



Universität Stuttgart

CZ
Carl Zeiss
Stiftung

 DiTEnS



**Ergebnisbericht zum Mock-Up
des DiTEnS-Dialogprozesses
am Universitätscampus Vaihinggen**



Universität Stuttgart



Carl Zeiss
Stiftung



Ergebnisbericht zum Mock-Up des DiTEnS-Dialogprozesses am Universitätscampus Vaihingen

Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren,
liebe Leserschaft,

die Wärmeversorgung ist eine der zentralen Herausforderungen auf dem Weg zur Klimaneutralität. Hier sind eine Vielzahl von Entscheider*innen, ausgehend von der Hausbesitzerebene über unterschiedliche Energieversorger und -vertriebe, Handwerk, Heiztechnologieunternehmen, aber auch Kommunen beteiligt. Zusammen mit einem heterogenen Gebäudebestand entstehen hieraus komplexe Entscheidungsprobleme, die eine individualisierte Entscheidungsfindung und ggf. Koordination zwischen den verschiedenen Ebenen erfordern. Es geht daher längst nicht mehr nur um technische Lösungen, sondern auch um neue Formen, die die Entscheidungsfindung einer Vielzahl heterogener Einzelakteure durch geeignete Information, Kommunikation und möglicherweise auch Kooperationsoptionen geeignet zu unterstützen.

Eine erfolgreiche Wärmewende im Gebäudebereich erfordert ein gemeinsames Verständnis komplexer Zusammenhänge sowie Instrumente, die den Dialog mit den involvierten Akteuren und Entscheider*innen auf einer wissenschaftlichen Basis unterstützen. Aufgrund der unterschiedlichen Situation und der individuellen Präferenzen der beteiligten Akteure erscheint ein Ansatz, diese Entscheidungen bottom-up zu entwickeln, zielführender als ein Top-Down-Ansatz, der in vielen Fällen auf Umsetzungsschwierigkeiten und Ablehnung stößt.

Die Stuttgart Research Initiative „Discursive Transformation of Energy Systems“, kurz DiTEnS, verfolgt genau dieses Ziel und verbindet energiewissenschaftliche Modellierung, digitale Werkzeuge und partizipative Methoden, um die relevanten Stakeholder bei der Umsetzung der Wärmewende effizient zu begleiten. Durch Simulationsmodelle, XR-Visualisierungen und digitale Zwillinge werden Energiesysteme transparent und greifbar, um die Entscheidungsfähigkeit vor Ort evidenzbasiert und mit Blick auf Abstimmungsprozesse zu stärken. Dies kann aufgrund der Vielzahl der Akteure am Ende in der Breite nur dann einen Durchbruch erzielen, wenn die hierfür notwendigen Instrumente einschließlich der benötigten Daten kosteneffizient bereitgestellt werden können.

Die Forschungsinitiative wird von der Carl-Zeiss-Stiftung im Rahmen des Programms „Durchbrüche“ gefördert. In diesem Sinne trägt DiTEnS zur Vision bei, durch die Förderung von Kooperationen, durch das Wirken an Schnittstellen zwischen Disziplinen, Institutionen und gesellschaftlichen Sektoren Erkenntnisse bereitzustellen und Brücken zu bauen, die Durchbrüche ermöglichen.

Ein erster Meilenstein ist das Mock-Up am Campus Vaihingen, das als Demonstrationsvorhaben die erste praktische Umsetzung darstellt. Hier werden technische Modellierungen, Visualisierungen und Beteiligungsprozesse in einem realen Umfeld erprobt und miteinander verknüpft. Die entwickelten Methoden und Werkzeuge, insbesondere die Kombination aus Simulation, Visualisierung und Beteiligung, sollen im nächsten Schritt in Quartiere mit deutlich heterogener Situation transferiert werden. Damit leistet DiTEnS einen direkten Beitrag für die Realisierung einer klimaneutralen Wärmeversorgung und damit zur Erreichung der gesetzlich verankerten Klimaziele.

Mein besonderer Dank gilt allen Teilnehmenden des DiTEnS-Dialogprozesses, die mit ihrem Engagement, ihrer Expertise und ihrer Offenheit wesentlich zu dessen Gelingen beigetragen haben. Ihre Mitwirkung hat deutlich gemacht, dass die Transformation des Energiesystems nur als gemeinschaftliche Aufgabe gelingen kann, getragen von Interdisziplinarität, Transdisziplinarität sowie einem aktiven Transfer zwischen Wissenschaft und Praxis.

Ich wünsche Ihnen viel Freude bei der Lektüre.

Prof. Dr.-Ing. Kai Hufendiek
DiTEnS-Projektsprecher

Zusammenfassung

Die *Stuttgart Research Initiative „Discursive Transformation of Energy Systems“*, kurz DiTEoS, ist eine inter- und transdisziplinäre Initiative verschiedener Einrichtungen der Universität Stuttgart, die darauf abzielt, den Wandel kommunaler Energiesysteme wissenschaftlich zu begleiten und praktisch zu unterstützen. Im Zentrum steht die Verbindung von technischem Energiesystemwissen mit partizipativen Verfahren, um für alle beteiligten Personen System-, Ziel- und Transformationswissen zu erschließen und dadurch die Handlungsfähigkeit zu verbessern. Das Ziel ist es, Instrumente zu entwickeln, die lokale Stakeholder bei der Umsetzung einer klimaneutralen Wärmeversorgung befähigen, und zwar datenbasiert, dialogorientiert und gesellschaftlich eingebettet.

Gefördert wird die Forschungsinitiative durch die Carl-Zeiss-Stiftung im Rahmen des Programms „Durchbrüche“. Dabei leistet DiTEoS einen Beitrag zur Vision, Mehrwerte an den Schnittstellen zwischen Disziplinen, Institutionen und gesellschaftlichen Sektoren zu schaffen. DiTEoS vereint informationstechnische, energiewissenschaftliche und sozialwissenschaftliche Ansätze und schafft eine methodische Basis für faktenbasierte Entscheidungen in der Transformation der Wärmeversorgung.

Ein erster zentraler Meilenstein ist ein Mock-Up für die Analyse- und Visualisierung am Campus Vaihingen. Das Mock-Up dient als Demonstrationsvorhaben, in dem modellbasierte Analysen, immersive Visualisierungen und dialogorientierte Beteiligungsprozesse erstmals in einem realen Umfeld verknüpft wurden. Das Ziel des Mock-Up war es, technische, planerische und kommunikative Elemente zusammenzuführen und den Campus Vaihingen als Experimentierfeld für integrierte Energiesystemlösungen zu nutzen.

Erkenntnisse aus System-, Ziel- und Transformationswissen

Die energetische Analyse des Campus Vaihingen verdeutlicht die komplexe Struktur heterogener Gebäude- und Nutzungstypen. Unterschiedliche Baujahre, Nutzungsprofile und teils fossil geprägte Infrastrukturen sowie ein eigenes Wärmenetz führen zu unterschiedlichen Wärmebedarfen und Anforderungen an das Energiesystem, die sinnvoll nur integrativ zu lösen sind.

Durch die Entwicklung eines digitalen Zwillings und simulationsbasierter Modelle konnten verschiedene Versorgungsvarianten, wie bspw. Abwärmenutzung, Wärmepumpen, Niedertemperatur-Wärmenetze und saisonale Speicher, verglichen werden. Die Untersuchungsergebnisse deuten darauf hin, dass hybride Versorgungslösungen, die zentrale und dezentrale Systeme kombinieren, eine Balance im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit unter der Randbedingung der Erreichung von Klimaneutralität ermöglichen.

Im Dialogprozess wurde darauf aufbauend Zielwissen zu Bewertungskriterien der Umsetzung generiert. Teilnehmende der Universität und der Universitätsverwaltung, der Energieversorger und derjenigen, die den Campus Vaihingen nutzen, diskutierten zentrale Zielgrößen wie Klimaneutralität, Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit, Flexibilität und Akzeptanz. Dabei wurden Zielkonflikte sichtbar gemacht und Zielkonstellationen entwickelt, die als Grundlage für den Umbau des Energiesystems am Campus Vaihingen dienen.

Das Transformationswissen entstand in einer Serie von Workshops, in denen Stakeholder konkrete Transformationspfade der Umsetzung entwickelten. Darin werden technische, wirtschaftliche und organisatorische Maßnahmen kombiniert, wie bspw. die Senkung der Netztemperaturen, die Umstellung auf erneuerbare Wärmeerzeugung und die Einführung datenbasierter Steuerungs- und Monitoringsysteme. Das Mock-Up ermöglichte, das Dialogkonzept unter realen Bedingungen zu testen, dessen Umsetzbarkeit zu bewerten und Rückmeldungen aus der Praxis zu integrieren.

Zusammenfassung

Wirkung und Nutzen der priorisierten Maßnahmen

Aus den gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich mehrere Handlungsfelder:

- Aufbau eines Niedertemperatur-Wärmenetzes auf dem Campus Vaihingen mit hybriden Anschlussoptionen und Erweiterungspotenzial
- Schrittweise Umstellung der Wärmeerzeugung auf Technologien wie Großwärmepumpen, Abwärmenutzung und saisonale Speicher
- Systematische Senkung der Netztemperaturen zur Effizienzsteigerung und besseren Integration innovativer Technologien
- Energetische Sanierung besonders verbrauchsintensiver Gebäude zur Reduktion des Gesamtbedarfs
- Etablierung einer stabilen Dateninfrastruktur zur kontinuierlichen Steuerung, Überwachung und Evaluierung des Energiesystems
- Fortführung der Stakeholder-Einbindung, um Akzeptanz, Mitsprache, Handlungs- und Energiekompetenz zu stärken

Diese Maßnahmen ermöglichen kurzfristige Emissionsminderungen, schaffen zugleich aber eine flexible, erweiterbare Infrastruktur, die zukünftige Entwicklungen integrieren kann. Für den Campus Vaihingen können sich durch die Umsetzung dieser Maßnahmen deutliche Reduktionspotenziale bei CO₂-Emissionen und eine erhöhte Versorgungseffizienz bei möglichst geringen Kosten ergeben.

Erkenntnisse für Forschung und Praxis

Das Mock-Up fungiert als Lernplattform, die Konzepte unter realen Bedingungen testet, deren Wirkung quantifiziert und sozialwissenschaftliche Rückmeldungen integriert. So können wissenschaftliche Erkenntnisse in praxisrelevante Handlungsempfehlungen übersetzt werden.

Das Projekt zeigt, dass technische Innovationen allein nicht genügen, um ein klimaneutrales Wärmesystem zu gestalten. Notwendig ist ein integrierter und interdisziplinärer Ansatz, der technisches Know-how und den Einbezug von entscheidungsbefugten Personen vor Ort verbindet. Der Erfolg basiert auf der Verzahnung von wissenschaftlicher Analyse mit Umsetzungsbezug, wodurch Instrumente entstanden sind, die Transparenz, Akzeptanz und Entscheidungsqualität erhöhen.

Darüber hinaus liefert DiTeNS wissenschaftliche Beiträge zur transdisziplinären Methodik von Transformationsprozessen. Mit dem Mock-Up wird der Transfer in die Anwendung geleistet, wie zum einen ein digitaler Zwilling und immersive Visualisierungsinstrumente Austausch und Entscheidungsfindung fördert, und wie zum anderen Stakeholder-Feedback in modellbasierte Analysen integriert werden kann bzw. wie partizipative Formate die Qualität von Entscheidungen im Energiesystem verbessern.

Ausblick

Die im Mock-Up entwickelten Ansätze werden in zwei weiteren Case Studies auf urbane Quartiere mit heterogener Stakeholder-Struktur übertragen. Das Ziel ist es, die Methodik iterativ weiterzuentwickeln, zu validieren und für verschiedene kommunale Kontexte adaptierbar zu machen. So entsteht bis Projektende 2029 eine erprobte, übertragbare Methodik und geeignete effizient adaptierbare Modelle zur diskursiven Transformation lokaler Energiesysteme, die technische Innovation mit gesellschaftlicher Akzeptanz verbindet. DiTeNS steht damit beispielhaft für Forschung, die Brücken zwischen den Disziplinen, Institutionen und den gesellschaftlichen Stakeholdern schlägt und zeigt, wie Klimaneutralität durch Wissen, Kooperation und Kommunikation erreichbar wird.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Motivation für ein klimaneutrales Energiesystem am Universitätscampus Stuttgart-Vaihingen	1
1.2 Stuttgart Research Initiative „Discursive Transformation of Energy Systems“	2
1.3 Zielsetzung des Mock-Up am Campus Vaihingen und des DiTeNS-Dialogprozesses	3
1.4 Aufbau des Ergebnisberichts	3
2. Methodische Vorgehensweise	5
2.1 Entwicklung des DiTeNS-Dialogprozesses als Bottom-Up-Ansatz zur Stakeholder-Integration	5
2.2 Aufbau und Ablauf des DiTeNS-Dialogprozesses	6
2.2.1 Klärungsphase	6
2.2.2 Vorbereitungsphase	7
2.2.3 Dialogphase 1: Systemwissen	7
2.2.4 Dialogphase 2: Zielwissen	7
2.2.5 Dialogphase 3: Transformationswissen	8
2.2.6 Abschlussphase	8
2.3 Datengrundlagen und Informationsquellen	8
2.4 Analyse- und Visualisierungsinstrumente des DiTeNS-Werkzeugkastens	10
2.4.1 Verknüpfung der Modellkette mit der Visualisierung	10
2.4.2 Energiesystemmodell TIMES local	10
2.4.3 Ziel des Modells zur Betriebssimulation	11
2.4.4 Cave Automatic Virtual Environment	13
2.5 Fazit zur Entwicklung des DiTeNS-Dialogprozesses	14
3. Ausgangslage am Campus Vaihingen	15
3.1 Räumliche Struktur des Campus Vaihingen und aktuelle Nutzung	15
3.2 Stakeholder-Landschaft	18
3.2.1 Identifizierte Stakeholder am Campus Vaihingen	18
3.2.2 Stakeholder-Beziehungen und Governance-Struktur	20
3.3 Fazit zur Ausgangslage am Campus Vaihingen	24
4. Systemwissen I – Bestandsanalyse	26
4.1 Gebäudestruktur	26
4.2 Versorgungsinfrastruktur	28
4.2.1 Wärmeversorgungsinfrastruktur	28
4.2.2 Kälteversorgungsinfrastruktur	35
4.2.3 Elektrische Versorgungsinfrastruktur	36
4.3 Energiebereitstellung	39
4.3.1 Heizkraftwerk Pfaffenwald	39
4.3.2 Abwärmezentrale am Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart	43
4.4 Energie- und Klimabilanz	44
4.5 Potenziale der Versorgungsinfrastruktur	48
4.5.1 Wärmeversorgungsinfrastruktur	48
4.5.2 Kälteversorgungsinfrastruktur	49
4.5.3 Elektrische Versorgungsinfrastruktur	50
4.6 Fazit zur Bestandsanalyse	51
5. Systemwissen II – Potenzialanalyse	53
5.1 Potenziale der Senkung des Raumwärmebedarfs	53
5.2 Lokale Potenziale der Energiebereitstellung	57
5.2.1 Wärmeerzeugung	57
5.2.2 Photovoltaikanlagen	57
5.2.3 Biogene Energieträger	58
5.2.4 Wasserstoff	59

Inhaltsverzeichnis

5.3	Fazit zur Potenzialanalyse.....	59
5.4	Ergebnisse und Erkenntnisse des Workshops 1 – Systemwissen: Bestands- und Potenzialanalyse.....	61
5.4.1	Evaluation des Workshops zum Systemwissen	62
5.4.2	Implikationen für den DiTEnS-Dialogprozess.....	66
6.	Zielwissen.....	68
6.1	Interaktive Szenarioentwicklung	68
6.1.1	Herleitung der untersuchten Szenarien	68
6.1.2	Parameter und Parameterauswahl.....	68
6.1.3	Zentrale Rahmenannahmen und zukünftige Bedarfsentwicklung	70
6.2	Energieversorgungsvarianten als Ergebnisse der Szenarioberechnungen	71
6.2.1	Energiebereitstellung.....	71
6.2.2	Entwicklung des Energiesystems am Campus Vaihingen	75
6.3	Analyse und Simulation der Versorgungsinfrastruktur	76
6.3.1	Wärmeversorgungsinfrastruktur	76
6.3.2	Elektrische Versorgungsinfrastruktur.....	77
6.4	Betriebsoptimierung der Energiebereitstellung	79
6.5	Ergebnisse und Erkenntnisse der Workshops 2 und 3.....	80
6.5.1	Evaluation des Workshops zum Zielwissen I	80
6.5.2	Evaluation des Workshops zum Zielwissen II	82
6.5.3	Implikationen für den DiTEnS-Dialogprozess.....	84
7.	Transformationswissen	86
7.1	Methodik der multikriteriellen Entscheidungsanalyse.....	86
7.1.1	Funktion und Ablauf einer multikriteriellen Entscheidungsanalyse.....	86
7.1.2	Definitionen der Entscheidungskriterien	87
7.2	Ergebnisse der multikriteriellen Entscheidungsanalyse	88
7.3	Ableitung von Maßnahmen zum Erreichen des Zielzustands	94
7.4	Bewertung der Maßnahmen durch die Stakeholder	96
7.5	Ergebnisse und Erkenntnisse des Workshops 4 – Transformationswissen: Maßnahmenpfade und Governance-Ansätze	98
7.5.1	Evaluation des Workshops zum Transformationswissen	98
7.5.2	Implikationen für den DiTEnS-Dialogprozess.....	100
8.	Übergeordnete Erkenntnisse und Ergebnisse des DiTEnS-Dialogprozesses	103
8.1	Zusammenfassung.....	103
8.2	Abgeleitete Erkenntnisse und Ergebnisse	104
8.3	Fazit zur Umsetzung des DiTEnS-Dialogprozesses	107
8.4	Handlungsempfehlungen für die beteiligten Stakeholder und die Universitätsleitung.....	108
8.5	Nächste Schritte im DiTEnS-Dialogprozess und dessen Fortführung	111
9.	Abschließende Betrachtung.....	113
9.1	Erkenntnisgewinne aus dem DiTEnS-Dialogprozess im Mock-Up am Campus Vaihingen ..	113
9.2	Wissenschaftliche Beiträge	116
9.3	Fazit und Ausblick.....	117
	Literaturverzeichnis.....	119
	Abkürzungsverzeichnis.....	123
	Abbildungsverzeichnis.....	124
	Tabellenverzeichnis.....	127
	Anhang	129

1. Einleitung

1.1 Motivation für ein klimaneutrales Energiesystem am Universitätscampus Stuttgart-Vaihingen

Der Universitätscampus Vaihingen ist nicht nur ein zentraler Standort für Forschung und Lehre, sondern stellt zugleich zusammen mit den ebenfalls dort befindlichen anderen Forschungseinrichtungen und Wohngebäuden eine Liegenschaft dar, die einen erheblichen Energiebedarf auch im Wärmebereich aufweist. Die Umgestaltung der Energieversorgung, insbesondere der Wärmeversorgung, am Campus der Universität Stuttgart in Vaihingen kann sowohl als exemplarisches Leuchtturmvorhaben als auch als konkreter Beitrag zur Erfüllung kommunaler sowie gesetzlicher Zielsetzungen dienen. Ergänzend ist das Energie- und Klimaschutzkonzept für Landesliegenschaften 2030 zu berücksichtigen, aus dem sich die Zielvorgabe einer Netto-Treibhausgasneutralität bis 2030 für die Gebäude der Universität Stuttgart und das Hochschulkraftwerk ableitet (FMBW).

Mit dem Inkrafttreten des Gesetzes für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze, kurz Wärmeplanungsgesetz, auf Bundesebene werden Kommunen verpflichtet, systematische Wärmepläne für ihr Gemeindegebiet zu erstellen, je nach Größe der Kommune bis zum Jahr 2026 bzw. bis zum Jahr 2028. Gleichzeitig gelten in Baden-Württemberg Bestimmungen aus dem Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz, die Gemeinden zu mitgestaltenden Stakeholdern beim Prozess der Wärmewende machen. Flankiert wird dies durch die europäische *ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS DIRECTIVE* (EPBD), die den Dekarbonisierungspfad des Gebäudebestands vorgibt, sowie durch das *GEBÄUDEENERGIEGESETZ* (GEG), das gebäudebezogene Anforderungen für Heizungen und erneuerbare Energien konkretisiert. In diesem Rahmen sollen Städte verbindliche Strategien entwickeln, in welchen Gebieten zentrale Wärmeversorgungssysteme potenziell realisiert werden dürfen oder dezentralere Lösungen für die Wärmebereitstellung sinnvoller sind.

Die Landeshauptstadt Stuttgart hat die kommunale Wärmeplanung im Dezember 2023 beschlossen und im Gemeinderat verabschiedet. Diese dient als Leitlinie zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2035 und identifiziert Stadtgebiete mit Potenzial für leitungsgebundene Wärmeversorgung, Flächen für dezentrale Lösungen und Muster zur Priorisierung von Sanierungen. Die kommunale Planung stützt sich auf Daten aus rund 200.000 Gebäuden und erlaubt sowohl räumliche als auch energetische Differenzierung. In diesem Prozess werden auch Stakeholder wie Energieversorger, Stadtwerke, Netzbetreiber, Wohnungsunternehmen und Nutzer*innen systematisch eingebunden.

Innerhalb dieser Planung ist am Campus Vaihingen der Universität Stuttgart primär eine leitungsgebundene Wärmeversorgung vorgesehen, die auf dem existierenden Wärmenetz aufbaut. Auch wenn die Gebäude am Campus weitgehend bereits am bestehenden Wärmenetz angeschlossen sind, bildet der gesamte Universitätscampus eine heterogene Gebäudestruktur ab. Aufgrund der relativ einfachen Verfügbarkeit der Daten für das Forschungsteam wurde der Campus für einen Mock-Up im Rahmen des Projekts gewählt, um Entwicklungen der Instrumente und erste Tests einfach zu ermöglichen. Gleichzeitig entsteht eine Lösung für das Energiesystem am Campus, das bei einer erfolgreichen Transformation einerseits die CO₂-Bilanz der Universität Stuttgart verbessern und andererseits als Demonstrator für vergleichbare Quartiere in der Stadt Stuttgart aber auch über die Stadtgrenzen hinaus dienen kann.

Mit einem realen Anwendungsbeispiel wird so demonstriert, wie energiewissenschaftliche, informationstechnische und sozialwissenschaftliche Komponenten zusammenwirken können. Zudem erlaubt der Campus Vaihingen in einem überschaubaren Maßstab eine Kooperation zwischen Stakeholdern aus der Wissenschaft, der Verwaltung sowie aus der Praxis.

1.2 Stuttgart Research Initiative „Discursive Transformation of Energy Systems“

Die Stuttgarter Forschungsinitiative „Diskursive Transformation von Energiesystemen“, kurz DiTEⁿS¹, ist als langfristig angelegte inter- und transdisziplinäre Plattform der Universität Stuttgart konzipiert, die energiewissenschaftliche, informationstechnische und sozialwissenschaftliche Kompetenzen bündelt und über die Zeit um weitere Forschungsvorhaben erweitert werden soll.

Als erstes Projekt wird die „VR-basierte simulative Gestaltung eines gesellschaftlichen Dialogs zur Transformation urbaner Energiesysteme“ umgesetzt. Ziel dieses Vorhabens ist die Entwicklung eines an den Phasen der kommunalen Wärmeplanung orientierten Dialogprozesses, der durch 2D- und 3D-Visualisierungen so erweitert wird, dass relevante Stakeholder systematisch und evidenzbasiert in die Gestaltung urbaner Energiesysteme einbezogen werden können. In diesem Zusammenhang sollen dazu digitale Zwillinge und simulative Modelle gebaut werden, um verschiedene Energieversorgungsvarianten abzubilden. Diese Visualisierungen werden in Formen der Beteiligung für diskursive Prozesse genutzt, um Stakeholder aktiv in die Entwicklung, die Analyse und die Entscheidung über potenzielle Transformationspfade einzubinden.

Die übergeordneten Zielstellungen der Stuttgarter Forschungsinitiative DiTEⁿS gestalten sich dabei folgendermaßen:

- Entwicklung eines integrativen Analyserahmens, in dem Systemwissen, Zielwissen und Transformationswissen verbunden werden
- Entwicklung von Simulations- und Visualisierungsinstrumenten zur Unterstützung von Dialogprozessen
- Erprobung dieser Methoden in realen Case Studies mit direktem Bezug zur Praxis sowie unter Einbindung aller relevanten Stakeholder
- Sicherstellung des Wissenstransfers, sodass die entwickelten Methoden und Instrumente auch in weiteren Stadtquartieren und Kommunen Anwendung finden

Die Projektlaufzeit erstreckt sich bis März 2029 über mehrere, aufeinander aufbauende Phasen, in denen der entwickelte Dialogprozess sowie die entwickelten Methoden schrittweise ausgearbeitet, getestet und in reale Anwendungskontexte überführt werden. In der Initialphase stehen die Datenerhebung, Modellbildung und Technologieintegration im Vordergrund. Hier werden die energetischen, räumlichen und organisatorischen Grundlagen des Untersuchungsraums erhoben und in einer konsistenten Datenbasis zusammengeführt.

¹ Das Akronym geht auf den englischen Projektnamen zurück, wo es als Stuttgart Research Initiative (SRI) Discursive Transformation of Energy Systems (DiTEⁿS) bezeichnet wird.

1.3 Zielsetzung des Mock-Up am Campus Vaihingen und des DiTEaS-Dialogprozesses

In diesem Kontext wird das Mock-Up als prototypische Umsetzung entwickelt und als erste Case Study konzipiert. Es umfasst grundlegende Funktionalitäten der Systemmodellierung, Simulation und Visualisierung und ermöglicht die interaktive Analyse verschiedener Versorgungsvarianten. Ziel ist es, zentrale Abläufe und Schnittstellen exemplarisch abzubilden, um technische und methodische Konzepte in einem kontrollierten Umfeld zu erproben und den Dialogprozess zu unterstützen.

Die anschließenden Fallstudien, die im weiteren Kontext auch als Case Studies bezeichnet werden, erweitern und validieren die im Mock-Up entwickelten Funktionen. Dort werden die Modelle und Visualisierungsinstrumente in einem konkreten zivilgesellschaftlichen Kontext eingesetzt. Das Vorgehen zielt darauf ab, die Praxistauglichkeit, Übertragbarkeit und Robustheit der Ansätze zu bewerten und daraus Handlungsempfehlungen für kommunale Stakeholder abzuleiten. Damit entsteht eine Entwicklungskette, die von der prototypischen Demonstration hin zur validierten Anwendung im realen Stadtquartierskontext führt.

Das Mock-Up am Campus Vaihingen verfolgte das Ziel, den Campus Vaihingen als Experimentierfeld für integrierte Energiesystemlösungen und die Zusammenstellung des benötigten Baukastens an Modellwerkzeugen zu nutzen. Dabei kamen Methoden der Stakeholder-Beteiligung, der Modellierung und Visualisierung, unter anderem mit VR-Technologien, zum Einsatz, um komplexe Zusammenhänge anschaulich und interaktiv darzustellen.

Ein Schwerpunkt lag in der Entwicklung und Erprobung eines innovativen Dialogformats, das die Einbindung unterschiedlicher Stakeholder-Gruppen ermöglicht. Auf diese Weise sollten nicht nur technische, sondern auch soziale und organisatorische Aspekte in die Gestaltung der Transformationspfade einfließen. Darüber hinaus wurde angestrebt, die gewonnenen Erkenntnisse und Methoden auf andere Quartiere und Kontexte übertragbar zu machen, sodass das Mock-Up und der dafür zusammengestellte Modellwerkzeugkasten sowie die aufbauenden Visualisierungen als Modell für vergleichbare Transformationsprozesse in den nachfolgenden Case Studies und darüber hinaus dienen kann.

Die Abschlussphase umfasste die Ergebnisdokumentation, die Abstimmung eines Maßnahmenpapiers, eine gemeinsame Evaluation sowie die Präsentation und Weitergabe der Ergebnisse an Entscheidungsträger und weitere Interessierte. Damit waren die Ergebnisse nur im Sinne dieses Projektvorhabens ein „Test“. Die erarbeiteten Ergebnisse haben im Kontext des Campus Vaihingen wichtige Hinweise für die Transformation geliefert, sodass die Arbeit auch aus dieser Perspektive einen eigenständigen Mehrwert aufweist. Die Ergebnisse werden in diesem Bericht in diesem Sinne dargestellt und dokumentiert.

1.4 Aufbau des Ergebnisberichts

Der vorliegende Ergebnisbericht folgt in der Struktur den Phasen, die auch bei der kommunalen Wärmeplanung eingesetzt werden und spiegelt dementsprechend die methodische Vorgehensweise der Forschungsinitiative DiTEaS wider. Das Vorgehen verfolgt durch die Einbindung der Stakeholder im Dialogprozess von Anbeginn im Gegensatz zur kommunalen Wärmeplanung jedoch einen Bottom-Up-Ansatz, der im Hinblick auf die Passung der Ergebnisse zu individuellen Bedarfen als vorteilhaft erscheint. Das Ziel ist es, den Weg zur praktischen Umsetzung der Wärmewende im Mock-

Up am Campus Vaihingen nachvollziehbar darzustellen und die Ergebnisse sowie die gewonnenen Erkenntnisse festzuhalten.

In Kapitel 2 wird die methodische Vorgehensweise dargelegt und gezeigt, wie technische, planerische und kommunikative Elemente zu einem integrierten Forschungsansatz verbunden werden. Das Kapitel bildet damit die Grundlage für die anschließenden Analysen.

In Kapitel 3 wird die Ausgangslage des Campus Vaihingen mit seinen Gebäudestrukturen, Verbrauchsdaten, bestehenden Infrastrukturen und relevanten Stakeholder beschrieben. Darauf aufbauend wird in Kapitel 4 das vorhandene Systemwissen analysiert und die derzeitige Wärmeversorgung im Bestand untersucht. In Kapitel 5 wird diese Betrachtung um eine Analyse erweitert, in der das Potenzial möglicher Versorgungstechnologien und -optionen bewertet wird.

Im Anschluss wird in Kapitel 6 das im Dialogprozess erarbeitete Zielwissen zusammengefasst. Zudem werden die gemeinsam definierten Leitbilder, Prioritäten und Bewertungsmaßstäbe dokumentiert. Auf dieser Basis wird in Kapitel 7 das Transformationswissen beschrieben und leitet konkrete Maßnahmen sowie Handlungsoptionen für die Umsetzung einer klimaneutralen Wärmeversorgung am Campus Vaihingen ab.

In Kapitel 8 werden der Verlauf und die Ergebnisse des Dialogprozesses reflektiert, die entwickelte Methodik bewertet und deren Mehrwert für Partizipation, Transparenz und Entscheidungsfindung in kommunalen Entwicklungsprozessen gezeigt. Abschließend bündelt Kapitel 9 die zentralen Erkenntnisse des durchgeführten Mock-Up am Campus Vaihingen und bewertet deren Übertragbarkeit auf andere urbane Quartierskontexte in den beiden geplanten Case Studies.

Parallel zur dargestellten Struktur des Ergebnisberichts finden sich im gesamten Dokument blaue Hinweisboxen, die als vertiefende Elemente dienen sollen. Diese enthalten Erfahrungswerte, Praxisbeispiele oder Anmerkungen von Stakeholdern und Autor*innen, die während der Durchführung des Mock-Up am Campus Vaihingen gesammelt worden sind. Diese Kästen heben besonders relevante Einsichten, methodische Reflexionen oder praktische Herausforderungen hervor und machen den Bericht nicht nur informativer, sondern auch anschlussfähiger für künftige Projekte und kommunale Stakeholder. Um das Verständnis für die Vielschichtigkeit realer Transformationsprozesse zu fördern, sollen diese Hinweisboxen als Brücke zwischen wissenschaftlicher Analyse und praktischer Umsetzung verstanden werden.

2. Methodische Vorgehensweise

2.1 Entwicklung des DiTEaS-Dialogprozesses als Bottom-Up-Ansatz zur Stakeholder-Integration

Der Dialog zur Stakeholder-Integration in DiTEaS folgt einem transdisziplinären Forschungsansatz. Im Mittelpunkt steht ein gemeinsamer Lernprozess der beteiligten Stakeholder, um die für die Energiewende erforderlichen Anpassungen oder Veränderungen von Verhaltensweisen und/oder Praktiken zu ermöglichen. (Pohl und Hirsch Hadorn 2008; Schäfer et al. 2025) Zentral für den Lernprozess sind drei Wissensarten, die aufeinander aufbauen:

- **Systemwissen:** Wissen, was ist.
- **Zielwissen:** Wissen, was sein soll bzw. was nicht sein soll.
- **Transformationswissen:** Wissen, wie der Pfad vom Ist- zum Soll-Zustand verläuft.

In Anlehnung an diese Wissensarten wurde der DiTEaS-Dialogprozess in drei zentrale Dialogphasen gegliedert. Für diese Dialogphasen werden Modellierungen und Visualisierungen als Entscheidungshilfe zur Verfügung gestellt. Ziel der engen Verzahnung von Stakeholder-Dialog, Modellierung und Visualisierung ist es, einerseits den Dialog zwischen den Stakeholdern zu unterstützen und andererseits den gemeinsamen Lernprozess zu fördern. Darüber hinaus wurde in allen Phasen Wert auf die Umsetzung grundlegender Anforderungen an Beteiligungsprozesse gelegt, insbesondere auf Transparenz, Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit.

Wie in Tabelle 2-1 dargestellt, lassen sich die Phasen des Dialogprozesses mit dem gesetzlich vorgeschriebenen Ablauf der kommunalen Wärmeplanung (kWP) in Deutschland verknüpfen (§ 13 WPG; MUKE BW 2020; dena 2023). Während die kommunale Wärmeplanung inhaltlich von der Erhebung des Status quo über Potenzialanalysen und Szenarien-Entwicklung bis hin zur Umsetzungsstrategie reicht, erweitert DiTEaS diese Schritte durch strukturierte Beteiligung, verschiedene Dialogformate und Visualisierungsinstrumente und erarbeitet im Unterschied zur kommunalen Wärmeplanung Lösungsoptionen bottom-up aufbauend auf Dialogprozessen unter Einbezug der Entscheidungsträger und Betroffenen auf unterster Ebene von Anfang an.

Tabelle 2-1: Phasen des Dialogprozesses in DiTEaS sowie deren Bezug zur kommunalen Wärmeplanung.

Phasen des Dialogprozesses	Kommunale Wärmeplanung
Klärungsphase	-
Vorbereitungsphase	Vorbereitungsphase
Dialogphase 1: Systemwissen	Bestandsanalyse
	Potenzialanalyse
Dialogphase 2: Zielwissen	Entwicklung eines Zielszenarios
Dialogphase 3: Transformationswissen	Umsetzungsstrategie
Abschlussphase	-

2.2 Aufbau und Ablauf des DiTEaS-Dialogprozesses

Der Dialogprozess für den Mock-Up Campus Vaihingen war in insgesamt fünf Phasen gegliedert, die in Abbildung 2-1 dargestellt und im Folgenden ausführlicher beschrieben werden.

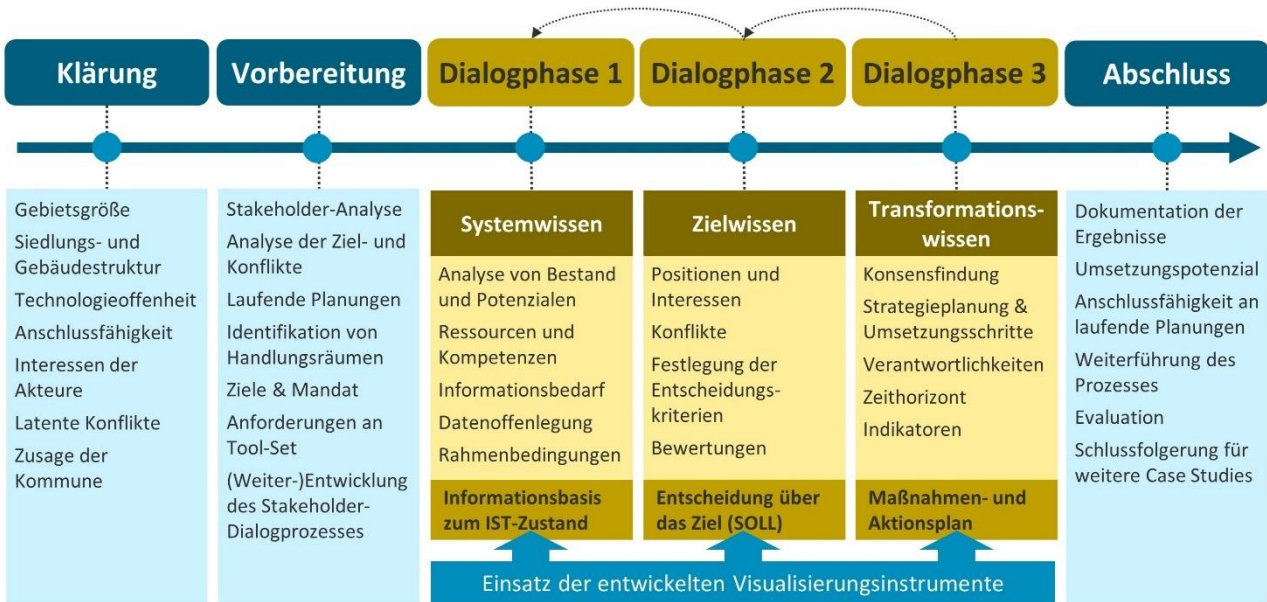


Abbildung 2-1: Ablauf des DiTEaS-Dialogprozesses.

2.2.1 Klärungsphase

In der Klärungsphase wird die Eignung eines Gebiets (Stadtteil, Quartier, etc.) als Case Study für das Forschungsprojekt DiTEaS geprüft. Hierfür entwickelte das Projektteam Kriterien, die technische, städtebauliche und soziale Aspekte berücksichtigen. Da der Campus Vaihingen bereits bei der Projektantragstellung als Case Study festgelegt worden war, erfolgte keine erneute Überprüfung. Im weiteren Verlauf wird in dem Zusammenhang auch vom Mock-Up am Campus Vaihingen gesprochen. Ausschlaggebend hierfür waren vorliegende Vorarbeiten (z. B. einzelne energiewissenschaftliche Modelle, Visualisierungen) sowie laufende bzw. abgeschlossene Projekte („Campus hoch I“; „MobiLab“; „E-CampUS“), die einen erleichterten Zugang zu Daten über das Gebiet gewährleisten (US 2022; US 2024).

Geprüft wurde stattdessen die Durchführbarkeit eines Stakeholder-Dialogs. Relevanz erhielt in diesem Zusammenhang eine parallel geplante Machbarkeitsstudie, die sich auf das Wärmenetz und das Heizkraftwerk (HKW) am Campus Vaihingen bezog. Dabei stellte sich die Frage, ob ein Stakeholder-Dialog auf Ebene der Entscheidungsträger*innen möglich sei, wenn dieselben Stakeholder zeitgleich in die Machbarkeitsstudie eingebunden und ihre Ressourcen dort gebunden sind.

In Vorgesprächen mit den zentralen Stakeholdern am Campus Vaihingen zeigte sich ein heterogenes Bild: während einige ein deutliches Interesse am Dialogprozess äußerten, verwiesen andere auf die geplante Machbarkeitsstudie und empfahlen eine enge Abstimmung, um parallele Aktivitäten möglichst zu vermeiden. Nach Auswertung der Vorgespräche wurde entschieden, einen Dialogprozess zu starten. Dabei war es wichtig, diesen zeitlich unabhängig von der Machbarkeitsstudie anzulegen, um die inhaltliche Unabhängigkeit zu sichern. Zudem sollte der Kreis der Stakeholder gezielt um weitere Stakeholder erweitert werden, die nicht ausschließlich auf Entscheidungsebene angesiedelt sind, sondern auch Betroffene und Interessierte repräsentieren.

2.2.2 Vorbereitungsphase

In der Vorbereitungsphase wurden grundlegende Daten und Charakteristika des Energiesystems am Campus Vaihingen erhoben und analysiert. Dazu zählten Informationen zu Gebietseigenschaften, Gebäudestrukturen, Versorgungsleitungen und bestehenden Energietechnologien. Die erhobenen Daten wurden in Validierungs-Workshops zusammen mit Stakeholdern aus technischen Bereichen überprüft und ergänzt. Parallel dazu erfolgte eine Stakeholder-Analyse, bei der die relevanten Stakeholder identifiziert sowie ihre Positionen, Interessen und potenziellen Konflikte auf Basis der Vorgespräche systematisch ausgewertet wurden.

2.2.3 Dialogphase 1: Systemwissen

In der Dialogphase 1 (Systemwissen) stand die gemeinsame Erarbeitung und Zusammenführung von Wissen über den aktuellen Zustand des Energiesystems am Campus Vaihingen im Mittelpunkt. Dabei wurden die erhobenen Daten zu Energiebedarf, Infrastrukturen, Technologien und Potenzialen mit den Perspektiven der Stakeholder verknüpft. In moderierten Dialogformaten, wie bspw. Diskussionen, Kleingruppenarbeit und Feedback-Runden, konnten die unterschiedlichen Sichtweisen eingebracht, ergänzt und kritisch reflektiert werden. Ergänzend wurden erste Ergebnisse aus Modellierungen und Visualisierungen vorgestellt, um komplexe Zusammenhänge transparent darzustellen und eine gemeinsame Wissensbasis zu schaffen. Auf diese Weise entstand ein geteiltes Verständnis über den Status quo und die zentralen Herausforderungen des Energiesystems am Campus Vaihingen.

2.2.4 Dialogphase 2: Zielwissen

In der Dialogphase 2 (Zielwissen) wurde aufbauend auf der gemeinsamen Wissensbasis über den Status quo diskutiert, welche Ziele für die Entwicklung des Energiesystems am Campus Vaihingen verfolgt werden sollen. Dazu wurden zwei Workshops durchgeführt, in denen gemeinsam mit den Stakeholdern die Rahmenannahmen für die Modellierung und Simulation des zukünftigen Energiesystems am Campus Vaihingen festgelegt (Workshop 1) und Kriterien für die systematische Bewertung alternativer Versorgungsvarianten abgestimmt (Workshop 2) wurden.

Workshop 1 konzentrierte sich auf die Festlegung zentraler Modellierungs- und Simulationsparameter. Vorgestellt wurden relevante techno-ökonomische Szenarioparameter, wie bspw. Zieljahr Klimaneutralität, Preispfad der Energieträger, Ausbaugeschwindigkeit für Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) und dazugehörige Ausprägungen (z. B. Zieljahr Klimaneutralität: 2030, 2035 und 2040). Diese wurden anschließend in Kleingruppen diskutiert und Kombinationen von Parametern und Ausprägungen festgelegt. Dadurch konnten unterschiedliche Zielvorstellungen sichtbar gemacht und zugleich Gemeinsamkeiten herausgearbeitet werden. Die Ergebnisse dienten als Inputgrößen für die Energiesystemmodellierung und Betriebssimulation und bildeten somit die Grundlage für die spätere Berechnung von Energieversorgungsvarianten.

Darüber hinaus erfolgte in Workshop 1 die Validierung und Priorisierung von Entscheidungskriterien für eine multikriterielle Entscheidungsanalyse. Berücksichtigt wurden dabei sowohl quantitative als auch qualitative Kriterien wie Treibhausgasemissionen, Flächennutzung und Ästhetik. Auf diese Weise wurden die unterschiedlichen Prioritäten der Stakeholder dokumentiert und transparent gemacht.

Workshop 2 diente der Vorstellung und Diskussion verschiedener Energieversorgungsvarianten, die aus den zuvor von den Stakeholdern definierten Szenarien im Rahmen der Modellierung entwickelt wurden. Mithilfe von Visualisierungen und dem Einsatz der CAVE wurden die Varianten entlang der

zuvor abgestimmten Kriterien dargestellt und ihre Konsequenzen für die Stakeholder greifbarer gemacht. Schließlich wurden die Varianten im Hinblick auf ihre Realisierbarkeit sowie auf Aspekte der ästhetischen Integration diskutiert und von den Stakeholdern bewertet. Auf diese Weise entstand ein abgestimmtes Bild darüber, welche Zielrichtungen für die weitere Planung maßgeblich sind.

2.2.5 Dialogphase 3: Transformationswissen

Die Dialogphase 3 (Transformationswissen) konzentrierte sich darauf, Wege und Maßnahmen zu entwickeln, wie die angestrebten Ziele erreicht werden können. Auf Grundlage der zuvor diskutierten Szenarien wurden konkrete Optionen und Handlungsstrategien erarbeitet und deren Umsetzbarkeit bewertet. Dabei spielten Fragen der Machbarkeit, Priorisierung, Kosten und Governance ebenso eine Rolle wie die Einbindung relevanter Stakeholder. In Planungswerkstätten und Dialogrunden wurden mögliche Maßnahmen (im Sinne von Handlungsoptionen) entworfen, miteinander verglichen und weiterentwickelt. Das Ergebnis dieser Phase war ein gemeinsames Verständnis über realistische Transformationspfade sowie eine Konsensbildung hinsichtlich Zuständigkeiten und erster Umsetzungsschritte.

Der Dialogprozess wurde nach jedem der vier durchgeführten Workshops durch standardisierte Befragungen evaluiert. Die Evaluation diente dazu, Rückmeldungen zu Aufbau, Inhalten und Wirkung der Veranstaltungen zu erfassen. Inhaltlich spiegelten die Fragebögen die jeweiligen Schwerpunkte der Workshops wider, die Szenarioentwicklung und multikriterielle Entscheidungsanalyse, die Bewertung unterschiedlicher Energieversorgungsvarianten und deren Visualisierung in der CAVE sowie die Priorisierung von Maßnahmen zur Transformation des Energiesystems. Auf einzelne Ergebnisse aus den Befragungen wird in den entsprechenden Kapiteln des Berichts zurückgegriffen.

2.2.6 Abschlussphase

In der Abschlussphase wurden die im DiTeNS-Dialogprozess erarbeiteten Maßnahmen, Bewertungen und Priorisierungen zusammengeführt und redaktionell konsolidiert. Grundlage bildeten die im Workshop zum Transformationswissen diskutierten Maßnahmensteckbriefe sowie die Einschätzungen der Stakeholder zum Beitrag zur Klimaneutralität und zu deren Umsetzbarkeit.

Die konsolidierten Inhalte wurden den beteiligten Stakeholdern zur Prüfung vorgelegt, verbunden mit der Bitte um Feedback, Ergänzungen und Zustimmung zur zusammenfassenden Darstellung. Dieses Vorgehen diente dazu, Transparenz im Prozess zu gewährleisten, die Anschlussfähigkeit der Ergebnisse sicherzustellen und einen gemeinsamen Orientierungsrahmen für die weiteren Schritte zu schaffen.

Das Ergebnis der Abschlussphase ist ein abgestimmtes Maßnahmenpapier, das die zentralen Ergebnisse des Dialogprozesses bündelt und als Grundlage für die weitere Umsetzung und Kommunikation dient. (León et al. 2026)

2.3 Datengrundlagen und Informationsquellen

Die verwendeten Daten, die für die modellbasierten Analysen und Visualisierungen verwendet worden sind, stammen aus verschiedenen Datenquellen, welche in diesem Kapitel genannt oder kurz vorgestellt werden. Die Verarbeitung von Daten aus unterschiedlichen Quellen ist mit einigen Herausforderungen verbunden. Die Aktualität der Daten sowie die unterschiedliche Indizierung von Gebäuden in Netzplänen stellen Herausforderungen dar.

Die Bereitstellung der Datenplattform Open GeoData erfolgt durch das Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung des Landes Baden-Württemberg. Die Nutzer*innen erhalten auf diese Weise Zugang zu Geodaten, die für eine Vielzahl von Anwendungen in der Planung, Analyse und Visualisierung räumlicher Informationen genutzt werden können. (LGL 2025)

Ein wesentlicher Bestandteil von Open GeoData sind die LOD2 (Level of Detail 2) Gebäudedaten. Die vorliegenden 3D-Gebäudemodelle fungieren als Informationsquelle hinsichtlich der Form und Struktur von Gebäuden. Die LOD2-Daten beinhalten Informationen zu Gebäudegrundrissen sowie standardisierten Dachformen, die aus Überflügen mithilfe eines Laserscan, digitalen stereoskopischen Luftbildern und dem aktuellen Digitalen Geländemodell mit einer Gitterweite von 1 Meter gewonnen wurden.

Die Daten werden im CityGML-Format bereitgestellt und sind in Kacheln mit einer Seitenlänge von 2 km organisiert. Die Handhabung und Integration in verschiedene Anwendungen, die auf Geographische Informationssysteme, kurz GIS, basieren, wird hierdurch ermöglicht.

Neben den Gebäudedaten werden durch Open GeoData auch Terrain-Daten bereitgestellt. Diese Informationen sind von signifikanter Relevanz für die Analyse der Geländestrukturen und unterstützen Planungsprozesse in diversen Bereichen, von der Stadtentwicklung bis hin zur Umweltforschung.

Der Energieatlas BW ist ein Internet-Portal, das von der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg in Zusammenarbeit mit dem Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft entwickelt wurde. Das Portal fungiert als Datenquelle zur Analyse des Bestandes sowie des Potenzials erneuerbarer Energien in der Region Baden-Württemberg. Der Energieatlas präsentiert Daten zu diversen Energiequellen, darunter Biomasse, Wasserkraft, Sonne und Wind. Des Weiteren beinhaltet er Daten zu Wärmenetzen, Wärmebedarfen und der kommunalen Wärmeplanung sowie zur Netzinfrastruktur. (LUBW 2025)

Neben den öffentlich zugänglichen Daten des Energieatlas und Open GeoData wurden weitere anlagen- und gebäudespezifische Daten von der Universität bereitgestellt beziehungsweise der Zugriff auf diese wurde gewährt. Dies umfasst sowohl interne Datenbanken, die der Energieversorgung zuzuordnen sind, als auch Daten über das Strom-, Wärme- und Kältenetz. Dank des Zugriffs auf die universitätsinterne Datenbank konnten nicht nur historische Daten abgerufen werden, sondern auch Echtzeitdaten, die es ermöglichen, Strom-, Wärme- und Kälteverbräuche abzurufen.

Des Weiteren wurden Daten des Building Information Modeling für die Gebäude des Fraunhofer-Instituts auf dem Campus Vaihingen sowie für den Neubau des Höchstleistungsrechenzentrums Stuttgart (HLRS), welches im weiteren Verlauf als HLRS III bezeichnet wird, herangezogen. Darüber hinaus wurden Daten aus Laserscans für die campusweiten Versorgungskanäle erhoben. Diese Daten beinhalten nicht nur den detailliert nachmodellierten Verlauf der unterirdischen Schächte, sondern auch hochauflösende Laserscans des Inneren der Schächte.

Die daraus erzeugten Punktwolken bilden die Geometrie der Schächte sowie die Infrastruktur in diesen Schächten, wie Stromleitungen oder Rohrleitungen, realitätsnah ab. Aus Drohnenaufnahmen des Campus wurde ein Photogrammetrie-Modell erstellt, welches neben Gebäuden auch jegliche oberirdische Infrastruktur erfasst.

2.4 Analyse- und Visualisierungsinstrumente des DiTeNS-Werkzeugkastens

2.4.1 Verknüpfung der Modellkette mit der Visualisierung

Als Analyseinstrumente kamen folgende Modelle zum Einsatz: Energiesystemmodell TIMES local (Kapitel 2.4.2), Modell zur Betriebssimulation (Kapitel 2.4.3) und Cave Automatic Virtual Environment (Kapitel 2.4.4).

Im Energiesystemmodell wird über mehrere Jahre die Veränderung des Energiesystems über Kostenoptimierung ermittelt. Teil der Ergebnisse sind Energiemengen pro Jahr und Kapazitäten/Leistungen von Stromerzeugern, Wärmeerzeugern und Speichern.

Diese werden an die Betriebssimulation übergeben, die auf Jahresbasis das Zusammenspiel mehrerer energietechnischer Anlagen sowie das Wärme- und Stromnetz (thermo-hydraulisch bzw. mittels Lastflussrechnung) in zeitlich hoher Auflösung abbildet. Das Strom- und Wärmenetz ist in der CAVE sichtbar, was eine anschauliche Darstellung der Simulationsergebnisse ermöglicht.

2.4.2 Energiesystemmodell TIMES local

Das Energiesystemmodell TIMES local ist ein techno-ökonomisches Optimierungsmodell, das zur Analyse und langfristigen Planung von lokalen Energiesystemen eingesetzt wird. Es basiert auf dem Energiesystemmodellgenerator TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) und wurde für den Campus Vaihingen kalibriert und angepasst. TIMES basiert auf einem linearen Optimierungsansatz, bei dem die kosteneffizienteste Kombination von Technologien und Energieträgern zur Deckung der Energiebedarfe über einen definierten Zeithorizont ermittelt wird. (Loulou et al. 2021; Loulou et al. 2024)

Für den Anwendungsfall Campus Vaihingen wurden für den Zeitraum 2020 bis 2040 folgende Teilbereiche betrachtet: Stromerzeugung / -bezug (HKW, Netzbezug, PV), Stromanwendungen (Gebäudestrom, HLRS), Wärmeerzeugung (HKW, Großwärmepumpen mit Wärmequelle Abwärme HLRS, Luft, Geothermie), Wärmeanwendungen (Raumwärme und Trinkwarmwasser der Gebäude im Bilanzraum). Die Gesamtstruktur ist in Abbildung 2-2 schematisch dargestellt.

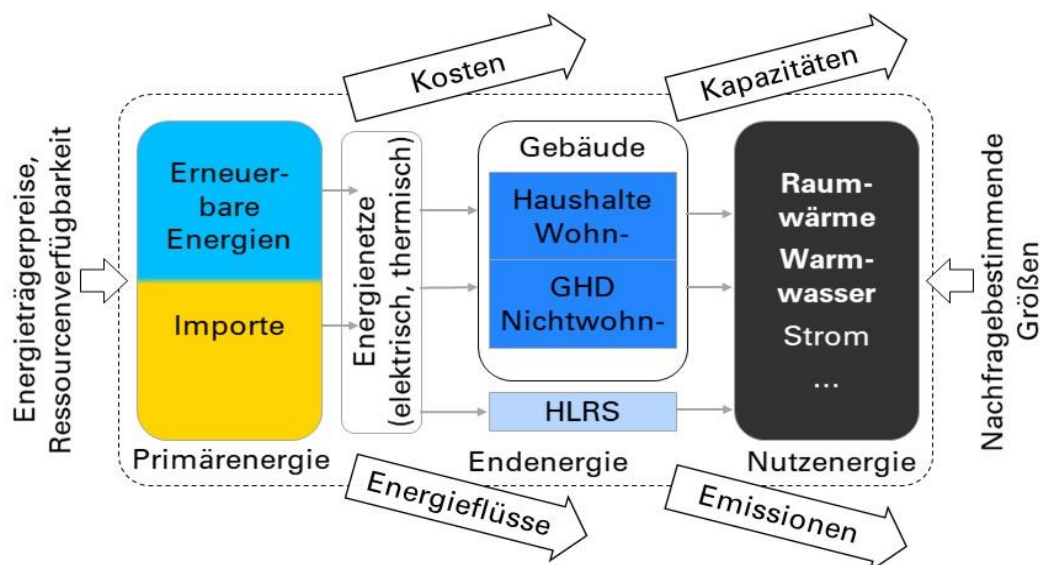


Abbildung 2-2: Aufbau des Energiesystemmodells TIMES local.

Mit TIMES local wurden verschiedene Szenarien simuliert, die die Entwicklung des Strom- und Wärmeverbrauchs für unterschiedliche Gebäudetypen sowie den Technologiemix zur Strom- und Wärmeerzeugung aufzeigen, woraus sich investive Maßnahmen ableiten lassen.

2.4.3 Ziel des Modells zur Betriebssimulation

Das Modell zur Betriebssimulation wurde dahingehend ausgerichtet, dass eine integrale Betrachtung des Energieversorgungssystems möglich ist. Zum einen sollte eine Analyse der primärseitigen Vorlauf- und Rücklauftemperaturen möglich sein. Dies ist nötig, um Auswirkungen verschiedener Betriebsstrategien auf die Wärmenetztemperaturen analysieren zu können und geeignete Regelungs- und Steuerungsmethoden zu erproben.

Für die Simulation des Wärmenetzes wurde PyDHN² eingesetzt, eine Python-Bibliothek, die auf NetworkX basiert und Werkzeuge zur Speicherung, Visualisierung und Verwaltung von Netzdaten sowie zur Durchführung von stationären und dynamischen Simulationen bereitstellt (Boggetti und Kämpf 2024). PyDHN verfolgt einen modularen, objektorientierten Ansatz, der Vielseitigkeit in der Modellierung und die einfache Implementierung eigener Komponenten ermöglicht.

Abbildung 2-3 zeigt das Flussdiagramm des Simulationsprozesses mit Initialisierung, Massenstromregelung, Systemsteuerung, Netz- und Wärmespeicherberechnung sowie abschließendem Simulationsergebnis. Die Simulation erfolgt in einem modular aufgebauten Framework, das auf PyDHN als hydraulisch-thermischem Solver basiert. Nach der Initialisierung des Netzes und dem Einlesen der Lastzeitreihen werden alle relevanten Erzeuger- und Verbrauchskomponenten (z. B. BHKW, Wärmepumpe, Solarthermie, Speicher) dynamisch eingebunden. In einer zeitdiskreten Schleife werden die Wärmelasten gesetzt, geeignete Regelungsstrategien berechnet und die Netzberechnungen von PyDHN ausgeführt.

Dabei handelt es sich bei der PID-Regelung (Proportional-Integral-Differential) um eine klassische, rückkopplungsbasierte Regelung, die auf Abweichungen zwischen Soll- und Istwert reagiert. Die RBC (Rule-Based Control) nutzt einfache, fest definierte Betriebsregeln (z. B. Schwellwerte oder Wenn-Dann-Logiken) zur Steuerung der Komponenten. Die MPC (Model Predictive Control) hingegen ist ein modellbasierter, vorausschauender Ansatz, der unter Berücksichtigung zukünftiger Lasten und Randbedingungen ein Optimierungsproblem löst, um den Betrieb des Gesamtsystems ökonomisch und effizient zu gestalten.

Dabei liefert der Solver Temperaturen, Massenströme, Druckdifferenzen und Wärmeleistungen, die kontinuierlich mit den Zuständen von Speicher und Erzeugern abgeglichen werden. Auf dieser Basis werden sowohl Energiebilanzen (z. B. produzierte und verbrauchte Wärme, Verluste) als auch betriebswirtschaftliche Kenngrößen erfasst und in Zeitreihenform ausgewertet.

Dieses Zusammenspiel von Regelung und physikalischem Solver ermöglicht eine konsistente Abbildung des Gesamtsystems und eine detaillierte Analyse der Auswirkungen verschiedener Betriebsstrategien. Neben der Analysemöglichkeit unterschiedlicher Betriebsstrategien stellt das Modell auch sicher, dass die gewählte Konfiguration tatsächlich in der Realität für die Versorgungsaufgabe geeignet ist.

² PyDHN steht für Python District Heating Networks.

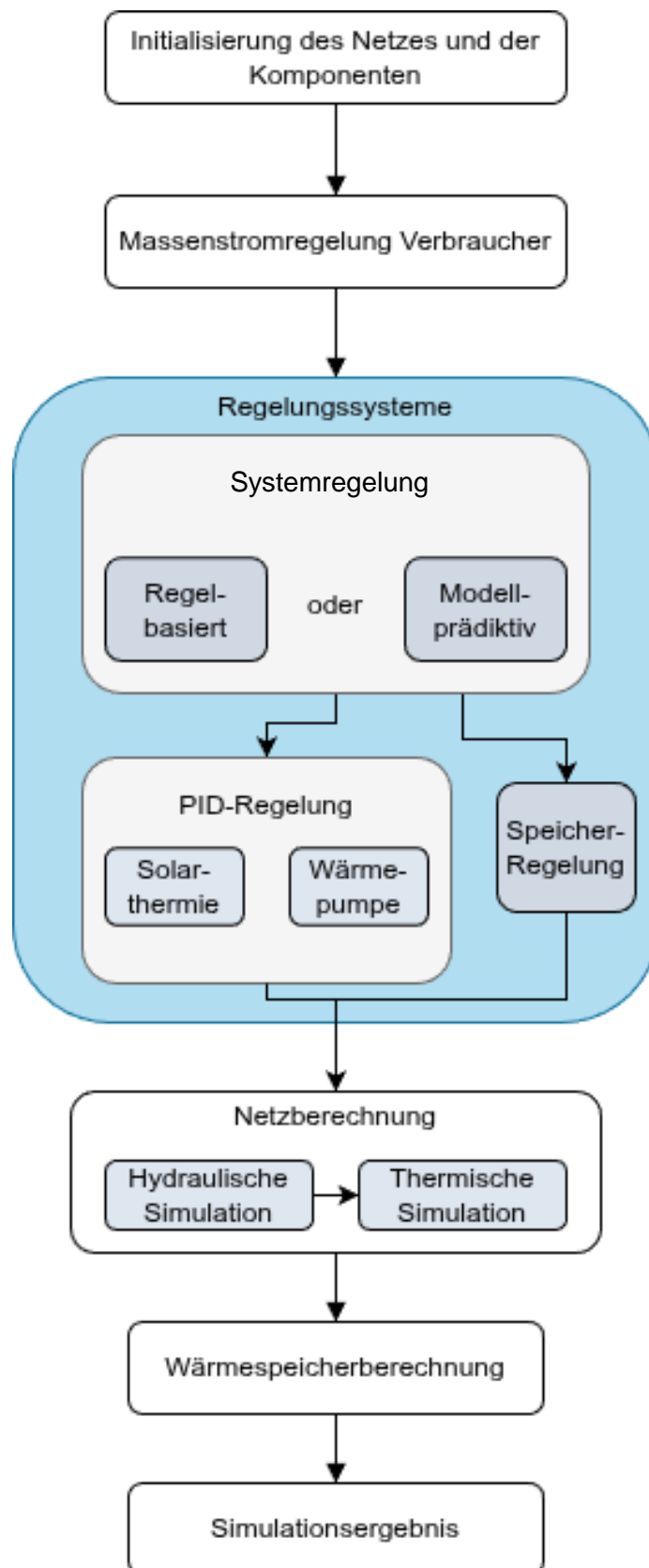


Abbildung 2-3: Flussdiagramm des Simulationsprozesses des Wärmenetzes mit Initialisierung, Massenstrom und Systemregelung, Netz- und Wärmespeicherberechnung sowie abschließendem Simulationsergebnis.

2.4.4 Cave Automatic Virtual Environment

Zur Visualisierung komplexer Daten kommt innerhalb des Projektes die fünfseitige Cave Automatic Virtual Environment, kurz CAVE, am HLRS zum Einsatz. Bei der CAVE handelt es sich um eine Virtual Reality (VR) Umgebung. Die CAVE ist ein würfelförmiger Raum, dessen Wände als Projektionsfläche dienen. Die Bilder werden durch fünf hochauflösende stereoskopische Projektoren erzeugt. Nutzer können die CAVE in kleinen Gruppen betreten und sich frei in dieser bewegen, wie in Abbildung 2-4 gezeigt.

Damit aus den stereoskopischen Bildern ein 3D-Effekt entsteht, tragen alle nutzenden Personen eine spezielle Brille (Active Shuttering Glasses). Die beiden Gläser dieser Brillen dunkeln sich abwechselnd in hoher Frequenz ab, sodass immer nur eines der beiden projizierten Bilder sichtbar ist. Durch diese Technik werden die Darstellungen dreidimensional wahrgenommen.

Zusätzlich zu der 3D-Technik ist die CAVE mit einem optischen Tracking System ausgestattet, das es ermöglicht, die Darstellung an die Perspektive eines Nutzers anzupassen. Dazu sind an einer Brille Marker angebracht, deren Position und Orientierung von einem optischen Tracking System erfasst wird. Dadurch wird die Darstellung an die Perspektive des Nutzers dieser Brille angepasst.

Weiterhin wird durch das Tracking System eine Interaktion mit der virtuellen Darstellung ermöglicht. Durch Tracking einer 3D-Maus kann die Ansicht eines virtuellen Objektes durch einen Nutzer in der CAVE verändert werden oder es kann sich durch ein virtuelles Modell bewegt werden. Darüber hinaus ermöglicht die 3D-Maus auch eine direkte Interaktion mit der Visualisierung. So lässt sich über ein Menü z. B. zwischen verschiedenen Darstellungsarten umschalten, die dargestellten Daten können geändert werden oder Orte, an denen Daten visualisiert werden können, angepasst werden.

Zum Rendern wird ein Rechencluster verwendet. Für jede Seite der CAVE stehen dabei zwei Knoten zur Verfügung, sodass pro Knoten ein Bild gerendert werden kann. Ein weiterer Knoten betreibt ein Display, über das der Nutzer die CAVE steuern kann. In jedem der elf Cluster-Knoten sind jeweils ein Intel Xeon Gold 6234 Prozessor und eine Nvidia Quadro P6000 GPU verbaut.



Abbildung 2-4: Analyse des Energienetzes am Campus Vaihingen durch mehrere Personen in einer CAVE.

Die CAVE wird mit den Visualisierungssoftwaresystemen COVISE und Vistle betrieben. Beide können aus verschiedenen Datenquellen Visualisierungen erstellen, die mithilfe des Renderers OpenCOVER in unterschiedlichen VR-Umgebungen dargestellt werden können.

Die Vorteile einer Darstellung von Daten in einer CAVE gegenüber anderen VR-Umgebungen, wie Head-Mounted-Displays oder Darstellungen auf 2D-Displays, sind die hohe Immersion der Nutzer durch die umgebende Darstellung innerhalb der CAVE. Orientierung und Interaktion mit dem Modell sind intuitiv, da man sich natürlich durch die CAVE bewegen kann. Weiterhin wird eine Kollaboration zwischen den Nutzern ermöglicht, da sie die gleiche Darstellung betrachten und ohne Einschränkung miteinander diskutieren können.

2.5 Fazit zur Entwicklung des DiTEaS-Dialogprozesses

Die Entwicklung des DiTEaS-Dialogprozesses zielte darauf ab, dialog- und visualisierungsbasierte Formate zu schaffen, die wissenschaftliche Modellierung mit Stakeholder-Beteiligung verknüpfen. Im Zentrum stand die Entwicklung eines interaktiven Prozesses, der komplexe Zusammenhänge eines Energiesystems verständlich visualisiert und diskutabel macht. Durch die Verknüpfung von Energiesystemmodellierung, Betriebssimulation und immersiver 3D-Visualisierung entstand ein Werkzeugkasten methodischer Instrumente, die wissenschaftliche Erkenntnisse für Stakeholder aus Forschung, Verwaltung, Privatwirtschaft und Zivilgesellschaft zugänglich macht und den Austausch zwischen diesen Gruppen fördert.

Der Dialogprozess soll so dazu beitragen, dass die Verständigung über technische, planerische und gesellschaftliche Aspekte der Transformation eines Energiesystems verbessert wird. Zudem soll der Dialogprozess einen gemeinsamen Lernprozess ermöglichen, das Vertrauen in modellbasierte Entscheidungen stärken und die Entwicklung von Zielbildern fördern.

Damit bildet der Dialogprozess einen zentralen Baustein des DiTEaS-Ansatzes und schafft Schnittstellen zwischen Disziplinen, verbessert die Aussagekraft komplexer Daten und bietet eine übertragbare Grundlage für künftige Beteiligungs- sowie Planungsprozesse in der kommunalen Energiewende.

3. Ausgangslage am Campus Vaihingen

3.1 Räumliche Struktur des Campus Vaihingen und aktuelle Nutzung

Das Untersuchungsgebiet Campus Vaihingen befindet sich am nord-westlichen Rand von Stuttgart-Vaihingen. Die graue Linie in Abbildung 3-1 stellt die geografische Bilanz- und Systemgrenze des Untersuchungsgebiets und damit die Basis für die in Kapitel 4 bis 7 durchgeführten Untersuchungen dar. Die Definition der Bilanz- und Systemgrenze ist insbesondere aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen bestehenden Versorgungsinfrastruktur, d. h. aufgrund der geographischen Lage der existierenden Wärme-, Kälte- und Stromnetze, entstanden.

