.....	10
Tabelle 3: Umfrageergebnisse in statistischen Kennzahlen.....	14
Tabelle 4: Modellierungsszenarien	16
Tabelle 5: EE-Potenzial und verfügbare Energieträger je Szenario	17
Tabelle 6: Steckbrief und Modellierungsergebnisse - Industrial Park.....	35
Tabelle 7: Steckbrief und Modellierungsergebnisse - Service Park	31
Tabelle 8: Steckbrief und Modellierungsergebnisse - Hybrid Park.....	33
Tabelle 9: Steckbrief und Modellierungsergebnisse - Power Park	37
Tabelle 10: Steckbrief und Modellierungsergebnisse - Thermo Park	39
Tabelle 11: Gegenüberstellung von Interaktion und Transaktion	51
Tabelle 12: Einteilung der Ebenen und Dimensionen von Governance-Konzepten	52
Tabelle 13: Instrumenten-Archetypen-Matrix	58
Tabelle 14: Merkmalsausprägung des lokalen Energiemarktes	60
Tabelle 15: SWOT-Analyse Lokaler Energiemarkt	62
Tabelle 16: Merkmalsausprägung der Energiegenossenschaft	63
Tabelle 17: SWOT-Analyse Energiegenossenschaft	64
Tabelle 18: Merkmalsausprägung des Contracting-Modells	65
Tabelle 19: SWOT-Analyse Contracting	66

Glossar

In dieser Studie sind nachfolgende Begriffe wie folgt definiert:

Endenergie:	Teil der Primärenergie, der den Unternehmen nach Abzug von Transport- und Umwandlungsverlusten zur Verfügung steht, d.h. Energie, die am Zähler der Verbraucher ankommt (z.B. Erdgas, Strom, Nahwärme).
Energieautarkie: [1] [2]	<p>Energieautarkie ist eine Befriedigung der lokalen Energienachfrage in einem Gebiet durch lokale Quellen innerhalb dieses Gebiets.</p> <p>Der Grad der Energieautarkie kann in zwei Stufen eingeteilt werden:</p> <p>komplette Energieautarkie, d. h. die Region ist von ihrer Umgebung auf physischer Ebene energetisch abgetrennt und deckt ihre eigene Energienachfrage ständig und komplett selbst aus lokalen Energieträgern, z.B. Sonnenenergie, Windenergie, lokale Biomasse (auch leistungsbezogene, strenge oder starke Autarkie genannt)</p> <p>bilanzielle Energieautarkie, d. h. die jährliche Summe der lokalen Energieerzeugung aus lokalen Energieträgern (z.B. Sonnenenergie, Windenergie, lokale Biomasse) ist größer als die Summe der jährlichen Energienachfrage, d. h. die Region ist über das Jahr autark, wobei die überregionale Netzinfrastruktur (für Elektrizität, Gas, Wärme usw.) genutzt wird, um Diskrepanzen zwischen Angebot und Nachfrage in einzelnen Stunden eines Jahres auszugleichen (auch weiche Autarkie genannt)</p>
Energiebedarf:	eine theoretische Planungsgröße, welche die prognostizierte Energiemenge beschreibt, die zur Deckung der Nachfrage in einem bestimmten Zeitraum erforderlich ist
Energiegemeinschaften: [3] [4]	<p>Energiegemeinschaften sind eine Erscheinungsform von Energiekooperationen. Innerhalb der EU werden Energiegemeinschaften gemäß Artikel 22 der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie (Renewable Energy Directive (RED II)) und Artikel 16 der Strommarktinnenrichtlinie (Internal Electricity Market Directive (IEMD)) definiert und zwischen Renewable Energy Communities (REC) und Citizen Energy Communities (CEC) unterschieden. Energiegemeinschaften können verschiedene Rechtsformen annehmen, z.B. Genossenschaften, gemeinnützige Unternehmen oder öffentlich-private Partnerschaften, wobei sehr häufig die Genossenschaft gewählt wird.</p> <p>Primärer Zweck von Energiegemeinschaften ist die Schaffung ökonomischen, ökologischen oder sozialen Nutzens für die Mitglieder der Gemeinschaft, statt auf finanzielle Profite zu fokussieren. Anteilseigner dürfen sowohl natürliche Personen, lokale Behörden und Kommunen sowie KMU sein, sofern ihre hauptsächliche wirtschaftliche Aktivität außerhalb von Energie liegt.</p>

Energiekooperationen:	Eine Kooperation ist eine freiwillige Zusammenarbeit zwischen mindestens zwei Einheiten, deren rechtliche und wirtschaftliche Selbstständigkeit dabei erhalten bleibt. Energiekooperationen haben grundsätzlich die gemeinsame Erzeugung, Nutzung und/oder Beschaffung von Energie durch mindestens zwei Kooperationspartner zum Gegenstand. Zudem fällt unter Energiekooperationen auch die gemeinsame Vermarktung stromsystemdienlicher Services, z.B. auf Flexibilitätsmärkten.
Energieverbrauch:	die tatsächlich genutzte Menge an Energie in einem bestimmten Zeitraum
Gewerbe- und Industriegebiete:	Die gesetzlichen Definitionen von Gewerbe- und Industriegebieten sind in der Baunutzungsverordnung (BauNVO) enthalten. Gemäß §§ 8,9 BauNVO dienen Gewerbegebiete der Unterbringung von nicht erheblich belästigenden Gewerbebetrieben, während in Industriegebieten auch Betriebe angesiedelt werden dürfen, die in anderen Baugebieten unzulässig sind. In dieser Studie wird der Begriff Gewerbegebiete jedoch zusammenfassend für Industrie- und Gewerbegebiete verwendet.
Nutzenergie:	Teil der Endenergie, der nach Abzug von Umwandlungsverlusten tatsächlich vom Verbraucher genutzt werden kann (z.B. mechanische Bewegung, Raumwärme etc.)
Primärdaten:	Daten, die direkt durch eigene Erhebungen für einen spezifischen Zweck und in einem bestimmten Kontext gewonnen werden, z.B. durch Umfragen, Interviews etc.
Primärenergie:	Energie, welche zu Beginn der Umwandlungskette in den Energieträgern enthalten ist und noch keiner weiteren Umwandlung unterzogen wurde. Es handelt sich entweder um externe Primärenergie, die von außen in das System Gewerbegebiet hineinfließt und durch Netzinfrastruktur oder Transport am imaginären Zähler des Gebietes ankommt (z.B. Erdgas, Strom, Wasserstoff) oder um interne Primärenergie, welche originär innerhalb des Systems verfügbar ist (z.B. Solarstrahlung, Wind, Biomasse).
Sekundärdaten:	Daten, die bereits existieren und ursprünglich für andere Zwecke erhoben wurden, z.B. veröffentlichte Studien, Statistiken, Berichte, Datenbanken
Systemgrenze:	Die Systemgrenze legt den Rahmen eines Systems fest, d. h. welche Elemente zu einem System gehören und welche nicht. Das System Gewerbegebiet umfasst in dieser Studie die gesamte Gewerbegebietsfläche sowie Flächen in einem Radius von einem Kilometer um die Gewerbegebietsaußengrenzen, die Potenzial für Wind-, Sonnen oder Bioenergie aufweisen.

1 Einleitung

Eine wichtige Herausforderung der Energietransformation ist die Dekarbonisierung der Sektoren Industrie, Gewerbe, Handel, und Dienstleistungen (GHD), welche in Summe etwa 40 % des Endenergieverbrauches in Deutschland verursachen [5]. Insbesondere Gewerbe- und Industriegebiete sind in diesem Kontext von hoher Relevanz. Allein in Deutschland existieren über 60.000 Gewerbegebiete [6], von denen der Großteil noch keine Energietransformation vollzogen hat. Bei ihrer Entwicklung und Erschließung gewinnen Nachhaltigkeitsfaktoren, wie die Integration erneuerbarer Energien, bei Unternehmen und Kommunen gleichermaßen eine immer größere Bedeutung. Auf kommunaler Ebene rücken Gewerbegebiete in den Fokus, da sie für die gesetzlich vorgeschriebene kommunale Wärmeplanung sowie die Erstellung von Klimaschutzkonzepten auf Länderebene (z.B. in §§ 18,20 des Niedersächsischen Klimagesetzes NKlimaG) eine bedeutende Rolle spielen. Zudem sind nachhaltige und energieeffiziente Gewerbebestände ein entscheidender Faktor, um den zukünftigen Erfolg der regionalen Wirtschaft sicherzustellen. Aus der Sicht von Industrie und GHD sind die Energiekosten eine wichtige Einflussgröße für die Wettbewerbsfähigkeit. Dies gilt insbesondere mit Blick auf die künftig zu erwartenden Preissteigerungen fossiler Energieträger durch die nationale Umsetzung des europäischen Emissionshandelssystems (EU-ETS). Außerdem spielt die Energie-Versorgungssicherheit und -Unabhängigkeit eine zunehmend wichtige Rolle. Dezentrale Erneuerbare Energien und möglichst weitgehende Energieautarkie in Gewerbegebieten sind folglich wichtige Wettbewerbsfaktoren für Unternehmen und zentrale Erfolgsfaktoren für Staat und Kommunen, um die gesteckten Klimaschutzziele zu erreichen und attraktive Wirtschaftsstandorte zu erhalten. Damit der Transformationsprozess hin zur klimaneutralen Wirtschaft gelingen kann, sind für die Entwicklung von Gewerbegebieten zukunftsgerechte Konzepte dringend notwendig. Aktuell existieren jedoch vielfältige Gründe, weshalb Energiekooperationen in Gewerbe- und Industriegebieten nicht realisiert werden [7]. Zum einen sind technische Lösungen erforderlich, die wirtschaftlich tragbar sind. Andererseits zählen unter anderem die Koordination und Organisation der Energiekooperationen zu den größten Herausforderungen [7] [8], sodass organisatorische Konzepte und Governance-Aspekte ebenfalls betrachtet werden.

1.1 Vorstellung des Projekts

In Anbetracht der genannten Herausforderungen entstand das von der WIGOS (Wirtschaftsförderungsgesellschaft Osnabrücker Land), ihrer Schwestergesellschaft oleg (Osnabrücker Land-Entwicklungsgesellschaft) und der Hochschule Osnabrück gemeinsam entwickelte Pilotprojekt „Energieautarke Gewerbegebiete in der Metropolregion

Nordwest“ (AutaGE). Der hauptsächliche **Fördermittelgeber** für das Projekt ist die **Metropolregion Nordwest**. Ein Großteil der Mittel stammt aus dem Förderfonds, der zu gleichen Teilen aus Mitteln der Länder Bremen und Niedersachsen gespeist wird und das zentrale Instrument zur Förderung innovativer, regionaler Kooperationsprojekte der Metropolregion darstellt. Alle Fördermittelgeber und Projektergebnisse sind auf der projekteigenen [Website](#) online einsehbar.

Die folgende Abbildung 1 verdeutlicht die Ziel- und Schwerpunktsetzung des Projektes.

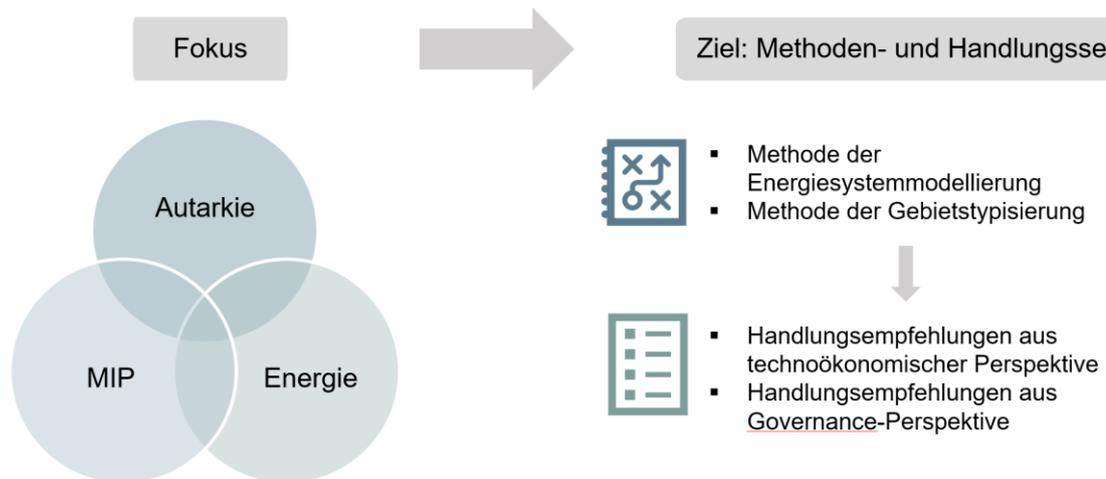


Abbildung 1: Fokus und Ziele des Projektes Autage

Der Fokus des Autage-Projektes liegt auf der Energieversorgung von Gewerbegebieten und somit exklusiv auf der Ressource Energie. Industrieller Symbiose (IS) sowie Eco-Industrial-Parks (EIP) betrachten neben Energie den Austausch weiterer Ressourcen wie z.B. Materialien, Wasser und Nebenprodukten [9]. Darüber hinaus werden in den Konzepten der nachhaltigen Gewerbegebiete gemäß den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit neben der ökonomischen Dimension auch die ökologische und insbesondere die soziale Dimension berücksichtigt. Beispielsweise können Shared Services wie Kantine oder zentrale Kinderbetreuung und Sicherheitsdienst sowie Kooperationen im Bereich Transport und Einkauf eine wichtige Rolle spielen. Diese Aspekte finden im Autage-Projekt kaum Berücksichtigung.

Im Rahmen der energetischen Betrachtung liegt ein Schwerpunkt auf der Untersuchung wirtschaftlich erreichbarer Autarkiegrade. Der Autarkiegrad gibt den Anteil der Endenergieerzeugung aus interner Primärenergie am gesamten Endenergiebedarf an. Außerdem konzentriert sich das Projekt auf Gewerbegebiete, welche von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) dominiert werden. Für derartige Gebiete wird in der wissenschaftlichen Fachliteratur der Begriff der Mixed-Industrial Parks (MIP) oder der Mixed-Use Eco-parks verwendet. EIP besitzen vor allem aufgrund ihrer strukturellen Merkmale günstigere Voraussetzungen für nachhaltige Lösungen als MIP [10], sodass für KMU domi-

nierte Gewerbegebiete eine Forschungslücke besteht [10] [11]. Statt Ansätze für nachhaltige Energielösungen auf der Ebene einzelner Unternehmen zu untersuchen, fokussiert diese Studie auf Energiekooperationen von Unternehmen und gemeinschaftliche Energielösungen auf Gebietsebene.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Methoden- und Handlungssets zur Nutzung erneuerbarer Energien und zur Steigerung der Energieautarkie in Gewerbegebieten. Stakeholder wie Kommunen, Wirtschaftsförderer und Unternehmen verfügen in Form dieses Projektberichtes über eine praxisorientierte Handreichung. Sie sollen in die Lage versetzt werden, in einer komplexen Energieversorgungswelt die Energietransformation von Gewerbegebieten proaktiv voranzutreiben und konkrete Strategien zur Transformation von Gewerbegebieten zu entwickeln. In Abbildung 2 ist ein Muster der anvisierten Handreichung schematisch dargestellt, die im Rahmen des Projektes mit Inhalten zu füllen ist. Im Leistungsumfang des Projektes sind folglich drei Leistungen vorgesehen, die abschließend im Fazit in **Kapitel 4** aufgegriffen und zusammengefasst werden:

- Entwicklung einer Methodik zur Schaffung einer Datenbasis
- Entwicklung einer Methodik zur Typisierung von Gewerbegebieten
- Handlungsempfehlungen je Gewerbegebietstyp

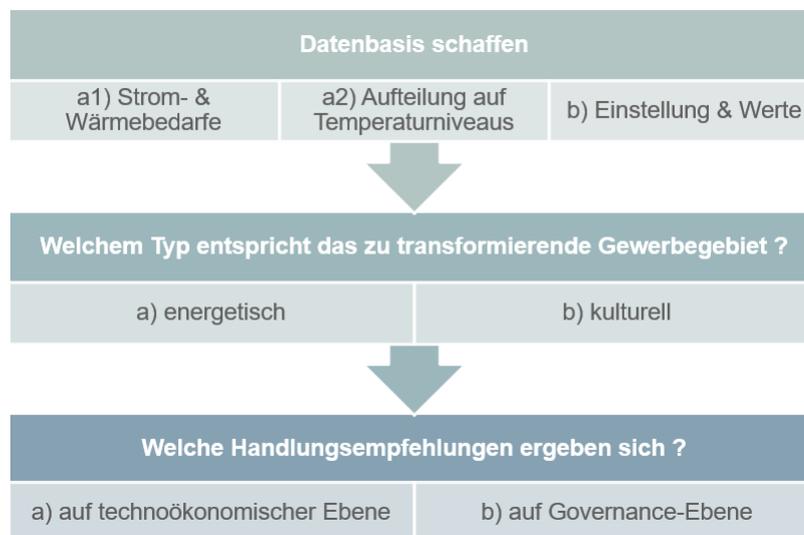


Abbildung 2: Schema der praxisorientierten Handreichung als anvisiertes Projektergebnis

Das Methodenset in **Kapitel 2** zeigt den methodischen Weg auf, um zum Ziel in Form der Handlungsempfehlungen zu gelangen. Da die Methoden von Stakeholdern auf deren reale Praxisprojekte übertragen werden können, ist das Methodenset bereits ein wichtiger Teil der Projektergebnisse. Es beinhaltet sowohl die Erläuterung der Energiemodellierung als auch der Methodik zur Typisierung von Gewerbegebieten. Das Handlungsset in **Kapitel 3** gliedert sich in Handlungsempfehlungen aus zwei unterschiedlichen Perspektiven. Einerseits können zukünftige Energiesysteme aus technischer Perspektive

betrachtet werden, wofür häufig Begriffe wie Erneuerbare-Energien-Cluster, Multi-Energy-Systems oder Distributed-Energy-Systems verwendet werden. Andererseits können sie aus der Governance-Perspektive gedacht werden, wobei dann Bezeichnungen wie Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften (Renewable Energy Communities (REC)) gebraucht werden. Bei allen Bezeichnungen handelt es sich laut Lowitzsch et al. [12] um Konzepte für denselben Begriff, nämlich für neue Energiesysteme, jedoch aus unterschiedlichen Perspektiven. Das Handlungsset umfasst Handlungsempfehlungen für unterschiedliche Gewerbegebietstypen aus beiden Blickwinkeln. Neben technologischen Möglichkeiten und deren Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen werden ebenfalls Governance-Aspekte wie die innere Organisationsstruktur der Gewerbegebiete untersucht. Der Governance-Blickwinkel legt den Fokus auf die Frage, wie Energie-Kooperationen zwischen Unternehmen innerhalb von Gewerbegebieten koordiniert und organisatorisch gestaltet werden können. Die technoökonomische Perspektive liefert Antworten auf die Frage, welche Technologien in welchem Umfang eingesetzt werden sollten, um eine möglichst kostengünstige Energieversorgung in der Zukunft zu erzielen.

Das Projekt gliedert sich in fünf Arbeitspakete. Abbildung 3 zeigt den Projektablaufplan (PAP) über die 18-monatige Projektdauer zwischen dem 24.11.2023 und 23.05.2025.

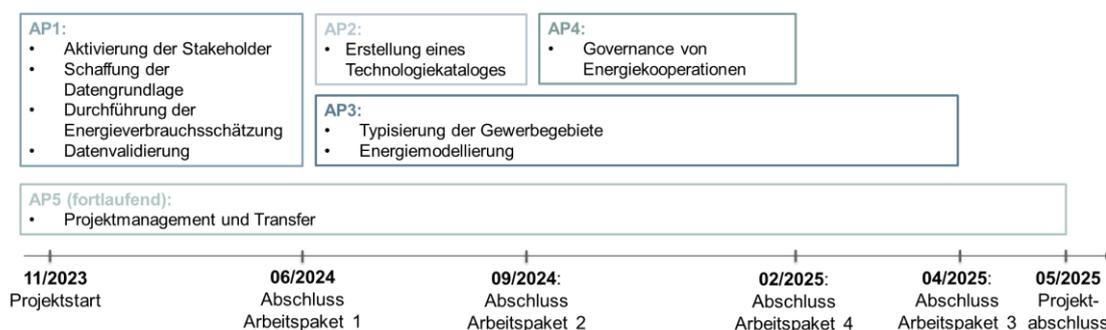


Abbildung 3: Projektablaufplan Autage

Die ersten vier Arbeitspakete erzielen den inhaltlichen Projektfortschritt. **Arbeitspaket 1** umfasst die Eingrenzung des Untersuchungsgebiets und die Stichprobenziehung, die Datenerfassung durch Zugriff auf Geoinformationssysteme und Wirtschafts-Datenbanken sowie die Datengenerierung durch Entwicklung und Anwendung einer Schätzungsmethodik für Energieverbräuche. Weiterhin wird die geschaffene Datenbasis einer Validierung unterzogen. **Arbeitspaket 2** beinhaltet die Erstellung eines Technologiekataloges mit einsetzbaren Technologien und deren spezifischen Investitionskosten, Betriebskosten und Nutzungsdauern. Der Technologiekatalog dient als wichtige Eingangsdatentabelle für die Energiemodellierung. In **Arbeitspaket 3** wird das Energiemodell entwickelt und eine anschließende Auswertung der Modellierungsergebnisse sowie eine Sensitivitätsanalyse vorgenommen. Die Governance-Aspekte von Energiekooperationen in Gewerbegebieten werden im Rahmen des **Arbeitspakets 4** untersucht. Abschließend

werden die Teilergebnisse zum gesamten Projektergebnis in Form dieses Projektberichts zusammengeführt. **Arbeitspaket 5** umfasst das Projektmanagement und den Transfer von Zwischenständen und finalen Ergebnissen an die Stakeholder. Während der Projektlaufzeit wurden zu diesem Zweck drei Veranstaltungen mit der Begleitgruppe und den Fördermittelgebern sowie weiteren Unterstützern und Interessierten durchgeführt. Im Februar und November 2024 fanden jeweils Zwischenpräsentationen online statt und im Mai 2025 erfolgte die abschließende Vorstellung der Projektergebnisse in Präsenz.

1.2 Untersuchungsgebiet und Stichprobe

Das Untersuchungsgebiet der Studie ist in Abbildung 4 dargestellt und umfasst die Städte Bremen und Oldenburg sowie den Landkreis Osnabrück innerhalb der Metropolregion Nordwest. Grundsätzlich sind die Projektergebnisse jedoch nicht auf die Anwendung innerhalb des Untersuchungsgebiets beschränkt, sondern können auf Gewerbegebiete an beliebigen Standorten übertragen werden.



Abbildung 4: Untersuchungsgebiet (grün) innerhalb der geografischen Einheiten der Metropolregion Nordwest (blau)

Wissenschaftliche Untersuchungen zu Industrieller Symbiose und nachhaltigen Ökoparks werden in erster Linie für eher große Gewerbegebiete mit einer Fläche ab etwa

100 Hektar und großen ansässigen Unternehmen durchgeführt, wie bspw. in [8] [13] [14] [15] [16]. In Deutschland erstrecken sich Industrie- und Gewerbegebiete über 6.338 Quadratkilometer [17]. Legt man die Zahl von ca. 60.000 Industrie- und Gewerbegebieten in Deutschland zugrunde [6], so beträgt die durchschnittliche Größe eines Parks etwa 10 Hektar. Dies lässt den Schluss zu, dass der durchschnittliche Park deutlich kleiner ist als die in der Literatur hauptsächlich untersuchten Industrieparks. Im Untersuchungsgebiet existieren den Geodaten aus OpenStreetMap sowie OpenGeo-Data.NI des LGLN zufolge grundsätzlich etwa 800 Gewerbe- und Industrieflächen mit stark variierenden Größen. Um die Studie auf sinnvolle Areale einzugrenzen, werden Mindestanforderungen an die Gebietsfläche ($A \geq 5$ ha) und die Unternehmensanzahl ($n \geq 5$) festgelegt. Aus den nach Anwendung dieser Kriterien verbleibenden 165 Gebieten wird eine zufällige Stichprobe gezogen, um etwa 25 % dieser Gebiete in den Städten bzw. dem Landkreis zu untersuchen. Die resultierende Stichprobe besteht aus $n = 44$ Gewerbegebieten, davon 25 im Landkreis Osnabrück, 12 in Bremen und 7 in Oldenburg. Die Abbildung 5 stellt die Größenaufteilung innerhalb der Gebiete grafisch dar. Hinsichtlich der Gebietsfläche A liegen alle Gebiete der Stichprobe im Intervall zwischen $8 \text{ ha} < A < 220 \text{ ha}$. Die durchschnittliche Gebietsfläche innerhalb der Stichprobe beträgt 43 ha, wobei 75 % (33) der Gebiete der Stichprobe eine Fläche $A \leq 50$ ha aufweisen und nur 10 % (4) eine Fläche $A > 100$ ha.

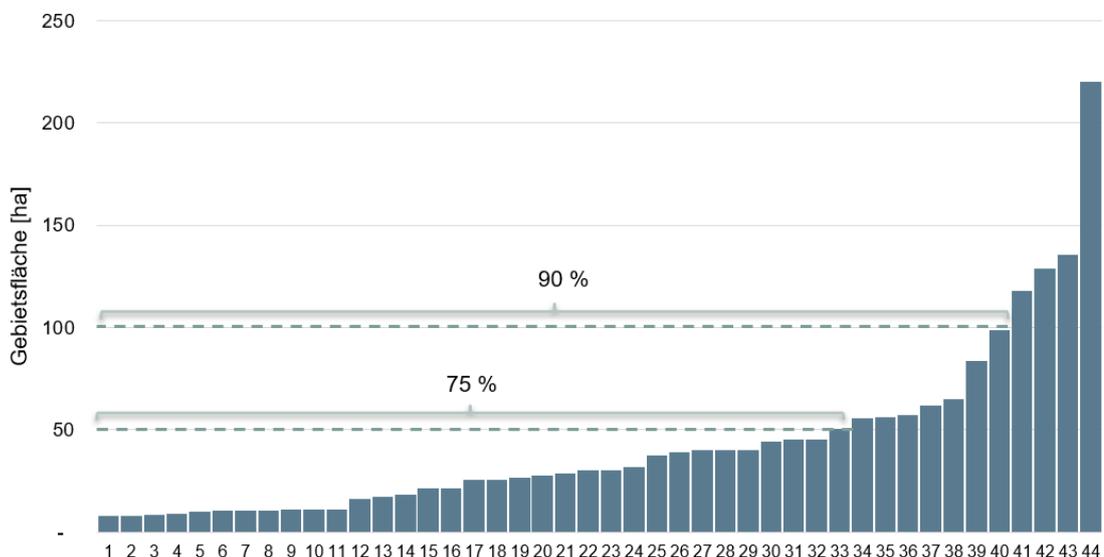


Abbildung 5: Gebietsgrößen der Stichprobe (n=44)

2 Methodenset

Das Methodenset beinhaltet sowohl die Erläuterung der durchgeführten Energiewirtschaftlichen Modellierung als auch der Methodik zur Typisierung von Gewerbegebieten. Es soll Stakeholder einerseits befähigen, die Methoden in ihrem lokalen Kontext eigenständig anzuwenden und andererseits Aufschluss geben, welcher methodische Weg in diesem Projekt verfolgt wurde, um zu den resultierenden Handlungsempfehlungen zu gelangen.

2.1 Methode I: Energiewirtschaftliche Modellierung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über das entwickelte Energiemodell. Zunächst erfolgt eine Einführung in das Open Energy Modelling Framework (oemof), das als zentrales Werkzeug der Modellierung dient. Anschließend werden die Struktur und Funktionsweise des erstellten Modells erläutert. Daraufhin werden die notwendigen Input-Parameter und die betrachteten Modellierungsszenarien vorgestellt. Abschließend werden Grenzen dargelegt, welche bei der Anwendung des Modells zu berücksichtigen sind.

2.1.1 Das AutoGE-Energiemodell

Energiemodellierung beschreibt die Entwicklung und Verwendung mathematischer und computergestützter Modelle, um bspw. die Energieversorgung zu simulieren. Grundsätzlich bildet ein Energiemodell die Realität möglichst genau, aber mit reduzierter Komplexität ab und ermöglicht somit ein besseres Verständnis komplexer Zusammenhänge in Energiesystemen. Diese Studie verwendet das auf der Programmiersprache Python basierende, öffentlich zugängliche Open Energy Modelling Framework (oemof) und stützt sich auf das oemof.solph-Paket. Dieses Paket nutzt eine Graphenstruktur, um die Erzeugung, Energieflüsse, Umwandlungen und den Verbrauch in Energiesystemen darzustellen. Das in diesem Projekt entwickelte AutoGE-Energiemodell ist in der Abbildung 6 schematisch dargestellt. Der Quelltext ist auf der Projekt-[Website](#) bzw. auf der Plattform GitHub veröffentlicht.

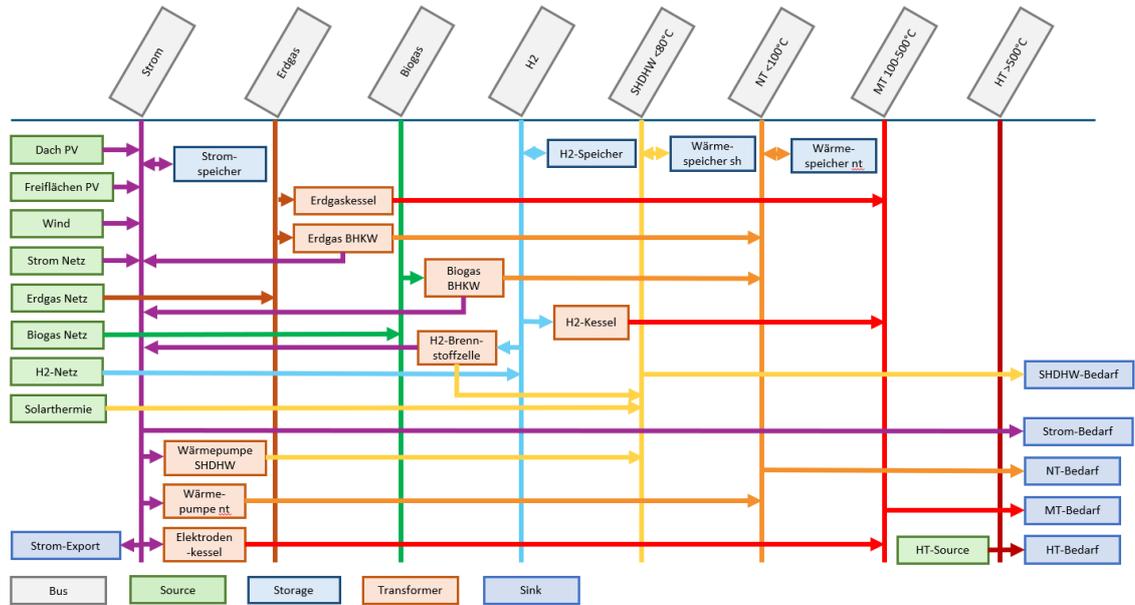


Abbildung 6: Schematische Darstellung des AutaGE-Energiemodells

Die zentralen Verbindungspunkte zwischen den unterschiedlichen Komponenten des Modells werden als „Busses“ bezeichnet. Diese dienen als Verbindungen, über die verschiedene Energieflüsse laufen. Im betrachteten Beispielmmodell gibt es z.B. Busses für Strom, Erdgas, Biogas, Wasserstoff und Wärme. Als „Sources“, d.h. mögliche Erzeugungsanlagen beinhaltet das Modell Dachflächen-PV, Freiflächen-PV, Windenergieanlagen, Solarthermie sowie den Bezug von Energieträgern wie Strom und Erdgas sowie ggf. Biogas und Wasserstoff aus der öffentlichen Netzinfrastruktur. Darüber hinaus sind Wärmepumpen (Hochtemperatur-WP, Sole-Wasser-WP und Luftwärmepumpen), Blockheizkraftwerke (erdgas- oder biogasgefeuert), Erdgaskessel, Elektrodenkessel, Wasserstoffkessel sowie Elektrolyseure und Brennstoffzellen ebenfalls als mögliche Erzeugungsanlagen in Form von „Transformern“ integriert. Sie fungieren als Bindeglied zwischen zwei Busses, indem sie Energie von einer Form in eine andere umwandeln. Ein anschauliches Beispiel hierfür ist die Wärmepumpe, die Energie zwischen dem Strombus und dem Wärmebus transformiert. Die Unternehmen eines Gewerbegebietes der Stichprobe stellen mit ihren jährlichen Strom- und Wärmebedarfen die „Sinks“ dar. Der Wärmebedarf der Unternehmen wird in vier Temperaturniveaus unterteilt, die in Tabelle 1 dargestellt sind. Unternehmen, die Prozesswärme auf einem mittleren Temperaturniveau benötigen, sind gleichzeitig „Sources“ in Form von Abwärmequellen zur Nutzung der Abwärme für Prozesswärme auf einem niedrigen Temperaturniveau oder Heizung und Warmwasser. Unternehmen, welche Prozesswärme auf einem niedrigen Temperaturniveau benötigen, sind zugleich „Sources“ in Form von Abwärmequellen zur Nutzung der Abwärme als Input für Wärmepumpen, um Wärme zu liefern und deren Jahresarbeitszahl bzw. Effizienz zu verbessern. Zudem sind Speicher wie Großbatterien sowie

Wasserstofftanks und Wärmespeicher sowohl für Prozesswärme als auch für Heizung und Warmwasser als „Storages“ im Modell enthalten.

Tabelle 1: Temperaturniveaus der Wärme im Modell

<i>Bezeichnung</i>	<i>Abkürzung</i>	<i>Temperatur</i>
Raumwärme	DHW	< 60 °C
Warmwasser		60 - 80 °C
niedere Prozesswärme	NT	80 – 100 °C
mittlere Prozesswärme	MT	100 – 500 °C
hohe Prozesswärme	HT	> 500 °C

Durch die in Python implementierte Bibliothek Pyomo wird die Graphenstruktur des oemof.solph-Pakets in ein Optimierungsmodell überführt. Pyomo ermöglicht die Modellierung sowohl linearer (LP) als auch gemischt-ganzzahliger (MILP) Optimierungsprobleme. Das erstellte Optimierungsmodell wird im Anschluss an einen externen Solver übergeben, der das mathematische Optimierungsproblem löst. Der modellierte Zeitrahmen des AutoGE-Modells bezieht sich auf ein Jahr und weist eine stündliche Auflösung auf. Die Optimierung besteht darin, für jede Stunde eines Jahres die optimale Lastdeckung zu ermitteln, sodass die jährlichen Kosten der Lastdeckung ihr Minimum erreichen. In den jährlichen Lastdeckungskosten sind sowohl Investitionsausgaben (Capital Expenditures (CapEx)) für neu zu installierende Technologien als auch Betriebsausgaben (Operational Expenditures (OpEx)) für neue und bestehende Anlagen berücksichtigt. Die CapEx fließen als Annuitäten in die jährlichen Lastdeckungskosten ein. Zu den OpEx zählen variable Kosten wie z.B. Energiekosten je verbrauchter Energiemenge (kWh) Strom und Erdgas, aber auch der Leistungspreis für die maximal bezogene Leistung (kW) aus der öffentlicher Netzinfrastruktur sowie fixe Betriebskosten wie Wartung und Instandhaltung der Energieanlagen. Erzielbare Erlöse durch die externe Vermarktung von Überschussenergie fließen ebenfalls in die Optimierung ein.

2.1.2 Datenbasis

Für eine Energiemodellierung ist eine umfangreiche Datenbasis essenziell. Die erforderlichen Eingangsdaten für das Energiemodell lassen sich in die drei Kategorien energetische, technische und wirtschaftliche Daten einteilen, wie in Tabelle 2 deutlich wird. Zudem sind dort die jeweiligen Quellen aufgeführt, aus denen die Sekundärdaten entnommen werden. Die Inputdatei im Excel-Format ist auf der Projekt-[Website](#) bzw. auf der Plattform GitHub veröffentlicht. Auf eine Erhebung der Endenergieverbräuche aller Unternehmen als Primärdaten wird verzichtet, da unter anderem zu erwarten ist, dass die Bereitstellung der Daten nicht von allen Unternehmen unterstützt wird. Bei Umfragen im wissenschaftlichen Kontext sind grundsätzlich Rücklaufquoten von ca. 67 % bzw. für Analysen auf Unternehmensebene sogar nur 20 % zu erwarten [18]. Die Entwicklung

alternativer Methoden der Energiebedarfsschätzung anhand von bereits vorhandenen Sekundärdaten aus verschiedenen Quellen ist daher ohnehin sinnvoll.

Tabelle 2: Sekundärdatenbasis für das Energiemodell

<i>Energetische Daten</i>		<i>Technische Daten</i>		<i>Wirtschaftliche Daten</i>	
<i>Bezeichnung</i>	<i>Quellen</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Quellen</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Quellen</i>
jährliche Endenergiebedarfe der Unternehmen	eigene Schätzungsmethode basierend auf [19] [20]	Wirkungsgrad der Technologien	Technikkataloge [21] [22]	CapEx OpEx	Technikkataloge [21] [22]
stündliche Lastprofile der Unternehmen für Strom und Wärmeniveau	Synthetische Lastprofile aus [23] [24] [25]	Lebensdauer der Anlagen	Technikkataloge [21] [22]	Energiepreise	Monitoringbericht BNetzA [26] und Handelsplätze für Energieträger
stündliche EE-Erzeugungsprofile	OPSD [27]			Export Erlöse	angesetzt in Höhe der berechneten LCOE je Technologie
Vorhandene EE-Erzeugung	MaStR [28]				
Abwärmepotenzial & Abwärmenniveau	Synthese aus diversen Studien [29] [30] [31] [32] [33]				

A. Methode der Energiebedarfsschätzung

Die entwickelte Methode zur Schätzung des Endenergiebedarfs der Unternehmen in den Gewerbegebieten basiert ebenfalls auf Sekundärdaten, die größtenteils öffentlich verfügbar sind, wie Abbildung 7 zeigt. Aus der MARKUS-Datenbank der Creditreform werden die in den Gewerbegebieten der Stichprobe jeweils ansässigen Unternehmen entnommen. Zu diesen Unternehmen enthält die Datenbank Informationen wie deren Wirtschaftszweig, die Beschäftigtenzahl sowie den Jahresumsatz. Wie bereits im Kontext der Stichprobenziehung erläutert, werden die Gebäude- und Dachflächen durch Geodaten aus OpenStreetMap sowie OpenGeoData.NI des LGLN ermittelt. Zudem werden spezifische Energieverbrauchskennzahlen des Primärenergieverbrauchs für Strom und Brennstoffe aus aktueller Fachliteratur entnommen. Die spezifischen Kennzahlen beziehen sich einerseits auf den Wirtschaftszweig eines Unternehmens und andererseits entweder auf deren Fläche, die Beschäftigtenzahl oder den Umsatz. Für das produzierende Gewerbe wird hauptsächlich (Lässig) als Quelle verwendet, für den GHD-Sektor stammen die meisten Werte aus (Fraunhofer).

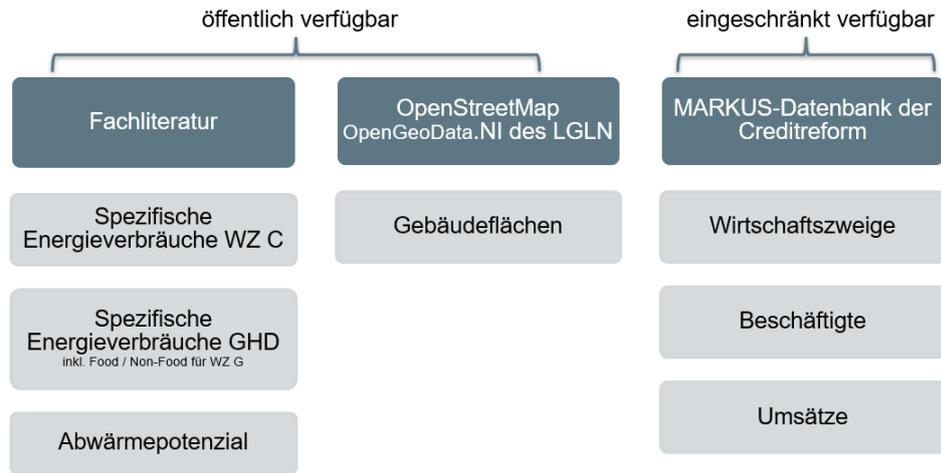


Abbildung 7: Sekundärdatenquellen für die Energiebedarfsschätzung

Die genaue Berechnungsmethodik des Energiebedarfs für ein exemplarisches Unternehmen ist in Abbildung 8 dargestellt. Anhand des Wirtschaftszweiges werden einem Unternehmen spezifische Energieverbrauchskennzahlen zugeordnet und dann jeweils mit den ermittelten Größen Beschäftigtenzahl, Jahresumsatz und Gebäudefläche multipliziert. Aus den resultierenden Werten wird der Mittelwert gebildet, sodass aus den spezifischen Energieverbräuchen ein geschätzter Endenergiebedarf errechnet wird. Sollten spezifische Kennzahlen nicht zu allen Berechnungsvarianten vorliegen, so werden nur die Berechnungsvarianten durchgeführt, zu denen spezifische Kennzahlen vorliegen. Der Brennstoffbedarf wird abschließend noch mit einem Wirkungsgrad für die Wandlungseffizienz der aktuellen Wärmeversorgung nach [33] versehen, um den Wärmebedarf zu berechnen. Die Strom- und Wärmebedarfe der Unternehmen werden aufsummiert, sodass sich daraus letztendlich der kumulierte Endenergiebedarf auf Gewerbegebietsebene ergibt.

Energiebedarfsschätzung [kWh p.a.]						
WZ	Variante Beschäftigte		Variante Umsatz		Variante Fläche	
A12345	50.000 kWh / MA	30 MA	120 kWh / TEUR	10.000 TEUR	90 kWh / m ²	10.000 m ²
Energiebedarf	1.500.000 kWh		1.200.000 kWh		900.000 kWh	
Geschätzter Energiebedarf	= MITTELWERT = 1.200.000 kWh					



Abbildung 8: beispielhafte Berechnungsmethode des Energiebedarfs eines Unternehmens

Um die Dimensionen der untersuchten Gebiete zu verdeutlichen, ist das „Durchschnittsgebiet“ der 44 Gewerbegebiete aus der Stichprobe mit seinen Eigenschaften in Abbildung 9 dargestellt. Durchschnittlich weist ein Gebiet eine Größe von 43 ha auf und der jährliche Endenergiebedarf beläuft sich auf 19 GWh Wärme und 12 GWh Strom. Auf einer Gebäudefläche von durchschnittlich 11 ha beherbergt das Durchschnittsgebiet 70 Unternehmen.



Abbildung 9: Eigenschaften des „Durchschnittsgebietes“ der Stichprobe

B. Methode der Abwärmepotenzialschätzung

Die Schätzung des Abwärmepotenzials eines Gebietes weist methodische Parallelen zur Energiebedarfsschätzung auf. Das Abwärmepotenzial wird in der aktuellen Forschung anhand von Abwärmefaktoren errechnet. Die Abwärmefaktoren geben den Anteil des Energieverbrauchs an, der als nutzbare Abwärme zur Verfügung steht. [30] und [32] errechnen das Abwärmepotenzial aus dem gesamten Energieverbrauch, während [31] und [33] es aus dem Brennstoffverbrauch errechnen (Abwärme aus Rauchgas). [32] kombiniert sogar zwei Abwärmefaktoren, einen bezogen auf den Stromverbrauch (Abwärme z.B. aus Kompressoren) und einen bezogen auf den restlichen Energieverbrauch. Die genaue Berechnungsmethodik des Abwärmepotenzials ist in Abbildung 10 beispielhaft für ein Unternehmen dargestellt. Die nutzbaren Abwärmemengen der Unternehmen werden aufsummiert, sodass sich daraus letztendlich das kumulierte Abwärmepotenzial auf Gewerbegebietsebene ergibt.

Abwärmeschätzung anhand Abwärmefaktoren für Produktionsunternehmen [kWh p.a.]				
WZ	Variante Energieverbrauch	Variante Brennstoffverbrauch	Variante Strom- und Restverbrauch	
			Strom	Rest
C12345	6 % des Energieverbrauchs	8 % des Brennstoffverbrauchs	10 %	4 %
Geschätzter Energieverbrauch	1.200.000 kWh	700.000 kWh	500.000	700.000
Abwärmemenge	72.000 kWh	56.000 kWh	78.000 kWh	
Geschätzte Abwärmemenge	= MITTELWERT = 68.700 kWh			

Abbildung 10: beispielhafte Berechnungsmethode des Abwärmepotenzials eines Unternehmens

C. Validierung der Methodik

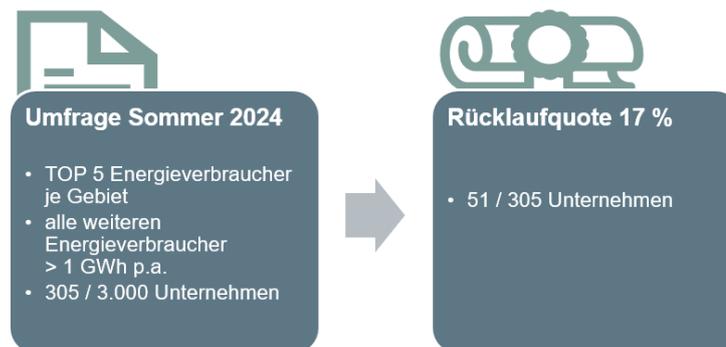


Abbildung 11: Struktur der Umfrage zur Validierung der Schätzungsmethodik

Zur Validierung der Methodik der Energieverbrauchsschätzung wurde im Sommer 2024 in den Gewerbegebieten der Stichprobe eine Umfrage bei 305 der 3.000 Unternehmen durchgeführt. Es wurden die gemäß der Schätzung fünf größten Energieverbraucher je Gebiet sowie alle Unternehmen mit einem geschätzten Energiebedarf > 1 GWh angeschrieben. Von den 305 kontaktierten Unternehmen haben 51 Unternehmen teilgenommen, sodass sich eine Rücklaufquote von 17 % ergibt. Die Unternehmen haben u.a. ihren jährlichen Strom- und Wärmeverbrauch, den Strombezug aus dem öffentlichen Stromnetz sowie die lokale Stromerzeugung aus eigenen EE auf ihren Grundstücken angegeben. Die Auswertung der Umfrageergebnisse anhand statistischer Kennzahlen ist in Tabelle 3 aufgeführt. Alle Kennzahlen können zur Bewertung der Genauigkeit der Schätzungen herangezogen werden.

Tabelle 3: Umfrageergebnisse in statistischen Kennzahlen

Kennzahl	Zeichen	Strom	Brennstoff
Mean Absolute Percentage Error	MAPE	55 %	67 %
Mittelwert der prozentualen Abweichungen vom Schätzwert	\bar{x}	- 9 %	- 39 %
Standardabweichung von diesem Mittelwert	s	68 %	68 %
Prozentuale Abweichung des realen Gesamtverbrauchs aller Befragten vom geschätzten Gesamtverbrauch		- 3 %	- 41 %

Ein Mean Absolute Percentage Error (MAPE) von 55 % bzw. 67 % bedeutet, dass die durchschnittliche prozentuale Abweichung der prognostizierten Werte von den tatsächlichen Werten 55 % bzw. 67 % beträgt. Das heißt, im Durchschnitt liegen die Schätzungen des Strom- oder Wärmebedarfs eines Unternehmens um 55 % bzw. 67 % über oder unter den tatsächlichen Werten. Es spielt keine Rolle, ob die prozentualen Abweichungen positiv oder negativ sind, da MAPE nur die Größe der Abweichung betrachtet, nicht die Richtung. Die Berechnung erfolgt also ohne Berücksichtigung der Vorzeichen der Fehler. Finden die Vorzeichen der Fehler Berücksichtigung, so ergibt sich der Mittelwert der prozentualen Abweichungen. Es fällt auf, dass dieser mit – 9 % bzw. – 39 % deutlich geringer ausfällt als der MAPE. Dies deutet darauf hin, dass sich Abweichungen einzelner Unternehmen innerhalb eines Gewerbegebietes ausgleichen können. Dennoch weisen die Abweichungen der Umfragerückläufer von den Schätzungen nach der vorgestellten Methodik eine erhebliche Streuung auf, wie auch die Standardabweichung von 68 % vom Mittelwert der prozentualen Abweichungen verdeutlicht.

Trotz der identifizierten Unsicherheiten der Schätzungsmethodik lassen sich aus der Umfrageauswertung wertvolle Schlüsse ziehen. Es ist festzustellen, dass die Schätzungen auf Gewerbegebietsebene verlässlicher sind als auf Unternehmensebene. Der reale Gesamtstromverbrauch anhand der Umfragewerte ist lediglich 3 % geringer als der geschätzte Strombedarf aller befragten Unternehmen. Es gilt hier allerdings zu bedenken, dass die Lastprofile von Unternehmen, deren prozentuale Abweichungen sich im Mittelwert ausgleichen nicht zwingend übereinstimmen und sich somit dennoch Abweichungen aufgrund der stündlichen Auflösung des Modells ergeben können. Darüber hinaus sind die Schätzungen des Strombedarfs deutlich genauer als jene des Brennstoffbedarfs. Außerdem ist der reale Verbrauch geringer als der geschätzte Bedarf, insbesondere bei Brennstoffen. Der reale Gesamtbrennstoffverbrauch anhand der Umfragewerte ist 40 % geringer als der geschätzte Brennstoffbedarf aller befragten Unternehmen.

Nichtsdestotrotz zeigen die Unsicherheiten der Schätzungsmethodik die Notwendigkeit auf, mögliche Fehlerquellen und Ursachen für die Abweichungen zu untersuchen. Die Fehlerquellen ergeben sich aus den Komponenten der Berechnungsmethodik und sind in Abbildung 12 aufgeführt. Es kann sich folglich um einen fehlerhaften Wirtschaftszweig,

unzutreffende oder veraltete Angaben zu Flächen, Umsatz- oder Beschäftigtenzahlen oder um ungenaue spezifische Kennzahlen handeln.

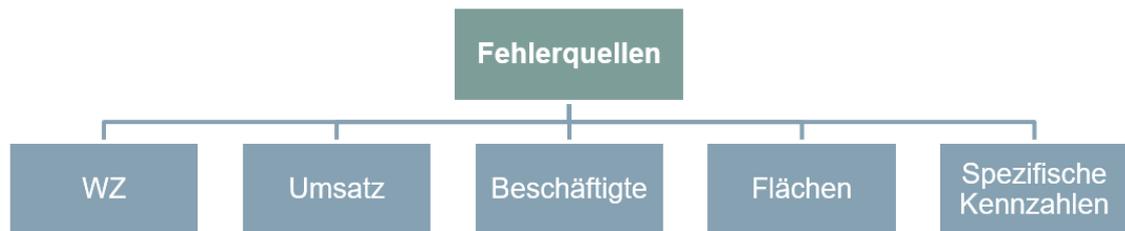


Abbildung 12: Mögliche Fehlerquellen der Schätzungsmethodik

Die Flächenangaben zu Gebäude- und Dachflächen sind als zuverlässig einzustufen, da es sich bei den Geodaten aus OpenGeoData.NI des LGLN um amtliche Daten handelt und sowohl die aus OpenStreetMap sowie OpenGeoData.NI stammenden Daten durch Google Maps validiert werden können. Zudem stellt die MARKUS-Datenbank eine verlässliche Quelle für den WZ-Code der Unternehmen dar, sodass es sich hier mit hoher Wahrscheinlichkeit um valide Daten handelt. Vereinzelt können dennoch Fehler auftreten, z.B. wenn ein Unternehmen in etwa gleichem Umfang zwei sehr unterschiedliche Geschäftsbereiche aufweist, jedoch nur ein WZ-Code existieren kann. Da sich der Wirtschaftszweig eines Unternehmens selten ändert, sind veraltete Daten selten zu erwarten. Anders gestaltet sich dies bei Umsatz- und Beschäftigtenzahlen, die ebenfalls aus der Datenbank stammen. Hier können erhebliche Abweichungen auftreten, sofern Umsätze oder Beschäftigtenzahlen veraltet sind. Daher wurden im Zuge der durchgeführten Umfrage ebenfalls Umsatz- und Beschäftigtenzahlen der Unternehmen abgefragt. Obwohl diese gelegentlich von den Schätzwerten abweichen, konnten für die Verwendung der realen Werte im Vergleich zur Verwendung der Daten aus der MARKUS-Datenbank jedoch keine signifikanten Unterschiede der Ergebnisse beobachtet werden. Folglich liegt die Fehlerquelle mit dem größten Einfluss auf die Energiebedarfsschätzung in den spezifischen Kennzahlen. Die Unternehmen und deren Prozesse sind zu individuell, als dass sich deren Energiebedarf mit hoher Genauigkeit anhand spezifischer Kennzahlen je WZ-Code vorhersagen ließe. Selbst innerhalb desselben Wirtschaftszweiges können unterschiedlich gestaltete Prozesse und der Einsatz verschiedener lokaler Erzeugungsanlagen wie PV, Solarthermie, Wärmepumpen oder BHKW zu stark abweichenden Energiebedarfsstrukturen führen. Weiterhin gilt es zu prüfen, ob möglicherweise eine Berechnungsvariante, z.B. anhand der Fläche, für bestimmte Wirtschaftszweige genauer ist als eine andere, z.B. anhand des Umsatzes, und daher auf eine Mittelwertbildung aus drei Berechnungsvarianten verzichtet werden könnte. In diesem Kontext ist anzumerken, dass für manche Wirtschaftszweige ohnehin nur bestimmte spezifische Kennzahlen vorliegen, sodass häufig allein aufgrund der Datenverfügbarkeit bereits die

Verwendung der geeigneten Berechnungsvariante eintritt. So werden Energieverbräuche für die Wirtschaftszweige G und H, d.h. Groß und Einzelhandels- sowie Lager- und Transportunternehmen zumeist pro Fläche ausgewiesen. Für die Wirtschaftszweige, bei denen zwei oder alle drei spezifischen Kennzahlen vorliegen und somit alle Berechnungsvarianten möglich sind, konnte nicht nachgewiesen werden, dass eine Berechnungsvariante genauer ist als die andere.

2.1.3 Modellierungsszenarien

Um die Ergebnisse in Abhängigkeit unterschiedlicher Modellannahmen bewerten zu können, werden verschiedene Szenarien untersucht. Zentrale Einflussfaktoren sind die zeitliche Perspektive sowie die Möglichkeiten für den Ausbau erneuerbarer Energien in dem Gewerbegebiet. Auf der zeitlichen Perspektive werden die mittlere Frist bis 2030 und die lange Frist bis 2045 betrachtet. Als zweiter Haupteinflussfaktor die lokale Situation im MIP berücksichtigt. Hier wird zwischen günstigen Bedingungen und begrenztem Potenzial für erneuerbare Energien unterschieden. Die vier resultierenden Szenarien sind in der Matrix in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Modellierungsszenarien

		Lokale EE-Situation	
		Begrenztes Potenzial	Günstige Bedingungen
Zeitliche Perspektive	2030	Ready-for-30 Szenario 1	Ready-for-30 Szenario 2
	2045	Fit-for-45 Szenario 3	Fit-for-45 Szenario 4

Für jedes der vier Szenarien stehen unterschiedliche Technologien und Energieträger zur Verfügung, welche in Tabelle 5 dargestellt sind. Weiterhin wird ein Szenario „Status-quo“ zu Vergleichszwecken eingesetzt, beispielsweise in Bezug auf die jährlichen Energiekosten. Im „Status-quo“ wird angenommen, dass der gesamte Energiebedarf durch Stromversorgung aus dem öffentlichen Netz und Erdgaslieferung über Pipelines für Gaskessel gedeckt wird.

Tabelle 5: EE-Potenzial und verfügbare Energieträger je Szenario

	<i>Ready-for-30 begrenzt Potential</i>	<i>Ready-for-30 günstige Bedingungen</i>	<i>Fit-for-45 begrenzt Potential</i>	<i>Fit-for-45 günstige Bedingungen</i>
Lokales EE-Potenzial				
<i>Dachflächen-PV</i>	X	X	X	X
<i>Solarthermie</i>	X	X	X	X
<i>Freiflächen-PV</i>		X		X
<i>Windenergieanlagen</i>		X		X
Energieträger				
<i>Strom aus öffentl. Netz</i>	X	X	X	X
<i>Wasserstoff</i>	X	X	X	X
<i>Erdgas</i>	X	X		
<i>Biogas</i>		X		X

In den „Ready-for-30“ Szenarien besteht das Ziel darin, die kostengünstigste Energieversorgung unter den aktuellen Bedingungen zu ermitteln. Daher wird die Nutzung von Erdgas in dieser Strategie weiterhin in Betracht gezogen.

In den „Fit-for-45“ Szenarien wird die kostengünstigste Energieversorgung, die bereits heute den zukünftigen Anforderungen entspricht, untersucht. Der Schwerpunkt liegt auf der Erreichung des Ziels der Klimaneutralität für das Jahr 2045 durch gegenwärtige Investitionen, was einen Verzicht auf Erdgas beinhaltet.

In jedem Zukunftsszenario bleibt Strom aus dem Netz nutzbar, wobei angenommen wird, dass dieser im 2045-Szenario nur aus erneuerbaren Quellen stammt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, grünen Wasserstoff zu importieren und Abwärme für Nahwärmenetze zu nutzen, entweder direkt oder indirekt als Input für Wärmepumpen.

In den Szenarien mit begrenztem lokalem Potenzial ist das Potenzial für die lokale Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien am Standort auf Dachflächen-PV und Solarthermie im Rahmen der lokal vorhandenen Dachflächen beschränkt und es ist kein Biogas verfügbar.

Szenarien mit günstigen Bedingungen umfassen Standorte, die das gleiche Potenzial für Dachflächen-PV und Solarthermie haben sowie zusätzliches Potenzial für lokale Windturbinen, lokale Freiflächen-PV und die lokale Verfügbarkeit von Biogas aufweisen. Das Windenergie-Potenzial sowie das Freiflächen-PV-Potenzial ist für jedes Gebiet auf ein Maximum begrenzt, welches in Relation zum Strombedarf des Gebietes auf 80 % bzw. 10 % festgelegt wird. Durch diese Limitation sowie durch die Ansetzung der Exporterlöse in Höhe der LCOE statt der deutlich höheren erzielbaren Einspeisevergütung oder Marktprämie wird verhindert, dass das Optimierungsmodell diese Anlagen überdimensioniert und der Export von Energieüberschüssen zu einem Geschäftsmodell wird. Der Fokus des Projektes verbleibt auf Lösungen, die einen möglichst hohen Autarkiegrad und Eigenverbrauchsanteil zum Ziel haben.

2.1.4 Unsicherheiten des Modells

Obwohl das entwickelte Energiemodell durch die breite Datenbasis, mehrere Temperaturniveaus des Wärmebedarfs sowie die verschiedenen einsetzbaren Technologien und Energieträger zur Strom- und Wärmeversorgung bereits sehr umfangreich ist, stellt es dennoch eine Vereinfachung der Realität dar. Die Ergebnisse dieser Studie sind daher stets im Kontext der Grenzen des Modells zu betrachten und zu interpretieren.

Zuerst gilt es zu berücksichtigen, dass das Energiemodell vollständige und sichere Informationen in der Zukunft annimmt, welche in der Realität jedoch abweichen können. Im Voraus ist dem Modell für jede Stunde des Jahres bekannt, welche Energiemengen durch erneuerbare Energien und konventionelle Energieerzeuger produziert werden können und wieviel Energie von den hinzugefügten Verbrauchern nachgefragt wird. In der Realität kann die Energieerzeugung aus erneuerbaren Quellen, die technische Verfügbarkeit konventioneller Erzeuger und die voraussichtliche Energienachfrage zwar weitestgehend prognostiziert werden, jedoch nicht mit der Präzision des Modells. In der Praxis sind unvorhersehbare Abweichungen möglich, die eine flexible Reaktion des Energiesystems erfordern. Um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten, können die durch die Modellierung vorgesehenen Dimensionen der Anlagen künftig mit einem Sicherheitsfaktor im Sinne einer Reserve versehen werden.

Eine weitere Grenze des Modells liegt in der Annahme einer beliebig flexiblen Betriebsweise. Während im Modell technische Anlagen beliebig ein- und ausgeschaltet werden können, weisen viele Anlagen in der Realität jedoch gewisse Vorlauf- und Anfahrzeiten auf und fahren einen schonenden Betrieb, der häufige Schaltvorgänge zu vermeiden versucht. Außerdem werden im Modell keine Übertragungsverluste im lokalen Wärme- und Stromnetz berücksichtigt.

In dieser Studie werden wissenschaftlich anerkannte spezifische Kosten für Technologien verwendet, die sich in der Praxis je nach lokalen Standortgegebenheiten allerdings noch verändern können. Für technische sowie insbesondere wirtschaftliche Parameter ist zudem zu beachten, dass diese in der Zukunft variieren können und somit lediglich eine Momentaufnahme darstellen. Das Modell ist daher flexibel gestaltet, sodass die Input-Parameter über eine Excel-Inputdatei beliebig angepasst werden können, um zukünftige Analysen mit veränderten Werten zu ermöglichen.

Skaleneffekte und Kosten für Netzinfrastruktur werden aktuell nicht berücksichtigt.

Insgesamt liefern die Modellierungsergebnisse eine verlässliche Größenordnung sowohl zu den jährlichen Kosten der Lastdeckung, als auch zur Dimensionierung von technischen Anlagen. Für die spezifischen Gebiete sind in der Praxis jedoch immer Abweichungen von der optimalen Lösung, aufgrund des höheren Detailgrades zu erwarten.

2.2 Methode II: Typisierung der Gewerbegebiete

Die Typisierung von Gewerbegebieten ist notwendig, um spezifische Handlungsempfehlungen für unterschiedliche Anwendungsfälle formulieren zu können. Aus der technoökonomischen Perspektive werden die Gewerbegebiete anhand ihrer Energiebedarfsstruktur typisiert, sodass je Gewerbegebietstyp technoökonomische Analysen durchgeführt und technoökonomische Handlungsempfehlungen abgeleitet werden können. Analog zu dieser Vorgehensweise werden aus der Governance-Perspektive Gewerbegebiete anhand der Ausprägung ihrer Kulturdimensionen bzw. ihrer Wertelogiken typisiert, sodass je Typ Governance-Konzepte und energetische Kooperationsmodelle vorgeschlagen werden können.

2.2.1 Energetische Typisierung

Die energetische Typisierung dient der Ableitung von Handlungsempfehlungen aus der technoökonomischen Perspektive. Sie basiert einerseits auf der Kennzahl "Wärme-Strom-Verhältnis" und andererseits auf dem Temperaturniveau des Wärmebedarfes eines Gebiets.

A. Typisierung nach dem Wärme-Strom-Verhältnis

Im ersten Schritt werden die 44 Gebiete der Stichprobe anhand ihres Verhältnisses zwischen Wärme- und Strombedarf (Wärme-Strom-Verhältnis) in 3 Typen eingeteilt. Dafür ist die Kenntnis des jährlichen Wärme- und Strombedarfs aller Unternehmen eines betrachteten Gewerbegebiets erforderlich. Wie bereits in Kapitel 2.1.2 erläutert, können diese Werte aus Sekundärdaten errechnet oder geschätzt werden, bzw. durch eigenständig erhobene Primärdaten in Form von Energieverbräuchen vorliegen. Das durchschnittliche Wärme-Strom-Verhältnis liegt etwa im Intervall von 1,5:1 bis 3:1. Gebiete, in denen der Strombedarf höher ausfällt als der Wärmebedarf, sind hingegen als stromintensiv zu bezeichnen, wohingegen Gebiete mit einem Wärme-Strom-Verhältnis ab 4:1 als wärmeintensive Gebiete gelten. Abbildung 13 verdeutlicht die identifizierten drei Typen. Auf der Ordinate des Koordinatensystems ist der relative spezifische Strombedarf in Prozent dargestellt. Dieser Wert gibt an, inwiefern der Strombedarf eines Gebiets vom durchschnittlichen spezifischen Strombedarf abweicht, gemessen in Kilowattstunden je Quadratmeter Gebietsfläche [kWh/m^2]. Eine Bewegung auf der y-Achse vom Koordinatenursprung nach oben bedeutet dementsprechend, dass der spezifische Strombedarf um den jeweiligen Prozentsatz höher ausfällt als in einem durchschnittlichen Gebiet. Die Abszisse folgt derselben Logik für den Wärmebedarf. Dort ist der relative spezifische Wärmebedarf in Prozent aufgetragen. Dieser Wert gibt an, inwiefern der Wärmebedarf eines Gebiets vom durchschnittlichen spezifischen Wärmebedarf, gemessen in Kilowattstunden je Quadratmeter Gebietsfläche [kWh/m^2], abweicht. Eine Bewegung auf der x-

Achse vom Koordinatenursprung nach rechts bedeutet dementsprechend, dass der spezifische Wärmebedarf um den jeweiligen Prozentsatz höher ausfällt als in einem durchschnittlichen Gebiet. Für beide Achsen ist ein Toleranzbereich von +/- 25 % dargestellt, innerhalb dessen der spezifische Energiebedarf noch als durchschnittlich zu bewerten ist. Die blauen Kreise stellen die Gewerbegebiete der Stichprobe dar. Der spezifische Energiebedarf eines Gebietes wird durch die Größe des jeweiligen blauen Kreises illustriert.