Das Untersuchungsgebiet besteht aus über 200 Nichtwohngebäuden mit verschiedenen Gebäudefunktionen. Entsprechend der durch *HÖRNER UND BISCHOF (2022)* entwickelten Typologie für Nichtwohngebäude in Deutschland sind hier Büro-, Verwaltungs- oder Amtsgebäude; Gebäude für Forschung und Hochschullehre; Schule, Kindertagesstätte und sonst. Betreuung; Sportgebäude; Beherbergungs- und Unterbringungsgebäude; Gastronomie- und Verpflegungsgebäude; Produktions-, Werkstatt-, Lager- und Betriebsgebäude, sowie Technikgebäude angesiedelt. (Hörner und Bischof 2022)

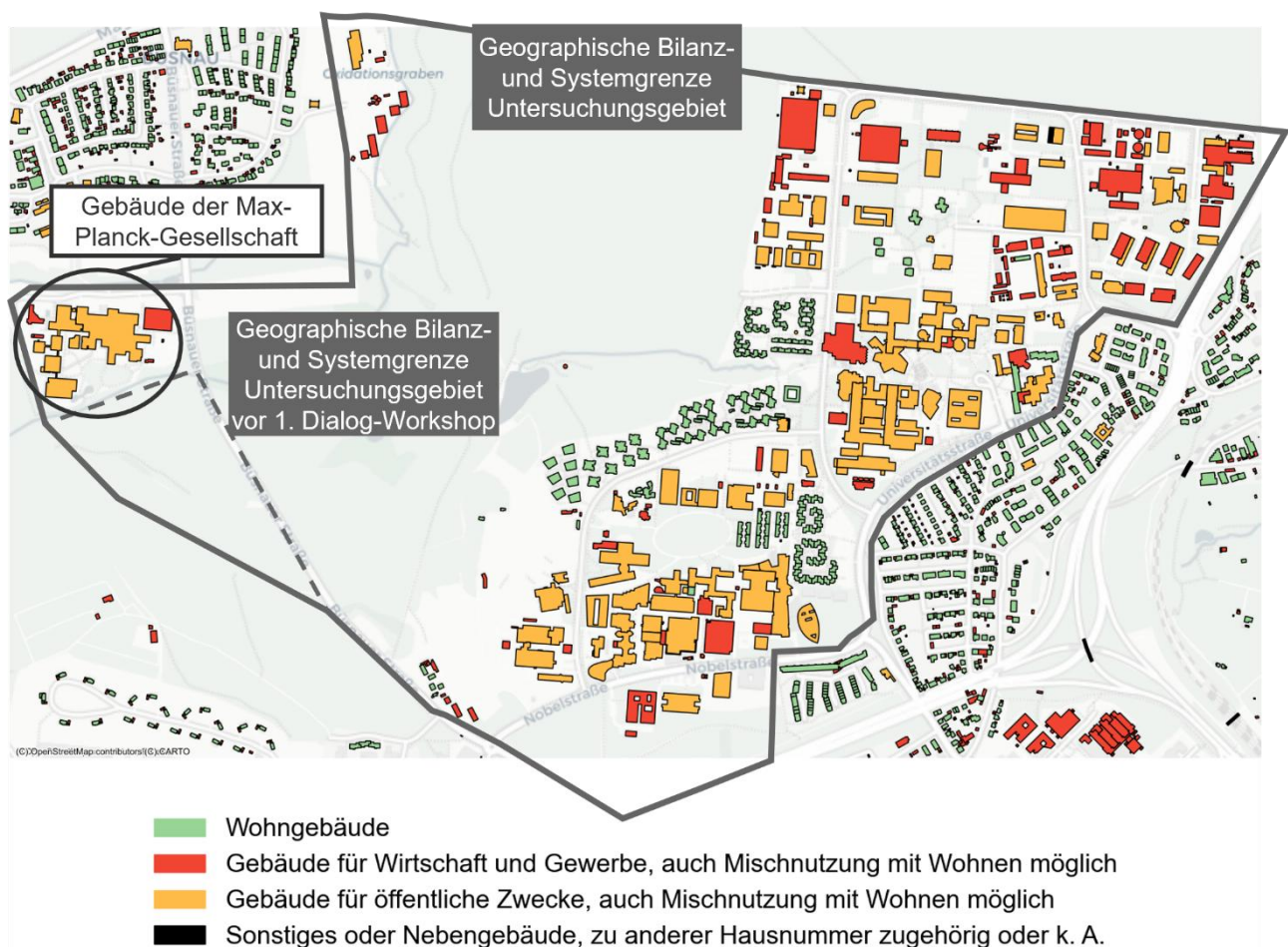


Abbildung 3-1: Lageplan des Untersuchungsgebietes Campus Vaihingen mit Gebäudenutzung und ausgewählten relevanten Gebäude.

Im ersten Workshop hatten die Teilnehmenden die Möglichkeit, zur vorgestellten Bestands- und Potenzialanalyse Rückmeldungen zu geben.

In Bezug auf die **Bilanz- und Systemgrenze** wurde angemerkt, dass die präsentierte Variante eine Freifläche unterhalb der Gebäude der Max-Planck-Gesellschaft im Westen des Untersuchungsgebiets nicht berücksichtigt, die als Müllhalde im Besitz des Landes Baden-Württemberg ist und für Flächen-PV in Frage kommen könnte. Die Bilanzgrenze wurde im Nachgang zum Workshop für die nachfolgenden Analysen entsprechend erweitert, wie nun in Abbildung 3-3 zu sehen. Davor verlief die Bilanzgrenze entlang der Büsnauer Straße bis zu den Gebäuden der Max-Planck-Gesellschaft.

Zudem wurde von den teilnehmenden Personen angemerkt, dass die Zuteilung der Gebäude zu Nutzungstypen und Betreibenden nicht überall korrekt vollzogen wurde, wie z. B. beim Gebäude der Hochschule für Technik auf dem Campus Vaihingen. Durch bilaterale Gespräche im Nachgang zum Workshop konnte dies korrigiert werden.

In Abbildung 3-1 werden die beschriebenen Gebäudefunktionen nach *HÖRNER UND BISCHOF (2022)* aufgrund der Übersichtlichkeit über den Objektnutzungsschlüssel der 3D-Gebäudemodelle in der Detailstufe 2 zu den beiden übergeordneten Gebäudefunktionen Gebäude für Wirtschaft und Gewerbe in orange und Gebäude für öffentliche Zwecke in aggregierter Form (gelb). Diese werden durch die Vermessungsverwaltungen der Bundesländer erstellt, über die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland zusammengeführt und seit 2022 für alle frei zur Verfügung gestellt. Die 3D-Gebäudemodelle enthalten die Gebäudegeometrie inklusive der Dachformen und weitere Metadaten, wie die Gebäudefunktion (vgl. Kapitel 2.3). (Hörner und Bischof 2022; AdV 2025)

Für die durchgeführten Untersuchungen werden die Metadaten vom 06.12.2023 verwendet. Neben den Nichtwohngebäuden befinden sich etwa 100 Wohngebäude im Untersuchungsgebiet, welche sowohl als Personalwohnungen als auch als studentische Wohnheime genutzt werden. Die Wohngebäude sind in Abbildung 3-1 in Hellgrün dargestellt.

Abbildung 3-1 zeigt weiterhin die geografische Lage von Gebäuden, die derzeit für die Energieversorgung, d. h. Wärme-, Kälte- und Stromversorgung, relevant sind. Dazu gehören die beiden Kältezentralen Nord und Süd, mit welchen die Versorgung eines Kältenetzes erfolgt; das HKW, mit welchem die Versorgung eines Wärmenetzes erfolgt und das HLRS, welches sowohl einen großen Stromabnehmer als auch eine potenzielle Abwärmequelle für das Wärmenetz darstellt. Die bestehende Versorgungsinfrastruktur und relevante technische Daten werden in Kapitel 4.2 beschrieben.

Die Wohn- und Nichtwohngebäude werden durch verschiedene Beteiligte verwaltet, wobei Eigentümer*innen und Verwaltende bzw. Betreibende sich hier teilweise unterscheiden. Dabei werden die in Abbildung 3-2 in blau dargestellten Gebäude betrieben durch die Universität Stuttgart, die in Hellblau dargestellten Gebäude betrieben durch die Hochschule der Medien und das in Dunkelblau dargestellte Gebäude betrieben durch die Hochschule für Technik. Sowohl die Gebäude der Universität Stuttgart, als auch die Gebäude der Hochschule der Medien und der Hochschule für Technik befinden sich dabei im Eigentum des Landes Baden-Württemberg und werden durch den Landesbetrieb Vermögen und Bau Baden-Württemberg verwaltet.

Ausgangslage am Campus Vaihingen

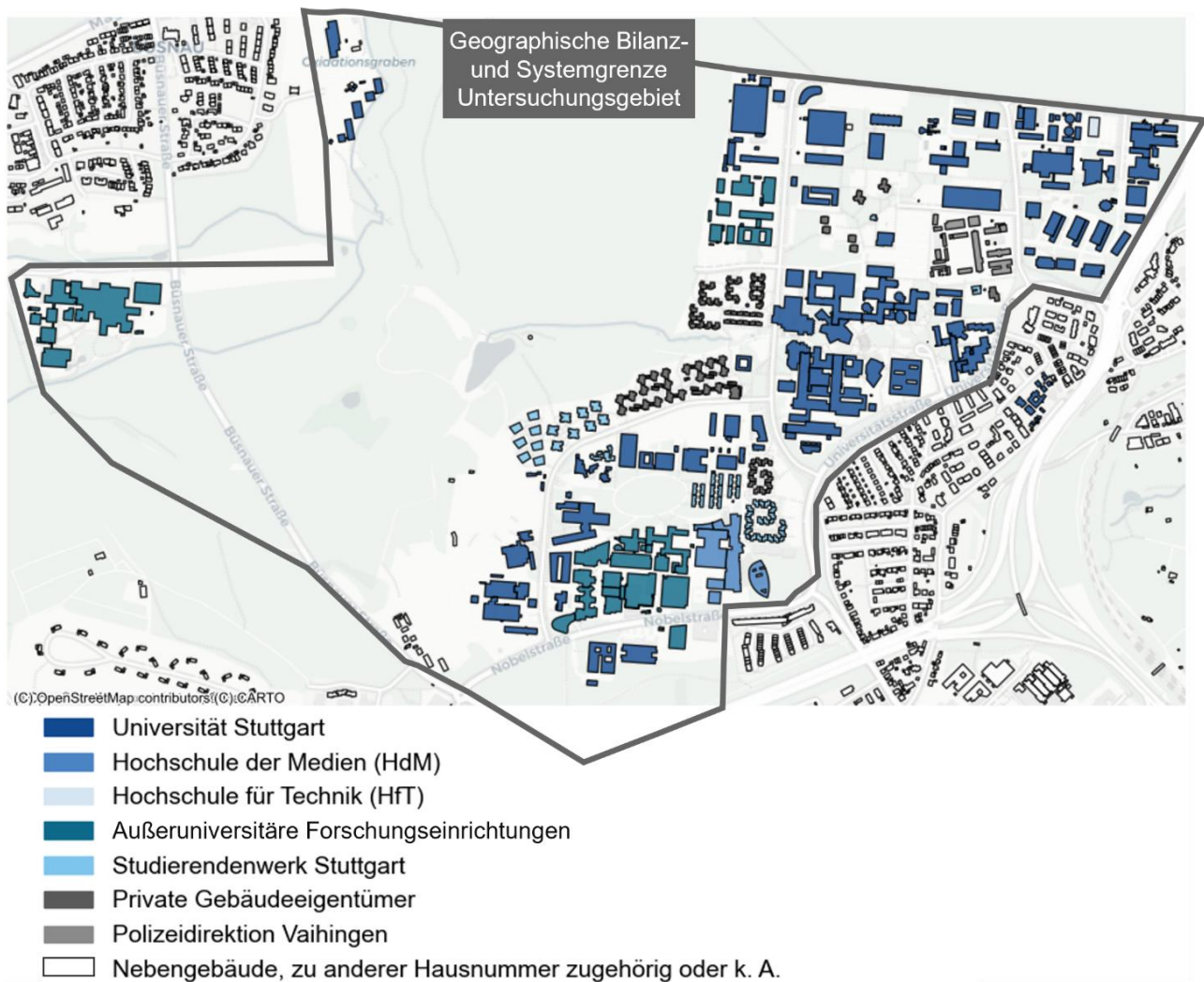


Abbildung 3-2: Lageplan des Untersuchungsgebietes Campus Vaihingen mit Gebäudebetreibern.

Die weiteren in Abbildung 3-2 dargestellten Gebäude sind Gebäude im Eigentum und im Betrieb Dritter. Das sind u. a. außeruniversitäre Forschungsstandorte der Fraunhofer-Gesellschaft, des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt sowie der Max-Planck-Gesellschaft. Wohngebäude, Schulen und Kindergärten befinden sich im Eigentum und im Betrieb des Studierendenwerks oder privater Gebäudeeigentümer wie der Vereinigung Stuttgarter Studentenwohnheime e. V., Vonovia, Förderverein der Helene-Fernau-Horn-Schule mit Schulkindergarten Stuttgart e. V. oder Ökumenisches Zentrum Stuttgart Gesellschaft bürgerlichen Rechts.

Auch für die genannten Dritten können sich die Eigentümer*innen und Verwaltende bzw. Betreibende unterscheiden. Da als Ausgangslage für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen aber insbesondere Verbrauchsdaten für die Gebäude, die durch die Universität Stuttgart betrieben werden zur Verfügung gestellt wurden, ist insbesondere die Information, wer die Gebäude betreibt relevant. In Abbildung 3-2 sind daher ausschließlich die während der durchgeführten Untersuchung identifizierten Gebäudebetreibern, nicht die Gebäudeeigentümer*innen dargestellt. Im nachfolgenden Kapitel wird u. a. näher auf die Zusammenhänge der Gebäudebetreibern und der Gebäudeeigentümer*innen eingegangen.

3.2 Stakeholder-Landschaft

Die für die Energiesystemtransformation am Campus Vaihingen relevante Stakeholder-Landschaft wurde in der Vorbereitungsphase durch eine Stakeholder-Analyse untersucht, welche sich in die drei Phasen der Identifikation, Kategorisierung und Beziehungsanalyse einteilen lässt (Reed et al. 2009).

Nach KÜNKEL ET AL. (2019) werden in der vorliegenden Ergebnisdokumentation unter Stakeholder *„Personen oder Institutionen [verstanden], die ein Interesse an einem bestimmten Entwicklungsverlauf oder einer bestimmten Entscheidung haben. Sie können entweder als Einzelpersonen oder als Vertreter einer Gruppe auftreten. Dazu gehören Personen, die eine Entscheidung beeinflussen, die Schlüsselfiguren bei der Umsetzung oder die von der Entwicklung betroffen sind“* (Künkel et al. 2019, S. 155). In unserem Falle umfasst dies also Personen und Institutionen, die in Entscheidungen und Umsetzungsvorhaben bezüglich des künftigen, klimaneutralen Energieversorgungssystems am Campus Vaihingen eingebunden oder von diesen betroffen sind.

3.2.1 Identifizierte Stakeholder am Campus Vaihingen

Ausgangspunkt für die Identifikation der Stakeholder war das projektinterne Vorwissen über zentrale Institutionen und Personen, die an Entscheidungs- und Umsetzungsprozessen rund um die Energie- und Wärmewende am Campus Vaihingen beteiligt sind. Dieses Vorwissen basiert auf den bereits laufenden oder abgeschlossenen Forschungsprojekten und Studien am Campus Vaihingen sowie der Einbindung von Projektbeteiligten in universitäre Gremien, die sich mit Energie- und Klimathemen beschäftigen wie u. a. dem sogenannten „Runden Tisch Nachhaltigkeit“. Dieses Wissen wurde mit Online-Recherchen ergänzt, um bisher unbekannte Stakeholder zu erfassen.

Im Anschluss an diese erste Identifikation von Stakeholdern erfolgte die Kategorisierung dieser. Hierbei wurde u. a. zwischen Stakeholdern auf Entscheidungsebene, Stakeholdern des operativen Betriebs des Energiesystems sowie unmittelbar betroffenen Gruppen unterschieden. Stakeholder mit formalen Entscheidungsbefugnissen oder an zentralen Stellen des Betriebs wurden für Interviews ausgewählt, um bisherige Erfahrungen sowie aktuelle Interessen, Hemmnisse und Konflikte im Bereich der Energie- und Wärmeversorgung und deren Transformation am Campus Vaihingen zu erschließen. Der Fokus der Interviews auf diese Stakeholder entsprang dem Umstand, dass die Untersuchung am Campus Vaihingen vorerst stärker als Vorarbeit für einen technischen Mock-Up betrachtet wurde und die Interviews deshalb auf zentrale Stakeholder mit Entscheidungs- und Fachkompetenz beschränkt wurden. Im Laufe der Untersuchungen zeichnete sich jedoch ein Bedarf für einen Dialogprozess ab, weshalb der Kreis an beteiligten Stakeholder erweitert wurde. Für den Dialogprozess wurden somit auch betroffene Stakeholder eingebunden, auf die teils in den Interviews als beteiligungsrelevante Stakeholder hingewiesen wurde. Eine Auflistung der identifizierten Stakeholder inklusive Kategorisierung und Angabe der Art der Beteiligung findet sich in Tabelle 3-1.

Neben den in den Dialogprozess eingebundenen Stakeholdern gibt es noch weitere Stakeholder auf dem Campus Vaihingen, die v. a. als Abnehmer von Wärme-, Kälte und Strom vom HKW ebenfalls von Veränderungen des lokalen Energiesystems betroffen sind. Diese Stakeholder wurden in unserem Dialogprozess nicht beteiligt, da sie größtenteils eine strukturähnliche Position zu bereits eingebundenen Stakeholdern aufweisen und aufgrund des Mock-Up Charakters der Studie keine vollumfassende Einbindung aller Stakeholder angestrebt wurde. Dies umfasst die Hochschule der Medien, die Hochschule für Technik wie auch die Max-Planck-Gesellschaft und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt als weitere außeruniversitäre Forschungs- bzw. Lehreinrichtungen neben dem Fraunhofer-Institutszentrum. Dazu kommen die Vereinigung Stuttgarter Studentenwohnheime e. V. und Vonovia als Eigentümer bzw. Betreiber von Wohnanlagen neben dem Studierendenwerk.

Ausgangslage am Campus Vaihingen

Tabelle 3-1: *Beteiligte Stakeholder am Campus Vaihingen.*

Stakeholder	Bedeutung für die Energiewende am Campus	Rolle			Beteiligung	
		Entscheider	Betreiber	Betroffene	Interview	Dialog
Leiter & Mitarbeiter der Abteilung 2 für Ingenieurtechnik, UBA, Landesbetrieb Vermögen & Bau Baden-Württemberg	Eigentümer der Gebäude und (Versorgungs-)Infrastruktur der Universität Stuttgart und damit Zuständig für Sanierung & Neubau von Gebäuden und Energieinfrastruktur	X			X	X
Ehemaliger Rektor, Universität Stuttgart	Leitung der Universität mit Fokus auf dem akademischen Betrieb, im Amt bis Oktober 2024	X			X	
Rektor, Universität Stuttgart	Leitung der Universität mit Fokus auf dem akademischen Betrieb	X			X	
Prorektor für Forschung und nachhaltige Entwicklung, Universität Stuttgart	u. a. verantwortlich für die Nachhaltigkeitsstrategie an der Universität Stuttgart	X			X	
Kanzlerin, Universität Stuttgart	Leitung der Verwaltung und somit auch der Gebäude- und Infrastrukturverwaltung der Universität Stuttgart	X				
Leiter Green Office, Universität Stuttgart	Nachhaltigkeitsmanagement an der Universität Stuttgart		X		X	X
Energiemanager, Dezernat 6 „Facility Management“, Universität Stuttgart	Energiemanagement an der Universität Stuttgart		X		X	X
Dezernats- und Abteilungsleiter, Dezernat 8 „Planen und Bauen“, Universität Stuttgart	Baumanagement mit Bauherreneigenschaft und Flächenmanagement an der Universität Stuttgart		X		X	X
Geschäftsführender Direktor & Leiter Stromversorgung, HKW der Universität Stuttgart	Das Heizkraftwerk auf dem Campus Vaihingen versorgt Universitätsgebäude, außeruniversitäre Einrichtungen und Studierendenwohnheime mit Strom, Fernwärme, Fernkälte und Dampf.		X		X	X
Referent für Nachhaltigkeit, Studierendenvertretung der Universität Stuttgart (stuvus)	Vertretung der Studierenden gegenüber der Universitätsleitung & -gremien mit Fokus auf Nachhaltigkeitsthemen			X		X
Mitglied des Personalrats, Universität Stuttgart	Vertretung der Mitarbeitenden der Universität Stuttgart gegenüber der Universitätsleitung & -gremien			X		X
Leiterin & Fachreferent der Abteilung Bauen & Technik, Studierendenwerk Stuttgart	Zuständig für die technische Betreuung der vom Studierendenwerk betriebenen Wohnanlagen, teils in Eigenbesitz, teils für andere Eigentümer betrieben		X	X		X
Wohnheimsprecher, Wohnanlage Straussacker 2	Vertretung der Bewohnenden der Wohnanlage gegenüber dem Studierendenwerk Stuttgart und Koordination der Wohnheim-internen Aufgaben			X		X
Verwaltungsleitung, Fraunhofer-Institutszentrum Stuttgart	Gebäudetechnische Verwaltung der fünf Fraunhofer-Institute am Campus Vaihingen		X	X		
Crossing Borders e. V. ³	Studentischer Verein der Universität Stuttgart, der sich mit Bildungsprojekten für nachhaltiges Handeln im Bereich regenerativer Energien einsetzt			X		X

³ Crossing Borders e. V. hat sich in Bildung Erneuerbare Energien Stuttgart e. V. umbenannt.

Zudem sind auf dem Campus die Verkehrspolizeiinspektion Ludwigsburg und Polizeidirektion Vaihingen, eine Schule sowie verschiedene Kindergärten bzw. Kindertagesstätten angesiedelt. Schließlich sind für die Transformation am Campus Vaihingen auch der Netzbetreiber Stuttgart Netze relevant, der das Umspannwerk Allmand auf dem Campus betreibt. Das Campus-interne Stromnetz, welches sich im Besitz des Universitätsbauamtes Stuttgart und Hohenheim (UBA) befindet, wird dahingegen durch das HKW der Universität Stuttgart betrieben.

Bei der Finalisierung der durch DiTEnS angestoßenen Planung und vor allem bei einer Konkretisierung Richtung Umsetzung von Maßnahmen sollte auch mit diesen Stakeholdern eine Koordination stattfinden. Dies betrifft auch das Fraunhofer-Institutszentrum, welches zwar zum Dialogprozess eingeladen wurde, an diesem jedoch nicht teilgenommen hat. Zudem sei hier bereits darauf hingewiesen, dass für die weitere Planung und Umsetzung im Anschluss an den Dialogprozess der Rektor sowie die Kanzlerin der Universität Stuttgart u. a. für ein formales Planungs- und Umsetzungsmandat eingebunden werden sollten, da die beiden für eine Teilnahme am Dialogprozess zwar angefragt wurden, an diesem jedoch ebenfalls nicht teilgenommen haben.

3.2.2 Stakeholder-Beziehungen und Governance-Struktur

Im dritten Schritt der Stakeholder-Analyse wurde die Beziehungs- und Konfliktdynamik zwischen den Stakeholdern am Campus Vaihingen genauer untersucht. Grundlage bildeten die Interviews mit den Stakeholdern (vgl. Tabelle 3-1), in denen bisherige Erfahrungen sowie Interessen, Hemmnisse und (potenzielle) Konfliktlinien im Bereich der Transformation des Energiesystems am Campus Vaihingen besprochen wurden. Die Interviews wurden in Zweier- oder Dreier-Teams leitfadengestützt geführt und simultan protokolliert (Flick 2025, S. 194 ff.).

Die Protokollierung der Interviews wurde der gängigeren Tonaufnahme vorgezogen, da durch das projektinterne Vorwissen über die Situation am Campus bekannt war, dass bereits gewisse manifeste Konflikte bestehen. Durch einen Verzicht auf eine Aufnahme wurde begünstigt, dass Stakeholder trotz dieser Konflikte überhaupt über diese Konflikte sprachen (Vogel und Funck 2018).

Die Interviewprotokolle wurden mithilfe einer qualitativen Inhaltsanalyse und einem induktiven Codier-Verfahren mit einem Fokus auf die beiden Dimensionen Hemmnisse und Konflikte der Energiewende am Campus Vaihingen in MaxQDA ausgewertet (Rädiker und Kuckartz 2019). Durch die induktive Codierung entstanden zunächst materialnahe Codes, die im Zuge schrittweiser Abstraktion zu übergeordneten Hauptkategorien, im Falle der Konflikte im Abgleich mit etablierten Konflikttypologien, verdichtet wurden (Ohlhorst und Schön 2010; Renn 2013; Becker et al. 2016).

So konnten zentrale Hemmnisse und Konfliktlinien der Transformation am Campus Vaihingen herausgearbeitet werden, wie sie in Tabelle 3-2 aufgeschlüsselt sind. Dabei ist zu beachten, dass diese Analyse auf in den Interviews berichteten Tatbeständen beruht, also von der Wahrnehmung und Konstruktion der Situation am Campus der interviewten Stakeholder ausgeht. Die Analyse wurde projektintern zur Vorbereitung des Dialogprozesses genutzt, insbesondere für die dort eingesetzten Dialogformate. Zudem wurden daraus Anforderungen an die Modellierung und Visualisierungen abgeleitet. Dies fand im Sinne einer Ko-Kreation des Dialogprozesses und der technischen Entwicklungen zwischen Projektteam und Stakeholdern statt (Dametto et al. 2022; Manktelow et al. 2023).

Neben der Hemmnis- und Konfliktanalyse wurde aus den Interviewprotokollen in Kombination mit der Stakeholder-Kategorisierung, der erfassten Eigentümer- und Betriebsstruktur und ergänzenden Online-Recherche ein Überblick über die bestehende Governance-Struktur am Campus Vaihingen erstellt. Wie in Abbildung 3-3 dargestellt, wurde dies in Form eines „Mappings“ umgesetzt.

Ausgangslage am Campus Vaihingen

Tabelle 3-2: *Identifizierte Hemmnisse und Konflikte der Energiewende am Campus Vaihingen.*⁴

Hauptkategorie	Unterkategorie
Hemmnisse	
Exogene Ereignisse	
Unzuträgliche Landes- und Bundespolitik	
Bürokratische Hürden	Formell: bürokratische Vorgaben und Verfahren
	Informell: Selbstschutz vor Risiken und Veränderungen in der Verwaltung
Finanzielle Restriktionen	
Unzureichende Governance	Fehlender Wille in Verantwortungspositionen
	Fehlende Strategie
	Fehlendes Mandat
	Mangelhafte Koordination
	Mangelhafte Kommunikation
	Falsche Anreizstrukturen
	Externe Lieferverpflichtungen
Mangelnde Ressourcen und -kompetenzen	Personalmangel
	Mangel an Fachkompetenz
Problematisches Nutzungsverhalten	
Technische Herausforderungen	Technische Komplexität
	Schwierige Potenzialbestimmung & begrenzte Potenziale
	Mangelhaftes Monitoringsystem
	Energietechnik am Campus z. T. veraltet
Konflikte	
Technik- und Strategiekonflikte	Uneinigkeit über weiteres Vorgehen
	Technische Unsicherheiten
	Ökonomische Unsicherheiten
	Realistische Zielsetzung
Verteilungskonflikte	
Personale Konflikte und Beziehungskonflikte	
Zielkonflikte	Mission Forschung & Lehre vs. Klimaschutzziele
	Finanzielles Ziel vs. Klimaschutzziele
	Versorgungssicherheit vs. Klimaschutzziele
	Dringendes vs. Nicht-Dringendes

⁴ Detaillierte Tabelle inkl. materialnaher Codes siehe Anhang 1.

Die Governance-Struktur der Energiewende am Campus Vaihingen ist geprägt durch verteilte Entscheidungsbefugnisse und Zuständigkeiten zwischen Gebäude- und Versorgungsinfrastruktureigentümern und -betreibern, wobei das UBA als mehrheitlicher Eigentümer und die Universität Stuttgart als mehrheitlicher Betreiber von Gebäuden und Energieversorgungsinfrastruktur die zentralen Stakeholder des Untersuchungsgebiets darstellen. Diese Ausgangslage wurde im ersten Workshop des Dialogprozesses den teilnehmenden Stakeholdern präsentiert, um die Entscheidungsstrukturen und die damit zusammenhängende Koordinationsherausforderung der Energiewende am Campus Vaihingen allen Involvierten in Erinnerung zu rufen bzw. zu vermitteln.

Durch die Stakeholder-Analyse konnte auch die Ausgangslage der Energiewende am Campus Vaihingen nachvollzogen werden. Dies umfasst einerseits eine Reihe bereits vorliegender Studien zur Energieversorgung. Dazu zählt der E-CampUS-Bericht aus dem Jahr 2019, in dem aus techno-ökonomischer Perspektive untersucht wurde, mit welchen Maßnahmen und zu welchen Kosten eine klimaneutrale Energieversorgung des Campus bis 2030 erreicht werden könnten.

Hinzu kommen die Nachhaltigkeitsberichte der Universität Stuttgart, bestehend aus dem IST-Bericht von 2022 sowie dem Bericht von 2023 mit dem Schwerpunkt auf Energie und Klimaschutz. Ergänzend liegen vom UBA beauftragte technische Studien zur geplanten und unterdessen auch in Bau befindlichen Abwärmezentrale am neuen HLRS III sowie der Quartierssteckbrief der kommunalen Wärmeplanung der Stadt Stuttgart aus dem Jahr 2023 vor.

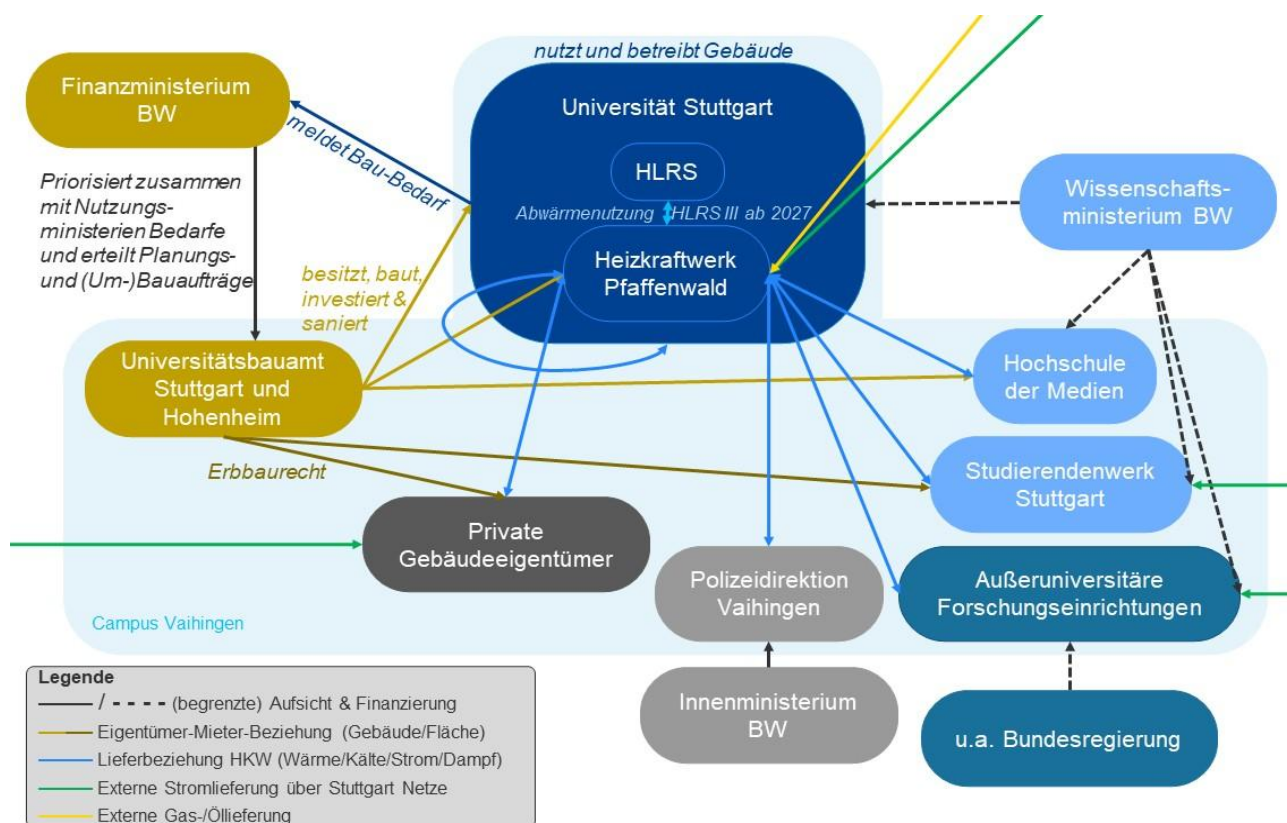


Abbildung 3-3: Entscheidungs- und Steuerungsstruktur von Baumaßnahmen der Energiewende am Campus Vaihingen.

Im ersten Workshop hatten die teilnehmenden Personen die Möglichkeit, zur vorgestellten Analyse Rückmeldungen zu geben. Dabei wurde vom UBA angemerkt, dass sie zwar Eigentümer von und Investor in Gebäuden und Energieinfrastruktur am Campus ist, sie jedoch gemäß der „Dienstanweisung des Finanzministeriums für die Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg“ nicht eigenständig über neue Maßnahmen entscheiden kann.

Das UBA kann Planungs- und Bauprojekte nur starten, wenn Bedarfsanträge der Universität vom Finanzministerium in Absprache mit dem Wissenschaftsministerium als Nutzungsministerium bewilligt werden oder aber durch den Landtag oder gesetzliche Vorschriften Aufträge des Finanzministeriums an das UBA initialisiert werden. Dies wurde im Nachgang zum Workshop in der Abbildung zur Governance-Struktur am Campus ergänzt.

Ab dem Jahr 2025 wird zudem eine vom UBA beauftragte Machbarkeitsstudie zur klimaneutralen Wärme-, Kälte- und Stromversorgung des Versorgungsgebiets des HKW erarbeitet, deren Abschluss Mitte 2026 vorgesehen ist. Neben den technischen Studien zum Bau des HLRS III und der dazugehörigen Abwärmezentrale wurde von Januar bis März 2023 eine Öffentlichkeitsbeteiligung für Anwohner*innen mit einer Auftaktveranstaltung, einer Online-Beteiligungsphase sowie einem abschließenden Bürgerforum durchgeführt. Dazu liegt ein Abschlussbericht aus dem Jahr 2023 vor.

Neben diesen Studien existieren zwei universitätsinterne Gremien, die sich bereits in der Vergangenheit mit Fragen der Energiewende und Klimaneutralität befassten. Der Runde Tisch Klima, der im Jahr 2020 eingerichtet und 2023 in Runder Tisch Nachhaltigkeit umbenannt wurde, unterstützt die Hochschulleitung in strategischen Fragen der Nachhaltigkeit. Er setzt sich neben Expert*innen aus der Professorenschaft sowie weiteren Universitätsangehörigen aus Forschung, Verwaltung und Hochschulleitung auch aus studentischen Vertreter*innen von stuvus und DoKUS zusammen. Das Gremium begleitete bisher zentrale Maßnahmen wie die Erstellung einer CO₂-Bilanz, die Einrichtung des Green Office und die Entwicklung eines Reallabors für Klimaschutz und diskutiert regelmäßig weitere Themen aus dem Bereich Nachhaltigkeit.

Der Arbeitskreis Energie an der Universität Stuttgart wurde im Jahr 2004 gegründet und im Jahr 2022 als Arbeitskreis Energie und Klimaschutz neu ausgerichtet, um in Form von Nachhaltigkeitsberichten ein Energie- und Klimaschutzkonzept für die Universität Stuttgart zu entwickeln und fortzuschreiben. Ihm gehören Vertreter*innen des Rektorats, des Green Office, des Energiemanagements, des HKW sowie des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung bzw. des Instituts für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung an. Bei Bedarf werden weitere Beteiligte aus Verwaltung, Instituten und dem UBA einbezogen. Nach Einschätzung von Stakeholdern ist dieser Arbeitskreis derzeit jedoch nur eingeschränkt aktiv.

Bislang existieren also keine Gremien, die über die Universität hinaus weitere Stakeholder am Campus Vaihingen aktiv in Planungen einbinden, ebenso wenig wurden Studien zur umfassenden klimaneutralen Energieversorgung des Campus Vaihingen im Rahmen eines partizipativen Verfahrens erarbeitet. Vor diesem Hintergrund baut das Projekt DiTEoS auf den vorhandenen Analysen und Gremienarbeiten auf und erweitert bestehende Ergebnisse und Kooperationen durch den partizipativen Dialogprozess. Zudem wird die Verknüpfung der Ergebnisse des Dialogprozesses mit der anstehenden Machbarkeitsstudie des UBA beachtet.

3.3 Fazit zur Ausgangslage am Campus Vaihingen

Aus der Stakeholder-Analyse am Campus Vaihingen ergab sich ein Bedarf an einer zwischen Stakeholdern abgestimmten, klaren und mandatierten Strategie für die Transformation des Energiesystems am Campus Vaihingen (vgl. Tabelle 3-2). Die große Mehrheit der Stakeholder zeigte zudem Bereitschaft für einen Dialog, der dieses Desiderat und die weiteren identifizierten und damit verbundenen Hemmnisse und Konflikte im Gebiet bearbeitet. Bestehende Differenzen zwischen den Stakeholdern lagen dabei vor allem in der Einschätzung des Weiterbetriebs des HKW, insbesondere in Bezug auf die Fragen wie lange, in welcher Kapazität und mit welchen Energieträgern (etwa Biogas oder Wasserstoff) dieses weiterbetrieben werden soll.

Zudem liegen der lokalen Transformation des Energiesystems gemäß den Stakeholdern auch einige externe Hemmnisse im Wege, wie die polit-ökonomischen Verschiebungen durch die Energiekrise aufgrund des russischen Angriffskrieges in der Ukraine, höhergelegene bürokratische und politische Hürden sowie ein Fachkräftemangel in involvierten Professionen, die im Dialogprozess selbst zwar nicht aufgelöst, aber in Bezug auf lokale Strategien im Umgang mit diesen diskutiert werden können. Einige Stakeholder standen weiteren Studien zwar skeptisch gegenüber, sahen jedoch den Nutzen in einer besseren Koordination, insbesondere unter Einbezug praktischer und fachlicher Perspektiven und Bedarfe des Betriebs, was als bisheriges Defizit wahrgenommen wurde. Im Fokus dieser operativen Perspektive stand vor allem das Thema der ökonomischen Auswirkungen, der Versorgungssicherheit und der Umsetzbarkeit einer Transformationsstrategie im operativen Betrieb des Energiesystems und unter Einbindung bestehender Systeme. Stakeholder des Wissenschaftsbetriebs betonten wiederum teilweise die Beachtung von Innovationspotenzialen beim Entwerfen zukünftiger Energieversorgungsvarianten, die sie bei planerischen und operativen Stakeholdern eher vermissen.

Auf der Governance-Ebene besteht durch die getrennte Eigentümer- und Betreiberstruktur von Gebäude- und Energieinfrastruktur prinzipiell ein Verteilungskonflikt im Sinne eines Nutzer-Investor-Dilemmas bzw. Vermieter-Mieter-Dilemmas, da sich Sanierungen und neue Versorgungsinfrastruktur auf Kosten des UBA nicht bei diesem selbst, sondern bei der Universität und anderen Stakeholdern positiv auf die Energiekosten auswirkt. Da die Mehrheit der Stakeholder jedoch an das Land Baden-Württemberg angebundene, dort tätige Institutionen sind und somit ein gemeinsamer institutioneller Rahmen mit bindenden Klimaneutralitätszielen von Landesliegenschaften bis 2030 und einem Klimaneutralitätsziel des Landes bis 2035 besteht, ergibt sich eine weisungsgebundene, grundsätzliche Kooperationsbereitschaft aller Stakeholder zur klimaneutralen Transformation des lokalen Energiesystems, auch wenn bei einigen Stakeholdern gewisse Zweifel an der tatsächlichen Realisierbarkeit der ambitionierten Zielvorgabe bis 2030 erkennbar waren. Im Vergleich zu typischen Wohn- und Mischgebieten ist die Koordination unter den Stakeholdern grundsätzlich vereinfacht, da auf Gebäude- und Infrastrukturebene anstatt einer hohen Anzahl an heterogenen privaten Stakeholdern eine geringe Anzahl an mehrheitlich staatlichen bzw. staatsnahen Stakeholder vorhanden ist.

Die eher zentralisierte Eigentümer- und Betreiberstruktur am Campus Vaihingen wirkt sich durch eine zentrale Erfassung und Verwaltung der energetischen Monitoring-Daten, zumindest für die Gebäude der Universität Stuttgart und damit dem Großteil der betrachteten thermisch konditionierten Nutzfläche, außerdem in einer vergleichsweise hohen Datenverfügbarkeit z. B. von zeitlich und räumlich hochaufgelösten gemessenen Verbrauchsdaten für Wärme, Kälte und Strom aus. Trotz dieser vergleichsweise hohen Datenverfügbarkeit von gemessenen Verbrauchsdaten im Untersuchungsgebiet des Campus Vaihingen der Universität Stuttgart sind derzeit weder die Anteile der Trinkwarmwasserbereitung, noch die der Prozesswärme und Prozesskälte am Gesamtwärme- und

-Kälteverbrauch bekannt. Auch die Stromverbräuche der raumluftechnischen Anlagen sind unbekannt. Daneben sind weitere Fragestellungen hinsichtlich der Betrachtung von Temperaturabsenkungen im Vor- und Rücklauf des Wärmenetzes, der Nachverdichtung, der energetischen Sanierungszustände, d. h. sowohl der aktuelle Zustand der bauphysikalischen Eigenschaften der Gebäudehüllen als auch der Zustand der Wärmeübergabestationen, sowie der dezentralen Anlagentechnik, trotz der vergleichsweise geringen Anzahl an Stakeholder, schwer zu beantworten. Diese Informationen sind insbesondere für die Abschätzung der zukünftigen Bedarfs- und Versorgungsstruktur wesentlich. Die Datenbeschaffung und Methoden zur Datenvorverarbeitung stellen somit auch für dieses Untersuchungsgebiet auf technischer Seite eine der größten Herausforderungen für die Entwicklung möglicher Transformationspfade des Energieversorgungssystems dar.

Die dargelegte Analyse der Ausgangslage der Energiewende am Campus Vaihingen mit der beschriebenen Stakeholder-Landschaft, der heterogenen Gebäudestruktur, den energieintensiven Forschungsinfrastrukturen, der bestehenden Versorgungsinfrastruktur aus HKW und Kältezentralen, dem Höchstleistungsrechenzentrum sowie mehrerer Wohnanlagen zeichnet ein komplexes sozio-technisches System, welches ein geeignetes und interessantes Umfeld zur Entwicklung, Erprobung und Untersuchung neuartiger Ansätze und Instrumente der lokalen Energiewende darstellt, wie sie als Methodik einer „VR-basierten simulativen Gestaltung eines gesellschaftlichen Dialogs zur Transformation urbaner Energiesysteme“ in DiTeNS entsteht. Zu beachten ist dabei, dass sich die Ausgangslage am Campus signifikant von typischen urbanen Wohn- und Mischquartieren unterscheidet und bei einer Übertragung der Methodik und Ergebnisse auf weitere Case Studies bzw. städtische Quartiere diese Unterschiede im Bereich der Stakeholder-, Gebäude- und Versorgungsinfrastruktur berücksichtigt werden müssen.

Letzten Endes liegt bei den beteiligten Stakeholdern am Campus Vaihingen, auch im Unterschied zu typischen Stadtquartieren, zwar ein durchgehend hoher Bildungsstand mit Gymnasial- und Hochschulabschlüssen vor. Jedoch gibt es teils erhebliche Unterschiede im Fach- und Vorwissen rund um die Energie- und Wärmeversorgung, was eine Herausforderung für die Aufbereitung von Inhalten für den Dialogprozess darstellt. Eine zielgruppenorientierte Aufbereitung und Visualisierung in den Workshops muss einen gemeinsamen Lernprozess über die Phasen der System-, Ziel- und Transformationswissensgenerierung unter allen Beteiligten fördern, zugleich auch am Campus Vaihingen die unterschiedlichen Informationsbedarfe von Expert*innen bis hin zu fachlichen Laien bedienen.

4. Systemwissen I – Bestandsanalyse

4.1 Gebäudestruktur

Die Ermittlung des Energiebedarfs der Gebäude im Untersuchungsgebiet ist die Basis für Transformationspfade der Energieversorgungssysteme hin zu integrierten klimaneutralen Energieversorgungssystemen. Voraussetzung für eine Transformation der Energieversorgungssysteme ist, dass der Energiebedarf aller Gebäude zu jedem Zeitpunkt der Transformation gedeckt werden muss.

Es ist dabei üblich, den Energiebedarf von Gebäuden mittels Gebäudearchetypen abzuschätzen. Wobei ein Gebäudearchetyp eine Gruppe von Gebäuden mit ähnlichen Eigenschaften ist, welche zu einem Cluster zusammengefasst wird. Die Eigenschaften die den Energiebedarf von Gebäuden beeinflussen und Ähnlichkeiten aufweisen sind in vielen Gebäudetypologien die Baualtersklasse und die Gebäudefunktion. Dabei steht die Eigenschaft Baualtersklasse für eine zeitliche Periode von baulichen, Brandschutz- und Energiesparanforderungen, Materialverfügbarkeiten und architektonischen Trends in welcher in allen Gebäuden eine ähnliche Anlagentechnik und ähnliche Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehüllteile, d. h. Wand, Dach, Keller, Fenster, eingesetzt wurden.

Die Parameter der Eigenschaft Baualtersklasse verändern sich dabei, wenn energetische Sanierungsmaßnahmen, wie der Austausch von Anlagentechnik, die Nachrüstung von erneuerbaren Energien oder die Dämmung von Gebäudehüllteilen, durchgeführt werden. Wobei die Sanierungstiefe, d. h. der Umfang der Sanierungsmaßnahmen dabei ebenfalls variieren können. Typische Sanierungsmaßnahmen und entsprechende statistische Kennwerte liegen in der deutschen Nichtwohngebäudetypologie bisher nicht vor. (Hörner und Bischof 2022)

Die Eigenschaft Gebäudefunktion beschreibt dagegen belegungs- und nutzungsbezogene Parameter, d. h. durch den Nutzenden beeinflusste Parameter, wie Belegungs- und Nutzungsprofile von Räumen und Gebäuden, Geräteleistungsdichten, Soll-Temperaturen oder Luftwechselraten. Ein Gebäudearchetyp wird dann z. B. durch statistische Werte der ähnlichen Eigenschaften beschrieben. So wird es vermieden für jedes einzelne Gebäude Daten erheben zu müssen bzw. zur Verfügung gestellt zu bekommen. (Hörner und Bischof 2022; Li et al. 2023)

Die zur Ermittlung des Energiebedarfs relevante Gebäudestruktur des Untersuchungsgebiets, setzt sich daher zusammen aus der in Abbildung 4-1 dargestellten Baualtersklasse und der in Abbildung 4-2 dargestellten Gebäudefunktion. Um die Gebäudefunktion für das oben erläuterte Energiesystemmodell TIMES Local ausreichend genau beschreiben zu können, wurde auf Basis der deutschen Nichtwohngebäudetypologie eine andere Aggregation der Gebäudefunktion vorgenommen als der in Abbildung 3-1 erläuterten Aggregation, welche zur Visualisierung im Dialogformat verwendet wurde. Unter Vernachlässigung von nicht relevanten Gebäudearchetypen der Nichtwohngebäudetypologie werden am Campus Vaihingen Bildungs- und Bürogebäude sowie Hallenbauten als zwei Gebäudearchetypen betrachtet.

In Abbildung 4-1 ist das Untersuchungsgebiet mit den drei Baualtersklassen nach der deutschen Nichtwohngebäudetypologie Altbauten, vor 1979, Zwischenbauten, 1979 bis 2009 und Neubauten, nach 2010 dargestellt. Baualtersklassen für deutsche Wohngebäude-Typologie bilden üblicherweise geringere zeitliche Perioden von fünf bis dreißig Jahren ab. Grundsätzlich wurde im Rahmen der Untersuchungen das exakte Baualter für alle durch die Universität Stuttgart betriebenen Gebäude,

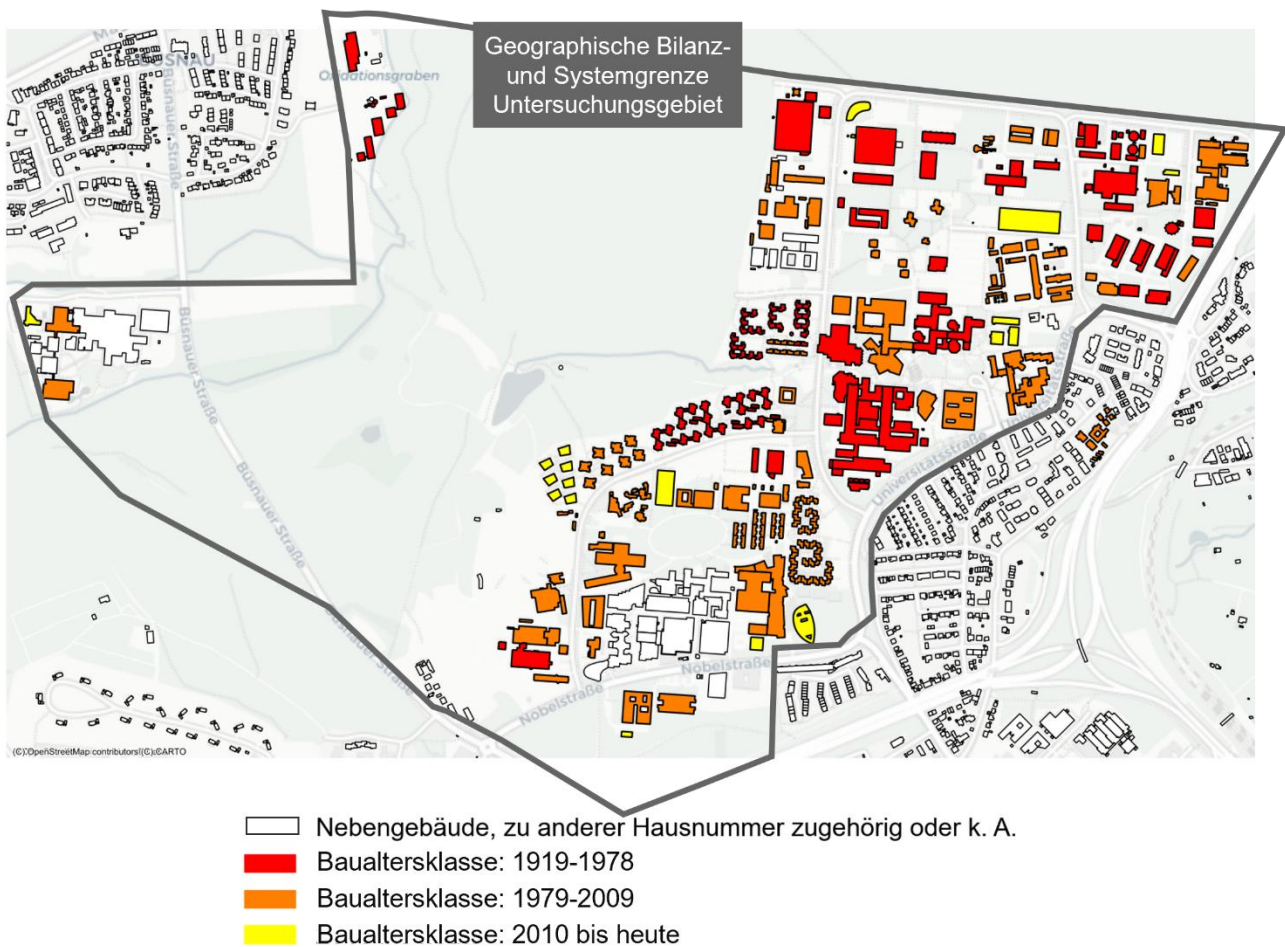


Abbildung 4-1: Lageplan des Untersuchungsgebietes Campus Vaihingen mit Baualtersklassen nach der deutschen Nichtwohngebäudetypologie (Hörner und Bischof 2022).

sowie für die Wohnheime im Untersuchungsgebiet zur Verfügung gestellt. Zur Darstellung werden auch für die Wohngebäude die drei erläuterten Baualtersklassen der Nichtwohngebäude verwendet.

Von einer Ermittlung des Energiebedarfs mittels der beschriebenen Gebäudestruktur wurde in dieser Untersuchung jedoch abgesehen, da im vorliegenden Fall in erheblichem Umfang zeitlich hoch aufgelöste Messdaten sowohl für die Energiebedarfe Strom, Wärme und Kälte als auch die Einspeisungen zur Verfügung standen. Information zu bereits durchgeführten energetischen Sanierungsmaßnahmen und Sanierungstiefen im Untersuchungsgebiet konnten jedoch während des Untersuchungszeitraums nicht ermittelt werden, daher musste hier mit Abschätzungen gearbeitet werden.

Im Workshop hatten die teilnehmenden Personen die Möglichkeit, zur vorgestellten Bestands- und Potenzialanalyse Rückmeldungen zu geben. Dabei wurde angemerkt, dass im Verlauf des Ausbaus des Wärmenetzes für die AWZ am HLRS III auch das Verteilnetz des HKW im selben Versorgungskanal „Ringschluss HLRS“ (vgl. Abbildung 4-2) erweitert wird. Die Anmerkung wurde dokumentiert und die zugrundeliegenden Analysen anhand des Stakeholder-Inputs erneut geprüft. Wo erforderlich, wurden die Ergebnisse entsprechend angepasst und in künftigen Energienetzmodellberechnungen berücksichtigt.

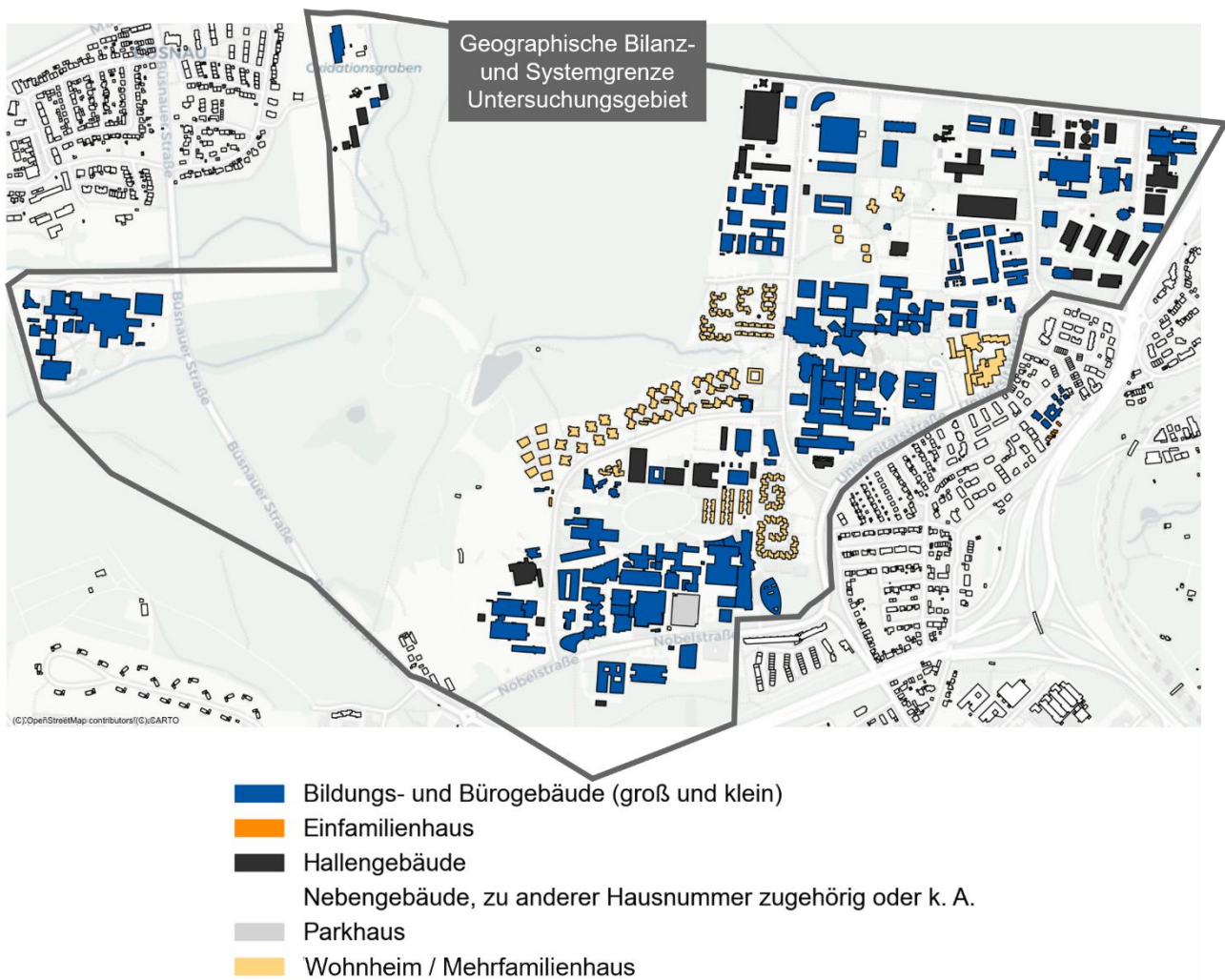


Abbildung 4-2: *Lageplan des Untersuchungsgebietes Campus Vaihingen mit eigener Aggregation der Gebäudefunktion.*

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass für derartig große Untersuchungsgebiete Abweichungen von abgeschätzten Energiebedarfslastprofilen zu gemessenen, witterungsbereinigten Energieverbrauchslastprofilen bestehen, wurden letztere für die Untersuchungen verwendet. Die Daten ermöglichen jedoch im weiteren Verlauf auch die Validierung von Abschätzungsmethoden, die im Falle der anderen Case Studies zu erwarten sind. Im Hinblick auf die Entwicklung wird davon ausgegangen, dass eine Fluktuation des Verhaltens durch die Summe der Nutzenden im Untersuchungsgebiet vernachlässigt werden kann. Auf den Energieverbrauch (Wärme, Kälte, Strom) im Untersuchungsgebiet wird in den nachfolgenden Kapiteln zur Versorgungsinfrastruktur eingegangen.

4.2 Versorgungsinfrastruktur

4.2.1 Wärmeversorgungsinfrastruktur

Das Wärmenetz am Campus Vaihingen wird vom HKW der Universität Stuttgart betrieben und versorgt die Mehrheit der Gebäude am Campus Vaihingen mit thermischer Energie. Die Anschlussleistung beträgt ca. 92 MW für 109 Abnehmer. Das Netz umfasst eine Länge von rund 12 km, ein Volumen von etwa 2.300 m³ und arbeitet mit Vorlauftemperaturen zwischen 70 °C und 120 °C. Die

Die Darstellung des Wärmenetzes am Campus Vaihingen ist in der veröffentlichten Version des Ergebnisberichts nicht verfügbar.

Abbildung 4-3: Darstellung des Wärmenetzes am Campus Vaihingen mit dem Heizkraftwerk, Haupttrassen und ausgewählten Netzpunkten.

Planck-Gesellschaft. Das Wärmenetz erstreckt sich dabei vom HKW bis zu den Einrichtungen der Max-Planck-Gesellschaft in Büsnau. Einen Überblick über das Netz und wichtige Punkte im Netz können aus Abbildung 4-3 entnommen werden.

Die Analyse des Wärmenetzes am Campus Vaihingen zeigt, dass sowohl auf Gebäude- als auch auf Netzebene deutliche Optimierungspotenziale bestehen. Der Vergleich zwischen dem Informatikgebäude mit Wärmeübertrager und dem Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung (IWS) ohne Wärmeübertrager verdeutlicht, dass Gebäude mit Wärmeübertrager die Vorlauftemperatur im Sommer besser an die Last anpassen können, während Gebäude ohne Wärmeübertrager höhere und weniger regelbare Vorlauftemperaturen sowie deutlich erhöhte Rücklauftemperaturen aufweisen. Dies führt im Sommer zu einer geringen Temperaturspreizung ($\Delta T \approx 0 \text{ }^\circ\text{C}$), reduzierter Wärmeabgabe, hohen Netzverlusten und einer Überhitzung des Rücklaufs, was als ein Hinweis auf eine Überversorgung sein kann, wie in Abbildung 4-4 dargestellt.

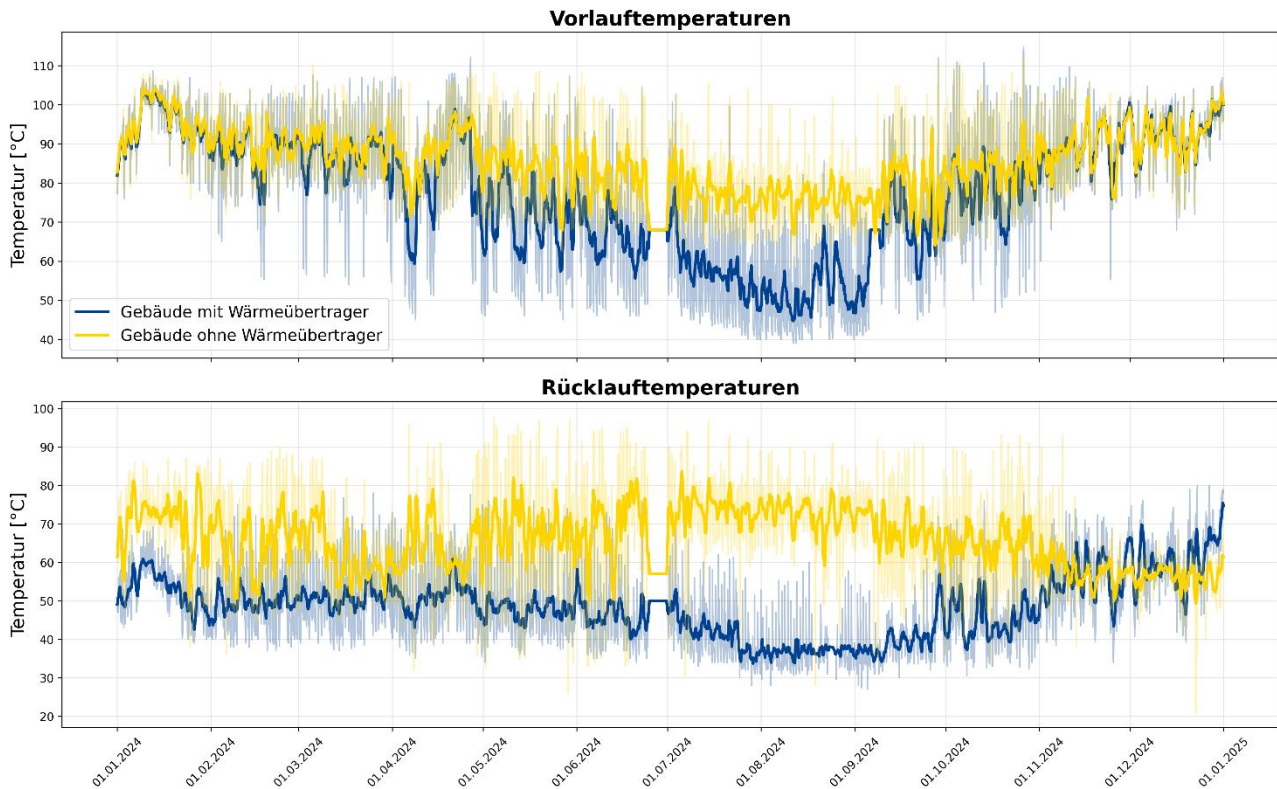


Abbildung 4-4: Vergleich der Vorlauf- (oben) und Rücklaufemperaturverläufe (unten) von Gebäuden mit und ohne Wärmeübertrager.

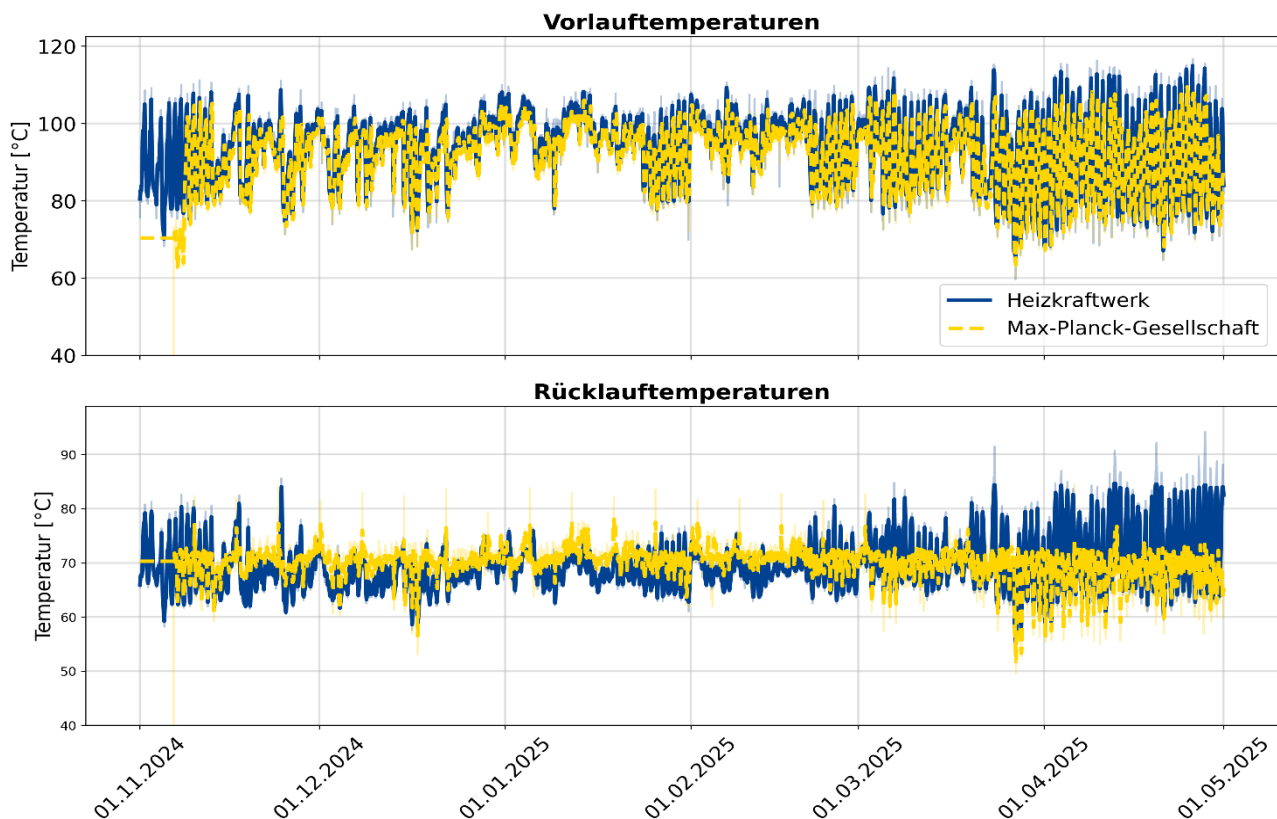


Abbildung 4-5: Messdaten von Vorlauf- (oben) und Rücklauftemperaturen (unten) am Heizkraftwerk und an den Gebäuden der Max-Planck-Gesellschaft.

Ein möglicher zusätzlicher Einflussfaktor auf die im Sommer beobachteten hohen Temperaturen ist der saisonal unterschiedliche Betriebsmodus des HKW. Im Sommer wird das Heizkraftwerk im Einschicht-Betrieb gefahren. Dabei werden tagsüber die thermischen Speicher durch den GuD-Block mit höheren Temperaturen beladen, um nachts eine ausreichende Wärmeversorgung des Netzes ohne laufende Blöcke sicherzustellen.