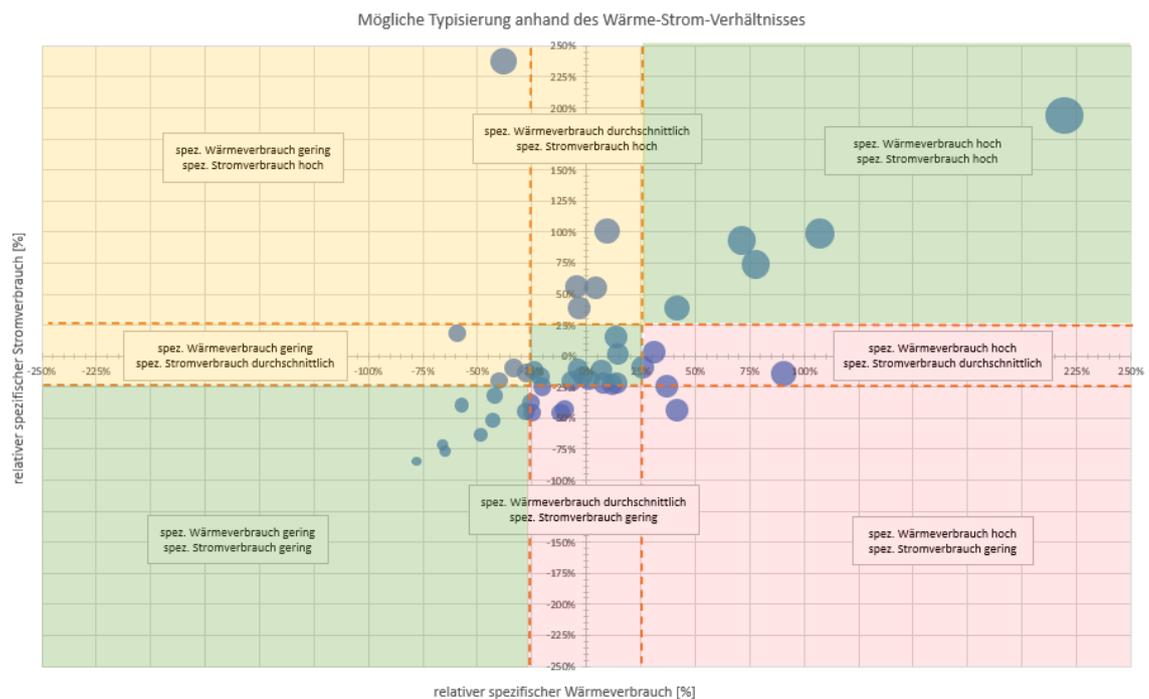


Abbildung 13: Koordinatensystem zur Typisierung anhand des Wärme-Strom-Verhältnis

Innerhalb der grünen Flächen liegen Gebiete mit einem Wärme-Strom-Verhältnis, welches dem Durchschnitt von etwa 1,5:1 bis 3:1 entspricht. Von unten links nach oben rechts steigt lediglich der spezifische Energiebedarf der Gebiete an, sodass die Gebiete im ersten Quadranten als energieintensiv einzustufen sind, sich jedoch hinsichtlich des Wärme-Strom-Verhältnisses nicht signifikant von jenen im dritten Quadranten unterscheiden. Liegt nur eine der beiden Größen relativer spezifischer Wärme- und Strombedarf außerhalb des Toleranzbereiches oder die beiden Größen liegen gar in entgegengesetzter Richtung ausgehend vom Durchschnitt, so handelt es sich um strom- oder wärmeintensive Gebiete. Diese sind durch die gelbe (stromintensiv) und rote Fläche (wärmeintensiv) im zweiten und vierten Quadranten dargestellt. Es bleibt festzuhalten, dass sich durch die erläuterte Typisierungsmethodik die 3 Typen stromintensive, wärmeintensive und durchschnittliche Gebiete ergeben. Weiterhin fällt auf, dass die Methodik für eine fundierte Differenzierung noch nicht hinreichend ist, da der Großteil der Gebiete bis auf wenige Ausreißer dem durchschnittlichen Gebietstyp entspricht.

B. Zusätzliche Typisierung nach Temperaturniveaus des Wärmebedarfs

Neben dem wichtigen Faktor des Wärme-Strom-Verhältnisses ist für eine Typisierung auch die Einteilung der Temperaturniveaus des Wärmebedarfs relevant. Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erläutert, wird eine Unterscheidung zwischen Raumheizung und Brauchwassererwärmung und verschiedenen Prozesswärmeniveaus eingeführt. Nach Anwendung der in Kapitel 2.1.2 genannten Methoden zur Wärmebedarfsermittlung anhand von Sekundär- oder Primärdaten liegt darüber hinaus Kenntnis der Aufteilung des Wärmebedarfs auf die eingeführten Temperaturniveaus vor. Abbildung 14 gibt einen Überblick über die resultierenden 5 Typen.

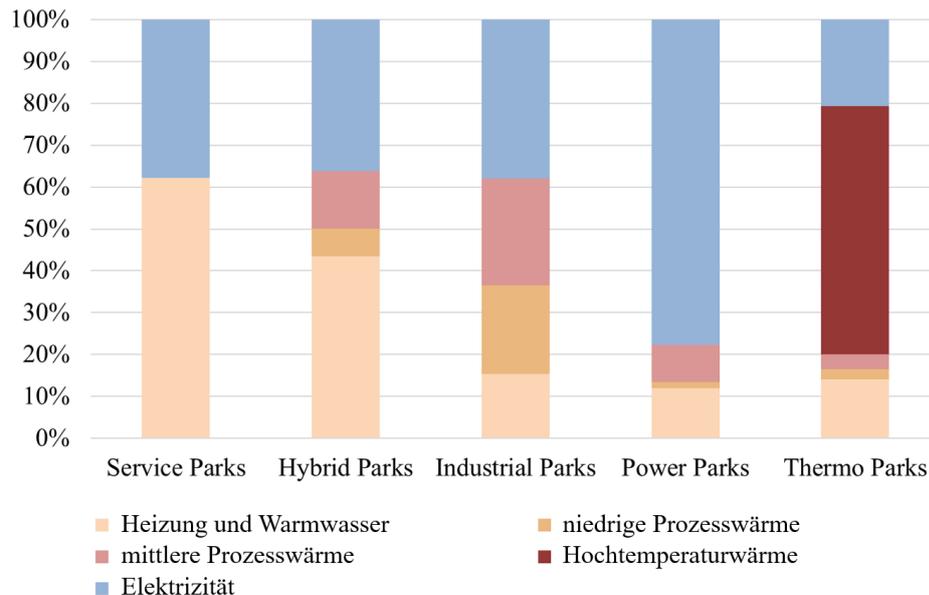


Abbildung 14: Typisierung anhand des prozentualen Anteils der Energiearten am Gesamtenergiebedarf

- **Service Parks:** Zu den vorherrschenden Sektoren gehören Logistik, Handel und bürobezogene Aktivitäten. Der Energiebedarf umfasst Strom, Raumheizung und Warmwasserbereitung. Diese Parks zeichnen sich dadurch aus, dass es keine Industrieunternehmen gibt und daher kein Bedarf an Prozesswärme besteht.
- **Hybridparks:** Sie stellen eine Mischung aus Service Parks und Industrial Parks dar. Die typische Zusammensetzung umfasst dienstleistungsorientierte und einige wenige produzierende Unternehmen. Folglich ist der Wärmebedarf durch einen großen Anteil für Raumheizung und Warmwasserbereitung gekennzeichnet, ergänzt durch einen vergleichsweise geringen Anteil für Prozesswärme.
- **Industrial Parks:** Diese Gebiete sind durch eine hohe Konzentration von Industrieunternehmen gekennzeichnet, was zu einem erheblichen Bedarf an Prozesswärme auf niedrigem und mittlerem Temperaturniveau führt. Es ist bemerkenswert, dass der Bedarf an Heizung und Warmwasser nur 10 % des gesamten Energiebedarfs in diesen Parks ausmacht.

- **Power Parks:** Dieser Typ weicht erheblich von dem üblichen Strom-Wärme-Verhältnis ab. In „Power Parks“ ist der Strombedarf deutlich höher als der Wärmebedarf. Die beobachtete Diskrepanz lässt sich vor allem auf das Vorhandensein von Industrien zurückführen, die durch stromintensive Produktionsprozesse gekennzeichnet sind. Dazu gehören zum Beispiel die Herstellung von Kunststoffen, elektronischen Produkten und Elektrogeräten oder der Betrieb von Kühlhäusern mit hohem Kühlbedarf.
- **Thermo Parks:** Dieser Typ weicht ebenfalls erheblich von dem üblichen Strom-Wärme-Verhältnis ab. „Thermo-Parks“ sind Parks mit einem Wärme-Strom-Verhältnis ab ca. 4:1 und weisen einen erheblichen Anteil von Hochtemperatur-Prozesswärme (>500 °C) am Gesamtenergiebedarf auf. Zu den Unternehmen, die zu dieser Energiestruktur führen, gehören die Glasproduktion, die Herstellung von Grundmetallen und die Fertigung von Metallerzeugnissen.

2.2.2 Kulturelle Typisierung

Die kulturelle Typisierung dient der Ableitung von Handlungsempfehlungen aus der Governance-Perspektive. In dieser Studie werden zur Bildung archetypischer Gewerbegebiete die Ausprägungen von Kulturdimensionen und Wertelogiken von Gewerbegebieten verwendet. Wie sich noch zeigen wird, fließen in diese Kriterien auch die finanzielle Lage sowie die Offenheit gegenüber neuen Technologien ein. Der Ansatz bedient sich unter anderem der sozialwissenschaftlichen Forschung zu Kulturdimensionen sowie weiterer theoretischer Modelle, die im Folgenden erläutert werden. Die Abbildung 15 stellt die theoretische Herleitung der verwendeten Unterscheidungskriterien grafisch dar.

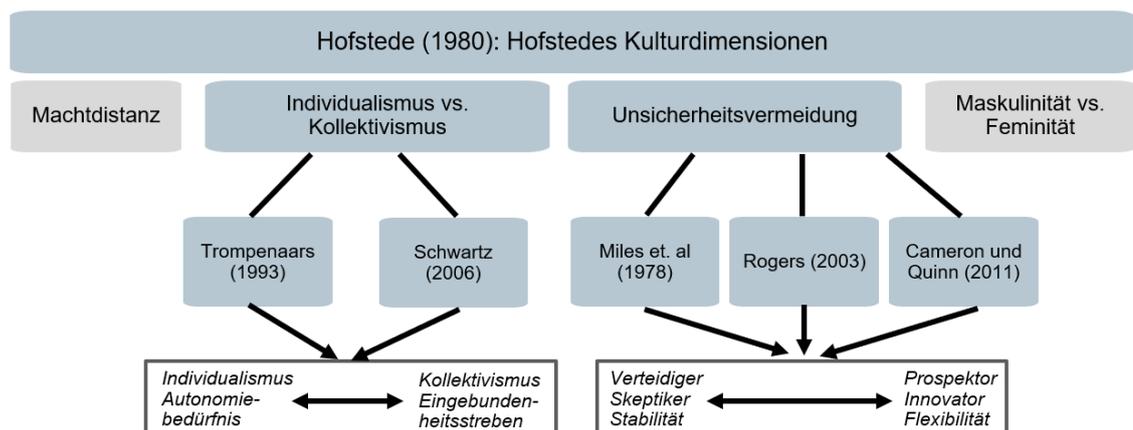


Abbildung 15: Herleitung von Unterscheidungskriterien der archetypischen Gewerbegebiete anhand von Kulturdimensionen und Wertelogiken

Im Forschungsbereich der Kulturdimensionen wird erforscht, anhand welcher Dimensionen sich Kulturen beschreiben und unterscheiden lassen. Zudem verfolgen manche Strömungen die Frage, welche Zusammenhänge zwischen nationaler oder regionaler

Kultur und Verhaltensweisen von Unternehmen bestehen. So versucht Hofstede mit Hilfe von ursprünglich vier entwickelten Kulturdimensionen zu demonstrieren, dass nationale Kulturgruppen einen wesentlichen Einfluss auf die Führung und Organisation von Unternehmen und somit auch auf deren Entscheidungen in den jeweiligen Ländern haben [34]. Obwohl manche Studienergebnisse unterstützen, dass einer Nation anhand der Kulturdimensionen Hofstedes kulturelle Werte zugeschrieben werden können [35], gibt es andererseits auch erhebliche Kritik an Hofstedes Arbeiten [36]. Unter anderem wird kritisiert, dass Nationen nicht homogen sind und daher auch keine einheitliche Kulturgruppe bilden können. Unabhängig davon, ob Nationen oder Regionen einheitliche Kulturgruppen bilden können, können die Kulturdimensionen dennoch dazu verwendet werden, archetypische Gewerbegebiete zu entwickeln. Es bleibt kritisch anzumerken, dass auch ein Gewerbegebiet keine zwingend einheitliche Kulturgruppe sein muss, sondern die dort ansässigen Unternehmen ganz unterschiedliche Kulturen vertreten können. Demnach ist die Bildung der Archetypen eine vereinfachte Sicht der Realität, um Komplexität zu reduzieren. Die Kulturdimensionen werden auf die lokale Ebene in fiktive Gewerbegebiete übertragen. Die vier Dimensionen nach Hofstede sind Machtdistanz, Maskulinität versus Feminität, Unsicherheitsvermeidung und Individualismus versus Kollektivismus [34]. Die beiden erstgenannten Dimensionen werden für die Einteilung von Gewerbegebieten als weniger relevant angesehen als die letztgenannten. Hofstedes Kulturdimensionen weisen laut [37] enge Zusammenhänge zu den später erschienenen Arbeiten von Trompenaars [38] sowie Schwartz [39] auf. In allen drei Publikationen spielt neben weiteren Kulturdimensionen die Unterscheidung zwischen Individualismus und Kollektivismus eine bedeutende Rolle. Damit wird beschrieben, inwiefern das individuelle Autonomiebedürfnis von Gruppeninteressen beschnitten wird. Es beschreibt die Unterscheidung, ob wir eher in einer Gruppe mit starkem „Wir-Gefühl“ oder als Individuum funktionieren und ob individuelle Freiheit Vorrang vor Kollektivinteressen hat. Das erste Unterscheidungskriterium für archetypische Gewerbegebiete liegt daher zwischen den Polen Individualismus bzw. einer egoistischeren Ausrichtung der Akteure des Gewerbegebietes oder einer sozialen Ausrichtung und Kollektivismus. Die zweite Dimension der Unsicherheitsvermeidung beschreibt, inwiefern Risiken toleriert werden. Daraus lässt sich ableiten, dass Gewerbegebiete nach dem Kriterium der Risikoaffinität zwischen den Polen risikofreudig und risikoscheu eingeteilt werden können. Dieses zweite Unterscheidungskriterium weist Anschlussfähigkeit zur Diffusionstheorie von Innovationen nach Rogers [40] und zur Typisierung von Unternehmensstrategien nach Miles und Snow [41] auf. Sie identifizieren als gegensätzliche Wettbewerbsstrategien die Prospektor Strategie und die Verteidiger Strategie. Während Prospektoren nach neuen Chancen und Innovationen suchen und hohe Risiken eingehen, sind Verteidiger darauf bedacht, sich

vor Änderungen zu schützen und Stabilität zu bewahren. Eine ähnliche Dimension weist auch das Competing Values Framework zur Kategorisierung von Organisationskulturen auf, welches die gegensätzlichen Ausprägungen Flexibilität und Stabilität enthält [42]. Zudem unterscheidet Rogers fünf verschiedene Typen, die sich durch ihr Adoptionsverhalten bei Innovationen unterscheiden. Während Innovatoren Risikofreude und hohe Liquidität aufweisen, charakterisiert die späte Mehrheit und die Nachzügler Skepsis gegenüber Innovationen und eine geringere Liquidität [40]. Aus den beiden eingeführten Kulturdimensionen lässt sich eine Matrix mit den Achsen der Risikobereitschaft sowie des Gemeinschaftssinnes bilden, wie in Abbildung 16 dargestellt. Es ergeben sich vier Quadranten, in die ein Gewerbegebiet je nach Ausprägung der beiden Unterscheidungskriterien eingeordnet werden kann. In Gewerbegebieten innerhalb der ersten drei Quadranten sind Energie-Kooperationen möglich, jedoch unterscheiden sich die denkbaren Governance-Konzepte. Es wird daher ein archetypisches Gewerbegebiet je Quadranten hergeleitet. Die drei entwickelten Archetypen sind ebenfalls der Matrix zu entnehmen.

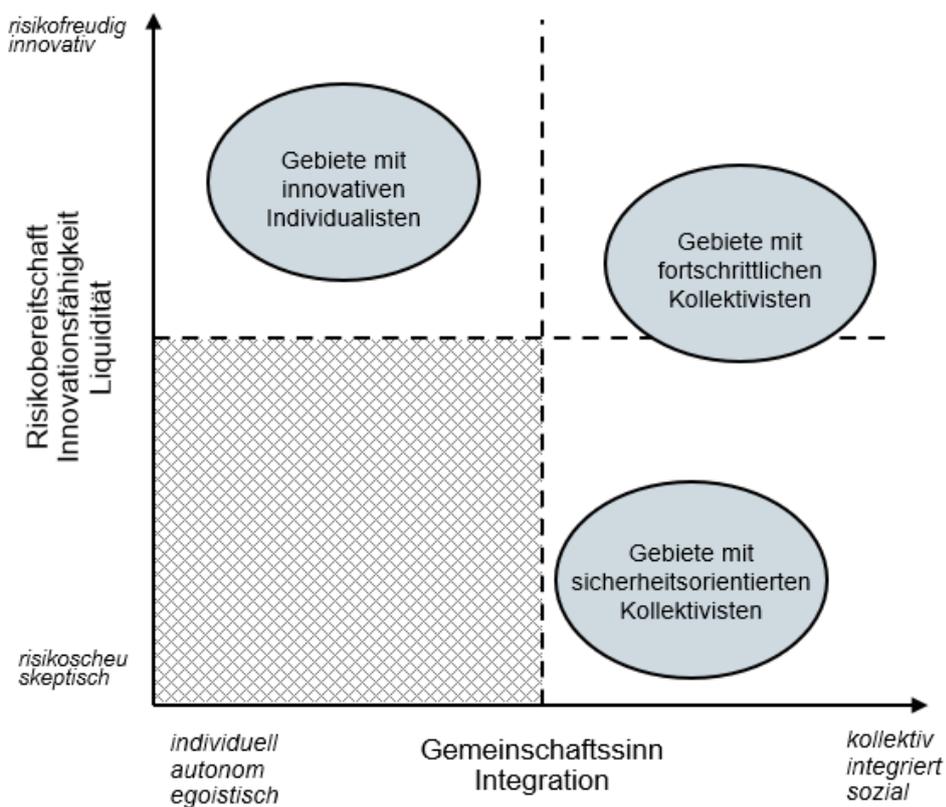


Abbildung 16: Matrix mit drei archetypischen Gewerbegebieten

- **Innovative Individualisten:** Gebiete, in denen die Unternehmerschaft mehrheitlich aus innovativen Individualisten besteht, zeichnen sich durch eine hohe Risikobereitschaft und Innovationsfähigkeit aus. Gleichzeitig haben die ansässigen

Akteure den Anspruch, möglichst autonom handeln zu können. Sie sind eher individualistisch und egoistisch veranlagt und verfolgen somit vornehmlich das Ziel, den eigenen ökonomischen Nutzen zu vergrößern.

- **Fortschrittliche Kollektivisten:** In einem Gebiet mit fortschrittlichen Kollektivisten hingegen überwiegt eindeutig die soziale gegenüber der ökonomischen Wertelogik. Ein solches Gebiet zeichnet sich durch einen ausgeprägten Gemeinschaftssinn aus, ist jedoch gleichzeitig durchaus innovationsfähig und eher risikofreudig.
- **Sicherheitsorientierte Kollektivisten:** Gebiete, in denen sicherheitsorientierte Kollektivisten dominieren sind skeptisch gegenüber neuen Technologien und scheuen Risiken. Dennoch weisen sie einen beachtlichen Gemeinschaftssinn und soziale Werte auf.

Gewerbegebiete, welche in den vierten Quadranten einzuordnen sind, weisen aufgrund ihrer hohen Risikoaversion und Skepsis gegenüber neuen Technologien sowie ihres gering ausgeprägten Gemeinschaftssinnes ungünstige Voraussetzungen für Energie-Kooperationen auf. Um die Erfolgsaussichten für die Etablierung von Energie-Kooperationen in solchen Gebieten zu steigern, ist eine Bewegung auf der Ordinate nach oben, auf der Abszisse nach rechts oder eine Kombination aus beidem erforderlich. Um es mit anderen Worten zu sagen, sind Maßnahmen zur Steigerung der Risikobereitschaft oder zur Stärkung des Gemeinschaftssinnes notwendig. Mögliche Maßnahmen zur Erreichung des ersten oder dritten Quadranten werden in den Handlungsempfehlungen in Kapitel 3 aufgegriffen.

2.3 Methodische Empfehlungen

Folgende methodische Empfehlungen ergeben sich aus den gesammelten Erfahrungen während der praktischen Anwendung des Methodensets im Projekt.

A. *Energiemodell*

Input-Daten für das Energiemodell, wie z.B. die Energiebedarfe der Unternehmen, sollten vorzugsweise als Primärdaten gewonnen werden. Die Validierung der Berechnungen, die auf Sekundärdaten beruhen, zeigt signifikante statistische Unsicherheiten hinsichtlich der bestimmten Energiebedarfe auf. Daher ist die Präferenz für Primärdaten bei der Erstellung von Energiemodellen nicht nur eine methodische Frage, sondern auch eine, die sich mitunter auf die Genauigkeit der Modellergebnisse auswirkt. Werden tat-

sächliche Energieverbräuche der Unternehmen durch Umfragen ermittelt und als Energiebedarfe zugrunde gelegt, liegen genauere Daten und folglich auch genauere Ergebnisse vor. Die Primärdatenerhebung ist der vorgestellten Methode der Berechnung aus Sekundärdaten daher vorzuziehen. Die angewandte Berechnungsmethode aus Sekundärdaten kann Primärdaten dennoch sinnvoll ergänzen, sofern manche Unternehmen nicht an einer Umfrage teilnehmen und ihre Energieverbräuche nicht mitteilen möchten. Obwohl die Markus-Datenbank sowie GIS wie OSM als verlässliche Quellen einzustufen sind, ist der Aufwand der Datenaufbereitung und -ergänzung nicht zu unterschätzen. In der Markus-Datenbank sind nicht alle Unternehmen eines Gewerbegebietes enthalten, da dort nur Gesellschaften geführt werden, welche mit diesem Ort im Handelsregister eingetragen sind. Daher sind einige Unternehmen und deren WZ, Mitarbeiter, Umsatz mittels Google Maps nachträglich zu ermitteln. Weiterhin fehlen gelegentlich die Flächen mancher Gebäude in den GIS-Daten, welche dann manuell zu ergänzen sind.

B. Typisierung

Um eine Typisierung zu erzielen, ist die Durchführung von Interviews zu den genannten Kulturdimensionen innerhalb der Gebiete ratsam. Die systematische Auswertung der Interviews kann die kulturelle Typisierung anhand von Kriterien erleichtern und ermöglicht zudem eine Vergleichbarkeit zwischen Gebieten, sofern Interviews in mehreren Gebieten durchgeführt werden. Im Projekt wurden keine Kennzahlen erarbeitet, anhand derer sich die Gewerbegebiete objektiv den Archetypen zuteilen lassen.

3 Handlungsset

Das Handlungsset umfasst Handlungsempfehlungen für die zuvor methodisch identifizierten Gewerbegebietstypen sowohl aus der technoökonomischen als auch aus der Governance-Perspektive. Es präsentiert Stakeholdern wichtige Lösungsansätze für die Energieversorgung verschiedener Gewerbegebietstypen, welche in realen Projekten als strategische Grundlage dienen und weiter konkretisiert werden können.

3.1 Perspektive I: Technoökonomische Perspektive

Die technoökonomische Perspektive des Handlungssets liefert Antworten auf die Frage, welche Technologien in welchem Umfang eingesetzt werden sollten, um eine möglichst kostengünstige Energieversorgung in der Zukunft zu erzielen. Dazu werden zunächst die Modellierungsergebnisse der Energiemodellierung, aufgegliedert nach den energetischen Gewerbegebietstypen, analysiert und anschließend Implikationen und Handlungsempfehlungen abgeleitet. Außerdem wird zwischen universellen, typenunabhängigen und typenspezifischen Empfehlungen unterschieden.

3.1.1 Darstellung der Modellierungsergebnisse

Die Modellierungsergebnisse werden für verschiedene Gewerbegebietstypen für alle Szenarien dargestellt. Die Tabelle 6 bis Tabelle 10 sind einerseits Steckbriefe, welche die Merkmale des exemplarisch dargestellten Gebietes wie die Gebietsfläche, Unternehmensanzahl sowie den Wärme- und Strombedarf aufführen. Weiterhin sind in den Tabellen die durch das Energiemodell ermittelten, kostenoptimalen Dimensionierungen der Technologien je Szenario angegeben. Außerdem sind dort die elektrischen Netzanschlussleistungen und resultierende Autarkiegrade aufgelistet. Wirtschaftliche Kennzahlen wie die Kosten der jährlichen Lastdeckung und Investitionskosten sind ebenfalls enthalten. Um einen grafischen Einblick in die Ergebnisse zu geben, stellen wir in Abbildung 17 bis Abbildung 21 die geordneten Jahresdauerlinien für Wärme und Strom dar. Die Last wird in absteigender Reihenfolge sortiert, und die Strom- bzw. Wärmeerzeugung für jede Stunde aufgezeichnet. Wenn die Erzeugung die Nachfrage in einer bestimmten Stunde übersteigt, wird die überschüssige Energie entweder gespeichert oder, im Falle von Strom, an das öffentliche Netz verkauft. Die weißen Flächen unterhalb der Lastkurve werden in den Berechnungen durch die Entladung von Speichern aufgefüllt, so dass die Last immer gedeckt ist. Die jeweils oben rechts dargestellten Tortendiagramme zeigen die Anteile der verschiedenen Technologien, die den jährlichen Strom- und Wärmebedarf decken. Bei der Interpretation der Kreisdiagramme zur Deckung des Strombedarfs ist zu beachten, dass der Gesamtstrombedarf in der Abfolge der Szenarien aufgrund der

zunehmenden Elektrifizierung der Wärme zunehmend steigt, während der Wärmebedarf in allen Szenarien konstant bleibt.

Für jeden Gewerbegebietstyp führen Windturbinen und Freiflächen-PV zu einem höheren Beitrag der lokalen Erzeugung zur optimalen Stromversorgung. Die lokale Windenergie deckt etwa 40-60 % des gesamten Strombedarfs. Die Freiflächen-Photovoltaik trägt etwa 5-7 % bei. Windenergie und Freiflächen-PV werden stets auf ihre maximale Kapazität hochskaliert. Dieses Ergebnis ist in beiden Szenarien Ready-for-30 und Fit-for-45 unter günstigen lokalen Bedingungen zu beobachten.

Weiterhin wird für alle Typen in allen Szenarien die gesamte nutzbare Dachfläche für die Installation von PV-Dachanlagen verwendet. Eine Ausnahme stellt das Ready-for-30-Szenario mit günstigen lokalen Bedingungen für die Typen der Service Parks, Hybrid Parks und Thermo Parks dar. Das Maximum der PV-Kapazität auf den Dächern wird nicht ausgeschöpft, da durch Windenergie, Freiflächen-PV und KWK bereits ausreichend Strom günstiger produziert werden kann. In den anderen Szenarien deckt die Maximierung der Dachflächen-PV bereits 40-60 % des gesamten Strombedarfs dieser Typen. In Industrial Parks und Power Parks mit entsprechend hohem Strombedarf ist die Strombedarfsdeckung durch Dachflächen-PV hingegen auf 10-15 % beschränkt, obwohl die maximale Kapazität ausgenutzt wird.

Im Ready-for-30-Szenario mit begrenztem lokalen EE-Potenzial werden in diesen Parks folglich 80 % des Stroms durch erdgasgefeuerte BHKW bereitgestellt, in den Service Parks, Hybrid Parks und Thermo Parks immerhin 35-55 %. Im Ready-for-30-Szenario unter günstigen lokalen Bedingungen nimmt die Bedeutung von BHKW zwar ab, da die Stromerzeugung aus lokalen EE zunimmt und die Wärme zunehmend mittels Wärmepumpen für Heizung, Warmwasser und niedrige Prozesswärme sowie Elektrodenkessel für Prozesswärme elektrifiziert wird. Dennoch decken BHKW weiterhin einen Anteil von 10-20 % des Strombedarfes für alle Gewerbegebietstypen. Entfällt die Erdgasnutzung im Fit-for-45-Szenario, so zeigt sich bei allen Typen eine hohe Abhängigkeit von Importen aus dem öffentlichen Stromnetz in Höhe von 50-85 % des gesamten Strombedarfs bei begrenztem lokalen EE-Potenzial. Liegen im Fit-for-45-Szenario günstige Bedingungen für erneuerbare Energien vor, so ersetzen Biogas-BHKW in Industrial Parks die Erdgas-BHKW vollständig. In Service und Hybrid Parks werden Biogas-BHKW ebenfalls eingesetzt, jedoch nimmt ihr Anteil an der Energieversorgung im Vergleich zu den erdgasgefeuerten BHKW ab.

Auf die eingehende Untersuchung der Stromversorgung folgt nun eine Untersuchung der Wärmeversorgung. Zunächst gilt es festzuhalten, dass für alle Gewerbegebietstypen die Elektrifizierung der Wärme von Szenario 1 bis Szenario 4 stetig zunimmt. Insbesondere in Service Parks werden Großwärmepumpen eingesetzt, die bereits 50-90 % des

Wärmebedarfs decken können und somit in allen Szenarien den hauptsächlichen Anteil der Wärmeversorgung übernehmen. Der Einsatz von Wärmepumpen dient in erster Linie der Deckung des Bedarfs an Raumwärme und Warmwasser sowie niedriger Prozesswärme. In Gebieten mit größerem Prozesswärmebedarf auf dem mittleren Temperaturniveau wie Hybrid Parks und vor allem Industrial Parks dominieren in den Ready-for-30-Szenarien hingegen noch erdgasbefeuerte Quellen wie Erdgaskessel und Erdgas-BHKW die Wärmebedarfsdeckung. Auf die KWK-Anlage entfallen 15-50 % des Bedarfs, während der Anteil der Gaskessel 20-40 % beträgt. Dies ist auch für Power Parks festzustellen. Hier ist die Dominanz der BHKW jedoch allein dadurch zu erklären, dass aufgrund des geringen Wärmebedarfs dieser Gebiete bereits 50-85 % des Wärmebedarfes aus der Abwärme der BHKW gedeckt werden können, die ohnehin zur Deckung des hohen Strombedarfes in Betrieb sind. Obwohl Erdgas in Industrial und Hybrid Parks in den Ready-for-30-Szenarien noch stark verbreitet ist, decken Wärmepumpen unter günstigen lokalen EE-Bedingungen ebenfalls bereits 30-50 % des Wärmebedarfs. In den Fit-for-45-Szenarien ist Erdgas nicht verfügbar. Folglich werden in diesen Szenarien in Industrial Parks, Hybrid Parks und Power Parks 35-70 % des Wärmebedarfs durch Wärmepumpen gedeckt. Der Einsatz von Wärmepumpen dient in erster Linie der Deckung des Bedarfs an Raumwärme und Warmwasser sowie geringer Prozesswärme, während Wasserstoffkessel und Elektrodenkessel als Ersatz für den Erdgaskessel für die Erzeugung mittlerer Prozesswärme eingesetzt werden. Wasserstoffkessel decken dabei in den genannten Gewerbegebietstypen 10-40 % und Elektrodenkessel 5-15 % des Gesamtwärmebedarfs.

Darüber hinaus sind für alle Typen in allen Szenarien Strom- und Wärmespeicher wichtig. Die Größe der Speicher nimmt einerseits unter günstigen Bedingungen mit zunehmender Verfügbarkeit von EE und andererseits mit steigender Elektrifizierung durch Erdgasausschluss in Fit-for-45-Szenarien zu. Da Wärme gespeichert werden kann, ist die elektrische Last der Gewerbegebiete in Stunden mit hoher Produktion von erneuerbaren Energien am höchsten. Wärmepumpen und Elektrokessel laufen auf Hochtouren, um die niedrigen Stromkosten zu nutzen. Die Jahresdauerlinien für Wärme demonstrieren, wie Elektrokessel und Wasserstoff- bzw. Gaskessel sich gegenseitig ersetzen.

Weiterhin ist zu beachten, dass die Abwärmenutzung in allen Szenarien sowohl für Service Parks, als auch Industrial und Hybrid Parks etwa 5 % des gesamten Wärmebedarfs ausmacht. Für Power Parks beträgt der Anteil sogar 10 %.

Abschließend gilt es festzuhalten, dass die Wärmeversorgung von Thermo Parks grundsätzlich anders realisiert wird als für die übrigen Typen. In allen Szenarien werden zwei Drittel des Wärmebedarfes solcher Gebiete durch vorhandene Abwärme der Hochtemperaturprozesse einzelner Industrieunternehmen abgedeckt. In Ready-for-30-Szenarien

besteht die restliche Wärmeversorgung größtenteils aus erdgasgefeuerten Kesseln und BHKW, während in Fit-for-45-Szenarien Wärmepumpen 20 % und Elektro- und Wasserstoffkessel zusammen ca. 15 % des Wärmebedarfes decken. Es gilt zu berücksichtigen, dass der Hochtemperaturbedarf der einzelnen wärmeintensiven Unternehmen nicht in der Jahresdauerlinie enthalten ist. Es wird die Annahme getroffen, dass Hochtemperatur individuell auf dem Betriebsgelände der entsprechenden Unternehmen z.B. durch spezielle Hochtemperaturöfen, bereitgestellt wird.

Tabelle 6: Steckbrief und Modellierungsergebnisse - Service Park

Steckbrief Service Park					
Gewerbefläche		[ha]		8	
Anzahl Unternehmen				18	
Strombedarf der Unternehmen		[MWh]		2.772	
Wärmebedarf der Unternehmen		[MWh]		3.474	
Abwärmepotential		[MWh]		-	
Technologie	Einheit	Szenario 1 Ready-for-30 begrenztes Potential	Szenario 2 Ready-for-30 günstige Bedingungen	Szenario 3 Fit-for-45 begrenztes Potential	Szenario 4 Fit-for-45 günstige Bedingungen
Dach-PV	[MWp]	1,86	1,18	1,86	1,86
Freiflächen PV	[MWp]	-	0,30	-	0,30
Windenergie	[MW]	-	1,14	-	1,14
BHKW Erdgas	[MWel]	0,47	0,35	-	-
BHKW Biogas	[MWel]	-	-	-	0,16
Wärmepumpe	[MW]	0,46	0,69	1,08	0,98
Gas-Kessel	[MW]	0,73	0,71	-	-
H2-Kessel	[MW]	-	-	0,34	0,33
Elektrodenkessel	[MW]	-	0,01	0,01	0,05
Stromspeicher	[MWh]	0,94	0,53	1,05	1,05
Wärmespeicher	[MWh]	4,64	8,46	11,54	10,36
Elektrolyseur	[MWel]	-	-	-	0,05
H2-Brennstoffzelle	[MWel]	-	-	-	-
Netzanschluss	[MW]	-	0,09	0,75	0,42
Weitere Daten					
Autarkiegrad	[%]	37%	68%	62%	81%
Durchschnittliche Energiekosten*	[€/kWh]	0,09	0,08	0,12	0,09
Jährliche Kosten der Lastdeckung*	[€]	692.092	608.131	905.341	688.660
Netto Invest.*	[€]	2.670.701	3.951.298	2.823.821	4.736.260
Investitionsquote*	[%]	0,8	1,2	0,8	1,4

*Bitte beachten Sie, dass die angegebenen Energiekosten auf einem Modell basieren, das die Marktpreise Stand Januar 2025 berücksichtigt. Zukünftige Preisänderungen können diese Werte jedoch beeinflussen.

- ca. 50 % des Strombedarfs können bei hohem EE-Potenzial durch zum Maximum ausgebaute Windenergie (45-50 %) und Freiflächen-PV-Anlagen (5 %) gedeckt werden
- Großwärmepumpen übernehmen in allen Szenarien den Großteil der Wärmeversorgung (45-98 % des Wärmebedarfs)
- der maximale Ausbau an Dachflächen-Photovoltaik kann ca. 35-45 % des benötigten Stromes liefern

Service Park Wärmesektor

Service Park Stromsektor

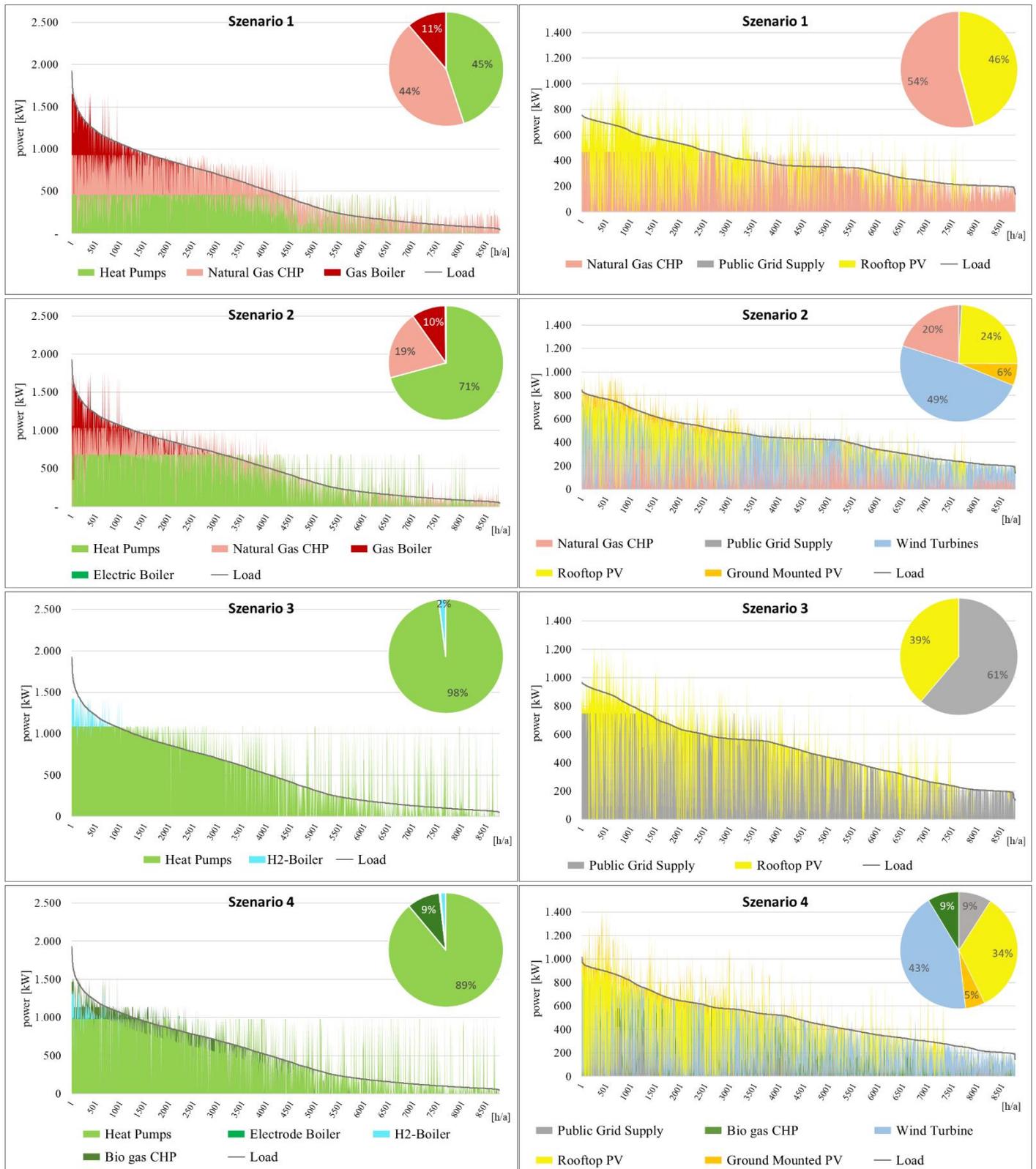


Abbildung 17: Jahresdauerlinien Service Park

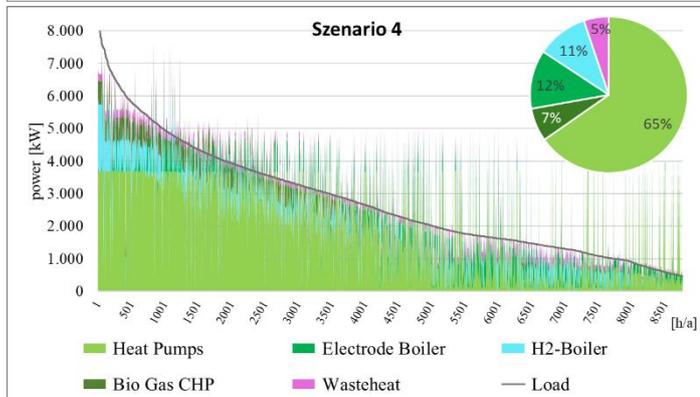
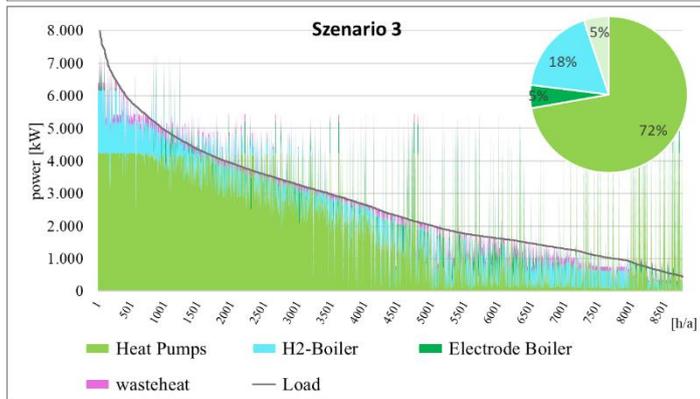
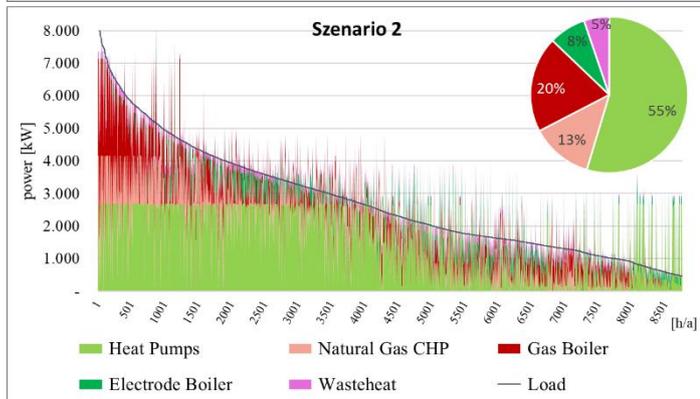
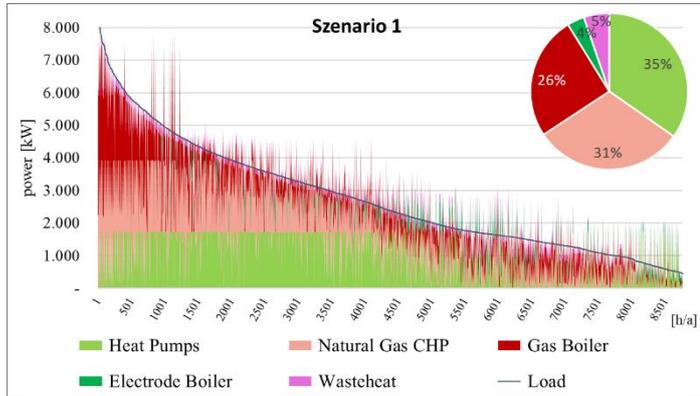
Tabelle 7: Steckbrief und Modellierungsergebnisse - Hybrid Park

Steckbrief Hybrid Park					
Gewerbefläche		[ha]		118	
Anzahl Unternehmen				57	
Strombedarf der Unternehmen		[MWh]		13.702	
Wärmebedarf der Unternehmen		[MWh]		24.159	
Abwärmepotential		[MWh]		2.233	
Technologie	Einheit	Szenario 1 Ready-for-30 begrenzttes Potential	Szenario 2 Ready-for-30 günstige Bedingungen	Szenario 3 Fit-for-45 begrenzttes Potential	Szenario 4 Fit-for-45 günstige Bedingungen
Dach-PV	[MWp]	12,70	7,88	12,70	12,70
Freiflächen PV	[MWp]	-	1,47	-	1,47
Windenergie	[MW]	-	5,61	-	5,61
BHKW Erdgas	[MWel]	2,19	1,46	-	-
BHKW Biogas	[MWel]	-	-	-	0,69
Wärmepumpe	[MW]	1,72	2,68	4,24	3,69
Gas-Kessel	[MW]	3,65	2,99	-	-
H2-Kessel	[MW]	-	-	1,93	2,05
Elektrodenkessel	[MW]	0,95	0,95	0,96	0,99
Stromspeicher	[MWh]	7,96	3,73	7,84	7,52
Wärmespeicher	[MWh]	28,38	46,05	46,78	55,46
Elektrolyseur	[MWel]	-	-	-	0,24
H2-Brennstoffzelle	[MWel]	-	-	-	-
Netzanschluss	[MW]	0,07	1,13	3,61	2,05
Weitere Daten					
Autarkiegrad	[%]	43%	69%	60%	79%
Durchschnittliche Energiekosten*	[€/kWh]	0,09	0,08	0,13	0,10
Jährliche Kosten der Lastdeckung*	[€]	3.505.535	3.126.505	4.778.865	3.712.990
Netto Invest.*	[€]	15.678.363	20.111.508	15.785.113	25.149.368
Investitionsquote*	[%]	1,6	2,0	1,6	2,6

*Bitte beachten Sie, dass die angegebenen Energiekosten auf einem Modell basieren, das die Marktpreise Stand Januar 2025 berücksichtigt. Zukünftige Preisänderungen können diese Werte jedoch beeinflussen.

- ca. 50 % des Strombedarfs können bei hohem EE-Potenzial durch zum Maximum ausgebaute Windenergie (45-50 %) und Freiflächen-PV-Anlagen (5 %) gedeckt werden
- der maximale Ausbau an Dachflächen-Photovoltaik kann ca. 30-60 % des benötigten Stromes liefern
- Großwärmepumpen übernehmen in allen Szenarien 35-70 % der Wärmeversorgung und decken zunehmend den Bedarf an Raumwärme und Warmwasser sowie niedriger Prozesswärme
- bei Verzicht auf Erdgas wird Wasserstoff zur Erzeugung von mittlerer Prozesswärme genutzt

Hybrid Park Wärme



Hybrid Park Strom

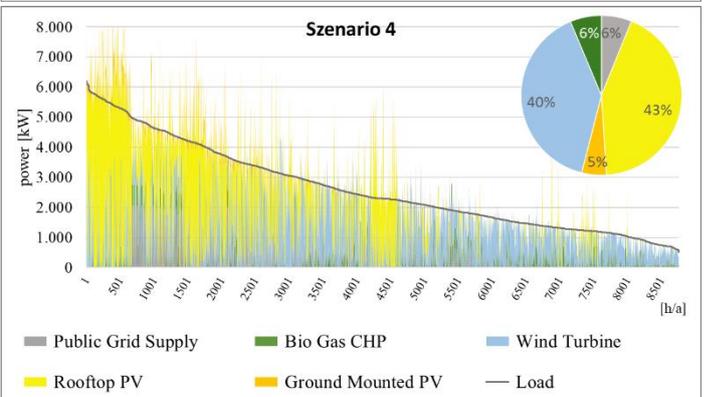
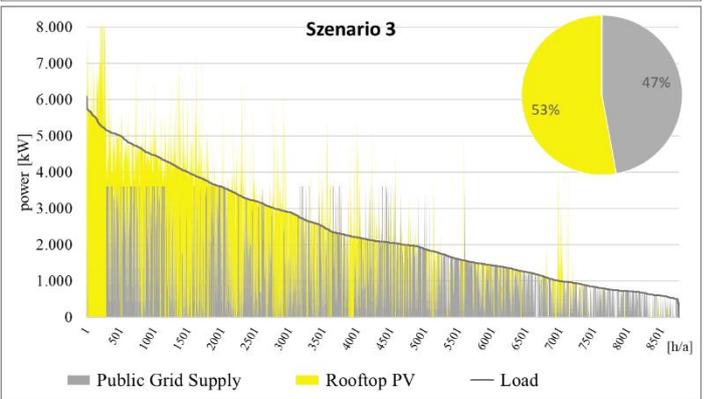
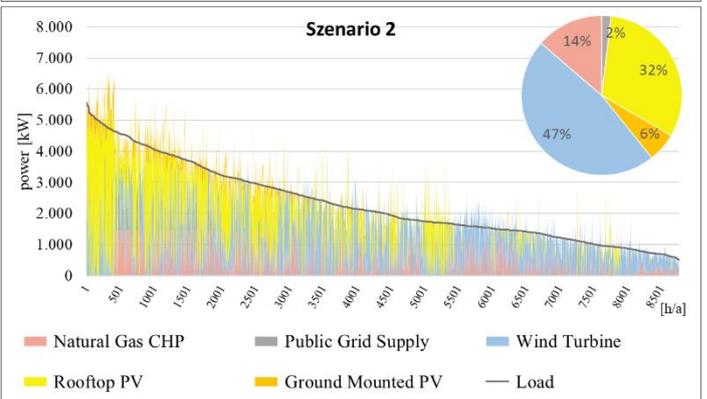
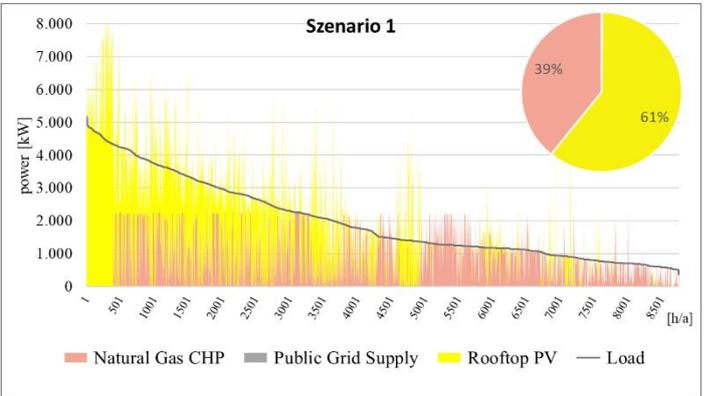


Abbildung 18: Jahresdauerlinien Hybrid Park

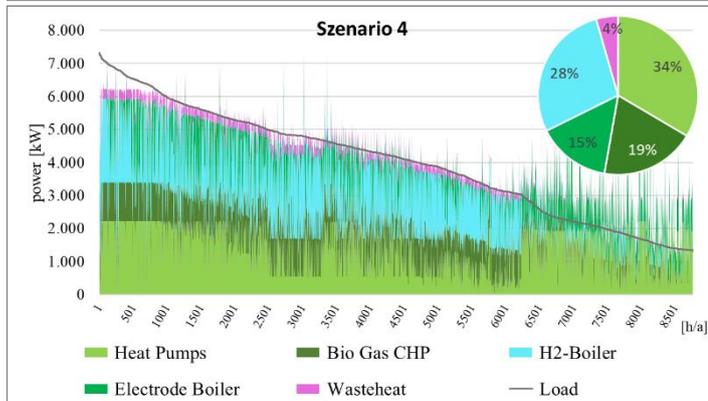
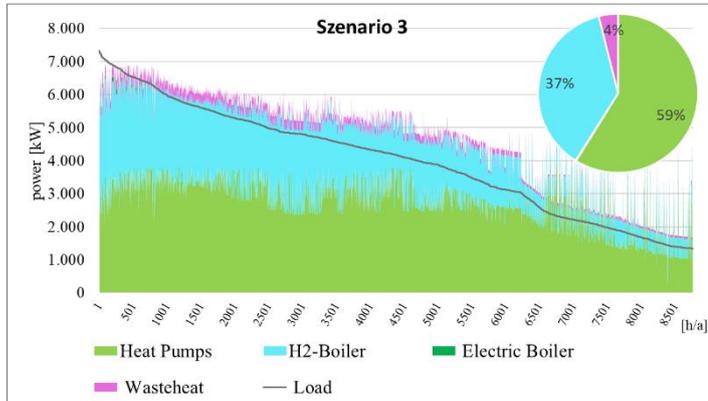
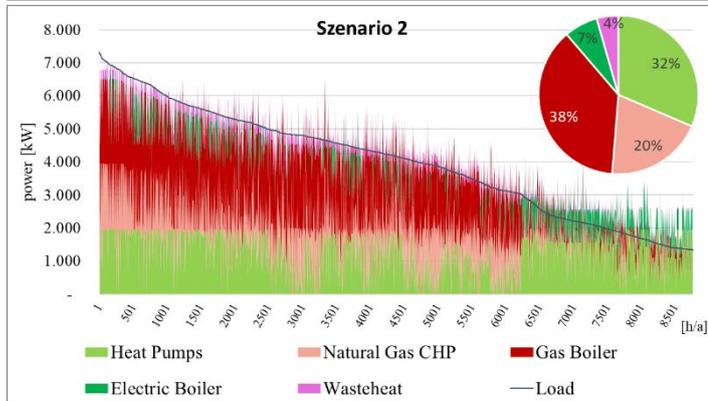
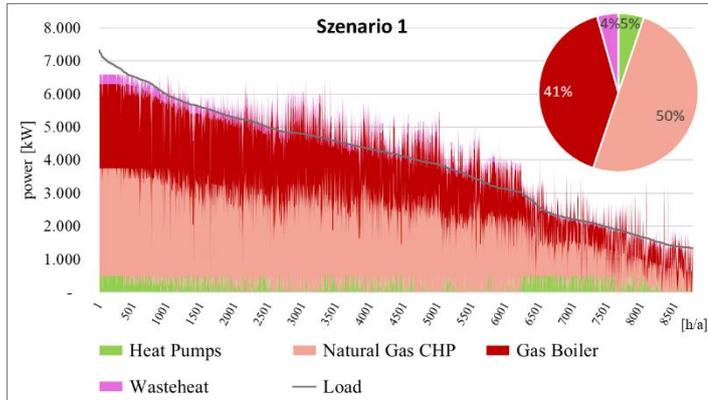
Tabelle 8: Steckbrief und Modellierungsergebnisse - Industrial Park

Steckbrief Industrial Park					
Gewerbefläche		[ha]		45	
Anzahl Unternehmen				22	
Strombedarf der Unternehmen		[MWh]		21.566	
Wärmebedarf der Unternehmen		[MWh]		35.062	
Abwärmepotential		[MWh]		6.244	
Technologie	Einheit	Szenario 1 Ready-for-30 begrenztes Potential	Szenario 2 Ready-for-30 günstige Bedingungen	Szenario 3 Fit-for-45 begrenztes Potential	Szenario 4 Fit-for-45 günstige Bedingungen
Dach-PV	[MWp]	3,9	3,9	3,9	3,9
Freiflächen PV	[MWp]	-	2,3	-	2,3
Windenergie	[MW]	-	8,8	-	8,8
BHKW Erdgas	[MWel]	3,3	2,0	-	-
BHKW Biogas	[MWel]	-	-	-	1,2
Wärmepumpe	[MW]	0,5	2,0	3,8	2,2
Gas-Kessel	[MW]	2,6	2,6	-	-
H2-Kessel	[MW]	-	-	2,9	2,5
Elektrodenkessel	[MW]	-	1,4	0,1	2,6
Stromspeicher	[MWh]	2,9	2,3	0,1	2,3
Wärmespeicher	[MWh]	14,6	27,3	21,6	45,3
Elektrolyseur	[MWel]	-	-	-	-
H2-Brennstoffzelle	[MWel]	-	-	-	-
Netzanschluss	[MW]	0,7	1,6	5,1	2,4
Weitere Daten					
Autarkiegrad	[%]	10%	50%	28%	53%
Durchschnittliche Energiekosten*	[€/kWh]	0,10	0,08	0,16	0,12
Jährliche Kosten der Lastdeckung*	[€]	5.533.450	4.742.815	9.163.513	6.553.899
Netto Invest.*	[€]	6.586.156	20.745.970	5.825.768	20.591.883
Investitionsquote*	[%]	1,3	4,1	1,1	4,1

*Bitte beachten Sie, dass die angegebenen Energiekosten und Investitionen auf einem Modell basieren, das die Marktpreise Stand Januar 2025 berücksichtigt. Zukünftige Preisänderungen können diese Werte jedoch beeinflussen.

- ca. 50 % des Strombedarfs können bei hohem EE-Potenzial durch zum Maximum ausgebaute Windenergie (45-50 %) und Freiflächen-PV-Anlagen (5 %) gedeckt werden
- der maximale Ausbau an Dachflächen-Photovoltaik kann ca. 10-15 % des benötigten Stromes liefern
- Kraft-Wärme-Kopplung in Form von Erdgas-BHKW ist von hoher Bedeutung für die Strom- und Wärmeversorgung und wird bei Verzicht auf Erdgas durch Biogas-BHKW vollständig ersetzt
- bei Verzicht auf Erdgas wird Wasserstoff zur Erzeugung von Prozesswärme mit mittlerem Temperaturniveau genutzt
- Wärmepumpen decken zunehmend den Bedarf an Raumwärme und Warmwasser sowie niedriger Prozesswärme

Industrial Park Wärmesektor



Industrial Park Elektrizitätssektor

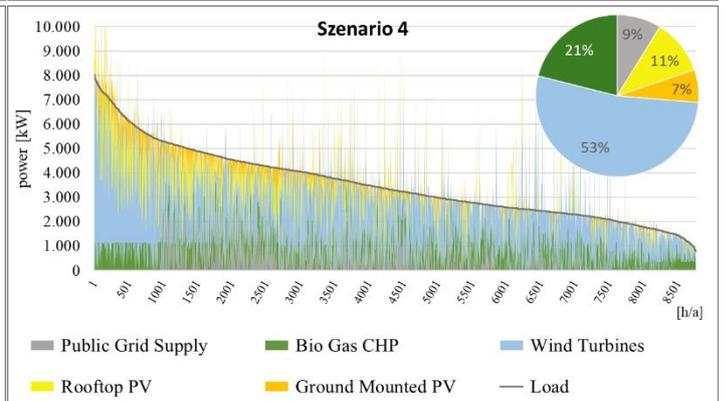
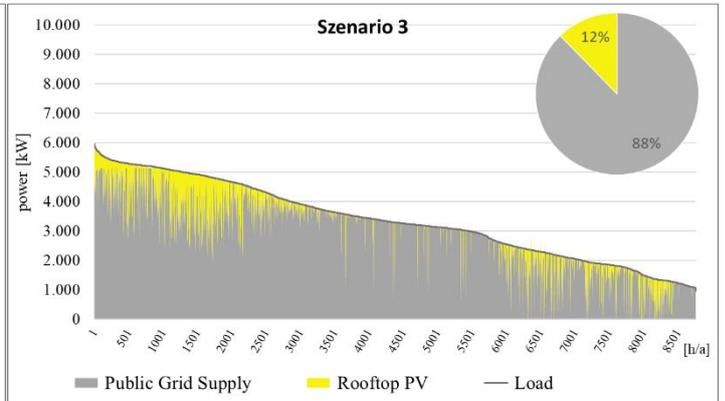
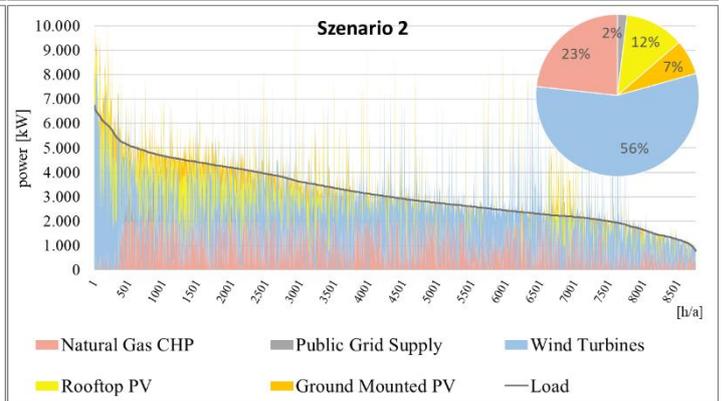
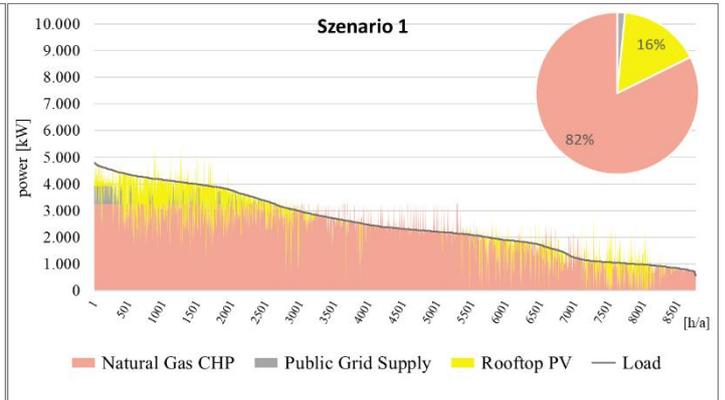


Abbildung 19: Jahresdauerlinien Industrial Park

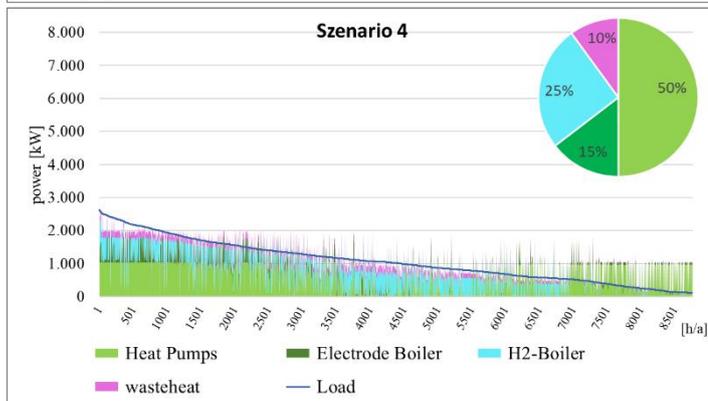
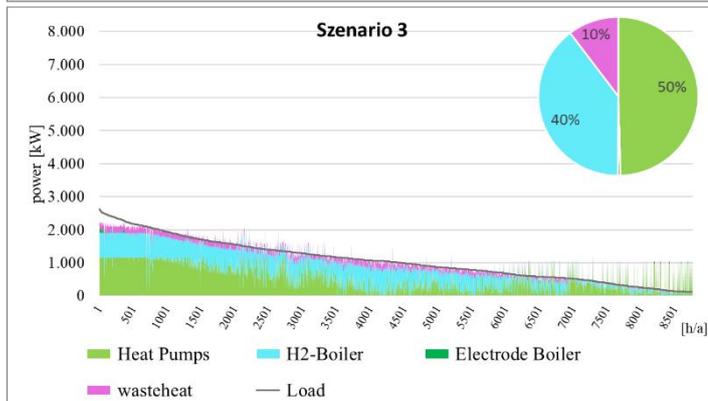
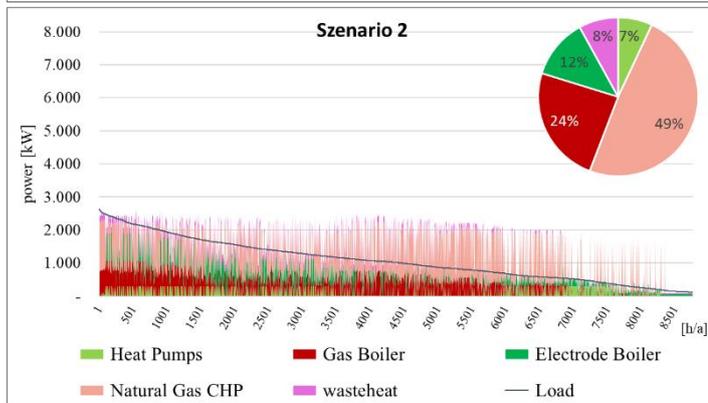
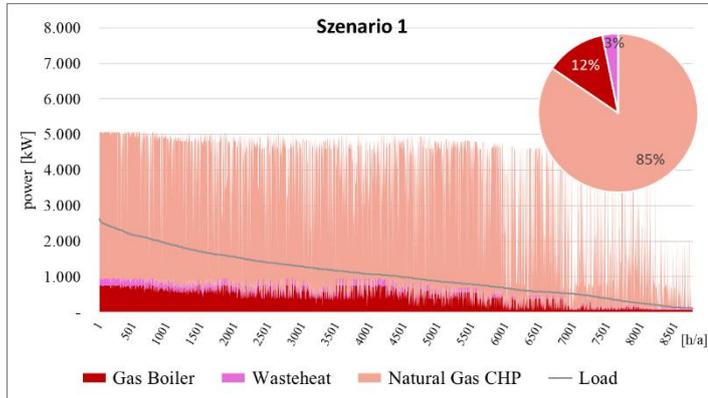
Tabelle 9: Steckbrief und Modellierungsergebnisse - Power Park

Steckbrief Power Park					
Gewerbefläche		[ha]		40	
Anzahl Unternehmen				18	
Strombedarf der Unternehmen		[MWh]		32.572	
Wärmebedarf der Unternehmen		[MWh]		9.382	
Abwärmepotential		[MWh]		3.493	
Technologie	Einheit	Szenario 1 Ready-for-30 begrenztes Potential	Szenario 2 Ready-for-30 günstige Bedingungen	Szenario 3 Fit-for-45 begrenztes Potential	Szenario 4 Fit-for-45 günstige Bedingungen
Dach-PV	[MWp]	5,27	5,27	5,27	5,27
Freiflächen PV	[MWp]	-	3,50	-	3,50
Windenergie	[MW]	-	13,35	-	13,35
BHKW Erdgas	[MWel]	4,11	1,51	-	-
BHKW Biogas	[MWel]	-	-	-	-
Wärmepumpe	[MW]	-	0,30	1,15	1,03
Gas-Kessel	[MW]	0,77	0,77	-	-
H2-Kessel	[MW]	-	-	0,76	0,76
Elektrodenkessel	[MW]	-	0,84	0,12	0,77
Stromspeicher	[MWh]	1,10	4,72	0,71	3,33
Wärmespeicher	[MWh]	4,68	16,69	12,01	25,98
Elektrolyseur	[MWel]	-	0,12	-	0,19
H2-Brennstoffzelle	[Mwel]	-	-	-	-
Netzanschluss	[MW]	1,55	2,92	5,74	4,53
Weitere Daten					
Autarkiegrad	[%]	12%	60%	21%	69%
Durchschnittliche Energiekosten*	[€/kWh]	0,15	0,11	0,18	0,12
Jährliche Kosten der Lastdeckung*	[€]	6.454.239	4.519.222	7.494.950	5.006.572
Netto Invest.*	[€]	7.791.236	26.871.867	4.153.210	25.771.829
Investitionsquote*	[%]	3,4	11,7	1,8	11,2

*Bitte beachten Sie, dass die angegebenen Energiekosten auf einem Modell basieren, das die Marktpreise Stand Januar 2025 berücksichtigt. Zukünftige Preisänderungen können diese Werte jedoch beeinflussen.