Diese Betriebsweise führt dazu, dass die tagsüber erhöhten Vorlauftemperaturen auch im Wärmenetz sichtbar werden. Die beschriebenen Muster, insbesondere die geringe Spreizung und die hohen Rücklauftemperaturen, lassen sich dadurch jedoch nicht vollständig erklären, da sie auch bei Teillastbetrieb und in Gebäuden ohne Wärmetauscher auftreten.

Auch am HKW und am Netzschlechtepunkt bei den Gebäuden der Max-Planck-Gesellschaft bestätigen sich diese Muster, wie in Abbildung 4-5 dargestellt. Während im Winter Vorlauftemperaturen von rund 100 °C und Spreizungen von 20 bis 30 °C gemessen werden, zeigen sich ab dem Frühjahr zunehmend hohe Vorlauftemperaturen mit großen Schwankungen, während die Spreizung auf wenige bis 0 °C absinkt. Die Analyse aus Abbildung 4-6 zeigt zudem Abweichungen von der Vorgabe aus den Technischen Anschlussbedingungen⁵. Anstelle von 70 °C bei 0 °C Außentemperatur wurden 95 °C gemessen, was bei mildem Wetter zu hohen Vorlauftemperaturen und reduziertem Wirkungsgrad führt.

⁵ Die Technischen Anschlussbedingungen (TAB) sind eine verbindliche technische Anforderungen der Fernwärmeversorgungsunternehmen für den sicheren Betrieb von Fernwärme-Hausstationen, gesetzlich verankert in § 17 AVBFernwärmeV.

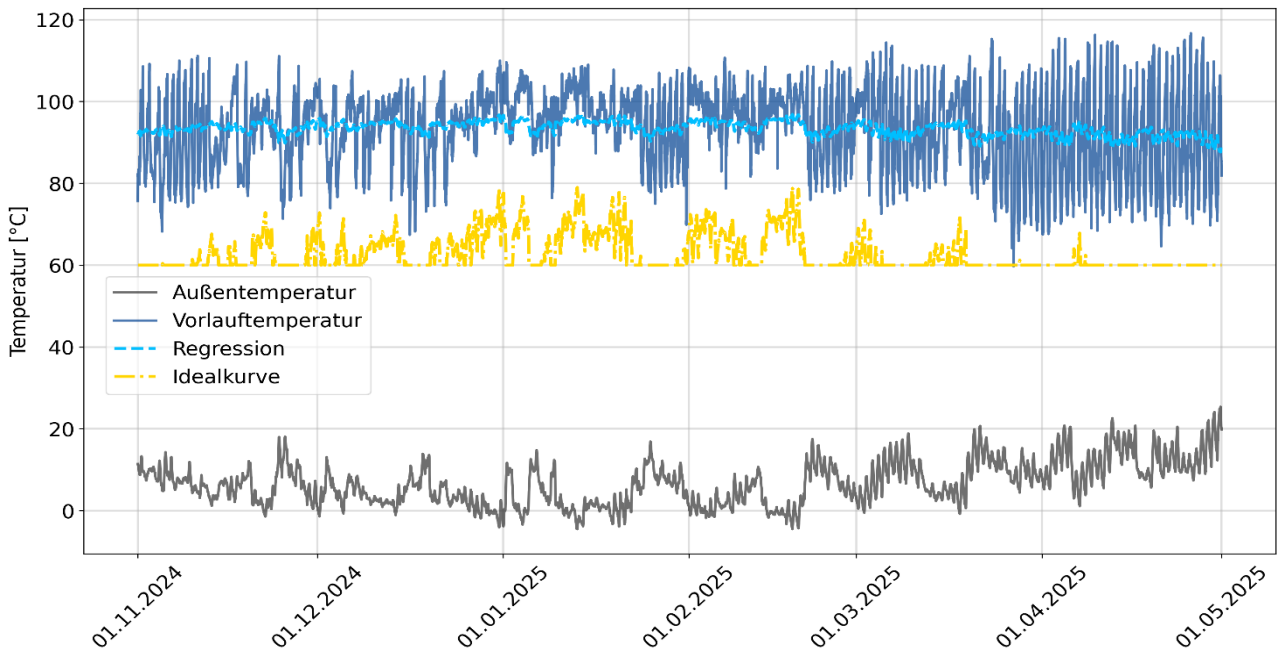


Abbildung 4-6: Analyse der Heizkurven des Wärmenetzes am Campus Vaihingen im Vergleich zu den Technischen Anschlussbedingungen.

Tabelle 4-1: Adresse und Eigenschaften von analysierten Gebäuden mit Messdaten aus dem Monitoring der Universität Stuttgart.

Adresse	Baujahr	Anschluss an Wärmenetz	Trinkwarmwasser-versorgung	Vorauf-temperatur	
				Raum-heizung	Trinkwarm-wasser
Allmandring 5B	1997	Raumheizung und Trinkwarmwasser mit Wärmeübertrager	Zentral, über Wärmenetz	< 80 °C	
Pfaffenwaldring 4	1959	Raumheizung und Trinkwarmwasser mit Wärmeübertrager	Keine Angabe	< 85 °C	
Allmandring 28B	1988	Raumheizung mit Wärmeübertrager, Trinkwarmwasser ohne Wärmeübertrager, mit zwei Brauchwasserbereitern mit je einem Doppelregister	Zentral, über Wärmenetz	< 60 °C	< 95 °C
Allmandring 31	1993	Raumheizung mit Wärmeübertrager, Trinkwarmwasser ohne Wärmeübertrager, mit zwei Brauchwasserbereitern mit je einem Doppelregister	Zentral, über Wärmenetz	< 80 °C	< 95 °C
Allmandring 13	2021	Raumheizung inkl. Versorgung RLT-Anlagen mit Wärmeübertrager	Dezentral, über el. Durchlauferhitzer	< 65 °C	
Pfaffenwaldring 7	1977	Raumheizung ohne Wärmeübertrager	Raumweise dezentral, über el. Durchlauferhitzer	< 120 °C	
Universitätsstraße 28 bis 34	1990	In Planung	Gebäudeweise dezentral, über Gas-Brennwertkessel und el. Nachheizung	< 80 °C	

Neben der beschriebenen Messdatenanalyse der netzseitigen Vor- und Rücklauftemperaturen, wurde ebenfalls eine Messdatenanalyse der gebäudeseitigen Vor- und Rücklauftemperaturen durchgeführt. Durch das Monitoring der durch die Universität Stuttgart verwalteten Gebäude stehen Messdaten von Messstellen in ausgewählten Gebäuden zur Verfügung. Zu den ausgewählten Gebäuden gehören die in Tabelle 4-1 aufgeführten. Die analysierten Messdatensätze beinhalten verschiedene Vor- und Rücklauftemperaturen, den zugehörigen Volumenstrom und die über die Wärmemengenzähler ermittelten Wärmeleistungen der Heizperiode 2024 / 2025, mit dem Start im Oktober 2024 und dem Ende im Mai 2025.

Für die Messdatenanalyse wurden zunächst die einzelnen Messstellen lokalisiert. Wobei vereinzelt Fotos von Ausschnitten der Hausübergabestationen mit Kurzbeschreibung oder Ausschnitte von hydraulischen Schemata der Hausübergabestationen zur Verfügung gestellt wurden. Eine beispielhafte Lokalisierung der Messstellen ist in Abbildung 4-7 für das Gebäude im Allmandring 31 und in Abbildung 4-8 für das Gebäude im Pfaffenwaldring 7 dargestellt. Dabei wurde festgestellt, dass die Wärmeversorgung der Gebäude über das Wärmenetz nicht aufgrund eines einzigen Wärmeübertragers in die Kategorien „direkte Wärmeübertragung“ und „indirekte Wärmeübertragung“ eingeteilt werden kann. Wobei mit der Kategorie „direkte Wärmeübertragung“ darauf hingewiesen wird, dass der hydraulische Kreis zur Wärmeversorgung des Gebäudes, ohne einen Wärmeübertrager, direkt mit dem hydraulischen Kreis des Wärmenetzes gekoppelt ist.

Mit der Kategorie „indirekte Wärmeübertragung“ wird darauf hingewiesen, dass mit einem Wärmeübertrager der hydraulische Kreis zur Wärmeversorgung des Gebäudes vom Kreis des Wärmenetzes entkoppelt ist. In den analysierten Gebäuden erfolgt dagegen die hydraulische Entkopplung der Wärmeversorgung des Gebäudes teilweise für die Raumheizung über einen Wärmeübertrager und für das Trinkwarmwasser über separate Brauchwasserbereiter (vgl. Abbildung 4-7) oder die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt raum- oder gebäudeweise dezentral elektrisch (vgl. Abbildung 4-8). Bereits mit der geringen Anzahl an analysierten Gebäuden kann ein Hinweis auf die Diversität des Aufbaus der verschiedenen Hausübergabestationen gegeben werden (vgl. Tabelle 4-1).

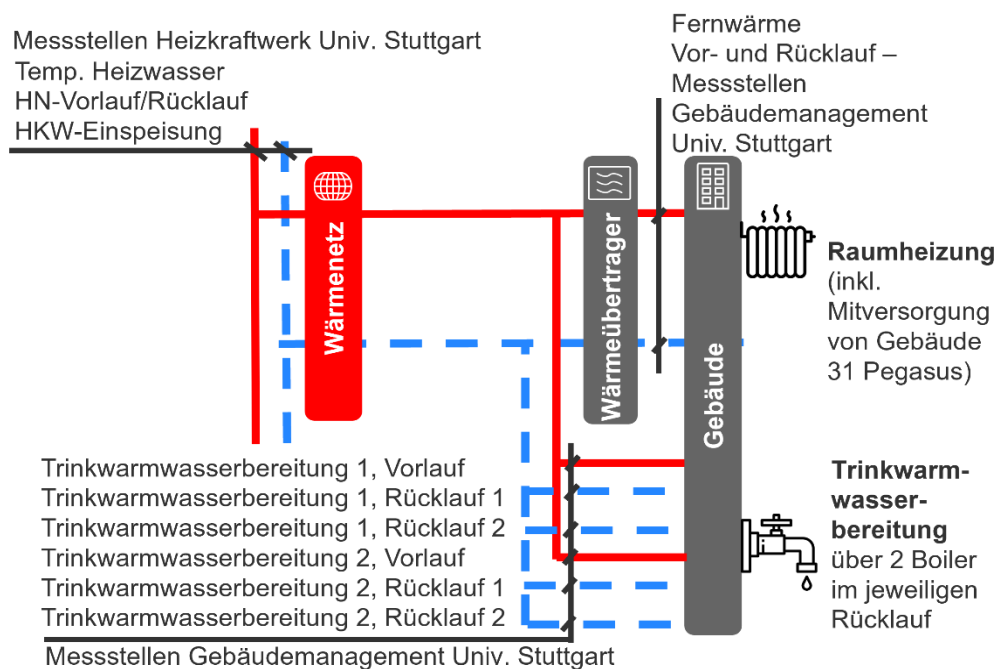


Abbildung 4-7: Schematische Darstellung der lokalisierten Messstellen für Allmandring 31 inklusive Foto eines Ausschnitts des Hydraulikschemas.

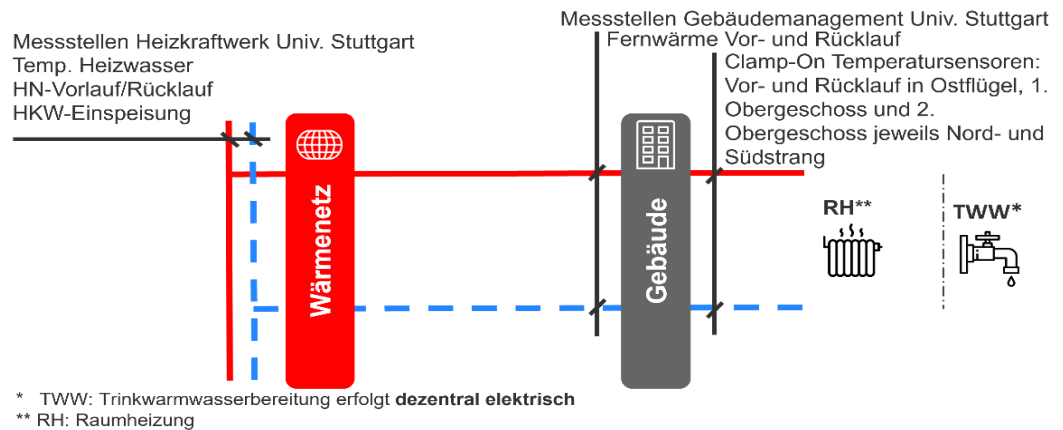


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der lokalisierten Messstellen für Pfaffenwaldring 7.

Im Anschluss an die Lokalisierung der Messstellen wurden jeweils die Temperaturen der Messstellen eines Gebäudes über den Betrachtungszeitraum aufgetragen. In Abbildung 4-9 ist der entsprechende Temperaturverlauf der in Abbildung 4-7 lokalisierten Messstellen des Gebäudes im Allmandring 31, mit „indirekter Wärmeübertragung“ dargestellt. In Abbildung 4-10 ist der entsprechende Temperaturverlauf der in Abbildung 4-8 lokalisierten Messstellen des Gebäudes im Pfaffenwaldring 7, mit „direkter Wärmeübertragung“ dargestellt. Dabei sind die Vorlauftemperaturen in Rottönen

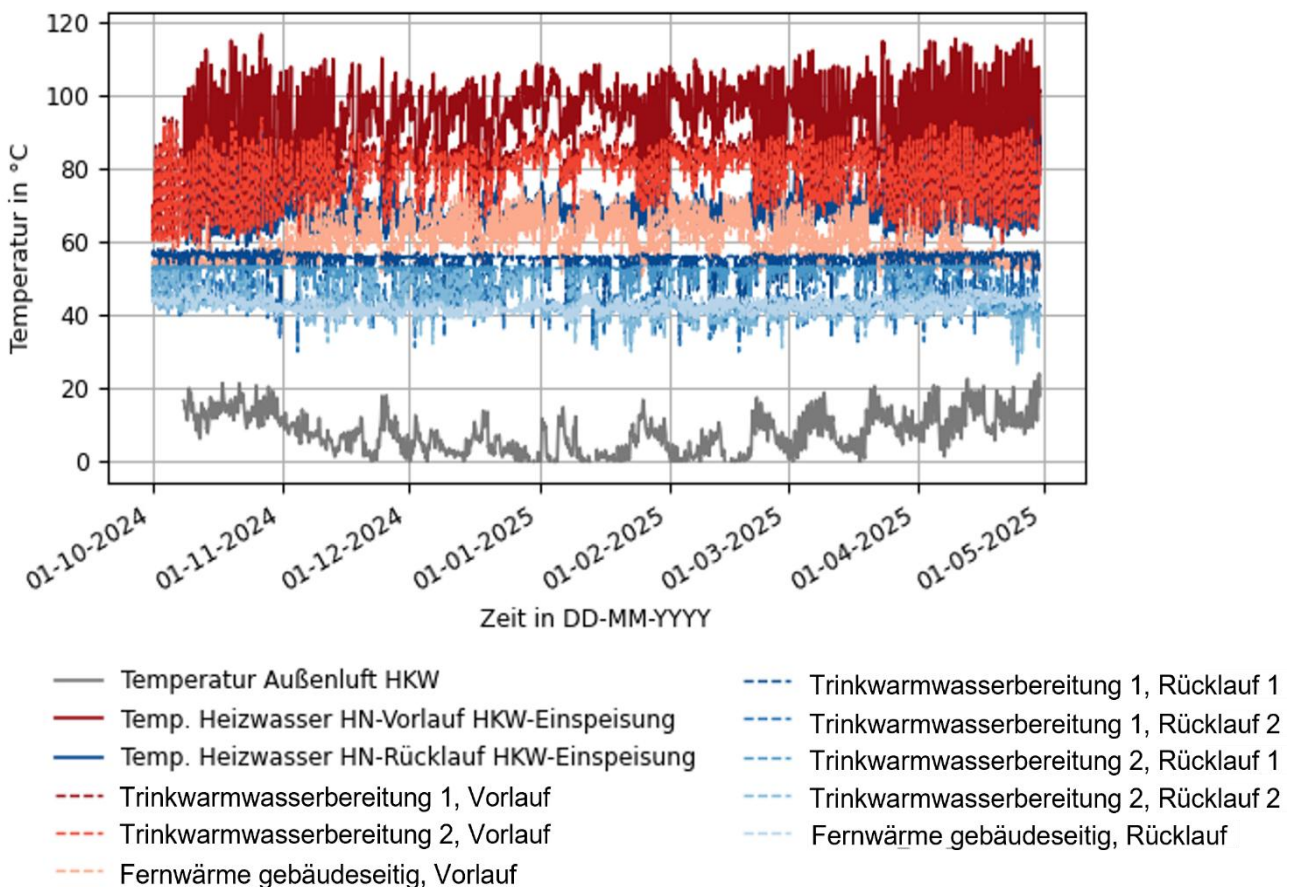


Abbildung 4-9: Temperaturverlauf der lokalisierten Messstellen für Allmandring 31, mit „indirekter Wärmeübertragung“ und von Messstellen am Heizkraftwerk.

dargestellt, die Rücklauftemperaturen in Blautönen. Die durchgezogenen Kurven stellen je die Vor- und Rücklauftemperatur, die vom Heizkraftwerk in das Wärmenetz eingespeist wurden, dar. Die gestrichelten Kurven stellen die Messdaten der Messstellen dar, die von den einzelnen Gebäuden vorliegen.

Die hellroten und hellblauen Kurven in Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 stellen die Vor- und Rücklauftemperaturen der Raumheizung der jeweiligen Gebäude dar. Die weiteren Kurven stellen die Vor- und Rücklauftemperaturen des Trinkwarmwassers der jeweiligen Gebäude dar.

In Abbildung 4-9 wird ersichtlich, dass sowohl die Vor- als auch die Rücklauftemperaturen der beiden hydraulischen Kreise für das Trinkwarmwasser durchschnittlich mehr als 15 K über den Temperaturen für die Raumheizung liegen. An den Rücklaufemperaturverläufen des Trinkwarmwassers, welche eine maximale Temperatur von 58 bzw. 54 °C nicht überschreiten, wird ersichtlich, dass im Gebäude im Allmandring 31 eine funktionsfähige Rücklaufemperaturbegrenzung eingesetzt ist. Weiterhin liegen die Vor- und Rücklauftemperaturen sowohl für das Trinkwarmwasser als auch für die Raumheizung deutlich unterhalb der vom Heizkraftwerk in das Wärmenetz eingespeisten Temperaturen. Dies verdeutlicht die Wirkung einer Entkopplung der hydraulischen Kreise des Wärmenetzes und des Gebäudes in der „indirekten Wärmeübertragung“.

In Abbildung 4-10 wird ersichtlich, dass die Vorlauftemperatur für die Raumheizung im Gebäude in Pfaffenwaldring 7 nahezu der vom Heizkraftwerk in das Wärmenetz eingespeisten Vorlauftemperatur entspricht. Die Rücklauftemperatur der Raumheizung im Gebäude in Pfaffenwaldring 7 liegt dagegen weit über der vom Heizkraftwerk in das Wärmenetz eingespeisten Rücklauftemperatur.

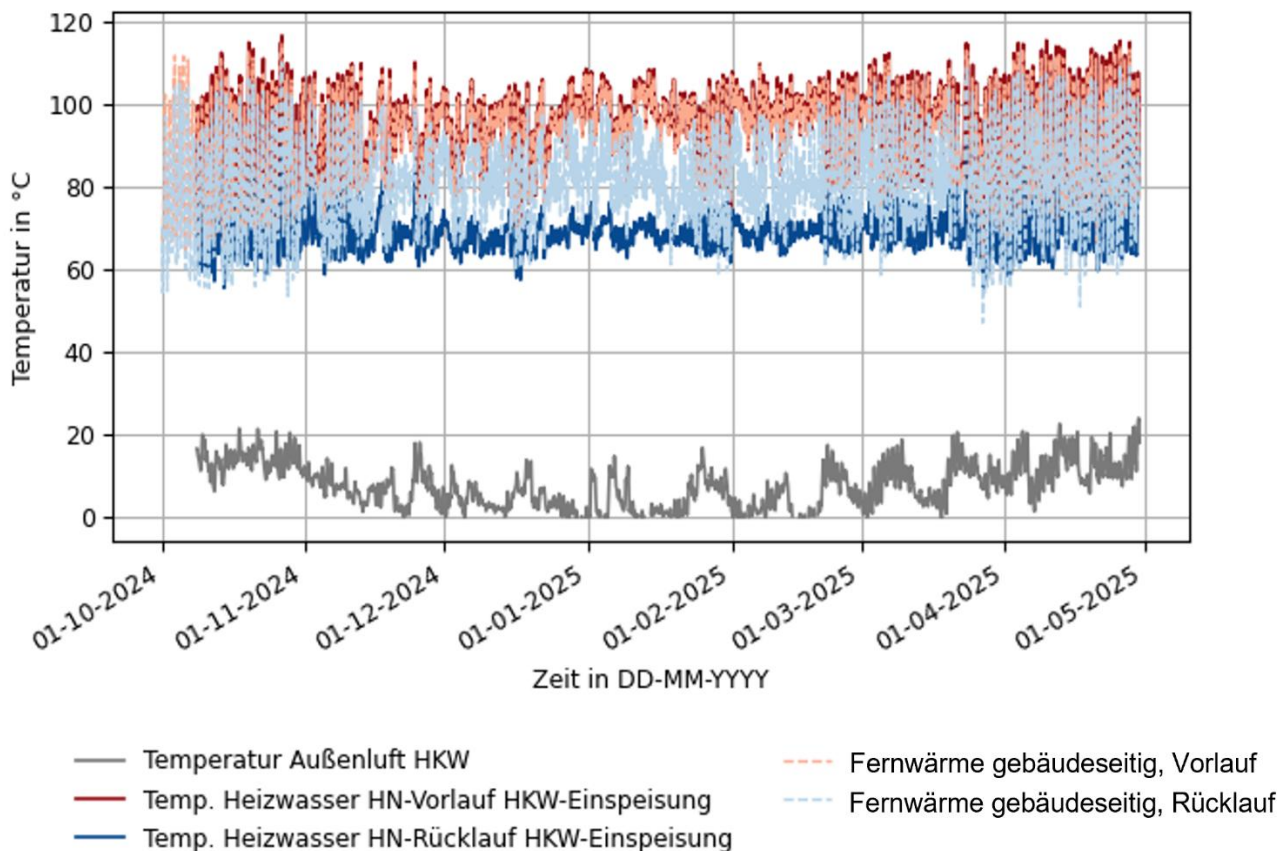


Abbildung 4-10: Temperaturverlauf ausgewählter Messstellen für Pfaffenwaldring 7, mit „direkter Wärmeübertragung“ und von Messstellen am Heizkraftwerk.

Im Workshop hatten die Teilnehmenden die Möglichkeit, zur vorgestellten Bestands- und Potenzialanalyse Rückmeldungen zu geben. Dabei wurde das Problem einer geringen Temperaturspreizung bei Gebäuden ohne Wärmeübertrager im Sommer damit relativiert, dass die Rücklauf-Temperaturbegrenzung bei solchen Gebäuden dafür sorgen, dass ein nur noch sehr kleiner oder gar kein Volumenstrom durch das Gebäude zirkuliere. Die gemessenen Rücklauftemperaturen entsprechen daher nahezu den Vorlauftemperaturen und somit gäbe es gemessen keine Spreizung.

Zudem wurden die relativ hohen Temperaturen im Sommer im Wärmenetz damit erklärt, dass das HKW im Sommer nicht wie im Winter im 2-Schichtbetrieb, sondern im 1-Schicht-Betrieb betrieben wird. Deshalb müssten im Sommer tagsüber die Wärmespeicher durch den GuD-Block des HKW mit hohen Temperaturen beladen werden, um auch nachts das Wärmenetz mit ausreichend Wärme (ohne den Betrieb von Kraftwerksblöcken) versorgen zu können. Die hohen Temperaturen sind dadurch tagsüber auch im Wärmenetz sichtbar.

Diese divergierenden Einschätzungen konnten im Workshop selbst nicht abschließend geklärt werden, wurden jedoch bei weiteren Analysen der (künftigen) Betriebsführung und -optimierung der Wärmeversorgung berücksichtigt und im dritten Workshop zur Diskussion gestellt.

Dies ist begründet durch die wesentlich geringere Wärmeabnahme im Gebäude im Vergleich zur Wärmeabnahme im gesamten Wärmenetz. Weiterhin zeigen die Temperaturverläufe gebäudeseitig im Vergleich zu Abbildung 4-9 wesentlich höhere Amplituden in den Tag-/Nacht- und Wochentag/Wochenendzyklen auf. Dies verdeutlicht die Wirkung einer „direkten Wärmeübertragung“.

4.2.2 Kälteversorgungsinfrastruktur

Die Versorgung mit Kälte wird am Campus Vaihingen nahezu vollständig durch eine zentrale Kälteerzeugung an zwei Standorten und anschließende Verteilung zu den Kälteverbrauchern durch ein Kälteversorgungsnetz gewährleistet. Zusätzlich ist in sechs Gebäuden eine dezentrale Kälteerzeugung installiert. (GEF 2024)

In Abbildung 4-11 ist die geographische Ausdehnung des Kälteversorgungsnetzes sowie die geographischen Standorte der beiden Kältezentralen Nord und Süd zur zentralen Kälteerzeugung dargestellt. Die Kälteerzeugung in diesen Kältezentralen erfolgt jeweils durch mehrere Kompressionskältemaschinen mit einer Kälteleistung von 12,5 MW in der Kältezentrale Nord und 7,5 MW in der Kältezentrale Süd. (GEF 2024; HKW 2025)

Die Darstellung des Kältenetzes sowie der Kältezentralen am Campus Vaihingen ist in der veröffentlichten Version des Ergebnisberichts nicht verfügbar.

Abbildung 4-11: Kältenetz und Kältezentralen der Kälteversorgung am Campus Vaihingen sowie Kälteverbräuche der angeschlossenen Gebäude (HKW 2025; US 2025).

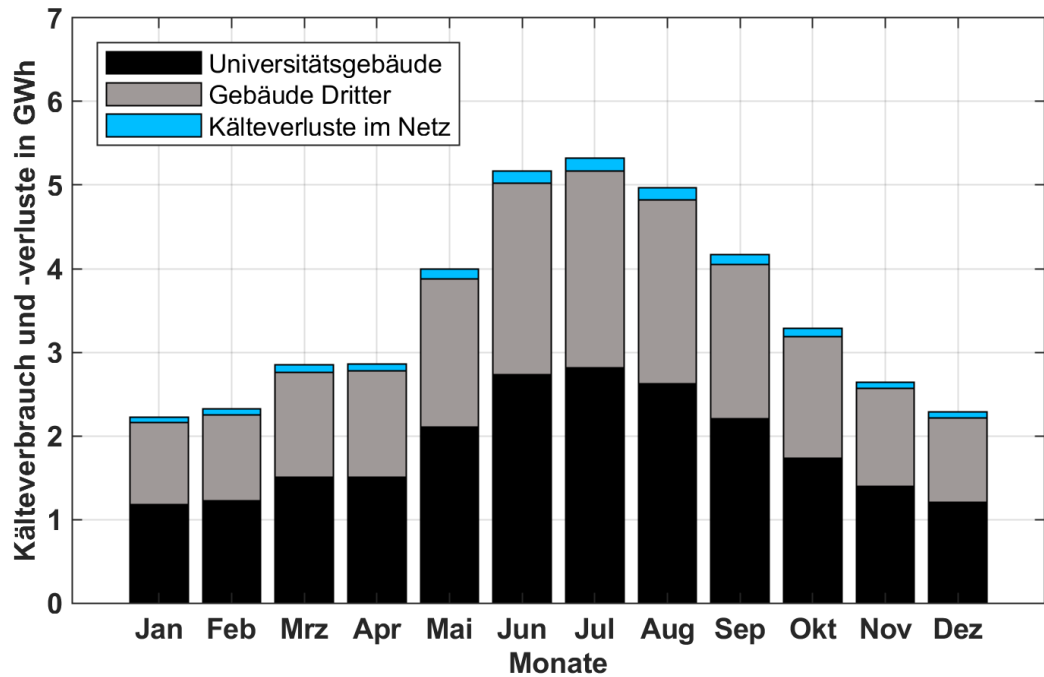


Abbildung 4-12: Monatliche Kälteverbräuche von Universitätsgebäuden, Gebäude Dritter sowie Kälteverluste des Kältenetzes (GEF 2024; HKW 2025; US 2025).

Um ganzjährig vorhandene Kältebedarfe bspw. für Versuchsstände einiger Forschungsinstitute mit Kälte versorgen zu können, ist die Kältezentrale Süd ganzjährig im Betrieb, während die Kältezentrale Nord nur im Sommer aufgrund zusätzlicher Kältebedarfe bspw. zur Gebäudekühlung in Betrieb ist (GEF 2024).

Die Kälteverbräuche der 77 an das Kältenetz angeschlossenen Gebäude sind je nach Verfügbarkeit der Daten und je nach Höhe der Kälteverbräuche farblich in Abbildung 4-11 markiert. Ein Gebäude mit einem besonders hohen Kälteverbrauch ist bspw. das HLRS im Südwesten des Campus Vaihingen mit über 3.000 MWh pro Jahr. Insgesamt betragen die Kälteverbräuche der an das Kältenetz angeschlossenen Gebäude inklusive der Kälteverluste des Kältenetzes im Jahr 2019 45,8 GWh und im Jahr 2023 42,1 GWh (HKW 2025). Hiervon entfielen im Jahr 2019 22,4 GWh und im Jahr 2023 22,9 GWh auf die Universitätsgebäude (US 2025).

Die monatlichen Kälteverbräuche der Universitätsgebäude und der dritten Gebäude sind in Abbildung 4-12 für das Jahr 2023 dargestellt. Die bereits genannten ganzjährig vorhandenen Kälteverbräuche sowie die erhöhten Kälteverbräuche in den Sommermonaten sind in Abbildung 4-12 ebenfalls nachzuvollziehen. Des Weiteren sind die monatlichen Kälteverluste des Kältenetzes dargestellt (AGFW 2025).

4.2.3 Elektrische Versorgungsinfrastruktur

Der Campus Vaihingen wird in der für dieses Forschungsprojekt relevanten Mittelspannungsebene von zwei Stromverteilnetzbetreibern versorgt. Zum einen betreibt das HKW der Universität Stuttgart ein eigenes Verteilnetz, über das sämtliche Universitätsgebäude, ein Gebäude der Polizei, die Hochschule der Medien sowie das Lehr- und Forschungsklärwerk Bünsau mit Strom versorgt werden.

Zum anderen erfolgt die Versorgung der Wohngebäude, des Fraunhofer-Institutszentrums Stuttgart, die Gebäude der Max-Planck-Gesellschaft, die Mehrzahl der Polizeigebäude sowie die Gebäude

des ehemaligen Campus-Guest-Areals über die Stuttgart Netze GmbH. Eine Darstellung der Gebäude mit Kennzeichnung des jeweils zugehörigen Stromnetzes ist in Abbildung 4-13 dargestellt.

Da der Schwerpunkt des Projekts auf der methodischen Entwicklung des Dialogprozesses lag, wurde es als ausreichend erachtet, ausschließlich das durch das HKW betriebene Stromnetz (im Folgenden HKW-Stromnetz genannt) detailliert zu analysieren. In Abbildung 4-14 ist eine qualitative Darstellung des HKW-Stromnetzes, bei welchem es sich um ein 10-kV-Mittelspannungsnetz handelt, gezeigt. Da bei der Modellierung keine exakten geografischen Koordinaten vorlagen, kann die tatsächliche Lage der Leitungen von der dargestellten Anordnung abweichen. Das eingezeichnete Umspannwerk verbindet über zwei 40-MVA-Transformatoren das HKW-Stromnetz mit dem überlagerten Hochspannungsnetz. Die Leitungen des HKW-Stromnetzes verlaufen überwiegend in Versorgungskanälen oder Schutzrohren; nur wenige Abschnitte sind direkt im Erdreich verlegt. Das HKW-Stromnetz lässt sich in zwei Teilnetze untergliedern:

- **Normalnetz:** Versorgt sämtliche Gebäude des Campus, einschließlich der meisten Labore und Versuchsanlagen. Innerhalb dieses Netzes ist ein Betrieb stets innerhalb der zulässigen Spannungsgrenzen sicherzustellen.
- **Sondernetz:** Dient der Versorgung von Sonderverbrauchern, insbesondere dem Höhenprüfstand des Instituts für Luftfahrtantriebe, dem Windkanal des Forschungsinstituts für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart sowie den Motorenprüfständen des Instituts für Flugzeugbau.

Der separate Anschluss dieser Sonderverbraucher über ein eigenes Teilnetz dient der Vermeidung von Beeinflussungen anderer Verbraucher im Normalnetz durch NetZRückwirkungen, bspw. durch steile Spannungsflanken, Spannungsbandüberschreitungen oder Oberschwingungen. Im Normalbetrieb sind beide Teilnetze galvanisch voneinander getrennt, sodass ein Leistungsaustausch ausschließlich über das Umspannwerk erfolgen kann.

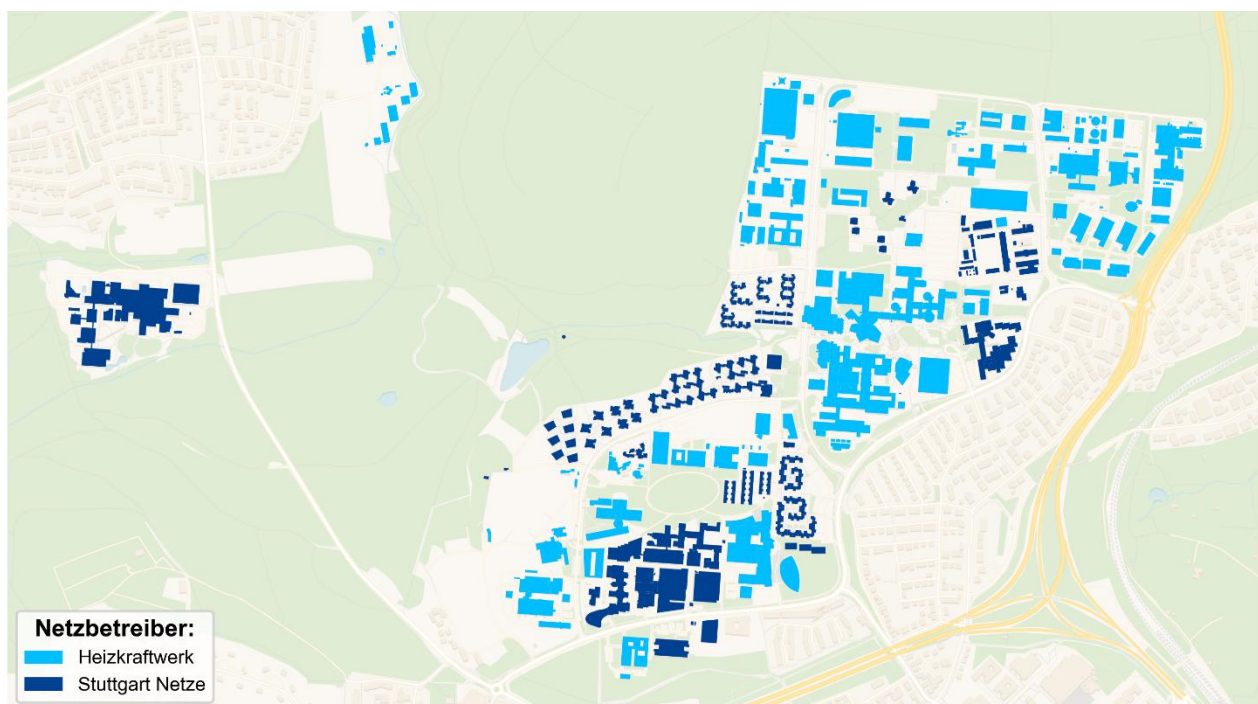


Abbildung 4-13: Zuordnung des Netzanschlusses der Gebäude des Campus Vaihingen zu den jeweiligen Mittelspannungsnetzen.

Die Darstellung des HKW-Stromnetzes am Campus Vaihingen ist in der veröffentlichten Version des Ergebnisberichts nicht verfügbar.

Abbildung 4-14: Darstellung des HKW-Stromnetzes am Campus Vaihingen.

Das HKW stellt, neben wenigen PV-Anlagen, den einzigen Stromerzeuger auf dem Campus Vaihingen dar. Da der Betrieb des HKW wärmegeführt erfolgt, besteht kein direkter regelungstechnischer Zusammenhang zwischen Stromverbrauch und Stromerzeugung. Etwaige Leistungsdifferenzen werden über den Bezug aus dem externen Hochspannungsnetz über das Umspannwerk ausgeglichen. Im Normalbetrieb speist das HKW stets in das Normalnetz ein.

Die Leistungsmessdaten des HKW-Stromnetzes umfassen die auf 15 Minuten gemittelten Leistungswerte an den Niederspannungsabgängen für das Jahr 2024. Da für einige Abgänge erst ab Februar 2024 valide Messwerte vorliegen, wurde der Untersuchungszeitraum des Stromnetzes auf Februar bis einschließlich Dezember 2024 begrenzt.

Abbildung 4-15 zeigt die Lastverläufe der fünf Niederspannungsabgänge mit den höchsten gemessenen Spitzenlasten im HKW-Stromnetz sowie die mittlere und gesamte Last aller Abgänge. Die maximale Gesamtlast betrug 22,1 MW und trat im April 2024 auf. Diese sowie weitere Lastspitzen sind auf den Betrieb des Höhenprüfstands des Instituts für Luftfahrtantriebe (ILA) zurückzuführen. Der Betrieb des Prüfstands muss vorab beim HKW angemeldet werden. Versorgt wird die Anlage über die Abgänge „ILA 1“ und „ILA 2“.

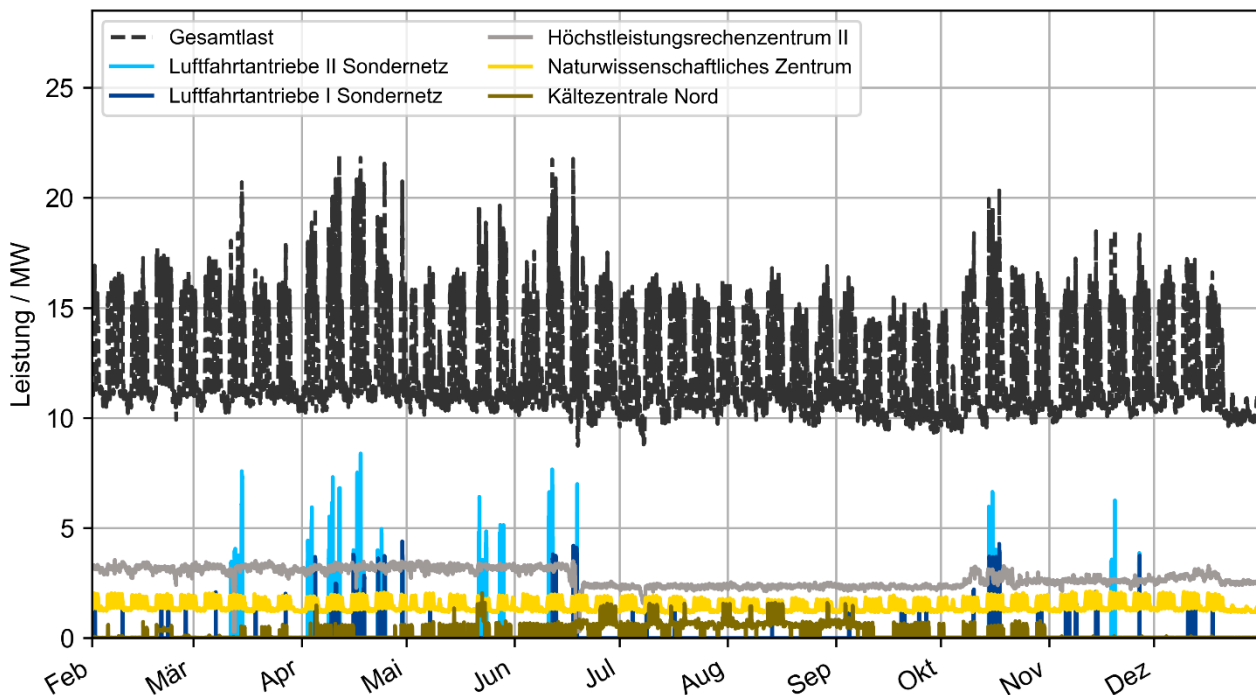


Abbildung 4-15: Lastprofile der fünf Niederspannungsabgänge mit den höchsten Spitzenlasten im HKW-Stromnetz sowie die Durchschnitts- und Gesamtlast aller Abgänge im Jahr 2024.

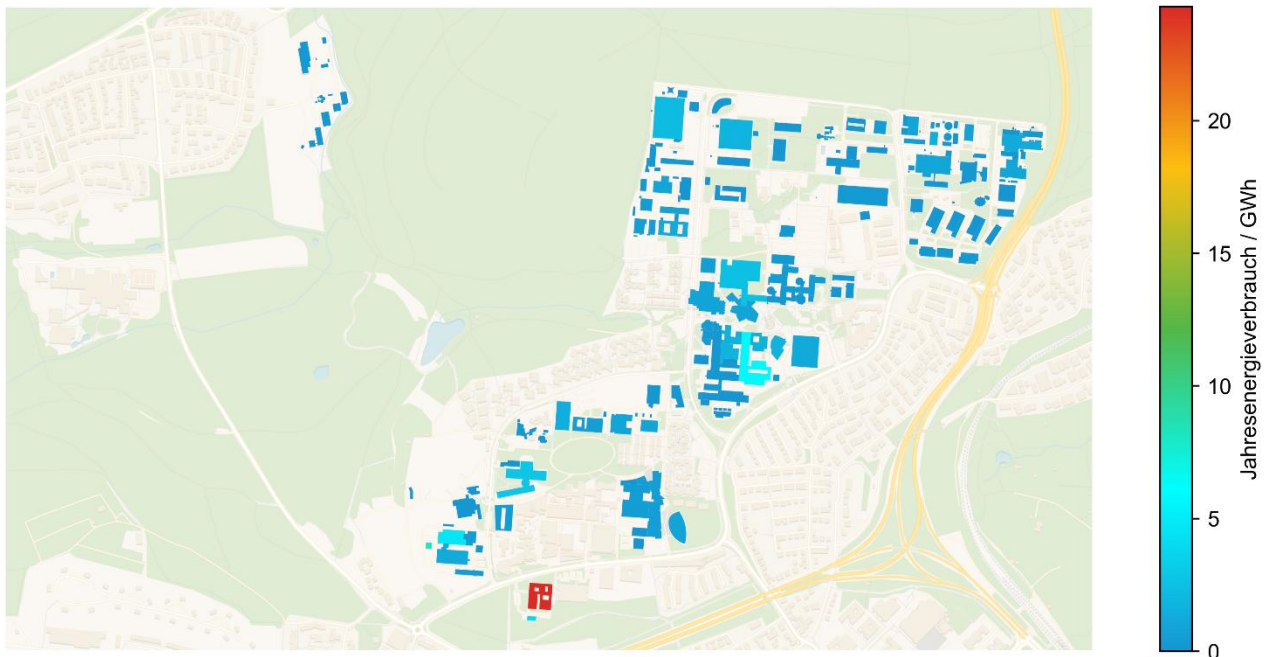


Abbildung 4-16: Elektrischer Jahresenergieverbrauch der an das HKW-Stromnetz angeschlossenen Gebäude auf dem Campus Vaihingen im Jahr 2024.

Ein weiterer bedeutender Verbraucher ist das HLRS, das über den Abgang „HLRS II“ gespeist wird. Hier zeigt sich ein leicht schwankender, jedoch insgesamt kontinuierlicher Lastverlauf. Mitte Juni 2024 ist ein einmaliger, deutlicher Leistungsabfall zu beobachten. Das Naturwissenschaftliche Zentrum (NWZ), das über den Abgang „NWZ“ versorgt wird, weist hingegen einen klar ausgeprägten Wochenrhythmus auf. Bei höherer zeitlicher Auflösung zeigt sich an Werktagen tagsüber eine Lastspitze von etwa 2,1 MW, während nachts eine hohe Grundlast von rund 1,2 MW besteht.

Weitere wesentliche Verbraucher sind die beiden Kältezentralen Süd und Nord auf dem Campus Vaihingen. Die Kältezentrale Nord, die über den Abgang „KZN“ versorgt wird, weist einen ganzjährigen Energieverbrauch auf, der in den Sommermonaten seine höchsten Werte erreicht. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in Abbildung 4-14 keine weiteren Lastverläufe dargestellt.

Abbildung 4-16 zeigt eine qualitative Darstellung des elektrischen Jahresenergieverbrauchs der an das HKW-Stromnetz angeschlossenen Gebäude des Campus Vaihingen im Jahr 2024. Da keine exakte Zuordnung der Gebäude zu den jeweiligen Netzknoten vorlag, wurde für jedes Gebäude der geografisch nächstgelegene Netzknoten des HKW-Stromnetzes identifiziert. Die an den Netzknoten gemessenen Leistungen wurden anschließend entsprechend der jeweiligen Gebäudeflächen auf die einzelnen Gebäude verteilt. Aus der Darstellung wird deutlich, dass das HLRS mit einem jährlichen Energiebedarf von über 24 GWh den mit Abstand größten Verbraucher auf dem Campus darstellt.

4.3 Energiebereitstellung

4.3.1 Heizkraftwerk Pfaffenwald

Das Heizkraftwerk Pfaffenwald (HKW) am Campus Vaihingen besteht aus einer Gas- und Dampfturbinenanlage (GuD-Anlage, Block 40) sowie den konventionellen Dampfkesseln (Blöcke 50 und 60), die jeweils unterschiedliche Aufgaben im Energieverbund übernehmen. Die Gesamtstruktur

und die wichtigsten Komponenten des HKWs sind in Abbildung 4-17 dargestellt. Zwei Gasturbinen (GT 41, Baujahr 2006, und GT 42, Baujahr 2017, je 5,2 MW_{el}) erzeugen Strom und heiße Abgase. Diese Abwärme wird im Abhitzeessel (Baujahr 1988) zur Dampferzeugung genutzt. Der erzeugte Dampf treibt eine Dampfturbine (DT, Baujahr 1963, 11,7 MW_{th}, 3,9 MW_{el}) an, sodass zusätzlich Strom produziert wird und Wärme in das Netz eingespeist werden kann.

Zwei konventionelle Dampfkessel (Blöcke 50 und 60) erzeugen jeweils rund 38 MW_{th} Wärmeleistung und etwa 12 MW_{el} Strom. Sie nutzen direkt Gas oder Öl zur Dampferzeugung und liefern so Wärme an das Netz, sind jedoch im elektrischen Wirkungsgrad deutlich geringer. Sechs Speicherbehälter mit einer Gesamtkapazität von 95 MWh_{th} (bei ΔT = 50 K) ermöglichen die Pufferung überschüssiger Wärme. Dadurch kann die Wärmeerzeugung zeitlich von der Nachfrage entkoppelt und das Gesamtsystem flexibilisiert werden.

Die Analyse der Kraftwerksblöcke am Campus Vaihingen verdeutlicht, dass sich die einzelnen Einheiten hinsichtlich Effizienz und Einsatzprofil klar unterscheiden. Der GuD-Block (Block 40) weist einen höheren elektrischen Wirkungsgrad von etwa 37 % auf und eignet sich damit insbesondere für den stromgeführten Betrieb. Demgegenüber verfügen die konventionellen Dampfkessel (Blöcke 50 & 60) über einen hohen thermischen Nutzungsgrad von rund 72 und 65 %, jedoch nur geringe elektrische Effizienzwerte (≈ 15 %), sodass sie vorrangig im wärmegeführten Betrieb eingesetzt werden sollten. Im Gesamteffizienzvergleich erreichen die Blöcke Werte von 77 % (GuD-Block), 79 % (Block 60) und 87 % (Block 50), wie in Abbildung 4-18 dargestellt.

Die Jahresdauerlinien zeigen, dass der GuD-Block die Grund- und Mittellast abdeckt und mit bis zu 60 % zeitlicher Auslastung (Block 43) deutlich häufiger betrieben wird, während die Blöcke 50 und 60 überwiegend für Spitzenlastfälle genutzt werden und mit 19 bis 23 % Auslastung nur einen geringen Anteil der Jahresstunden laufen.

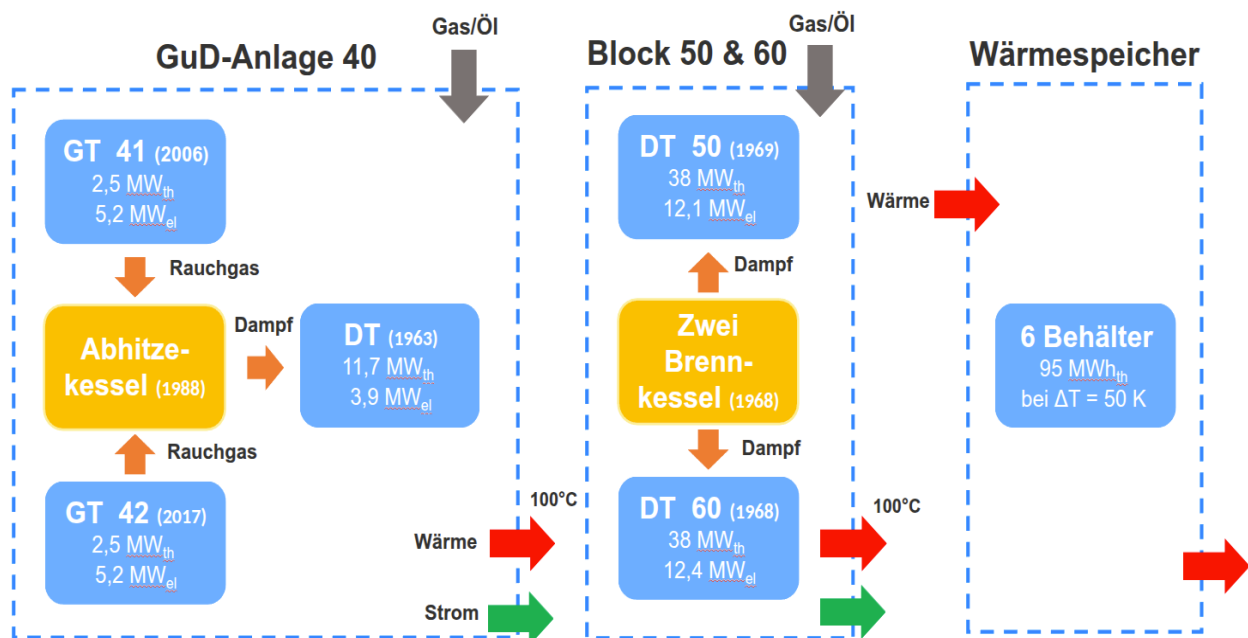


Abbildung 4-17: Schematische Darstellung des Aufbaus des Heizkraftwerks am Campus Vaihingen mit Gas-und-Dampf-Kraftwerksanlage (GuD), konventionellen Dampfkesseln und Wärmespeichern.

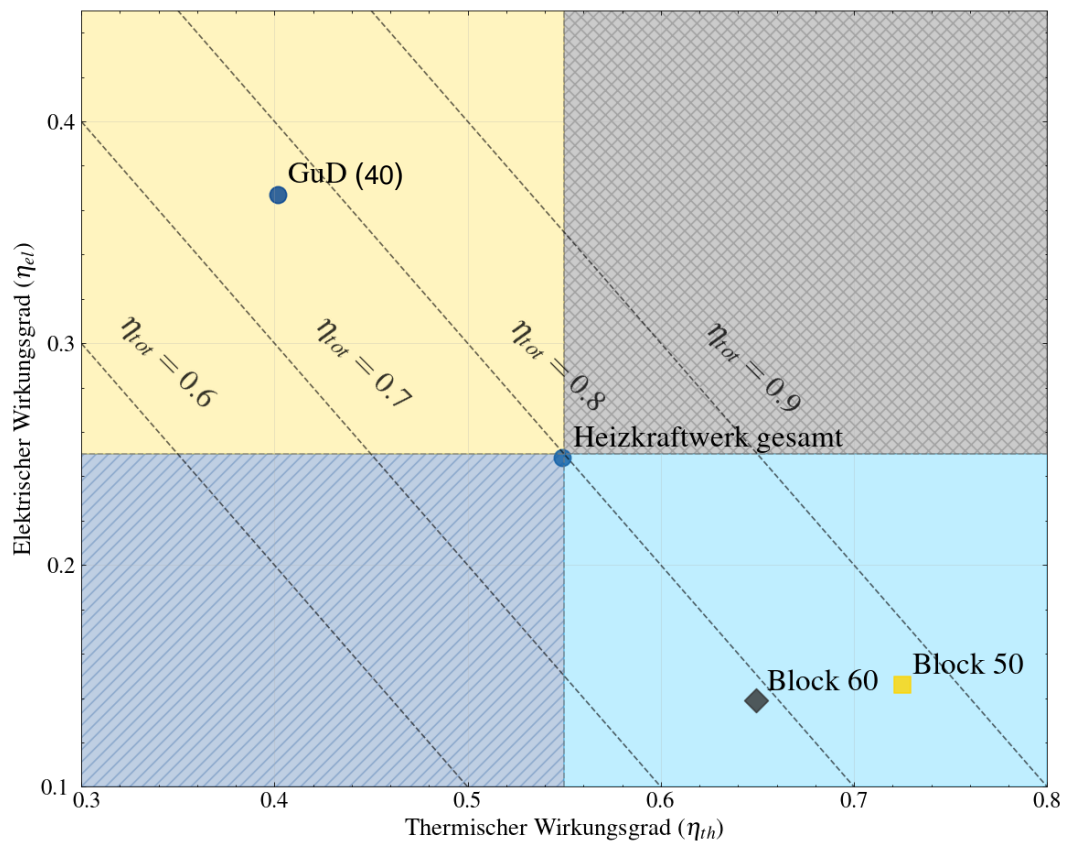


Abbildung 4-18: Vergleich der elektrischen und thermischen Effizienz sowie der Gesamteffizienz der Kraftwerksblöcke des Heizkraftwerks am Campus Vaihingen.

Der GuD-Block (Blöcke 41 bis 43) dominiert zudem eindeutig die elektrische Energieerzeugung am Standort. Damit ergibt sich eine komplementäre Betriebsstrategie, bei der der GuD-Block als Dauerläufer fungiert und die Blöcke 50 und 60 als flexible Reserve dienen, wie in der Abbildung 4-19 dargestellt.

Mit der geplanten Integration der Abwärmezentrale (AWZ) am Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS), die mit einer Verfügbarkeit von rund 80 % betrieben werden kann, lässt sich bereits ein Anteil von etwa 54 % des jährlichen Wärmebedarfs decken. Wird zusätzlich überschüssige Wärme in den thermischen Speichern ($95 \text{ MWh}_{\text{th}}$) zwischengespeichert und zeitversetzt genutzt, könnte dieser Anteil auf über 60 % steigen.

Unter diesen Bedingungen wäre die derzeit installierte Kapazität des HKWs langfristig voraussichtlich überdimensioniert, da ein erheblicher Teil des Grundlastbedarfs durch die AWZ abgedeckt werden kann. Die potenziellen Beiträge der AWZ zur Wärmeversorgung und die resultierenden Entlastungseffekte für das HKW sind in Abbildung 4-20 dargestellt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die unterschiedlichen Effizienzprofile der Blöcke eine klare arbeitsteilige Betriebsweise nahelegen: Der GuD-Block sichert eine wirtschaftliche Strom- und Grundlastversorgung, während die Blöcke 50 und 60 flexibel Spitzen abfangen. Durch die Integration der AWZ und den verstärkten Einsatz von Speichern können Effizienz, Flexibilität und CO_2 -Bilanz des Campus-Wärmesystems nachhaltig verbessert werden.

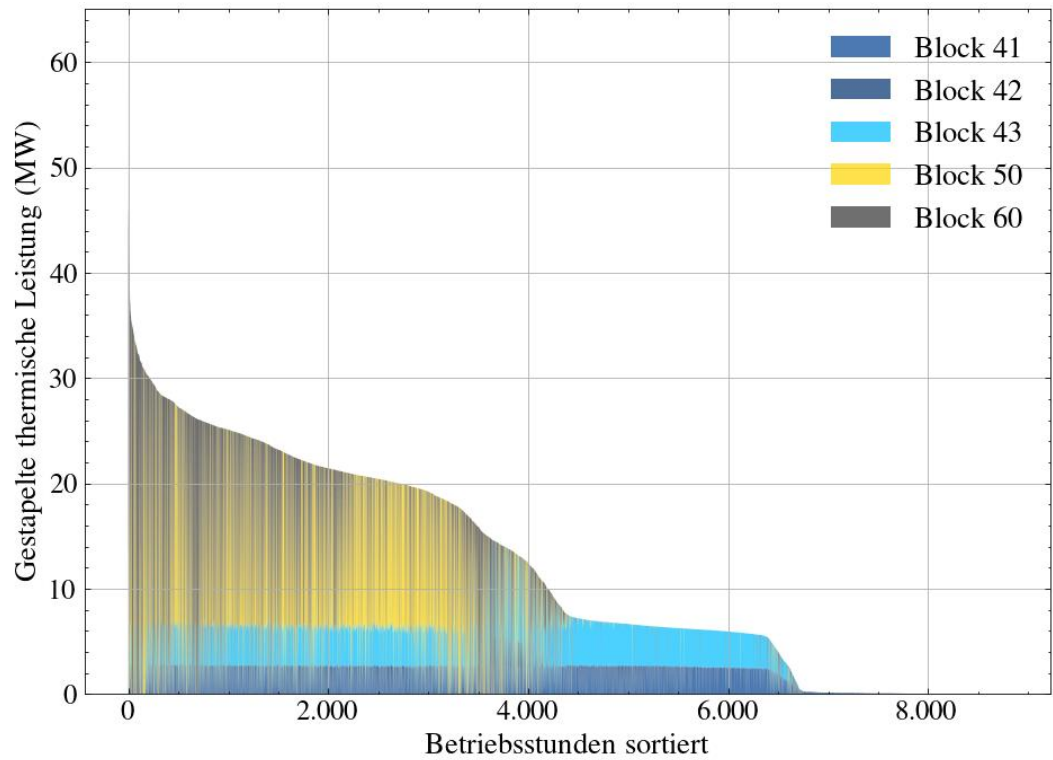


Abbildung 4-19: Gestapelte Jahresdauerlinien der thermischen Leistung der Kraftwerksblöcke des Heizkraftwerks am Campus Vaihingen.

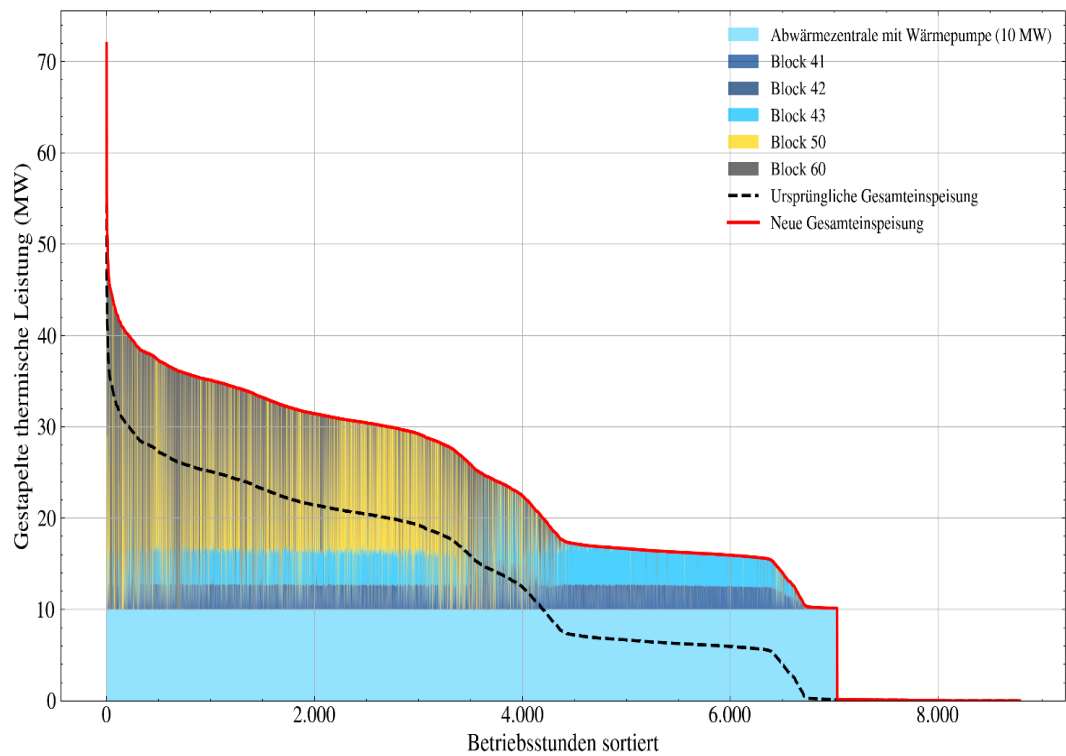


Abbildung 4-20: Abschätzung des Deckungsanteils der Abwärmezentrale am jährlichen Wärmebedarf des Campus Vaihingen sowie Auswirkungen auf die Auslastung des Heizkraftwerks.

Im Workshop hatten die Teilnehmenden die Möglichkeit, zur vorgestellten Bestands- und Potenzialanalyse Rückmeldungen zu geben. Ein Experte widersprach der im Workshop präsentierten Schlussfolgerung, dass die Kapazitäten des HKW aufgrund einer zukünftigen Diversifizierung der Wärmequellen u. a. durch die AWZ tendenziell reduziert werden könnten. Dies läge daran, dass die drei verschiedenen Blöcke des HKWs aus Gründen der Effizienz auch künftig benötigt würden.

Diese divergierenden Einschätzungen konnten im Workshop selbst nicht abschließend geklärt werden. Die Anmerkung wurde jedoch bei weiteren Analysen der (künftigen) Betriebsführung und -optimierung der Wärmeversorgung berücksichtigt und in Workshop 3 wieder zur Diskussion gestellt.

4.3.2 Abwärmezentrale am Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart

Die geplante AWZ am HLRS nutzt die in den Rechenzentren HLRS I, HLRS II und HLRS III anfallende Abwärme und hebt deren Temperaturniveau mithilfe von fünf Ammoniak-Großwärmepumpen auf Fernwärmeniveau an. Aus den Rechenzentren HLRS I und HLRS II wird über einen separaten Pufferspeicher eine Abwärmemenge von etwa 1 MW mit rund 35 bis 40 °C Vorlauftemperatur ausgekoppelt und in einer eigenen Wärmepumpe verarbeitet, die eine Wärmeleistung von rund 1,9 MW_{th} bei einer Austrittstemperatur von 87 °C bereitstellt.

Im HLRS III fallen weitere rund 5 MW Abwärme an, die über eine DN-350-Leitung ausgekoppelt, in Pufferspeichern mit einem Volumen von etwa 52 m³ zwischengespeichert und anschließend über vier baugleiche Wärmepumpen genutzt werden, die zusammen eine Wärmeleistung von rund 8,4 MW_{th} erzeugen. Insgesamt erreicht die AWZ somit eine Wärmebereitstellung von etwa 10,3 MW_{th}, die nach hydraulischer Trennung über Wärmeübertrager in das bestehende Campus-Wärmenetz eingespeist wird.

Die Betriebsweise sieht dabei einen Vorlauf von 85 °C und einen Rücklauf von 65 °C vor, während auf der Seite der Abwärme Temperaturen zwischen 30 °C und 40 °C verarbeitet werden. Für den effizienten Betrieb ist insbesondere die Einhaltung einer Rücklauftemperatur ≤ 65 °C innerhalb des Fernwärmenetzes entscheidend. Die Struktur ist in Abbildung 4-21 dargestellt.

Zur Stabilisierung des Betriebs und zum Abfangen von Lastschwankungen verfügt die AWZ zusätzlich über thermische Pufferspeicher mit einem Volumen von rund 60 m³, die parallel zu den Wärmepumpen eingebunden sind. Mit diesem Aufbau ermöglicht die AWZ die dauerhafte Bereitstellung von Grundlastwärme aus bisher ungenutzter Rechenzentrumsabwärme, reduziert den Primärenergieeinsatz des HKW und erhöht zugleich die Flexibilität des gesamten Energiesystems.

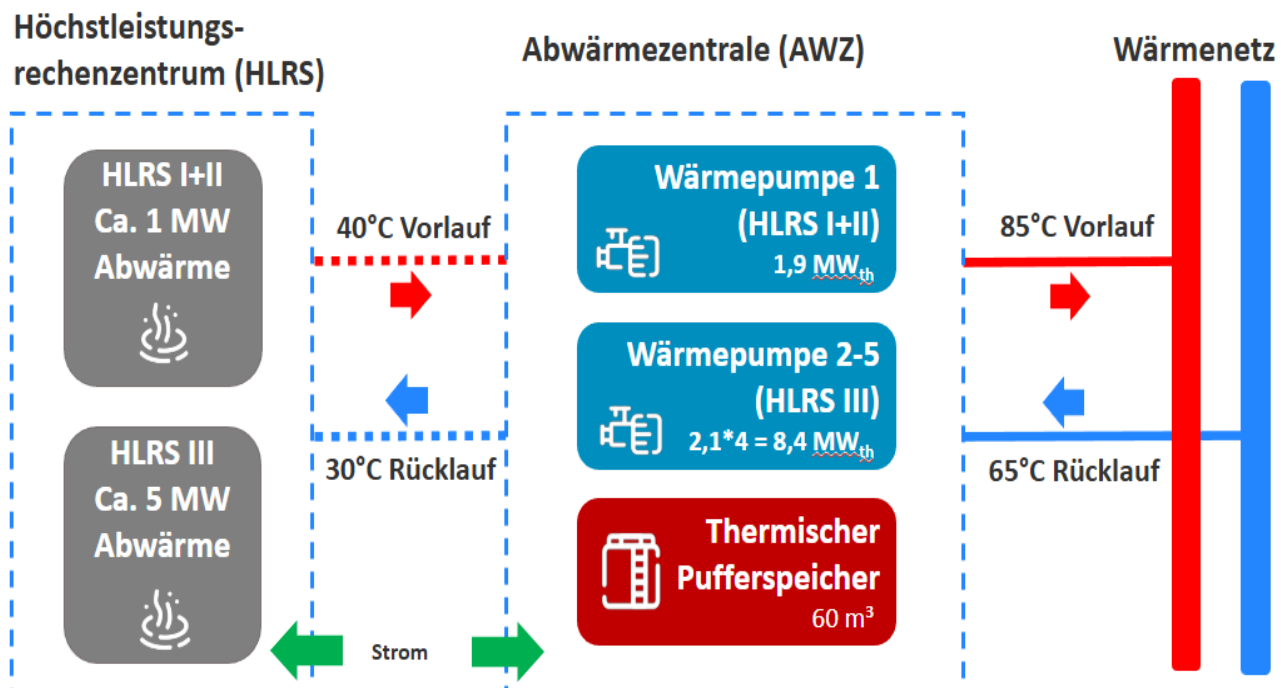


Abbildung 4-21: Schematische Darstellung der geplanten Abwärmezentrale mit Einbindung der Rechenzentren am Höchstleistungsrechenzentrum, Wärmepumpen, Pufferspeichern und hydraulischer Anbindung an das Wärmenetz des Campus Vaihingen.

4.4 Energie- und Klimabilanz

Nach der Beleuchtung der Teilbereiche des Energiesystems wird im Folgenden ein Gesamtüberblick gegeben. Die verschiedenen Energieträger und die Nutzenergiebereitstellung sind am Campus Vaihingen miteinander verknüpft. Zentrales Element ist das HKW, welches Strom, Wärme und Dampf erzeugt, und überwiegend mit Erdgas betrieben wird. Es stellt den einzigen Wärmeerzeuger für das Fernwärmenetz dar.