- ca. 50 % des Strombedarfs können bei hohem EE-Potenzial durch zum Maximum ausgebaute Windenergie (45-50 %) und Freiflächen-PV-Anlagen (5 %) gedeckt werden
- der maximale Ausbau an Dachflächen-Photovoltaik kann ca. 10-15 % des benötigten Stromes liefern
- bei Erdgasverfügbarkeit werden Erdgas-BHKW zur Stromerzeugung eingesetzt, durch deren Abwärme zwar 50-85 % des Wärmebedarfes gedeckt wird, aber hohe Wärmeüberschüsse entstehen
- bei Verzicht auf Erdgas wird Wasserstoff zur Erzeugung von Prozesswärme genutzt
- Wärmepumpen decken zunehmend den Bedarf an Raumwärme und Warmwasser sowie niedriger Prozesswärme

Power Park Wärme



Power Park Strom

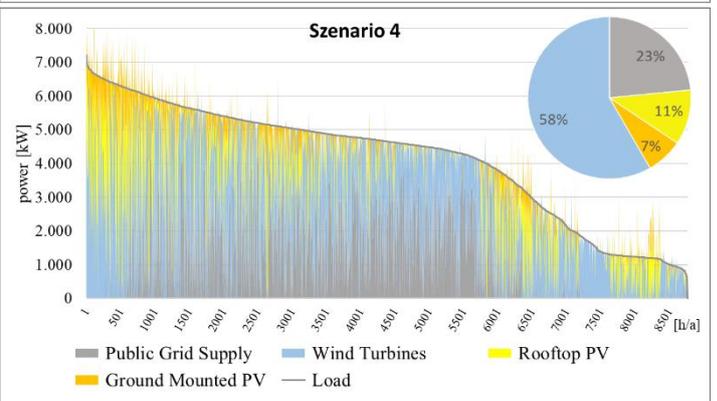
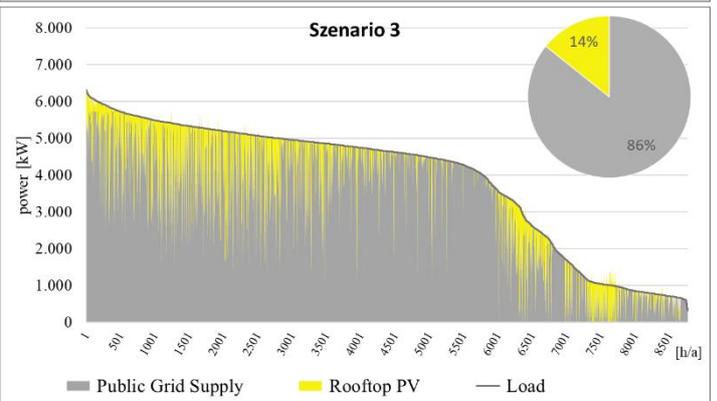
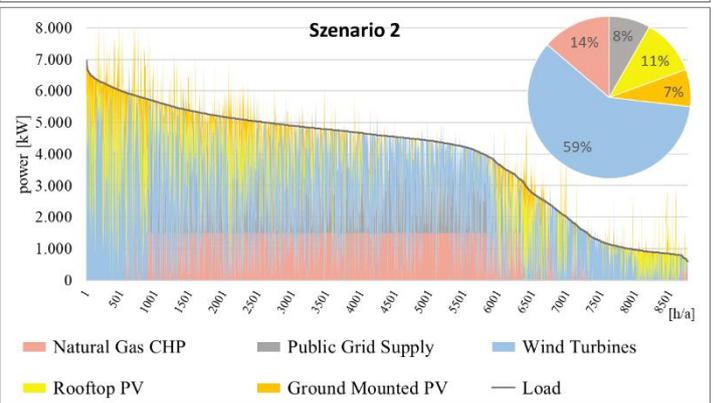
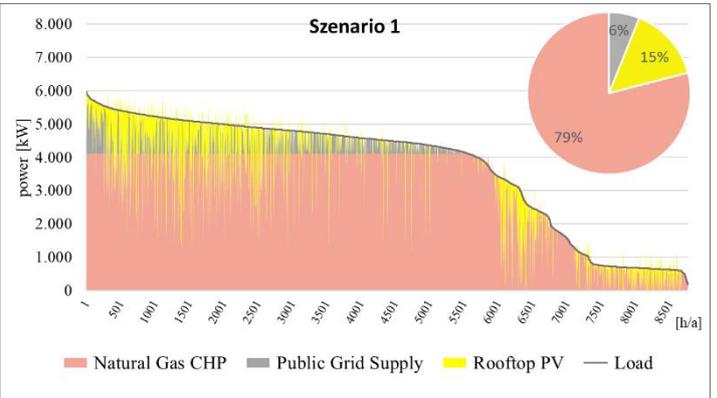


Abbildung 20: Jahresdauerlinien Power Park

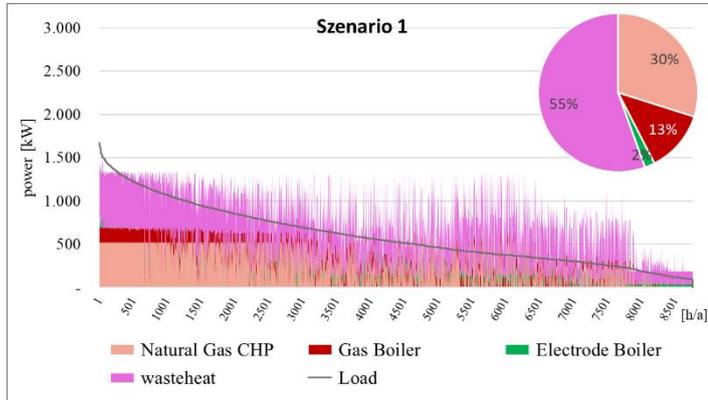
Tabelle 10: Steckbrief und Modellierungsergebnisse - Thermo Park

Steckbrief Thermo Park					
Gewerbefläche		[ha]		40	
Anzahl Unternehmen				27	
Strombedarf der Unternehmen		[MWh]		5.426	
Wärmebedarf der Unternehmen		[MWh]		20.786	
davon Hochtemperaturbedarf		[MWh]		15.551	
Abwärmepotential		[MWh]		5.191	
Technologie	Einheit	Szenario 1 Ready-for-30 begrenztes Potential	Szenario 2 Ready-for-30 günstige Bedingungen	Szenario 3 Fit-for-45 begrenztes Potential	Szenario 4 Fit-for-45 günstige Bedingungen
Dach-PV	[MWp]	3,81	3,49	3,81	3,81
Freiflächen PV	[MWp]	-	0,58	-	0,58
Windenergie	[MW]	-	2,22	-	2,22
BHKW Erdgas	[MWel]	0,52	0,27	-	-
BHKW Biogas	[MWel]	-	-	-	-
Wärmepumpe	[MW]	-	0,24	0,46	0,44
Gas-Kessel	[MW]	0,16	0,24	-	-
H2-Kessel	[MW]	-	-	0,25	0,19
Elektrodenkessel	[MW]	0,15	0,17	0,17	0,25
Stromspeicher	[MWh]	3,29	2,95	2,97	2,98
Wärmespeicher	[MWh]	8,52	4,77	4,01	8,88
Elektrolyseur	[MWel]	-	0,27	-	0,29
H2-Brennstoffzelle	[MWel]	-	-	-	-
Netzanschluss	[MW]	0,86	1,06	1,51	1,31
Weitere Daten					
Autarkiegrad	[%]	46%	83%	63%	88%
Durchschnittliche Energiekosten*	[€/kWh]	0,09	0,07	0,11	0,08
Jährliche Kosten der Lastdeckung*	[€]	946.828	784.171	1.158.603	846.028
Netto Invest.*	[€]	3.179.505	6.435.795	2.937.833	6.657.150
Investitionsquote*	[%]	2,4	5,0	2,3	5,1

*Bitte beachten Sie, dass die angegebenen Energiekosten auf einem Modell basieren, das die Marktpreise Stand Januar 2025 berücksichtigt. Zukünftige Preisänderungen können diese Werte jedoch beeinflussen.

- ca. 50 % des Strombedarfs können bei hohem EE-Potenzial durch zum Maximum ausgebaute Windenergie (45-50 %) und Freiflächen-PV-Anlagen (5 %) gedeckt werden
- der maximale Ausbau an Dachflächen-Photovoltaik kann 35-55 % des benötigten Stromes liefern
- ca. 60% des Wärmebedarfes wird durch Abwärme aus Hochtemperaturprozessen gedeckt
- restliche 15-20 % der Wärmeversorgung bestehen entweder aus erdgasgefeuerten Kesseln und BHKW oder aus Elektro- und Wasserstoffkesseln

Thermo Park Wärme



Thermo Park Strom

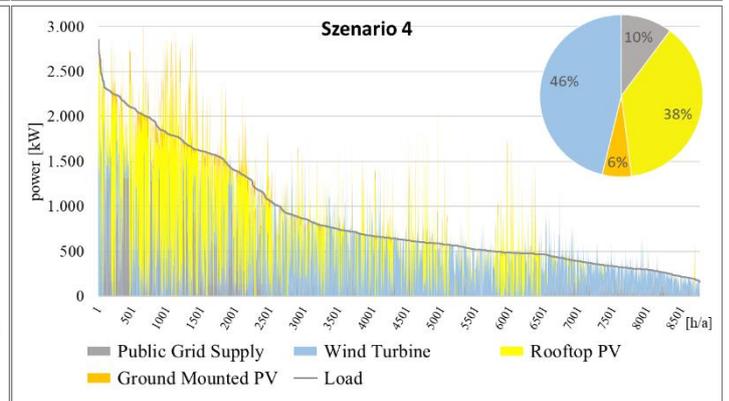
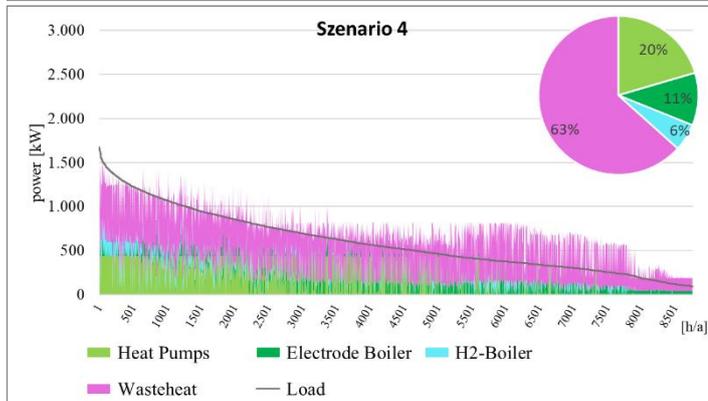
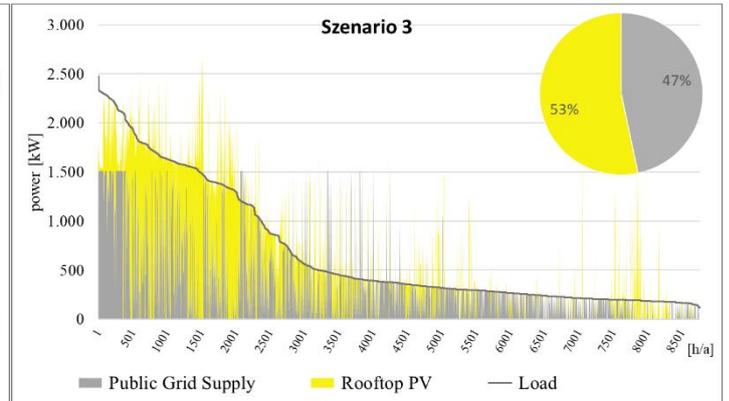
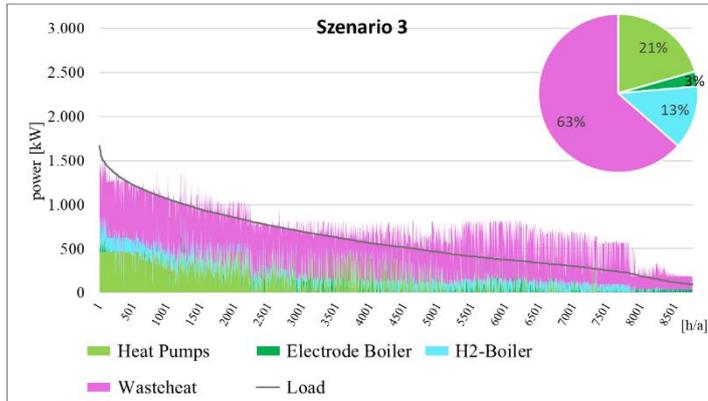
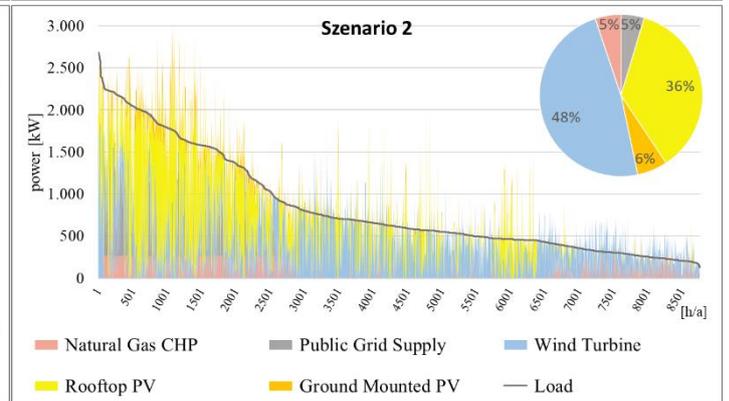
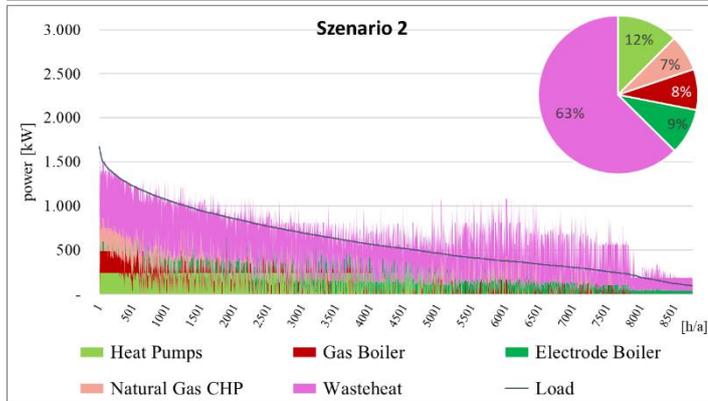
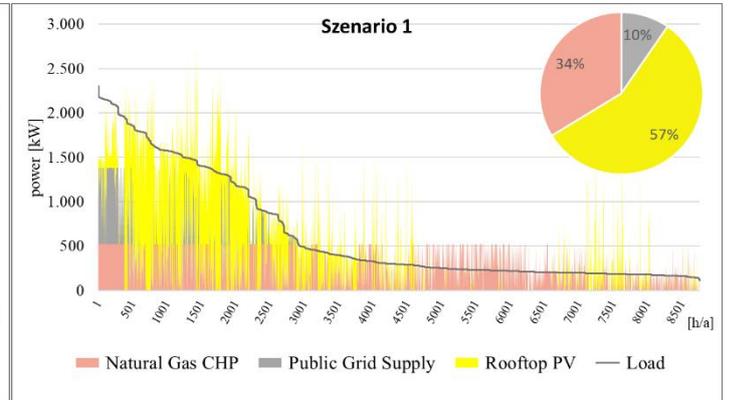


Abbildung 21: Jahresdauerlinien Thermo Park

Die resultierenden Energieautarkiegrade je Gewerbegebietstyp und Modellierungsszenario sind in Abbildung 22 grafisch dargestellt.

In Service Parks wie auch manchen Hybrid Parks können bereits durch den Einsatz weniger Technologien wie dem Ausbau von Dachflächen-PV und Wärmepumpen Autarkiegrade von 40-80 % erzielt werden. Dies gilt auch für Thermo Parks, wobei dort die Abwärmenutzung als Technologie zu ergänzen ist. Unter günstigen lokalen Bedingungen sind Autarkiegrade von 70-80 % wirtschaftlich optimal, bei auf Dachflächen-PV begrenztem EE-Potenzial immerhin 40-60 %.

In Power und Industrial Parks wird eine tendenzielle Energieautarkie durch die Ausschöpfung lokaler EE-Potenziale erreicht. Sofern lokales EE-Potenzial in Form von Windenergieanlagen und Freiflächen-PV vorhanden ist, sind Autarkiegrade von 50-60 % wirtschaftlich optimal. Ist das EE-Potenzial hingegen auf Photovoltaik auf den Dachflächen beschränkt, wird im wirtschaftlichen Optimum ca. 10-20 % Autarkie realisiert. Power und Industrial Parks greifen in diesem Szenario weiterhin in hohem Maße auf den Netzbezug zurück, wobei das Ready-for-30-Szenario vornehmlich auf Erdgas und das Fit-for-45-Szenario auf Strom aus dem öffentlichen Netz angewiesen ist.

Eine Autarkiesteigerung ist auch wirtschaftlich attraktiv, da die Leistung des Stromnetzanschlusses für alle Gewerbegebietstypen - mit Ausnahme des Fit-for-45-Szenarios mit begrenztem Potenzial – erheblich reduziert wird. In manchen Szenarien bedeutet dies eine Reduzierung der Netzanschlussleistung um mehr als 50 %.

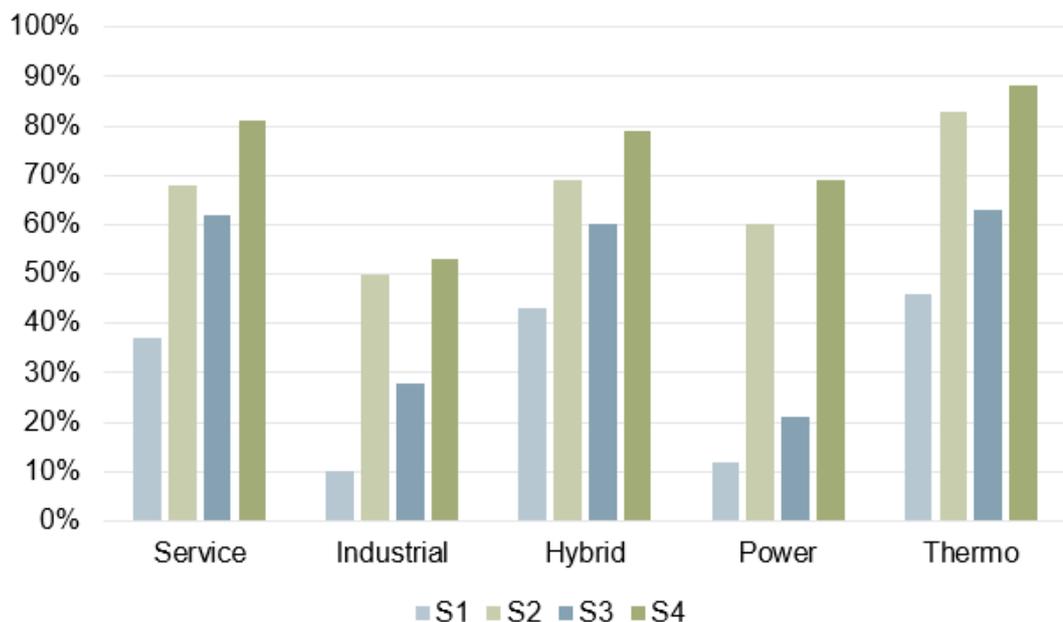


Abbildung 22: Erreichbare Autarkiegrade je Gewerbegebietstyp und Modellierungsszenario

Die Kombination neuer technologischer Lösungen führt für alle Gebietstypen in drei von vier Szenarien zu einer Verringerung der Kosten der jährlichen Lastdeckung. In Abbildung 23 sind die Kosten für das exemplarische Gewerbegebiet des Typs „Industrial Park“ für die vier Modellierungsszenarien im Vergleich zum Status Quo dargestellt. Es ist wichtig zu beachten, dass in den jährlichen Energieausgaben ebenfalls Annuitäten für Investitionen in neue Technologien enthalten sind.

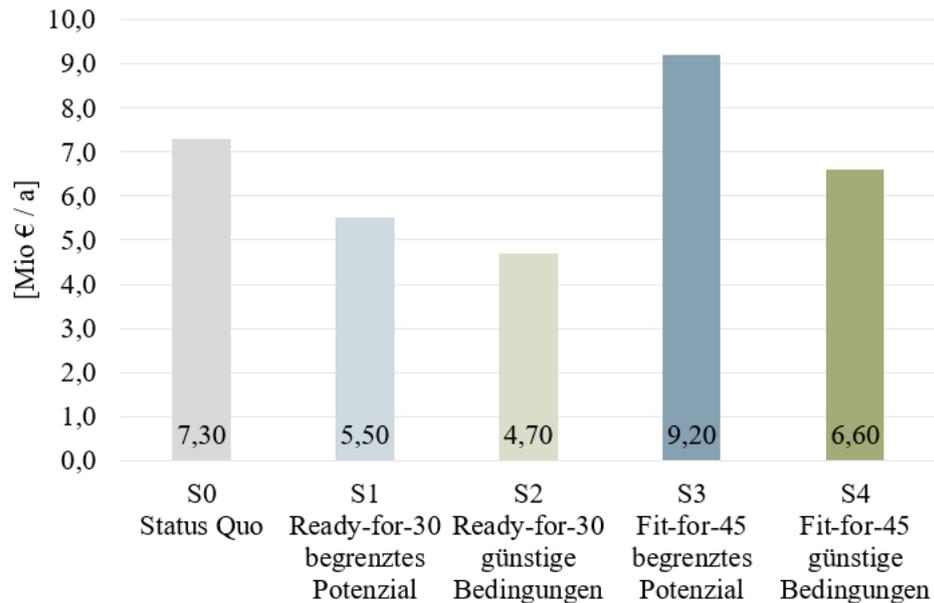


Abbildung 23: jährliche Kosten der Lastdeckung im Vergleich zum Status Quo für den Typ „Industrial Park“ nach Szenarien

Die Analyse zeigt, dass eine Energieversorgung, die den Anforderungen des Jahres 2045 entspricht, wie sie im Fit-for-45-Szenario skizziert wird, an einem Standort mit günstigen Bedingungen bereits heute wirtschaftlich tragfähig ist. Die einzige Ausnahme bildet der Anteil des importierten Netzstroms, der heute noch nicht vollständig aus erneuerbaren Energien stammt. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der Anteil erneuerbarer Energien am Netzstrom in den nächsten Jahren und Jahrzehnten zunimmt. Die jährlichen Energiekosten des Status Quo können im Fit-for-45-Szenario unter günstigen Bedingungen um 10 % gesenkt werden. Dies gilt trotz der Tatsache, dass künftige Strompreissenkungen durch erneuerbare Erzeugung im Strommarkt sowie Größenvorteile und Lernkurveneffekte, die die Investitionskosten für Technologien wie PV, Windturbinen und Batterien weiter senken könnten, nicht berücksichtigt werden. Umgekehrt ist das Fit-for-45-Szenario mit begrenztem Potenzial das einzige, bei dem die jährlichen Energiekosten im Vergleich zum Status Quo steigen. Schließlich kann festgestellt werden, dass Strategien, die weniger ehrgeizig sind als der Fit-for-45-Ansatz, d.h. die Ready-for-30-Szenarien, in jedem Fall wirtschaftlich tragfähig sind. Diese Erkenntnis ist unabhängig davon, ob der Standort ein begrenztes Potenzial oder günstige

Bedingungen aufweist. Im Vergleich zum Status Quo können die jährlichen Energiekosten in den Ready-for-30-Szenarien um 24 – 35 % gesenkt werden. Die Modellierungsergebnisse verdeutlichen, dass sich auf unterschiedlichen Anspruchsniveaus finanzielle Vorteile der Umstellung auf umweltfreundlichere Energielösungen in den Gewerbegebieten ergeben. Die Kosten lokaler Energie sind deutlich niedriger als der alternative Strombezug aus dem Netz, so dass für jede Kilowattstunde Strom, die in dem Gebiet lokal erzeugt und genutzt wird, monetäre Einsparungen erzielt werden. Die wirtschaftlichen Vorteile lassen sich unter anderem auf die niedrigen Energieerzeugungskosten in den Parks zurückführen. Die Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Electricity (LCOE)) lokaler EE und KWK-Anlagen sind geringer als die durchschnittlichen Stromgestehungskosten des deutschlandweiten Kraftwerksparks. Außerdem entfallen Netzentgelte, die ansonsten für die Nutzung von Übertragungsnetzen und Verteilnetzen hoher Spannungsebenen für den bezogenen Strom anfallen. Die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien zur Wärmeerzeugung führt darüber hinaus zu Wärmepreisen, die etwa auf dem Niveau aktueller Erdgaspreise liegen. Es ergeben sich daher wettbewerbsfähige durchschnittliche Energiekosten je Kilowattstunde genutzter Energie (Strom oder Wärme) in den Gewerbegebieten.

Neben resultierenden Energiekosten bzw. den Kosten der jährlichen Lastdeckung sind für Stakeholder auch die zu tätigen Investitionen für die Energietransformation von hohem Interesse. In Tabelle 8 bis Tabelle 10 sind sowohl die absoluten Investitionen als auch die Investitionsquoten aufgeführt. Werden die jährlichen Investitionen ins Verhältnis zum jährlichen Umsatz gesetzt, ergibt sich die sogenannte Investitionsquote. Sie gibt den Anteil des Umsatzes an, der im weiteren Sinne wieder in den betrieblichen Prozess zurückfließt und lässt damit Rückschlüsse auf das betriebliche Investitionsverhalten zu. Übliche Investitionsquoten liegen im branchenunabhängigen Durchschnitt bei etwa 2 % [43], im Verarbeitenden Gewerbe bei 3 % [44]. Sie berücksichtigen Investitionen in Gebäude sowie in technische Anlagen und Maschinen. Sowohl Neu-, Aus- oder Umbau von Bürogebäuden oder Lager- und Produktionshallen als auch Ersatz oder Erweiterung des Produktionsmaschinenparks oder des Fuhrparks sind darin enthalten. Die Investitionsquoten dieser Studie betrachten hingegen nur die Investitionen, welche für die energetische Transformation der Gewerbegebiete im Sinne dieses Projektes zu tätigen sind. Die folgende Abbildung 24 stellt die aus dem Energiemodell resultierenden Investitionsquoten je Gewerbegebietstyp und lokalen Standortbedingungen dar. Um die gesamte Investitionsquote des Gewerbegebietes zu erhalten, müssten sie folglich den üblichen Investitionsquoten hinzuaddiert werden.

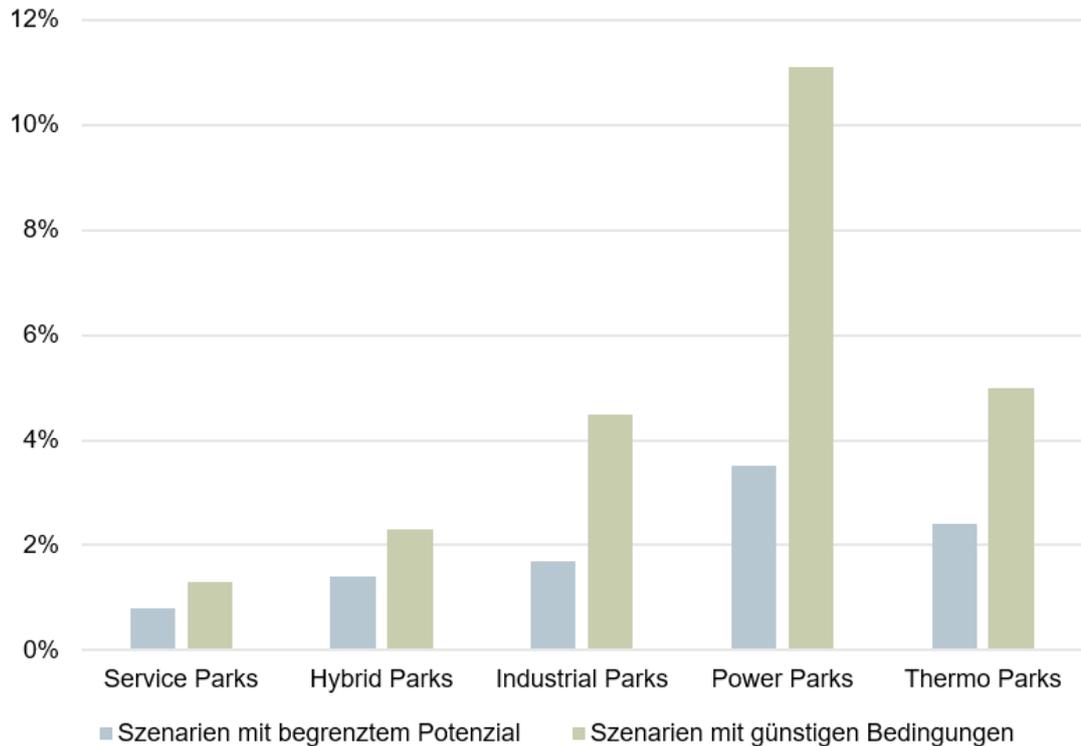


Abbildung 24: Investitionsquoten je Gebietstyp und Modellierungsszenario

Für alle Gebietstypen sind die Investitionsquoten in Szenarien mit günstigen Bedingungen für lokale EE höher, da kapitalintensive Windenergieanlagen und Freiflächen-PV-Anlagen angeschafft werden. Für Service Parks, Hybrid Parks und Thermo Parks sind die zu tätigen Investitionen in diesen Szenarien knapp doppelt so hoch, für Industrial Parks und Power Parks verdreifachen sie sich im Vergleich zu Szenarien mit ungünstigen Standortbedingungen.

Die Investitionsquoten für Service und Hybrid Parks liegen mit 1 – 2 % in der gleichen Größenordnung wie übliche Investitionsquoten in Unternehmen mit vergleichbaren Tätigkeiten, d.h. die übliche Investitionsquote müsste zum Zwecke der Energietransformation in einem Jahr höchstens verdoppelt werden. Industrial und Thermo Parks weisen mit 2-5 % bereits höhere Investitionsquoten auf, sodass sich hier die erforderlichen Investitionen im Vergleich zu einem üblichen Jahr in Abhängigkeit des Szenarios verdoppeln oder verdreifachen. In Power Parks fällt die Quote mit 3,5-11 % eindeutig am höchsten aus, sodass sich hier die üblichen Jahresinvestitionen um den Faktor 3 bis 6 erhöhen würden. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die gesamten Investitionstätigkeiten zur besseren Veranschaulichung einem Jahr zugeschrieben werden. In der Praxis besteht die Möglichkeit, die für die Energietransformation erforderlichen Investitionen auf mehrere Jahre aufzuteilen und somit die gesamte Investitionsquote geringer zu halten.