Für Strombereitstellung wird zusätzlich Strom aus dem Netz ins Bilanzgebiet bezogen. Weiterhin tragen PV-Anlagen einen relativ kleinen Anteil an der Strombereitstellung. Neben den Gebäuden sind das HLRS und die Kältemaschinen (Kälteerzeuger des Kältenetzes) spezielle Stromverbraucher. In allen drei Energienetzen (Strom, Wärme, Kälte) treten gewisse Verluste auf. Abbildung 4-22 veranschaulicht das Energiesystem Campus Vaihingen anhand eines Energieflussdiagramms.

Im Workshop hatten die Teilnehmenden die Möglichkeit, zur vorgestellten Bestands- und Potenzialanalyse Rückmeldungen zu geben. Bezüglich der CO₂-Emissionen wurde angemerkt, dass für die Kunden des Heizkraftwerks neben der Universität wie z. B. die Fraunhofer-Institute die spezifischen CO₂-Emissionen des bezogenen Strommixes aus intern durch das HKW produziertem und somit CO₂-belastetem und extern bezogenem, CO₂-neutralen Öko-Strom relevant sind.

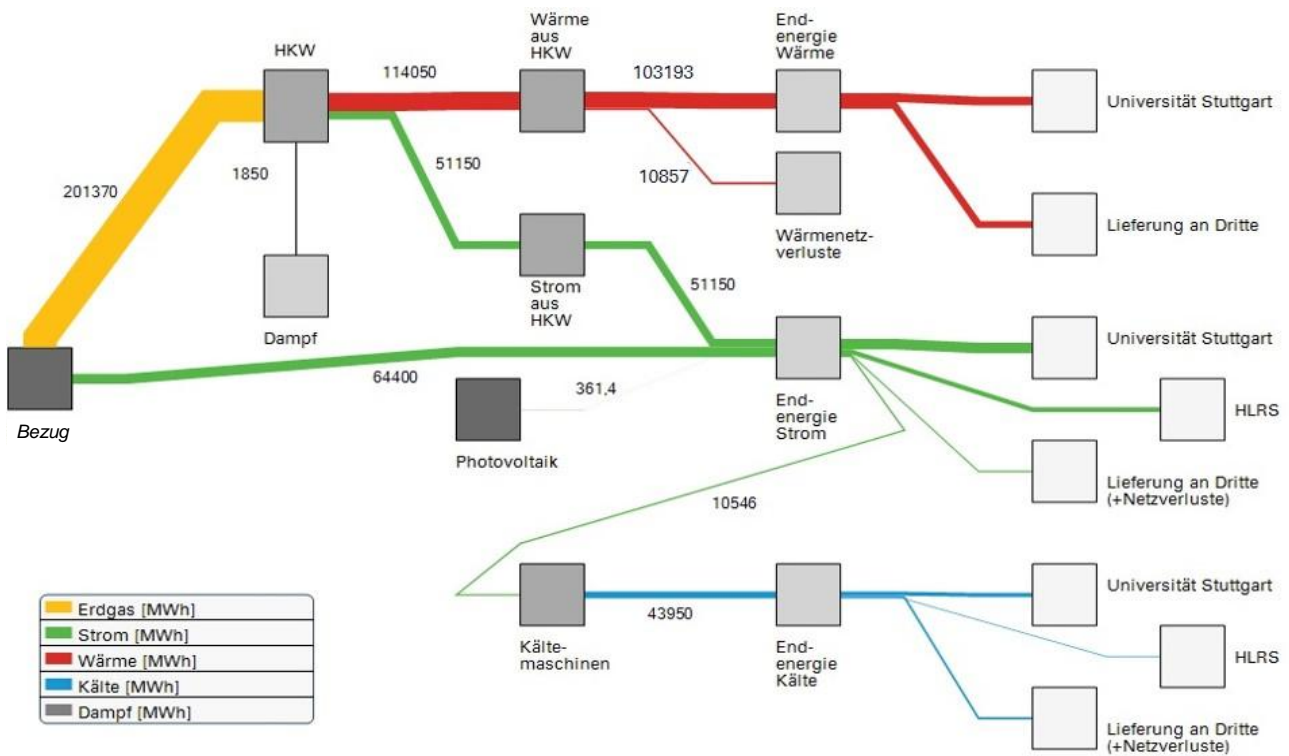


Abbildung 4-22: Energieflussdiagramm für den Campus Vaihingen im Basisjahr als Mittelwert der Jahre 2019 und 2023.

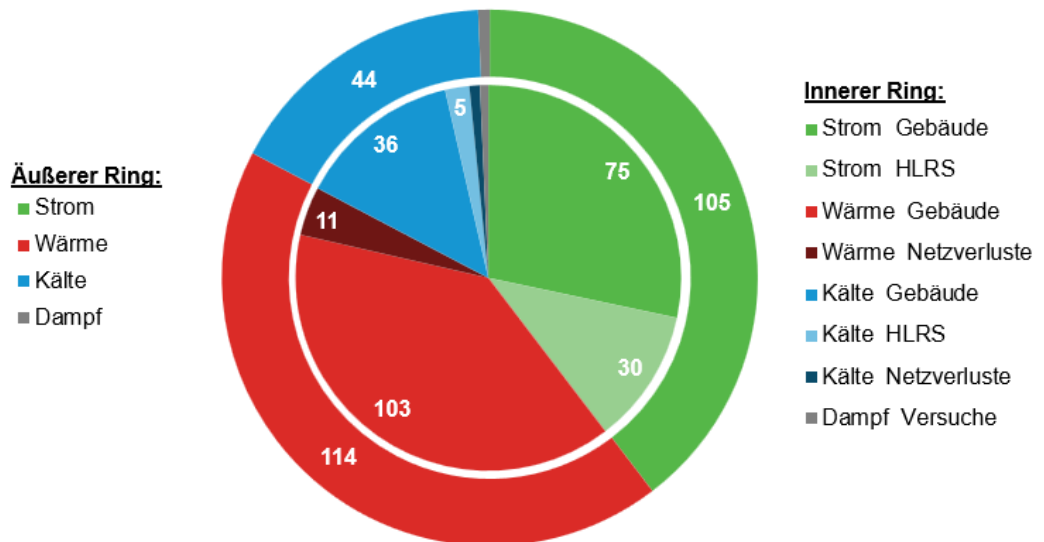


Abbildung 4-23: Endenergieverbrauch Strom (ohne Netzverluste), Wärme, Kälte und Dampf am Campus Vaihingen im Basisjahr (Werte in GWh)

Zur Einordnung in die historische Entwicklung zeigt Abbildung 4-24 den Stromverbrauch und Abbildung 4-25 den Wärmeverbrauch der Universität Stuttgart zwischen 2013 und 2022. Dabei ist zu beachten, dass damit einerseits die Energieverbräuche von Universitätsgebäuden, die sich nicht auf dem Campus Vaihingen befinden, inkludiert sind und andererseits die Energieverbräuche Dritter, wie bspw. Fraunhofer-Institute, Hochschulen oder Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, nicht inkludiert sind.

Die relative Entwicklung der Verbräuche wird dadurch wenig beeinflusst. Der Stromverbrauch hat über die letzten Jahre etwas geschwankt mit einem „Loch“ zu Beginn der Corona-Pandemie. Der Wärmeverbrauch ist dagegen angestiegen, was u. a. auf Neubauten zurückzuführen ist.

Wie in Abbildung 4-26 dargestellt, ist bei der Entwicklung der CO₂-Emissionen der Universität Stuttgart der Wechsel auf Ökostrom 2015 und die Gasmangellage 2022 als Abweichung vom Trend nach unten zu erkennen.

Für eine bessere Vorstellung der quantitativen Relevanz von Strom-, Wärme-, Kälte- und Dampfverbrauch zeigt Abbildung 4-23 den Endenergieverbrauch am Campus Vaihingen als Kreisdiagramm. Aus Abbildung 4-23 geht hervor, dass das Verhältnis von Strom und Wärme beim Verbrauch ungefähr bei 1:1 liegt. Der größte Stromverbraucher ist das HLRS mit einem Anteil von 28,5 %.

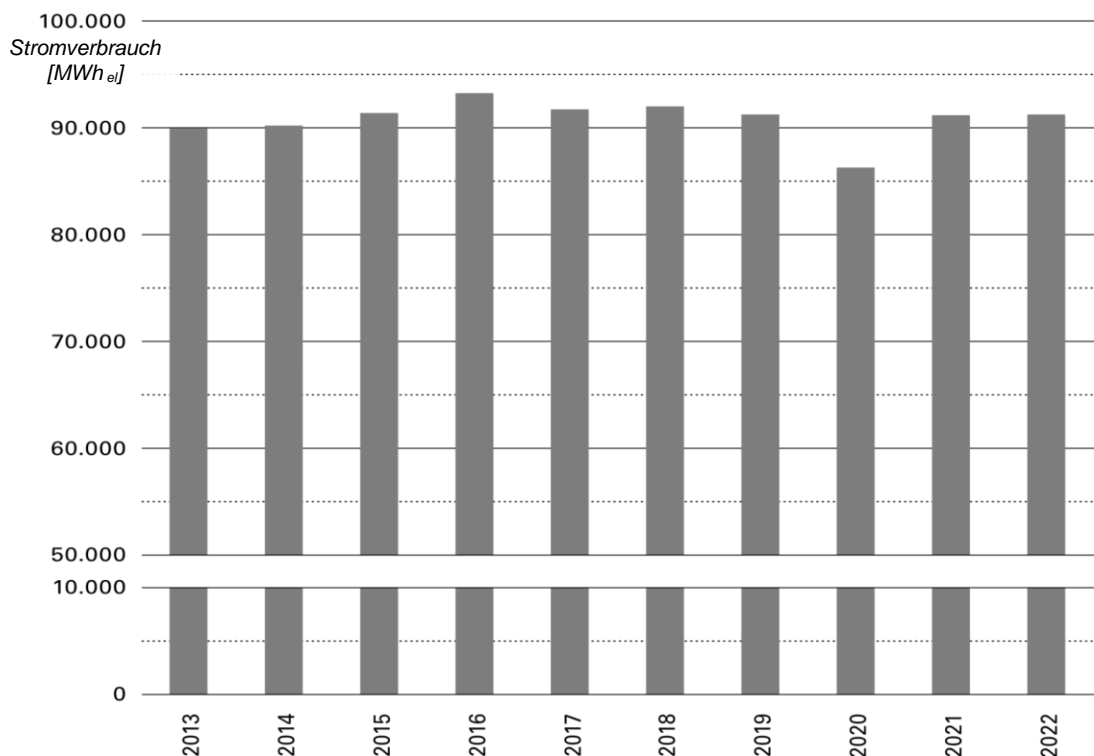


Abbildung 4-24: Historische Entwicklung der Endenergie Strom an der Universität Stuttgart (Gebäude der Universität Stuttgart am Standort Stadtmitte und Campus Vaihingen ohne Gebäude Dritter) (US 2023).

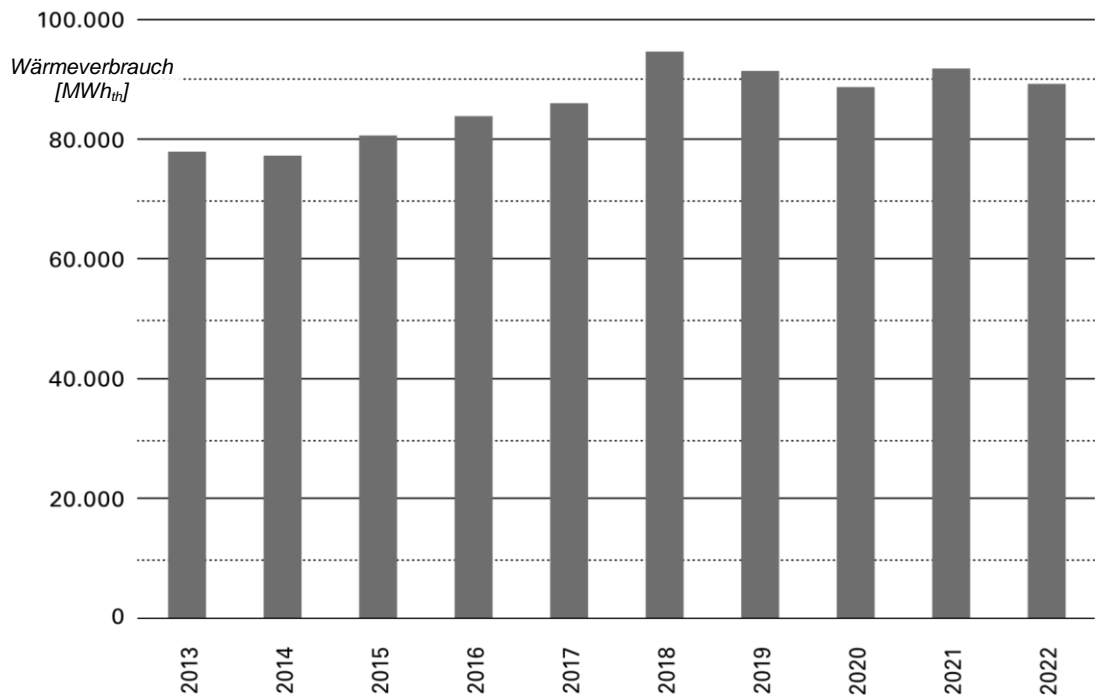


Abbildung 4-25: Historische Entwicklung der Endenergie Wärme an der Universität Stuttgart (Gebäude der Universität Stuttgart am Standort Stadtmitte und Campus Vaihingen ohne Gebäude Dritter) (US 2023).

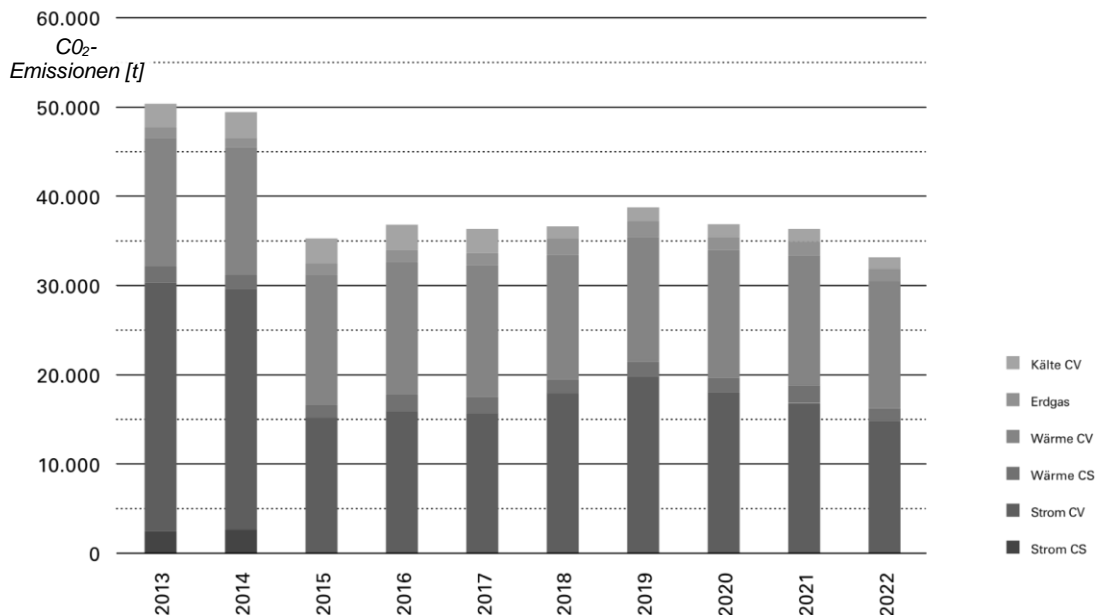


Abbildung 4-26: Historische Entwicklung der CO₂-Emissionen an der Universität Stuttgart (Gebäude der Universität Stuttgart am Standort Stadtmitte und Campus Vaihingen ohne Gebäude Dritter) (US 2023).

4.5 Potenziale der Versorgungsinfrastruktur

4.5.1 Wärmeversorgungsinfrastruktur

Hintergrund der durchgeführten gebäudeseitigen Messdatenanalyse ist es, stichprobenartig zu prüfen, welche Vor- und Rücklauftemperaturen derzeit gebäudeseitig benötigt werden, um daraus ggf. ein Potenzial und Maßnahmen für eine Temperaturabsenkung im Wärmenetz und damit ein Potenzial zur Effizienzsteigerung der Erzeugungsanlagen und des Wärmenetzes abzuleiten.

Die beispielhafte stichprobenartige Messdatenanalyse verdeutlicht dabei zum einen, dass die „indirekte Wärmeübertragung“ zur besseren Regelbarkeit, Stabilität und zur Absenkung der Vor- und Rücklauftemperaturen im Gebäude führt. Eine Nachrüstung von Wärmeübertragern und einer Rücklauf temperaturbegrenzung in Hausübergabestationen ist daher sinnvoll, zur Vor- und zur Rücklauf temperaturabsenkung und bietet damit ein Potenzial zur Effizienzsteigerung der Erzeugungsanlagen und des Wärmenetzes. Unter Berücksichtigung der Technischen Anschlussbedingungen des Wärmenetzes und der Rückmeldungen der im Dialogformat Beteiligten des HKW, wird weiterhin davon ausgegangen, dass eine Temperaturabsenkung im Wärmenetz nicht durch die gebäudeseitigen Anforderungen limitiert wird, sondern vielmehr durch fehlende, fehlerhaft eingestellte oder defekte Sensorik und Aktorik in den Hausübergabestationen und der dadurch notwendigen Druckhaltung im operativen Betrieb.

Weiterhin wird am Beispiel des analysierten Gebäudes Allmandring 31 ersichtlich, dass ein Potenzial zur Vor- und zur Rücklauf temperaturabsenkung darin liegt, die Versorgung der Gebäude mit Trinkwarmwasser vom Wärmenetz zu entkoppeln. Eine Dezentralisierung der Trinkwarmwasserbereitung wird für die Gebäude, die durch die Universität Stuttgart betrieben werden, laut einem Experten der Universität Stuttgart ohnehin bereits verfolgt. Für die anders verwalteten Gebäude ist eine Information dieser Art nicht bekannt.

Darüber hinaus zeigen die Analysen, dass auch die Betriebsführung des Wärmenetzes ein erhebliches Optimierungspotenzial aufweist. Insbesondere in den Sommer- und Übergangsmonaten liegen die gemessenen Vorlauf temperaturen deutlich über dem notwendigen Niveau und überschreiten oftmals die in den TAB vorgegebenen Sollwerte. Eine Anpassung der Fahrweise und eine konsequente Orientierung an den TAB-Vorgaben könnten daher wesentlich dazu beitragen, die Vorlauf temperaturen zu senken und die Effizienz des Gesamtsystems zu steigern.

Neben der beschriebenen Nachrüstung in Hausübergabestationen bietet daher auch eine Prüfung und Nachjustierung der Sensorik und Aktorik ein Potenzial zur Vor- und zur Rücklauf temperaturabsenkung. Weiterhin wird am Beispiel des analysierten Gebäudes Allmandring 31 ersichtlich, dass ein Potenzial zur Vor- und zur Rücklauf temperaturabsenkung darin liegt, die Versorgung der Gebäude mit Trinkwarmwasser vom Wärmenetz zu entkoppeln. Eine Dezentralisierung der Trinkwarmwasserbereitung wird für die Gebäude, die durch die Universität Stuttgart betrieben werden, laut einem Experten der Universität Stuttgart ohnehin bereits verfolgt. Für die anders verwalteten Gebäude ist eine Information dieser Art nicht bekannt.

Entsprechend der Messdatenanalysen abgeleitete Maßnahmen zur Effizienzsteigerung der Erzeugungsanlagen und des Wärmenetzes durch eine mögliche Vor- und Rücklauf temperaturabsenkung im Wärmenetz werden in Kapitel 7.3 beschrieben.

4.5.2 Kälteversorgungsinfrastruktur

Bis 2035 ist laut des UBA der Neubau einiger Gebäude mit Kältebedarf sowie der Wegfall von Kältebedarfen einiger Gebäude bspw. des Höchstleistungsrechenzentrums aufgrund der Nutzung der Abwärme durch Großwärmepumpen, geplant. Insgesamt steigt die elektrische Anschlussleistung von aktuell 43,1 MW auf 48,2 MW an (GEF 2024; UBA 2025).

Somit ist bis 2035 mit einem steigenden Kältebedarf am Universitätscampus Vaihingen zu rechnen. Verstärkt wird dies durch den ansteigenden Bedarf zur Gebäudekühlung aufgrund des fortschreitenden Klimawandels. Für die Deckung dieser steigenden Kältebedarfe bietet sich weiterhin die Nutzung des vorhandenen Kältenetzes und der zentralen Kälteerzeugung in den beiden Kältezentralen Nord und Süd an. Voraussichtlich muss aber die Kälteleistung durch den Zubau weiterer Kältemaschinen an den steigenden Kältebedarf angepasst werden.

Beim Zubau weiterer Kältemaschinen bzw. dem Ersatz bestehender Kältemaschinen ist zu beachten, dass die bestehenden Kompressionskältemaschinen mit dem Kältemittel R 134a betrieben werden. Dieser Fluorkohlenwasserstoff hat ein hohes Treibhausgaspotenzial und ist im Falle von Leckagen mit steigendem ökonomischem Aufwand durch die künstliche Verknappung infolge der F-Gase-Verordnung der Europäischen Union verbunden. Langfristig ist somit ein Ersatz aller bestehender Kältemaschinen durch Kältemaschinen mit natürlichen Kältemitteln wie bspw. Ammoniak sinnvoll.

Bei der Kälteerzeugung durch Kompressionskältemaschinen wird Wärme erzeugt, die aktuell durch Rückkühlwerke ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. Diese Wärme kann durch eine Temperaturerhöhung durch zu installierende Großwärmepumpen in das bestehende Wärmenetz eingespeist und dadurch durch angeschlossene Gebäude genutzt werden. Dies reduziert zum einen den elektrischen Energiebedarf der Rückkühlwerke. Zum anderen kann ein erheblicher Teil der Wärmebedarfe umweltfreundlich durch die Abwärmennutzung bereitgestellt werden. Das Abwärmepotenzial wird auf 26,2 GWh pro Jahr geschätzt und kann somit circa 25 % des jährlichen Wärmebedarfs des Jahres 2023 decken.

Zusammenfassend wird als Maßnahme empfohlen, dass das Abwärmepotenzial der zentralen Kälteerzeugung der Kältezentrale Süd durch die Installation von Großwärmepumpen genutzt wird. Idealerweise sollte diese Maßnahme in Verbindung mit der Installation zusätzlicher Kältemaschinen als Reaktion auf den steigenden Kältebedarf bzw. in Verbindung mit dem Ersatz der bestehenden Kältemaschinen durch Kältemaschinen mit natürlichen Kältemitteln erfolgen.

Im Workshop hatten die Teilnehmenden die Möglichkeit, zur vorgestellten Bestands- und Potenzialanalyse Rückmeldungen zu geben. Bei der Kälteversorgung wurde vom UBA darauf hingewiesen, dass die Kältezentrale Süd neben der neu geplanten Abwärmeezentrale am HLRS als zusätzliches konstant vorliegendes Abwärmepotenzial genutzt werden könnte. Eine Modernisierung der Kältezentrale sei ohnehin nötig, da das aktuell genutzte Kältemittel auf Dauer aufgrund schärferer Gesetzgebungen nicht mehr nutzbar sei. Das Abwärmepotenzial der Kältezentrale Süd wurde im Anschluss an den Workshop wie hier beschrieben untersucht und im weiteren Dialogprozess berücksichtigt.

4.5.3 Elektrische Versorgungsinfrastruktur

Die Untersuchung des HKW-Stromnetzes erfolgte durch die Modellierung der wesentlichen Komponenten des Mittelspannungsnetzes. Dazu zählen die Leitungen, Hochspannungstransformatoren, Schalter sowie die im Netz angeschlossenen Verbraucher und Erzeuger. Mithilfe einer zeitreihenbasierten, einphasigen AC-Lastflussberechnung konnten unter Einbeziehung der Messdaten des HKW und zusätzlicher synthetischer Leistungszeitreihen für jedes 15-Minuten-Intervall im Beobachtungszeitraum (Februar 2024 bis einschließlich Dezember 2024) die Leitungsströme, Leitungsauslastungen, Leistungsflüsse sowie die Spannungswerte an den Netzknoten bestimmt werden. Die Lastflussberechnung wurde statisch und separat für jedes Zeitintervall durchgeführt. Als Potenzialknoten, an dem stets die Nennspannung anliegt, wurde der Oberspannungsknoten der beiden Hochspannungstransformatoren definiert.

Da die Messdaten des HKW lediglich Informationen über die Wirkleistung, nicht jedoch über die Blindleistung enthalten, musste der Blindleistungsbedarf an den Netzknoten abgeschätzt werden. Für alle Netzknoten, zu denen keine spezifischen Informationen vorlagen, wurde ein Leistungsfaktor von 0,95 (untererregt/spannungssenkend) angenommen. Für die Generatoren des HKW sowie die Motoren in den Kältezentralen konnten die Leistungsfaktoren anhand von Typenschildfotos präziser bestimmt werden.

Abbildung 4-27 zeigt die Ergebnisse der probabilistischen Lastflussberechnung im Status quo unter ausschließlicher Berücksichtigung der Messdaten. Dargestellt sind die Leitungsauslastungen in % sowie die Knotenspannungen in per unit (p. u.). Die Leitungsauslastung ergibt sich aus dem Verhältnis des tatsächlichen Stroms zum zulässigen Nennstrom unter Einbeziehung der sicherheitsrelevanten Korrekturfaktoren in Abhängigkeit von der Verlegeart. Die Knotenspannung in per unit entspricht der auf die Nennspannung von 10 kV bezogenen Spannung, die gemäß den Vorgaben für öffentliche Mittelspannungsnetze im Bereich von 0,90 bis 1,10 p. u. liegen muss.

In dieser und in weiteren Abbildungen gleicher Art sind jeweils die Worst-Case-Werte für jede Leitung und jeden Netzknoten dargestellt. Dabei wurden zunächst alle Ausreißer außerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstands entfernt. Der dargestellte Wert der Leitungsauslastung entspricht dem maximalen Wert der verbleibenden Daten, während der dargestellte Wert der Knotenspannung dem minimalen Wert entspricht.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Status Quo während des gesamten Beobachtungszeitraums keine Überlastungen der untersuchten Stromnetzkomponenten des HKW-Stromnetzes auftreten und die Spannungsbandgrenzen stets eingehalten werden konnten. Die höchsten Leitungsauslastungen traten in den Leitungen zwischen dem Abspannwerk und dem HKW auf. Die höchste Leitungsauslastung von 73,9 % trat auf der Leitung zwischen Naturwissenschaftliche Zentrum und Mensa auf.

Die Darstellung der Betrachtung der Leitungsauslastungen und Knotenspannungen ist in der veröffentlichten Version des Ergebnisberichts nicht verfügbar.

Abbildung 4-27: Betrachtung der Leitungsauslastungen und Knotenspannungen im HKW-Stromnetz im Worst-Case (auf Basis des Status Quos).

Die Darstellung der Simulation des Stromnetzes
ist in der veröffentlichten Version
des Ergebnisberichts nicht verfügbar.

Abbildung 4-28: Simulation des Stromnetzes unter Berücksichtigung des Neubaus des Höchstleistungsrechenzentrums III ohne Netzausbau zur Darstellung der Auswirkungen auf Leitungsauslastungen und Knotenspannungen.

In Abbildung 4-28 ist dargestellt, welche Auswirkungen ein direkter Anschluss des Neubaus des HLRS sowie seiner Abwärmezentrale an den bestehenden Netzknoten, der aktuell das HLRS versorgt, hätte. Es zeigt sich eine deutliche Überlastung der Zuleitungen zwischen dem Abspannwerk und dem HLRS. Da aufgrund der Dauerlast des HLRS keine Flexibilisierung des Lastverhaltens möglich ist, besteht an dieser Stelle Handlungsbedarf in Form eines Netzausbaus. Entsprechende Maßnahmen sind den Verantwortlichen bereits bekannt; eine Erweiterung der Versorgungsleitungen befindet sich in Planung beziehungsweise Umsetzung.

Darüber hinaus wurde ein Szenario mit einer hohen Durchdringung von PV-Anlagen auf den Dachflächen der Campusgebäude simuliert. Bei einem gleichmäßig über den Campus verteilten Ausbau mit einer Gesamtleistung von 2,92 MW ist mit einer durchschnittlichen Verringerung der maximalen Leitungsauslastung um etwa 1 % zu rechnen. Ursache hierfür ist die Reduzierung der Residuallast durch den lokalen PV-Ertrag, wodurch insgesamt weniger elektrische Energie über das Mittelspannungsnetz übertragen werden muss.

Ein weiteres Szenario betrachtete die Integration von 200 Ladepunkten für Elektrofahrzeuge, die zufällig auf Netzknoten mit bestehenden Lasten verteilt wurden. Erwartungsgemäß ergaben sich hierbei keine signifikanten Steigerungen der Leitungsauslastung, da sich der Gesamtleistungsbedarf des Campus infolge der angenommenen Gleichzeitigkeit und der realistischen Nennleistungen der Ladepunkte nur geringfügig erhöhte.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich das Mittelspannungsnetz in einem technisch guten Zustand befindet und zukünftige Erweiterungen grundsätzlich realisierbar erscheinen. Da die Simulationen lediglich bis zu den Mittelspannungsabgängen durchgeführt wurden, können keine belastbaren Aussagen über die Dimensionierung von Schaltanlagen und Transformatoren innerhalb der Mittelspannungsebene oder in der Niederspannung getroffen werden. Beim Anschluss neuer Verbraucher oder Erzeuger ist daher im Einzelfall zu prüfen, ob alle betroffenen Netzkomponenten den zu erwartenden zusätzlichen Belastungen standhalten.

4.6 Fazit zur Bestandsanalyse

Die Bestandsanalyse des Campus-Energiesystems verdeutlicht mehrere zentrale Herausforderungen. Auf Gebäudeebene zeigen sich erhebliche Sanierungsrückstände sowie ineffiziente Hausübergabestationen, die durch zu hohe Rücklauftemperaturen die Netz- und Erzeugungseffizienz belasten. Auch auf Netzebene treten systematisch überhöhte Vorlaufemperaturen und eine geringe Temperaturspreizung auf, insbesondere im Sommer. Dies führt zu Überversorgung, erhöhten Netzverlusten und erschwert die Integration neuer Wärmeerzeuger. Hinzu kommt, dass das HKW weiterhin

stark von fossilem Erdgas abhängig ist und eine installierte Leistung aufweist, die im Hinblick auf die zukünftige Versorgung wärmeseitig langfristig überdimensioniert sein dürfte.

Aus diesen Analysen ergeben sich wichtige Erkenntnisse: Gebäude mit eingebauten Wärmeübertragern belegen, dass eine bessere Temperaturspreizung möglich ist und somit ein zentrales Optimierungspotenzial im Netz besteht. Dieses Optimierungspotenzial wirkt sich unmittelbar auf die Wärmeerzeugung aus, da die Effizienz und Fahrweise des HKW stark von den Temperaturbedingungen im Netz abhängen. Der GuD-Block eignet sich aufgrund seines höheren elektrischen Wirkungsgrads insbesondere für den Grund- und Mittellastbetrieb, während die konventionellen Blöcke 50 & 60 vor allem zur Deckung von thermischen Spitzenlasten eingesetzt werden sollten.

Von besonderer Bedeutung ist zudem die bereits im Bau befindliche Abwärmezentrale am HLRS, die mit rund 10 MW thermischer Leistung und einer Verfügbarkeit von etwa 80 % künftig einen großen Teil des jährlichen Wärmebedarfs decken kann. Schon heute lässt sich davon ausgehen, dass damit rund 54 % des Wärmebedarfs abgedeckt werden, was sich durch die Nutzung der bestehenden thermischen Speicher auf über 60 % steigern ließe. Damit wird die AWZ faktisch Teil des bestehenden Systems und gleichzeitig ein entscheidender Baustein für die Transformation. Die aktuelle CO₂-Bilanz ist zwar weiterhin stark durch fossile Energieträger geprägt, zeigt jedoch klar, dass Abwärmenutzung, Wärmepumpen und Gebäudesanierungen erhebliche Reduktionspotenziale eröffnen.

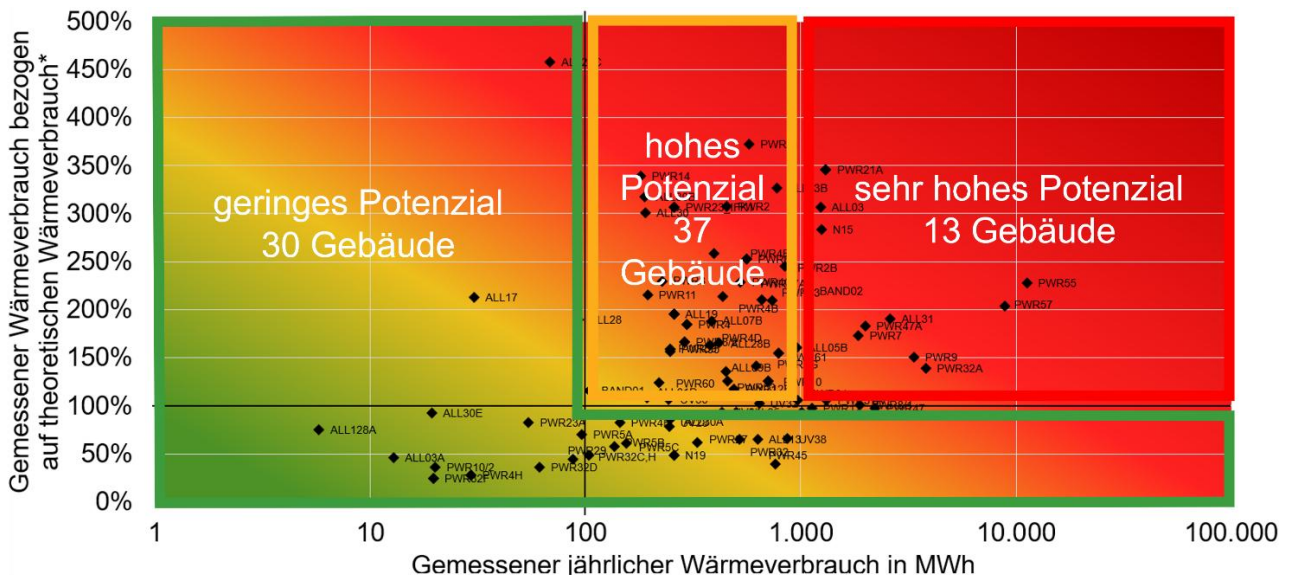
5. Systemwissen II – Potenzialanalyse

5.1 Potenziale der Senkung des Raumwärmebedarfs

Während durch eine energetische Sanierung der Gebäudehülle die Transmissionswärmeverluste gesenkt werden können, zieht die Nachrüstung einer Wärmerückgewinnung bei Lüftungsanlagen bzw. der Einbau neuer Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung eine Senkung der Lüftungswärmeverluste nach sich. Aufgrund mangelnder Daten zu Anzahl, Größe bzw. Luftleistung und dem Anteil bereits mit Wärmerückgewinnung ausgestatteter Anlagen konnte kein quantitatives Potenzial zur Senkung der Lüftungswärmeverluste ermittelt werden. Der Fokus des Kapitels liegt auf der Identifikation von Gebäuden mit Abweichungen von statistisch üblichen Verbräuchen sowie der Ermittlung des Potenzials zur Senkung der Transmissionswärmeverluste (Potenzial der energetischen Sanierung der Gebäudehülle).

In einem Vergleich von gemessenen, witterungsbereinigten jährlichen Wärmeverbrauchsdaten der Gebäude die durch die Universität Stuttgart betrieben werden, gemittelt über die Jahre 2021 bis 2023 gegenüber theoretischen statistischen jährlichen Wärmeverbräuchen in 2021 wurden alle Gebäude der Universität entsprechend ihrer Gebäudenutzung nach dem Bauwerkszuordnungskatalog eingeordnet (Bagherian et al. 2021). Die Zuordnung der Gebäude zu der Gebäudenutzung nach dem Bauwerkszuordnungskatalog wurde dabei durch einen Experten der Universität Stuttgart, u. a. mittels eines Raumbuchs durchgeführt. Wobei in dem Raumbuch jeder Raum der Gebäude, die durch die Universität Stuttgart betrieben werden, nach DIN 277 hinterlegt ist.

In Abbildung 5-1 ist das Verhältnis der gemessenen, witterungsbereinigten Wärmeverbrauchsdaten zu den theoretischen statistischen Wärmeverbräuchen aufgetragen über den absoluten gemessenen, witterungsbereinigten jährlichen Wärmeverbrauch. Dabei liegen etwa zwei Drittel der untersuchten Gebäude über den theoretischen statistischen Wärmeverbräuchen im Jahr 2021. Etwa ein



* Gemessener Wärmeverbrauch in kWh/(m²NGF*a), witterungsbereinigt und gemittelt über die Jahre 2021 bis 2023 bezogen auf theoretischen statistischer (2021) Wärmeverbrauch entsprechend Gebäudenutzung nach Bauwerkszuordnungskatalog in kWh/(m²NGF*a)

Abbildung 5-1: Potenzial zur Wärmeverbrauchsreduktion und geplanten Sanierungsmaßnahmen.

Viertel dieser Gebäude haben dabei einen absoluten jährlichen Wärmeverbrauch von über einer Gigawattstunde. Sie werden an dieser Stelle als Gebäude mit einem sehr hohen Potenzial zur absoluten Energieverbrauchsreduktion definiert. Diese Gebäude mit sehr hohem Potenzial zur absoluten Energieverbrauchsreduktion sind in Abbildung 5-2 mit roter Umrandung dargestellt.

Gebäude deren gemessener, witterungsbereinigter Wärmeverbrauch über den theoretischen statistischen Wärmeverbrauch liegt, welche jedoch zwischen 100 und 1.000 MWh Wärme pro Jahr verbrauchen, werden in Abbildung 5-2 mit orangener Umrandung dargestellt. Diese Gebäude bieten ein hohes Potenzial zur absoluten Wärmeverbrauchsreduktion. In diesem Bereich liegen Gebäude, welche den theoretischen statistischen Wärmeverbrauch von bis zu 370 % überschreiten.

Alle weiteren in Abbildung 5-2 mit grüner Umrandung dargestellten Gebäude liegen entweder innerhalb der üblichen Wärmeverbräuche entsprechend ihrer Gebäudenutzung oder verbrauchen weniger als 100 MWh Wärme pro Jahr. Sie werden in dieser Untersuchung definiert als Gebäude mit geringem Potenzial zur absoluten Wärmeverbrauchsreduktion.

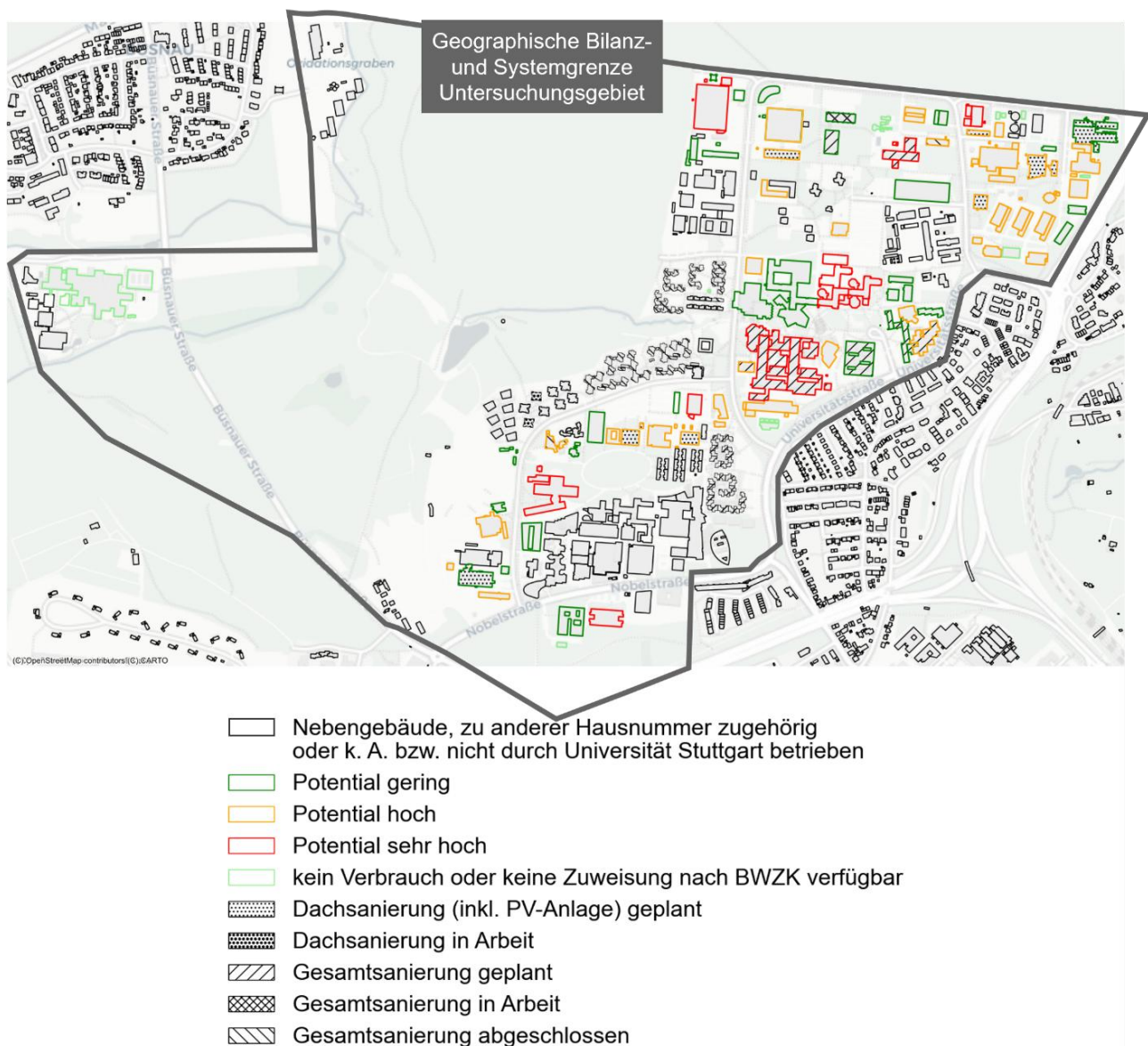


Abbildung 5-2: Lageplan des Untersuchungsgebietes Campus Vaihingen mit Potenzial zur Energieverbrauchsreduktion und geplanten Sanierungsmaßnahmen.

Zu allen schwarz umrandeten Gebäuden liegen keine weiteren Informationen vor. Weiterhin sind in Abbildung 5-2 die zum Zeitpunkt der Untersuchung durch das UBA und durch das Studierendenwerk geplanten, abgeschlossenen oder aktuellen Sanierungsmaßnahmen dargestellt. Dabei werden sowohl mit der Gesamtanierung als auch mit der Dachsanierung, welche durch das UBA geplant werden, Gebäudehüllflächen mit Wärmedurchgangskoeffizienten eines Effizienzniveaus KfW55 angestrebt. Eine Dachsanierung beinhaltet dabei neben der energetischen Sanierung des Daches immer auch, nach Möglichkeit, die Montage einer PV-Anlage. Eine Gesamtanierung beinhaltet die energetische Sanierung der gesamten Gebäudehülle und ebenfalls nach Möglichkeit, die Montage einer PV-Anlage.

Die Überschreitung der theoretischen statistischen Wärmeverbräuche kann neben einer ggf. falsch zugewiesenen oder nur teilweise zutreffenden Gebäudenutzung oder einer nicht korrekt zu verortenden Wärmezählerposition im Gebäude, mehrere Ursachen haben. Vorrangig deutet die Überschreitung jedoch auf einen Sanierungsrückstand der Gebäude hin. Insbesondere für die Gebäude mit sehr hohem Potenzial wird eine Priorisierung der energetischen Sanierung empfohlen.

Trotz fehlenden Informationen zum energetischen Sanierungszustand der Gebäude im Untersuchungsgebiet wurde in erster Näherung eine vereinfachte Abschätzung des energetischen Sanierungspotenzials durchgeführt, welches aufgrund der Dämmung der Gebäudehüllflächen Dach und Außenwand und dem Austausch von Fenstern besteht. Diese vereinfachte Abschätzung wurde für Gebäude mit bekanntem Baujahr durchgeführt.

Für die vereinfachte Abschätzung wird die Differenz der Wärmedurchgangskoeffizienten vor und nach der Sanierung, die Gebäudehüllflächen von Dach, Außenwand und Fenstern sowie die standortabhängige Gradtagszahl angenommen. Für den Gebäudezielzustand, d. h. nach der Sanierung, werden die Wärmedurchgangskoeffizienten des Effizienzniveaus KfW 55 angenommen. Die Annahmen für Wärmedurchgangskoeffizienten je Baujahr und die Gebäudehüllflächen in Abhängigkeit der Nettogrundfläche basieren auf der Gebäudetypologie für Nichtwohngebäude des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU 2022). Bei Betrachtung eines Einzelgebäudes müssen zur Bestimmung des effektiven Sanierungspotenzials noch die Wärmegewinne durch solare Strahlung, technische Geräte oder Personen berücksichtigt werden. Die Wärmegewinne, sowie die weiteren Gebäudehüllflächen oder deren exakte Bestimmung wurden in dieser vereinfachten Abschätzung vernachlässigt.

Im Workshop hatten die Teilnehmenden die Möglichkeit, zur vorgestellten Bestands- und Potenzialanalyse Rückmeldungen zu geben. Bezüglich des Potenzials zur Wärmeverbrauchsreduktion wurde von Seiten des Heizkraftwerks angemerkt, dass das als sehr hoch eingestufte Reduktionspotenzial der Kraftwerkshalle des HKWs aus deren Sicht nicht realistisch sei. Dies wurde im Nachgang zum Workshop genauer betrachtet und bilateral besprochen.

Die Kategorisierung als sehr hohes Potenzial begründet sich aus der Einstufung der Kraftwerkshalle gemäß dem Bauwerkszuordnungskatalog als technisches Bauwerk, wodurch der theoretische Wärmeverbrauch des Gebäudes eher niedrig angesetzt wird. Der tatsächliche Verbrauch des Gebäudes liegt gemäß dieser Typologisierung deutlich über dem typischen Verbrauch dieser Gebäudenutzung. Die entsprechende Kategorisierung ist gemäß diesen definitorischen Festlegungen somit korrekt und wurde demnach so belassen.

In Abbildung 5-3 ist das ermittelte energetische Sanierungspotenzial, durch die Dämmung der Gebäudehüllflächen Dach und Außenwand und dem Austausch von Fenstern, entsprechend der eigenen Aggregation der Gebäudefunktion dargestellt. Der verbleibende kumulierte Raumwärmebedarf der Gebäude im Untersuchungsgebiet ist deutlich höher als der Raumwärmebedarf für einen auf das Effizienzniveau KfW 55 sanierten Gebäudebestand. Dies kann neben den Vereinfachungen der gewählten vereinfachten Abschätzung und der ungesicherten Sanierungszustände u. a. auch durch die fehlende Berücksichtigung von Anteilen an Prozesswärme, Wärme zur Trinkwarmwasserbereitung und durch Herausforderungen mit den bestehenden Hausübergabestationen im Wärmenetz verursacht werden.

Neben einer energetischen Sanierung der Gebäudehülle kann auch die Sanierung der haustechnischen Anlagen, in welchen die Überprüfung oder Nachrüstung von Hausübergabestationen oder ein technisches Monitoring der Anlagentechnik mit inbegriffen ist, sowie die Überprüfung oder Nachrüstung der Gebäudeleittechnik (Gebäudeautomatisierung) zur Senkung des Raumwärmebedarfs beitragen. Durch Gebäudeautomatisierung können Ineffizienzen und Verluste bei der Wärmeverteilung verringert werden sowie die Wärmeabgabe an die Gebäudenutzung angepasst.

Das Einsparpotenzial ist sehr stark gebäudeabhängig und der Maßnahmenkatalog weniger konkret als bei der Gebäudehüllsanierung (z. B. enthalten Energiemanagementsysteme Funktionalitäten, die auch einzeln nachgerüstet werden können). Aus regulatorischer Sicht ist zu bemerken, dass Gebäude mit mehr als 290 kW thermischer Leistung ab 2025 ein bestimmtes Maß an Gebäudeautomation nachweisen müssen (§71a GEG). Eine technoökonomische Betrachtung wurde im Rahmen des Projekts DiTEnS nicht durchgeführt.

Entsprechende Maßnahmen sind auch Teil des in Kapitel 7.3 beschriebenen Maßnahmenkatalogs. Neben der energetischen Sanierung können nachgelagert, gerade in Hörsälen und selten genutzten Räumen, Hallen und Laboren, weitere Maßnahmen wie eine präsenzabhängige Regelung sinnvoll zur Wärmeverbrauchsreduktion eingesetzt werden, sofern der operative Betrieb der Wärmeerzeugungsanlagen und funktionale Hausübergabestationen dies ermöglichen (Ullmann et al. 2025).

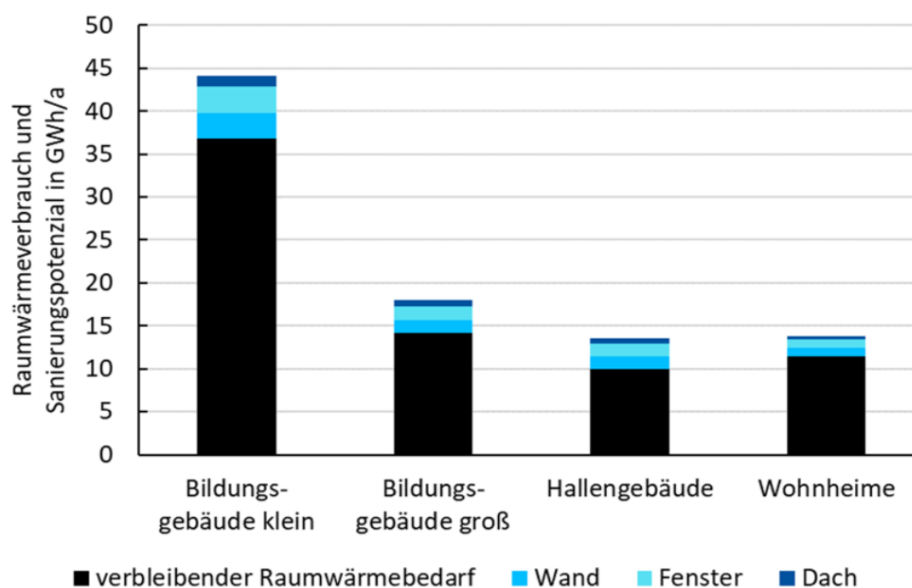


Abbildung 5-3: Energetisches Sanierungspotenzial, durch die Dämmung der Gebäudehüllflächen Dach und Außenwand und den Austausch von Fenstern, entsprechend der eigenen Aggregation der Gebäudefunktion in Abbildung 4-2.

Durch eine energetische Sanierung der Gebäudehülle, der haustechnischen Anlagen und der Gebäudeleittechnik von insbesondere den priorisierten Gebäuden kann die Effizienz des Wärmenetzes erhöht und der Wärmeverbrauch der Gebäude signifikant reduziert werden und somit Treibhausgasemissionen bzw. Betriebskosten eingespart werden. Das Potenzial zur Wärmeverbrauchsreduktion beschreibt daher auch das Potenzial für weitere Einsparungen.

5.2 Lokale Potenziale der Energiebereitstellung

5.2.1 Wärmeerzeugung

Aufgrund des bestehenden Wärmenetzes beziehen sich lokale Potenziale zur Wärmeerzeugung auf mögliche Wärmequellen, deren Wärme ins Wärmenetz eingespeist werden kann. Grundsätzlich kann bei Potenzialen dieser Art zwischen direkter Einspeisung und indirekter Einspeisung unter Einsatz einer Großwärmepumpe zur Anhebung des Temperaturniveaus unterschieden werden. Am Campus Vaihingen sind die potenziellen Wärmequellen, für die eine Großwärmepumpe nötig ist, Abwärmenutzung aus dem HLRS sowie Geothermie mit Erdwärmesonden.

Die Abwärmenutzung aus dem HLRS mit einer Energiezentrale mit Großwärmepumpen ist bereits geplant, finanziert und teilweise erbaut. Die erwartete thermische Leistung liegt bei $10,3 \text{ MW}_{\text{th}}$. Für Geothermie mit Erdwärmesonden kommen größere Grünflächen in Frage. Abbildung 5-4 zeigt mögliche Flächen auf dem Campus Vaihingen als rote Ellipsen. Das maximale thermische Potenzial des Erdreichs beläuft sich hier auf ca. $16 \text{ MW}_{\text{th}}$ (ohne Regeneration).

Das maximal nutzbare thermische Potenzial nach Anhebung des Temperaturniveaus durch eine Großwärmepumpe liegt bei ca. $27 \text{ MW}_{\text{th}}$. Die Regeneration außerhalb der Heizperiode könnte das HLRS durch seine ganzjährig anfallende Abwärme leisten, welche sonst in den Sommermonaten gekühlt werden müsste. Bei den großen Teilflächen A und B muss beachtet werden, dass sie auf bzw. nahe einer Deponie liegen, was mit Erdsondenbohrungen möglicherweise nicht vereinbar ist.

5.2.2 Photovoltaikanlagen

Die Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg hat das Potenzial für PV-Anlagen geschätzt und bietet mit ihrem Energieatlas die Möglichkeit an, das theoretische Potenzial abzuschätzen. Daraus ergibt sich für den Campus Vaihingen ein Potenzial von $10,6 \text{ MW}_{\text{p}}$ auf Dachflächen.

Der Energiemanager der Universität Stuttgart führt und pflegt eine Liste mit dem PV-Potenzial aller Universitätsgebäude. Stand April 2024 waren am Campus Vaihingen $361 \text{ kW}_{\text{p}}$ installiert. Das Ausbaupotenzial unter Berücksichtigung von Dachaufbauten und statischen Gegebenheiten beläuft sich für die Universitätsgebäude auf $3054 \text{ kW}_{\text{p}}$. Weiterhin wird ein Potenzial von $982 \text{ kW}_{\text{p}}$ an Fassaden ausgewiesen.

Im Workshop hatten die Teilnehmenden die Möglichkeit, zur vorgestellten Bestands- und Potenzialanalyse Rückmeldungen zu geben. Bezüglich des Geothermie-Potenzials wurde darauf hingewiesen, dass bei den großen Teilflächen A und B beachtet werden muss, dass sie auf bzw. nahe einer Deponie liegen, was mit Bohrungen für Erdsonden unter Umständen nicht vereinbar ist. Diese Anmerkungen wurden in die Potenzialanalyse eingearbeitet und in anschließenden Modellierungen möglicher künftiger Energieversorgungsvarianten berücksichtigt.

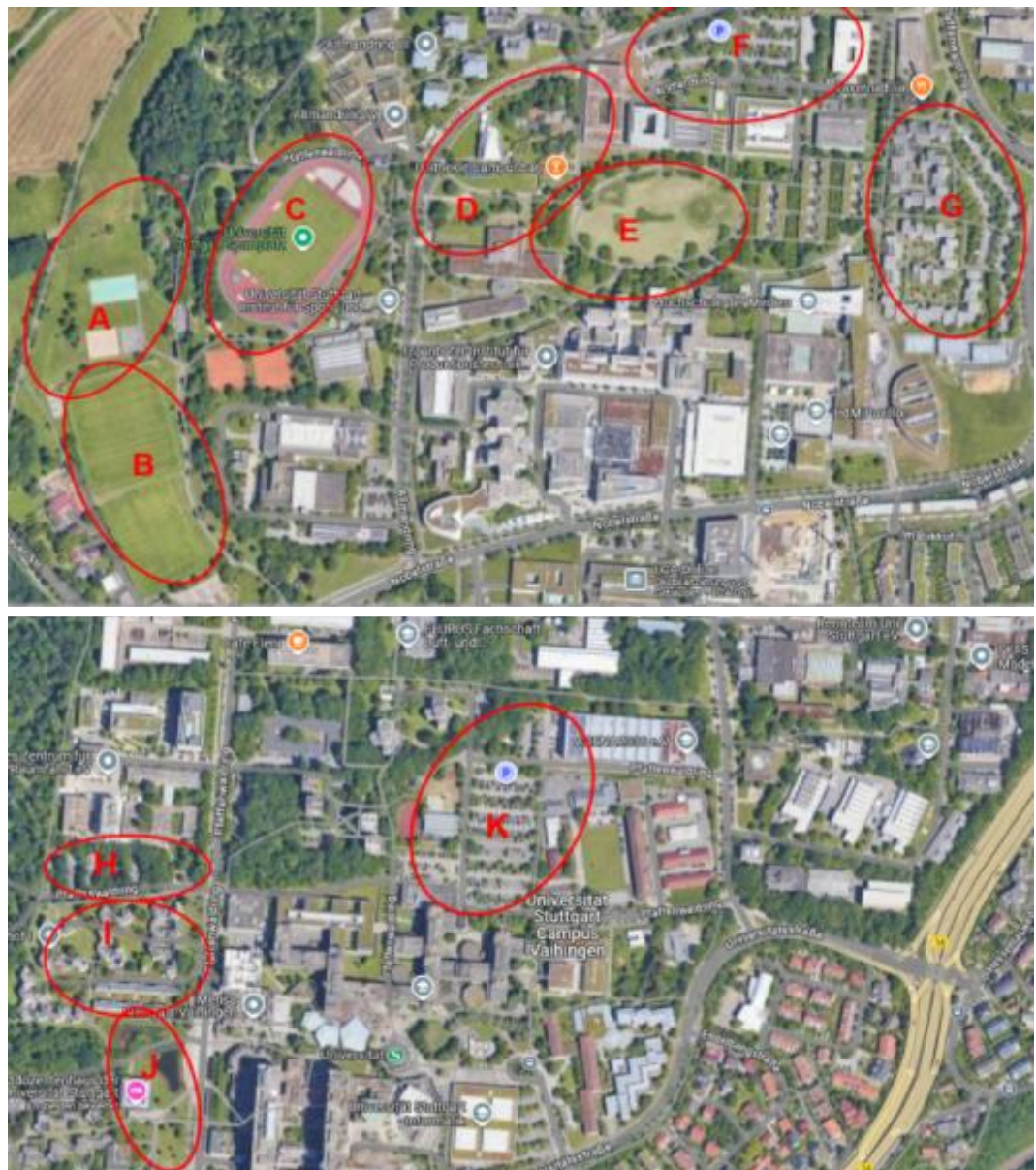


Abbildung 5-4: Potenzielle Flächen für Geothermie am Campus Vaihingen (Google Maps 2025).

5.2.3 Biogene Energieträger

Das regionale Biomassepotenzial ist mit Blick auf die verfügbaren Flächen als vernachlässigbar einzustufen. Zusätzliche Biomasse aus der Umgebung sind stark begrenzt und unterliegen der Preisunsicherheit, was langfristige Planungen erschwert. Biomasse könnte hinsichtlich des aktuellen Bedarfs an Brennstoffen für das HKW nur einen kleinen Beitrag liefern, was folgendes Beispiel zeigt: Ein Spitzenlastkessel, der 10 % des Jahresenergiebedarfs decken könnte, würde für die Versorgung mit Holzpellets bis zu fünf 40t-LKWs täglich erfordern.

Biogas ist zwar bilanziell über das Gasnetz verfügbar, unterliegt jedoch ebenfalls einer hohen Preisunsicherheit. Der vollständige Ersatz des heutigen Erdgasbedarfs des HKW durch Biogas würde zudem einen erheblichen Anteil des in Baden-Württemberg heute verfügbaren Biogaspotenzials benötigen, was die Knappheit dieses Energieträgers unterstreicht.

Im Workshop hatten die Teilnehmenden die Möglichkeit, zur vorgestellten Bestands- und Potenzialanalyse Rückmeldungen zu geben. Bezüglich des präsentierten theoretischen PV-Potenzials auf Dachflächen des Campus wurde vom Universitätsbauamt angemerkt, dass dies sehr theoretisch sei. Mehrere Stakeholder verwiesen auf eine mangelnde Realisierbarkeit des angegebenen Potenzials bei mehreren Gebäuden.

Speziell genannt wurden die Tanks am HKW, das zeltähnliche Dach des Forschungsgebäudes des Instituts für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren sowie der Windkanal am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren. Zudem wurde vom UBA darauf hingewiesen, dass auch Freiflächen wie die Müllhalde südlich der Gebäude der Max-Planck-Gesellschaft oder Parkplätze als PV-Potenzialflächen in Frage kommen könnten. Der schwierigen Abschätzung des tatsächlich realisierbaren PV-Potenzials wurde in weiteren Workshops teils durch die Szenarioparameter „Flächenpotenziale“ und „PV-Ausbaugeschwindigkeit“ Rechnung getragen.

5.2.4 Wasserstoff

Die lokale Erzeugung von Wasserstoff auf dem Campus Vaihingen ist bei Strom-Bezug aus dem Netz klar unwirtschaftlich. Aufgrund der Tatsache, dass der Strom von PV-Anlagen auch in Zukunft zu keiner Überschusssituation führen wird, sind lokale erneuerbare Energien als Stromlieferant für Wasserstofferzeugung keine Option. Es bestehen zwar Überlegungen der terranets bw, den Campus Vaihingen an ein zukünftiges Wasserstoffnetz anzuschließen. Hierbei bestehen jedoch grundsätzliche, zeitliche und preisliche Unsicherheiten. Zur Erreichung eines jahresbezogenen Klimaziels kann Wasserstoff mangels Zuverlässigkeit kein verlässlicher Bestandteil sein.

5.3 Fazit zur Potenzialanalyse

Die durchgeführte Potenzialanalyse stellt für den Campus Vaihingen verschiedene Möglichkeiten zur Reduktion des Energieverbrauchs und zur Effizienzsteigerung oder Transformation der Versorgungsinfrastruktur heraus. Dabei lassen sich die identifizierten Potenziale in drei Schwerpunktbereiche gliedern: Die energetische Sanierung der Gebäude, die Optimierung der Versorgungsinfrastruktur sowie die lokale erneuerbare Energiebereitstellung. Nachfolgend wird auf wesentliche Erkenntnisse und Herausforderungen bezüglich der Potenzialanalyse eingegangen.

Im Bereich der energetischen Sanierung wurden etwa zwei Drittel der untersuchten Gebäude identifiziert, deren gemessener, witterungsbereinigter Wärmeverbrauch über den theoretischen statistischen Wärmeverbräuchen liegt. Besonders hervorzuheben sind dabei Gebäude mit sehr hohem Potenzial zur absoluten Energieverbrauchsreduktion, die einen jährlichen Wärmeverbrauch von über einer Gigawattstunde aufweisen.

Die vereinfachte Abschätzung des energetischen Sanierungspotenzials durch Dämmung der Gebäudehüllflächen und Austausch von Fenstern verdeutlicht, dass neben der Gebäudehülle insbesondere auch die Sanierung der haustechnischen Anlagen und der Gebäudeleittechnik erforderlich ist. Durch die Priorisierung und Umsetzung entsprechender Sanierungsmaßnahmen können sowohl die Effizienz des Wärmenetzes erhöht als auch Treibhausgasemissionen und Betriebskosten signifikant reduziert werden.

Im Workshop hatten die Teilnehmenden die Möglichkeit, zur vorgestellten Bestands- und Potenzialanalyse Rückmeldungen zu geben. Bezüglich der Option eines künftigen Betriebs des HKW mit Wasserstoff verwiesen die teilnehmenden Personen darauf, dass der Gastransportnetzbetreiber (terrane**t**s bw) als Planerin des Wasserstoff-Kernnetzes in Baden-Württemberg bereits im Gespräch stand und das HKW als Ankerkunden für den Raum Stuttgart gewinnen möchte.

Genauere Informationen konnten dazu aber nicht geliefert werden. Ob diese Interessenbekundung die zukünftige Wasserstoffnutzung am HKW plausibler macht, wurde am Workshop nicht abschließend diskutiert. In der Modellierung zukünftiger Energieversorgungsvarianten wurde dadurch unverändert ab 2030 von einem gewissen Wasserstoffpotenzial mit literaturbasierten Preisentwicklungen ausgegangen.

In Bezug auf die Versorgungsinfrastruktur deutet die gebäudeseitige Messdatenanalyse darauf hin, dass mit der Nachrüstung von Wärmeübertragern und Rücklauftemperaturebegrenzungen, sowie durch die Prüfung und Nachjustierung der Sensorik und Aktorik in Hausübergabestationen ein Potenzial zur Vor- und Rücklauftemperatureabsenkung besteht. Die Entkopplung der Trinkwarmwasserbereitung vom Wärmenetz stellt ein weiteres Potenzial zur Temperatureabsenkung dar. Darüber hinaus wird mit der Analyse der Betriebsführung des Wärmenetzes, insbesondere in den Sommer- und Übergangsmonaten, ein Optimierungspotenzial hinsichtlich eines energieeffizienten Betriebs identifiziert. Eine Anpassung der Fahrweise der Kraftwerkskomponenten und eine konsequente Orientierung hinsichtlich der Wärmenetztemperaturen an den technischen Anschlussbedingungen des Wärmenetzes könnten wesentlich zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems beitragen.

Für das Kälteversorgungsnetz ist bis 2035 mit einem steigenden Kältebedarf zu rechnen, wobei die Anschlussleistung von aktuell 43,1 MW auf 48,2 MW ansteigen wird. Beim notwendigen Zubau weiterer Kältemaschinen wird ein Ersatz der bestehenden Anlagen durch Kältemaschinen mit natürlichen Kältemitteln empfohlen, um das hohe Treibhausgaspotenzial des aktuell eingesetzten Kältemittels R 134a zu vermeiden. Die Nutzung der Abwärme der zentralen Kältemaschinen durch die Installation von Großwärmepumpen bietet dabei ein erhebliches Potenzial zur Reduktion von fossilen Energieträgern in der Wärmeversorgung des Untersuchungsgebiets. Dies trifft insbesondere in der ganzjährig eingesetzten Kältezentrale Süd zu. Mit dem geschätzten Abwärmepotenzial von 26,2 GWh pro Jahr können etwa 25 % des jährlichen Wärmebedarfs des Jahres 2023 gedeckt werden.

Hinsichtlich der Potenziale zur lokalen Energiebereitstellung ist die Abwärme der bestehenden und im Bau befindlichen Höchstleistungsrechenzentren hervorzuheben. Die Abwärme wird in Kombination mit mehreren Großwärmepumpen auf einem Nutztemperatureniveau von etwa 85 °C nutzbar gemacht. Die Heizzentrale zur Abwärmenutzung befindet sich bereits in einer fortgeschrittenen Planungsphase. Es wird eine ganzjährig, kontinuierlich zur Verfügung gestellte thermische Leistung von 10,3 MW erwartet. Für das theoretische Geothermiepotenzial wird die Nutzung von Erdwärmesonden als einzige sinnvoll einsetzbare Technologie betrachtet.

In einer ersten Abschätzung liegt das Geothermiepotenzial bei ca. 27 MW_{th} nach Anhebung des Temperatureniveaus durch eine Großwärmepumpe. Dabei wird berücksichtigt, dass die Regeneration des Erdreichs außerhalb der Heizperiode durch die ganzjährig anfallende Abwärme des HLRS erfolgen kann. Das Potenzial von PV-Anlagen auf Dachflächen der Gebäude, die durch die Universität

Stuttgart betrieben werden, beläuft sich unter Berücksichtigung von Dachaufbauten und statischen Gegebenheiten auf 3.054 kW_p sowie zusätzlich auf 982 kW_p an entsprechenden Fassaden. Das regionale Biomassepotenzial ist hingegen aufgrund der verfügbaren Flächen als vernachlässigbar einzustufen. Die lokale Erzeugung von Wasserstoff auf dem Campus Vaihingen ist bei Strombezug aus dem Netz unwirtschaftlich und kann zur Erreichung eines jahresbezogenen Klimaziels mangels Zuverlässigkeit kein verlässlicher Bestandteil sein.

Im Untersuchungszeitraum der Potenzialanalyse lagen unvollständige Daten zum energetischen Sanierungszustand der Gebäude im Untersuchungsgebiet vor. Die Datenbeschaffung stellt sowohl für die Bestands- als auch für die Potenzialanalyse eine der größten Herausforderungen dar. Die Qualität der Daten ist dabei wesentlich für die Aussagekraft der Ergebnisse. Mit vereinfachten Abschätzungen wie der hinsichtlich des Sanierungspotenzials können tatsächliche Sanierungspotenziale erheblich unter- oder überschätzt werden. Obwohl im Verlauf des Dialogprozesses von verschiedenen Stakeholdern vereinzelt weitere Daten zu Sanierungen in Arbeit, geplanten oder abgeschlossenen Sanierungen zur Verfügung gestellt wurden, konnte eine Quantifizierung dieser Unter- oder Überschätzung nicht durchgeführt werden.

Zusammenfassend kann mit der Potenzialanalyse dargestellt werden, dass durch die Kombination von energetischer Sanierung der Gebäude, Modifikation der Versorgungsinfrastruktur und dem Ausbau der lokalen Energiebereitstellung insbesondere durch die Abwärmenutzung des HLRS und der Kältezentrale Süd, von Geothermie und PV ein Potenzial zur Reduktion des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen am Campus Vaihingen besteht. Weitere kleinere Potenziale zur lokalen Energiebereitstellung wie der Nutzung der Abwärme der S-Bahntunnel wurden ebenfalls untersucht, jedoch nicht weiterverfolgt. Die während der Potenzialanalyse identifizierten und in Kapitel 7.3 beschriebenen Maßnahmen tragen dabei nicht nur zur Erreichung der in Kapitel 6 beschriebenen Klimaneutralitätsziele bei, sondern auch zu einer langfristigen Reduktion der Betriebskosten.

5.4 Ergebnisse und Erkenntnisse des Workshops 1 – Systemwissen: Bestands- und Potenzialanalyse

Der Workshop 1 des Dialogprozesses am Campus fand am 4. Juni 2025 am Höchstleistungszentrum Stuttgart statt mit Vertreter*innen des UBA, des HKW, des Green Offices der Universität Stuttgart sowie des Dezernats 6 für Facility Management, des Dezernats 8 für Planen und Bauen, der Mitarbeitenden und der Studierenden der Universität Stuttgart, wie auch Vertreter*innen des Studierendenwerks Stuttgart, des Wohnheims Straussäcker 2 und des studentischen Vereins „Crossing Borders Stuttgart“.

Den teilnehmenden Stakeholdern wurden die in Kapitel 3 bis 5 dargestellten Analysen zur Ausgangslage, zum Bestand der Energieversorgung und zu lokalen klimaneutralen Energiepotenzialen am Campus präsentiert. Im Mittelpunkt stand der Aufbau einer gemeinsamen Wissensbasis und die Sammlung von Anmerkungen, welche in unsere weiteren Analysen für kommende Workshops einfließen. Zur Betrachtung der Potenzialanalyse des Strom- und Wärmenetzes sowie der PV-Potenziale kam eine VR-Visualisierung des digitalen Zwillings in der CAVE des HLRS zum Einsatz. Die restlichen Inhalte wurden mit Grafiken und Darstellungen auf PowerPoint-Folien vermittelt. Abschließend wurden mit den Stakeholdern Herausforderungen auf dem Weg zur klimaneutralen Energieversorgung am Campus Vaihingen diskutiert. Der genauere Ablauf des Workshops ist der Abbildung 5-5 zu entnehmen.

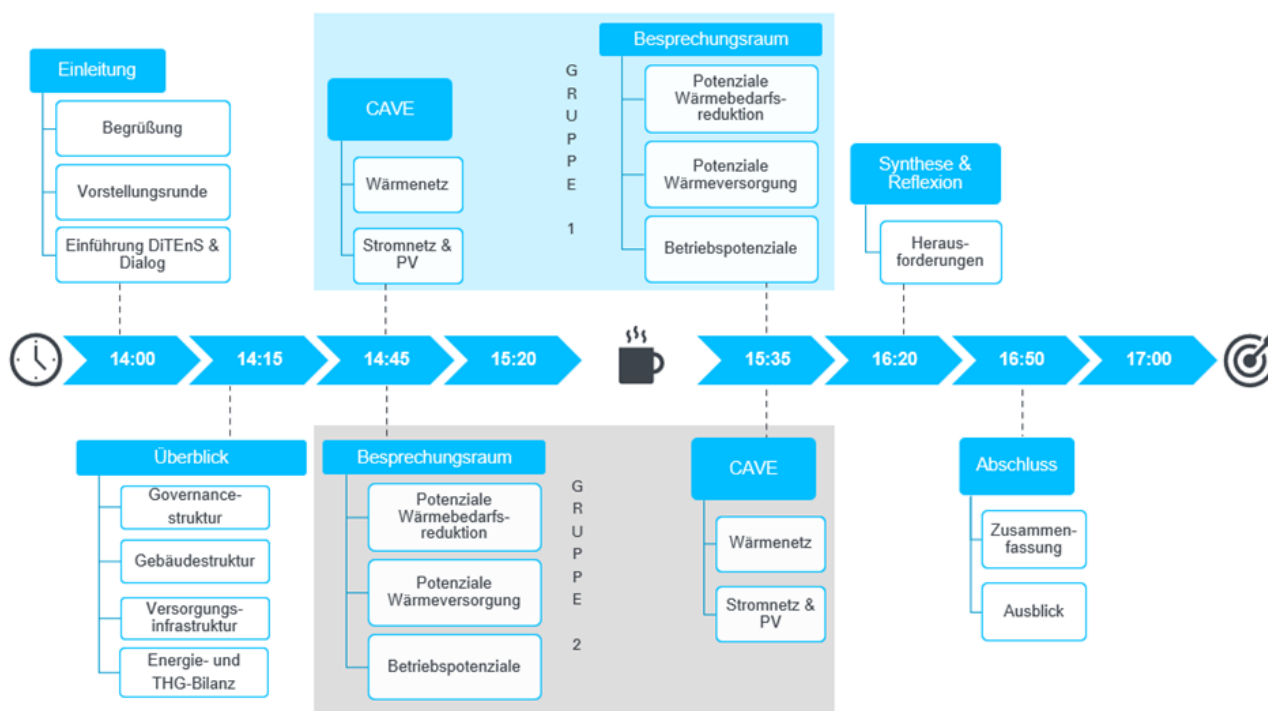


Abbildung 5-5: Ablaufplan des Workshops 1: Systemwissen - Bestand & Potenziale.

5.4.1 Evaluation des Workshops zum Systemwissen

Abbildung 5-6 zeigt einige Eindrücke aus dem Workshop zu Systemwissen. Im ersten Workshop des Dialogprozesses am Campus Vaihingen wurde zu Beginn eine Einigung auf bzw. Zustimmung der Stakeholder zum übergeordneten Ziel des Dialogprozesses erzielt: Die Diskussion von wünschenswerten und realisierbaren Transformationspfaden in Richtung klimaneutraler Energieversorgung am Campus Vaihingen. Als angestrebtes Ergebnis des Prozesses traf zudem eine Einigung auf einen Transformationspfad und die Ausarbeitung eines dazugehörigen Maßnahmenplans unter allen Anwesenden auf Zustimmung.

Das spezifische Ziel des ersten Workshops war die Erarbeitung einer gemeinsamen Wissensbasis über das bestehende Energiesystem und die Potenziale für eine nachhaltige Energieversorgung am Campus Vaihingen. Dieses Ziel konnte durch die Präsentation und Diskussion der in Kapitel 5.2 dargestellten Inhalte der Potenziale größtenteils – mit Ausnahme zweier, weiter unten beschriebener Uneinigkeiten – erreicht werden.

In die in Workshop 1 präsentierten Inhalte wurden auch schon Erkenntnisse aus den Stakeholder-Interviews sowie aus vorgelagerten Validierungsworkshops mit dem UBA, dem HKW und dem Energiemanager der Universität Stuttgart als Stakeholder des Untersuchungsgebiets eingearbeitet. In der Online-Nachbefragung zum Workshop per Umfrageinstrument „evasys“ stimmten vier Teilnehmende voll und ganz und drei eher der Zielerreichung des Workshops zu, bei zwei Enthaltungen (N = 13, n = 9).

In der Diskussion der Bestands- und Potenzialanalyse wurden von den Teilnehmenden Ergänzungen oder Korrekturen vorgenommen, die in Vorbereitung der darauffolgenden Workshops in die technischen Entwicklungen eingearbeitet wurden. Dies betraf u. a. Ergänzungen bei der



Abbildung 5-6: Eindrücke aus dem Workshop 1: Systemwissen – Bestand & Potenziale (oben: Visualisierungen und Präsentationen zum Strom- und Wärmenetz in der CAVE, unten: Sammlung und Diskussion von Herausforderungen der Energiewende am Campus Vaihingen).

Governance-Struktur, die Anpassung der Bilanzraumgrenze, Korrekturen bei Kategorisierungen der Gebäudestruktur, das bis dahin nicht betrachtete Abwärmepotenzial der Kältezentralen, eine Korrektur beim Flächenpotenzial für oberflächennahe Geothermie sowie eine ausschnittsweise Klärung des technischen PV-Potenzials.

Zudem konnten Unklarheiten bei den Teilnehmenden bezüglich des Flächenverlusts bei der Nutzung von Geothermie in der Diskussion dahingehend geklärt werden, dass die Flächen bei oberflächennaher Geothermie mit Unterbrechung in der Bauzeit der Anlage wie gewohnt z. B. als Sportanlage oder Grünfläche weitergenutzt werden können. Letztendlich wurde bei der Betrachtung von Potenzialen der künftigen Wärmeversorgung am Campus vom UBA darauf hingewiesen, dass die für 2027 geplante Abwärmezentrale am HLRS III aufgrund von betriebsbedingten Ausfällen des HLRS (Wartungen, Rechnerumbau) nicht als versorgungssicherer Energieversorger zu betrachten ist und diesbezüglich somit immer eine vollständige Redundanz im Energiesystem vorhanden sein muss, sei es durch das bestehende HKW oder neue Anlagen. Dies wurde projektintern z.T. berücksichtigt, indem im Workshop 3 künftige Szenarien und Energieversorgungsvarianten auch mit einer reduzierten Verfügbarkeit der Abwärmezentrale simuliert und diesbezüglich auf Versorgungssicherheit geprüft wurden.

In der Betrachtung der Energieversorgungspotenziale am Campus Vaihingen kamen zwei Divergenzen zwischen den vom Projektteam erarbeiteten Ergebnissen und Einschätzungen der teilnehmenden Personen auf, die im Workshop selbst nicht mehr komplett aufgelöst werden konnten.

Dies betraf einerseits Wasserstoff als mögliche Option für den klimaneutralen Weiterbetrieb des HKW. Projektseitig wurde davon ausgegangen, dass bezüglich einer möglichen Versorgung des

HKW mit Wasserstoff sehr hohe Unsicherheiten bestehen, da eine lokale Erzeugung klar unwirtschaftlich und bei einer möglichen Versorgung über das bundesweite Wasserstoff-Kernnetz der Anbindungszeitpunkt, der Preis sowie die verfügbaren Mengen als offene Fragen bestehen bleiben.

Die teilnehmenden Personen verwiesen bei der Vorstellung dieser Potenzialeinschätzung darauf, dass terranets bw als Planerin des Wasserstoff-Kernnetzes in Baden-Württemberg mit dem HKW bereits im Gespräch stand und dieses als netzseitigen Ankerkunden für den Raum Stuttgart gewinnen möchte. Genauere Informationen könnten dazu aber nicht geliefert werden. Ob diese Interessenbekundung von terranets bw die zukünftige Wasserstoffnutzung am HKW plausibler macht, zumal terranets bw als Ferngasnetzbetreiber nur für den Gastransport und nicht für die gelieferte Energie und damit für einen wesentlichen Teil des Preises verantwortlich ist, wurde am Workshop nicht abschließend diskutiert. In der Modellierung zukünftiger Energieversorgungsvarianten wurde daher unverändert ab 2030 von einem gewissen Wasserstoffpotenzial mit literaturbasierten Preisentwicklungen ausgegangen.

Eine andere Divergenz bestand in der Einschätzung möglicher Kapazitätsreduktionen am HKW unter Annahme einer zukünftigen Diversifizierung der Wärmequellen (u. a. durch die Abwärmezentrale des HLRS III ab 2027). Hier gingen projekt-interne Analysen von einem Potenzial zur künftigen Reduzierung der HKW-Kapazitäten aus, da gemäß den Analysen die verschiedenen Heizkessel bzw. Wärmeauskopplungen bereits jetzt allgemein nur gering ausgelastet und die maximalen Kapazitäten des HKW nur selten benötigt werden. Eine der teilnehmenden Personen widersprach dieser Schlussfolgerung, da die drei verschiedenen Blöcke aus Gründen der Effizienz benötigt würden. Dies stand auch im Zusammenhang mit unterschiedlichen Einschätzungen zur Effizienz des Wärmenetzbetriebs im Sommer. Auch diese Divergenz konnte im Workshop selbst nicht abschließend geklärt werden. Die Anmerkungen wurden jedoch bei weiteren Analysen der (künftigen) Betriebsführung und -optimierung der Wärmeversorgung berücksichtigt und in Workshop 3 wieder zur Diskussion gestellt.

Im Anschluss an die gemeinsame Betrachtung der Bestands- und Potenzialanalyse wurden am Workshop auch technische und soziale Herausforderungen der Energiewende am Campus diskutiert. Wahrgenommene Herausforderungen der Teilnehmenden wurden zusammengetragen und von diesen in eine sogenannte Stacey-Matrix eingeordnet (vgl. Abbildung 5-7).

In der anschließenden Diskussion der Herausforderungen wurde von Seite des HKW bemängelt, dass dieses bei vergangenen Planungen entweder nicht oder zu spät einbezogen worden sei. Auch der fehlende Einbezug von und Vorabinformationen für betroffene Stakeholder wie der Verwaltung oder Bewohnende von Wohnheimen bei Entscheidungen zur Energieversorgung am Campus wurde bemängelt. Dieses Desiderat eines umfassenden Stakeholder-Dialogs wurde auch durch die Anmerkung bestärkt, dass die dezentrale Entscheidungsstruktur an der Universität Stuttgart dazu führe, dass zwischen unterschiedlichen Interessen abgewogen werden müsse und niemand alleine einen Weg vorgeben könne. Zugleich seien zwischen den Stakeholdern auch immer verschiedene, oft nicht deckungsgleiche Interessen vorhanden. Zudem sei es bei Planungsvorhaben auch wichtig, die Vorgeschichten zwischen den verschiedenen Stakeholdern zu kennen. Bezüglich dieses Koordinationsbedarfs wurde es als positiv angesehen, dass im DiTEnS-Dialogprozess nun eine so große Runde an Stakeholdern zusammenkommt. Dies wurde von den Teilnehmenden auch in der Nachbefragung zum Workshop betont, in der das Verstehen anderer Sichtweisen und der Austausch zu aktuellen Energiethemen außerhalb ihres Tagesgeschäfts positiv hervorgehoben wurde.

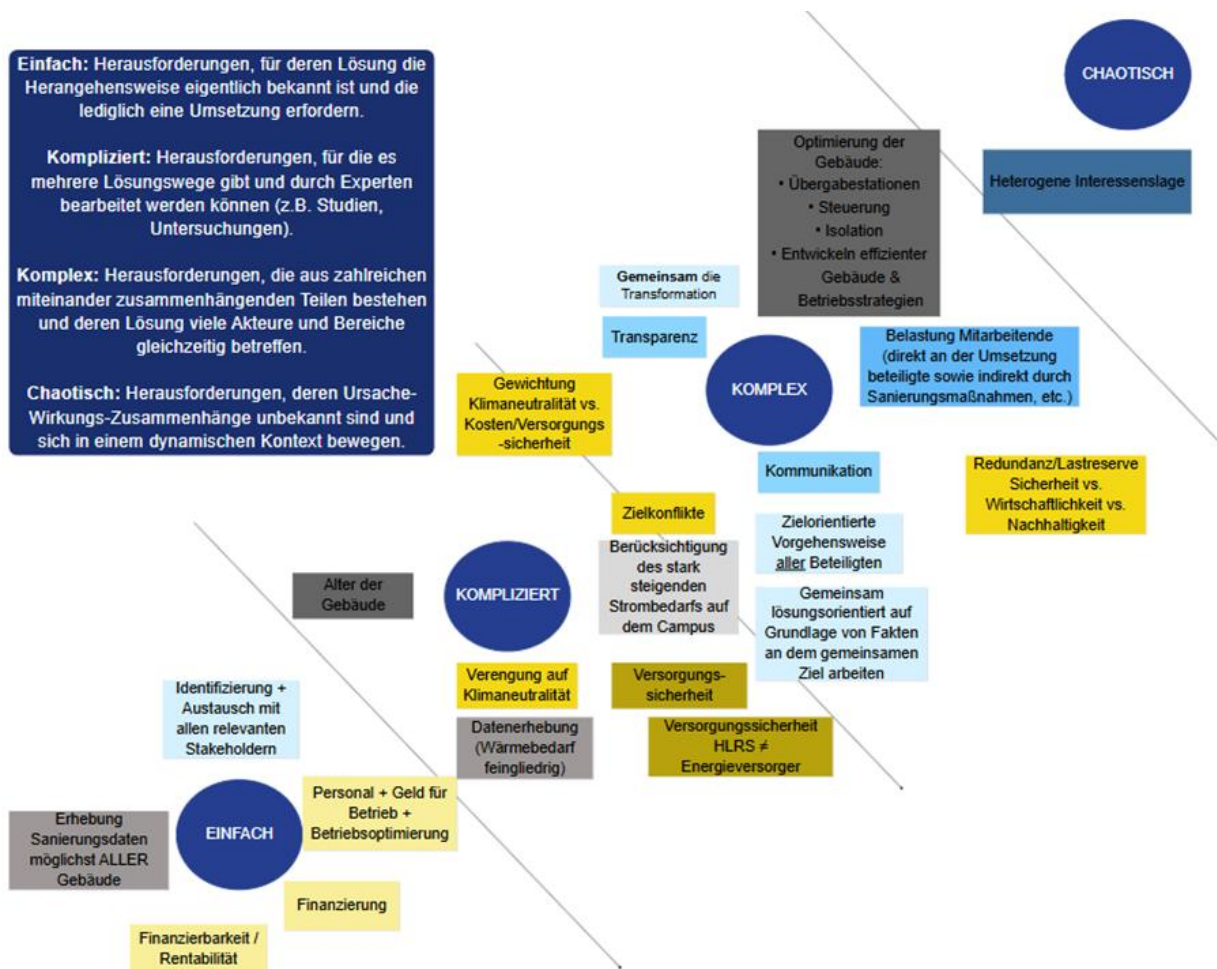


Abbildung 5-7: Von den Stakeholdern in einer Stacey-Matrix zusammengetragene Herausforderungen der Energiewende am Campus Vaihingen (farbliche Clusterung im Nachgang durch DiTEnS).

Das UBA betonte bei der Diskussion, dass die Dienstanweisung für den Landesbetrieb regule, wie das UBA mit der Universität zusammenarbeite. Demzufolge müsse ein Projekt beim UBA nach gewissen Verwaltungsregeln beantragt werden, wenn es baulich umgesetzt werden solle. Solange nichts beantragt werde, passiere auch nichts und gehe die Energiewende am Campus auf der baulichen Ebene somit auch nicht voran. Die in Planung befindliche Abwärmезentrale beim HLRS entspringe wiederum einer politischen bzw. gesetzlichen Vorgabe der Abwärmenutzung von Rechenzentren, wodurch keine Beantragung durch die Universität selbst erforderlich gewesen sei. Ohne klaren Auftrag könne das UBA keine Planung und Umsetzung von Maßnahmen vornehmen.

Als weitere Herausforderungen berichteten verschiedene Stakeholder davon, Abwägungen zwischen Investitionen in das Tagesgeschäft, insbesondere in die Instandhaltung, und Investitionen in die Klimaneutralität vornehmen zu müssen und erstere im Tagesgeschäft mit begrenzten Ressourcen dann oft Vorrang hätten. Zudem mangle es an Finanzierung und Personal, um Nachhaltigkeitsprojekte umzusetzen. Dazu kämen häufige Stellenwechsel und befristete Anstellungsverhältnisse, die zu einem Wissensverlust ("brain drain") führen und die Kontinuität von Projekten beeinträchtigen würden. Zuletzt wurde in der Diskussion von Seite des HKW bemängelt, dass in bisherigen wissen-

schaftlichen Studien wie dem E-CampUS Bericht praktische, planerische Aspekte, wie Instandhaltungszyklen von Anlagen, nicht oder unzureichend berücksichtigt wurden. Eine praktisch funktionierende Strategie zu entwickeln sei wichtiger als eine schnelle Zielerreichung.

Die im Workshop genannten und diskutierten Herausforderungen decken sich größtenteils mit den im Vorfeld per Stakeholder-Interviews identifizierten Hemmnissen und Konflikten (vgl. Tabelle 3-2). Durch die gemeinsame Diskussion konnte jedoch auch unter den Teilnehmenden ein gemeinsames Verständnis für Herausforderungen und Perspektiven anderer Stakeholder erarbeitet werden. Zudem stellt die Bewertung der Herausforderungen in die Kategorien „einfach“, „kompliziert“, „komplex“ und „chaotisch“ im Vergleich zur vorausgehenden Stakeholder-Analyse ein Informationsgewinn dar. Die Diskussion zeigte nochmals deutlich den Bedarf für einen Dialog, u. a. unter Einbindung praktischer Perspektiven, der mandatiert einen Transformationspfad erarbeitet und bestehende Hemmnisse und Herausforderungen angeht. Neben der Erarbeitung eines gemeinsamen Systemwissens zur Energiewende am Campus Vaihingen kann die Verdeutlichung dieses Bedarfs als Ergebnis des ersten Workshops gesehen werden, welche eine motivationale Grundlage für den weiteren Dialogprozess darstellte.

5.4.2 Implikationen für den DiTEnS-Dialogprozess

In der Vorbereitung und Testung des ersten Workshops wurde dem Projektteam bereits bewusst, dass eine Vorstellung und Diskussion der Bestands- und Potenzialanalyse innerhalb des dreistündigen Workshop-Rahmens und in Anbetracht der unterschiedlichen Wissensstände der teilnehmenden Personen eine Herausforderung darstellen würde. Dies bestätigte sich in der praktischen Umsetzung. In der Nachbefragung zum Workshop war der zu dichte und technische Input und der fehlende Raum für genügend Austausch zentraler Kritikpunkt. Das Ziel einer gemeinsamen Erarbeitung von Systemwissen kann in künftigen Case Studies besser erreicht werden, wenn die Wissensvermittlung bedarfsorientierter gestaltet und der Wissenseinholung und dem interaktiven Austausch mehr Raum eingeräumt wird. Für die weiteren Workshops des Dialogprozesses am Campus Vaihingen wurde dieses Feedback bereits beachtet und die folgenden Workshops interaktiver, technisch reduziert und weniger gedrängt gestaltet.

Das oben dargelegte Stakeholder-Feedback im Workshop zur präsentierten Bestands- und Potenzialanalyse verweist auf gewisse Aspekte der Analyse, in die die Stakeholder früher einbezogen werden sollten. Dies betrifft einerseits die Festlegung der Bilanzgrenze sowie andererseits die Erhebung von Abwärme- und Flächenpotenzialen im Gebiet. Eine frühere Einbindung der Stakeholder in diese Bereiche ermöglicht in künftigen Case Studies eine präzisere Bestands- und Potenzialanalyse, mit der bereits in den ersten Workshop gestartet werden kann.

In der Nachbefragung zum Workshop wurde auch die wahrgenommene Nützlichkeit der im Workshop genutzten VR-Visualisierungen des digitalen Zwillings in der CAVE abgefragt. Eine Mehrheit stimmte der Aussage zu, dass Visualisierungen in der CAVE eine Teilnahme an einem Beteiligungsverfahren attraktiver machen (zwei Personen stimmten voll und ganz, vier eher zu, zwei waren neutral und eine Person stimmte dem nicht zu (N = 13, n = 9)). Eine einfache 2D-Visualisierung (z. B. Karten, Grafiken und Informationen auf Vortragsfolien) von Planungsvorhaben fand eine Mehrheit aber eher sinnvoll als die genutzte immersive 3D-Visualisierung in der CAVE (fünf Personen stimmten eher zu, drei waren neutral und eine Person stimmte der Aussage eher nicht zu).

Die eine Person, die die CAVE tendenziell bevorzugte, begründete dies qualitativ damit, dass die 3D-Visualisierung die Thematik in Verbindung mit der gebauten Realität greifbarer mache. Die indif-

ferenten Personen sahen in der CAVE eine Abwechslungsmöglichkeit zu klassischen Präsentationsfolien und 2D-Karten und den Vorteil, dreidimensionale Platzverhältnisse schnell einschätzen zu können. Dieser Anwendungsfall kam im Workshop spontan mit der Frage auf, ob in einem Versorgungskanal noch genügend Platz wäre für weitere Stromleitungen. Mit einem Blick in das 3D-Modell des lasergescannten Versorgungsschachts des digitalen Zwillinges konnte diese Frage in der CAVE beantwortet werden.

Gegenüber diesen Vorteilen sehen die indifferenten Personen jedoch die Gewöhnungsdauer an die Situation in der CAVE sowie eine mögliche „Cyber Sickness“ als Nachteil oder fanden die Informationen auf 2D-Karten und Folien insgesamt doch zweckmäßiger. Dadurch fällt ihnen eine Aussage über die allgemeine Nützlichkeit der CAVE schwer und sie sehen diese anwendungsfallspezifisch.

Die Personen, welche 2D-Visualisierungen der CAVE eher vorziehen, sehen bei der CAVE den Nachteil einer eingeschränkten Anzahl an nutzenden Personen, die durch das ausgebildete Personal geführt wird anstatt einer individuell freien und interaktiven Nutzung. Zudem stehe man sich in der CAVE tendenziell im Weg und sehe nicht alle relevanten Aspekte der Visualisierung. Eine Person begründete ihre Einschätzung damit, dass im Workshop in der CAVE *„nur ‚einfache‘ Übersichtspläne der Versorgungsleitungen gezeigt wurden und keine komplizierten Strukturen, die in der 3D Darstellung auseinandergenommen wurden“*. Eine andere Person hätte *„eine Visualisierung der Versorgungsnetze mit z. B. Anzeige der Auswirkung von Parametern (Netzlast etc.) in Echtzeit“* hilfreicher gefunden, *„auch in 2D“*.

In künftigen Case Studies sollte somit ein klareres Zielbild für die Visualisierungen in der CAVE entwickelt werden. Der erste Workshop zeigte, dass die CAVE die relevante Energieinfrastruktur innerhalb des Gebiets für die Teilnehmenden greifbar machen und damit auch Unsichtbares sichtbar machen konnte sowie die anvisierten Informationen vermitteln konnte. Jedoch fehlen aktuell noch konkrete Anwendungsfälle, in denen spezifisch die immersive Qualität der CAVE gegenüber anderen 2D- und 3D-Visualisierungen für konkrete Planungsfragen tatsächlich einen Mehrwert bietet und den ressourcenintensiven Einsatz der CAVE rechtfertigt.

6. Zielwissen

6.1 Interaktive Szenarioentwicklung

6.1.1 Herleitung der untersuchten Szenarien

Zur Bewertung möglicher Entwicklungspfade des Energiesystems am Campus Vaihingen wurden drei Szenarien definiert, die sich hinsichtlich des angestrebten Zieljahres der Klimaneutralität (KN) unterscheiden: KN 2030, KN 2035 und KN 2040. Somit erfolgt die Bezeichnung der Szenarien auf Basis des Parameters „Zieljahr Klimaneutralität“. Die Szenarien bilden unterschiedliche Transformationsgeschwindigkeiten ab und ermöglichen eine Abschätzung ökologischer, ökonomischer und technischer Auswirkungen verschiedener Umsetzungszeiträume. Die Szenarien unterscheiden sich weiterhin in den anderen in Tabelle 6-1 dargestellten Parametern, wobei gewisse Parametereinstellungen auch auf mehrere Szenarien zutreffen.

6.1.2 Parameter und Parameterauswahl

Szenarien können durch die Variation zentraler Parameter gesteuert werden. Da jedes Analyseinstrument auf Eingangsdaten angewiesen ist, wurden für den Stakeholder-Prozess eine handhabbare Anzahl relevanter Parameter definiert, die in den Analysen variiert werden können. Grundlage bildeten zentrale Einflussfaktoren auf das Energiesystem des Campus Vaihingen. Dazu zählen ökonomische und gesetzliche Rahmenbedingungen wie Energie- und CO₂-Preise, Zinssätze sowie Klimaneutralitätsziele und Erneuerbare-Energien-Quoten.

Ebenso wurden geografische Aspekte berücksichtigt, insbesondere die Flächenverfügbarkeit und -charakteristik von Energieerzeugern und Leitungsinfrastruktur. Weitere Parameter betreffen die Transformationsgeschwindigkeit, etwa Sanierungsaktivitäten, PV-Ausbau und technologische Ver-

Tabelle 6-1: Übersicht der Parameter mit diskreten qualitativen Ausprägungen.

Parameter	Ausprägung		
Zieljahr Klimaneutralität	2030	2035	2040
Preisfad für Energieträger und CO ₂ -Zertifikate	konstant	moderat ansteigend	stark ansteigend
Flächenpotenziale	niedrig	mittel	hoch
PV-Ausbaugeschwindigkeit	niedrig	mittel	hoch
Sanierungsaktivität	gemäß optimierendem Energiesystemmodell		
Verfügbares Abwärmepotenzial	konstant	abnehmend	zunehmend
Ladesäulenausbau Elektromobilität	niedrig	mittel	hoch
	dezentral	zentral (Standort X)	
Art der Betriebsführung	regelbasiert	Optimiert	
	Standard	Betriebskosten	Autarkie
Lastmanagement	starr	flexibel/intelligent	

fügbare wie Abwärmenutzung oder Wasserstoffintegration. Schließlich wurden auch Betriebsführungsstrategien und Flexibilitätsoptionen energietechnischer Anlagen untersucht. Die Auswahl erfolgte zunächst durch das DiTEs-Team, während die konkrete Ausprägung der Parameter im Dialogprozess gemeinsam mit den Beteiligten erarbeitet wurde. Die ausgewählten Parameter samt deren Ausprägungen sind in Tabelle 6-1 dargestellt.

Die strukturierte Auswahl und gemeinsame Konkretisierung dieser Parameter bildete ein transparentes Fundament für die szenariobasierte Analyse des Campus-Energiesystems und schuf die Grundlage für den faktenbasierten Austausch zwischen Wissenschaft, Verwaltung und Praxis. Als Ausprägungsformen für das Zieljahr Klimaneutralität wurden die Zieljahre der Landesliegenschaften (2030), der Stadt Stuttgart (2035) und des Landes Baden-Württemberg (2040) definiert. Auf einen sinkenden Preispfad für Energieträger und CO₂-Zertifikate wurde aufgrund der geringen Wahrscheinlichkeit als Ausprägungsform verzichtet, dafür aber zweierlei unterschiedlich stark steigende Preispfade gewählt. Für Flächenpotenziale, PV-Ausbaugeschwindigkeit und Ladesäulenausbau Elektromobilität wurde jeweils zwischen niedrig, mittel und hoch unterschieden. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Szenarienauswahl nicht dazu geeignet ist, Aussagen über die Vorteilhaftigkeit eines Zieljahres für die Klimaneutralität zu treffen, da mit den unterschiedlichen Zieljahren gleichzeitig nicht notwendigerweise verbundene Unterschiede in den Annahmen der externen Preise verbunden sind. Dies war auch nicht das Ziel der Analyse.

Der Ladesäulenausbau Elektromobilität hat dabei eine zweidimensionale Ausprägungsform mit Ergänzung der Unterscheidung zwischen zentralem und dezentralem Standort. Das verfügbare Abwärmepotenzial hängt von der Entwicklung der Höchstleistungsrechner ab, deren Rechenkapazität in Zukunft konstant bleiben, abnehmen oder zunehmen kann.

Die Art der Betriebsführung kann regelbasiert oder optimiert sein, wobei im zweiten Fall eine Kriterien-basierte Optimierung (z. B. nach Betriebskosten, Autarkie) möglich ist. Das Lastmanagement kann starr oder flexibel/intelligent sein. Nicht variiert wurde die Sanierungsaktivität, da diese im Energiesystemmodell optimiert werden kann. Als Ergebnis des Dialog-Workshops ergab sich folgende Stakeholder-Einschätzung, die in Abbildung 6-1 dargestellt ist.

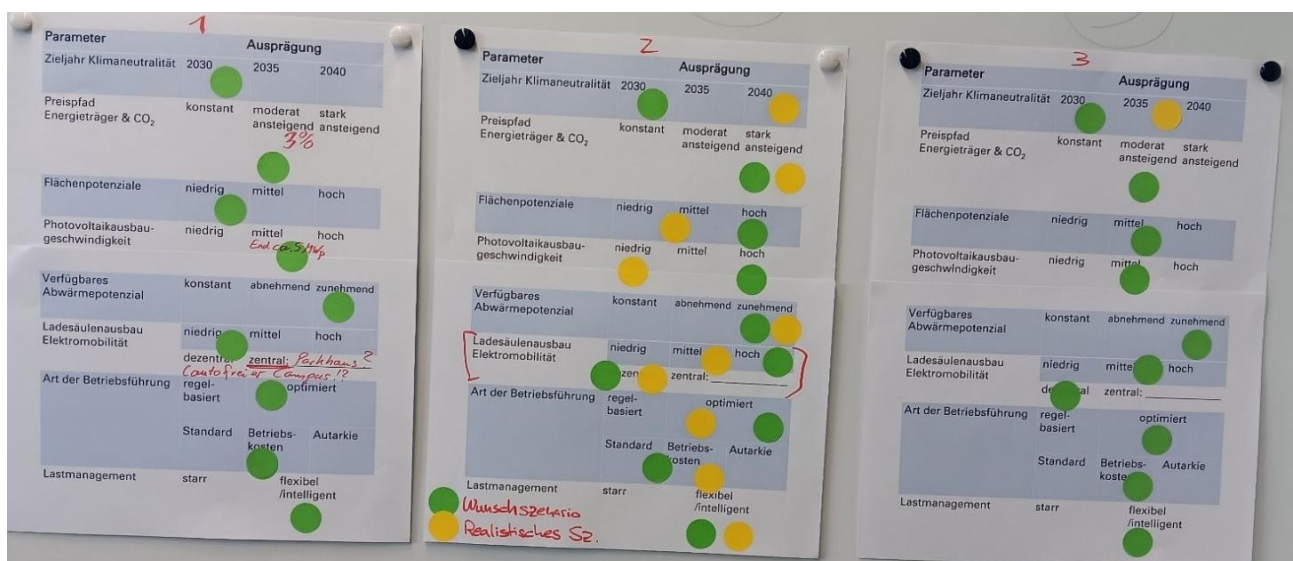


Abbildung 6-1: Einschätzung der Szenario-Parameter und deren qualitativer Ausprägungen durch die Stakeholder in Workshop 2.

6.1.3 Zentrale Rahmenannahmen und zukünftige Bedarfsentwicklung

Die Transformation des Energiesystems Campus Vaihingen in der Zukunft wird beeinflusst vom zukünftigen Bedarf an Nachfrage nach Energiedienstleistungen. Hierzu wird zwischen Strom und Wärme unterschieden und weiterhin differenziert zwischen Stromanwendungen in Gebäuden und dem Strombedarf des HLRS sowie Raumwärme, Trinkwarmwasser (Bestand und Neubauten).

Bei der Raumwärme wird auch die vermiedene Wärmezufuhr durch Sanierung berücksichtigt (vgl. Tabelle 6-1), die in ihrem Ausmaß vom Energiesystemmodell optimiert wird. In Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3 werden die erwartete Entwicklung der Strom- und Wärmenachfrage gezeigt. Biomasse und entsprechende Technologien zur Strom- und Wärmebereitstellung wurden vom Lösungsraum ausgeschlossen, um der Prämisse der Universität Stuttgart, möglichst auf Biomasse zu verzichten, gerecht zu werden.

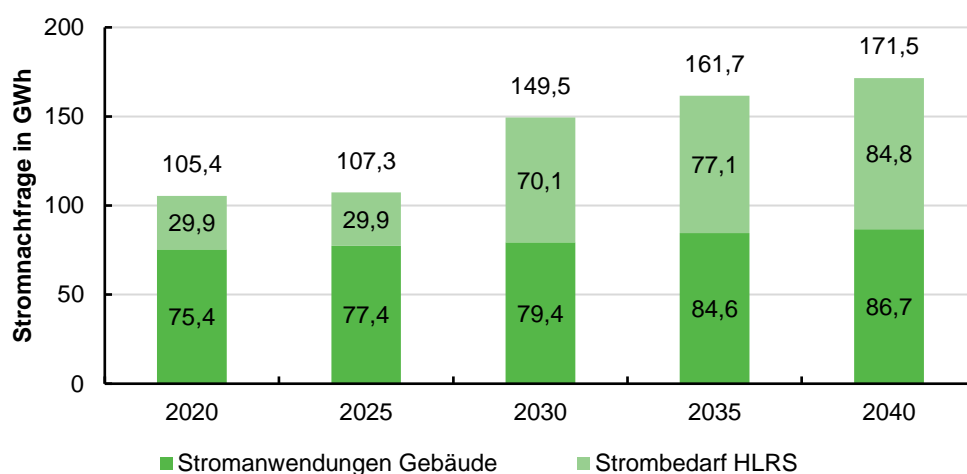


Abbildung 6-2: Stromnachfrage im Basisjahr und die erwartete Entwicklung bis 2040.

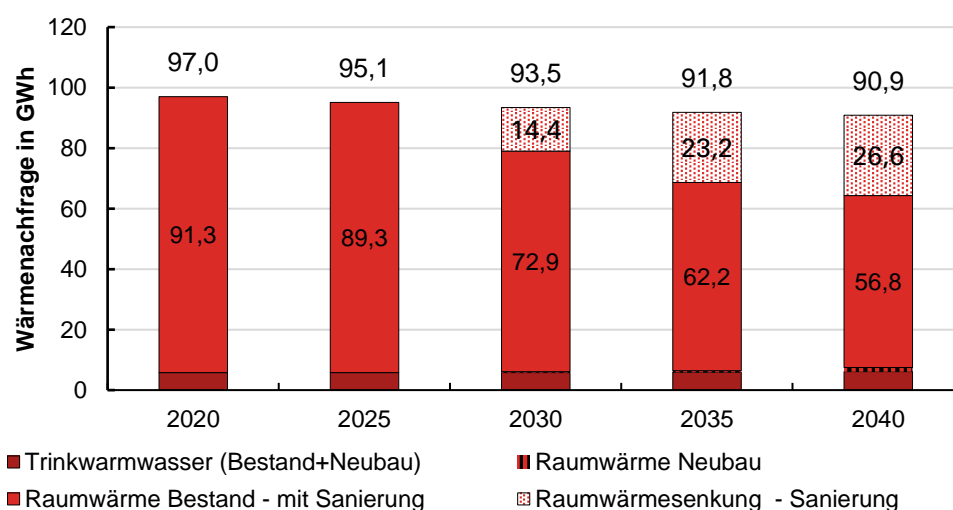


Abbildung 6-3: Wärmenachfrage im Basisjahr und die erwartete Entwicklung bis 2040.

6.2 Energieversorgungsvarianten als Ergebnisse der Szenarioberechnungen

6.2.1 Energiebereitstellung

Die Szenarioergebnisse für die Energieversorgung des Campus Vaihingen für die ausgewählten Szenarien KN 2030, KN 2035, KN 2040 unterteilen sich in die Strombereitstellung (Erzeugung im Bilanzraum, Bezug durch Stromnetz), die Wärmebereitstellung durch Fernwärme inklusive der zugehörigen installierten Leistungen und notwendigen Flächen für neue Wärmeerzeuger, den Primärenergieverbrauch sowie die Entwicklung der CO₂-Emissionen und die Gesamtsystemkosten. Die Ergebnisse werden im Folgenden als Balkendiagramme dargestellt. Diese enthalten eine doppelte x-Achse, auf der die Stützjahre (Hauptebene) und jeweils die Szenarien KN 2030, KN 2035, KN 2040 (Unterebene) aufgetragen sind. In der Regel werden Datenbeschriftungen eingesetzt, um relative Unterschiede zu untermauern und zu präzisieren.

Die derzeitige Strombereitstellung basiert zu etwa gleichen Teilen auf selbst erzeugtem Strom des HKW und aus dem Stromnetz bezogenem Strom, was die erste Säule in Abbildung 6-4 zeigt. Der Anteil der Stromerzeugung durch PV im Basisjahr ist sehr gering und liegt bei 0,3 GWh_{el}. Das HKW erzeugt in den Szenarien KN 2035 und KN 2040 in den Jahren 2030 bzw. 2030 und 2035 noch kleine Mengen erdgasbasierten Strom. Der PV-Anteil wächst auf geringem Niveau langsam an, wobei die PV-Ausbaugeschwindigkeit und das Potenzial der Dachflächen die limitierenden Faktoren sind. Die starke Steigerung der Strombereitstellung ab 2030 ist hauptsächlich auf den Bedarf der Großwärmepumpen (siehe folgende Grafiken) zurückzuführen.

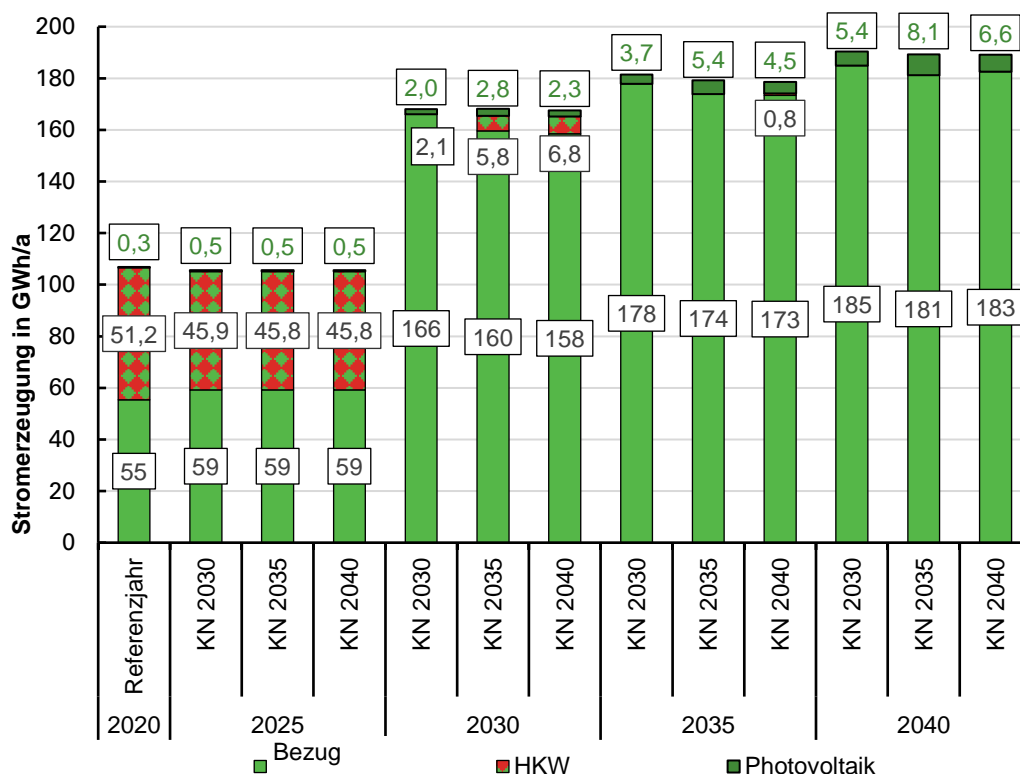


Abbildung 6-4: Strombereitstellung (Bezug, Erzeugung) am Campus Vaihingen für alle betrachteten Szenarien.

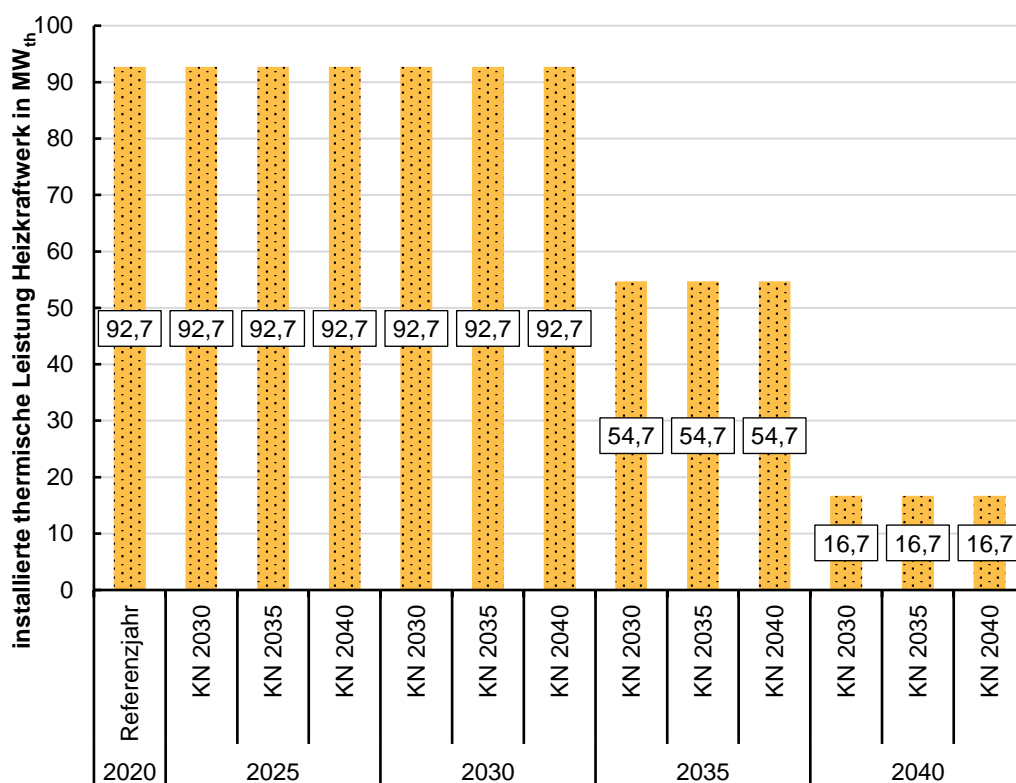


Abbildung 6-5: Angenommene Entwicklung der thermischen Leistung des Heizkraftwerks am Campus Vaihingen für alle betrachteten Szenarien.

Vor der Betrachtung der Entwicklung der Fernwärmeerzeugungsmengen und -kapazitäten, muss definiert werden, welche Perspektive das HKW als Bestandwärmeerzeuger hat. Da das Energiesystemmodell den Rückbau von Kapazitäten nicht optimieren kann, müssen Annahmen getroffen, wie lange die aktuellen Turbinen und Kessel noch zur Verfügung stehen. Dazu ist in Abbildung 6-5 die Entwicklung der thermischen Leistung des HKW dargestellt.

Aufgrund der Rolle als Übergangstechnologie wird davon ausgegangen, dass das HKW bis 2030 mit seiner heutigen thermischen Leistung zur Verfügung steht, was durchaus mit einer deutlichen Reduzierung der Betriebsstunden einher gehen kann. 2035 und 2040 wird jeweils von einer Stilllegung von 38 MW_{th} ausgegangen (Blöcke 20 und 60). Die verbleibende Leistung kann in späteren Jahren nur genutzt werden, wenn man sich noch vor dem Zieljahr der Klimaneutralität befindet. Unter Beachtung der Perspektive des HKW ergibt sich eine Veränderung der Technologien und Energieträger zur Einspeisung ins Wärmenetz, die in Abbildung 6-6 durch dargestellt ist.

Die Veränderung findet in allen Szenarien 2030 statt. In diesem Jahr ist die Inbetriebnahme der sich bereits im Bau befindlichen Großwärmepumpe zur Abwärmenutzung am HLRS abgeschlossen. Es bedarf aufgrund des perspektivischen Rückbaus eines weiteren Wärmeerzeugers, welcher in einer Geothermie-Großwärmepumpe besteht. Diese ist bislang nur Teil des Szenarioergebnisses und befindet sich nicht in konkreter Planung. Bei früher Klimaneutralität (KN 2030) ist für die Übergangszeit (Jahr 2030) der Einsatz des bestehenden HKW notwendig.

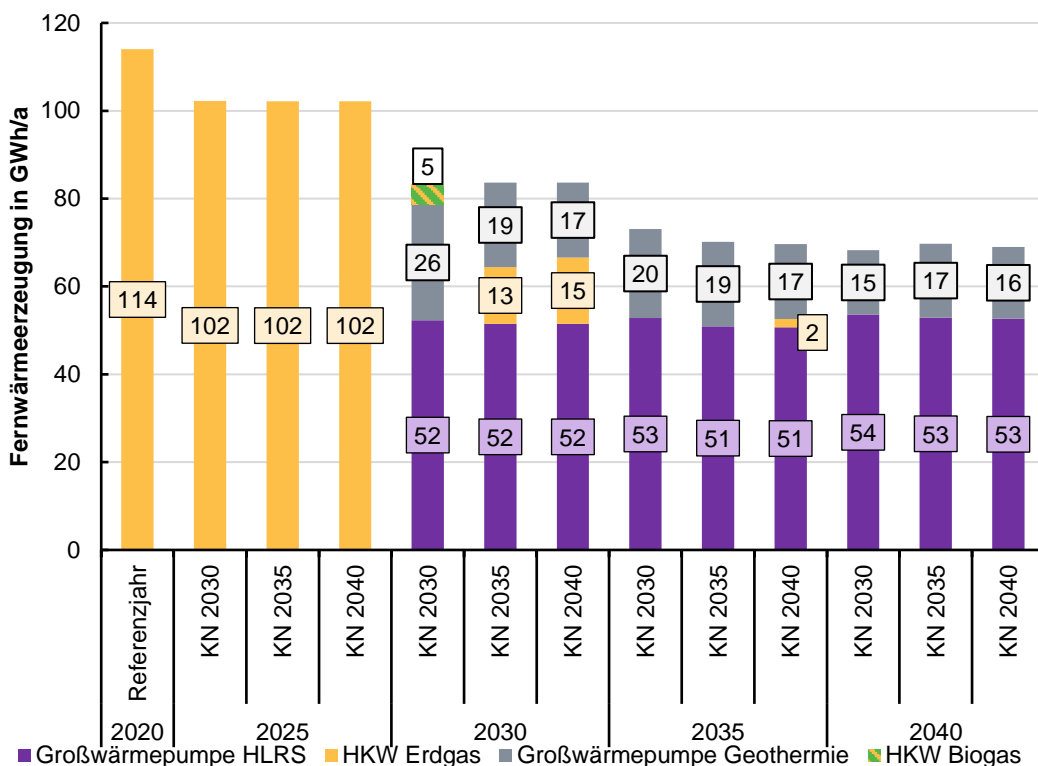


Abbildung 6-6: Fernwärmebereitstellung am Campus Vaihingen für alle betrachteten Szenarien.

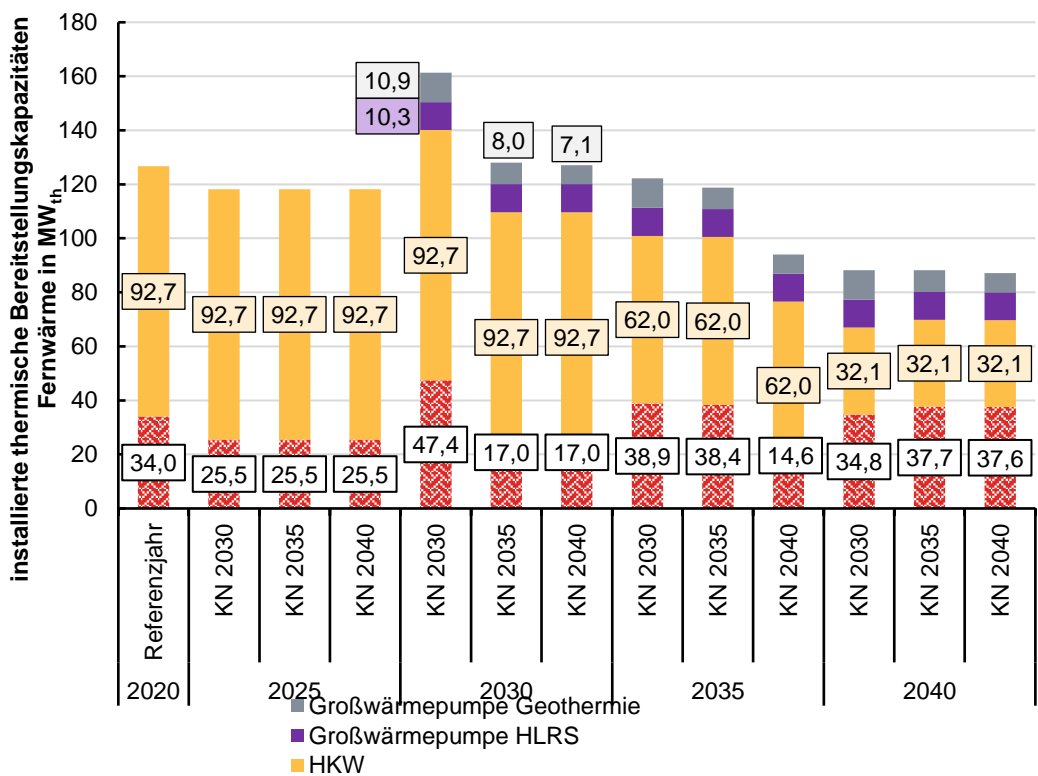


Abbildung 6-7: Thermische Kapazitäten der Wärmeerzeuger und Kurzzeitspeicher am Campus Vaihingen für alle betrachteten Szenarien.

Bei der Betrachtung der thermischen Kapazitäten, die die Fernwärme bereitstellen können, müssen auch Speichertechnologien betrachtet werden. Am HKW gibt es bereits einen aus Wassertanks bestehenden Speicher. Als Ergebnis der Energiesystemoptimierung ergibt sich der Zubau weiterer Kurzzeitspeicher, die als Wassertanks ausgeführt sein können. Die Entwicklung der thermischen Leistung des Wärmeerzeuger-Portfolios und der Kurzzeitspeicher zeigt Abbildung 6-7.

Während die thermische Leistung der Großwärmepumpe am HLRS aufgrund der fortgeschrittenen Planung eindeutig ist, ergeben sich für die thermische Leistung der Großwärmepumpe Unterschiede. Diese sind auf den Stellenwert des HKW als Übergangstechnologie und den Fortschritt der energetischen Gebäudesanierung zurückzuführen. Je später Klimaneutralität erreicht werden muss, desto länger deckt das HKW zeitweise einen Teil der notwendigen thermischen Last und desto weiter sind energetische Sanierungen fortgeschritten, die die thermische Last reduzieren.

Eine Umstellung des bestehenden HKW, ggf. mit neuen Turbinen und Kesseln, auf Biomasse oder Wasserstoff ist nicht Teil des Optimierungsergebnisses. Aufgrund der zugrundeliegenden Preisannahmen für Biogas, Pellets und Wasserstoff ist diese Variante langfristig teurer als neue Wärmeerzeuger (Großwärmepumpen). Somit spiegeln sich Biogas und Wasserstoff auch nicht bei der Primärenergie und den Bezügen wider, die in Abbildung 6-8 dargestellt sind. Der Einsatz von Erdgas korreliert hier mit dem Zieljahr der Klimaneutralität, in welchem die CO₂-Emissionen auf null sinken. Der Stellenwert von Strom nimmt durch den Zubau von Großwärmepumpen und die neue Generation eines Höchstleistungsrechners am HLRS deutlich zu. Der Flächenbedarf für neue Wärmeerzeuger liegt für Großwärmepumpen bei einigen hundert Quadratmetern. Für die Erdsonden der Geothermie sind Flächen von mehreren tausend Quadratmetern nötig, welche allerdings nicht versiegelt werden und weiterhin zur Nutzung als Grün- oder ggf. auch Verkehrsfläche zur Verfügung stehen.

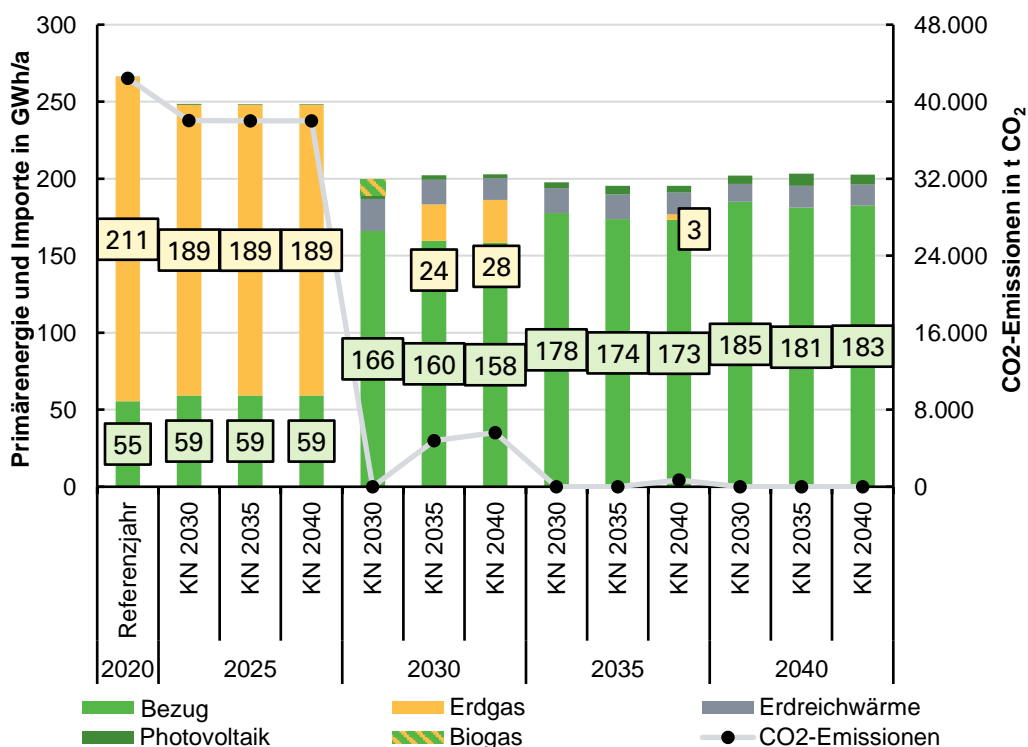


Abbildung 6-8: Primärenergie und Bezug am Campus Vaihingen für alle betrachteten Szenarien.

6.2.2 Entwicklung des Energiesystems am Campus Vaihingen

Neben energiebezogenen Größen werden im Folgenden die beiden aggregierten Größen CO₂-Emissionen und Gesamtsystemkosten betrachtet. Bei den CO₂-Emissionen eignen sich hier der kumulative Wert über den Betrachtungszeitraum 2020 bis 2040. Die Gesamtkosten werden absolut angegeben, wobei die absolute Höhe wenig aussagekräftig ist und die relativen Unterschiede entscheidend sind. Eine relative Angabe der Gesamtsystemkosten ist jedoch nicht möglich, da eine sinnvolle Referenz nicht gegeben ist.

In nachfolgender Abbildung 6-9 werden die kumulierten CO₂-Emissionen auf der rechten y-Achse aufgetragen. Auf der linken y-Achse stehen oben die Gesamtsystemkosten und unten die Höhe der undiskontierten Investitionen.

Die Verschiebung der Klimaneutralität um fünf Jahre (KN 2035) oder zehn Jahre (KN 2040) gegenüber dem offiziellen Landesziel geht in den Modellergebnissen mit zusätzlichen CO₂-Emissionen von 8 bzw. 10,5 % einher. Die höchsten Gesamtsystemkosten treten im Szenario KN 2040, welches sich von den beiden anderen auch durch eine höhere Preissteigerungsrate bei Energieträgern unterscheidet. Die Investitionen sind etwas höher, je früher Klimaneutralität erreicht wird, da die neuen Wärmeerzeuger etwas höhere thermische Leistungen aufweisen, die sie u. a. benötigen, weil die Sanierung noch nicht so weit fortgeschritten ist.

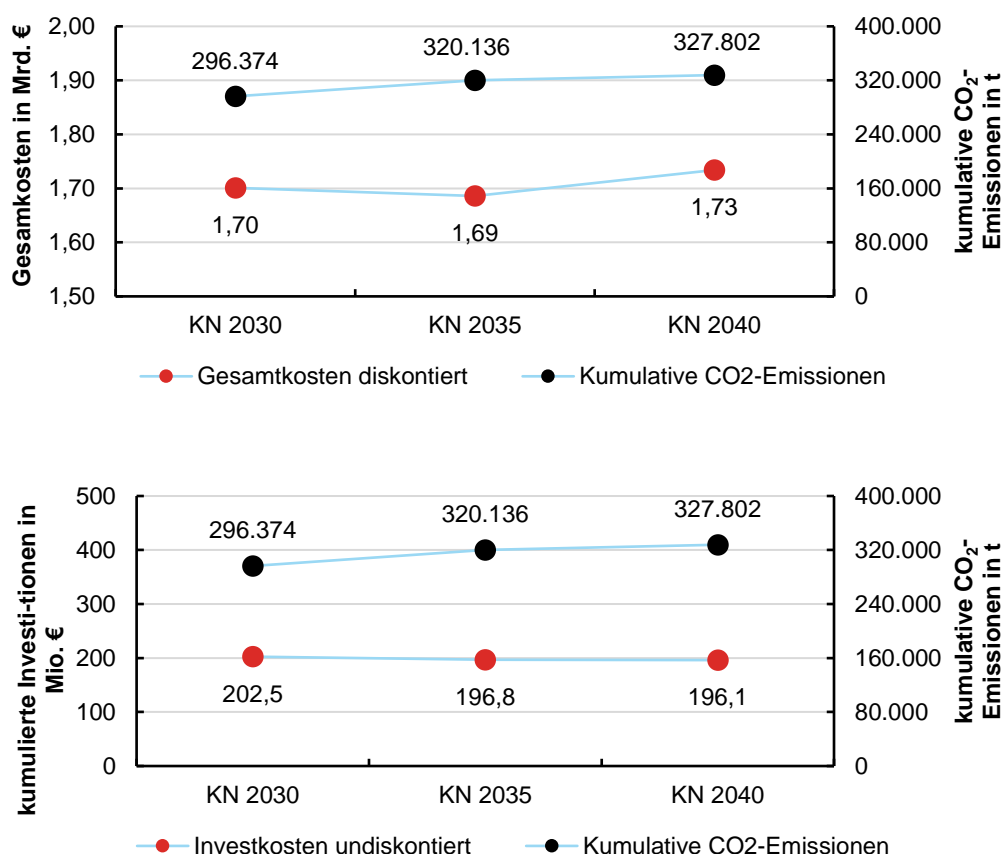


Abbildung 6-9: Kumulierte CO₂-Emissionen und Gesamtsystemkosten (oben) sowie nicht diskontierte Gesamtinvestitionen am Campus Vaihingen (unten) für alle betrachteten Szenarien.

6.3 Analyse und Simulation der Versorgungsinfrastruktur

6.3.1 Wärmeversorgungsinfrastruktur

Für die Bewertung der Integration der AWZ in das Wärmenetz am Campus Vaihingen wurde eine detaillierte Analyse der Netzcharakteristika durchgeführt. Grundlage bildet die Variante KN 2030, projiziert auf das Jahr 2035, mit einer angenommenen AWZ-Nennleistung von 5 MW_{el} ($\approx 20 \text{ MW}_{\text{th}}$) und einer Vorlauftemperatur von $85 \text{ }^\circ\text{C}$. Ergänzend wird das HKW als Spitzenlastherzeuger mit einer maximalen thermischen Leistung von 15 MW berücksichtigt, wie in Abbildung 6-10 zu sehen ist.

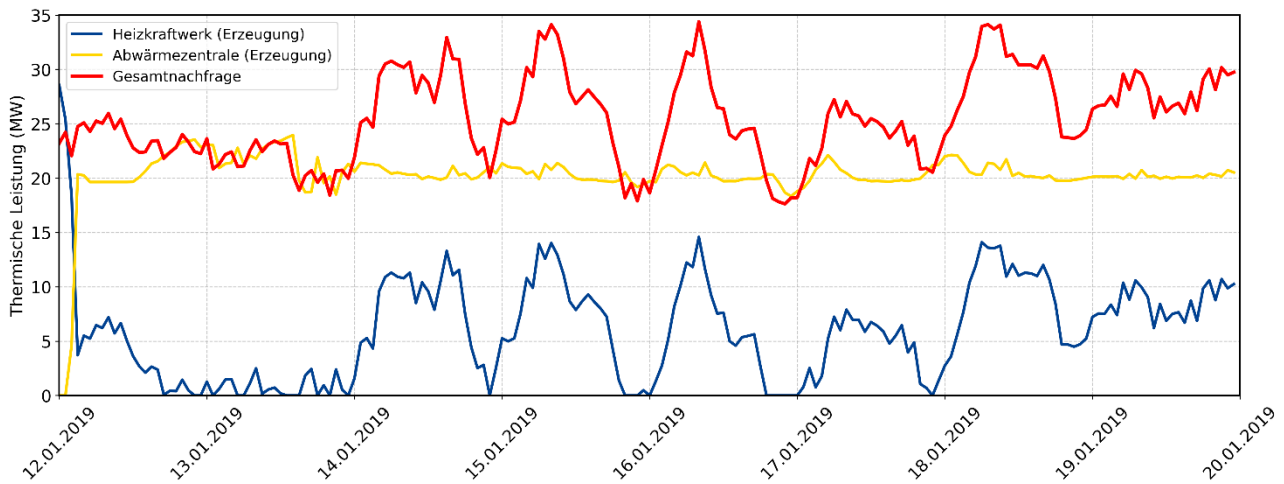


Abbildung 6-10: Darstellung des zukünftigen Betriebsverhaltens im Wärmenetz am Campus Vaihingen (Variante KN 2030, Projektionsjahr 2035) anhand des zeitlichen Verlaufs der thermischen Leistungen von der Abwärmezentrale am Höchstleistungsrechenzentrum III und Heizkraftwerk im Vergleich zur gesamten Nachfrage.

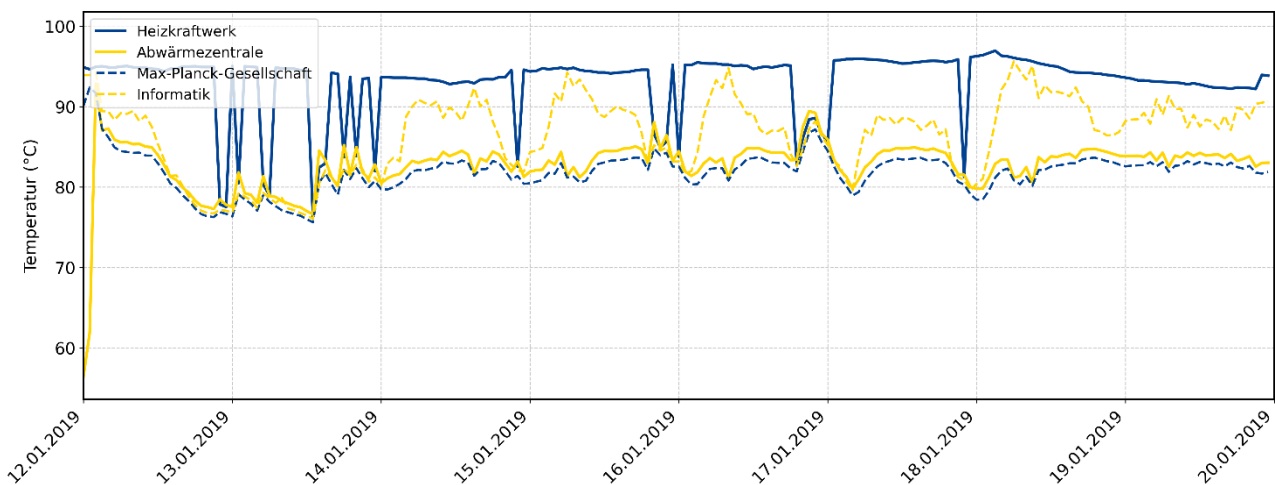


Abbildung 6-11: Verlauf der Vorlauftemperaturen an zentralen Netzpunkten bei einer zukünftigen Integration der Abwärmezentrale am Höchstleistungsrechenzentrum III.