3.1.2 Sensitivitätsanalyse

Um zu prüfen, welche Auswirkungen die Unsicherheit der Energiepreisschwankungen auf die Modellergebnisse haben, wird eine Sensitivitätsanalyse für den Gewerbetyp Industrie durchgeführt. In Anlehnung an eine Monte-Carlo Analyse werden 100 Modelldurchläufe für jedes Szenario durchgeführt, bei denen die Importpreise für Strom und Erdgas variieren. In den Szenarien 1 und 2 variiert der durchschnittliche Strompreis im Gewerbegebiet zwischen 10 und 30 ct/kWh und der Erdgaspreis zwischen 5 und 15 ct/kWh, dabei ist der Strompreis in seiner Tendenz an den Gaspreis gekoppelt sodass bei hohen Gaspreisen auch der Strompreis hoch ausfällt. In den Szenarien 3 und 4 ersetzt Biogas Erdgas und für Wasserstoff wird die Annahme getroffen das der Preis jeweils 20 % über dem Strompreis liegt. Abbildung 25 zeigt die resultierende Dimensionierung der Komponenten zur Wärmeherzeugung der 4 Szenarien über jeweils 100 Modelldurchläufe mit schwankenden Importpreisen für Erdgas, Strom und Biogas. Die Auslegungsgrößen der Komponenten werden durch Boxplots veranschaulicht. In diesen Boxplots repräsentiert der Kasten (Interquartilsabstand) die mittleren 50 % der Werte. Die Whisker (Antennen) erstrecken sich bis zu den minimalen und maximalen Werten innerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstands. Werte außerhalb der Whisker werden als Ausreißer gewertet und nicht in die Boxplots miteinbezogen. Die Grafik zeigt, dass die Modellergebnisse trotz der Schwankungen der Energiepreise weitgehend konsistente Größenordnungen bei der Auswahl der Komponenten beibehalten. Auch bei abweichenden Energiepreisen können die ausgewählten Technologien in ähnlicher Dimensionierung eingesetzt werden, um den Energiebedarf zu decken.

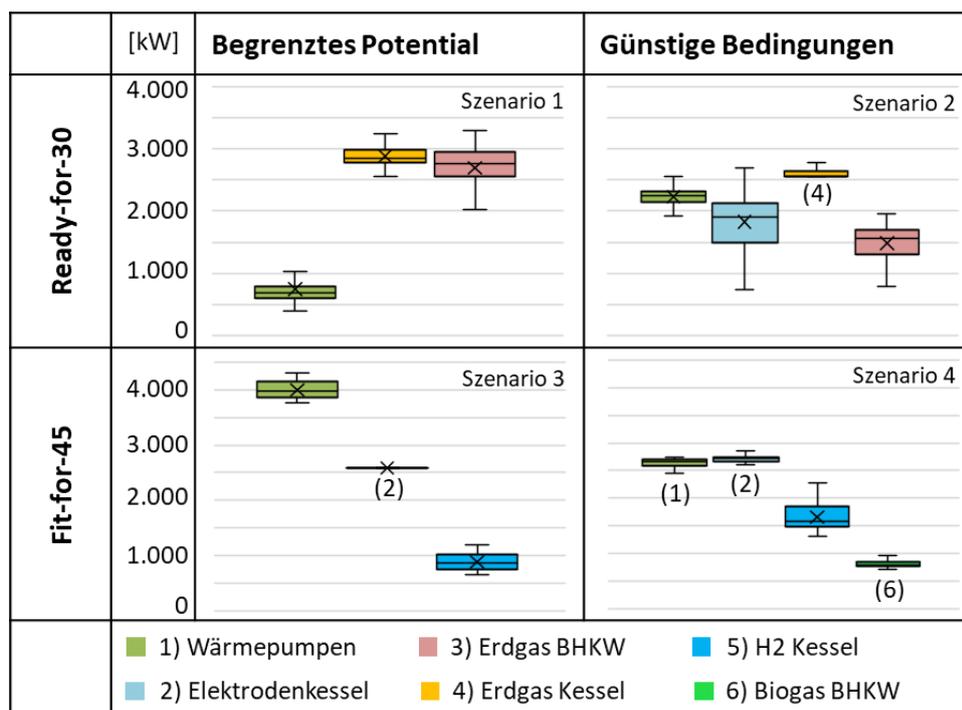


Abbildung 25: Sensitivität der Dimensionierung der Technologien

Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Speichersysteme. In einem Fit-for-45 Szenario mit begrenztem lokalem Potential für erneuerbare Energien ist kein Stromspeicher erforderlich, da die aus dem Netz bezogene Strommenge ausreichend Flexibilität bietet. In den anderen drei Szenarien variiert die Größe des Stromspeichers zwischen 1 und 3,5 MWh. In den Szenarien mit begrenztem lokalem Potential für erneuerbare Energien weisen die Wärmespeicher ähnliche Größen von etwa 17-22 MWh auf. Unter günstigen lokalen Bedingungen werden die Wärmespeicher weitaus größer ausgelegt, mit Kapazitäten von etwa 35 MWh bis 60 MWh. Die Auslegung der Wärmespeicher zeigt geringere Sensitivitäten als die Auslegung der Stromspeicher. Auch bei abweichenden Energiepreisen ergibt sich eine ähnliche Dimensionierung für Wärmespeicher, während bei Batteriespeichern größere Unsicherheiten hinsichtlich ihrer Kapazitäten bestehen.

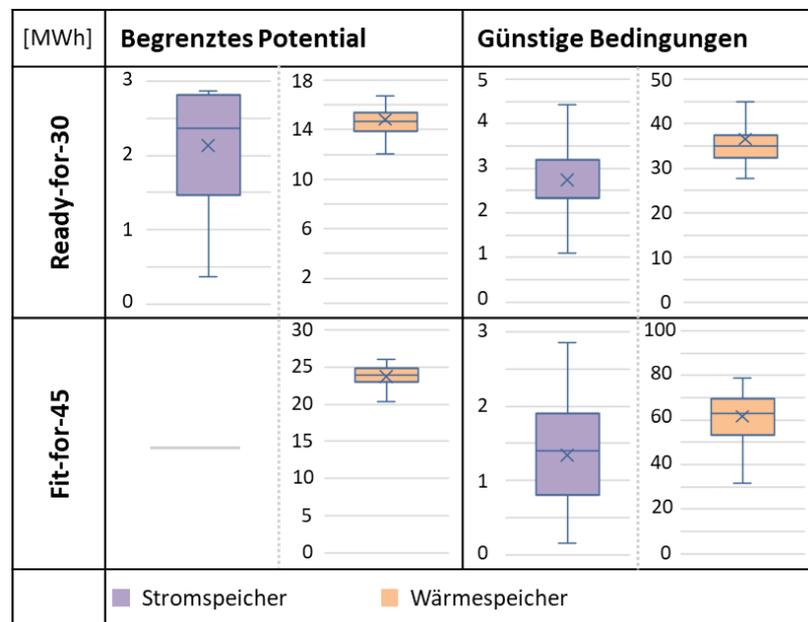


Abbildung 26: Sensitivität der Dimensionierung der Speicher

3.1.3 Handlungsempfehlungen

Im Kontext der folgenden Handlungsempfehlungen gilt es zu berücksichtigen, dass zur Wärmeversorgung sowohl zentrale als auch dezentrale Alternativen existieren. In den Gewerbegebieten sind einerseits zentrale Energy-Hubs mit Anlagen wie Blockheizkraftwerken oder Großwärmepumpen denkbar, andererseits dezentrale Lösungen in Form vieler kleinerer Anlagen bei den Unternehmen. Die zentrale Versorgung bietet dabei durch Skaleneffekte potenzielle Vorteile, erfordert jedoch ein Wärmenetz. Da weder Skaleneffekte bei spezifischen Investitionskosten oder Anlageneffizienz noch Kosten für ein Wärmenetz im Energiemodell berücksichtigt sind, trifft diese Studie keine Festlegungen,

ob die Energieversorgung zentral oder dezentral organisiert werden sollte. Eine Ausnahme stellen Thermo Parks dar, da hier ein Wärmenetz für eine zentrale Versorgung mit einer großen Abwärmequelle erforderlich ist.

3.1.3.1 Typenunabhängige Empfehlungen

- **Maximierung lokaler EE und Ausschöpfung von Windpotenzialen:**
Das grundlegende Prinzip für eine kosteneffiziente Stromversorgung von Gewerbegebieten ist die Maximierung der lokalen Stromproduktion, insbesondere aus Wind und PV. Solarthermie wird in keinem Szenario eingesetzt und ist daher im Vergleich als unwirtschaftlich zu bewerten. Da die Elektrifizierung der Wärmeversorgung zunimmt, ist die Maximierung der lokalen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien von entscheidender Bedeutung für die Senkung der Kosten sowohl für Strom als auch für Wärme. Die Integration von Windenergie bietet in dieser Hinsicht ein erhebliches Potenzial. Die Herausforderung, Standorte mit begrenztem Potenzial in Gebiete mit günstigeren Bedingungen umzuwandeln, bietet den lokalen Akteuren erhebliche Möglichkeiten, mehr grüne Gewerbegebiete mit wettbewerbsfähigen Energiepreisen zu schaffen.
- **kurzfristige Umstellung auf Wärmepumpen zur Heizung und Warmwasserbereitung:** Die Studie stellt eine zunehmende Elektrifizierung der Wärme fest, wobei sich Wärmepumpen zur Deckung des Bedarfs an Raumheizung, Warmwasserbereitung und Niedertemperatur-Prozesswärme als effektiv erweisen.
- **mittelfristige Elektrifizierung der Prozesswärme oder Umstellung auf Wasserstoff:** Darüber hinaus hängt die Durchführbarkeit der Elektrifizierung von Prozesswärme im mittleren Temperaturbereich von der Wettbewerbsfähigkeit der Strom- und Wasserstoffpreise für Elektroden- oder Wasserstoffkessel ab. Welche Lösung sich durchsetzen wird, lässt sich derzeit nicht prognostizieren, zumal auch eine Kombination beider Lösungen denkbar ist.
- **vorübergehender Einsatz von erdgasgefeuerter KWK:** Weiterhin sind KWK-Systeme wie Erdgas-BHKW aufgrund ihrer hohen Effizienz und der noch geringen Kosten für den Brennstoff Erdgas nach wie vor unverzichtbar, insbesondere in Gebieten mit begrenzten lokalen EE-Ressourcen. Eine Substitution durch Biogas-BHKW ist hingegen derzeit nicht für alle Gebietstypen wirtschaftlich sinnvoll.

- **keine dezentralen Wasserstofftechnologien:** Außerdem ist festzustellen, dass der lokale Einsatz von Elektrolyseuren oder Brennstoffzellen in keinem Szenario wirtschaftlich ist. Obwohl Wasserstoff für die Prozesswärmebereitstellung eine Rolle spielt, werden diese Technologien innerhalb der Systemgrenze nicht dezentral eingesetzt, sondern Wasserstoff von außerhalb der Systemgrenze importiert.
- **Installation großer Speicher, insbesondere für Wärme:** In dem Maße, in dem sich lokale EE-Systeme durchsetzen und herkömmliche Energiequellen ersetzen, wird der Bedarf an umfangreichen Batterie- und Wärmespeichersystemen zum Schlüssel für die Aufrechterhaltung der Flexibilität im Energiesystem. Vor allem die Wärmespeicherung erweist sich im Vergleich zur Batterietechnologie als kostengünstigere Lösung. Sobald große Mengen EE-Strom verfügbar sind, steigt die elektrische Last in allen Gewerbegebieten, da dann elektrisch Wärme erzeugt wird, die günstiger gespeichert werden kann als Strom. Mit zunehmender Elektrifizierung und EE-Integration wird die Größe von Wärmespeichersystemen voraussichtlich zunehmen. Während Batteriespeicher mit Ausnahme von Szenario 3 konstante Größen aufweisen.
- **Netzanschlussleistung ausreichend:** Im Fit-for-45 Szenario mit begrenztem EE-Potenzial, in dem weder Erdgas noch erneuerbare Energien genutzt werden können, sind alle Typen stark von Netzimporten von außerhalb der Systemgrenze abhängig. Netzanschlüsse, ähnlich der heutigen Dimensionierung, sind weiterhin erforderlich. In den anderen Szenarien sinkt trotz zunehmender Elektrifizierung die Spitzenlast aus dem öffentlichen Stromnetz, sodass Leistungspreiseinsparungen erzielt werden können.

3.1.3.2 Typenabhängige Empfehlungen

- **Service Parks:** Bei der Energietransformation dieser Gebiete sollte der Schwerpunkt einerseits auf die maximale Ausschöpfung aller nutzbaren Dachflächenkapazitäten für den Photovoltaik-Ausbau und andererseits auf die Installation von Wärmepumpen gelegt werden. Der Einsatz von Wärmepumpen, die hauptsächlich mit Solarstrom betrieben werden, bewirkt eine effiziente Elektrifizierung der Wärmeversorgung, insbesondere für Heizung und Warmwasser. Erdgas- oder

vorzugsweise Biogas-BHKW fällt lediglich eine ergänzende Rolle neben der Solarenergie zu. Wasserstoff ist für Service Parks nicht relevant, da keine wesentliche Prozesswärme benötigt wird.

- **Hybrid Parks:** Ähnlich wie in Service Parks sollten einerseits die maximale Ausschöpfung aller nutzbaren Dachflächenkapazitäten für den Photovoltaik-Ausbau und andererseits die Installation von Wärmepumpen im Mittelpunkt der energetischen Umgestaltung stehen. Der Einsatz von Wärmepumpen, die hauptsächlich mit Solarstrom betrieben werden, bewirkt eine effiziente Elektrifizierung der Wärmeversorgung, insbesondere für Heizung und Warmwasser. Erdgas- oder vorzugsweise Biogas-BHKW dienen als ergänzende Quelle neben der Solarenergie. Wasserstoff ist in Hybrid Parks optional einsetzbar, allerdings ist die vollständige Elektrifizierung der Prozesswärme mithilfe von Elektrodenkesseln ebenfalls möglich, da der Bedarf an Prozesswärme geringer ist als bspw. in Industrieparks.
- **Industrial Parks:** Die Energietransformation in Industrial Parks ist komplexer als für Service- und Hybrid-Parks, da eine Kombination vieler Technologien erforderlich ist und sich nur durch günstige Standortbedingungen für lokale EE nennenswerte Autarkiegrade um 50 % erzielen lassen. Insbesondere der Windenergie fällt großes Potenzial zu, da Dachflächen-PV nur 10-15 % des enormen Strombedarfs dieser Gebiete decken kann. Die maximale Ausnutzung der vorhandenen Windenergiepotenziale ist daher unerlässlich. Außerdem ist zu empfehlen, dass gemeinschaftliche Anstrengungen unternommen werden, um die Realisierung von Windenergieanlagen in Gewerbegebieten zu vereinfachen, indem bspw. auf den Abbau regulatorischer und baurechtlicher Restriktionen hingewirkt wird [45]. Darüber hinaus sind Technologien der Kraft-Wärme-Kopplung bspw. durch Erdgas-Blockheizkraftwerke von großer Bedeutung für diese Gebiete. Aufgrund des hohen Strom- wie auch Wärmebedarfs eignet sich die gleichzeitige Erzeugung dieser Energieformen hier besonders gut. In einer fossilfreien Zukunft sollten Erdgas-BHKW daher vollständig durch Biogas-BHKW ersetzt werden, anstatt auf andere Technologien außerhalb von KWK umzusteigen. Auch eine KWK-Lösung mit Wasserstoff als Brennstoff sollte in Erwägung gezogen werden, wurde in diesem Projekt jedoch nicht weiter untersucht. Weiterhin spielt Wasserstoff für die Bereitstellung von Prozesswärme eine wichtige Rolle, da der lokal erzeugte Strom zur vollständigen Elektrifizierung der Prozesswärme durch Elektrodenkessel nicht ausreicht, weil er bereits größtenteils zur Deckung des Strombedarfs eingesetzt wird.

- **Power Parks:** Die Transformation von Power Parks gestaltet sich ähnlich herausfordernd wie in Industrial Parks, da die Ausschöpfung und Schaffung lokaler EE-Potenziale essenziell sind. Insbesondere der Windenergie fällt großes Potenzial zu, da Dachflächen-PV nur 10-15 % des enormen Strombedarfs dieser Gebiete decken kann. Die maximale Ausnutzung der vorhandenen Windenergiepotenziale ist daher unerlässlich. Außerdem ist zu empfehlen, dass gemeinschaftliche Anstrengungen unternommen werden, um die Realisierung von Windenergieanlagen in Gewerbegebieten zu vereinfachen, indem bspw. auf den Abbau regulatorischer und baurechtlicher Restriktionen hingewirkt wird [45]. KWK in Form von Biogas-BHKW ist wirtschaftlich nicht empfehlenswert, da sich aufgrund des untypischen Strom-Wärme-Verhältnisses keine Kopplung von Strom und Wärme ausnutzen lässt. Weiterhin kann Wasserstoff bei entsprechendem Prozesswärmebedarf eine wichtige Rolle spielen, da der lokal erzeugte Strom zur vollständigen Elektrifizierung der Prozesswärme durch Elektrodenkessel nicht ausreicht, weil er bereits größtenteils zur Deckung des Strombedarfs eingesetzt wird.
- **Thermo Parks:** In Thermo Parks ist zur Nutzung der Abwärme ein Wärmenetz unverzichtbar. KWK in Form von Biogas-BHKW ist wirtschaftlich nicht empfehlenswert, da sich aufgrund des untypischen Strom-Wärme-Verhältnisses keine Kopplung von Strom und Wärme ausnutzen lässt. Der Einsatz von Wasserstoff ist optional, wobei im Falle eines eher geringen Strombedarfs in diesen Gebieten und hoher Verfügbarkeit von EE-Strom die vollständige Elektrifizierung der Prozesswärme durch Elektrodenkessel in Erwägung gezogen werden sollte. Es gilt zu beachten, dass die wenigen großen Hochtemperaturwärmeverbraucher individuell Lösungen zur wirtschaftlichen Dekarbonisierung ihrer Hochtemperaturprozesse finden müssen, da hierfür im Rahmen dieser Studie keine spezifischen Lösungen untersucht werden.

3.2 Perspektive II: Governance-Perspektive

Die Governance-Perspektive legt den Fokus auf die Beantwortung der Frage, wie Energie-Kooperationen zwischen Unternehmen innerhalb von Gewerbegebieten koordiniert und organisatorisch gestaltet werden können. Für die Gestaltung von Governance-Konzepten ist eine Einteilung in zwei relevante Ebenen ratsam. Die Basisebene dient jeder Energiekooperation als solides Fundament und verkörpert hauptsächlich ein Koordinations- und Organisationsforum. Die Aufbauebene beinhaltet konkrete Kooperationsmodelle und eine Koordinationsstruktur für energetische Transaktionen. Demzufolge sollte ein Governance-Konzept sowohl Transaktionen als auch Interaktionen koordinieren. Tabelle 11 enthält eine Gegenüberstellung von Interaktion und Transaktion. Interaktionen haben den Zweck des Informationsaustausches und der Beziehungspflege (z.B. Vertrauensaufbau) innerhalb einer Kooperation. Sie laufen häufig informell ab und ihnen kann oft kein direkter monetärer Wert zugeschrieben werden. Transaktionen dienen hingegen dem zielgerichteten Austausch von Gütern, Dienstleistungen oder Geld. Sie werden dokumentiert und formalisiert und haben einen bestimmbarer monetären Wert.

Tabelle 11: Gegenüberstellung von Interaktion und Transaktion

<i>Merkmal</i>	<i>Interaktion</i>	<i>Transaktion</i>
<i>Zweck</i>	wechselseitiger Informationsaustausch, Beziehungspflege etc.	zielgerichteter Austausch von Gütern, Dienstleistungen oder Geld
<i>Formalisierung</i>	oft informell	formell und dokumentiert
<i>Wert</i>	oft kein direkter monetärer Wert	bestimmbarer monetärer Wert

Für beide Ebenen, Basis- und Aufbauebene ist darüber hinaus jeweils eine strukturelle und eine prozessuale Dimension zu definieren. Die Matrix in Tabelle 12 verdeutlicht diese Einteilung grafisch. Die strukturelle Dimension umfasst die zu etablierenden Institutionen und Regeln durch Governanceformen wie Markt oder Hierarchie und bezieht sich auf den Organisationsaufbau. Die Prozessdimension identifiziert die relevanten Akteure und koordiniert den Kommunikations- und Informationsfluss sowie Prozesse der Entscheidungsfindung in der betroffenen Gruppe. Hier wird deutlich, dass Governance nicht nur die Struktur, sondern auch die Art und Weise (Prozesse) der Inter- und Transaktionen zwischen Akteuren beinhaltet [46]. Es zeigt sich außerdem, dass die Dimensionen sich gegenseitig beeinflussen und daher kaum isoliert betrachtet werden können. Die gewählte Struktur beeinflusst die Prozesse und umgekehrt. Innerhalb von Kooperationen existieren verschiedene strukturelle Ausprägungen, z.B. hinsichtlich der Bindungsintensität der beteiligten Akteure. Die Bindung kann bspw. durch befristete Verträge einerseits sehr nah am Markt liegen, andererseits durch Kapitalverflechtung eine starke Nähe zur Hierarchie aufweisen [47]. Zudem kann die prozessuale Koordination

der Kooperation sowohl eher hierarchisch, z.B. durch ein dominantes Unternehmen oder heterarchisch auf Augenhöhe gestaltet sein [47].

Tabelle 12: Einteilung der Ebenen und Dimensionen von Governance-Konzepten

	Strukturelle Dimension	Prozessuale Dimension
Basisebene <i>Fokus:</i> Koordination, Organisationsforum, Interaktionen	Governance-Form, z.B. Hierarchie, Netzwerk, Markt	Akteure, Informationsaustausch, Entscheidungsprozesse
Aufbauebene <i>Fokus:</i> Koordination Kooperationsmodelle energetische Transaktionen	Governance-Form, z.B. Hierarchie, Netzwerk, Markt	Akteure, Informationsaustausch, Entscheidungsprozesse

3.2.1 Typenunabhängiges Organisationsschema

Unabhängig des kulturellen Typs ist das Governance-Schema nach Betker [48] ein mögliches Organisationsschema der Basisebene. Das Schema ist in Abbildung 27 illustriert. Es findet bspw. bereits Anwendung im Vorzeigeprojekt FrankFurter Osten Nachhaltig (FFN) [49].

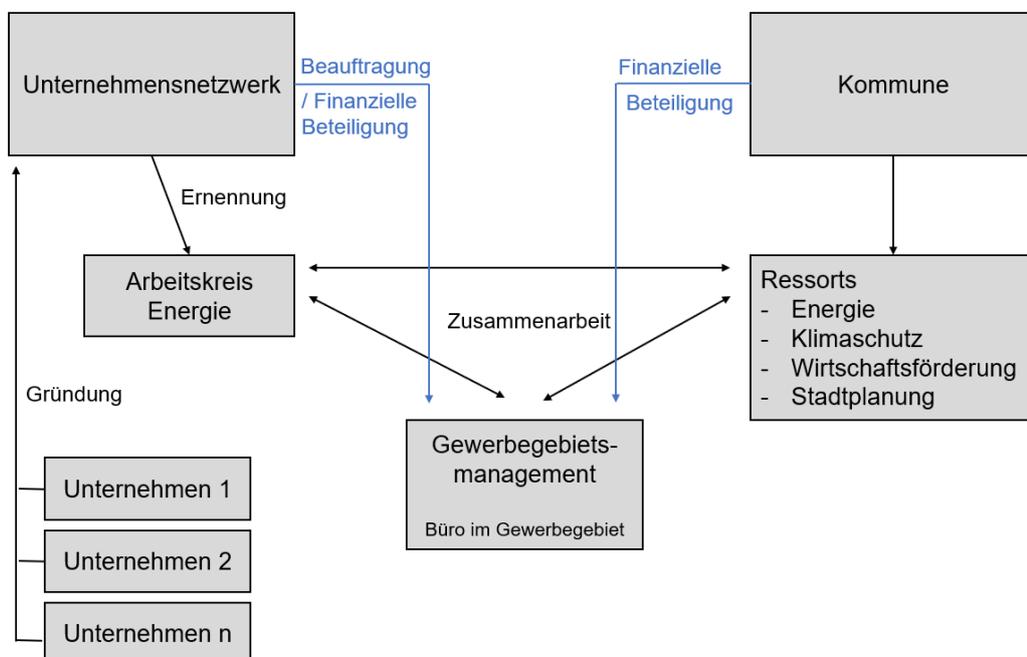


Abbildung 27: Organisationsschema für nachhaltige Gewerbegebiete nach Betker

Betker identifiziert ein Unternehmensnetzwerk, die Kommune sowie ein Gewerbegebietsmanagement als die drei tragenden Säulen eines neuen Governance-Schemas in

Gewerbegebieten. Es resultiert ein neuer Governance-Modus, für den neue Formen der Handlungskoordination zwischen den Akteuren grundlegend sind und der somit eine nachhaltige Transformation vorantreiben kann. Die hohe Bedeutung eines Parkmanagements und die wichtige Rolle von externen Unterstützern wird in der Literatur stark untermauert.

Faria et al. [50] untersuchen institutionelle Konfigurationen von Industrieller Symbiose und fassen zusammen, dass eine ideale Struktur die Unternehmen, die lokale Kommune, Forschungseinrichtungen und eine Koordinationseinheit (z.B. Parkmanagement) als Akteure berücksichtigt. Jeder dieser Akteure kann theoretisch als (externer) Unterstützer auftreten. Eine Interpretation des Parkmanagements als Unterstützer vertritt auch einer der weltweit bekanntesten EIP in Kalundborg (Dänemark) in seinem öffentlich verfügbaren Leitfaden [51]. Mortensen und Kørnøv [52] kommen zu dem Schluss, dass das Zusammenspiel der Akteure genauso wichtig für die Entstehung von EIP ist wie die ökonomische und technische Machbarkeit. Katana et al. [53] untersuchen die Rollen, welche verschiedene Unterstützer wie Kommunen, Forschungsinstitute und Geschäftsentwickler für den Wissensaustausch in der Entstehungsphase von IS spielen. Externe Unterstützer nehmen die Rollen von Katalysatoren, Moderatoren, Mediatoren und Verwaltern in IS-Netzwerken ein. Boons et al. [54] identifizieren sieben anfängliche Dynamiken in der Entstehung von IS, welche durch die jeweils agierenden Unterstützer und deren Aktivitäten charakterisiert werden können. Mainar-Toledo et al. [13] sowie [55] betonen ebenfalls die Wichtigkeit von externen Unterstützern sowie eines etablierten Park Managements, um Energie-Kooperationen realisieren zu können und die trotz ökonomischer und ökologischer Vorteile weiterhin bestehenden Hemmnisse zu überwinden. Rodin und Moser [56] untersuchen die anfänglichen Aktivitäten von externen Unterstützern zur Etablierung von Energie-Kooperationen. Beispielhaft sind hier die Organisation von Meetings, Networking und Workshops auf Parkebene, die Durchführung von Interviews mit ansässigen Unternehmen, das Zusammenbringen potenzieller Partner sowie die proaktive Motivation der Unternehmen zu nennen. Zudem wird empfohlen, dass sich die externen Unterstützer ebenfalls untereinander vernetzen, um einen Erfahrungsaustausch zu betreiben, Best-Practices festzulegen und Know-How-Kapazitäten aufzubauen. Im Rahmen des Projektes „Grün statt Grau – Gewerbegebiete im Wandel“ [57] ziehen Schack et al. [58] anhand einer Fallstudie Schlüsse für die notwendigen anfänglichen Aktivitäten zur Etablierung von EIP. Demnach sollte die Kommune einen Gewerbegebietsmanager anstellen, um wichtige Energiethemen voranzutreiben und kostenlose Fachberatungen anbieten, um konkretes Interesse zu wecken. Weiterhin soll das Gebietsmanagement die Unternehmen untereinander vernetzen und diese dabei sowohl zielgerichtet individuell ansprechen, als auch kollektive Kontaktaufnahmen vollziehen.

Die Hauptaktivitäten eines Parkmanagements beinhalten die Interaktion mit öffentlichen und privaten Stakeholdern, die Wartung der Parkinfrastruktur, die Identifikation potenzieller Synergien und Partnerschaften im Park, die parkinterne Kommunikation und die Durchführung von Trainings [59]. Als hauptsächliche Finanzierungsquellen werden öffentliche Gelder oder im Gebiet ansässige Unternehmen genannt.

Grundsätzlich ist Betkers Schema zufolge in jedem GE oder GI die Gründung eines Unternehmensnetzwerkes erforderlich, welches ggf. einen Arbeitskreis Energie ernennt. Der Arbeitskreis Energie arbeitet mit entsprechenden Ressorts der Kommune und einem Gewerbegebietsmanagement eng zusammen, um Energiekooperationen voranzutreiben. Die Finanzierung des Gewerbegebietsmanagements erfolgt entweder vollständig durch die Kommune bzw. öffentliche Gelder oder durch eine Beitragszahlung der Unternehmen im Unternehmensnetzwerk. Der weltweit bekannte EIP in Kalundborg (Dänemark) nennt eine ähnliche Struktur seinem öffentlich verfügbaren Leitfaden. Demnach kann die Unterstützerorganisation bzw. das Parkmanagement entweder eine eigene juristische Person oder eine interne Projekteinheit einer Mutterorganisation wie bspw. eines Unternehmens, einer Kommune oder einer akademischen Einrichtung sein. Die Finanzierung kann entweder vollständig von der Mutterorganisation übernommen bzw. gesponsert werden oder durch Beitragszahlungen der Mitglieder sichergestellt werden [51]. Im exemplarisch genannten Gewerbegebiet Fechenheim-Nord/Seckbach [49] bei Frankfurt hat das Gewerbeparkmanagement beispielsweise ein eigenes Standortbüro im Gewerbegebiet und besteht aus einem Standortmanager und einer Klimaschutzmanagerin. Der Standortmanager ist eine auf fünf Jahre befristete Stelle, welche von der Wirtschaftsförderung Frankfurt GmbH eingerichtet wurde. Die Klimaschutzmanagerin ist eine ebenfalls auf fünf Jahre befristete Position, die durch das Energiereferat der Stadt eingerichtet wurde. Das Standortmanagement koordiniert, organisiert und moderiert alle Belange und Prozesse im Gewerbegebiet. Zu den Aufgaben des Klimamanagements zählen kostenlose Erstberatungen der Unternehmen zu Erneuerbaren Energien, Energieeffizienz und Fördermöglichkeiten, die Erarbeitung eines Klimaschutzteilkonzepts für das Gebiet sowie die fachliche und organisatorische Begleitung von Klimaschutzmaßnahmen.

Ein Gewerbeparkmanagement sowie externe Unterstützer sind in verschiedenen Phasen einer Kooperation als Schlüsselakteure anzusehen. Abbildung 28 stellt die Aufgaben zur Etablierung einer Energie-Kooperation nach Kooperationsphasen dar. Sie beinhaltet drei Haupt-Kooperationsphasen sowie fünf untergeordnete Phasen, die sich aus einer Synthese verschiedener Quellen zu den Phasen einer Kooperation [7], [13], [47], [60], [61], [62], [63], [64] ergeben. Die inhaltlichen Aspekte der jeweiligen Phasen entstammen ebenfalls den zitierten Inspirationsquellen und sind leicht modifiziert. Wichtig ist an dieser Stelle der Hinweis, dass die Schlüsselakteure als treibende Kräfte zwar Verantwortung

für die Übernahme der Aufgaben tragen, diese jedoch nicht alle eigenständig erledigen können. Es ist vielmehr eine sinnvolle Delegation und die Zusammenarbeit mehrerer Akteure gefragt.