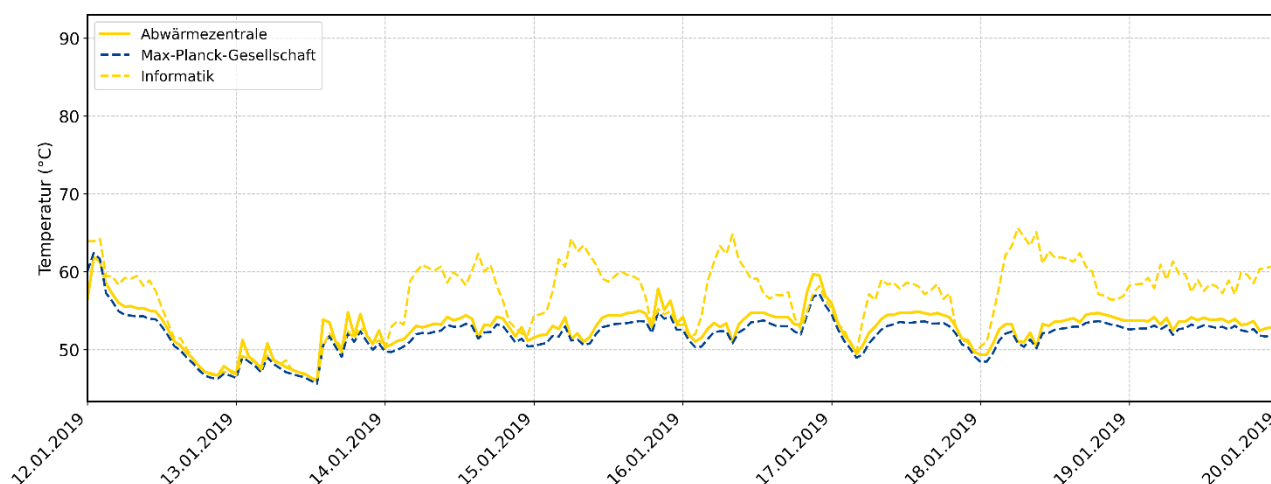


Abbildung 6-12: Darstellung der Rücklauftemperaturen bei einer Temperaturspreizung von 30 Kelvin.

Die Untersuchung fokussiert auf zentrale Netzpunkte, das HKW, das HLRS mit Ringschluss, die Gebäude der Max-Planck-Gesellschaft sowie das Informatikgebäude, und analysiert die Vorlauf- und Rücklauftemperaturen sowie die Temperaturspreizungen an den Verbrauchern. Während das HKW im zukünftigen Betrieb sowohl mit 95 °C als auch mit reduzierter Vorlauftemperatur von 85 °C einspeisen kann, liefert die AWZ konstant rund 85 °C. An den Gebäuden der Max-Planck-Gesellschaft ergeben sich Vorlauftemperaturen von unter 80 °C mit deutlich geringeren Schwankungen als im heutigen Betrieb. Im Informatikgebäude tritt eine Mischtemperatur auf, die durch die höhere Einspeisung des HKW beeinflusst wird, siehe Abbildung 6-11.

Besonderes Augenmerk liegt auf den Rücklauftemperaturen. Bei einer Temperaturspreizung von 30 K erreichen die Verbraucher Rücklauftemperaturen von unter 60 °C. Dabei handelt es sich um einen Wert, der ausreichend niedrig für den effizienten Betrieb der AWZ ist, dargestellt in Abbildung 6-12. Damit wird die Integration der AWZ technisch ermöglicht und die erforderliche Spreizung für die Großwärmepumpen sichergestellt. Im Gegensatz dazu führt eine geringere Spreizung von nur 15 K an den Verbrauchern zu Rücklauftemperaturen oberhalb des notwendigen Niveaus, wodurch die effiziente Einbindung der AWZ nicht gewährleistet werden kann.

Zusammenfassend zeigt die Analyse, dass die dauerhafte Einspeisung der AWZ die Grundlastversorgung des Campus übernehmen kann, während das HKW flexibel Spitzenlasten abdeckt. Entscheidend für den Erfolg ist jedoch die Einhaltung ausreichender Temperaturspreizungen in den Gebäuden, da diese die Rücklauftemperaturen bestimmen und damit die Effizienz der AWZ maßgeblich beeinflussen.

6.3.2 Elektrische Versorgungsinfrastruktur

Ziel der Betriebssimulation des HKW-Stromnetzes ist es, die zeitlichen Verläufe der Leitungsauslastungen zu analysieren und die zugrunde liegenden Ursachen zu identifizieren. Besonders auffällig ist dabei das Betriebsverhalten der Sonderverbraucher und insbesondere des Höhenprüfstandes. Als repräsentatives Beispiel wird die Kalenderwoche 16 des Jahres 2024 herangezogen.

Abbildung 6-13 zeigt den jeweiligen Verlauf der Leitungsauslastung von fünf Leitungen, die am stärksten belastet sind, sowie den Durchschnitt aller Leitungen im betrachteten Zeitraum. Vier der fünf Leitungen stellen Verbindungen zwischen dem HKW und dem Abspannwerk dar. Die Leitung mit der stärksten Auslastung (maximal 59,5 %) verläuft zwischen dem Naturwissenschaftlichen

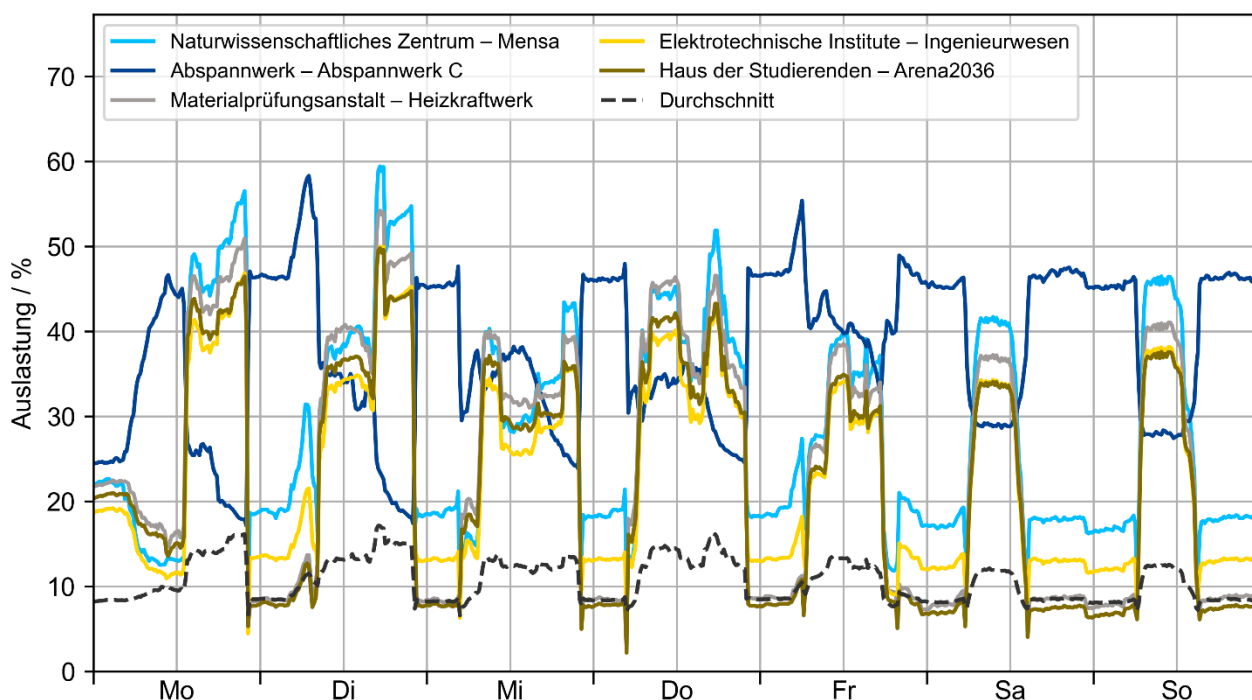


Abbildung 6-13: Verläufe der Auslastungen der fünf am stärksten belasteten Leitungen im Stromnetz des Heizkraftwerks und die durchschnittliche Leitungsauslastung aller Leitungen in der Kalenderwoche 16 des Jahres 2024.

Zentrum (NWZ) und der Mensa (MEN) und bildet ebenfalls einen Teilabschnitt einer Verbindung zwischen HKW und Abspannwerk. Die verbleibende Leitung (AW zu AW C) verbindet zwei Sammelschienen innerhalb des Abspannwerks und ist für den Energieaustausch zwischen dem Normalnetz und dem überlagerten Hochspannungsnetz relevant.

In Abbildung 6-14 sind die elektrischen Lastverläufe der vier größten Verbraucher, die Durchschnittslast, die Gesamtlast sowie die elektrische Erzeugungsleistung des HKW in derselben Kalenderwoche dargestellt. Während des Betriebs des Höhenprüfstands (ILA 1, ILA 2) stellt das HKW über mehrere Stunden Leistungen von über 10 MW bereit. Diese hohen Einspeisungen führen unmittelbar zu erhöhten Leitungsauslastungen der Verbindungen zwischen HKW und Abspannwerk. Besonders deutlich wird dieser Zusammenhang bei steilen Leistungsänderungen des HKW, die sich zeitgleich in den entsprechenden Leitungsauslastungen widerspiegeln. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Betrieb der Sonderverbraucher zu einer erhöhten Belastung des Normalnetzes führt. Dies erscheint zunächst unerwartet, da sich das HKW in unmittelbarer Nähe zum Höhenprüfstand befindet. Die Ursache liegt jedoch in der unterschiedlichen Netzzuordnung: Das HKW ist an das Normalnetz, der Höhenprüfstand hingegen an das Sondernetz angeschlossen.

Da der Höhenprüfstand vollständig über das Sondernetz versorgt wird, führt eine Regelung des HKW in Abhängigkeit vom Betrieb der Sonderverbraucher weder zu einer Entlastung des Sondernetzes noch des Normalnetzes. Auf Hochspannungsebene entsteht dadurch zwar eine geringere Gesamtlast, was aus bilanzieller Sicht wirtschaftlich vorteilhaft sein kann, eine netztechnische Entlastung bleibt jedoch aus. Würde das HKW während der Betriebszeiten des Höhenprüfstands direkt an das Sondernetz angeschlossen, könnten die Leitungsauslastungen sowohl im Normalnetz als auch im Sondernetz reduziert werden. Über die technische Realisierbarkeit eines solchen Schaltvorgangs kann im Rahmen dieses Projekts keine Aussage getroffen werden.

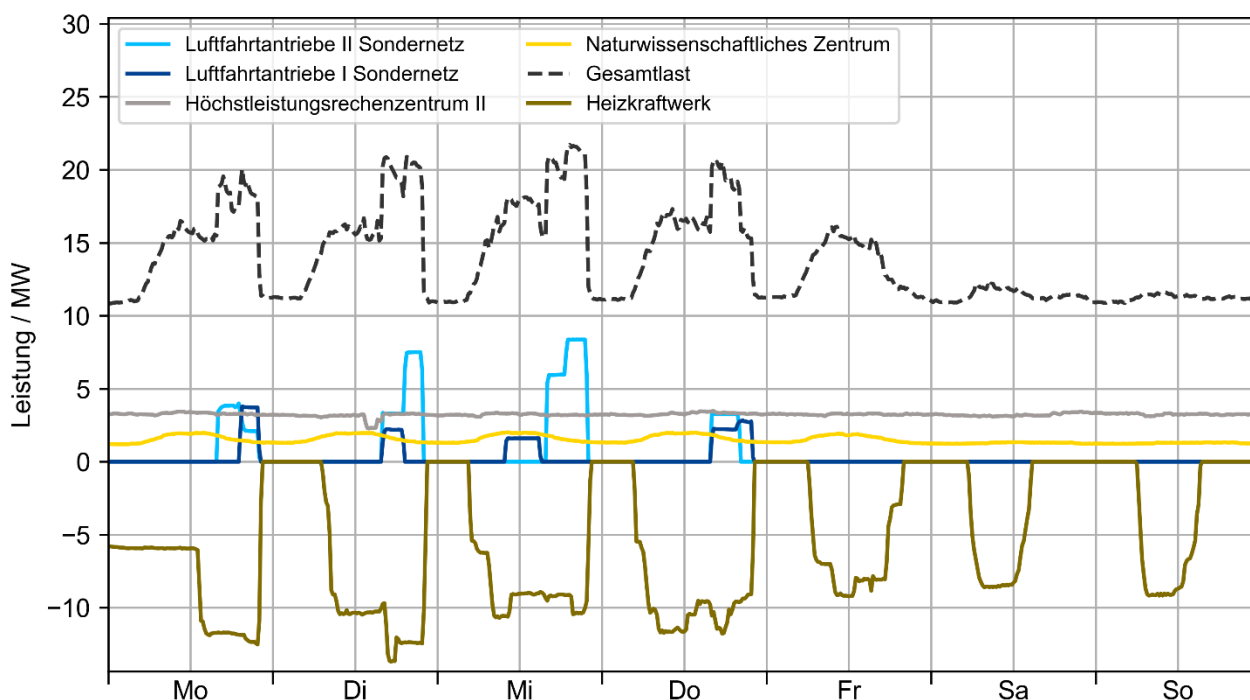


Abbildung 6-14: Elektrische Lastverläufe der vier größten Verbraucher sowie der Durchschnitts- und Gesamtlast am Campus und der elektrischen Erzeugungleistung des Heizkraftwerks in der Kalenderwoche 16 des Jahres 2024.

6.4 Betriebsoptimierung der Energiebereitstellung

Im Rahmen der Betriebsanalyse wurde der Einsatz der geplanten AWZ, des HKW sowie der thermischen Speicher aus einer Top-Down-Perspektive untersucht. Ziel war es, unterschiedliche Regelungsstrategien zu vergleichen und die Systemperformance unter variierenden Lastannahmen und AWZ-Kapazitäten zu bewerten. Zunächst wurde ein regelbasierter Betrieb betrachtet, bei dem die AWZ als Grundlasthersteller agiert und das HKW ausschließlich für Spitzenlasten eingesetzt wird. In dieser Konfiguration kommen die Speicher nur indirekt zum Einsatz, indem sie durch erhöhte HKW-Einspeisungen geladen werden.

Im nächsten Schritt wurde eine optimierte Betriebsstrategie simuliert, die eine stärkere Flexibilisierung ermöglicht. Dabei werden die Speicher gezielt eingesetzt, um Lastverschiebungen in Abhängigkeit von dynamischen Strompreisen vorzunehmen. Die AWZ wird vorzugsweise in Niedrigpreissphasen betrieben, während das HKW Spitzenlasten bis 20 MW abdeckt. Ein Variantenvergleich für das Jahr 2035 zeigt deutliche Unterschiede in den Betriebskosten und Emissionen:

- **KN 2030** (AWZ 20 MW_{th}): Referenzfall mit geringstem HKW-Einsatz und moderaten Betriebskosten (siehe Abbildung 6-15).
- **KN 2035** (AWZ 18,3 MW_{th}): Reduzierte AWZ-Kapazität führt zu einem höheren HKW-Einsatz, Spitzenlasten bis 23 MW und rund 14 % höheren Betriebskosten.
- **KN 2040** (AWZ 17,4 MW_{th}): Weitere Reduktion der AWZ-Kapazität verstärkt den HKW-Einsatz, Spitzenlasten steigen auf 25 MW, Betriebskosten liegen etwa 18 % über dem Referenzfall.

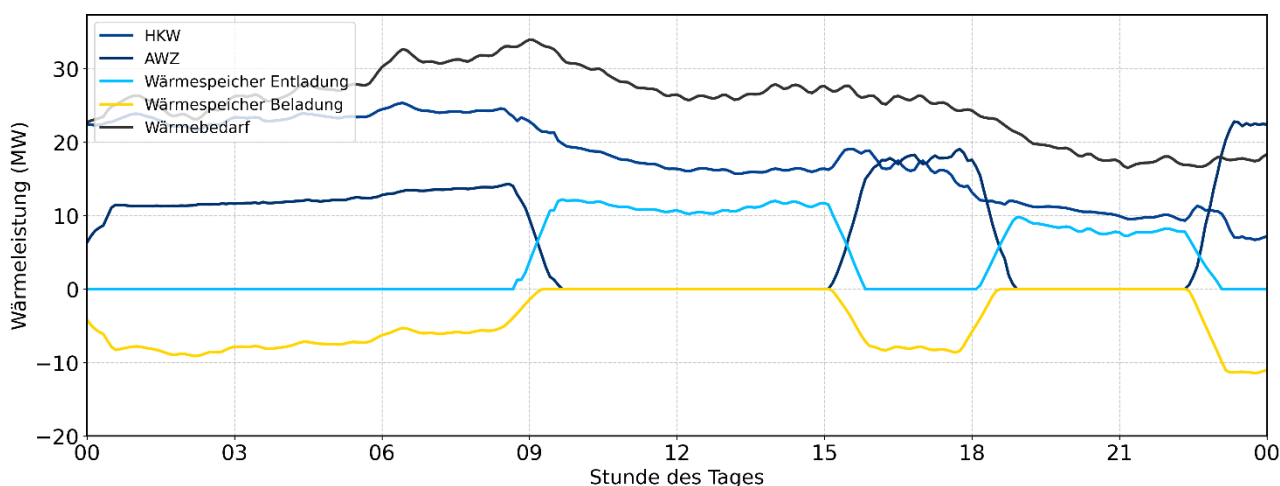


Abbildung 6-15: Darstellung des optimierten Betriebsverhaltens im Szenario KN 2030 mit thermischer Leistung von Abwärmezentrale und Heizkraftwerk im zeitlichen Verlauf sowie resultierender Wärmebedarfsdeckung.

Auch die Flexibilität des Systems verändert sich: während KN 2030 eine hohe Flexibilität (Bewertung 4 von 5) ermöglicht, sinkt diese in KN 2035 (3/5) und KN 2040 (2/5). In einer Extremsituation mit 25 % höherem Wärmebedarf (≈ 43 MW) übernimmt das HKW zusätzliche Lasten und erreicht Spitzenleistungen von ca. 26 MW. In diesem Szenario müssten perspektivisch weitere Erzeuger hinzugezogen oder zusätzliche Flexibilitätsoptionen integriert werden.

Zusammenfassend zeigt die Analyse, dass ein optimierter, speichergestützter Betrieb sowohl die Systemflexibilität erhöht als auch die Integration dynamischer Strompreise ermöglicht. Gleichzeitig wird deutlich, dass die künftige Dimensionierung der AWZ einen entscheidenden Einfluss auf Kosten, Emissionen und die Belastung des HKWs hat.

6.5 Ergebnisse und Erkenntnisse der Workshops 2 und 3

Bei der Dialogphase zum Zielwissen steht die gemeinsame Verständigung über normative Zielvorstellungen einer zukünftigen Energieversorgung im Mittelpunkt. Diese hängt einerseits von sich verändernden Rahmenbedingungen (z. B. Energiepreisen) ab, die von den beteiligten Stakeholdern nur begrenzt beeinflusst werden können. Andererseits wird die Gestaltung der Energieversorgung wesentlich durch die Einstellungen, Wertvorstellungen und Präferenzen der Stakeholder geprägt. Zur Analyse der ersten Dimension wurden Szenarien entwickelt; zur Bearbeitung der zweiten kam eine multikriterielle Entscheidungsanalyse zum Einsatz.

Die Dialogphase gliederte sich in zwei Workshops: Im ersten Workshop wurden gemeinsame Grundlagen erarbeitet, im zweiten Workshop die Ergebnisse diskutiert. Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse und Erkenntnisse aus beiden Workshops dargestellt.

6.5.1 Evaluation des Workshops zum Zielwissen I

Workshop 2 fand am 23.06.2025 am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH) statt und dauerte rund 3 Stunden. Teilgenommen haben Vertreter*innen des Universitätsbauamts Stuttgart und Hohenheim (UBA), des Heizkraftwerks Pfaffenwald, des Dezernats 6, des Green

Office, von Mitarbeitenden der Universität Stuttgart, der Studierendenvertretung (stuvus), der Wohnanlage Straußäcker sowie Vertreter*innen des Studierendenwerks Stuttgart und des studentischen Vereins „Crossing Borders Stuttgart“. Im Mittelpunkt des Workshops standen zwei Ziele:

- Festlegung zentraler Modellierungs- und Simulationsparameter. Hierzu zählen techno-ökonomische Annahmen des zukünftigen Energiesystems, etwa Energiepreise, Ausbaugeschwindigkeit der Photovoltaik oder das verfügbare Abwärmepotenzial.
- Validierung und Priorisierung ausgewählter Entscheidungskriterien zur systematischen Bewertung alternativer Energieversorgungssysteme am Campus Vaihingen.

Methodisch wurde ein Mix aus Präsentationen, Gruppen- und Einzelarbeit gewählt (vgl. Abbildung 6-16). Ergänzend fand ein Gallery Walk statt, bei dem die Teilnehmenden die Kriterien der MCDA-Analyse vertieft kennenlernen, kommentieren und erweitern konnten.

Nach einer kurzen Einführung zu Parametern energiewissenschaftliche Modelle stellte das DiTeNS-Team die vorab ausgewählten Parameter für den Bilanzraum Campus Vaihingen vor (vgl. Kapitel 6.2). Diese Vorauswahl sollte sicherstellen, dass sowohl die Anforderungen des Energiesystemmodells erfüllt werden als auch der zeitliche Rahmen des Workshops eingehalten bleibt. Anschließend erarbeiteten die Teilnehmenden in vier Kleingruppen mit jeweils 4 bis 5 Personen eigene Szenarien.

Ausgangspunkt war die Leitfrage: „*Welche Parametereinstellungen für die Modellierung des zukünftigen Energiesystems sind besonders interessant?*“. Jede Gruppe entwickelte mindestens ein Szenario (eine Gruppe zwei). Das Vorgehen wurde insgesamt positiv bewertet: In der Nachbefragung (N = 11, Rücklauf n = 6) hielten alle Befragten die Kleingruppenarbeit für ein sinnvolles Format. Besonders geschätzt wurde die Möglichkeit, sich aktiv einzubringen und eine konsensfähige Option bzw. einen Transformationspfad zu entwickeln. Einzelne Teilnehmende gaben jedoch an, Schwierigkeiten gehabt zu haben, die Bedeutung einzelner Parameterausprägungen einzuschätzen, was die Auswahl erschwerte. Insgesamt zeigte sich dennoch eine hohe Zufriedenheit mit den erarbeiteten Szenarien.

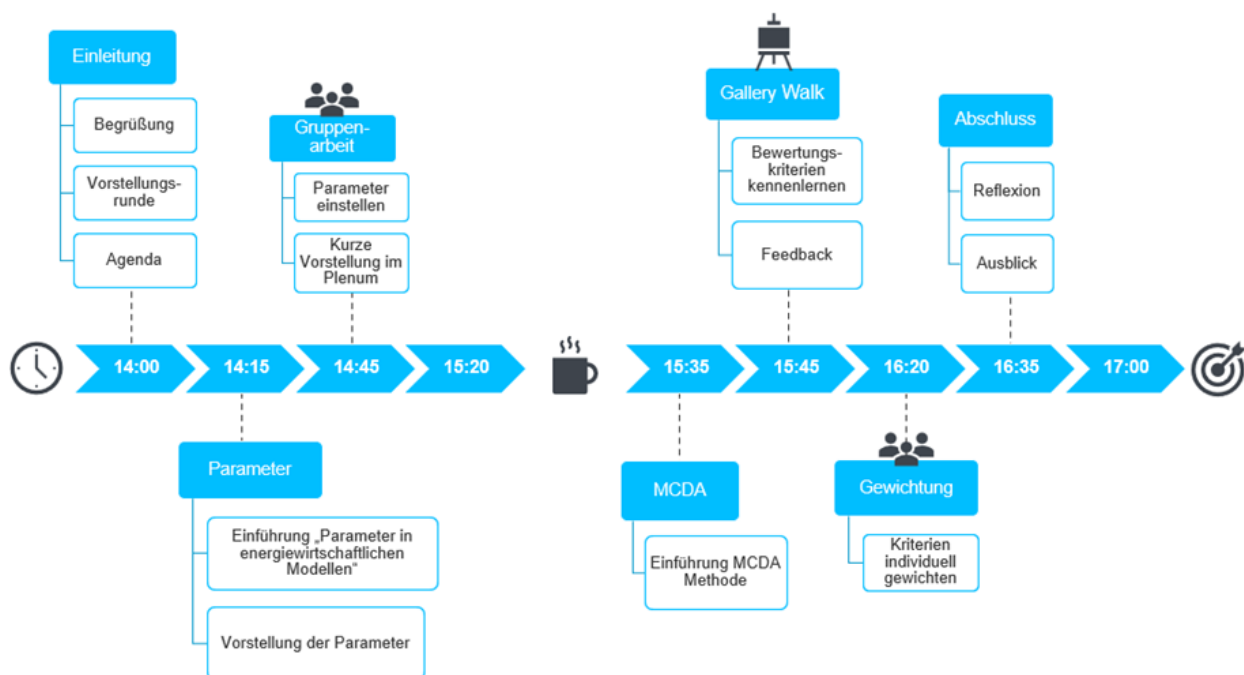


Abbildung 6-16: Ablaufplan des Workshop 2 – Zielwissen I.

Die multikriterielle Entscheidungsanalyse diente dazu, bei einer Vielzahl möglicher Energieversorgungsvarianten die Entscheidungsfindung transparent und nachvollziehbar zu gestalten. Dazu hatte jeder Teilnehmende die Möglichkeit, sieben vorab ausgewählte Kriterien zu priorisieren und zu gewichten. Grundlage der Auswahl bildeten Literaturrecherchen und ein vorheriger Workshop mit Stakeholdern aus der Praxis. Anstelle einer Folienpräsentation wurden die Kriterien auf Postern an Stellwänden präsentiert. Während eines etwa 20-minütigen Rundgangs konnten die Teilnehmenden die Definitionen diskutieren, Rückfragen an das DiTeNS-Team stellen und Ergänzungen vorschlagen. Das Format des Gallery Walk wurde überwiegend positiv aufgenommen, jedoch zeigte sich, dass aufgrund der begrenzten Zeit nicht alle Teilnehmenden jede Station besuchten oder sich mit allen Kriterien vertieft auseinandersetzen konnten. Die anschließende Einzelgewichtung der Kriterien per Bewertungsbogen erwies sich für einige Teilnehmenden als herausfordernd. Teilweise wurden Kriterien (z. B. Flächenverbrauch) unterschiedlich gewichtet - nicht aufgrund unterschiedlicher Prioritäten, sondern weil die Anweisungen oder Definitionen nicht immer eindeutig verstanden wurden.

Die im Workshop 2 in Kleingruppen entwickelten vier Szenarien, bestehend aus verschiedenen Kombinationen von Parametern und Ausprägungen, deckten eine Bandbreite möglicher Zukünfte ab, von realistisch bis wünschenswert. Nach den Modellläufen zeigte sich allerdings, dass die Unterschiede in den Ergebnissen relativ gering ausfielen. Dies legt nahe, dass die Szenarien möglicherweise zu ähnlich gestaltet waren und künftig auch extremere Varianten (z. B. Worst-Case-Szenarien) berücksichtigt werden sollten.

Grundsätzlich hat sich die Arbeit mit Szenarien bewährt, um mit Unsicherheiten über politische, ökonomische und soziale Entwicklungen umzugehen. Diese Entwicklungen sind naturgemäß nicht vorhersehbar, insbesondere je weiter der Zeithorizont reicht. In DiTeNS bildeten diese Szenarien die Eingangsgrößen für die Energiesystemmodellierung.

Hinsichtlich der multikriteriellen Entscheidungsanalyse zeigte sich, dass Kriterien, die nicht gemeinsam mit den Stakeholdern erarbeitet, sondern im kleinen Kreis der Expert*innen vorab festgelegt werden, weniger Akzeptanz finden und einen erhöhten Diskussionsbedarf erzeugen. Dies spiegelte sich auch in der Nachbefragung wider: die Einschätzungen, inwieweit die gewichteten Kriterien die Ziele und Interessen der Stakeholder in Bezug auf ein zukünftiges Energieversorgungssystem am Campus Vaihingen abbilden, fielen unterschiedlich aus.

6.5.2 Evaluation des Workshops zum Zielwissen II

Workshop 3 zu Zielwissen fand am 14.07.2025, rund drei Wochen nach Workshop 2, am Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS) statt und dauerte etwa 3 Stunden. Teilgenommen haben Vertreter*innen des Universitätsbauamts Stuttgart und Hohenheim (UBA), des Heizkraftwerks Pfaffenwald, des Dezernats 6, der Mitarbeitenden der Universität, der Studierenden der Universität (stuvus) sowie Vertreter*innen des Studierendenwerks Stuttgart und des studentischen Vereins „Crossing Borders Stuttgart“.

Ziel des Workshops war es, die auf Basis der im vorangegangenen Workshop entwickelten Stakeholder-Szenarien modellierten Energieversorgungsvarianten vorzustellen und zu diskutieren. Dabei standen insbesondere der Vergleich dieser Varianten anhand der zuvor definierten Kriterien, die Diskussion derselben sowie die Einschätzung hinsichtlich Realisierbarkeit und Ästhetik im Mittelpunkt (siehe Abbildung 6-17).

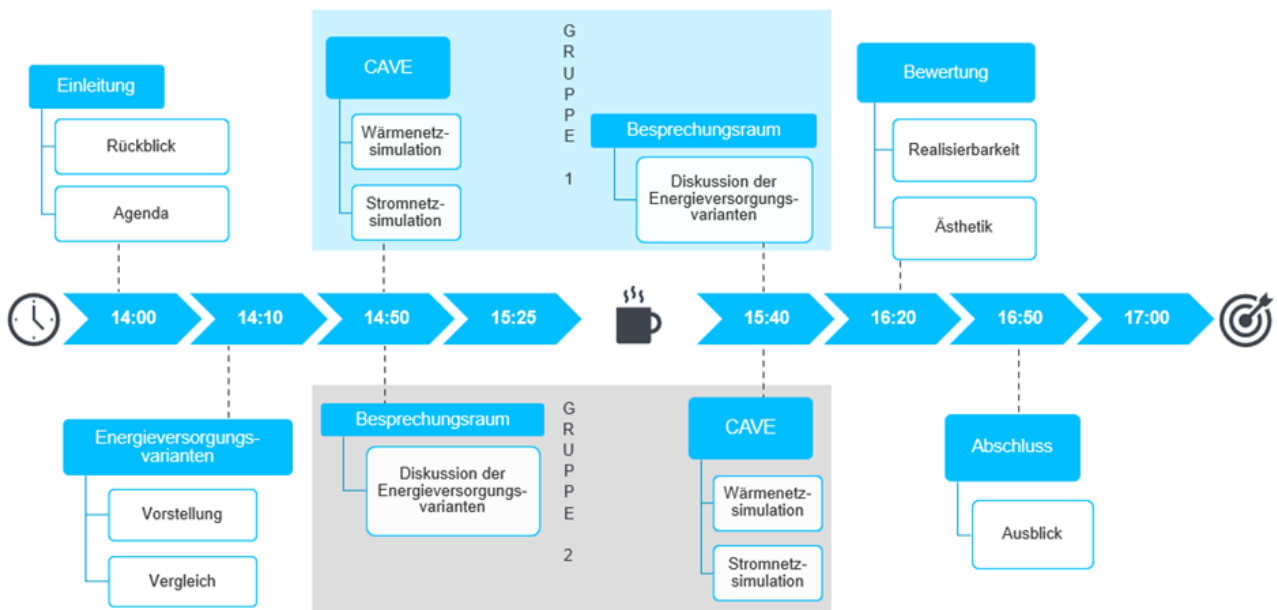


Abbildung 6-17: Ablaufplan des Workshop 3 – Zielwissen II.

Zu Beginn wurden die Ergebnisse der Energiesystemmodellierung präsentiert, die auf den im vorherigen Workshop entwickelten Szenarien basierten. Anschließend arbeiteten die Teilnehmenden in zwei Gruppen mit jeweils fünf Personen.

- Eine Gruppe diskutierte die vorgestellten Ergebnisse entlang von Leitfragen,
- die andere Gruppe betrachtete in der CAVE die Visualisierungen der Wärmenetz- und Stromnetzsimulation.

Nach rund 30 Minuten wechselten die Gruppen, sodass alle Teilnehmenden sowohl an der Diskussion als auch an der Visualisierung in der CAVE teilnahmen. Diese Aufteilung ermöglichte einerseits eine vertiefte inhaltliche Auseinandersetzung mit den Modellierungsergebnissen, andererseits eine anschauliche Darstellung komplexer Simulationen durch die immersive Visualisierung in der CAVE.

Während des Workshops zeigte sich die Herausforderung, mit der Heterogenität von Wissensständen der Teilnehmenden in Bezug auf technische Aspekte der Energieversorgung angemessen umzugehen. Die Gruppen wurden bewusst so zusammengesetzt, dass in einer Gruppe vorwiegend Expert*innen mit technischem Hintergrundwissen vertreten waren, während die andere Gruppe überwiegend aus Teilnehmenden ohne vertiefte technische Kenntnisse bestand. Die Inhalte und Präsentationen waren jedoch identisch. In der Gruppe mit technischer Expertise wurden vor allem spezifische Detailfragen gestellt, auf die aus Zeitgründen nicht immer vertieft eingegangen werden konnte. Hierzu wurde auf ein mögliches separates Fachgespräch verwiesen. In der zweiten Gruppe hingegen dominierten grundsätzliche Verständnisfragen, und es zeigte sich, dass nicht alle Inhalte der Präsentationen in ihrer Tiefe nachvollzogen werden konnten. Diese Beobachtungen spiegelten sich auch in den Rückmeldungen der Nachbefragung wider. Mehrere Teilnehmende wiesen darauf hin, dass die inhaltlichen Voraussetzungen teilweise zu hoch angesetzt waren: „Vielleicht zu checken, ob man das, was man an Wissen und Kenntnissen voraussetzt, auch wirklich erwarten kann.“, „Als Mensch ohne technische Expertise, ist es schwer bzw. nicht möglich den Sachverhalt in der Tiefe zu verstehen, was ja auch Auswirkungen darauf hat wie man sich einbringen kann. (...)“.

Im abschließenden Workshop-Teil stand die Bewertung der Kriterien Realisierbarkeit und Ästhetik im Fokus. Beide Kriterien lassen sich nicht direkt aus der Energiesystemmodellierung ableiten, da sie qualitativ zu erfassen und subjektiv zu bewerten sind.

Das Kriterium Realisierbarkeit wurde von den Stakeholdern als besonders wichtig hervorgehoben, müsse jedoch präzise definiert werden, da es verschiedene Dimensionen umfasst, wie etwa technische, finanzielle und organisatorische Aspekte. Am Beispiel der Photovoltaikanlagen auf den Dächern der Universitätsgebäude wurde aufgezeigt, dass neben der technischen Machbarkeit (z. B. Statik der Dächer) auch finanzielle Aspekte sowie interne Abstimmungsprozesse zwischen Universitätsbauamt und Universität und Abstimmungsprozesse mit dem Netzbetreiber einen Einfluss auf die zeitliche und organisatorische Umsetzung haben.

Das Kriterium Ästhetik wurde in der Plenumsdiskussion unterschiedlich bewertet. Während einige Teilnehmende betonten, dass im Kontext einer funktionalen Energieinfrastruktur die Funktionalität Vorrang habe (Ansatz „form follows function“), hoben andere die Bedeutung architektonischer und städtebaulicher Aspekte hervor, die bereits bei der Anlagenplanung berücksichtigt werden sollten. Insbesondere die Lage und Sichtbarkeit von Energieanlagen, etwa ob diese zentral auf dem Campus oder am Rand platziert werden, wurde als maßgeblich für die ästhetische Gesamtwirkung angesehen. Eine teilnehmende Person merkte in der Nachbefragung an, dass eine Visualisierung der Energieanlagen, wie z. B. einer Großwärmepumpe, hilfreich gewesen wäre, um die möglichen Auswirkungen auf das Erscheinungsbild des Campus Vaihingen besser einschätzen zu können. Diese Rückmeldung verdeutlicht die Relevanz visueller und räumlicher Darstellungen, um auch nicht-technische Kriterien wie Ästhetik angemessen zu diskutieren.

6.5.3 Implikationen für den DiTeNS-Dialogprozess

Nach der Evaluation des Workshop 2 erscheint es für zukünftige Case Studies sinnvoll, sowohl die Parameter und deren Ausprägungen als auch die MCDA-Kriterien im Vorfeld (etwa durch Interviews) gemeinsam mit den Beteiligten zu erheben. Auf diese Weise können Interessen und Wünsche stärker einfließen und die Identifikation mit dem Prozess erhöht werden. Zudem sollten gezielte Workshop-Formate die Teilnehmenden ermutigen, auch bewusst extremere oder weniger wahrscheinliche Szenarien zu entwickeln. Insgesamt ist es empfehlenswert, für diese Dialogphase mehr Zeit einzuplanen, um den Austausch und die Reflexion zwischen den Stakeholder zu fördern.

Aus Workshop 3 lassen sich mehrere Erkenntnisse für die Gestaltung zukünftiger Case Studies ableiten. Eine der zentralen Herausforderungen bestand im Zeitmanagement und im Umgang mit heterogenen Wissensständen. Zur Vorbereitung wurden den Teilnehmenden im Vorfeld Informationsmaterialien und Handouts zur Verfügung gestellt, um die theoretischen und technischen Grundlagen zu vermitteln. Dennoch zeigte sich, dass diese Materialien nicht von allen Teilnehmenden genutzt wurden, sodass während des Workshops weiterhin umfangreiche Erklärungen erforderlich waren. Dies führte dazu, dass der Informationsumfang als zu dicht empfunden wurde und die Teilnehmenden teilweise überfordert waren.

Eine mögliche Lösung besteht darin, komplexe Inhalte schrittweise und in kleineren Einheiten („verdaubaren Häppchen“) zu vermitteln, etwa über mehrere Veranstaltungen hinweg. Diese Vorgehensweise würde jedoch eine längere Gesamtzeitspanne und eine höhere zeitliche Beteiligung der Stakeholder erfordern. Darüber hinaus wurde in der Nachbefragung der Vorschlag eines „Technik-Onboardings“ geäußert. Ein solches Format könnte dazu dienen, grundlegendes technisches Verständnis zu vermitteln, um insbesondere Teilnehmende ohne energietechnischen Hintergrund besser auf die Workshops vorzubereiten. Dadurch ließen sich Wissensunterschiede ausgleichen, Missverständnisse reduzieren und die Diskussionstiefe erhöhen.

Insgesamt verdeutlichen die Erfahrungen aus Workshop 3, dass die Balance zwischen wissenschaftlicher Komplexität und partizipativer Verständlichkeit eine entscheidende Rolle spielt. Nur wenn technische Informationen nachvollziehbar vermittelt werden, können Stakeholder mit unterschiedlichem Fachwissen fundiert in den Entscheidungsprozess eingebunden werden.

7. Transformationswissen

7.1 Methodik der multikriteriellen Entscheidungsanalyse

7.1.1 Funktion und Ablauf einer multikriteriellen Entscheidungsanalyse

Methoden der multikriteriellen Entscheidungsanalyse, englisch „Multi-Criteria Decision Analysis“, kurz MCDA, werden im Kontext komplexer Entscheidungen in der Energieplanung eingesetzt mit dem Ziel, unterschiedliche (meist konfligierende) Interessen aufzudecken und einen Konsens zu fördern. Die Methode erlaubt es, eine Vielzahl entscheidungsrelevanter Kriterien sowohl quantitativ als auch qualitativer Natur zu berücksichtigen. In Entscheidungsprozessen, in denen viele Stakeholder beteiligt sind, stellt die Methodik somit sicher, dass die Werte, Ziele und Präferenzen aller Beteiligten berücksichtigt werden.

Die MCDA in DiTEoS folgte in Anlehnung an *MACHARIS ET AL. (2012)* und *SCHÄR ET AL. (2021)* folgenden acht Schritten. Zu Beginn steht die Definition des Entscheidungsproblems, indem die Menge der Entscheidungsalternativen identifiziert wird (Schritt 1). In DiTEoS sind dies die drei klimaneutralen Energieversorgungsoptionen (KN 2030, KN 2035, KN 2040) für den Campus Vaihingen, die im Prozess gemeinsam festgelegt wurden und für die Ergebnisse mit den Energiesystemmodellen berechnet wurden (Macharis et al. 2012; Schär und Geldermann 2021).

Eine Stakeholder-Analyse (Schritt 2) dient dazu, alle relevanten Interessengruppen zu identifizieren und deren Ziele zu verstehen. Dies ist wichtig, um relevante Entscheidungskriterien in den Prozess mit aufzunehmen. Unsere Analysen der Stakeholder und Konflikte lieferten wesentliche Erkenntnisse, die in die Entwicklung der Kriterien einfließen.

Mögliche relevante Entscheidungskriterien (Schritt 3) wurden zunächst durch eine Literaturanalyse bestehender MCDA-Analysen in der Energieplanung identifiziert und festgelegt (Wang et al. 2009; Oberschmidt 2010; Trutnevyte et al. 2011; Kirppu et al. 2018; Schär und Geldermann 2021; Lode et al. 2022). Dabei ergaben sich quantitative und qualitative Kriterien technischer, wirtschaftlicher, ökologischer und sozialer Natur. Diese Kriterien wurden Team-intern diskutiert und schließlich auf solche Kriterien reduziert, die entweder über In- oder Output-Parameter der Energiesystemmodellierungen bzw. -simulationen oder über Stakeholder-Einschätzungen quantifizierbar waren, um in die MCDA-Analyse einfließen zu können. Diese Kriterien wurden im Oktober 2024 durch den DiTEoS-Praxispartnerbeirat, bestehend aus Vertreter*innen von Kommunalverwaltungen, Energieversorgern, Mieter-, Vermieter- und Umweltverbänden, in einem Workshop validiert und modifiziert. Schließlich erfolgte eine fallbezogene Fokussierung, indem besonders relevante bzw. kritische Aspekte und Herausforderungen für den Standort Campus Vaihingen mittels unserer Stakeholder-Analyse identifiziert wurden und in die Definition der Kriterien einfließen.

Die so ausgewählten Entscheidungskriterien wurden den Teilnehmenden im zweiten Dialog-Workshop präsentiert. Jeder Stakeholder gewichtete jedes Kriterium (Schritt 4). Bei Teilnahme mehrerer Personen einer Institution (wie bspw. im Falle des UBA) einigten sich die Personen in interner Abstimmung auf eine Gewichtung. Die Stakeholder vergaben für jedes Kriterium Punkte zwischen 0 (überhaupt nicht wichtig) und 10 (sehr wichtig). Die Kriterien-Gewichte pro Stakeholder wurden zur Verwendung in der MCDA-Analyse anschließend per Summennormalisierung normalisiert.

Jedes Entscheidungskriterium erhält einen Performance Score (Schritt 5). Performance Scores geben an, wie gut eine Alternative ein Ziel (ausgedrückt über die Kriterien) erfüllt, auch qualitative Einschätzungen können dafür in numerische Werte (z. B. entlang einer Ordinal-Skala) umgewandelt werden. Inputs für die Performance Scores resultierten aus den Energiesystemmodellierungen und Simulationen.

Die Performance Scores der zur Entscheidung stehenden Energieversorgungsvarianten wurden zunächst normalisiert (Schritt 6). Dies dient dazu, Werte, die ursprünglich in unterschiedlichen Einheiten und Größenordnungen vorliegen, vergleichbar zu machen. Dabei wurden durch das lineare Min-Max-Verfahren die Performance Scores auf eine Skala zwischen 0 und 1 transformiert. Je nach Wirkrichtung des Kriteriums wird beim Ziel einer Minimierung der niedrigste Wert auf 1 und der höchste auf 0 gesetzt, beim Ziel einer Maximierung entsprechend der höchste Wert auf 1 und der niedrigste auf 0. Ein Wert nahe 1 entspricht somit einer günstigen Performance, ein Wert nahe 0 einer ungünstigen. Zur Aggregation wurde das Verfahren der gewichteten Summe genutzt. Dabei wurden die normalisierten Performance Scores mit den ebenfalls normalisierten Gewichten der Stakeholder multipliziert und schließlich aufaddiert. So erhält jede Energieversorgungsvariante einen Gesamtnutzwert, auf deren Basis sich ein Ranking über alle Versorgungsvarianten bilden lässt. Das Verfahren der gewichteten Summe wurde gewählt, da es gegenüber komplexeren Aggregationsmethoden leicht implementierbar und für verschiedene Stakeholder nachvollziehbar ist. Die Aggregation erfolgte über Excel sowie die open source Software HELDA.⁶

Das Ranking-Ergebnis wurde evaluiert und im Hinblick auf prägnante Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Stakeholdern überprüft (Schritt 7). Das Ziel einer Sensitivitätsanalyse ist es, kritische Kriterien, also solche, deren Änderung im Gewicht einen großen Einfluss auf das Endergebnis haben, zu identifizieren. Eine kleine Sensitivitätsanalyse erfolgte über die MCDA-Software HELDA (HELDA 2024).

Das Ranking-Ergebnis soll den Stakeholdern als Grundlage zur Entscheidung für eine Energieversorgungsvariante dienen (Schritt 8). Auf Grundlage der in den vorherigen Schritten gewonnenen Informationen umfasst der neunte Schritt entsprechend die Entwicklung von Umsetzungspfaden für die gewählte Alternative.

7.1.2 Definitionen der Entscheidungskriterien

Im Folgenden werden die entwickelten Entscheidungskriterien und ihre Definitionen vorgestellt. Ergänzende Erläuterungen, u. a. zu Modellannahmen und Operationalisierungen, finden sich in Anhang 2.

- **Treibhausgasemissionen:** Emissionen in t CO₂-Äquivalenten (absolute Menge), die aufgrund der Energieproduktion für die im Bilanzraum verbrauchte Endenergie (Scope 1 + 2) bis zum Zieljahr kumulativ anfallen.
- **Flächennutzung:** Flächenbedarf der unversiegelten Freifläche im Bilanzraum (in m²), die im Zieljahr ausschließlich für die Energieproduktion genutzt wird. Diese Flächen sind nicht mehr für andere Nutzungen wie Landwirtschaft, Biodiversitätsleistungen oder Erholung verfügbar. Nur Flächen, die durch die Energieanlagen für andere Zwecke gänzlich

⁶ HELDA entstammt der Zusammenarbeit zwischen KIT-ITES und KIT-ITAS und ist eine MCDA-Software, die für allgemeine Entscheidungsfindungsprobleme mit Stakeholdern einsetzbar ist. Die Software wurde im Dialogprozess zur Validierung der MCDA-Ergebnisse sowie in knapper Form zum Sensitivitätstest der Kriteriengewichtungen verwendet.

lich unbrauchbar werden, werden berücksichtigt. Dachflächen, die für erneuerbare Energien genutzt werden, sowie Flächen, die eine Doppelnutzung zulassen, gelten als flächenneutral, da sie keine zusätzlichen Freiflächen beanspruchen.

- **Gesamtkosten:** Die kumulativen Gesamtkosten (in EUR) umfassen Investitionskosten (Installations- und Anlagekosten inkl. Sanierungskosten), Betriebs- und Wartungskosten sowie Energiebezugskosten einer Versorgungsvariante bis zum Zieljahr. Bei der Berechnung der kumulativen Gesamtkosten einer Versorgungsvariante werden die Investitionen über ihre Lebensdauer verteilt und der Zeitwert des Geldes berücksichtigt.
- **Energiebedarf:** Der Energiebedarf umfasst die gesamten Energiebezüge und bilanzraumeigene Erzeugungsmengen im Zieljahr (in GWh) inklusive der Anteile, die zur Deckung von Netzverlusten erforderlich sind.
- **Ästhetik:** Subjektiv empfundene Attraktivität des Orts- und Landschaftsbildes im Bilanzraum und Zieljahr, resultierend aus den Anlagen des Energieversorgungssystems, gemessen über eine qualitative Bewertungsskala (sehr gut, gut, neutral (= weder Aufwertung noch Beeinträchtigung), schlecht, sehr schlecht).
- **Flexibilität:** Flexibilität eines Energiesystems (in kW/min) bezeichnet die Fähigkeit, die Energieerzeugung, -verteilung und -nutzung an wechselnde Bedingungen (z. B. Versorgungsengpässe oder Preisänderungen) anzupassen⁷.
- **Realisierbarkeit:** Realisierbarkeit beschreibt die praktische Umsetzbarkeit eines Energieversorgungssystems im Bilanzraum unter Berücksichtigung technischer, räumlicher, rechtlicher, organisatorischer und zeitlicher Rahmenbedingungen. Sie zeigt, ob und wie gut die vorgeschlagene Energieversorgungsvariante unter den gegebenen lokalen Voraussetzungen realisierbar ist und wie robust sie gegenüber Änderungen in den genannten Rahmenbedingungen ist. Das Kriterium wird gemessen über eine qualitative Bewertungsskala (sehr hoch, hoch, mittel, gering, sehr gering).

7.2 Ergebnisse der multikriteriellen Entscheidungsanalyse

Die beteiligten Stakeholder, darunter UBA, Green Office, Dezernat 6 (Facility Management), HKW, stuvus, Vertretung der Mitarbeitenden, Crossing Borders Stuttgart e. V., Studierendenwerk Stuttgart sowie die Wohnheimvertretung, bewerteten die sieben MCDA-Kriterien im Workshop 2. Das Dezernat 8 (Planen und Bauen) konnte an der Gewichtung nicht teilnehmen und ist daher aus der MCDA-Analyse ausgenommen.

Wie in Abbildung 7-1 dargestellt, zeigen die absoluten Gewichte (hier beispielhaft für das HKW und das Dezernat 6) die direkten Gewichtungen der Stakeholder auf einer Skala von 0 (sehr unwichtig) bis 10 (sehr wichtig). Sie eignen sich, um die Präferenzstruktur eines Stakeholders nachzuvollziehen. So zeigt sich beim HKW ein Fokus auf Gesamtkosten und Realisierbarkeit, während das Dezernat 6 Flächennutzung und Energiebedarf am höchsten bewertet. Hier wird deutlich, welche Themen für die einzelnen Stakeholder besonders ausschlaggebend sind. Die absoluten Gewichte aller Stakeholder finden sich in Anhang 3.

⁷ Aufgrund der ähnlichen Rahmenbedingungen der betrachteten Szenarien konnte kein signifikanter Unterschied in der Laständerungsrate (kW/min) identifiziert werden. Daher wurden ergänzend weitere Faktoren wie Auslastung, Speicherintegration und Verfügbarkeit berücksichtigt und in einem Flexibilitätsindex zusammengeführt (Skala: 1 = geringe Flexibilität; 5 = hohe Flexibilität). Der Index basiert nicht auf einer direkten Berechnungsformel, sondern wurde möglichst objektiv durch eine Expertenbewertung erstellt.

Im zweiten Workshop hatten die Teilnehmenden die Möglichkeit, Aspekte bei den Kriterien-Definitionen einzubringen, die aus ihrer Sicht nicht ausreichend berücksichtigt wurden. Im Folgenden werden diese Anmerkungen zu den entsprechenden Kriterien vorgestellt.

- **Treibhausgasemissionen:** Hier wurde angemerkt, Gebäude aus der Treibhausgasbilanz auszugrenzen, da diese Gebäude des Landes Baden-Württemberg seien und die Universität Stuttgart diese nur betreibe. Die Bilanzgrenze solle sich am Bezug von Energie und Mobilität orientieren. Des Weiteren sollten Alltagsmobilität und Dienstreisen und daraus entstehende Speicherflexibilität in Scope 3 berücksichtigt werden.
- **Flächennutzung:** Hier sollte auch die Nutzung von bestehenden Technikflächen (also bspw. Flächen in Gebäuden, die derzeit noch für Energietechnik genutzt werden, aber perspektivisch frei werden) z. B. für die Installation von Wärmepumpen und Speichern berücksichtigt werden. Somit seien es nicht nur unversiegelte Freiflächen, die neu zur Wärmeerzeugung und Verteilung genutzt werden müssten.
- **Gesamtkosten:** Einige Stakeholder hätten sich eine Berücksichtigung von Return on Invest und Amortisationszeitpunkt gewünscht, aufgeteilt nach Wohn- und Nichtwohngebäude. Dabei sollte die Kostentrennung und Verantwortung des Return on Invest berücksichtigt werden: Bauvorhaben lägen in der Verantwortung vom Finanzministerium, für den Bauunterhalt sei das MWK zuständig und die Energiekosten lägen bei der Universität. Zudem sollten Personal- und Wartungskosten aufgeführt werden und der Unterschied zwischen einem konstanten und einem dynamischen Strompreis berücksichtigt werden.
- **Energiebedarf:** Einige Stakeholder wünschten sich, dass beim Energiebedarf nach Nutzungsformen (Forschung und Grundbetrieb) unterschieden wird. Darüber hinaus wurde die Frage aufgeworfen, wieso der Energiebedarf überhaupt als entscheidungsrelevantes Kriterium definiert wurde, da es kein explizites Ziel der Stakeholder sei, den Energiebedarf zu ändern, sondern vielmehr das Ziel, die Energieeffizienz zu steigern.
- **Flexibilität:** Noch berücksichtigt werden sollte die eingesetzte Leistungskapazität zur gesamten möglichen Leistungskapazität, die Kombination verschiedener Anlagenkapazitäten (Kombinatorik) und die Erweiterbarkeit des Energiesystems in Bezug auf zusätzliche Komponenten.
- **Realisierbarkeit:** Zwischen den Stakeholdern bestanden unterschiedliche Ansichten darüber, ob Realisierbarkeit grundsätzlich ein Kriterium darstelle, das in seiner Ausprägung variabel sein darf oder ob es nicht gesetzt sein müsse. In diesem Zuge wurde auch diskutiert, ob es eine vorher bestimmbare eindeutige Realisierbarkeit (über die technische Realisierbarkeit hinaus) gebe oder ob sie nicht vielmehr erst im Bauplanungsprozess bestimmt werden könne. Auch eine ökonomische Realisierbarkeit müsse in der Definition Berücksichtigung finden oder es müsse begründet werden, wieso diese nicht berücksichtigt wird. Als fehlende Aspekte wurden außerdem soziale Aspekte und die Belastung von Mitarbeitenden sowie Störungen des Forschungsbetriebs während der Bauphase genannt. Abschließend kam die Frage auf, inwiefern Denkmalschutz und Architekten-Urheberrecht Entscheidungen eingrenzen oder in welchem Umfang sie auch einen gewissen Spielraum durch lokale Aushandlung zulassen.

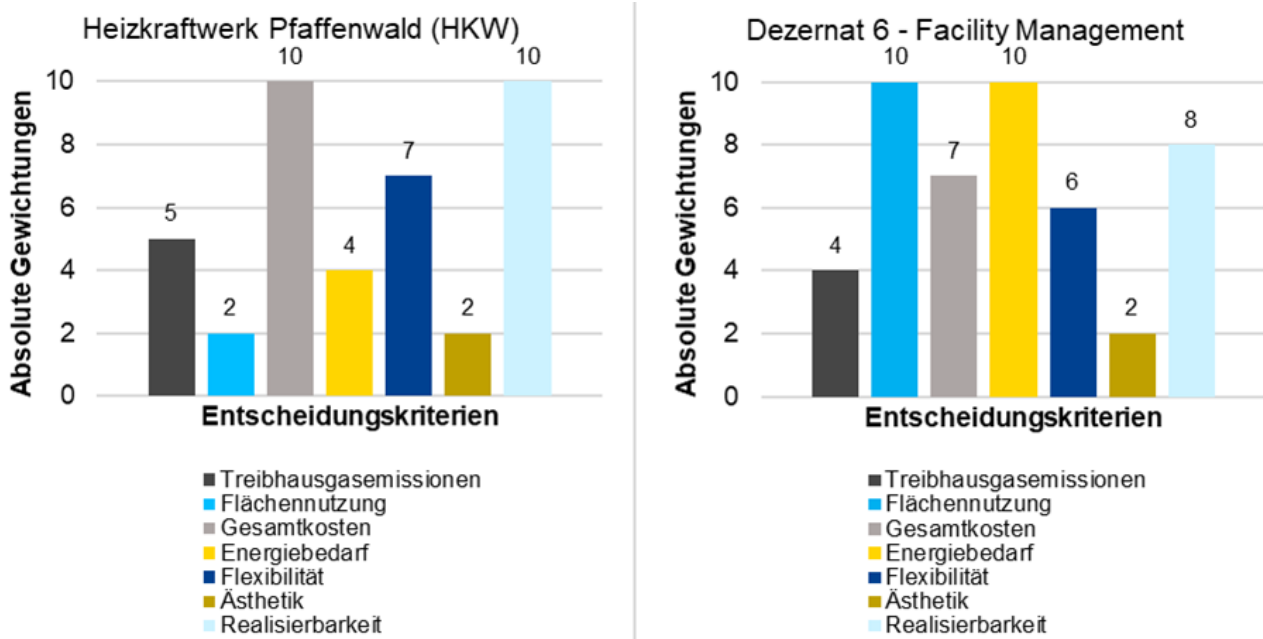


Abbildung 7-1: Absolute Gewichtungen der Entscheidungskriterien am Beispiel des Heizkraftwerks und Dezernats 6 (0 = sehr unwichtig; 10 = sehr wichtig).

Wie in Abbildung 7-2 gezeigt, setzen die normalisierten Gewichte die vergebenen Punkte eines Stakeholders in Relation zueinander, sodass die Summe aller Gewichte 1 ergibt. Dadurch werden die relativen Prioritäten vergleichbar gemacht, unabhängig davon, wie großzügig oder zurückhaltend ein Stakeholder Punkte verteilt hat. Die normalisierten Gewichte erlauben somit einen direkten Vergleich zwischen den Teilnehmenden, weshalb auf sie im Folgenden genauer eingegangen werden soll.

Für die beiden Kriterien Realisierbarkeit und Ästhetik war ursprünglich eine qualitative Bewertung durch die Stakeholder im dritten Workshop vorgesehen. Da die Teilnehmenden jedoch übereinstimmend angaben, hierfür nicht über ausreichende Informationen zu verfügen, wurden diese beiden Kriterien in der weiteren MCDA-Analyse nicht berücksichtigt und sind entsprechend in den Darstellungen der normalisierten Gewichtungen und den MCDA-Ergebnissen ausgenommen. Hierbei ist dennoch anzumerken, dass das Kriterium „Realisierbarkeit“ von allen Stakeholdern vergleichsweise hoch gewichtet wurde (wie den absoluten Gewichten in Anhang 3 zu entnehmen ist).

Am höchsten gewichtet wurden im Durchschnitt über alle Stakeholder die Kriterien Treibhausgasemissionen und Gesamtkosten. Die Analyse der Gewichtungen zeigt, dass zwischen den Stakeholdern Unterschiede in der Bewertung einzelner Kriterien bestehen. Besonders ausgeprägt sind diese Unterschiede bei den Kriterien Gesamtkosten und Flächennutzung, die im Vergleich zu anderen Kriterien am stärksten variieren. Dies deutet darauf hin, dass diese Kriterien vergleichsweise kontrovers betrachtet und von den Stakeholdern unterschiedlich priorisiert werden.

So gewichten das Studierendenwerk und das HKW die Gesamtkosten mit Abstand am höchsten, während die Studierendenvertretung (stuvus) oder das Green Office diesem Kriterium eine deutlich geringere Bedeutung beimessen. Ein anderes Bild zeigt sich bei der Flächennutzung: diesem Kriterium messen insbesondere das Dezernat 6 und Bewohnende des Campus hohe Relevanz bei, wohingegen das HKW diesem Aspekt eine geringe Bedeutung zuschreibt. Demgegenüber weisen die Kriterien Treibhausgasemissionen, Energiebedarf und Flexibilität eine vergleichsweise geringe

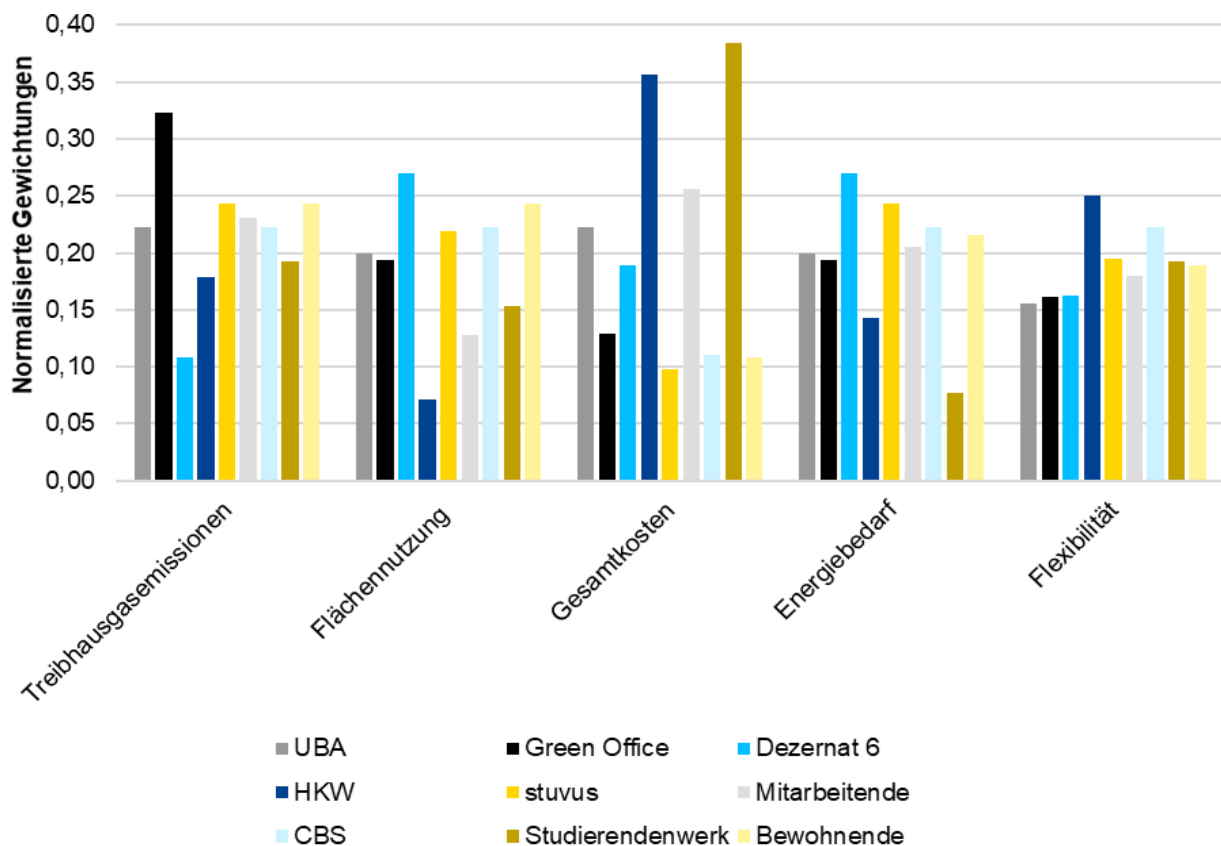


Abbildung 7-2: Normalisierte Gewichtungen der Entscheidungskriterien pro Stakeholder.

Streuung auf. Sie können daher als konsensfähiger betrachtet werden, da ihre Gewichtungen zwischen den Stakeholdern weniger stark variieren.

Tabelle 7-1 stellt die Performance Scores der drei Energieversorgungsvarianten (KN 2030, KN 2035, KN 2040) dar. Fünf Kriterien konnten durch die Energiesystemmodellierungen und Simulationen quantifiziert werden. Die beiden Kriterien Ästhetik und Realisierbarkeit, die aufgrund unzureichender Informationen nicht (wie vorgesehen) über die Stakeholder selbst bewertet werden konnten, konnten in der MCDA-Analyse nicht berücksichtigt werden.

Markiert sind die jeweils am besten (grün) sowie am schlechtesten (rot) abschneidenden Varianten pro Kriterium. Die ausführlichen Ergebnisse und Implikationen der Varianten wurden bereits in Kapitel 6 vorgestellt, daher soll hier nur kurz auf die wichtigsten Aspekte im Rahmen der MCDA eingegangen werden:

- **KN 2030** weist den niedrigsten Treibhausgasausstoß, den geringsten Energiebedarf und die höchste Flexibilität auf, dafür aber die höchste Flächennutzung.
- **KN 2035** liegt bei den Gesamtkosten am niedrigsten, hat jedoch den höchsten Energiebedarf.
- **KN 2040** verursacht die höchsten Treibhausgasemissionen und Kosten und weist die geringste Flexibilität auf, hat jedoch den geringsten Flächenverbrauch.

Tabelle 7-1: Performance Scores des Energieversorgungsvarianten für unterschiedliche Bewertungskriterien.

Bewertungskriterien	KN 2030	KN 2035	KN 2040
Treibhausgasemissionen bis 2040 (in to CO ₂ *)	296.374	320.136	327.802
Flächennutzung in 2040 (m ²)	639	551	523
Gesamtkosten bis 2040 (Mio. EUR)	1.700,7	1.685,9	1.734,0
Energiebedarf in 2040 (in GWh)	202.017	203.335	202.725
Flexibilität in 2040 (von 1 = niedrig bis 5 = hoch)	4	3	2
Ästhetik in 2040 (Likert-Skala)	N.A.	N.A.	N.A.
Realisierbarkeit (Likert-Skala)	N.A.	N.A.	N.A.

Die Aufschlüsselung verdeutlicht, dass keine Versorgungsvariante in allen Kriterien optimal abschneidet. Dabei handelt es sich um klassische Zielkonflikte zwischen den aufgestellten Kriterien Kosten, Flächenbedarf, Energiebedarf, Emissionen und Flexibilität, zu deren Lösung die durchgeführte MCDA-Analyse unterstützend beitragen soll.

Tabelle 7-2: Gesamtnutzwerte und das sich daraus ergebende Ranking (grün = Rang 1, weiß = Rang 2, rot = Rang 3) der Energieversorgungsvarianten (KN 2030, KN 2035, KN 2040) im Stakeholder-Durchschnitt.

	KN 2030	KN 2035	KN 2040
Gesamtnutzwerte im Stakeholder-Durchschnitt	0,75	0,50	0,28

Tabelle 7-2 stellt das Gesamtranking der drei Energieversorgungsvarianten nach durchgeführter Aggregation im Stakeholder-Durchschnitt dar. Klar ersichtlich wird, dass die Variante KN 2030 am besten abschneidet, gefolgt von KN 2035 und KN 2040.

Analysiert man die Ergebnisse pro Stakeholder, ist festzustellen, dass das Ranking der Energieversorgungsvarianten über alle Stakeholder hinweg gleich ist. Es gibt also keinen Stakeholder mit abweichender Rangfolge zum Stakeholder-Durchschnitt, was in Tabelle 7-3 dargestellt ist.

- **KN 2030** schneidet insgesamt am besten ab (Gesamtnutzwerte 0,67 bis 0,82). Ausschlaggebend ist, dass diese Variante die stärkste Reduktion der Treibhausgasemissionen erreicht, den Energiebedarf deutlich senkt und eine hohe Flexibilität aufweist. Gleichzeitig geht die Variante mit dem größten Flächenbedarf einher. Das Bewertungsergebnis der Variante fällt bei Dezernat 6 vergleichsweise schlechter aus, da die Treibhausgasemissionen niedrig und die Flächennutzung hoch gewichtet wurden, wodurch

Stärken und Schwächen der Variante bei diesem Stakeholder relativ stark ins Gewicht fallen.

- **KN 2035** erreicht mittlere Gesamtnutzwerte (0,42 bis 0,64). Die Variante zeigt zwar das beste Ergebnis bei den Gesamtkosten, dies fällt aber weniger ins Gewicht, da der Energiebedarf wiederum am schlechtesten abschneidet und ansonsten keine Vorteile gegenüber KN 2030 zu verzeichnen sind. Die Variante schneidet entsprechend bei den Stakeholdern vergleichsweise gut ab, die die Gesamtkosten sehr hoch gewichten.
- **KN 2040** erzielt die niedrigsten Gesamtnutzwerte (0,14 bis 0,40). Hauptgrund ist, dass die Reduktion der Treibhausgasemissionen deutlich verzögert eintritt, was bei den meisten Stakeholdern stark negativ ins Gewicht fällt. Auch bei der Flexibilität und den Gesamtkosten erzielt die Variante die schlechtesten Werte. Einen Vorteil bringt die Variante im Bereich des geringeren Flächenbedarfs gegenüber KN 2030 und KN 2035, weshalb die Variante bspw. bei Dezernat 6 vergleichsweise besser abschneidet, da dieses Kriterium höher gewichtet wurde.

Insgesamt zeigte die MCDA-Analyse, dass keine erheblichen Zielkonflikte zwischen den Teilnehmenden hinsichtlich der Präferenz für eine Energieversorgungsvariante, aber durchaus Unterschiede in der Gewichtung gewisser Bewertungskriterien bestehen. Als kontrovers zeigten sich insbesondere die Kriterien Gesamtkosten und Flächennutzung, die wiederum Auswirkungen auf die konkreten Gesamtnutzwerte einer Variante pro Stakeholder haben, nicht aber auf die Stakeholderübergreifende Rangfolge (1. KN 2030, 2. KN 2035, 3. KN 2040).

Die vorgenommene Min-Max-Normalisierung, durch die der beste Wert eines Kriteriums auf 1 und der schlechteste auf 0 gesetzt werden, generiert sehr starke Unterschiede zwischen den Variantenbewertungen. Vor allem, wenn die Unterschiede der Kriterien über die Varianten sehr klein sind, kann dies zu künstlich aufgeblasenen Differenzen in den normalisierten Werten und damit auch im Ranking der Versorgungsvarianten führen. Dies sollte bei der Ergebnisinterpretation berücksichtigt werden.

Tabelle 7-3: Gesamtnutzwerte und das sich daraus ergebende Ranking (grün = Rang 1, weiß = Rang 2, rot = Rang 3) der Energieversorgungsvarianten (KN 2030, KN 2035, KN 2040) pro Stakeholder.

	UBA	Green Office	Dezernat 6	HKW	stuvus	Mitarbeitende	CBS	Studierendenwerk	Bewohnende
KN 2030	0,73	0,77	0,67	0,82	0,75	0,79	0,74	0,73	0,72
KN 2035	0,51	0,44	0,50	0,58	0,42	0,50	0,45	0,64	0,45
KN 2040	0,29	0,28	0,40	0,14	0,33	0,22	0,33	0,19	0,34

Die Min-Max Methode wurde gewählt, da sie leicht nachvollziehbar ist, die relativen Abstände zwischen den Kriterienwerten beibehält und damit auch die relative Leistungsfähigkeit einer Variante sehr gut aufzeigen kann. Im Prozess wurden daher auch nicht die genauen Gesamtnutzwerte der Varianten in den Fokus gerückt, sondern vielmehr die Rangfolgen-Tendenz, die als Hilfestellung für die Entscheidungsfindung der Stakeholder dienen kann.

Die Sensitivitätsanalyse über die Software HELDA ergab, dass eine Gewichtsänderung um 10 oder 50 % bei keinem der Stakeholder eine Änderung der Rangfolge der Varianten nach sich zieht. Dies weist darauf hin, dass das Ranking-Ergebnis eine hohe Robustheit gegenüber abweichenden Kriteriengewichtungen besitzt.

7.3 Ableitung von Maßnahmen zum Erreichen des Zielzustands

In Abhängigkeit von der Entscheidung für eine Energieversorgungsvariante (KN 2030, KN 2035 oder KN 2040) sollten die Stakeholder im Workshop Maßnahmen zur Erreichung der gewählten Versorgungsvariante diskutieren, modifizieren und ergänzen. Als Grundlage leitete das DiTEaS-Team Maßnahmen aus den Modellierungs- und Simulationsergebnissen sowie aus den Stakeholder-Interviews ab. Diese Maßnahmen und ihre Interdependenzen wurden in Steckbriefen dokumentiert.

Jede Maßnahme wird in einem kurzen Steckbrief beschrieben. Dieser umfasst den Titel, den Kerngedanken, die erwartete Wirkung sowie wesentliche Abhängigkeiten zu anderen Maßnahmen. Eine erste kompakte Darstellung erfolgt in den folgenden Maßnahmenbeschreibungen, während die ausführlichen Steckbriefe mit Detailinformationen (z. B. Kosten, Verantwortlichkeiten, Förderoptionen, nächste Schritte) im Anhang zu finden sind.

- **Standortsuche und -wahl für Energiezentralen und Speicher:** Für die zukünftige Dekarbonisierung des Wärmenetzes ist die Sicherung geeigneter Flächen für zusätzliche Erzeuger und Speicher notwendig. Dazu zählen insbesondere Großwärmepumpen, thermische Speicher und potenziell Geothermieanlagen. Durch die Standortwahl wird die Grundlage für Versorgungssicherheit und Flexibilität geschaffen. Die Maßnahme steht in Abhängigkeit zu einer detaillierten Leistungsbedarfsplanung und bildet eine Voraussetzung für den weiteren Ausbau von Erzeugern.
- **Installation von Großwärmepumpen:** Langfristig sind weitere Großwärmepumpen erforderlich, um fossile Wärmeherzeugung zu substituieren. Geeignete Quellen sind oberflächennahe Geothermie sowie Abwärme aus der Kältezentrale Süd. Erwartet wird eine grundlastfähige Wärmebereitstellung mit einem Potenzial von bis zu 25 % des heutigen Jahresbedarfs. Die Maßnahme setzt die Klärung von Flächenverfügbarkeit und die Einbindung in das Strom- und Kältenetz voraus.
- **Umstellung HKW auf Biogas:** Das HKW wird derzeit überwiegend mit Erdgas betrieben. Um die Klimaneutralitätsziele zu erreichen, ist eine Umstellung einzelner Blöcke auf Biogas vorgesehen. Dadurch kann die Versorgungssicherheit übergangsweise gesichert und fossile Emissionen reduziert werden. Abhängigkeiten ergeben sich aus der Verfügbarkeit von Biogas, für das nur ein begrenztes Potential zur Verfügung steht.
- **Absenkung der Vorlauftemperaturen:** Die Integration der AWZ erfordert eine Einspeisung mit 85 °C, während derzeit Netztemperaturen deutlich darüber liegen. Eine Absenkung der Vorlauftemperaturen entsprechend den TAB erhöht die Effizienz der Wärme-

pumpen und des HKW. Gleichzeitig werden Rücklauftemperaturen gesenkt und Temperaturschwankungen reduziert. Die Umsetzung hängt von Anpassungen an Hausübergabestationen und der Gebäudetechnik ab.

- **Automatisierte Betriebsoptimierung:** Die steigende Komplexität des Energiesystems erfordert eine automatisierte, hierarchische Steuerung. Ziel ist die Echtzeitoptimierung des Einsatzes von HKW, AWZ, Speichern und weiteren Erzeugern auf Basis von Prognosen und Strompreisen. Erwartet werden eine höhere Effizienz, Flexibilität und Robustheit des Gesamtsystems. Abhängigkeiten bestehen zur Einführung dynamischer Strompreise bzw. zu einer Teilnahme an zukünftigen Flexibilitätsmärkten sowie zur Verfügbarkeit steuerbarer Verbraucher und Speicher.
- **Detaillierte Netzplanung:** Das bestehende Stromnetz ist aktuell stabil, jedoch wurden Niederspannungsebene und Trafostationen bislang nicht vollständig untersucht. Eine detailliertere Netzplanung soll mögliche Schwachstellen identifizieren und die langfristige Betriebssicherheit gewährleisten. Erwartet wird eine bessere Vorbereitung auf den Ausbau erneuerbarer Erzeuger und neuer Verbraucher. Die Maßnahme ist eng mit künftigen Ausbauprojekten und der Betriebsoptimierung verknüpft.
- **Installation neuer Kältemaschinen:** Die heutigen Kältemaschinen verwenden das Kältemittel R134a, das mittelfristig durch regulatorische Vorgaben nicht mehr verfügbar sein wird. Der Austausch gegen neue, klimafreundlichere Maschinen stellt die Versorgungssicherheit bei wachsendem Kältebedarf sicher. Erwartet wird eine Reduktion von ökologischen Risiken und eine verbesserte Integration von Abwärme und Wärmepumpentechnologien. Die Maßnahme ist mit der Planung zusätzlicher Großwärmepumpen abgestimmt.
- **Energetische Sanierung:** Ein großer Teil der Campusgebäude weist überdurchschnittlich hohe Wärmeverbräuche auf. Prioritär sollen Gebäude mit einem hohen absoluten Verbrauch und im Vergleich zu ähnlich genutzten Gebäuden zu hohem relativem Verbrauch umfassend saniert werden. Dazu gehören Verbesserungen der Gebäudehülle sowie der technischen Anlagen. Erwartet wird eine deutliche Senkung des Wärmebedarfs und eine erhöhte Gesamteffizienz. Die Maßnahme hängt von Förderprogrammen ab und weist Rückwirkungen auf die Netz- und Erzeugerseite auf.
- **Nachrüstung Hausübergabestationen:** Hausübergabestationen haben wesentlichen Einfluss auf Rücklauftemperaturen und damit auf die Effizienz des Wärmenetzes. Viele bestehende Stationen sind unzureichend eingestellt oder technisch veraltet. Die Maßnahme umfasst die Bestandsaufnahme, den Austausch oder die Nachjustierung von Ventilen und die Nachrüstung von Wärmeübertragern, um eine Spreizung von mindestens 30 K sicherzustellen. Erwartet werden eine Steigerung der Systemeffizienz und eine Senkung der Emissionen. Abhängigkeiten bestehen zu den geplanten Temperaturabsenkungen im Netz.
- **Evaluation dynamischer Strompreise:** Ein dynamischer Stromtarif oder die Teilnahme an zukünftigen Flexibilitätsmärkten ermöglichen die Anpassung des Betriebs an variable Marktpreise. Niedrigpreisphasen können so für Wärmeerzeugung und Speicherbeladung genutzt werden, während teure Spitzen vermieden werden. Erwartet werden eine Reduktion der Betriebskosten und eine höhere Nutzung erneuerbarer Energien. Die Maßnahme steht in engem Zusammenhang mit der automatisierten Betriebsoptimierung.

- **PV-Ausbau:** Auf den Gebäudedächern des Campus besteht ein Potenzial von über 10 MWp PV-Leistung. Ziel ist die umfassende Nutzung dieses Potenzials zur Senkung der Strombezugskosten und zur Verbesserung der Klimabilanz. Erwartet wird eine deutliche Reduktion der Energiekosten bei gleichzeitiger Erhöhung des EE-Anteils. Abhängigkeiten bestehen zu Sanierungsmaßnahmen und zur Netzplanung.
- **Analyse zukünftiger Energienachfrage:** Zur Vermeidung von Überdimensionierungen ist eine Prognose der Energienachfrage bis 2040 erforderlich. Dabei werden Neubauten, Sanierungen, Forschungsanlagen und neue Lehr- und Arbeitsformen berücksichtigt. Die Analyse schafft eine Grundlage für die Dimensionierung des Energiesystems. Abhängigkeiten bestehen zur Planung von Erzeugern und Netzen.
- **Koordinierungsgruppe Transformation:** Für die Umsetzung der Maßnahmen ist eine kontinuierliche Koordination notwendig. Eine Koordinierungsgruppe übernimmt die Steuerung, überwacht den Fortschritt und passt Strategien an veränderte Rahmenbedingungen an. Erwartet wird eine höhere Verbindlichkeit, Transparenz und Effizienz im Transformationsprozess. Die Maßnahme ist als Querschnittsaufgabe mit allen weiteren Maßnahmen verknüpft.

7.4 Bewertung der Maßnahmen durch die Stakeholder

Im zweiten Schritt des Prozesses bewerteten die Teilnehmenden die vorgeschlagenen Maßnahmen anhand eines Ampelsystems. Dabei stand grün für Zustimmung, gelb für Diskussionsbedarf und rot für Ablehnung der jeweiligen Maßnahme. Dieses Vorgehen ermöglichte eine schnelle und transparente Einschätzung der Akzeptanz der Maßnahmen innerhalb der Gruppe und bildete die Grundlage für eine anschließende Priorisierung und Diskussion. Wie Tabelle 7-4 zu entnehmen, war der Konsens zu den meisten Maßnahmen hoch, bei einigen Maßnahmen ergab sich noch Diskussionsbedarf zu ihrer genauen Ausgestaltung.

Im vierten Workshop wurden die in Kapitel 7.3 beschriebenen Maßnahmen vorgestellt und den teilnehmenden Stakeholdern die Möglichkeit geboten, neue Maßnahmen zu ergänzen. So wurde sichergestellt, dass die Belange aller Stakeholder bei der Maßnahmenentwicklung Berücksichtigung finden.

Ergänzt wurden folgende Maßnahmen:

- **Einbindung von Studierenden & wissenschaftlichen Mitarbeitenden** in der Umsetzung von Maßnahmen, bspw. bei der Überprüfung der Hausübergabestationen
- **Abschätzung von Veränderungen der Personalstruktur und des Weiterbildungsbedarfs** im Zuge der schrittweisen Verkleinerung/Umstrukturierung des Heizkraftwerks und der Transformation zu einem klimaneutralen Energiesystem
- **Erarbeitung einer Versorgungsstrategie zur Deckung von Sonderbedarfen** durch Forschungsversuche
- **Zentralisierung der IT** (u. a. zur effektiveren Kühlung)
- **Sensibilisierung der Nutzenden für Veränderungen**, u. a. Einbezug des Personals, z. B. bei der vorgesehenen Reduktion von Arbeitsflächen, Baustellenplanung

Tabelle 7-4: Durch die Stakeholder bewertete Maßnahmen mit Konsens und Diskussionsbedarf in Workshop 4.

Konsens	Diskussionsbedarf
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Absenkung der Vorlauftemperaturen ▪ Justierung und Nachrüstung der Hausübergabestationen ▪ Energetische Sanierung ▪ Automatisierte Betriebsoptimierung des Energiesystems ▪ Analyse der Energienachfrage bis 2040 am Campus Vaihingen zur Auslegung des zukünftigen Energiesystems ▪ Koordinierungsgruppe zur Steuerung und Begleitung der Transformation des Energiesystems ▪ Einbindung von Studierenden & wissenschaftlichen Mitarbeitenden in der Umsetzung von Maßnahmen ▪ Abschätzung von Veränderungen in der Personalstruktur und des Weiterbildungsbedarfs ▪ Erarbeitung einer Versorgungsstrategie zur Deckung von Sonderbedarfen durch Forschungsversuche ▪ Sensibilisierung der Nutzenden für Veränderungen ▪ Zentralisierung der IT 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Standortsuche und -wahl für Energiezentralen und thermische Speicher ▪ Installation von Großwärmepumpen mit den Wärmequellen oberflächennahe Geothermie, Abwärme der Kältezentrale Süd ▪ Installation neuer Kältemaschinen ▪ Detailliertere Netzplanung vor der Umsetzung neuer Projekte ▪ Ausbau der PV auf dafür geeigneten Dächern sowie Prüfung von Fassaden-integrierter PV ▪ Evaluation eines dynamischen Strompreises / Flexibilitätsmarkt ▪ Umstellung des Betriebs von Anlagen des HKW auf Biogas⁸

Im Workshop wurden die identifizierten Maßnahmen hinsichtlich des zu erwartenden Nutzens (Beitrag zur Klimaneutralität: gering, mittel, hoch) und des damit verbundenen Aufwands (Umsetzbarkeit: einfach, kompliziert, komplex) bewertet und in einer Matrix visualisiert. Abbildung 7-3 zeigt das Ergebnis. Diese systematische Gegenüberstellung ermöglicht eine priorisierte Betrachtung der Handlungsoptionen und dient als Grundlage für die Ableitung zielgerichteter Maßnahmenpakete.

Unter einfachen Maßnahmen sind solche zu verstehen, deren Vorgehensweise etabliert und direkt umsetzbar ist. Komplizierte Maßnahmen erfordern die Auswahl zwischen verschiedenen Lösungswegen und damit die Einbindung spezifischer Expertise, bspw. durch Studien oder Untersuchungen. Komplexe Maßnahmen zeichnen sich durch eine Vielzahl miteinander verbundener Teilaspekte sowie die Beteiligung zahlreicher Stakeholder und Bereiche aus. Ihre Umsetzung verlangt daher ein systemisches Vorgehen und abgestimmte Steuerungsprozesse. Tabelle 7-4 zeigt die Maßnahmen-Einteilung der Stakeholder in der Matrix.

Der Großteil der Maßnahmen wurde von den Stakeholdern als kompliziert bzw. komplex bewertet und ein mittlerer bzw. hoher Beitrag zum Klimaneutralitätsziel attestiert. Folgendes Einteilungsmuster der Maßnahmen lässt sich erkennen.

⁸ Eine teilweise Ablehnung unter den Stakeholdern ergab sich lediglich bei der Maßnahme „Umstellung des Betriebs von Anlagen des HKW auf Biogas“, wobei hier auch Diskussionsbedarf bestand. Dabei gab es keine einstimmige (und damit eindeutige) Ablehnung.

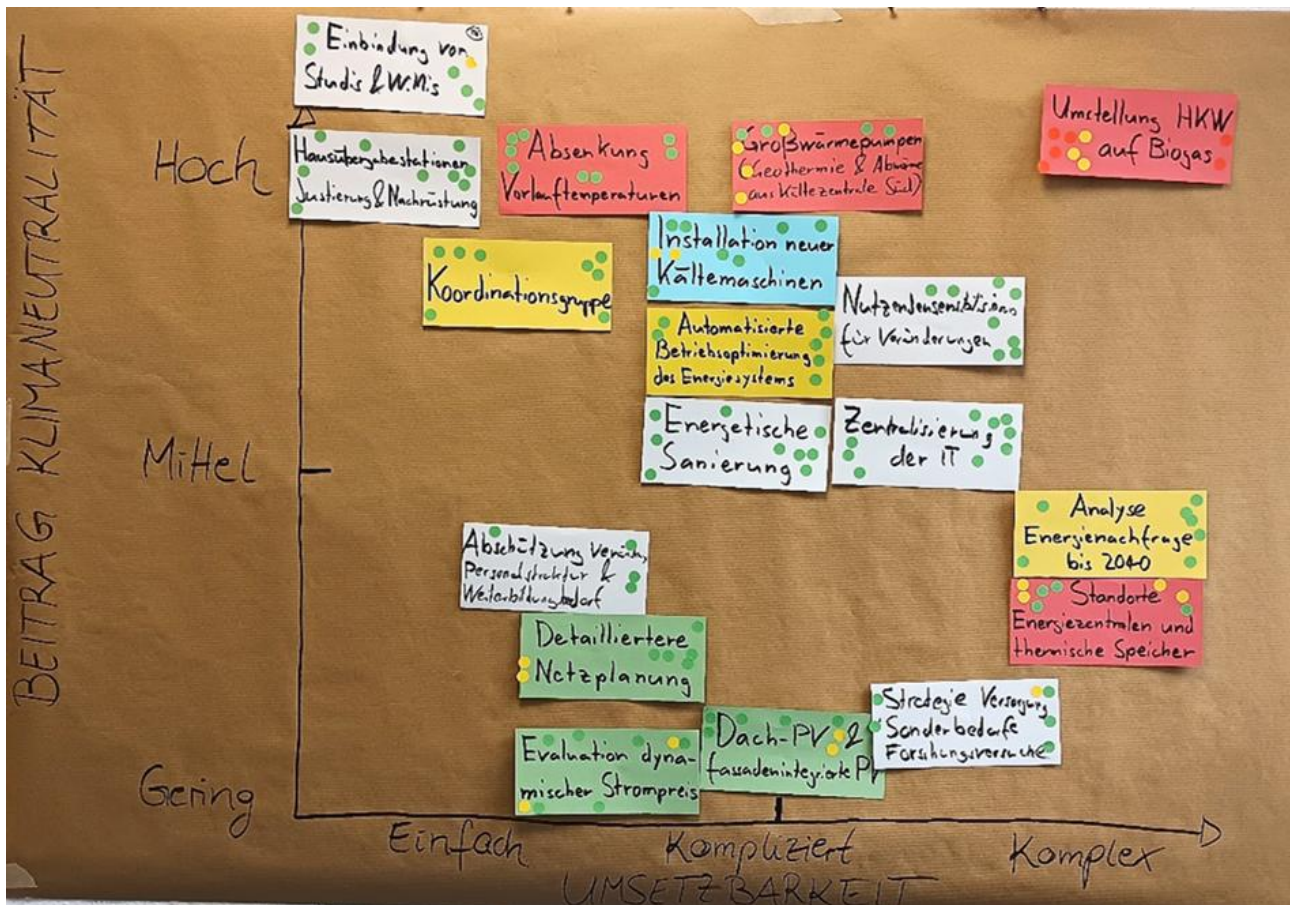


Abbildung 7-3: In Workshop 4 durch die teilnehmenden Stakeholder erarbeitete Maßnahmen sowie deren Clusterung.

7.5 Ergebnisse und Erkenntnisse des Workshops 4 – Transformationswissen: Maßnahmenpfade und Governance-Ansätze

Der 4. Workshop des Dialogprozesses fand am 25. Juli 2025 am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung statt. Teilgenommen haben Vertreter*innen des UBA, des HKW, der Dezernate 6 und 8, der Mitarbeitenden und der Studierenden der Universität sowie Vertreter*innen des Studierendenwerks Stuttgart und des studentischen Vereins „Crossing Borders Stuttgart“.

Die Ziele des Workshops waren die Entscheidung der Stakeholder für einen Transformationspfad auf Grundlage der MCDA-Ergebnisse sowie die Erarbeitung eines Maßnahmenplans zur Umsetzung des Pfades hin zu einer klimaneutralen Energieversorgung. Die inhaltlichen Programmpunkte folgten dieser Zielsetzung (vgl. Abbildung 7-4): so wurden zunächst die Ergebnisse der MCDA-Analyse präsentiert und anschließend über die präferierte Versorgungsvariante mit Ziel einer Einigung diskutiert. Im letzten Teil wurden die Maßnahmen vorgestellt, von den Teilnehmenden modifiziert, diskutiert und schließlich priorisiert.

7.5.1 Evaluation des Workshops zum Transformationswissen

Nach Vorstellung der MCDA-Ergebnisse diskutierten die Teilnehmenden die jeweiligen Vor- und Nachteile der beiden Energieversorgungsvarianten, die in der Analyse am besten abschnitten

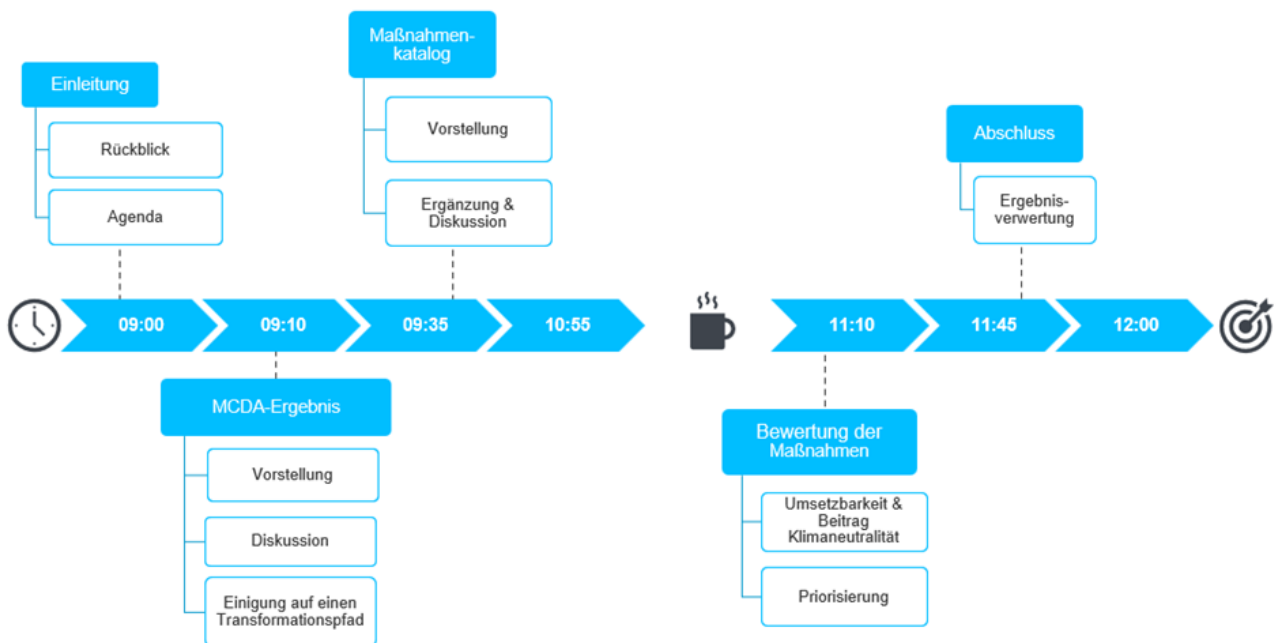


Abbildung 7-4: Zeitlicher und inhaltlicher Ablaufplan des Workshop 4 zum Transformationswissen.

(KN 2030 und KN 2035)⁹. Dabei wurde deutlich, dass die Auswahl eines geeigneten Transformationspfades für den Campus Vaihingen nicht alleine auf Grundlage der MCDA-Ergebnisse erfolgen konnte. Zwar half die Analyse, Unterschiede und Überschneidungen in den Interessen der Stakeholder über die Gewichtung der Kriterien sichtbar zu machen, wie aus der Workshop-Nachbefragung hervorging, doch blieb das entscheidende Kriterium der Realisierbarkeit außerhalb des Bewertungsrahmens. Die MCDA-Ergebnisse wurden daher von den Teilnehmenden in der Nachbefragung ($N = 11$, $n = 5$) nur als mäßig hilfreich bei der Entscheidung für eine Energieversorgungsvariante eingeschätzt.

Während einer Kurzabstimmung im Workshop selbst erachtete die Mehrheit der Stakeholder (7 von 10 Abstimmenden) den Transformationspfad der Variante KN 2035 zwar als ambitioniert, aber gegenüber KN 2030 als realistischer, da durch fehlende Fachkräfte wie Firmen und Planer, lange Bauprozesse, genehmigungsrechtliche Hürden und einen hohen Bedarf an landwirtschaftlichen Flächen zur Biogasbefeuerung die Variante KN 2030 nicht realistisch umzusetzen sei. Das Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2030 wurde somit von der Mehrheit der teilnehmenden Stakeholder als nicht realistisch eingeschätzt. Dies steht im Gegensatz zur gesetzlichen Verpflichtung im KSG des Landes

⁹ In der Nachbetrachtung zeigt sich hier, dass möglicherweise die gemeinsam mit den Stakeholdern festgelegte Art der Szenario-Auswahl unglücklich war und in einigen Fällen die Bewertung im Rahmen der MCDA für die Stakeholder erschwerte. Es erfolgte keine klare Trennung zwischen Annahmen zu externen Größen, wie Entwicklung von Energieträger und Komponentenpreisen, die durch die Akteure und Entscheider*innen nicht zu beeinflussen sind und Annahmen, die zumindest teilweise im Entscheidungsraum der Akteure liegen, wie z. B. der Zeitpunkt der Erreichung von Klimaneutralität. Dies sollte bei künftigen Case Studies besser separiert werden und aktiv mit den Stakeholdern besprochen werden, da auf diese Weise auch eine verbesserte Analyse der Robustheit der durch die Stakeholder zu beeinflussenden Entscheidungen ermöglicht werden, indem diese jeweils mit mehreren exogenen Annahmen getestet werden.

Baden-Württemberg, die Landesverwaltung bereits bis 2030 netto-treibhausgasneutral zu organisieren. Welche juristischen Implikationen sich hieraus ergeben, liegt nicht im Fokus des Dialogprozesses. Im Vordergrund stand im Workshop der Pfad hin zur Klimaneutralität, letztlich unabhängig vom Jahr der Zielerreichung, da dessen Realisierbarkeit offenkundig schwer einschätzbar war. Der erarbeitete Maßnahmenplan liefert dabei eine Orientierung zur Umsetzung dieses Pfades.

Im Endeffekt wurde ein von den Teilnehmenden gemeinsam getragener Maßnahmenplan mit Einschätzung der Umsetzungsprioritäten erarbeitet. Dabei zeigte sich, dass der Großteil der Maßnahmen mit mittlerer bis hoher Wirkung in Bezug auf das Klimaneutralitätsziel verbunden und als kompliziert bzw. komplex in der Umsetzung eingestuft wurde. In der Nachbefragung zum Workshop gaben 4 von 5 Umfrageteilnehmenden an „mit dem erarbeiteten, priorisierten Maßnahmenplan zur Erreichung eines klimaneutralen Energiesystems am Campus generell einverstanden“ zu sein.

Die „breite“ Unterstützung des Maßnahmenplans (unter Berücksichtigung der geringen Teilnahme an der Umfrage) zeigt, dass die Belange der Stakeholder sich größtenteils in den Maßnahmen wiederfinden und lässt eine grundsätzlich hohe Legitimität bei den Stakeholdern in der Umsetzungsphase vermuten, wenn auch einige offene Fragen und Herausforderungen noch gelöst werden müssen. Wesentliche offene Diskussionspunkte im Bereich der Maßnahmen zwischen den Stakeholdern betrafen u. a. Uneinigigkeiten bzgl. technischer Lösungsmöglichkeiten im Bereich der Dampfversorgung und bzgl. der Anpassungsfähigkeit des Forschungsbetriebs an die Energieerzeugung (v. a. Stromerzeugung) im Hinblick auf die Sicherstellung eines reibungslosen und versorgungssicheren Forschungsbetriebs.

Ein wesentlicher Eckpfeiler zur Steuerung des Transformationsprozesses und Verbesserung der damit zusammenhängenden Governance am Campus Vaihingen ist die Etablierung einer Koordinationsgruppe, die auch ein Wissensmanagement, u. a. zur Weiterführung der entwickelten digitalen Zwillinge der Strom- und Wärmenetze, beinhalten und transparent über ihre Arbeitsergebnisse an die Universitätsangehörigen berichten sollte. Die Koordinierungsgruppe sollte mit Mandat der Universitätsleitung, einer klaren Besetzung aus Vertreter*innen aller interessierten Beteiligten aus dem Dialogprozess und Finanzierung ausgestattet sein, um als effizientes und anerkanntes Steuerungsgremium zu fungieren.

Diese dient der weiteren Konkretisierung der Maßnahmen (z. B. Festlegung klarer Verantwortlichkeiten und zeitlicher Meilensteine), dem Monitoring des Fortschritts sowie der Anpassung von Strategien bei veränderten Rahmenbedingungen. Die Workshop-Teilnehmenden einigten sich darüber hinaus darauf, dass DiTEnS die Ergebnisse des gesamten Dialogprozesses im Rahmen eines mit ihnen abgestimmten Maßnahmenpapiers der Universitätsleitung kommuniziert. Auch ein Austausch zwischen DiTEnS und dem vom UBA beauftragten Ingenieurbüro, das mit der Anfertigung der Machbarkeitsstudie zur künftigen klimaneutralen Wärmeerzeugung am HKW beauftragt wurde, wird von den Teilnehmenden unterstützt und soll angestrebt werden.

7.5.2 Implikationen für den DiTEnS-Dialogprozess

Für zukünftige Case Studies lassen sich aus dem 4. Workshop mehrere Implikationen ableiten. Die Diskussion der verschiedenen Energieversorgungsvarianten gestaltete sich für Stakeholder zum einen als herausfordernd, da die Unterschiede zwischen den Varianten vergleichsweise gering und ein hohes technisches Vorwissen zum Verständnis der Energieversorgungsvarianten erforderlich waren. Zum anderen entstanden aus der fehlenden Unterscheidung zwischen Annahmen zu exo-

Folgende Aspekte sollten aus ihrer Sicht bei den Maßnahmen berücksichtigt werden:

- **Standortsuche und -wahl für Energiezentralen:** Der Untergrund sollte beachtet werden; Bodenlage in Bezug auf Geothermie sei schwierig am Campus. Bestehende und geplante Energiezentralen könnten ausreichen. Eine Umnutzung der HKW-Fläche sei möglich.
- **Installation von Großwärmepumpen mit den Wärmequellen oberflächennahe Geothermie, Abwärme der Kältezentrale Süd:** Abwärme in lokaler Nähe zur Regeneration benötigt. Mögliche Fläche: westlich HLRS / Schrebergärten.
- **Installation neuer Kältemaschinen:** Neue Anlagen sollen Wärme und Kälte bereitstellen
- **Netzplanung vor der Umsetzung neuer Projekte:** Ausfall bestimmter Versorger / Lastfälle müsse geprüft werden. Standby-Lasten sollten verhindert werden durch Verbesserung der Datenlage. Weiterführung des digitalen Zwillings des Stromnetzes sinnvoll.
- **Ausbau der PV auf dafür geeigneten Dächern sowie Prüfung von fassaden-integrierter PV:** Abschaltregelung (Ansteuerung über Stuttgarter Netze) müsse beachtet werden. Batteriespeicher zur Lastglättung. PV-Überschüsse mit Elektrolyseur.
- **Evaluation eines dynamischen Strompreises:** Forschungsbetrieb dürfe nicht behindert werden. Hohes preisliches Risiko, daher sollten Tarife kombiniert werden. Voraussetzungen seien die Erhöhung des Automatisierungsgrads, die Klärung des alltäglichen Handlings, andere Lieferverträge und Anreizstrukturen.
- **Umstellung des Betriebs von Anlagen des Heizkraftwerks auf Biogas:** Biogas sei lokal logistisch schwierig; nicht der gesamte Verbrauch des HKW solle ersetzt werden, sondern kleinere Mengen, die bilanziell abgerechnet werden; Wasserstoff sei evtl. ab 2035 verfügbar.

genen Einflussgrößen und durch die Entscheider*innen selbst zu beeinflussenden Größen in der Szenariodefinition Unschärfen in der Analyse und Bewertung der Ergebnisse im späteren Workshop zum Transformationswissen.

Hier wäre es für zukünftige Case Studies zunächst hilfreich, bei der Szenariodefinition sorgfältig zwischen exogenen Einflussgrößen und durch die Entscheider*innen zu beeinflussenden Größen zu trennen und die als Matrix darzustellen, d.h. ein Set von unterschiedlichen Transformationspfaden, die auf die endogenen Entscheidungen zurückgehen wird mit allen exogenen Szenarien verschnitten, um die Robustheit der Transformationspfade unter unterschiedlichen exogenen Entwicklungen aufzuzeigen.

Insgesamt sollten auch die Vor- und Nachteile der Varianten verständlicher und niedrighschwelliger aufbereitet werden. Darüber hinaus könnte es sinnvoll sein, die Varianten nicht ausschließlich auf Basis der Szenarien zu modellieren, sondern gemeinsam mit Stakeholdern zusätzlich relevante und realistische Optionen zu entwickeln, die die Transformationspfade ergänzen und nicht rein kostenoptimiert sind. Hier könnte eine Kombination aus Optimierung und gezielter Auswahl von Optionen, die den Stakeholdern als wichtig erscheinen (Kombinatorik), sinnvoll sein.

Auch die eingesetzte MCDA-Methodik sollte überdacht werden: Wesentliche entscheidungsrelevante Kriterien wie Realisierbarkeit müssen adäquat abgebildet werden können, da eine MCDA ansonsten nur begrenzt aussagekräftig und zielführend ist. Die Energiesystemmodellierungen und Simulationen erwiesen sich als wertvolle Grundlage zur Ableitung von Maßnahmen. Das Zusammenspiel von Modellierung und Stakeholder-Input gestaltete sich grundsätzlich gut, insbesondere im Hinblick auf Ergänzung und Priorisierung der Maßnahmen. Gleichzeitig zeigte sich, dass mehr Zeit für die Diskussion einzelner Maßnahmen sowie deren begründete Einordnung wünschenswert gewesen wäre, um einen Maßnahmenplan mit höherem Detailgrad erstellen zu können. Letztlich muss eine Strategie entwickelt werden, wie dominierende externe Herausforderungen (z. B. Personalmangel, genehmigungsrechtliche Hürden) im Dialog adressiert werden können ohne den Fokus auf Lösungen im eigenen Handlungsspielraum der Stakeholder zu verlieren.

8. Übergeordnete Erkenntnisse und Ergebnisse des DiTEaS-Dialogprozesses

8.1 Zusammenfassung

Ziel der Forschungsinitiative DiTEaS ist es, zu untersuchen, wie sich Energiesystemmodellierung, Visualisierungen mit Virtual Reality und partizipative Formate intelligent miteinander verknüpfen lassen, um Entscheidungsprozesse in der Energiewende zu unterstützen. Unser Ansatz soll dazu beitragen, die Entscheidungskriterien der beteiligten Stakeholder bei der Wahl von Energieversorgungsvarianten einzubeziehen und mögliche Widersprüche konstruktiv zu adressieren. Als erstes Untersuchungsgebiet diente der Universitätscampus in Stuttgart-Vaihingen. Dieser zeichnet sich durch eine heterogene Stakeholder-Lage und Gebäudestruktur, gewachsene Energieinfrastrukturen (u. a. mit einem eigenen Wärme- und Kältenetz sowie das HKW) und Einrichtungen mit hohem Energiebedarf aus und eignet sich damit als komplexes Untersuchungsgebiet zur initialen Testung des methodischen Ansatzes, insbesondere weil auch die Datenzugänglichkeit für das DiTEaS-Team hier als einfacher erwartet wurde, sodass darüber hinaus auch nach Abschluss der durchgeführten Analyse für das Forschungsprojekt Daten für Validierungen von Werkzeugen zur Verfügung stehen, die von den in diesem Bericht dargestellten Ergebnissen unabhängig sind und daher hier auch nicht dargestellt werden.

Die Dialogphasen am Campus Vaihingen gliederten sich in drei Phasen mit insgesamt vier Workshops, deren Ziel es war, in einem gemeinsamen Lernprozess relevanter Stakeholder den Aufbau von System-, Ziel- und Transformationswissen zu ermöglichen.

Dialogphase 1 (Systemwissen) behandelte den Bestand und die Potenziale des Energiesystems am Campus Vaihingen, die über Energiesystemmodellierungen, Simulationen und Visualisierungen in VR vermittelt wurden. Es wurden zentrale Infrastrukturen, Verbrauchsmuster und Potenziale sichtbar gemacht. Die Bestands- und Potenzialanalysen wurden durch Hinweise der Stakeholder präzisiert (u. a. Abwärme, PV, Geothermie). In der Diskussion wurden zentrale Hemmnisse sichtbar, wie etwa fehlende Einbindung von Stakeholdern, dezentrale Entscheidungsstrukturen, Ressourcenknappheit und Zielkonflikte zwischen Instandhaltung und Investitionen in Klimaschutz. Besonders kontrovers blieb die künftige Rolle des HKW, insbesondere im Hinblick auf Wasserstoffnutzung und Kapazitätsreduktion, die in späteren Workshops erneut aufgegriffen wurden.

Dialogphase 2 (Zielwissen) beinhaltete die partizipative Entwicklung von Zielszenarien und Priorisierung von Entscheidungskriterien sowie die Vorstellung und Diskussion modellierter bzw. simulierter Energieversorgungsvarianten. Bei letzterem kamen ebenso Energiesystemmodellierungen, Simulationen und Visualisierungen in VR zum Einsatz. Die Stakeholder gewichteten zentrale Entscheidungskriterien (darunter Kosten, Flächennutzung und Flexibilität) nach ihren jeweiligen Prioritäten. Parallel legten sie die Annahmen für Szenarien mit Parametern wie zukünftigen Energieträgerpreisen, Flächen- und Abwärmepotenzialen fest und Annahmen zum Zeitpunkt der gewünschten Erreichung von Klimaneutralität, aus denen sich dann insgesamt die zu untersuchenden Szenarien ergaben (KN 2030, KN 2035, KN 2040). Bei der Diskussion der Varianten zeigten sich Spannungsfelder zwischen ambitionierten Klimazielen (2030) und praktischer Realisierbarkeit (2035 / 2040). Auch die Unsicherheit über Verfügbarkeit und Preise künftiger Energieträger (insbesondere Biogas und Wasserstoff) spielte eine große Rolle.

Dialogphase 3 (Transformationswissen) stellte die Kriterien-basierte Bewertung der Energieversorgungsvarianten, die Entscheidung für einen Transformationspfad und die Erarbeitung eines Maßnahmenplans in den Vordergrund. Die Mehrheit der Stakeholder sprach sich für einen Pfad mit Zielhorizont 2035 aus, da dieser als realistisch und zugleich ambitioniert wahrgenommen wurde. Parallel dazu wurde ein Maßnahmenplan erarbeitet, der kurzfristige Quick Wins (z. B. Nachrüstung von Übergabestationen, Absenkung der Vorlauftemperaturen) ebenso enthält wie strategische mittel- bis langfristige Schritte (z. B. Installation von Großwärmepumpen, energetische Sanierungen, Betriebsoptimierung). Damit entstand eine erste gemeinsame Roadmap, die als Grundlage für die weitere Transformation dienen kann.

8.2 Abgeleitete Erkenntnisse und Ergebnisse

Die detaillierten Beschreibungen und Ergebnisse der einzelnen Dialogphasen finden sich in ihren jeweiligen Kapiteln. In diesem Abschnitt soll zusammenfassend im Hinblick auf die Gesamtzielsetzung darauf eingegangen werden, inwiefern der methodische Ansatz mit den Komponenten Dialog, Modellierung bzw. Simulation und Visualisierung in VR dazu beigetragen hat, Herausforderungen und mögliche Widersprüche zwischen Stakeholdern konstruktiv zu adressieren. Dabei soll insbesondere auch auf kritische Aspekte eingegangen werden.

Der strukturierte Dialog bildete die Grundlage des Prozesses. In moderierten Workshops kamen Vertreter*innen aus der Verwaltung, der Energieversorgung, der Mitarbeiterschaft und der Studierenden zusammen, die in ihrem Arbeitsalltag selten in dieser Zusammensetzung in Austausch treten. Allein diese Zusammenkunft, die frühe und breite Beteiligung, wurde vielfach als positiv wahrgenommen. So formulierte ein Teilnehmender in der Evaluationsbefragung zum Dialogprozess: „Alle an einen Tisch geholt, in einer Situation, in der es diesen Tisch nicht gab“. Der Dialog machte zentrale Spannungsfelder sichtbar, die sich wie ein roter Faden durch die Diskussionen zogen: die Abwägung zwischen Versorgungssicherheit, Kosten und Klimaschutz, die Differenz zwischen theoretischen Potenzialen und praktischer Umsetzbarkeit oder das Dilemma zwischen kurzfristigen Instandhaltungsbedarfen und langfristigen Zukunftsinvestitionen. Auch Unsicherheiten über Energieträger wie Wasserstoff oder Biogas, sowie über die künftige Energienachfrage, wie bspw. durch neue Großverbraucher oder Veränderungen im Lehrbetrieb, wurden ausdrücklich thematisiert.

Die Qualität des Dialogs bestand darin, dass diese Konfliktlinien nicht verdeckt, sondern explizit benannt und von den Stakeholdern offen diskutiert wurden. Der direkte Austausch förderte Verständnis für die jeweiligen Perspektiven und Zwänge und legte Zielkonflikte offen, die bislang implizit oder nur bilateral diskutiert wurden. Damit konnte ein gemeinsames Verständnis der Ausgangslage und Herausforderungen entstehen. Auch die Formalisierung und Dokumentation möglicher Optionen und Szenarien wurde von Teilnehmenden als förderlich empfunden.

Dennoch blieben methodische und organisatorische Grenzen des Dialogs sichtbar. So wurde die enge zeitliche Taktung der Workshops seitens der Teilnehmenden kritisiert, Diskussionen wirkten „gehetzt“ oder „abgewürgt“ und boten stellenweise zu wenig Raum für vertiefte Auseinandersetzungen. Kritisch zu sehen ist auch die starke technische Ausrichtung des Dialogs. Stakeholder ohne spezifisches Fachwissen konnten vielen Inhalten begrenzt folgen und waren entsprechend eingeschränkt in ihrer Beteiligungs- und Diskussionsfähigkeit. Ein vorgeschaltetes „Technik-Onboarding“ wurde von Teilnehmenden diesbezüglich als hilfreich angeregt. Auch war die Beteiligung nicht vollständig. Schlüssel-Stakeholder wie die Universitätsleitung fehlten, was die Anschlussfähigkeit der Ergebnisse an reale Entscheidungsprozesse möglicherweise einschränkt. Dies verweist direkt

auf das Hemmnis des fehlenden Mandats sowie auch Ressourcenknappheit in den Verantwortungsebenen, wie in der Stakeholder-Analyse identifiziert. Auch die nicht kontinuierliche Teilnahme einzelner Stakeholder über alle Workshops hinweg (aufgrund zeitlicher Kapazitäten) verhinderte, dass offene Fragen abschließend diskutiert werden konnten. Darüber hinaus dominierten Hemmnisse, die extern begründet sind (z. B. Fachkräftemangel, finanzielle Restriktionen, bürokratische Hürden) stellenweise den Prozess und verhinderten dadurch zum Teil eine konstruktive Lösungsfindung im eigenen Handlungsspielraum.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass der Dialog einen moderierten Raum für Austausch geschaffen hat, der allerdings durch zeitliche, inhaltliche und strukturelle Restriktionen geprägt war.

Die Modellierungen und Simulationen des Energiesystems stellten das analytische Rückgrat des Dialogprozesses dar. Sie erlaubten es, Betriebszustände aufzuzeigen, Potenziale zu bestimmen, Szenarien zu vergleichen, Konsequenzen unterschiedlicher Annahmen sichtbar zu machen und schließlich konkrete Maßnahmen abzuleiten. Damit konnte, auch durch konkrete quantitative Ergebnisse, das Verständnis über das bestehende Energiesystem sowie zukünftige klimaneutrale Optionen bei den Teilnehmenden gestärkt werden. Besonders wertvoll war die Möglichkeit, Parameter gemeinsam zu variieren: Unterschiedliche Annahmen der Stakeholder, etwa zu Flächenpotenzialen, Energieträgerpreisentwicklungen oder PV-Ausbau, konnten in Modellparametern gespiegelt werden und damit in die Modellierung der Energieversorgungsvarianten einfließen und in ihren Auswirkungen transparent gemacht werden. Damit griff die Modellierung Hemmnisse wie technische Komplexität, schwierige Potenzialbestimmungen und Strategie- und Technikkonflikte auf und machte diese bearbeitbar.

Allerdings zeigte sich auch, dass die Modelle in Teilen sehr komplex und voraussetzungsreich waren. Für einige Stakeholder ohne energietechnische Expertise war es schwierig, die Annahmen und Ergebnisse vollständig nachzuvollziehen. Zudem konnten die Modelle nur einen Teil der relevanten Fragen beantworten. Ein kritischer Punkt war bspw. die Dampfversorgung, die für bestimmte Forschungsprozesse unabdingbar ist und im Modell nicht abgebildet werden konnte. Auch die Kostenberechnungen erwiesen sich als problematisch. Mehrere Teilnehmende äußerten Zweifel an der Glaubwürdigkeit und Verständlichkeit der Gesamtkosten der Energieversorgungsvarianten, da eine differenzierte Aufschlüsselung fehlte und Annahmen nicht ausreichend transparent kommuniziert werden konnten. Auch individuelle Kosten für Stakeholder konnten nicht modelliert werden, was die Anschlussfähigkeit für die Praxis einschränkte und das Nutzer-Investor-Dilemma nicht adressieren konnte. Die Definition der Versorgungssicherheit und damit angenommenen Redundanzen in den Modellen erwies sich als kontrovers. So wurde von den Stakeholdern hervorgehoben, dass für die geplante Abwärmezentrale am HLRS III eine vollständige Redundanz berücksichtigt werden müsse, was so in der Wärmenetzsimulation jedoch nicht umgesetzt wurde. Auch Unsicherheiten über Modellannahmen, wie etwa zu Rohstoffpreisen oder zur Energienachfrageentwicklung, blieben bestehen.

Die Auseinandersetzung der Stakeholder mit den aufgezeigten Energieversorgungsvarianten (KN 2030, KN 2035, KN 2040) schien etwas schwierig, insbesondere im Hinblick auf deren konkrete Auswirkungen sowie Vor- und Nachteile, wie die Nachbefragung zu Workshop 3 ergab ($N = 7$, $n = 4$). Dies kann einerseits an der Verknüpfung fehlender Unterscheidung zwischen unterschiedlichen exogenen und endogen zu beeinflussenden Annahmen in den Szenarien liegen und zum anderen mit einer nicht adressatengerechten (eher technisch orientierten) Vermittlung stehen. Darüber hinaus waren auch die Unterschiede in den unterschiedlichen Varianten nur gering. Auch wurden aus Stakeholder-Sicht nicht alle relevanten realistischen Versorgungsoptionen abgedeckt (ebenfalls

Umfrage 3), was den Möglichkeitsraum und die Legitimität der vorliegenden Varianten möglicherweise etwas einschränkte.

Insgesamt zeigt sich, dass die Modell- und Simulationsergebnisse eine Informations- und Wissensbasis für die Diskussion über Bestand, Potenziale und mögliche Transformationspfade darstellte und eine Diskussion darüber überhaupt erst ermöglichten. So kamen neue Herausforderungen wie die Beachtung des anspruchsvollen Untergrundes im Falle von Geothermie oder die Frage nach der Anpassungsfähigkeit des Forschungsbetriebs an die Energieerzeugung letztlich getriggert durch die Modelle auf. In Teilen waren die Modelle jedoch stark von unsicheren Annahmen abhängig, die einer analytischen Vorgehensweise auch nicht zugänglich sind, da es sich um Annahmen zur Zukunft handelt (u. a. Wasserstofffrage, Preisentwicklungen, zukünftiger Energiebedarf geprägt durch Mobilitäts-, Wohn- und Arbeitskonzepte).

Eng mit der Modellierung verknüpft war die strukturierende MCDA. Sie sollte den Stakeholdern ermöglichen, die modellierten Energieversorgungsoptionen anhand von Kriterien wie Gesamtkosten, Flächennutzung oder Flexibilität zu bewerten. Die Bewertung der Methode erwies sich dabei als ambivalent. Einerseits bot sie die Möglichkeit, Präferenzen der Stakeholder durch Gewichtungen sichtbar zu machen. Andererseits war einigen Teilnehmenden unklar, wie die Kriterien zu verstehen und zu bewerten waren. So stellte sich bspw. beim Kriterium „Flächennutzung“ die Frage, ob viel Flächenverbrauch als positiv oder negativ gewertet werden sollte (sollte möglichst viel nutzbare Fläche genutzt oder möglichst wenig Fläche versiegelt werden?). Zudem wurden soziale Aspekte wie Akzeptanz oder Gemeinwohl aus Stakeholder-Sicht nur unzureichend abgebildet. Eine große Schwäche war, dass das Kriterium Realisierbarkeit nicht quantifiziert werden konnte, da zu wenige Informationen vorlagen. Ohne eine Betrachtung der Realisierbarkeit war die Diskussion theoretisch machbarer Maßnahmen aus Stakeholder-Sicht jedoch nur eingeschränkt zielführend. Darüber hinaus ließen der enge zeitliche Abstand zwischen den Workshops sowie modellseitige Einschränkungen keine Möglichkeit, das Stakeholder-Feedback zu den Kriterien einzuarbeiten. Während die MCDA-Ergebnisse rechnerisch die Variante mit Klimaneutralitätsziel 2030 nahelegte, bevorzugte die Mehrheit der Teilnehmenden in Workshop 3 KN 2035 als realistischeren Transformationspfad. Damit erwies sich die MCDA-Methode weniger als Entscheidungsinstrument, sondern vielmehr als Diskussionshilfe, die Unterschiede sichtbar machte, aber keine Konvergenz erzeugte.

Dies verdeutlicht, dass Modelle und Bewertungsverfahren alleine nicht ausreichen, um zu tragfähigen Entscheidungen zu kommen, sondern teils von organisatorischen und sozialen Faktoren (z. B. Fachkräftemangel, genehmigungsrechtlichen Hürden) und weiteren bei einzelnen Akteuren relevanten und teilweise nicht explizit kommunizierbaren Entscheidungskriterien überlagert werden, die in einem diskursiven Verfahren zielführend aufgegriffen und ausgehandelt werden müssen.

In der CAVE wurden Teile des Energiesystems dreidimensional und immersiv dargestellt, um die Thematik greifbarer zu machen (insb. Gebäudestruktur, Wärme- und Stromnetze). Die Visualisierung in Virtual Reality ergänzte die Modellierung somit durch eine räumlich-konkrete Ebene. Einige Teilnehmende empfanden die CAVE-Darstellungen als hilfreich in der Veranschaulichung abstrakter Zusammenhänge. Besonders das Aufzeigen der Platzverhältnisse in Leitungskanälen oder die Übersicht über den Campus ließen sich dreidimensional gewinnbringend vermitteln. Die VR vermittelte in diesen spezifischen Anwendungsfällen Aspekte, die mit Folien oder Karten schwer zu erfassen gewesen wären. Ein Teilnehmender formulierte in der Evaluierungsumfrage zu Workshop 1 ($N = 13, n = 9$): „Die 3D-Visualisierung macht die Thematik greifbarer in der Verbindung mit der gebauten Realität“. Auch stimmte die Mehrheit der Umfrageteilnehmenden zu, dass die Visualisierung in der CAVE die Teilnahme an einem Beteiligungsverfahren attraktiver macht.

Gleichzeitig wurde deutlich, dass der Mehrwert gegenüber klassischen 2D-Darstellungen begrenzt blieb, solange keine konkreten Entwürfe oder Szenarien in der VR erlebbar waren. Stakeholder äußerten, dass die Übersicht zwar nützlich und abwechslungsreich gewesen sei, „darüber hinaus aber nicht so viel“ geboten habe. Einige Stakeholder wünschten sich detailliertere Visualisierungen, wie bspw. eine Großwärmepumpe tatsächlich aussehen oder sich das Erscheinungsbild des Campus durch Umsetzung einer Variante verändern würde. Auch ein potenzieller Mehrwert einer dynamischen (in Echtzeit) Visualisierung von Parameterauswirkungen (z. B. Netzlast) auf das Versorgungsnetz wurde angemerkt. Vereinzelt berichteten Stakeholder zudem von „Cyber Sickness“, das ein körperliches Unwohlsein während des Aufenthalts in der CAVE beschreibt.

Insgesamt trug die VR-Komponente zur Attraktivität des Prozesses bei und förderte in einzelnen, spezifischen Anwendungsfällen die Anschaulichkeit. Es stellte sich heraus, dass der Nutzen der CAVE sehr anwendungsspezifisch ist. Nach Abschluss des Dialogprozesses lässt sich vermuten, dass Anwendungsfälle mit besonderem „CAVE-Nutzen“ vor allem solche umfassen, bei denen die immersive Qualität der CAVE zum Tragen kommt. Dies beinhaltet Situationen, in denen das Erleben baulicher Veränderungen in Bezug auf die bauliche Realisierbarkeit im Vordergrund steht (z. B. ausreichende Platzverhältnisse für Energiezentralen, Versorgungsleitungen, PV-Module) sowie Fälle, in denen die ästhetischen Auswirkungen baulicher Veränderungen auf die Umgebung vermittelt werden sollen.

8.3 Fazit zur Umsetzung des DiTeNS-Dialogprozesses

Die Kombination aus Dialog, Modellierung, Simulation und VR-Visualisierung am Campus Vaihingen hat dazu beigetragen, die Komplexität der Energiewende mit Fokus auf die Wärmeversorgung sichtbar zu machen und Widersprüche zwischen Stakeholdern zu adressieren. Der Ansatz förderte gegenseitiges Verständnis und Vertrauen und legte die Grundlage für weitere Kooperationen. Auch hat der Ansatz dazu beigetragen, die Teilnehmenden zu befähigen, sich mit dem Thema der Wärmewende auseinanderzusetzen, wie die Evaluierungsumfrage zum Dialogprozess zeigte ($N = 17$, $n = 7$). Mit Blick auf die Ausgangslage lässt sich resümieren, dass der methodische Ansatz am Campus Vaihingen vor allem interne Hemmnisse adressieren konnte. Die unzureichende Kommunikation und fehlende Abstimmung zwischen den Stakeholdern wurden durch den strukturierten Dialog aufgegriffen, Zielkonflikte wie Klimaschutz versus Versorgungssicherheit oder Konflikte in Bezug auf das planerische Vorgehen (Forschung versus Betriebspraxis) konnten transparent gemacht werden und durch die angestrebte Kooperation zwischen dem UBA und Forschenden teils aufgelöst werden.

Mit dem Maßnahmenplan, insbesondere der geplanten Koordinierungsgruppe, entstand zudem ein erster Ansatz zur Bearbeitung der Governance-Lücke. Die Modellierung bzw. Simulation trug dazu bei, technische Potenziale, Kosten und Szenarien aufzuzeigen und fungierte als sachliche Diskussionsgrundlage. Offen blieben dabei allerdings einige Fragen, etwa die Sicherstellung der Dampfversorgung für den Forschungsbetrieb, die Plausibilität und Differenzierung von Kostenannahmen sowie die Definition und Gewährleistung von Versorgungssicherheit. Weitere Untersuchungen sind hier notwendig. Ungelöst blieben auch grundlegende strukturelle Herausforderungen: eine verbindliche, mandatierte Strategie, die aber durch das Maßnahmenpapier und die Koordinierungsgruppe angestrebt wird und das ungelöste Nutzer-Investor-Dilemma. Der Dialogprozess legte an mehreren Stellen die Divergenz zwischen gesetzlich vorgeschriebenem Ziel der Klimaneutralität (2030) und einem aus Stakeholder-Sicht (mehrheitlich) realistisch zu erreichenden Zielpfad (2035) offen. Auch diese Diskrepanz und die Erarbeitung eines klar definierten Ziels konnten nicht erreicht werden. Ebenso konnten externe Restriktionen (Energiekrise, Fachkräftemangel, bürokratische Hürden) im

Prozess nicht gelöst werden, da sie außerhalb des Handlungsrahmens liegen. Es können allerdings die Auswirkungen solcher Restriktionen adressiert werden.

Insgesamt liegt der Hauptertrag in der Schaffung einer gestärkten Kooperationsbereitschaft der beteiligten Stakeholder, der Offenlegung ihrer Präferenzen und der Erarbeitung eines gemeinsamen Orientierungsrahmens in Form des Maßnahmenplans. Dies ist eine gute Grundlage, auf der weitere Planungen für eine klimaneutrale Energieversorgung aufbauen können.

Für den Erfolg künftiger Prozesse ist entscheidend, soziale und organisatorische Aspekte gleichrangig neben technischen zu berücksichtigen, die Methoden stärker an die Bedarfe und Wissensstände der Stakeholder anzupassen und die Einbindung der Entscheidungsebene sicherzustellen. Im Dialogprozess war vieles stark vorgeprägt (z. B. Modellparameter, MCDA-Kriterien) und von Expert*innen-Input dominiert. Dies sollte im Sinne der Ko-Produktion zukünftig offener und partizipativer mit Stakeholdern erarbeitet werden, auch um die Teilhabechancen aller Stakeholder zu erhöhen. Wie mit modellseitigen Einschränkungen bei der Einarbeitung von Stakeholder-Feedback zukünftig umgegangen werden kann, stellt eine wichtige Anforderung an die Modelle dar. Hemmnisse, die extern begründet sind (z. B. Fachkräftemangel, finanzielle Restriktionen, bürokratische Hürden) bleiben eine Herausforderung im Dialogprozess, da sie weder durch Diskurs, Modellierung bzw. Simulation noch durch Visualisierungen konstruktiv bearbeitet werden können. Um diese nicht zu „Show-Stopper“ lancieren zu lassen, sollte in zukünftigen Dialogprozessen verstärkt auf die eigenen Handlungsspielräume der teilnehmenden Stakeholder fokussiert werden und diese exogenen Einflüsse als zu beachtende Restriktionen sinnvoll berücksichtigt werden.

8.4 Handlungsempfehlungen für die beteiligten Stakeholder und die Universitätsleitung

Um die Ergebnisse des Dialogprozesses in konkrete Handlungsschritte zu überführen, wurden im Rahmen von Workshop 4 gemeinsam mit den Stakeholdern Maßnahmen für die klimaneutrale Transformation des Energiesystems am Campus Vaihingen entwickelt. Auf Grundlage der Stakeholder-Einordnung der Maßnahmen in einer Matrix bezüglich der Klimaneutralitätswirkung und Umsetzbarkeit, ist nachfolgende Priorisierung abgeleitet worden:

- **Sofortmaßnahmen („Quick Wins“):** Maßnahmen mit hohem Beitrag zur Klimaneutralität und einfacher Umsetzbarkeit bilden die erste Priorität. Sie sollten kurzfristig realisiert werden, da sie mit überschaubarem Aufwand große Wirkung entfalten.
- **Mittel- bis langfristige Maßnahmen:** Maßnahmen mit hohem Beitrag zur Klimaneutralität, die als kompliziert oder komplex einzustufen sind, sind planungs- und ressourcenintensiv und sollten durch gezielte Einbindung von Expert*innen oder die Koordination verschiedener Stakeholder-Gruppen in einem abgestimmten Steuerungsprozess umgesetzt werden. In einigen Fällen sind u. a. detailliertere technische Untersuchungen oder ökonomische Bewertungen, die eine fundierte Entscheidungsgrundlage schaffen, und dann auch eine Detailplanung eine notwendige Voraussetzung für die Umsetzung. Diese Maßnahmen sollten gezielt angegangen und sorgfältig für eine mittel- bis langfristige Zielerreichung geplant werden.
- **Ergänzende Maßnahmen:** Maßnahmen mit geringem bis mittlerem Beitrag und einfacher Umsetzbarkeit zum Klimaneutralitätsziel können flankierend umgesetzt werden, sofern Kapazitäten verfügbar sind. Sie leisten einen zusätzlichen Beitrag, ohne verfügbare Ressourcen wesentlich zu belasten.

- **zu prüfende Maßnahmen:** Maßnahmen mit geringem bis mittlerem Beitrag und vergleichsweise hohem Umsetzungsaufwand (kompliziert/komplex) sollten sorgfältig im Hinblick auf ihre Umsetzung geprüft und in Abhängigkeit von vorhandenen Ressourcen und Interdependenzen zu anderen Maßnahmen priorisiert werden.

Insgesamt ergibt sich hieraus ein gestuftes Vorgehen: Während „Quick Wins“ sofort umgesetzt werden sollten, bedürfen die strategischen mittel- langfristigen Maßnahmen weitere detailliertere Planungsschritte und ggf. Koordination. Ergänzende Maßnahmen sind parallel sinnvoll. Maßnahmen mit ungünstigem Aufwand-Nutzen-Verhältnis sollten sorgfältig überprüft und in Abhängigkeit vorhandener Ressourcen und bei Wechselwirkungen mit anderen, prioritären Maßnahmen, umgesetzt werden.

Tabelle 8-1 fasst die Maßnahmen zusammen und ordnet sie den jeweils verantwortlichen Stakeholdern zu. Die spezifischen Beschreibungen, Handlungsschritte und Meilensteine der einzelnen Maßnahmen finden sich in den Maßnahmen-Steckbriefen in Anhang 4. Es wird empfohlen, den Maßnahmenplan nicht nur als Übersicht zu verstehen, sondern als verbindliche Arbeitsgrundlage für Koordination und Fortschrittskontrolle. Die benannten Stakeholder sollten ihre Zuständigkeiten verbindlich annehmen, Ressourcen bereitstellen und über den Fortschritt regelmäßig in der geplanten Koordinierungsgruppe (Maßnahme 1.1) transparent berichten.

Die Workshops haben gezeigt, dass der strukturierte Austausch maßgeblich zu Perspektivwechseln und gegenseitigem Verständnis beiträgt. Daher wird empfohlen, diesen Dialog dauerhaft in Form einer regelmäßig tagenden Koordinierungsgruppe mit klarer Agenda (Maßnahme 1.1) zu verstetigen. Damit der Dialog auch die notwendige Breite gewinnt, sollten weitere Gruppen wie Studierende und Mitarbeitende sowie Vertretende von universitätsexternen Einrichtungen wie der Fraunhofer-Institute, der Max-Planck-Gesellschaft oder des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt einbezogen werden.

Der Universitätsleitung kommt hierbei eine zentrale Rolle zu: Sie sollte den Maßnahmenplan als verbindliche Arbeitsgrundlage nutzen und die geplante Koordinierungsgruppe mit einem klaren Mandat und ausreichenden Ressourcen ausstatten. Nur mit einer solchen Legitimation kann die Gruppe wirksam agieren und die Umsetzung der Maßnahmen koordiniert vorantreiben. Zur Legitimation und Sichtbarkeit gehört zudem, dass die Gruppe regelmäßig über ihre Arbeit berichtet.

Neben den im Maßnahmenplan verankerten technischen und organisatorischen Schritten wurde im weiteren Dialog deutlich, dass für eine erfolgreiche Umsetzung auch ergänzende prozessuale Maßnahmen erforderlich sind. Diese betreffen insbesondere Fragen der Governance, der Ressourcen, der Kommunikation sowie des Wissensmanagements.

Eine enge Abstimmung laufender Studien und Planungen ist notwendig. Die vom UBA in Auftrag gegebene Machbarkeitsstudie zur künftigen klimaneutralen Wärmezeugung (HKW Pfaffenwald) sollte mit den Ergebnissen von DiTEoS aktiv zusammengeführt werden. Auch kleinere wissenschaftliche Arbeiten und studentische Projekte können gezielt integriert werden, um praxisorientierte Verbesserungen zu erschließen.

Weitere Finanzierungsquellen sollten für weniger kostenintensive Maßnahmen geprüft werden, etwa Stiftungen mit einschlägiger Zielsetzung oder auch öffentliche Förderprogramme und der Klimainnovationsfonds oder die Universitätsstiftung. Gleichzeitig wurde deutlich, dass nicht allein die Finanzierung, sondern vor allem der Fachkräftemangel einen großen Engpass darstellt. Hierbei spielen

Erkenntnisse und Ergebnisse des Dialogprozesses

Tabelle 8-1: Maßnahmen-Empfehlung für den Campus Vaihingen aus dem Dialogprozess.