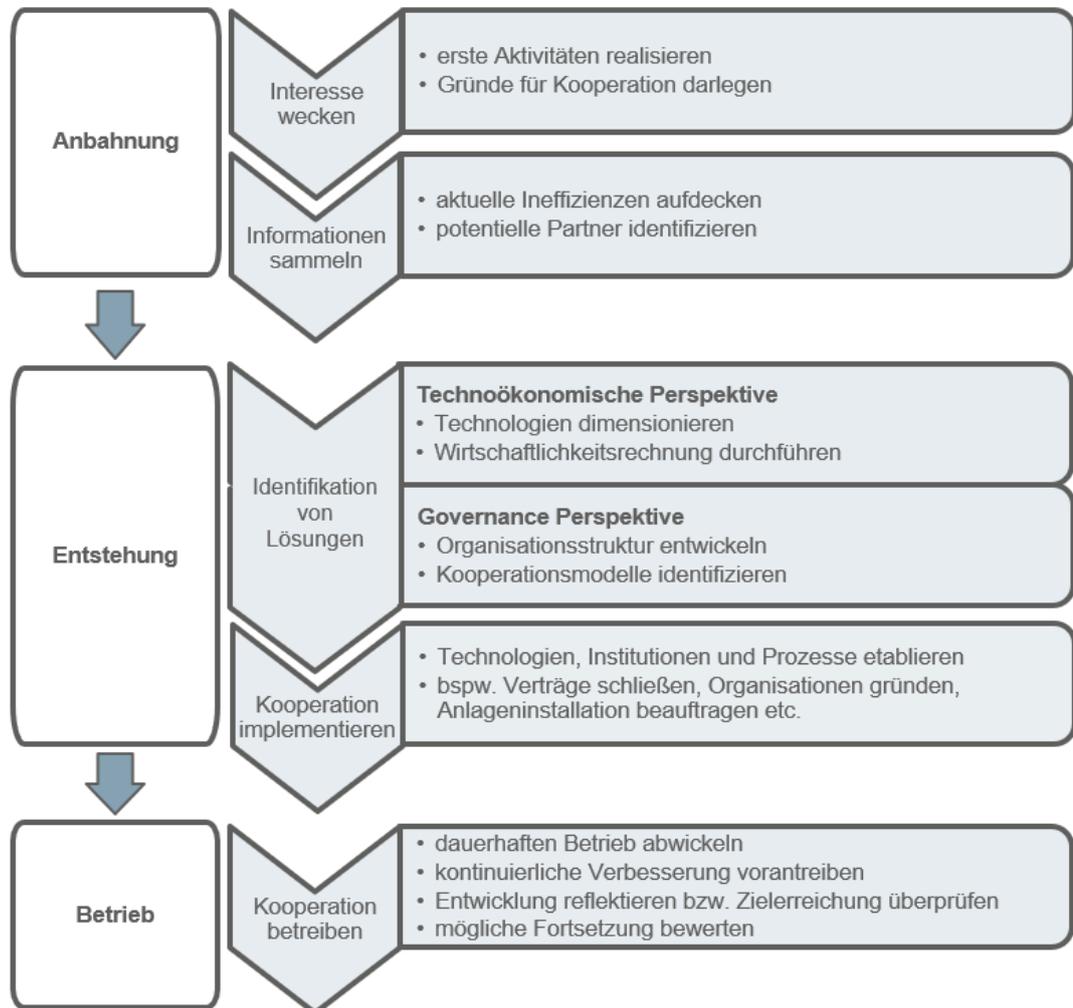


Abbildung 28: Aufgaben zur Etablierung einer Energie-Kooperation nach Kooperationsphasen

In die Anbahnungsphase fallen die Vorarbeiten für die Entstehung der Energiekooperation. Externe Unterstützer und Park-Management übernehmen die Aufgaben, Interesse bei den Stakeholdern (insbesondere den Unternehmen) zu wecken, ein Bewusstsein für Energieeffizienz und Vorteile von Kooperationen zu schaffen, die Datenerfassung zu verbessern, potenzielle Partnerschaften und aktuelle Ineffizienzen aufzudecken, technisches Know-How zu vermitteln und ein Netzwerk aufzubauen. Ist die Kooperation erfolgreich implementiert, stellt ein Gewerbeparkmanagement den Schlüssel dar, um den dauerhaften Betrieb abzuwickeln und eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Kooperation im Betrieb sicherzustellen. Ein Gewerbeparkmanagement wirkt in der Anbahnungs- und Entstehungsphase von Energiekooperationen folglich als eine Art Accelerator oder Inkubator im Gewerbegebiet. Der Fokus liegt auf der Schaffung eines Organisationsforums für Stakeholder, deren Koordination sowie der Aufnahme erster Aktivitäten.

Eine weitere grundlegende Aufgabe der geschaffenen Organisationsstruktur ist die Schaffung einer soliden Ausgangssituation für Energiekooperationen. Ziel ist die Schaffung einer vorteilhaften Basis im Gewerbegebiet, auf der konkrete Kooperationen aufgebaut werden können. Dies gilt insbesondere in Gewerbegebieten mit ungünstigen kulturellen Startbedingungen, welche in der Archetypen-Matrix in Abbildung 29 in den vierten Quadranten fallen. Um die Erfolgsaussichten für die Etablierung von Energiekooperationen in Gewerbegebieten zu steigern, sind Maßnahmen zur Steigerung der Risikobereitschaft oder zur Stärkung des Gemeinschaftssinnes notwendig. Sind diese Voraussetzungen erreicht, ist ein Gewerbegebiet einem der anderen drei Quadranten zuzuordnen. Mögliche Maßnahmen zur Erreichung des ersten oder dritten Quadranten sind in Abbildung 29 in den Rechtecken aufgeführt, wobei zur Erreichung des zweiten Quadranten jeweils eine Kombination erforderlich ist.

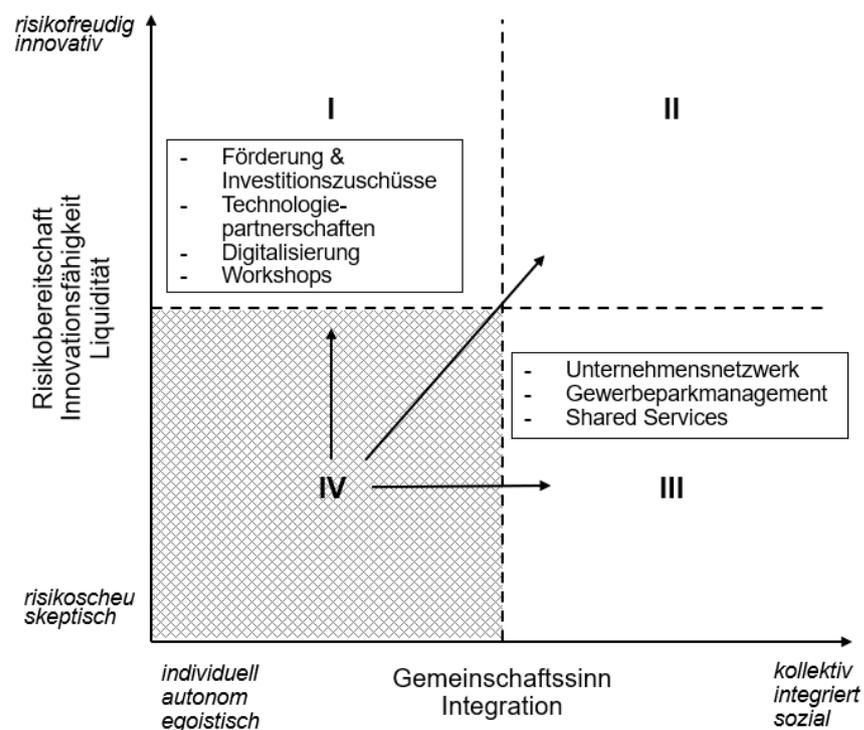


Abbildung 29: Maßnahmen zur Schaffung einer günstigen Ausgangssituation für Energiekooperationen in Gewerbegebieten

Da die Risikobereitschaft mit der Liquidität steigt, sind Investitionszuschüsse für nachhaltige Technologien zur gemeinsamen Energieerzeugung, -wandlung, -speicherung und -nutzung ein probates politisches Mittel. Eine weitere denkbare finanzielle Fördermaßnahme ist eine Energy-Sharing-Prämie je direkt genutzter Kilowattstunde lokal erzeugter Energie innerhalb des Gewerbegebietes, wie sie bspw. der Bundesverband Erneuerbare Energie fordert [65]. Außerdem lässt sich die Innovationsbereitschaft steigern, indem ein größeres Vertrauen in die eingesetzten Technologien und die erzielba-

ren Vorteile geschaffen wird. Dies kann bspw. durch Workshops oder Technologiepartnerschaften mit Forschungseinrichtungen gelingen. In kleinen Pilotprojekten können Technologien zunächst experimentell eingesetzt werden, um deren Betrieb und Vorteile demonstrieren und Unsicherheiten ausräumen zu können. Ein wichtiger Aspekt neuer Technologien ist häufig deren digitale Dimension, da bspw. viertelstündliche Energiedaten von Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen ausgelesen und geteilt werden müssen und eine intelligente Steuerung der Anlagen vorgesehen ist. Hier können Technologiepartnerschaften Unsicherheiten abbauen und mögliche Bedenken, z.B. zum Datenschutz, ausgeräumt werden. Selbst außerhalb des Themenfeldes Energie kann das Vortreiben einer grundsätzlichen Digitalisierung im Gewerbegebiet zu einer steigenden digitalen Affinität und größeren Offenheit gegenüber digitalen Technologien beitragen, von der auch potenzielle Energie-Kooperationsvorhaben profitieren können. In manchen Gebieten sind bspw. digitale Fahrerbörsen für Mitfahrgelegenheiten von und zum Arbeitsplatz denkbar oder digitale Plattformen, auf denen Abfallmengen angeboten werden können, um eine weitere stoffliche Verwendung durch andere Unternehmen zu ermöglichen. Während alle zuvor aufgezählten Maßnahmen eine Bewegung auf der Ordinate nach oben bewirken, ist bei der letztgenannten die Anmerkung angebracht, dass es sich dabei auch um eine Bewegung auf der Abszisse handeln kann. Die gemeinsame Organisation und Inanspruchnahme von Dienstleistungen (Shared Services), auch außerhalb des Energiebereichs, wie bspw. Grünflächenpflege, Sicherheitsmaßnahmen, Kinderbetreuung oder Kantinen, steigert den Gemeinschaftssinn innerhalb des Gewerbegebietes. Außerdem können Shared Services Ausgangspunkt und Initialzündung für eine Verfestigung und Ausweitung der Zusammenarbeit zwischen Unternehmen hin zu Industrieller Symbiose sein [15]. Zudem gilt es zu berücksichtigen, dass die Institutionalisierung selbst, d.h. die Etablierung eines Unternehmensnetzwerkes, eines Gewerbeparkmanagements und regelmäßiger Meetings auf Gewerbegebietesebene, eine Stärkung des Gemeinschaftssinnes bewirken kann.

3.2.2 Typenabhängige Kooperationsmodelle

Die folgenden Kooperationsmodelle beziehen sich auf die Aufbauebene von Energiekooperationen in Gewerbegebieten. Sie basieren auf dem Grundprinzip, dass durch Erhöhung der Autarkie und des Eigenverbrauches lokal erzeugter EE ökonomische sowie gegebenenfalls auch ökologische und soziale Vorteile erzielt werden können. Sie haben daher manche Stärken, Chancen und Risiken gemeinsam. In allen Kooperationsmodellen können die Energiekosten durch lokal erzeugte und verbrauchte erneuerbare Energien gesenkt werden. Eine weitere Stärke sind verringerte Netzentgelte der Unternehmen, da lokal genutzter Strom nur auf der Verteilnetzebene übertragen wird und eine

Nutzung der Übertragungsnetze entfällt. Zusätzlich reduziert die lediglich lokale Energieübertragung folglich Übertragungsverluste und bewirkt somit eine volkswirtschaftliche Effizienzsteigerung. Zudem ergeben sich weitere wirtschaftliche Vorteile für Gewerbegebiete durch die Monetarisierung von Überschussenergie und Flexibilitäten auf externen Energiemärkten außerhalb der Systemgrenze. Nehmen Gewerbegebiete über Aggregatoren an diesen Märkten teil, erhöht sich außerdem der volkswirtschaftliche Nutzen, da der Wettbewerb auf den nationalen Energiemärkten zunimmt. Für alle Kooperationsmodelle ergeben sich in diesem Kontext Chancen durch eine mögliche Etablierung regionaler Flexibilitätsmärkte, da diese die Vermarktungsmöglichkeiten von lokalen Flexibilitäten verbessern würden. Weiterhin können alle Kooperationsmodelle für die Gewerbegebiete einen Imagegewinn bedeuten, auch wenn dieser unterschiedlich stark ausfallen kann. Darüber hinaus besteht für alle Kooperationsmodelle das Risiko des Rückzugs eines großen Unternehmens aus der Kooperation oder gar aus dem Gewerbegebiet, der die wirtschaftlichen und technischen Kalkulationen dieser Modelle obsolet machen oder zumindest verschlechtern könnte.

Trotz dieser Gemeinsamkeiten unterscheidet sich die Eignung verschiedener Kooperationsinstrumente zwischen den identifizierten kulturellen Typen. Die empfohlene Zuordnung ist der folgenden Instrumenten-Archetypen-Matrix in Tabelle 13 zu entnehmen. Optional denkbare Kooperationsinstrumente für die Archetypen sind in Klammern dargestellt. Ein Aggregator sowie Power-Purchase-Agreements (PPA) können als Instrumente in jedem archetypischen Gewerbegebiet eingesetzt werden. Die genannten Instrumente wirken daher nicht konstitutiv für das jeweilige Kooperationsmodell eines Gewerbegebietes. Konstitutiv für das jeweilige Kooperationsmodell wirken die drei Instrumente lokale Energiemärkte (LEM), Energiegenossenschaften und Contracting. Sie sind wesentlich für die Unterscheidung der drei Kooperationsmodelle für die drei archetypischen Gewerbegebiete.

Tabelle 13: Instrumenten-Archetypen-Matrix

<i>Archetypen</i>	<i>LEM</i>	<i>Genossenschaft</i>	<i>Contracting</i>	<i>Aggregator</i>	<i>PPA</i>
<i>Gebiete mit innovativen Individualisten</i>	X			(X)	(X)
<i>Gebiete mit fortschrittlichen Kollektivisten</i>		X		(X)	(X)
<i>Gebiete mit sicherheitsorientierten Kollektivisten</i>			X	(X)	(X)

In den folgenden schematischen Darstellungen aller Kooperationsmodelle sind die Elemente außerhalb der Systemgrenze des Gewerbegebietes dieselben, sodass nur einmal an dieser Stelle darauf eingegangen wird. Von größerem Interesse ist die Struktur innerhalb der Systemgrenze. Unabhängig vom Archetyp und damit auch vom Kooperationsmodell werden Differenzmengen, die nicht lokal bereitgestellt werden können, extern an Strommärkten beschafft. Dazu ist häufig ein Energieversorgungsunternehmen (EVU), ein Aggregator oder ein sonstiger Dienstleister zwischengeschaltet, sodass das Gewerbegebiet nicht unbedingt direkt an den Strommärkten handeln muss. Ebenso ist der Abschluss von PPA für die kollektive Beschaffung von Strom denkbar. Weiterhin fließen Netzentgelte an die Netzbetreiber, da in allen Gewerbegebieten weiterhin das öffentliche Verteilnetz zur lokalen Stromübertragung genutzt wird und bei der externen Beschaffung auch Übertragungsnetzentgelte anfallen können. Lokal erzeugter Überschussstrom, der nicht im Gewerbegebiet abgenommen wird, wird extern vermarktet. Dazu kann ebenfalls ein Dienstleister zwischengeschaltet sein. Zudem ist es möglich, dass Unternehmen für eingespeiste Strommengen von Netzbetreibern je nach Anlagengröße eine Einspeisevergütung oder eine Marktprämie nach EEG erhalten. Weiterhin können Flexibilitäten wie Batteriespeicher oder steuerbare Lasten im Gewerbegebiet durch einen Aggregator auf externen Flexibilitätsmärkten vermarktet werden. Alle weiteren Ausführungen fokussieren die Struktur innerhalb der Systemgrenze.

A. Lokaler Energiemarkt für innovative Individualisten

Das wesentliche Kooperationsinstrument des Kooperationsmodells für archetypische Gewerbegebiete mit innovativen Individualisten ist der Lokale Energiemarkt (LEM). In Abbildung 30 ist das Kooperationsmodell schematisch dargestellt. Tabelle 14 verdeutlicht die Ausprägungen der wichtigsten Charakterisierungsmerkmale des Kooperationsmodells.

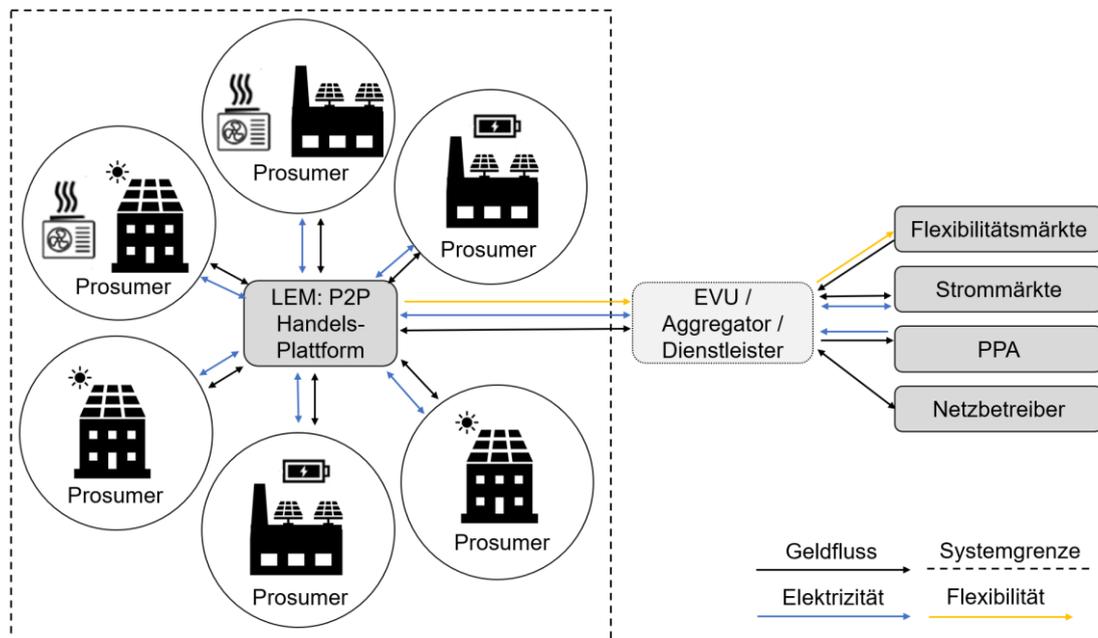


Abbildung 30: Kooperationsmodell für innovative Individualisten (schematisch)

Tabelle 14: Merkmalsausprägung des lokalen Energiemarktes

Merkmale	Ausprägung		
M1 Bindungsintensität	Markt		Hierarchie
M2 Investitionen in Vermögenswerte	individuell	kollektiv	dritte Partei
M3 Entscheidungsprozesse	zentral	dezentral	multilateral
M4 Nutzenverteilung	individuell		kollektiv

Die Bindung der einzelnen Unternehmen basiert in diesem Kooperationsmodell auf Transaktionen und Verträgen, da ein lokaler Energiemarkt für Elektrizität etabliert wird. Es gibt keine gemeinsame juristische Person oder Kapitalverflechtung der teilnehmenden Unternehmen. Die Investitionen in Vermögenswerte, wie bspw. PV-Anlagen auf den Gebäudedächern, Batteriespeicher oder Wärmepumpen, werden von jedem Unternehmen individuell getätigt, sodass die Anlagen deren Eigentum sind. Die Unternehmen tragen damit jeweils allein das Risiko für ihre individuellen Anlageninvestitionen. Der er-

zeugte Strom wird von jedem Unternehmen bevorzugt zur Deckung des eigenen Strombedarfes als Eigenverbrauch genutzt. Überschüssiger Strom kann freiwillig innerhalb des Gewerbegebietes auf dem LEM über eine Handelsplattform direkt zwischen ansässigen Unternehmen gehandelt werden. Der LEM ist daher ein Peer-to-Peer-(P2P)- Markt. Erst wenn auch auf dem LEM keine passende Nachfrage für den angebotenen Strom vorliegt, wird der Strom extern vermarktet. Weiterhin können flexible Lasten oder Batteriespeicher als Flexibilitäten von den Unternehmen eingesetzt werden, um den erzielbaren Gewinn auf dem LEM durch Lastmanagement und Demand Response zu maximieren. Flexibilitäten können somit nur zusätzlich extern über einen Aggregator vermarktet werden, sofern sie nicht bereits mit ihrer vollen Kapazität zur Gewinnmaximierung auf dem LEM eingesetzt werden. Die Entscheidungen werden folglich dezentral in jedem teilnehmenden Unternehmen getroffen und die Nutzenverteilung gestaltet sich individuell. Durch das wettbewerbsorientierte Marktumfeld handeln die Akteure nach ökonomischen Anreizen und sind tendenziell auf ihre individuelle Nutzenmaximierung bedacht. Einzelne Unternehmen können dadurch stärker profitieren als andere ebenfalls am LEM teilnehmende Nachbarn. Für den Stromhandel auf LEM ist eine Handelsplattform erforderlich. Die Abwicklung und Abrechnung der Transaktionen weisen daher einen hohen Automatisierungsgrad auf. In ihrer weiteren Ausgestaltung weisen LEM vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten auf [66]. Es wird ein Plattformbetreiber benötigt, welcher ein externer Vermittler, ein EVU oder ein Gewerbeparkmanager sein kann. Zudem kann die Preisbildung entweder als Uniform-Pricing oder als Pay-as-bid-Modell erfolgen. Die hier gewählte Gestaltung orientiert sich am Projekt pebbles im Allgäu [67] sowie an einer Feldstudie in der Schweiz [68] zu realen P2P-Märkten. Eine blockchain-basierte Handelsplattform läuft auf den installierten Smart Metern der Teilnehmer. Über eine Web-Anwendung können die Marktteilnehmer ihren minimalen Verkaufspreis sowie ihren maximalen Einkaufspreis für lokalen Strom auf dem LEM angeben. Der minimale Verkaufspreis orientiert sich dabei an der alternativ erzielbaren Vergütung bei externer Vermarktung des lokal erzeugten grünen Stroms, der maximale Einkaufspreis am Preis für Strombezug aus dem öffentlichen Netz außerhalb der Systemgrenze. Die Stromzuweisung erfolgt über zweiseitige Auktionsverfahren in einem viertelstündlichen Rhythmus. Die Preisbildung ist als Pay-as-bid-Modell gestaltet, bei dem der Abnahmepreis aus dem Durchschnitt der bezuschlagten Gebote resultiert. Es findet somit ein größtenteils automatisierter Handel zu dynamischen Preisen statt. Der Plattformbetreiber kümmert sich im Rahmen der außerhalb der Systemgrenze dargestellten Möglichkeiten um Differenzmengen für das Gewerbegebiet, welche nicht durch die lokale Energieerzeugung abgedeckt sind oder welche nicht lokal genutzt werden können. Die Ergebnisse der SWOT-Analyse zu diesem Kooperationsmodell sind in Tabelle 15 aufgeführt.

Tabelle 15: SWOT-Analyse Lokaler Energiemarkt

Stärken	Schwächen	Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> - individuelle ökonomische Nutzenmaximierung - Autonomie durch dezentrale Investitions- und Betriebsentscheidungen für Assets - Anreize für netzdienliches Verhalten und Flexibilitätseinsatz in Form von E-Fahrzeugen und Demand Response - Stromsteuerbefreiung bei lokaler Direktvermarktung nach § 9 Abs. 1 Nr. 3 b) StromStG im Radius von 4,5 km um den Ort der Erzeugung [69] 	<ul style="list-style-type: none"> - anspruchsvolle digitale Infrastruktur aus Smart-Metern, blockchain-basierter Online-Handelsplattform mit automatisierter Handelsabwicklung und benutzerfreundliche Web-App - ungerechte Nutzenverteilung innerhalb des Gebiets möglich - LEM nicht für Wärme geeignet [66] - Wahrscheinlichkeit großer Vorhaben wie WEA, Biogasanlagen und BHKW sinkt aufgrund individueller Investiertätigkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> - Integration von Bürgern (Prosumer) im gleichen Verteilnetz als Marktteilnehmer möglich - politische Unterstützung aufgrund des innovativen Charakters - Imagegewinn - technologischer Fortschritt ermöglicht digitale Technologien als State-of-the-Art für alle Akteure - Änderungen des regulatorischen Rahmens erforderlich [69] : <ul style="list-style-type: none"> - Abbau der Energielieferantenpflichten - Einführung dynamischer Netzentgelte - Förderung / Vergünstigung von Lokalstrom 	<ul style="list-style-type: none"> - Unternehmen scheuen individuelle Investitionen - geringe Liquidität auf dem LEM bei zu wenigen Marktteilnehmern - Abhängigkeit von Plattformanbietern mit digitalem Know-How - Markteintrittsbarrieren für kleine Unternehmen durch erforderliches digitales Know-How oder unverhältnismäßig hohe Investitionen in digitale Infrastruktur

B. Energiegenossenschaft für fortschrittliche Kollektivisten

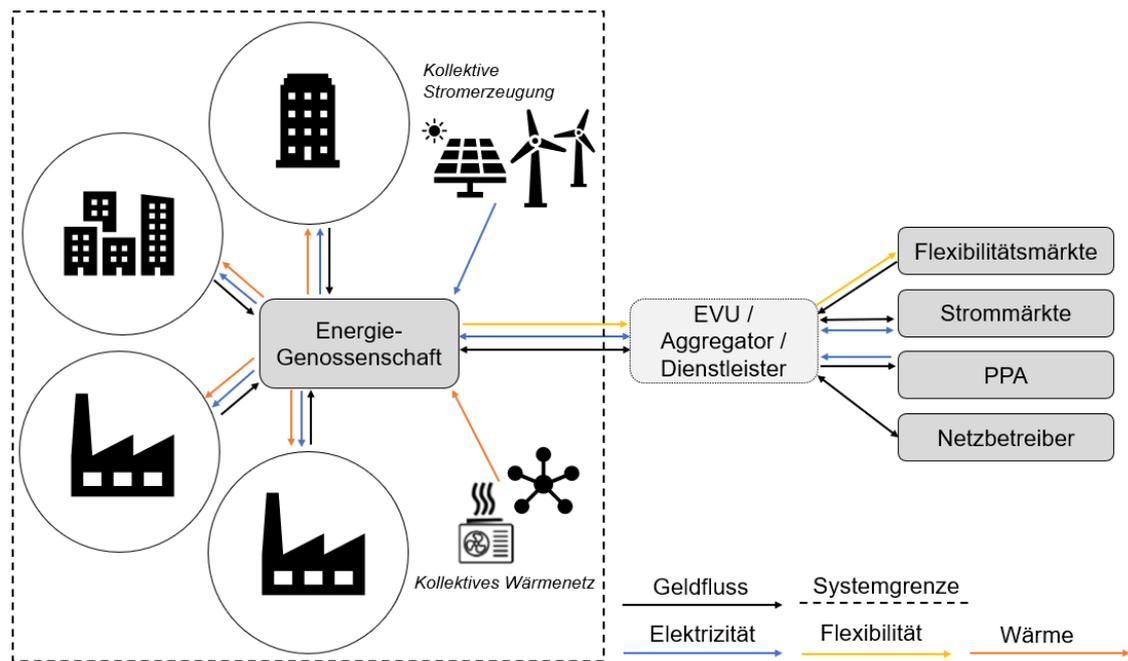


Abbildung 31: Kooperationsmodell für fortschrittliche Kollektivisten (schematisch)

Tabelle 16: Merkmalsausprägung der Energiegenossenschaft

Merkmale	Ausprägung		
M1 Bindungsintensität	Markt		Hierarchie
M2 Investitionen in Vermögenswerte	individuell	kollektiv	dritte Partei
M3 Entscheidungsprozesse	zentral	dezentral	multilateral
M4 Nutzenverteilung	individuell		kollektiv

Die Bindung der Unternehmen basiert in diesem Kooperationsmodell auf einer Kapitalverflechtung in der Hierarchie einer Energiegenossenschaft. Es wird somit durch die teilnehmenden Unternehmen eine juristische Person etabliert. Jedes Unternehmen kann freiwillig durch den Kauf von Genossenschaftsanteilen zu einem Mitglied der Energiegenossenschaft werden. Die Investitionen in Vermögenswerte, wie bspw. Windenergieanlagen, Freiflächen-PV-Anlagen, Batteriespeicher, zentrale Blockheizkraftwerke und Wärmepumpen, Wärmespeicher und Wärmenetze werden kollektiv über die Genossenschaft getätigt und finanziert. Dies ermöglicht die Realisierung von Technologien mit hohen Investitionskosten wie bspw. Windenergie- oder Biogasanlagen. Auch PV-Anlagen auf Dachflächen der Unternehmen sind denkbar, indem die Dachflächen an die Genossenschaft verpachtet werden, damit diese dort kollektive PV-Anlagen installieren kann. Die Versorgungsinfrastruktur, z.B. Wärme- und Stromnetze, können entweder öffentli-

che oder private Netze (Microgrids) sein. Während als Stromnetz das bereits vorhandene Verteilnetz genutzt werden kann, sind in vielen Gewerbegebieten keine Wärmenetze vorhanden. Die Finanzierung eines privaten Wärmenetzes über eine Genossenschaft kann daher eine interessante Option sein [66]. Die Unternehmen teilen das Risiko für die teils hohen Anlagen- und Infrastrukturinvestitionen. Entscheidungen werden multilateral getroffen, da Genossenschaften demokratisch nach dem Prinzip „eine Person, eine Stimme“ organisiert sind. Die Stimme jedes Mitgliedes hat in der Mitgliederversammlung das gleiche Gewicht, unabhängig von der Anzahl der gehaltenen Anteile. Gewinnmaximierung stellt lediglich ein nachrangiges Ziel dar [66] [70]. Der ökonomische Nutzen wird gleichmäßig unter den Mitgliedern aufgeteilt, indem die gelieferte Energie, z.B. Strom aus lokalen EE-Anlagen und Wärme aus dem Nahwärmenetz, zu einem kollektiven Fixpreis-Tarif je Kilowattstunde geliefert wird. Die externen Vermarktungserlöse werden anteilig an die Mitglieder verteilt, z.B. in Abhängigkeit des investierten Kapitals. Die Verteilung der lokal erzeugten Energie erfolgt proportional zu der viertelstündlichen Nachfrage der Teilnehmer, häufig durch einen Community Energy Manager [71]. Die Tätigkeiten des Community Energy Managers wie Abwicklung und Abrechnung der Energie können entweder von der Energiegenossenschaft übernommen oder an einen externen Dienstleister vergeben werden. Im erstgenannten Fall treten die Energiegenossenschaften als EVU auf [66]. In Tabelle 17 sind die Ergebnisse der SWOT-Analyse zu diesem Kooperationsmodell aufgeführt.

Tabelle 17: SWOT-Analyse Energiegenossenschaft

Stärken	Schwächen	Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> - Risikoaufteilung durch geteilte Investitionen - hohe Investitionssummen möglich, sodass Wärmenetz, WEA, BHKW und Biogasanlagen realisierbar sind - Ausnutzung von Skaleneffekten bei spezifischen Investkosten und Anlagen effizienz - sozial gerechte Nutzenverteilung durch einheitliche Energiepreise - Stärkung des sozialen Zusammenhalts - Demokratisierung der Energiewende - Bürgerbeteiligung 	<ul style="list-style-type: none"> - langwierige Entscheidungsprozesse - administrativer Aufwand für Abrechnung der Mitglieder - geringere ökonomische Effizienz als ein Markt - um den Status als BEG nach §3 EEG zu erhalten, ist die Beteiligung von natürlichen Personen als Mitglieder obligatorisch 	<ul style="list-style-type: none"> - Beschäftigte der ansässigen Unternehmen als natürliche Personen beteiligen [72] - politische Unterstützung aufgrund des sozialen Charakters - Imagegewinn - Änderungen des regulatorischen Rahmens erforderlich: - gesetzliche Verankerung des Energy Sharing im deutschen Recht, die Privilegien wie z.B. eine Energy-Sharing-Prämie garantiert [66] [65] 	<ul style="list-style-type: none"> - Energy-Sharing ist bisher nicht in deutsches Recht integriert - ggf. müssen die rechtlichen Pflichten eines Energielieferanten erfüllt werden [66] - finanzielle und technische Herausforderungen bei Großprojekten wie z.B. Bau eines Wärmenetzes überfordern die Genossenschaftsmitglieder

C. Contracting für sicherheitsorientierte Kollektivisten

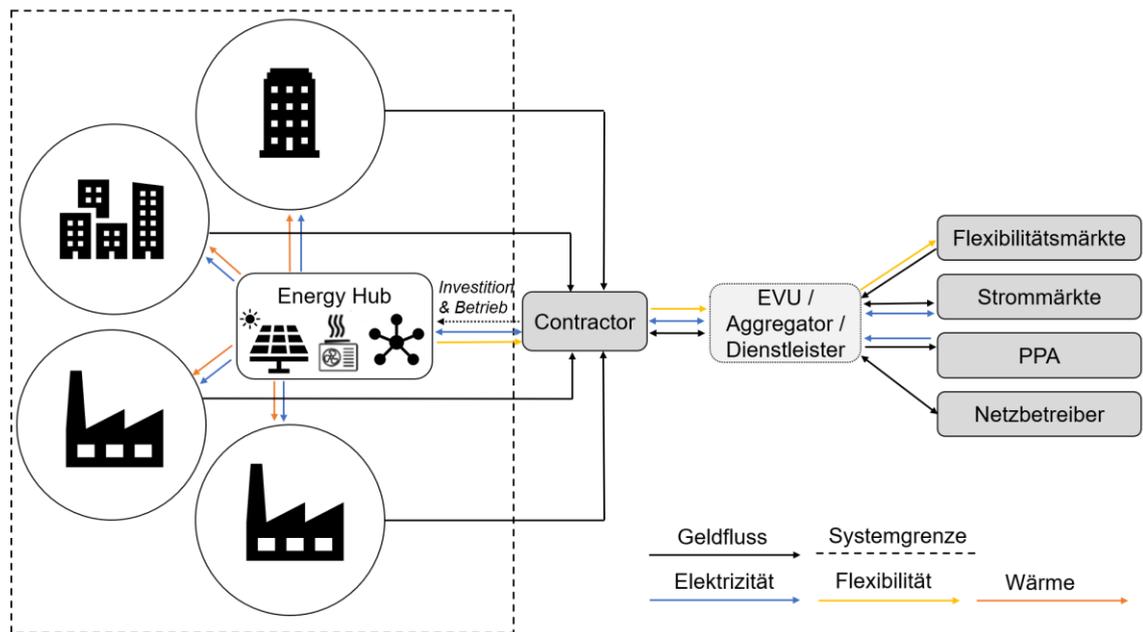


Abbildung 32: Kooperationsmodell für sicherheitsorientierte Kollektivisten (schematisch)

Tabelle 18: Merkmalsausprägung des Contracting-Modells

Merkmale	Ausprägung		
M1 Bindungsintensität	Markt		Hierarchie
M2 Investitionen in Vermögenswerte	individuell	kollektiv	dritte Partei
M3 Entscheidungsprozesse	zentral	dezentral	multilateral
M4 Nutzenverteilung	individuell		kollektiv

Das Prinzip des Kooperationsmodells für den Archetyp 3 weist einige Parallelen zum Modell für den Archetyp 2 auf, wie durch die ähnlichen Schemata verdeutlicht wird. Die hauptsächlichen Unterschiede liegen darin, dass keine juristische Person geschaffen wird und die Investitionen daher nicht kollektiv durch die Gemeinschaft, sondern durch eine dritte Partei getätigt werden. Die dritte Partei ist der sogenannte Contractor. Der Contractor übernimmt die Investitionen sowie den Betrieb und die Wartung von Energieanlagen, um für die Unternehmen im Gewerbegebiet eine effiziente und kostengünstige Energieversorgung zu gewährleisten. Dies geschieht häufig über ein zentrales Energy Hub im Gebiet. Ein Energy Hub ist ein System, welches verschiedene Energiequellen und -technologien in einem integrierten Netz zusammenführt. Das Ziel ist die effiziente Energiebereitstellung durch Kopplung verschiedener Energieträger wie bspw. Elektrizität und Wärme. Wie bei den Genossenschaften, ist neben der zentralen Energieerzeugung ebenfalls die dezentrale Erzeugung, z.B. durch PV-Anlagen auf den Dachflächen

der Unternehmen möglich, wobei der Contractor Eigentümer der PV-Anlage wäre. Für dezentrale PV-Anlagen gibt es sogar Modelle der Bürgerbeteiligung an gewerblichen PV-Anlagen, in denen die Bürger die Anlagen finanzieren und dafür eine Verzinsung auf ihre Einlage erhalten [73]. So können auch Projekte mit längeren Amortisationszeiten und eher geringer Verzinsung umgesetzt werden, welche für Gewerbe und Industrie zwar inakzeptable sind, für Privatinvestoren jedoch durchaus lohnenswert sein können. Als Eigentümer der Vermögenswerte obliegt dem Contractor auch die Entscheidung über die Fahrweise der Anlagen sowie deren Wartung und Instandhaltung. Zwar hängt die Beurteilung weiterer Entscheidungsprozesse stark davon ab, wie sich das Gewerbegebiet bezogen auf die Verhandlungen mit dem Contractor abstimmt und wer die Verhandlungen führt, jedoch ist von einer zunehmenden Zentralisierung von Entscheidungsprozessen auszugehen. Das Gewerbegebiet interagiert mit dem Contractor möglicherweise über die größten Energieverbraucher im Gebiet, da diese für den Contractor die wichtigsten Geschäftspartner sind und umgekehrt ein hohes Interesse an einer Optimierung der Energieversorgung haben. Die Nutzenverteilung gestaltet sich kollektiv, da die ansässigen Unternehmen einen vertraglich festgelegten fixen Preis je Kilowattstunde für die vom Contractor bezogene Energie bezahlen. Es handelt sich somit um Energieliefer-Contracting. Als alternative Bezeichnung für den Contractor wird häufig der Begriff Energy Service Company (ESCO) verwendet und das Modell kann auch als Energy-as-a-Service bezeichnet werden. Differenzmengen beschafft und vermarktet der Contractor im Rahmen der außerhalb der Systemgrenze dargestellten Möglichkeiten. Die Ergebnisse der SWOT-Analyse zu diesem Kooperationsmodell sind in Tabelle 19 aufgeführt.

Tabelle 19: SWOT-Analyse Contracting

Stärken	Schwächen	Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> - Auslagerung des Investitionsrisikos auf den Contractor - Kostensicherheit und Planbarkeit, da nur ein vertraglich vereinbarter Energiepreis zu zahlen ist - administrativer Aufwand gering, da Contractor Betrieb, Abwicklung und Wartung übernimmt 	<ul style="list-style-type: none"> - langfristige Abhängigkeiten vom Contractor und dessen Konditionen - weniger Autonomie und Kontrolle der Energieversorgung - geringere ökonomische Effizienz durch Margen des Contractors 	<ul style="list-style-type: none"> - spezialisierte Betriebsführung des Contractors steigert Effizienz der Anlagen - Imagegewinn 	<ul style="list-style-type: none"> - finanzielle Probleme des Contractors gefährden sichere Energieversorgung des Gebietes - durch Preisveränderungen auf Energiemärkten können die langfristig vereinbarten Konditionen unvorteilhaft werden

4 Fazit

Das Methoden- und Handlungsset liefert einen strukturierten Ansatz, für die Entwicklung einer Strategie zur energetischen Transformation von Gewerbegebieten. Die Schritt-für-Schritt Schablone zeigt Abbildung 33

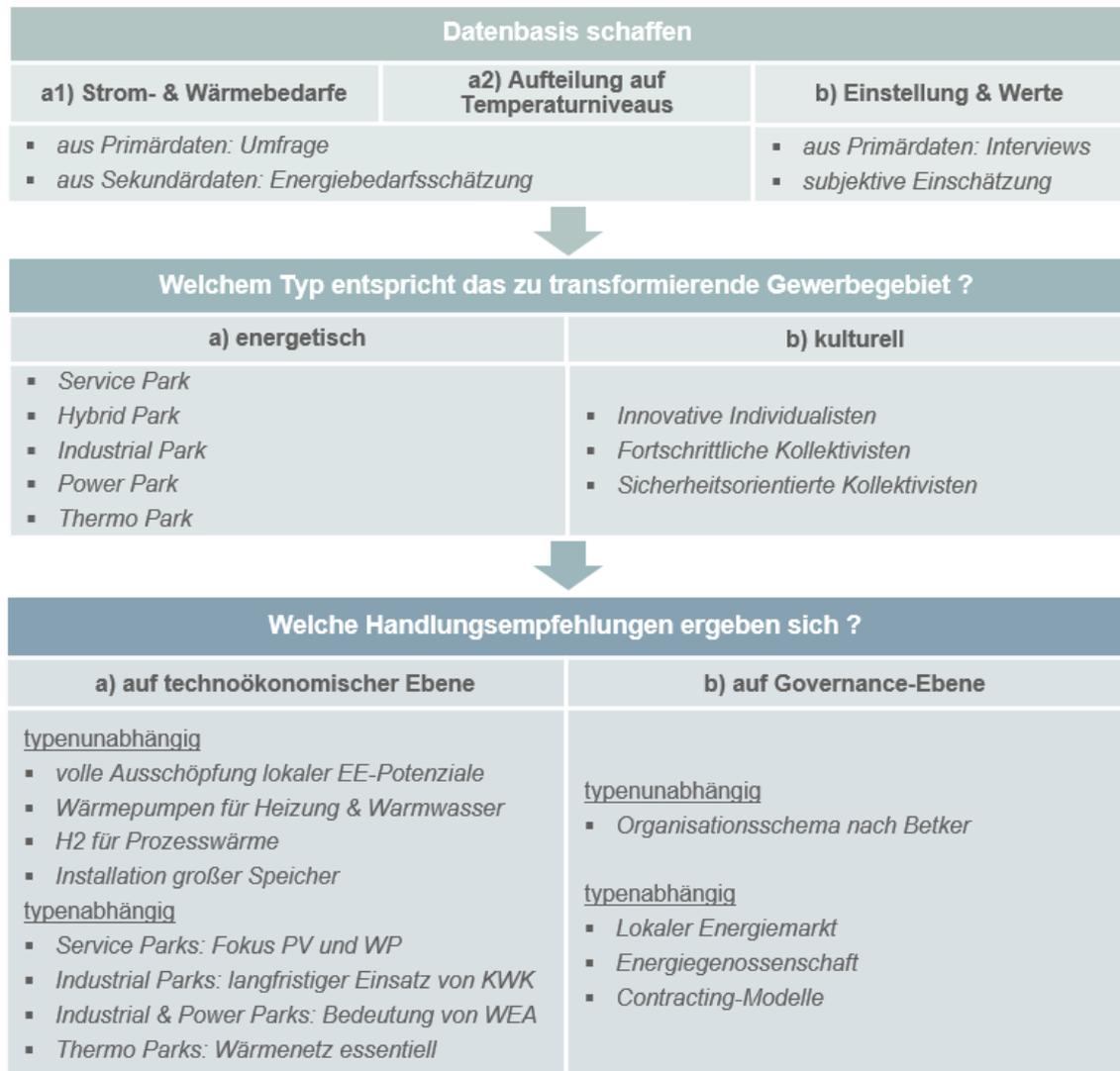


Abbildung 33: schematische Darstellung der Projektergebnisse

Schritt 1: Datenbasis schaffen

Bevorzugt sollten Primärdaten aus Abfragen und Interviews erhoben und verwendet werden. Falls diese nicht verfügbar sind, können Sekundärdaten genutzt werden, um den Energiebedarf anhand der entwickelten Methode zu schätzen. Zudem können Einstellungen und Werte des Gebietes durch Interviews ermittelt werden, damit eine subjektive Einschätzung vermieden wird.

Schritt 2: Identifikation des Typs

Zur Bestimmung des energetischen Typs werden die Energieverbräuche hinsichtlich des Strom-Wärme-Verhältnisses und der Wärmeniveaus analysiert. Daraus ergibt sich einer der fünf energetischen Typen: Service, Hybrid, Industrial, Power oder Thermo Park. Außerdem wird der kulturelle Typ durch die Untersuchung von Wertelogiken und Einstellungen ermittelt. Es resultiert einer von drei kulturellen Typen: Innovative Individualisten, Fortschrittliche Kollektivisten oder Sicherheitsorientierte Kollektivisten. Diese duale Typologie bildet die Grundlage für die sich anschließende Ableitung spezifischer Handlungsempfehlungen.

Schritt 3: Handlungsempfehlungen

Auf der technoökonomischen Ebene, sowie der Governance-Ebene werden sowohl typenunabhängige als auch typenabhängige Ansätze unterschieden.

Aus technoökonomischer Sicht sollten unabhängig vom Typ lokale EE-Potenziale vollständig ausgeschöpft, Wärmepumpen für Heizung und Warmwasser eingesetzt, Wasserstoff für Prozesswärme genutzt und große Speicher installiert werden. Typenabhängig wird für Service Parks der Fokus auf Dachflächen-PV und Wärmepumpen gelegt. Für Industrial Parks ist ein langfristiger Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung ratsam. Insbesondere Industrial & Power Parks profitieren von Windenergieanlagen, während in Thermo Parks ein Wärmenetz essenziell ist.

Im Bereich der Governance ist typenunabhängig das Organisationsschema nach Betker zu empfehlen. Abhängig vom kulturellen Typ des Gebiets können lokale Energiemärkte, Energiegenossenschaften oder Contracting-Modelle implementiert werden, um Energiekooperationen zu fördern.

Die systematische Anwendung des Methoden- und Handlungssets ermöglicht die Entwicklung einer maßgeschneiderten Strategie zur nachhaltigen und kosteneffizienten Transformation von Gewerbegebieten. Abschließend ist festzustellen, dass eine praxisnahe Validierung der entwickelten Modelle notwendig ist, um deren Anwendbarkeit und Mehrwert in realen Settings zu bestätigen. Zukünftige Forschungen sollten sich darauf konzentrieren, die aufgezeigten Modelle und Konzepte in realen Projekten zu testen und weiterzuentwickeln. Es gilt zu berücksichtigen, dass die Projektergebnisse zwar eine strategische Inspiration liefern, in der operativen Umsetzung jedoch flexible Anpassungen an die spezifischen regionalen Gegebenheiten sowie detailliertere technische Planungen unerlässlich sind.

Literaturverzeichnis

- [1] R. McKenna, C. Herbes und W. Fichtner, "Energieautarkie: Vorschlag einer Arbeitsdefinition als Grundlage für die Bewertung konkreter Projekte und Szenarien," *Z Energiewirtschaft*, Jg. 39, Nr. 4, S. 235–252, 2015, doi: 10.1007/s12398-015-0164-1.
- [2] R. McKenna, T. Jäger und W. Fichtner, "Energieautarkie – ausgewählte Ansätze und Praxiserfahrungen im deutschsprachigen Raum," *uwf*, Jg. 22, Nr. 4, S. 241–247, 2014, doi: 10.1007/s00550-014-0339-y.
- [3] E. Caramizaru und A. Uihlein. "Energy communities: an overview of energy and social innovation." Zugriff am: 8. Dezember 2024. [Online.] Verfügbar: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119433>
- [4] European Committee of the Regions: Commission for the Environment, Climate Change and Energy, M. Gancheva, S. O'Brien, N. Crook und C. Monteiro, *Models of local energy ownership and the role of local energy communities in energy transition in Europe*. Publications Office, 2018.
- [5] AG Energiebilanzen, "Auswertungstabellen zur Energiebilanz in Deutschland: Daten für die Jahre von 1990 bis 2023," 2024. Zugriff am: 24. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2023/11/awt_2023_d.pdf
- [6] Deutscher Bundestag Drucksache 19/11357, "Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Daniela Kluckert, Frank Antwort der Bundesregierung auf die kleine Anfrage der Abgeordneten Daniela Kluckert, Frank Sitta, Grigorios Aggelidis, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP," Zugriff am: 9. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/19/113/1911357.pdf>
- [7] V. Rodin und S. Moser, "The perfect match? 100 reasons why energy cooperation is not realized in industrial parks," *Energy Research & Social Science*, Jg. 74, S. 101964, 2021, doi: 10.1016/j.erss.2021.101964.
- [8] G. Massard, O. Jacquat und D. Zürcher, "International survey on eco-innovation parks.: Learning from experiences on the spatial dimension of eco-innovation.," Bern, Rep. 1402, 2014. Zugriff am: 4. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/education/publications-studies/publications/international-survey-on-eco-innovation-parks.html>
- [9] M. R. Chertow, "INDUSTRIAL SYMBIOSIS : Literature and Taxonomy," *Annu. Rev. Energy. Environ.*, Jg. 25, Nr. 1, S. 313–337, 2000, doi: 10.1146/annurev.energy.25.1.313.
- [10] A. Lambert und F. Boons, "Eco-industrial parks: stimulating sustainable development in mixed industrial parks," *Technovation*, Jg. 22, Nr. 8, S. 471–484, 2002, doi: 10.1016/S0166-4972(01)00040-2.
- [11] M. Le Tellier, L. Berrah, B. Stutz, J.-F. Audy und S. Barnabé, "Towards sustainable business parks: A literature review and a systemic model," *Journal of Cleaner Production*, Jg. 216, S. 129–138, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.145.
- [12] J. Lowitzsch, C. E. Hoicka und F. J. van Tulder, "Renewable energy communities under the 2019 European Clean Energy Package – Governance model for the energy clusters of the future?," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 122, S. 109489, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109489.

- [13] M. D. Mainar-Toledo *et al.*, "Accelerating sustainable and economic development via industrial energy cooperation and shared services – A case study for three European countries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 153, S. 111737, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111737.
- [14] D. van Beers, K. Tyrkko, A. Flammini, C. Barahona und C. Susan, "Results and Lessons Learned from Assessing 50 Industrial Parks in Eight Countries against the International Framework for Eco-Industrial Parks," *Sustainability*, Jg. 12, Nr. 24, S. 10611, 2020, doi: 10.3390/su122410611.
- [15] M. Chertow und J. Ehrenfeld, "Organizing Self-Organizing Systems," *J of Industrial Ecology*, Jg. 16, Nr. 1, S. 13–27, 2012, doi: 10.1111/j.1530-9290.2011.00450.x.
- [16] J. Cerceau, N. Mat, G. Junqua, L. Lin, V. Laforest und C. Gonzalez, "Implementing industrial ecology in port cities: international overview of case studies and cross-case analysis," *Journal of Cleaner Production*, Jg. 74, S. 1–16, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.03.050.
- [17] Statistisches Bundesamt. "Fläche für Siedlung nach Nutzungsarten in Deutschland." Zugriff am: 9. Januar 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/Tabellen/siedlungsflaeche.html>
- [18] B. Holtom, Y. Baruch, H. Aguinis und G. A Ballinger, "Survey response rates: Trends and a validity assessment framework," *Human Relations*, Jg. 75, Nr. 8, S. 1560–1584, 2022, doi: 10.1177/00187267211070769.
- [19] J. Lässig, T. Schütte und W. Riesner, *Energieeffizienz-Benchmark Industrie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022.
- [20] Fraunhofer ISI, IfE, GfK Retail and Technology GmbH und IREES GmbH, "Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013: Schlussbericht an das BMWi," Karlsruhe, München, Nürnberg, 2015. Zugriff am: 4. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.isi.fraunhofer.de/de/competence-center/energiepolitik-energiemaerkte/projekte/ghd_314889.html#3
- [21] A.-K. Weidlich und A. Schierenbeck, "Erneuerbare Energiesysteme in Industrie- und Gewerbegebieten: Technologien und Modellierungsansatz," in *RET.Con 2024 Tagungsband*, Hochschule Nordhausen inRET, Hg., Nordhausen, 2024, S. 31–39. Zugriff am: 12. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hs-nordhausen.de/veranstaltungen/ret-con/>
- [22] N. Langreder, F. Lettow, M. Sahnoun, S. Kreidelmeyer, A. Wünsch und S. Lengning, "Technikkatalog Wärmeplanung," 2024. Zugriff am: 12. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kww-halle.de/praxis-kommunale-waermewende/bundesgesetz-zur-waermeplanung>
- [23] BDEW. "Standardlastprofile Strom." Zugriff am: 12. Mai 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.bdew.de/energie/standardlastprofile-strom/>
- [24] S. Seim, D. Ruedt, Q. Wu, M. Held, P. Verwiebe und J. Mueller-Kirchenbauer, "Regression-based electricity load profiles of 32 industrial and commercial subsectors in Germany," 2021, doi: 10.5281/zenodo.4576494.
- [25] A. Sandhaas, H. Kim, C. de Jesús Tabora und N. Hartmann, "Generation of Industrial Electricity and Heat Demand Profiles for Energy System Analysis," Offenburg University of Applied Sciences INES – Institute of Sustainable Energy Systems, Offenburg, 2022. Zugriff am: 12. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://opus.hs-offenburg.de/frontdoor/index/index/docId/6309>
- [26] BNetzA, "Monitoringbericht 2024," 2024. Zugriff am: 12. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/MonitoringberichtEnergie2024.pdf>

- [27] Open Power System Data. "Times series in hourly resolution." Zugriff am: 12. Mai 2025. [Online.] Verfügbar: <https://open-power-system-data.org/>
- [28] Marktstammdatenregister. "Aktuelle Einheitenübersicht von Stromerzeugungseinheiten." Zugriff am: 12. Mai 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/Einheit/Einheiten/OeffentlicheEinheitenuebersicht>
- [29] C. Waldhoff und M. Reckzügel, "ReWIn - Regionales Wärmekataster Industrie: Strategieentwicklung für die systematische Optimierung der Abwärmenutzung in Industrie und Gewerbe," 2014. Zugriff am: 12. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kompetenzzentrum-energie.de/fileadmin/HSOS/Homepages/Kompetenzzentrum-Energie/ZBH/Pdf/ReWIn__2014.pdf
- [30] M. Reckzügel, M. Meyer und C. Waldhoff, "Konzeptstudie zur wiederkehrenden Quantifizierung bestehender Abwärmepotenziale in Niedersachsen," 2017. Zugriff am: 12. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kompetenzzentrum-energie.de/fileadmin/HSOS/Homepages/Kompetenzzentrum-Energie/ZBH/Pdf/KPZEnergie_Studie_Abwaerme_Niedersachsen.pdf
- [31] S. Brückner, *Industrielle Abwärme in Deutschland: Bestimmung von gesichertem Aufkommen und technischer bzw. wirtschaftlicher Nutzbarkeit*. München, 2016. Zugriff am: 12. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1310042/1310042.pdf>
- [32] S. Wolf, "Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme : Potenziale und Instrumente zur Potenzialerschließung," 2017, doi: 10.18419/opus-9593.
- [33] LANUV, "Potenzialstudie Industrielle Abwärme," 2019. Zugriff am: 12. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lanuk.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/LANUV_fabe96_Potenzialstudie_Industrielle_Abwaerme_web.pdf
- [34] G. Hofstede, *Culture's consequences: International differences in work-related values*, 18. Aufl. (Cross-cultural research and methodology series 5). Newbury Park, Calif.: Sage Publ, 2001.
- [35] J. A. Mazanec, J. C. Crotts, D. Gursoy und L. Lu, "Homogeneity versus heterogeneity of cultural values: An item-response theoretical approach applying Hofstede's cultural dimensions in a single nation," *Tourism Management*, Jg. 48, S. 299–304, 2015, doi: 10.1016/j.tourman.2014.11.011.
- [36] B. McSweeney, "Hofstede's Model of National Cultural Differences and their Consequences: A Triumph of Faith - a Failure of Analysis," *Human Relations*, Jg. 55, Nr. 1, S. 89–118, 2002, doi: 10.1177/0018726702551004.
- [37] M. P. Ferreira, F. A. R. Serra und C. S. F. Pinto, "Culture and Hofstede (1980) in international business studies: a bibliometric study in top management journals," *REGE*, Jg. 21, Nr. 3, S. 379–400, 2014, doi: 10.5700/rege536.
- [38] A. Trompenaars und C. Hampden-Turner, "Riding the waves of culture: Understanding cultural diversity in business," *Long Range Planning*, Jg. 26, Nr. 5, S. 153, 1993, doi: 10.1016/0024-6301(93)90118-Y.
- [39] S. Schwartz, "A Theory of Cultural Value Orientations: Explication and Applications," *Comp Sociol*, Jg. 5, 2-3, S. 137–182, 2006, doi: 10.1163/156913306778667357.
- [40] E. M. Rogers, *Diffusion of innovations*. New York, London, Toronto, Sydney: Free Press, 2003. [Online]. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4935198>
- [41] R. E. Miles, C. C. Snow, A. D. Meyer und H. J. Coleman, "Organizational Strategy, Structure, and Process," *The Academy of Management Review*, Jg. 3, Nr. 3, S. 546, 1978, doi: 10.2307/257544.

- [42] K. S. Cameron und R. E. Quinn, *Diagnosing and changing organizational culture: Based on the competing values framework*, 3. Aufl. (The Jossey-Bass business & management series). San Francisco, Calif.: Jossey-Bass, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10452142>
- [43] C. Dienes, A. Pahnke und H.-J. Wolter, "Investitionsverhalten von kleinen und mittleren Unternehmen," IfM Bonn, Bonn, 2018. Zugriff am: 12. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ifm-bonn.org/fileadmin/data/redaktion/publikationen/ifm_materialien/dokumente/IfM-Materialien-268_2018.pdf
- [44] P. Wohnus, "Industrieinvestitionen 2021," 2023. Zugriff am: 12. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.statistischebibliothek.de/mir/servlets/MCRFileNodeServlet/RPMonografie_derivate_00000334/03_2023_Handwerk.pdf
- [45] BWE, "Erleichterungen für die Errichtung von Windenergieanlagen in Industrie- und Gewerbegebieten sowie sonstigen Sondergebieten: Positionspapier," 2022. Zugriff am: 5. Februar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/02-planung/20220617_BWE_Empfehlungen_WEA_in_Gewerbegebieten.pdf
- [46] A. Benz und N. Dose, "Governance - Modebegriff oder nützliches sozialwissenschaftliches Konzept?," in *Governance - Regieren in komplexen Regelsystemen: Eine Einführung* (Deutsche Forschungsgemeinschaft.Literaturspendenprogramm Wissen aus Deutschland 1), A. Benz und N. Dose, Hg., 2. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010, S. 13–36.
- [47] T. Eggers und A. Engelbrecht, "Kooperation - Gründe und Typologisierung," in *Erfolgreich kooperieren: Best-Practice-Beispiele ausgezeichneter Zusammenarbeit*, H.-P. Wiendahl, C. Dreher und A. Engelbrecht, Hg., Heidelberg: Physica-Verlag, 2005, S. 1–12.
- [48] F. Betker, "Nachhaltigkeit institutionalisieren: ein neuer Gesellschaftsvertrag für städtische Gewerbegebiete Institutionalizing Sustainability: A New Social Contract for Urban Industrial Sites," *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, Jg. 22, Nr. 3, S. 178–186, 2013, doi: 10.14512/gaia.22.3.10.
- [49] Frankfurter Osten Nachhaltig FFN e.V., "5 Jahre Nachhaltiges Gewerbegebiet Fechenheim-Nord/Seckbach: Ergebnisbericht zum Pilotprojekt," Frankfurt, 2021. Zugriff am: 29. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://frankfurter-osten.de/bericht/>
- [50] E. Faria, A. Caldeira-Pires und C. Barreto, "Social, Economic, and Institutional Configurations of the Industrial Symbiosis Process: A Comparative Analysis of the Literature and a Proposed Theoretical and Analytical Framework," *Sustainability*, Jg. 13, Nr. 13, S. 7123, 2021, doi: 10.3390/su13137123.
- [51] Transition ApS, "Guide for Industrial Symbiosis Facilitators," 2021. Zugriff am: 30. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.symbiosis.dk/en/inspiration/>
- [52] L. Mortensen und L. Kørnøv, "Critical factors for industrial symbiosis emergence process," *Journal of Cleaner Production*, Jg. 212, S. 56–69, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.222.
- [53] K. Katana, B. Glau und M. Mirata, "Facilitator roles for knowledge sharing in industrial symbiosis networks during emergence," *Bus Strat Env*, Jg. 33, Nr. 8, S. 8540–8558, 2024, doi: 10.1002/bse.3923.
- [54] F. Boons, M. Chertow, J. Park, W. Spekkink und H. Shi, "Industrial Symbiosis Dynamics and the Problem of Equivalence: Proposal for a Comparative Framework," *J of Industrial Ecology*, Jg. 21, Nr. 4, S. 938–952, 2017, doi: 10.1111/jiec.12468.
- [55] S. Lehnhoff, A. Claasen, M. Reckzügel, M. Meyer und J. Knies, "Technische und ökonomische Machbarkeit energetischer Nachbarschaften," 2015. Zugriff am: 12. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kompetenzzentrum-energie.de/fileadmin/HSOS/>

- Homepages/Kompetenzzentrum-Energie/ZBH/PDF/Studie_Energetische_Nachbarschaften.pdf
- [56] V. Rodin und S. Moser, "From theory to practice: Supporting industrial decarbonization and energy cooperation in Austria," *Energy Research & Social Science*, Jg. 94, S. 102863, 2022, doi: 10.1016/j.erss.2022.102863.
- [57] WILA Bonn, "Grün statt Grau - Gewerbegebiete im Wandel: Nachhaltige Gewerbegebiete - Empfehlungen für Kommunen," Wissenschaftsladen Bonn e.V., Bonn, 2017. Zugriff am: 21. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: http://gewerbegebiete-im-wandel.de/images/PDF/Wila_Gewerbegebiete_Broschuere_Web.pdf
- [58] C. Schack, T. Neise und M. Franz, "Erfolgsfaktoren für eine nachhaltige Entwicklung von Gewerbegebieten," *Standort*, Jg. 48, Nr. 2, S. 132–139, 2024, doi: 10.1007/s00548-023-00848-z.
- [59] S. Tessitore, T. Daddi und F. Iraldo, "Eco-Industrial Parks Development and Integrated Management Challenges: Findings from Italy," *Sustainability*, Jg. 7, Nr. 8, S. 10036–10051, 2015, doi: 10.3390/su70810036.
- [60] L. Schlüter, L. Mortensen, A. N. Gjerding und L. Kjørnøy, "Can we replicate eco-industrial parks? Recommendations based on a process model of EIP evolution," *Journal of Cleaner Production*, Jg. 429, S. 139499, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139499.
- [61] A. Mertins, J. Halberstadt und T. Wawer, "Routes to renewables: Overcoming obstacles and accelerating biogas cooperation," *Energy Research & Social Science*, Jg. 118, S. 103802, 2024, doi: 10.1016/j.erss.2024.103802.
- [62] M. L. Cook, "The Future of U.S. Agricultural Cooperatives: A Neo-Institutional Approach," *American J Agri Economics*, Jg. 77, Nr. 5, S. 1153–1159, 1995, doi: 10.2307/1243338.
- [63] M. L. Cook, "A Life Cycle Explanation of Cooperative Longevity," *Sustainability*, Jg. 10, Nr. 5, S. 1586, 2018, doi: 10.3390/su10051586.
- [64] S. Ahmed und A. M. Măgurean, "Renewable Energy Communities: Towards a new sustainable model of energy production and sharing," *Energy Strategy Reviews*, Jg. 55, S. 101522, 2024, doi: 10.1016/j.esr.2024.101522.
- [65] BEE e.V., "Eckpunkte eines Energy Sharing Modells: Positionspapier," 2023. Zugriff am: 31. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bee-ev.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/Meldungen/Positionspapiere/2023/20230417_BEE_Positionspapier_Energy_Sharing_Model.pdf
- [66] J. N. Tockloth, *Gestaltungsmöglichkeiten zukünftiger lokaler Energiemärkte*, 1. Aufl. (Best-Masters). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Gabler, 2024.
- [67] Allgäuer Überlandwerk GmbH, AllgäuNetz GmbH & Co. KG, Fraunhofer FIT, Siemens AG und Stiftung Umweltenergierecht, "Ein Plattform-Konzept für eine kostenoptimierte Energiewende mit Hilfe lokaler Energiemärkte," 2021. Zugriff am: 16. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://pebbles-projekt.de/wp-content/uploads/2018/05/pebbles_Whitepaper-2.pdf
- [68] A. Wörner *et al.*, "Bidding on a Peer-to-Peer Energy Market: An Exploratory Field Study," *Information Systems Research*, Jg. 33, Nr. 3, S. 794–808, 2022, doi: 10.1287/isre.2021.1098.
- [69] Allgäuer Überlandwerk GmbH, AllgäuNetz GmbH & Co. KG, Fraunhofer FIT, Siemens AG und Stiftung Umweltenergierecht, "Policy Paper - Lokale Energiemärkte für eine kostenoptimierte Energiewende," 2021. Zugriff am: 16. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://pebbles-projekt.de/wp-content/uploads/2021/09/pebbles-Policy-Paper.pdf>
- [70] N. Watson, A. Gorbacheva, A. Schneiders, D. Shipworth und M. Fell, "Defining Peer-to-Peer Energy Trading, Community Self-Consumption and Transactive Energy Models: Concept Definition Paper," *SSRN Journal*, 2022, doi: 10.2139/ssrn.4207445.

- [71] F. Belmar, P. Baptista und D. Neves, "Modelling renewable energy communities: assessing the impact of different configurations, technologies and types of participants," *Energ Sustain Soc*, Jg. 13, Nr. 1, 2023, doi: 10.1186/s13705-023-00397-1.
- [72] M. Hentschel, W. Ketter und J. Collins, "Renewable energy cooperatives: Facilitating the energy transition at the Port of Rotterdam," *Energy Policy*, Jg. 121, S. 61–69, 2018, doi: 10.1016/j.enpol.2018.06.014.
- [73] M. Linhart, V. Rodin, S. Moser und A. Kollmann, "Citizen Participation to Finance PV Power Plants Focused on Self-Consumption on Company Roofs—Findings from an Austrian Case Study," *Energies*, Jg. 14, Nr. 3, S. 738, 2021, doi: 10.3390/en14030738.