Nr.	Maßnahme	Verantwortliche Stakeholder	Gekoppelte Maßnahmen
1	Sofortmaßnahmen (Quick Wins)		
1.1	Gründung einer Koordinierungsgruppe zur Steuerung und Begleitung der Transformation am Campus Vaihingen	Universitätsleitung, UBA	-
1.2	Einbindung von Studierenden & wissenschaftlichen Mitarbeitenden in der Umsetzung von Maßnahmen	UBA, HKW, Dezernat 6	-
1.3	Justierung und Nachrüstung der Hausübergabestationen	Dezernat 6, UBA, HKW, Dritte	-
1.4	Absenkung der Vorlauftemperaturen (kann nur bei vorheriger Umsetzung der Maßnahme 1.3 erfolgen)	HKW, Dritte, Dezernat 6 & 8	1.3
2	Mittel- bis langfristige Maßnahmen		
2.1	Standortsuche und -wahl für Energiezentralen und thermische Speicher	UBA	1.4, 2.2, 2.5
2.2	Installation von Großwärmepumpen mit den Wärmequellen oberflächennahe Geothermie, Abwärme der Kältezentralen	UBA, HKW	1.4, 2.1 2.3, 2.5
2.3	Installation neuer Kältemaschinen	UBA, HKW	2.2
2.4	Automatisierte Betriebsoptimierung des Energiesystems	HKW, Rektorat, Dezernat 6 & 8	2.2
2.5	Energetische Sanierung	UBA, Dritte, ggf. Dezernat 6	1.3, 2.1, 4.1
2.6	Zentralisierung der IT	Universitätsleitung, Dezernat 6	
2.7	Sensibilisierung der Nutzenden für Veränderungen	Universitätsleitung	-
2.8	Umstellung des Betriebs von Anlagen des Heizkraftwerks auf Biogas (bei Zieljahr 2030 der Klimaneutralität)	HKW, UBA	2.1, 2.2
3	Ergänzende Maßnahmen		
3.1	Abschätzung von Veränderungen in der Personalstruktur und des Weiterbildungsbedarfs	Universitätsleitung, HKW	-
3.2	Detailliertere Netzplanung vor der Umsetzung neuer Projekte	HKW, UBA	-
3.3	Evaluation eines dynamischen Strompreises	Dezernat 6 & 8 (Ministerien), HKW	2.4
4	Zu prüfende Maßnahmen		
4.1	Ausbau der PV auf dafür geeigneten Dächern sowie Prüfung von Fassaden-integrierter PV	UBA	2.5
4.2	Erarbeitung einer Versorgungsstrategie zur Deckung von Sonderbedarfen durch Forschungsversuche	UBA, HKW	-
4.3	Analyse der Energienachfrage bis 2040 am Campus Vaihingen zur Auslegung des zukünftigen Energiesystems	UBA, Dezernat 6	-

eine klare Kommunikationsstrategie und die Entwicklung einer sichtbaren Marke eine zentrale Rolle, sowohl für die interne Motivation als auch für die externe Personalgewinnung, insbesondere beim UBA.

Ein wesentliches Hemmnis am Campus war die fehlende Transparenz über strategische Weichenstellungen, was bei vielen Stakeholdern zu Unsicherheiten führte. Um diesem Defizit zu begegnen, sollte die Universitätsleitung zentrale Entscheidungen und Fortschritte im Transformationsprozess nicht nur innerhalb der einzurichtenden Koordinierungsgruppe, sondern gezielt an alle Universitätsangehörigen kommunizieren. Durch regelmäßige und adressatengerechte Informationen an Mitarbeitende, Studierende und weitere Gruppen kann Orientierung geschaffen, das Vertrauen in den Prozess gestärkt und die Akzeptanz für anstehende Veränderungen erhöht werden.

Eine langfristige Transformation erfordert, dass auch Wissens- und Datenmanagement systematisch verankert werden. Dazu gehört die Pflege und Weiterentwicklung der digitalen Zwillinge der Strom- und Wärmenetze, die Verbesserung der Datenlage (z. B. Wärmebedarfe, Sanierungsstände) sowie die klare Zuweisung von Verantwortlichkeiten. Diese Aufgaben sollten in die Arbeit der Koordinierungsgruppe integriert werden, sodass Daten, Modelle und Analysen fortlaufend aktualisiert, genutzt und in Entscheidungsprozesse eingespeist werden können.

8.5 Nächste Schritte im DiTEaS-Dialogprozess und dessen Fortführung

Mit dem DiTEaS-Dialogprozess wurde bewusst ein strukturierter und partizipativer Rahmen geschaffen, um einen offenen, faktenbasierten und lernorientierten Austausch zur Transformation der Energieversorgung am Campus Vaihingen zu ermöglichen. Ziel dieses Prozesses war es nicht, unmittelbar verbindliche Entscheidungen zu treffen (aber zu ermöglichen), sondern ein gemeinsames Verständnis zentraler Herausforderungen, Zielrichtungen und Handlungsoptionen zu entwickeln und diese transparent zu dokumentieren.

Das Ziel ist es gemeinsam mit den beteiligten Stakeholdern ein Papier zu verfassen, welches als zentrales Ergebnis dieses Dialogprozesses zu verstehen ist und zielführende Entscheidungspfade aufzeigt. Es soll die im Verlauf der Workshops gewonnenen Erkenntnisse, Bewertungen und Priorisierungen der beteiligten Akteursgruppen bündeln und diese in einem konsistenten Transformationspfad zusammenführen.

Die Erstellung des Maßnahmenpapiers verfolgt dabei die Absicht, die Ergebnisse des Dialogs dauerhaft verfügbar zu machen, Anschlussfähigkeit für weitere Diskussionen zu schaffen und eine fundierte Grundlage für nachfolgende Entscheidungs- und Umsetzungsprozesse bereitzustellen. Zugleich soll das Papier als Referenzrahmen dienen, an dem sich die Fortführung des Dialogs sowie die Konkretisierung und Weiterentwicklung einzelner Maßnahmen orientieren können. Vor dem Hintergrund des zeitlich befristeten Charakters der Forschungsinitiative DiTEaS wird dem Maßnahmenpapier eine besondere Rolle zugeschrieben.

Das Maßnahmenpapier wurde im Anschluss an den DiTEaS-Dialogprozess auf Grundlage der gemeinsam erarbeiteten Inhalte erstellt und in enger Abstimmung mit den beteiligten Personen weiterentwickelt. Die Rückmeldungen, fachlichen Ergänzungen und Verständigungen der unterschiedlichen Akteursgruppen konnten dabei erfolgreich aufgenommen und in eine konsistente Fassung überführt werden. Auf diese Weise entstand ein gemeinsam getragenes Ergebnisdokument, das die

im Dialogprozess entwickelten Maßnahmen systematisch bündelt und als belastbare Grundlage für die weiteren Schritte dient. (León et al. 2026)

Es soll dazu beitragen, den begonnenen Dialog über die Projektlaufzeit hinaus zu verstetigen, neue Akteure einzubinden und den Übergang von der dialogischen Erarbeitung hin zu institutionellen Strukturen zu unterstützen. In diesem Sinne versteht sich das Maßnahmenpapier nicht als Abschlussdokument, sondern als Ausgangspunkt für die nächsten Schritte im Prozess und als Impuls zur kontinuierlichen Fortführung des Dialogs.

9. Abschließende Betrachtung

9.1 Erkenntnisgewinne aus dem DiTeNS-Dialogprozess im Mock-Up am Campus Vaihingen

Im Projektverlauf wurden zahlreiche Erfahrungen gesammelt, die für zukünftige Case Studies wertvolle Hinweise liefern. Zunächst ist festzustellen, dass die Ergebnisse und auch das Feedback der beteiligten Akteure das grundsätzliche Vorgehen als nützlich und valide bewertet haben, sodass davon ausgegangen werden kann, dass der Ansatz von DiTeNS tragfähig ist.

Für den zukünftigen Einsatz des DiTeNS-Dialogprozesses, der in den kommenden beiden Case Studies im Feld demonstriert werden soll, sind auch schon im Antrag an einigen Stellen abweichende Bedingungen erwartet worden, wie bspw. die Vielzahl unabhängiger Personen, die Entscheidungen treffen, hohe Heterogenität bzgl. Entscheidungssituation und Entscheidungspräferenzen, andere Datenlage. Hier sind bereits Anpassungen vorgenommen worden, die nach Projektplan parallel zum Mock-Up angelaufen sind. Darüber hinaus resultieren nochmals wichtige Erkenntnisse aus der Durchführung des DiTeNS-Dialogprozesses am Campus Vaihingen mit seinen Workshops, die ebenfalls in die weitere Arbeit einfließen werden.

Erstere sind keine Ergebnisse des DiTeNS-Dialogprozesses und werden daher nicht weiter thematisiert. Letztere sollen jedoch hier nochmals zusammenfassend dargestellt werden, um den internen Lernprozess im Projekt aufzuzeigen und für andere nutzbar zu machen. Die Lessons Learned lassen sich in folgende fünf übergreifende Themenfelder gliedern:

- Vorgehen und Prozessgestaltung
- Formate und Workshop-Design
- Inhaltlich-methodische Aspekte
- Visualisierungen
- Modellwerkzeuge

Schlussendlich ergeben sich auch aus der Spezifität des Untersuchungsgebiets des Campus Vaihingen als Universität bzw. Forschungs- und Lehrbetrieb einige Konsequenzen für die Übertragbarkeit der Erkenntnisse und Methodik auf weitere Case Studies.

Darüber hinaus zeigte sich, dass die Werkzeuge und Prozesse noch besser in der Lage sein müssen, Stakeholder-Impulse flexibel und systematisch in technische Entwicklungen zu übersetzen. Diese Anforderung wurde im Mock-Up am Beispiel des durch die Stakeholder identifizierten Abwärmepotenzials der Kältezentralen deutlich, die in der technischen Potenzialanalyse durch das Team entsprechend in die Modelle zu implementieren und zu integrieren sind, auch wenn das zuvor nicht vorgesehen war.

Hinsichtlich der Modellierungs-, Simulations- und Visualisierungsinstrumente zeigte sich insgesamt, dass eine iterative Finalisierung der Workshop-Inhalte mit ausreichenden Zeiträumen zwischen den Workshops entscheidend sind. Nur so können Feedbackschleifen und Ko-Produktionsprozesse angemessen berücksichtigt werden.

Insgesamt waren im Dialogprozess Campus Vaihingen viele Aspekte bereits stark vorgegeben (etwa Modellparameter oder MCDA-Kriterien) und wurden wesentlich durch den Input der Expert*innen

bestimmt. Künftige Prozesse sollten im Sinne der Ko-Produktion an dieser Stelle offener gestaltet und stärker gemeinsam mit Stakeholdern entwickelt werden, um deren Einflussmöglichkeiten und damit eine notwendige Individualisierung zu verbessern.

Ein zentrales Ziel des DiTEaS-Dialogprozesses besteht darin, implizites Wissen in Entscheidungsprozesse einzubinden. Gemeint ist dabei insbesondere solches Wissen, das für individuelle Bewertungen und Abwägungen relevant ist, sich jedoch nur schwer explizit formulieren lässt. Weiterhin ist zu klären, wie mit den unvermeidbaren modellbedingten Grenzen der eingesetzten Werkzeuge umgegangen werden soll, wenn Stakeholder-Feedback integriert wird.

Ein weiteres zentrales Learning betrifft die Zusammensetzung der Stakeholder-Gruppen. Eine kontinuierliche Beteiligung derselben Personen, insbesondere aus Leitungs- und Entscheidungsebenen, konnte am Campus Vaihingen aufgrund terminlicher Verfügbarkeiten nicht gewährleistet werden, wäre für Wissenserhalt, Verbindlichkeit und die Umsetzungsfähigkeit von Ergebnissen jedoch hilfreich gewesen. Beim Design der Prozesse für die künftigen Case Studies sollte daher nochmals stärker auf Kriterien geachtet werden, die die Anwesenheit der relevanten Entscheidungsträger erleichtern, wie persönliche Relevanz und das Aufwand-Nutzen-Verhältnis.

Die Evaluation des DiTEaS-Dialogprozesses zeigt, dass in den Workshops einfachere Darstellungen und mehr Zeit für Austausch notwendig sind. Komplexe, technische Inhalte waren für Teile der Stakeholder von der Bestands- und Potenzialanalyse, über die Definition von Zielszenarien über ausgewählte Parameter bis hin zur Präsentation der Unterschiede zwischen den verschiedenen Energieversorgungsvarianten schwer zugänglich. Für den Umgang mit unterschiedlichem technischem und fachlichem Vorwissen muss daher in kommenden Case Studies eine Lösung entwickelt werden. Denkbar wären dabei spezifisch für Stakeholder-Gruppen ausgestaltete Workshop-Formate, einem dem DiTEaS-Dialogprozess vorgeschalteten „Technik-Onboarding“ oder die Entwicklung von intuitiv verständlicheren Visualisierungsformaten. Allerdings zeigt sich hier ein Dilemma zwischen zeitlicher Beanspruchung der Stakeholder und inhaltlichem Tiefgang des DiTEaS-Dialogprozesses.

Auch das methodische Design einzelner Formate bedarf Anpassungen. So hat sich der offene Gallery Walk für die Erarbeitung von Bewertungskriterien für Energieversorgungsvarianten als wenig geeignet erwiesen, da sich die Teilnehmenden eher untereinander austauschten, als sich mit den Inhalten auseinanderzusetzen. Geführte Rotationen oder Präsentationen im Plenum könnten hier wirksamere Alternativen sein. Hinzu kommt ganz grundlegend auch die Bedeutung geeigneter Räumlichkeiten, die für verschiedene Workshop-Formate eingerichtet werden können.

Schließlich wurde in der Nachbefragung zum Dialogprozess deutlich, dass bereits am Campus Vaihingen für einige Stakeholder die grundlegende Zielsetzung der Klimaneutralität stärker explizit gemacht und diskutiert hätte werden sollen. Da auf dem Universitätscampus durch Landesvorgaben grundsätzlich bereits eine institutionelle Zielbindung besteht, sollte in weiteren Case Studies mit privaten Stakeholdern ohne hart vorgegebene Klimaneutralitätsziele für eine frühzeitige Verständigung über die Relevanz und den normativen Rahmen der Energiewende zu Beginn des Dialogprozesses mehr Zeit eingeplant werden. Hier werden aufgrund der bislang noch hohen abstrakten Zustimmung zu Klimaschutz (Römer und Rode 2025) weiterhin Chancen gesehen, die gezielt genutzt werden sollen.

Ein zentrales inhaltliches Desiderat betrifft die Definition von Versorgungssicherheit. Stakeholder haben gewisse Vorstellungen über notwendige Redundanzen oder mögliche Worst-Case-Szenarien, mit denen ein künftiges Energieversorgungssystem umgehen können muss. Dies wurde durch

das Projektteam am Campus Vaihingen in der Vorbereitung des DiTEoS-Dialogprozesses weniger umfassend betrachtet, zeigte sich dann im Dialogprozess aber immer wieder. Diese Fragen sollten künftig bereits in Vorgesprächen adressiert, im Dialog stärker fokussiert und in den Analysen adäquat integriert werden.

Auf der methodischen Ebene hat sich im Workshop sowie der entsprechenden Nachbefragung gezeigt, dass der MCDA-Prozess in künftigen Case Studies zugänglicher erläutert werden sollte, insbesondere hinsichtlich der Gewichtungsskalen der unterschiedlichen Kriterien. Zudem stellte sich heraus, dass der Mehrwert der MCDA begrenzt ist, wenn sich die modellierten und simulierten Energieversorgungsvarianten nur geringfügig unterscheiden und wenn zentrale Kriterien, wie bspw. die Realisierbarkeit, nicht bewertet werden können.

Entsprechend sollte in künftigen Case Studies die Modellierung von Energieversorgungsvarianten basierend auf von Stakeholdern erarbeiteten Szenarien bei Bedarf durch zusätzliche Extremszenarien oder Modellierung gewisser Sonderfälle, die Stakeholder interessieren, ergänzt werden, sodass entscheidungsrelevante Konsequenzen unterschiedlicher Energieversorgungsvarianten diskutiert werden können. Dazu gehört auch, in künftigen Case Studies die Realisierbarkeit von Energieversorgungsvarianten als bereits angesprochenes zentrales Entscheidungskriterium für beteiligte Stakeholder operationalisierbar und bewertbar zu machen sowie die Gesamtkosten eines Transformationspfades Stakeholder-spezifisch aufzuschlüsseln.

In diesem Zusammenhang sind Möglichkeiten zur Integration individueller, zusätzlicher Restriktionen in die Analysen durch geeignete Berücksichtigung in den Modellwerkzeugen, wie z. B. Budgetrestriktionen bzw. Ressourcenrestriktionen, vorzusehen. Dies ermöglicht solche teilweise durch die Stakeholder wenig beeinflussbare Rahmenbedingungen in die Erarbeitung von Lösungsvorschlägen zu integrieren und damit den Handlungsraum realistisch abzugrenzen.

Es zeigte sich in der Evaluation des DiTEoS-Dialogprozesses durch die den Workshops nachgelagerte Online-Befragungen, dass eine Vollerfassung nur schwer erreichbar ist, obwohl diese aufgrund der Singularität gewisser Stakeholder für eine valide Evaluation des DiTEoS-Dialogprozesses grundlegend wäre. Die Rücklaufquote betrug bei unseren Umfragen zwischen 40 und 70 %. Vermutlich lag die begrenzte Bereitschaft an der hohen zeitlichen Inanspruchnahme der Stakeholder durch die enge Taktung der Workshops innerhalb weniger Wochen. Durch eine zeitliche Entzerrung des DiTEoS-Dialogprozesses sowie eingeplante Zeiträume für die Evaluation am Ende von Workshops könnte die Rücklaufquote in künftigen Case Studies erhöht werden.

Großes Potenzial wird in der Weiterentwicklung der bestehenden CAVE-Visualisierungen gesehen. Die Workshops zeigten, dass die genutzten CAVE-Visualisierungen für Teilnehmende die relevante Energieinfrastruktur innerhalb des Gebiets greifbar und damit auch Unsichtbares sichtbar machen und auch die anvisierten Informationen zu den Wärme- und Stromnetzen sowie dem PV-Potenzial vermitteln können. Zudem steigerte die CAVE als interessante VR-Visualisierung und als Abwechslung zu sonstigen Präsentationsformen für die Teilnehmenden die Attraktivität der Teilnahme an den Workshops.

Jedoch fehlen aktuell noch Anwendungsfälle, in denen spezifisch die immersive Qualität der CAVE gegenüber anderen 2D- und 3D-Visualisierungen für konkrete Planungsfragen der lokalen Energiewende einen Mehrwert bietet und der doch ressourcenintensive Einsatz der CAVE sich damit begründen lässt. In der Nachbefragung zum dritten Workshop wurde der Wunsch geäußert, konkrete Auswirkungen der Szenarien auf das Bild des Campus Vaihingen zu veranschaulichen, wie etwa

eine Großwärmepumpe aussieht oder welche baulichen Veränderungen mit ihrer Implementierung verbunden wären.

Solche Ansätze können dazu beitragen, die Lücke zwischen abstrakten Modellen, alltagsnaher Wahrnehmung und planerischen Fragen der baulichen Umsetzbarkeit zu schließen. Immersive CAVE-Visualisierungen machen ästhetische Veränderungen anschaulich und unterstützen zugleich die Einschätzung räumlicher Realisierungsmöglichkeiten. Der Mock-Up am Campus Vaihingen hat gezeigt, dass künftige Case Studies im Bereich der Visualisierung stärker danach unterscheiden sollten, für welche Anwendungsfälle die immersive Qualität der CAVE einen echten Mehrwert bietet und in welchen Fällen einfache 2D- oder 3D-Darstellungen ausreichen.

Dennoch sind die gewonnenen Erfahrungen aus dem Mock-Up für die weitere Arbeit der Forschungsinitiative hilfreich. Insbesondere konnten diese in einem Kontext gewonnen werden, der hinsichtlich Sichtbarkeit in der Öffentlichkeit unkritisch war, was für die Wahrung der Chance auf eine positive Beteiligung in einem Stadtquartier wichtig erscheint.

Damit zeigt sich, dass der DiTeNS-Dialogprozess sowie die entwickelte Methodik wertvolle Orientierungspunkte für die Anwendung in kommenden Case Studies bietet. Gerade in urbanen Quartieren sind die erhöhte Komplexität der Stakeholder-Konstellationen und der Entscheidungsstrukturen sowie die Datenverfügbarkeit zentrale Herausforderungen, die in künftigen Case Studies von Beginn an berücksichtigt werden.

9.2 Wissenschaftliche Beiträge

Um die soziotechnisch komplexen Transformationsaufgaben der Energiewende zu bewältigen, werden in der Praxis – ähnlich wie in der in DiTeNS entwickelten Methodik – zunehmend urbane digitale Zwillinge eingesetzt (Maiullari et al. 2024). Während das transformative Potenzial solcher Ansätze in der wissenschaftlichen Literatur oft hervorgehoben wird, besteht zugleich eine Skepsis hinsichtlich der Beweislage, dass solche Instrumente kollaborative Ansätze tatsächlich fördern und auf die tatsächlichen Anforderungen in der Praxis ausgerichtet sind (Weil et al. 2023). Gemäß *FERRÉ-BIGORRA ET AL. (2022)* besteht bei solchen technischen Entwicklungen oft das Risiko, dass die Komplexität von Städten auf eindimensionale, oft technische und algorithmisch verarbeitbare Indikatoren reduziert werden.

Der methodische Ansatz, der im Rahmen von DiTeNS entwickelt worden ist, war von Beginn an auf eine Verknüpfung von Stakeholder-Analyse, Dialogprozess und technischer Analyse- sowie Visualisierungsinstrumenten ausgelegt. So konnten Anforderungen aus der Stakeholder-Analyse und somit u. a. der operativen Praxis in die technischen Entwicklungen sowie den DiTeNS-Dialogprozess einfließen. Um der Multidimensionalität des Transformationsprozesses gerecht zu werden, wurde zudem die beschriebene multikriterielle Entscheidungsanalyse eingesetzt.

Die begleitende Beobachtung des DiTeNS-Dialogprozesses erlaubt eine Bewertung, inwiefern die entwickelte Methodik die im Gebiet identifizierten Hemmnisse, Herausforderungen und Konflikte der lokalen Energiewende am Campus Vaihingen tatsächlich zu bearbeiten geholfen hat. Somit leistet DiTeNS mit den vorliegenden Arbeiten einen Beitrag zur Forschungslücke, inwiefern ko-produzierte und kollaborativ eingesetzte Planungsinstrumente tatsächlich ein transformatives Potenzial im Bereich der lokalen Energiewende besitzen. Die Resultate werden in naher Zukunft in einem peer-reviewed Journal publiziert.

9.3 Fazit und Ausblick

Abschließend lässt sich festhalten, dass sich die am Campus Vaihingen entwickelte und erprobte Methodik auf den Ebenen des Dialogs sowie der Analyse- und der Visualisierungsinstrumente grundsätzlich bewährt hat. Es konnte ein für die Stakeholder nutzbares Ergebnis erzielt werden, das den Stakeholdern als Basis für die Umsetzung der lokalen Transformation des Energiesystems dienen kann.

Die Methodik von DiTEoS wird nun entsprechend adaptiert in zwei weiteren Case Studies in urbanen Quartieren angewendet, wobei Erfahrungen aus dem Mock-Up in Weiterentwicklungen für die zweite Case Study einfließen sollen. Die im DiTEoS-Dialogprozess am Campus Vaihingen diagnostizierten Defizite in der Vorgehensweise werden behoben und bestehende Potenziale gestärkt.

Das Ziel des Forschungsvorhabens, eine alternative Vorgehensweise zur Entwicklung von individuellen Transformationspfaden in einem Bottom-Up-Prozess anstelle von Top-Down-Ansätzen soll dabei nicht aus dem Fokus verloren werden. Denn auf diese Weise besteht die Möglichkeit, Stakeholder-Präferenzen und insbesondere auch implizite Informationen und Präferenzen der Stakeholder und lokaler Entscheider*innen in die Lösungsfindung zu integrieren, was andernfalls aufgrund der fehlenden expliziten Information auf höherer Aggregationsebene nicht möglich ist. Insgesamt sollen auf diese Weise bessere und umsetzbare Lösungen identifiziert und den lokalen Entscheider*innen zur Verfügung gestellt werden. Damit ist der Anspruch verbunden, dass insgesamt die Umsetzung der Transformation der lokalen Energiesysteme besser gelingen kann.



Literaturverzeichnis

- AdV (2025): Das amtliche 3D-Gebäudemodell in der Ausprägung LoD2. Online verfügbar unter <https://www.adv-online.de/AdV-Produkte/Weitere-Produkte/3D-Gebaeudemodelle-LoD/>, zuletzt geprüft am 02.09.2025.
- AGFW (2025): Pauschalierte Kennwerte. Kältenetzverluste. Hg. v. Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (AGFW). Online verfügbar unter <https://www.fw704.de/hauptmenue/kennwerte/pauschalierte-kennwerte>, zuletzt geprüft am 10.07.2025.
- Bagherian, Behrooz; Swiderek, Stefan; Hartung, Andreas; Bischof, Julian (2021): Vergleichswerte für den Energieverbrauch von Nichtwohngebäude. Anpassung eines vorliegenden Berechnungstools zur Ableitung von neuen Vergleichswerten für Energieverbrauchsangabe. In: *BBSR-Online-Publikation* (37/2021). Online verfügbar unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2021/bbsr-online-37-2021-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- Becker, Sören; Bues, Andrea; Naumann, Matthias (2016): Zur Analyse lokaler energiepolitischer Konflikte. Skizze eines Analysewerkzeugs. In: *Raumforschung und Raumordnung / Spatial Research and Planning* 74 (1), S. 39–49. DOI: 10.1007/s13147-016-0380-0.
- Boghetti, Roberto; Kämpf, Jérôme H. (2024): Verification of an open-source Python library for the simulation of district heating networks with complex topologies. In: *Energy* 290, S. 130169. DOI: 10.1016/j.energy.2023.130169.
- Dametto, Diego; Michelini, Gabriela; Higi, Leonard; Schröder, Tobias; Klaperski, Daniel; Popiolek, Roy et al. (2022): Developing a Stakeholder-Centric Simulation Tool to Support Integrated Mobility Planning. In: Marcin Czupryna und Bogumił Kamiński (Hg.): *Advances in Social Simulation*. Cham: Springer International Publishing (Springer Proceedings in Complexity), S. 65–78.
- dena (2023): Erste Schritte in der Kommunalen Wärmeplanung: Die Vorbereitungsphase. Berlin.
- Ferré-Bigorra, Jaume; Casals, Miquel; Gangoells, Marta (2022): The adoption of urban digital twins. In: *Cities* 131, S. 103905. DOI: 10.1016/j.cities.2022.103905.
- Flick, Uwe (2025): *Qualitative Sozialforschung: Eine Einführung*. 11. Auflage, Originalausgabe. Reinbek bei Hamburg: rowohltts enzyklopädie im Rowohlt Taschenbuch Verlag (Rowohlt Taschenbuch, 55694).
- FMBW: Energie- und Klimaschutzkonzept für Landesliegenschaften 2030. Hg. v. Finanzministerium Baden-Württemberg (FMBW).
- GEF (2024): Aktualisierung Hydraulische Netzberechnungen. Fernkältenetz Universität Stuttgart. Endbericht. Hg. v. GEF Ingenieure AG. Leimen.
- HELDA (2024). Version 1.0: Helmholtz. Online verfügbar unter <https://www.mcda-helmholtz.de/>, zuletzt geprüft am 21.10.2025.

- HKW (2025): Energieversorgung auf dem Campus. Hg. v. Heizkraftwerk der Universität Stuttgart. Online verfügbar unter <https://www.hkw.uni-stuttgart.de/technik/>, zuletzt geprüft am 10.07.2025.
- Hörner, Michael; Bischof, Julian (2022): Typologie der Nichtwohngebäude in Deutschland – Methodik, Anwendung und Ausblick. IWU Working Paper. Institut Wohnen und Umwelt (IWU). Online verfügbar unter https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/2022_IWU_HoernerEtBischof_WorkingPaper_Typologie-der-Nichtwohngebaeude-Deutschlands.pdf, zuletzt geprüft am 21.10.2025.
- IWU (2022): Nichtwohngebäude-Typologie-Deutschland. Hg. v. Institut Wohnen und Umwelt (IWU). Online verfügbar unter <https://github.com/IWUGERMANY/Nichtwohngebäude-Typologie-Deutschland>.
- Kirppu, Heidi; Lahdelma, Risto; Salminen, Pekka (2018): Multicriteria evaluation of carbon-neutral heat-only production technologies for district heating. In: *Applied Thermal Engineering* 130, S. 466–476. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.161.
- Künkel, Petra; Gerlach, Silvine; Frieg, Vera (2019): Stakeholder-Dialoge erfolgreich gestalten: Kernkompetenzen für erfolgreiche Konsultations- und Kooperationsprozesse. 2., aktualisierte Auflage. Wiesbaden and Heidelberg: Springer Gabler.
- León, Christian D.; Azzam, Abdulrahman; Beck, Johannes; Drück, Harald; Häbig, Pascal; Lott, Stefanie (2026): Empfohlene Maßnahmen für eine klimaneutrale Energieversorgung des Campus Vaihingen : Ergebnisse des DiTEaS-Dialogprozesses am Campus Vaihingen/Stuttgart. Hg. v. Stuttgart Research Initiative „Discursive Transformation of Energy Systems“ (SRI DiTEaS). Stuttgart.
- LGL (2025): Open GeoData. Hg. v. Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (LGL). Online verfügbar unter <https://opengeodata.lgl-bw.de/#/>.
- Li, Zheng; Ma, Jun; Tan, Yi; Guo, Cui; Li, Xiao (2023): Combining physical approaches with deep learning techniques for urban building energy modeling: A comprehensive review and future research prospects. In: *Building and Environment* 246, S. 110960. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110960.
- Lode, Maria Luisa; Heuninckx, Shary; te Boveldt, Geert; Macharis, Cathy; Coosemans, Thierry (2022): Designing successful energy communities: A comparison of seven pilots in Europe applying the Multi-Actor Multi-Criteria Analysis. In: *Energy Research & Social Science* 90, S. 102671. DOI: 10.1016/j.erss.2022.102671.
- Loulou, Richard; Goldstein, Gary; Kanudia, Amit; Lettilä, Antti; Remme, Uwe (2021): Documentation for the TIMES Model. PART 1. Online verfügbar unter https://github.com/etsap-TIMES/TIMES_Documentation/blob/master/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-I.pdf.
- Loulou, Richard; Goldstein, Gary; Kanudia, Amit; Lettilä, Antti; Remme, Uwe (2024): Documentation for the TIMES Model. PART 2. Online verfügbar unter https://github.com/etsap-TIMES/TIMES_Documentation/blob/master/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-II.pdf.
- LUBW (2025): Energieatlas BW. Hg. v. Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW). Online verfügbar unter <https://www.energieatlas-bw.de/start>.

- Macharis, Cathy; Turcksin, Laurence; Lebeau, Kenneth (2012): Multi actor multi criteria analysis (MAMCA) as a tool to support sustainable decisions: State of use. In: *Decision Support Systems* 54 (1), S. 610–620.
- Maiullari, Daniela; Nageli, Claudio; Rudena, Andreas; Isacson, Åsa; Dokter, Giliam; Ellenbroek, Ilse et al. (2024): Digital twin for supporting decision-making and stakeholder collaboration in urban decarbonization processes. A participatory development in Gothenburg. In: *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*. DOI: 10.1177/23998083241286030.
- Manktelow, Christopher; Hoppe, Thomas; Bickerstaff, Karen; Itten, Anatol; Fremouw, Michiel; Naik, Madhumita (2023): Can co-creation support local heat decarbonisation strategies? Insights from pilot projects in Bruges and Mechelen. In: *Energy Research & Social Science* 99, S. 103061. DOI: 10.1016/j.erss.2023.103061.
- MUKE BW (2020): Kommunale Wärmeplanung. Handlungsleitfaden. Stuttgart. Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/Leitfaden-Kommunale-Waermeplanung-barrierefrei.pdf.
- Oberschmidt, Julia (2010): Multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme.
- Ohlhorst, Dörte; Schön, Susanne (2010): Windenergienutzung in Deutschland im dynamischen Wandel von Konfliktkonstellationen und Konflikttypen. In: Peter Henning Feindt und Thomas Saretzki (Hg.): *Umwelt- und Technikkonflikte*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften (Springer eBook Collection Humanities, Social Science), S. 198–218. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-531-92354-3_10.
- Pohl, Christian; Hirsch Hadorn, Gertrude (2008): Gestaltung transdisziplinärer Forschung. In: *Sozialwissenschaften und Berufspraxis* 31 (1), S. 5–22. Online verfügbar unter https://www.ssoar.info/ssoar/bitstream/document/4457/1/ssoar-sub-2008-1-pohl_et_al-gestaltung_transdisziplinarer_forschung.pdf.
- Rädiker, Stefan; Kuckartz, Udo (2019): *Analyse qualitativer Daten mit MAXQDA: Text, Audio und Video*. Wiesbaden: Springer VS (Springer eBook Collection).
- Reed, Mark S.; Graves, Anil; Dandy, Norman; Posthumus, Helena; Hubacek, Klaus; Morris, Joe et al. (2009): Who's in and why? A typology of stakeholder analysis methods for natural resource management. In: *Journal of environmental management* 90 (5), S. 1933–1949. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.01.001.
- Renn, Ortwin (2013): Technikkonflikte. In: Armin Grunwald (Hg.): *Handbuch Technikethik*. Stuttgart and Weimar: Verlag J. B. Metzler, S. 72–76. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-476-05333-6_13.
- Römer, Daniel; Rode, Johannes (2025): KfW-Energiewendebarmometer 2025. Zustimmung stabil – jeder dritte Haushalt nutzt Energiewendetechnologie. Hg. v. KfW Bankengruppe. Frankfurt am Main.
- Schäfer, Martina; Bühner-Topcu, Susanne; Ehnert, Franziska; Graf, Verena; Haus, Juliane; Höhener, Olivia et al. (2025): Orientierungsrahmen zur Erfassung von Wirkungen transdisziplinärer und partizipativer Forschung: Zenodo, 2025. Online verfügbar unter

- https://zenodo.org/records/15641451/files/Arbeitspapier-2-2025-Orientierungsrahmen-AG-Wirkung_GTPF_250612.pdf.
- Schär, Sebastian; Geldermann, Jutta (2021): Adopting Multiactor Multicriteria Analysis for the Evaluation of Energy Scenarios. In: *Sustainability* 13 (5). DOI: 10.3390/su13052594.
- Trutnevyte, Evelina; Stauffacher, Michael; Scholz, Roland W. (2011): Supporting energy initiatives in small communities by linking visions with energy scenarios and multi-criteria assessment. In: *Energy Policy* 39 (12), S. 7884–7895. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.09.038.
- UBA (2025): Daten zu geplanten Neubauten, Sanierungen und Stilllegungen von Gebäuden, 2025. Universitätsbauamt Stuttgart und Hohenheim (UBA).
- Ullmann, Jens; Helf, Raffaella; Lierhammer, Peter; Häbig, Pascal; Eltrop, Ludger; Leger, Matthias et al. (Hg.) (2025): Ergebnisse des Einsatzes intelligenter Technologien zur Verringerung des Wärmeverbrauchs eines Bürogebäudes. Symposium Zukunft Wärme. Bad Staffelsetin, 20.-22. Mai 2025.
- US (2022): Energie- & Klimaschutzkonzept Universität Stuttgart. Teil 1 Ist-Analyse. Unter Mitarbeit von Elif Köksoy. Hg. v. Universität Stuttgart (US). Stuttgart.
- US (2024): Reallabor CampUS hoch i – CampUS intelligent gemacht. Projektsteckbrief. Hg. v. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart (US). Stuttgart.
- US (2025): Daten des Gebäudemonitorings der Universität Stuttgart, 2025. Dezernat 6 Facility Management.
- Vogel, Dita; Funck, Barbara Johanna (2018): Immer nur die zweitbeste Lösung? Protokolle als Dokumentationsmethode für qualitative Interviews: Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research, Vol 19, No 1 (2018). DOI: 10.17169/fqs-19.1.2716.
- Wang, Jiang-Jiang; Jing, You-Yin; Zhang, Chun-Fa; Zhao, Jun-Hong (2009): Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. In: *Renewable and sustainable energy reviews* 13 (9), S. 2263–2278.
- Weil, Charlotte; Birbi, Simon; Longchamp, Régis; Golay, Francois; Alahi, Alexandre (2023): Urban Digital Twin Challenges: A Systematic Review and Perspectives for Sustainable Smart Cities. In: *Sustainable Cities and Society* 99 (104862), S. 1–15. DOI: 10.1016/j.scs.2023.104862.

Abkürzungsverzeichnis

AWZ	Abwärmezentrale
BW	Baden-Württemberg
CAVE	Cave Automatic Virtual Environment
COP	Coefficient of Performance
HKW	Heizkraftwerk
HLRS	Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart
IER	Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
ILA	Instituts für Luftfahrtantriebe
KlimaG BW	Klimaschutzanpassungsgesetz Baden-Württemberg
KN	Klimaneutralität
KSG	Klimaschutzgesetz
kWP	kommunalen Wärmeplanung
kW _p	Kilowatt Peak
KZN	Kältezentrale Nord
LOD	Level of Detail
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
MW	Megawatt
NWZ	Naturwissenschaftliche Zentrum
PV	Photovoltaik
PV-Anlagen	Photovoltaikanlagen
SRI DiTEoS	Stuttgart Research Initiative “Discursive Transformation of Energy Systems”
UBA	Universitätsbauamtes Stuttgart und Hohenheim
VR	Virtual Reality
WPG	Wärmeplanungsgesetz – Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Ablauf des DiTEaS-Dialogprozesses.....	6
Abbildung 2-2:	Aufbau des Energiesystemmodells TIMES local.....	10
Abbildung 2-3:	Flussdiagramm des Simulationsprozesses des Wärmenetzes mit Initialisierung, Massenstrom und Systemregelung, Netz- und Wärmespeicherberechnung sowie abschließendem Simulationsergebnis.....	12
Abbildung 2-4:	Analyse des Energienetzes am Campus Vaihingen durch mehrere Personen in einer CAVE.....	13
Abbildung 3-1:	Lageplan des Untersuchungsgebietes Campus Vaihingen mit Gebäudenutzung und ausgewählten relevanten Gebäude.....	15
Abbildung 3-2:	Lageplan des Untersuchungsgebietes Campus Vaihingen mit Gebäudebetreibenden.....	17
Abbildung 3-3:	Entscheidungs- und Steuerungsstruktur von Baumaßnahmen der Energiewende am Campus Vaihingen.....	22
Abbildung 4-1:	Lageplan des Untersuchungsgebietes Campus Vaihingen mit Baualtersklassen nach der deutschen Nichtwohngebäudetypologie (Hörner und Bischof 2022).	27
Abbildung 4-2:	Lageplan des Untersuchungsgebietes Campus Vaihingen mit eigener Aggregation der Gebäudefunktion.....	28
Abbildung 4-3:	Darstellung des Wärmenetzes am Campus Vaihingen mit dem Heizkraftwerk, Haupttrassen und ausgewählten Netzpunkten.....	29
Abbildung 4-4:	Vergleich der Vorlauf- (oben) und Rücklauf-temperaturverläufe (unten) von Gebäuden mit und ohne Wärmeübertrager.....	29
Abbildung 4-5:	Messdaten von Vorlauf- (oben) und Rücklauf-temperaturen (unten) am Heizkraftwerk und an den Gebäuden der Max-Planck-Gesellschaft.....	30
Abbildung 4-6:	Analyse der Heizkurven des Wärmenetzes am Campus Vaihingen im Vergleich zu den Technischen Anschlussbedingungen.....	31
Abbildung 4-7:	Schematische Darstellung der lokalisierten Messstellen für Allmandring 31 inklusive Foto eines Ausschnitts des Hydraulikschemas.....	32
Abbildung 4-8:	Schematische Darstellung der lokalisierten Messstellen für Pfaffenwaldring 7.....	33
Abbildung 4-9:	Temperaturverlauf der lokalisierten Messstellen für Allmandring 31, mit „indirekter Wärmeübertragung“ und von Messstellen am Heizkraftwerk.....	33
Abbildung 4-10:	Temperaturverlauf ausgewählter Messstellen für Pfaffenwaldring 7, mit „direkter Wärmeübertragung“ und von Messstellen am Heizkraftwerk.....	34
Abbildung 4-11:	Kältenetz und Kältezentralen der Kälteversorgung am Campus Vaihingen sowie Kälteverbräuche der angeschlossenen Gebäude (HKW 2025; US 2025).	35
Abbildung 4-12:	Monatliche Kälteverbräuche von Universitätsgebäuden, Gebäude Dritter sowie Kälteverluste des Kältenetzes (GEF 2024; HKW 2025; US 2025).	36
Abbildung 4-13:	Zuordnung des Netzanschlusses der Gebäude des Campus Vaihingen zu den jeweiligen Mittelspannungsnetzen.....	37
Abbildung 4-14:	Darstellung des HKW-Stromnetzes am Campus Vaihingen.....	38
Abbildung 4-15:	Lastprofile der fünf Niederspannungsabgänge mit den höchsten Spitzenlasten im HKW-Stromnetz sowie die Durchschnitts- und Gesamtlast aller Abgänge im Jahr 2024.....	38
Abbildung 4-16:	Elektrischer Jahresenergieverbrauch der an das HKW-Stromnetz angeschlossenen Gebäude auf dem Campus Vaihingen im Jahr 2024.....	39
Abbildung 4-17:	Schematische Darstellung des Aufbaus des Heizkraftwerks am Campus Vaihingen mit Gas-und-Dampf-Kraftwerksanlage (GuD), konventionellen Dampfkesseln und Wärmespeichern.....	40

Verzeichnisse

Abbildung 4-18:	Vergleich der elektrischen und thermischen Effizienz sowie der Gesamteffizienz der Kraftwerksblöcke des Heizkraftwerks am Campus Vaihingen.	41
Abbildung 4-19:	Gestapelte Jahresdauerlinien der thermischen Leistung der Kraftwerksblöcke des Heizkraftwerks am Campus Vaihingen.	42
Abbildung 4-20:	Abschätzung des Deckungsanteils der Abwärmezentrale am jährlichen Wärmebedarf des Campus Vaihingen sowie Auswirkungen auf die Auslastung des Heizkraftwerks.	42
Abbildung 4-21:	Schematische Darstellung der geplanten Abwärmezentrale mit Einbindung der Rechenzentren am Höchstleistungsrechenzentrum, Wärmepumpen, Pufferspeichern und hydraulischer Anbindung an das Wärmenetz des Campus Vaihingen.	44
Abbildung 4-22:	Energieflussdiagramm für den Campus Vaihingen im Basisjahr als Mittelwert der Jahre 2019 und 2023.	45
Abbildung 4-23:	Endenergieverbrauch Strom (ohne Netzverluste), Wärme, Kälte und Dampf am Campus Vaihingen im Basisjahr (Werte in GWh).....	45
Abbildung 4-24:	Historische Entwicklung der Endenergie Strom an der Universität Stuttgart (Gebäude der Universität Stuttgart am Standort Stadtmitte und Campus Vaihingen ohne Gebäude Dritter) (US 2023).....	46
Abbildung 4-25:	Historische Entwicklung der Endenergie Wärme an der Universität Stuttgart (Gebäude der Universität Stuttgart am Standort Stadtmitte und Campus Vaihingen ohne Gebäude Dritter) (US 2023).....	47
Abbildung 4-26:	Historische Entwicklung der CO ₂ -Emissionen an der Universität Stuttgart (Gebäude der Universität Stuttgart am Standort Stadtmitte und Campus Vaihingen ohne Gebäude Dritter) (US 2023).....	47
Abbildung 4-27:	Betrachtung der Leitungsauslastungen und Knotenspannungen im HKW-Stromnetz im Worst-Case (auf Basis des Status Quos).	50
Abbildung 4-28:	Simulation des Stromnetzes unter Berücksichtigung des Neubaus des Höchstleistungsrechenzentrums III ohne Netzausbau zur Darstellung der Auswirkungen auf Leitungsauslastungen und Knotenspannungen.....	51
Abbildung 5-1:	Potenzial zur Wärmeverbrauchsreduktion und geplanten Sanierungsmaßnahmen.	53
Abbildung 5-2:	Lageplan des Untersuchungsgebietes Campus Vaihingen mit Potenzial zur Energieverbrauchsreduktion und geplanten Sanierungsmaßnahmen.	54
Abbildung 5-3:	Energetisches Sanierungspotenzial, durch die Dämmung der Gebäudehüllflächen Dach und Außenwand und den Austausch von Fenstern, entsprechend der eigenen Aggregation der Gebäudefunktion in Abbildung 4-2.....	56
Abbildung 5-4:	Potenzielle Flächen für Geothermie am Campus Vaihingen (Google Maps 2025).....	58
Abbildung 5-5:	Ablaufplan des Workshops 1: Systemwissen - Bestand & Potenziale.	62
Abbildung 5-6:	Eindrücke aus dem Workshop 1: Systemwissen – Bestand & Potenziale (oben: Visualisierungen und Präsentationen zum Strom- und Wärmenetz in der CAVE, unten: Sammlung und Diskussion von Herausforderungen der Energiewende am Campus Vaihingen).	63
Abbildung 5-7:	Von den Stakeholdern in einer Stacey-Matrix zusammengetragene Herausforderungen der Energiewende am Campus Vaihingen (farbliche Clusterung im Nachgang durch DiTEoS).	65
Abbildung 6-1:	Einschätzung der Szenario-Parameter und deren qualitativer Ausprägungen durch die Stakeholder in Workshop 2.	69
Abbildung 6-2:	Stromnachfrage im Basisjahr und die erwartete Entwicklung bis 2040.....	70
Abbildung 6-3:	Wärmenachfrage im Basisjahr und die erwartete Entwicklung bis 2040.....	70
Abbildung 6-4:	Strombereitstellung (Bezug, Erzeugung) am Campus Vaihingen für alle betrachteten Szenarien.	71
Abbildung 6-5:	Angenommene Entwicklung der thermischen Leistung des Heizkraftwerks am Campus Vaihingen für alle betrachteten Szenarien.	72

Verzeichnisse

Abbildung 6-6:	Fernwärmebereitstellung am Campus Vaihingen für alle betrachteten Szenarien.	73
Abbildung 6-7:	Thermische Kapazitäten der Wärmeerzeuger und Kurzzeitspeicher am Campus Vaihingen für alle betrachteten Szenarien.....	73
Abbildung 6-8:	Primärenergie und Bezug am Campus Vaihingen für alle betrachteten Szenarien.	74
Abbildung 6-9:	Kumulierte CO ₂ -Emissionen und Gesamtsystemkosten (oben) sowie nicht diskontierte Gesamtinvestitionen am Campus Vaihingen (unten) für alle betrachteten Szenarien.	75
Abbildung 6-10:	Darstellung des zukünftigen Betriebsverhaltens im Wärmenetz am Campus Vaihingen (Variante KN 2030, Projektionsjahr 2035) anhand des zeitlichen Verlaufs der thermischen Leistungen von der Abwärmezentrale am Höchstleistungsrechenzentrum III und Heizkraftwerk im Vergleich zur gesamten Nachfrage.	76
Abbildung 6-11:	Verlauf der Vorlauftemperaturen an zentralen Netzpunkten bei einer zukünftigen Integration der Abwärmezentrale am Höchstleistungsrechenzentrum III.....	76
Abbildung 6-12:	Darstellung der Rücklauftemperaturen bei einer Temperaturspreizung von 30 Kelvin. ...	77
Abbildung 6-13:	Verläufe der Auslastungen der fünf am stärksten belasteten Leitungen im Stromnetz des Heizkraftwerks und die durchschnittliche Leitungsauslastung aller Leitungen in der Kalenderwoche 16 des Jahres 2024.	78
Abbildung 6-14:	Elektrische Lastverläufe der vier größten Verbraucher sowie der Durchschnitts- und Gesamtlast am Campus und der elektrischen Erzeugungsleistung des Heizkraftwerks in der Kalenderwoche 16 des Jahres 2024.....	79
Abbildung 6-15:	Darstellung des optimierten Betriebsverhaltens im Szenario KN 2030 mit thermischer Leistung von Abwärmezentrale und Heizkraftwerk im zeitlichen Verlauf sowie resultierender Wärmebedarfsdeckung.	80
Abbildung 6-16:	Ablaufplan des Workshop 2 – Zielwissen I.	81
Abbildung 6-17:	Ablaufplan des Workshop 3 – Zielwissen II.	83
Abbildung 7-1:	Absolute Gewichtungen der Entscheidungskriterien am Beispiel des Heizkraftwerks und Dezernats 6 (0 = sehr unwichtig; 10 = sehr wichtig).....	90
Abbildung 7-2:	Normalisierte Gewichtungen der Entscheidungskriterien pro Stakeholder.	91
Abbildung 7-3:	In Workshop 4 durch die teilnehmenden Stakeholder erarbeitete Maßnahmen sowie deren Clusterung.	98
Abbildung 7-4:	Zeitlicher und inhaltlicher Ablaufplan des Workshop 4 zum Transformationswissen.....	99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Phasen des Dialogprozesses in DiTEoS sowie deren Bezug zur kommunalen Wärmeplanung.....	5
Tabelle 3-1:	Beteiligte Stakeholder am Campus Vaihingen.	19
Tabelle 3-2:	Identifizierte Hemmnisse und Konflikte der Energiewende am Campus Vaihingen.	21
Tabelle 4-1:	Adresse und Eigenschaften von analysierten Gebäuden mit Messdaten aus dem Monitoring der Universität Stuttgart.	31
Tabelle 6-1:	Übersicht der Parameter mit diskreten qualitativen Ausprägungen.	68
Tabelle 7-1:	Performance Scores des Energieversorgungsvarianten für unterschiedliche Bewertungskriterien.	92
Tabelle 7-2:	Gesamtnutzwerte und das sich daraus ergebende Ranking (grün = Rang 1, weiß = Rang 2, rot = Rang 3) der Energieversorgungsvarianten (KN 2030, KN 2035, KN 2040) im Stakeholder-Durchschnitt.	92
Tabelle 7-3:	Gesamtnutzwerte und das sich daraus ergebende Ranking (grün = Rang 1, weiß = Rang 2, rot = Rang 3) der Energieversorgungsvarianten (KN 2030, KN 2035, KN 2040) pro Stakeholder.	93
Tabelle 7-4:	Durch die Stakeholder bewertete Maßnahmen mit Konsens und Diskussionsbedarf in Workshop 4.	97
Tabelle 8-1:	Maßnahmen-Empfehlung für den Campus Vaihingen aus dem Dialogprozess.	110



Anhang

Anhang 1: *Umfassende Liste an identifizierten Hemmnissen und Konflikten der Energiewende am Campus Vaihingen inkl. materialnaher Codes.*

Hauptkategorie	Unterkategorie	Code
Hemmnisse		
Exogene Ereignisse		Äußere Ereignisse: Ukraine-Krise
Unzuträgliche Landes- und Bundespolitik		Parteiunabhängig fehlender Veränderungsdruck durch Landesregierung auf Verwaltungsstruktur
		Finanzierung flächendeckender Maßnahmen werden auf Landesebene von Haushalt zu Haushalt verschoben
		Blockade der Finanzierung von Bauvorhaben des UBA durch Ampelkrise auf Landes- oder Bundesebene
Bürokratische Hürden	Formell: bürokratische Vorgaben und Verfahren	Zu viel Bürokratie / genehmigungsrechtliche Hürden
		Komplexe und aufwändige Auftragsvergaben über Ausschreibungen
		Lange Bearbeitungszeiten bei Anträgen über UBA
		Vorgaben (nicht per se die Einstellungen von Personen)
		Kältemittel-Regelungen
		Bürokratische Hürden bei PV-Installation
		Denkschmalschutz & Architekten-Urheberrecht
	Informell: Selbstschutz vor Risiken und Veränderungen in der Verwaltung	Selbsterhaltungsinteresse und Unwille zur Kompetenzabgabe bei der Verwaltung
		Landesministerien hemmen energetischen Umbau, da damit allenfalls einhergehender Umbau der Verwaltungsstruktur abgelehnt wird
		Geringe Risikobereitschaft und Angst vor persönlicher Haftung in den Ministerialverwaltungen (u. a. durch Dominanz von Juristen)
		MWK und MF haben kein Interesse an neuen, privatwirtschaftlichen Finanzierungsmodellen für Sanierungen
		Haltung der Ministerien auf Landesebene für (bauliche) Veränderungen unabhängig von politischen Koalitionen sehr konservativ
		Trotz Problembewusstsein (Personalmangel) kein Veränderungswille bei Vermögen & Bau aufgrund von Selbsterhaltungsinteresse
		Angst vor Haftung bei Universitäts-Abteilungen, daher mangelnde Zuständigkeit
		Bedenken bzgl. EMAS-Einführung wegen Transparenz bisher nicht vorhandener Daten
Finanzielle Restriktionen		Begrenzte finanzielle Kapazitäten im UBA
		Fehlende finanzielle und personelle Ressourcen
		Investitionen rechnen sich erst langfristig

Anhang

Hauptkategorie	Unterkategorie	Code
Unzureichende Governance	Fehlender Wille von verantwortlichen Positionen	(Fehlender) Wille verantwortlicher Personen
		Fehlender Wille etwas Vernünftiges zu liefern
		Ehem. Rektor sah Zuständigkeit bei Kanzlerin, waren am Thema aber nicht interessiert, aktuelle Kanzlerin muss sich einarbeiten
	Fehlende Strategie	Fehlendes gemeinsames Ziel
		Kein energetischer Masterplan/Gesamtkonzept vorhanden
		Fehlende strategische Pläne beim UBA
	Fehlendes Mandat	Fehlender Auftrag
		Green Office bzw. Rektorat fehlt Hebel, um Dinge umzusetzen (laufende Institutionalisierung)
		Ineffizienter Runder Tisch Nachhaltigkeit
		Verantwortungsdiffusion, wenige Umsetzungsressourcen und damit wenig Motivation der Stakeholder
	Mangelhafte Koordination	Fehlende koordinierende und verantwortliche Stelle innerhalb der Uni
		Viele Nachhaltigkeitsbestrebungen laufen noch nebeneinander, anstatt integriert zu werden
		Viele einzelne Stellen, die an Dingen arbeiten
		Planungsrelevante Stakeholder sind nicht koordiniert
		Beauftragte planen an anderen vorbei
	Mangelhafte Kommunikation	Energiesparmaßnahmen wie Unischließung finden aus unklaren Gründen nicht mehr statt
		Glaubwürdigkeitsproblem bei der Kommunikation des Klimaneutralitätsziels
	Falsche Anreizstrukturen	Instituten fehlt Anreiz für Energieeinsparungen, da nur Uni insgesamt davon profitiert
		Betrieb durch HKW wird als selbstverständlich gesehen
	Externe Lieferverpflichtungen	Lieferverpflichtungen für externe Abnehmer - allenfalls Anpassungen von Übergabestationen und Verträgen nötig
Schwere Voraussagbarkeit von Umbau-Fertigstellungen für Vertragsanpassungen		
Mangelnde Personalressourcen und -kompetenzen	Personalmangel	Fehlende finanzielle und personelle Ressourcen
		Wenig Personalressourcen für Energiemanagement
		Begrenzte personelle Kapazitäten im UBA
		Personalmangel beim UBA
		Betriebspersonal ist überfordert, überlastet und schlecht bezahlt (E9)
		Fachkräftemangel bei Architekten und Planern
		Baubranche kommt nicht nach / lange Bauprozesse
	Mangel an Fachkompetenz	z.T. fehlende Fachkompetenz auf unterer Ebene
		Mangelnde Expertise bei Teilnehmenden des Runden Tisch Nachhaltigkeit
		Fehlende Personen, die sich mit Gebäuden jeweils identifizieren, technisch auskennen und diese auch betreiben

Anhang

Hauptkategorie	Unterkategorie	Code	
Problematisches Nutzungsverhalten		Falsches Nutzerverhalten mit Wärme in Gebäuden	
		Kein energiesparendes Verhalten beim Heizen, weil Wahrnehmung, dass Wärme Abfallprodukt der Stromproduktion des HKW sei	
		Hohes Anspruchsverhalten bei Nutzenden bzgl. Energiebedarf	
		Whataboutism bei kleinen Maßnahmen (kleine Maßnahmen werden als sinnlos wahrgenommen, wenn umfassende Maßnahmen nicht möglich)	
Technische Herausforderungen	Technische Komplexität	Einbindung bestehender Systeme u. a. für Übergangslösungen wichtig	
		Koordination unterschiedlicher Wärmeerzeuger zum Erreichen gleicher Vorlauftemperatur im Netz	
		Heterogener Gebäudebestand	
		Aufwand des Umbaus des Energiesystems am Campus höher als bei Wohn/Stadtquartier	
		Hohe Vorlauftemperatur erforderlich	
		Herausforderungen der Dekarbonisierung durch den Betrieb von Großversuchsanlagen (Spitzenlasten)	
	Schwierige Potenzialbestimmung & begrenzte Potenziale	HLRS kein sicherer Energieversorger (durch schwankendes Abwärmepotenzial)	
		Wenig Spielraum der Uni, da HLRS und Höhenprüfstand unveränderbare Großverbraucher	
		Energieeinsparung nur noch bei Verwaltungsgebäuden möglich, da bei Forschung und Lehre nicht viel möglich	
		Aufgrund von Forschungsantennen weit unter 20 % PV-Dachflächenpotenzial bei Uni-Gebäuden	
		Unzureichende Biogasvorkommen in BW	
	Mangelhaftes Monitoringsystem		Nicht erfasste Gebäudedaten wegen schlechter Internetverbindung u. a.
			Unbekannter Energieverbrauch (kein Energiemonitoring)
			Stromeinsparungen schwer aufgrund fehlender Sensorik
			fehlender Überblick über Gebäudestruktur und der Verbrauch u. a. aufgrund fehlender Messtechnik
			Energieerfassungssystem entspricht nicht den Standards
			Nicht mehr fortgeführte Software der Leitwarte muss für ca. 50 Mio. ersetzt werden
			Einspeiseleistung HKW kann nur über externen Dienstleister für die letzten 6 Monate abgefragt werden
			Dritte haben eigene Energieerfassungssysteme
			Energiedaten nicht von allen Gebäuden, sondern nur von Gebäuden, die dem Land gehören
Fehlendes Monitoring bei Hausübergabestationen & teils defekte/falsch eingestellte Hausübergabestationen			
Energietechnik am Campus z.T. veraltet	Fehlendes Monitoring bei Hausübergabestationen & teils defekte/falsch eingestellte Hausübergabestationen		

Anhang

Hauptkategorie	Unterkategorie	Code
Konflikte		
Technik- und Strategiekonflikte	Uneinigkeit über weiteres Vorgehen	Uneinigkeit über Strategie: weitere Studien (mehr Wissen) oder Umsetzung (direktes Handeln)
		Unterschiedliche Herangehensweisen: theoretische Betrachtung vs. Praxis
		Unzureichende Berücksichtigung praktischer Aspekte in wissenschaftlichen Studien
		Kritik an E-Campus-Studie
		Bisherige Uni-interne Planungen und Studien seien realitätsfern und basieren auf falschen Annahmen
		Mangelnder Fokus auf Umsetzung
		Bisherige Studien gehen an Versorgungssicherheit vorbei, da keine Übergangslösungen unter Einbindung bestehender Systeme geplant
		Fehlende Vertragsprüfungen und -verhandlungen mit externen Energieabnehmern
		Bevorzugung der Wissenschaft vor betrieblichen Stakeholder durch Universitätsleitung
	Professor*innen "backen eigene Brötchen"	
	Technische Unsicherheiten	Unterschiedliche Realisierbarkeitsvorstellungen in Bezug auf Energieträger (v. a. Biogas, Wasserstoff) (und damit verknüpft auch unterschiedliche Annahmen zum Weiterbetrieb des HKW)
	Ökonomische Unsicherheiten	Unterschiedliche Einschätzungen zum Energie-Contracting in Bezug auf Profitabilität
	Realistische Zielsetzung	2030-Klimaneutralitäts-Ziel für Landesliegenschaften: Anspruch und Umsetzungsmöglichkeiten
20 % PV-Ziel bei Uni-Gebäuden: Anspruch und Umsetzungsmöglichkeiten		
Energiesparziel: Anspruch und Umsetzungsmöglichkeiten (v. a. Gebäudesanierung)		
Verteilungskonflikte		Finanzierungsverantwortung für Energieeinsparmaßnahmen Uni oder UBA
		Betreiber vs. Vermieter (Eigentümer) Dilemma ("Mieter-Vermieter-Dilemma" zw. MWK/Uni und MF/UBA: Uni hat keine Entscheidungshoheit und UBA keinen Investitionsanreiz
		Uni zahlt Miete auf eigene Kosten, wenn Landes-Gebäude außer Betrieb genommen werden
		Unterschiedliche Anforderungen an Betriebspersonal je nach Kältemittel
Personale Konflikte / Beziehungskonflikte		Stakeholder A sieht Stakeholder B als „retardierendes Moment“
		Stakeholder B und Stakeholder C haben eine konfliktive Vorgeschichte

Anhang

Hauptkategorie	Unterkategorie	Code
Zielkonflikte	Mission Forschung & Lehre vs. Klimaschutzziele	Landesvorgabe zur Energieeinsparung beinhaltet keine konkreten Maßnahmen und beachtet Forschungsbetrieb der Uni nicht
		UBA ließe nur zertifizierte und normierte technische Lösungen zu, was die Nutzung innovativer Lösungen hemmt
		Vision vs. Umsetzbarkeit (Leitung vs. Koch)
		Wirtschaftlichkeit und normierte Technologie (UBA) vs. Innovationsanspruch (Uni)
		Innovative Ansätze wie PV-Fensterfolien oder Fassaden-PV zur Erschließung von mehr PV-Potenzial stoßen auf Ablehnung
	Finanzielles Ziel vs. Klimaschutzziele	Nutzen kommunikativer Klimaschutz-Maßnahmen vs. Kosten
		Ideologie vs. Kompromissbereitschaft
		Abwärmenutzung HLRS vs. höhere Stromkosten aufgrund niedrigerer Wärme-Strom-Kopplung über HKW
		Höhere Stromkosten bei Reduktion der Wärmenutzung aus dem HKW
		Wärmepumpen führen zu reduzierter Wärmenachfrage beim HKW (wodurch weniger Strom produziert werden kann)
	Wärmepumpen führen zu höherem Stromverbrauch und -kosten	
	Versorgungssicherheit vs. Klimaschutzziele	Erfüllung des Versorgungsauftrags "Sichere Energieversorgung"
	Dringendes vs. Nicht-Dringendes	Sanierungen fallen in Dringlichkeitsliste hinten runter wegen anderer "Baustellen"
		Universitätsgebäude haben beim UBA niedrige Priorität

Anhang 2: *Ergänzende Anmerkungen und Erläuterungen zu den Entscheidungskriterien der MCDA.*

Treibhausgasemissionen: *Scope 1* beschreibt Treibhausgasemissionen, die durch direkt im Bilanzraum erzeugte Energie entstehen. *Scope 2* bezieht sich auf Treibhausgasemissionen, die indirekt durch den externen Bezug von Energie entstehen. Neben den kumulativen Treibhausgasemissionen werden auch die damit verbundenen Klimafolgekosten (in EUR) einer Versorgungsvariante bis zum Zieljahr angegeben. Die Berechnung basiert auf der Methodenkonvention 3.1. zur Ermittlung von Umweltkosten (2021) des Umweltbundesamtes, welche auch das UBA zur Grundlegung des CO₂-Schattenpreises nutzt.

Flächennutzung: Neben dem berechneten Gesamtwert wird bei den Ergebnissen informativ auch angegeben, wie viel Fläche (in m²) für welche Technologie (z. B. Großwärmepumpen oder PV-Anlagen) im Zieljahr benötigt wird. Der vom Modell berechnete Wert (in m²) stellt keine ganz exakte Angabe dar, da die Berechnung auf Literaturwerten je Technologie (m² pro thermische/elektrische Leistung) beruhen und somit in Realität Abweichungen bestehen können (u. a. zusätzlicher Flächenbedarf durch nötige Versorgungsleitung, Zuleitungen, etc.). Annahme bei Wärmetechnologien: Alle Flächen, die neu zur Wärmeerzeugung/-verteilung genutzt werden (z. B. Flächen für Wärmepumpen und Speicher), sind bisher unversiegelte Freiflächen. Annahme bei PV: PV-Anlagen werden auf bereits versiegelten Flächen (v. a. Dächer und Fassaden) installiert oder auf unversiegelten Flächen, die durch die PV-Installation wie zuvor nutzbar bleiben (u. a. Agri-PV) und somit als weiterhin unversiegelt betrachtet werden.

Gesamtkosten: Neben den Gesamtkosten wird informativ angegeben, wieviel welche Technologie (z. B. eine Großwärmepumpe) zu welchem Investitionszeitpunkt kostet. Neben den Gesamtkosten wird zudem informativ der Kapitalwert des gesamten Technologieparks im Zieljahr angegeben.

Energiebedarf: Der Energiebedarf wird als Gesamtwert und differenziert nach unterschiedlichen Energieträgern dargestellt.

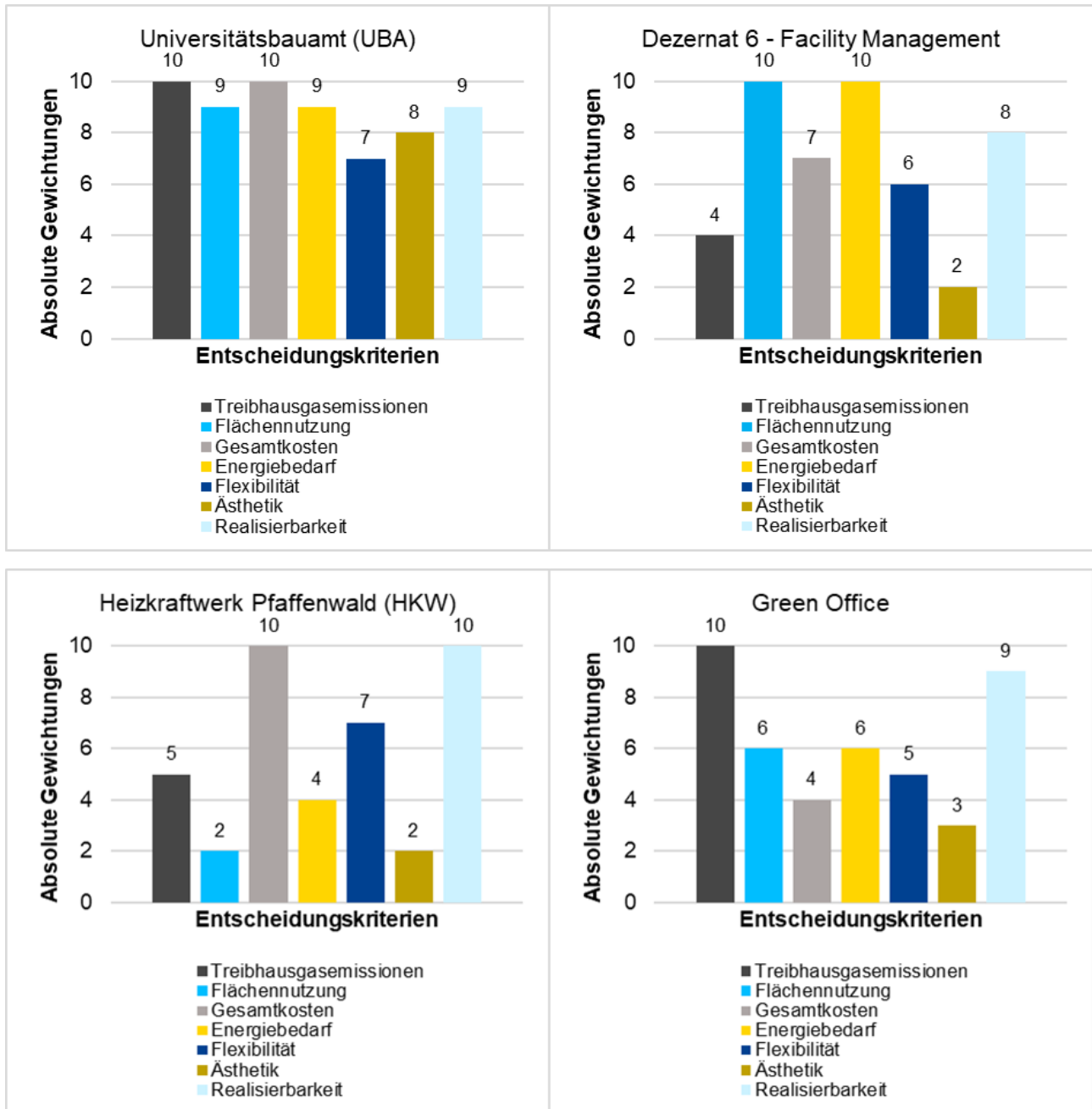
Ästhetik: Die Bewertung wird nach der Betrachtung der unterschiedlichen Versorgungsvarianten individuell durch die einzelnen Stakeholder vorgenommen. Somit liegt eine Stakeholder-spezifische Bewertung der Ästhetik einer Versorgungsvariante sowie eine daraus resultierende, über die Stakeholder hinweg durchschnittliche ästhetische Bewertung vor.

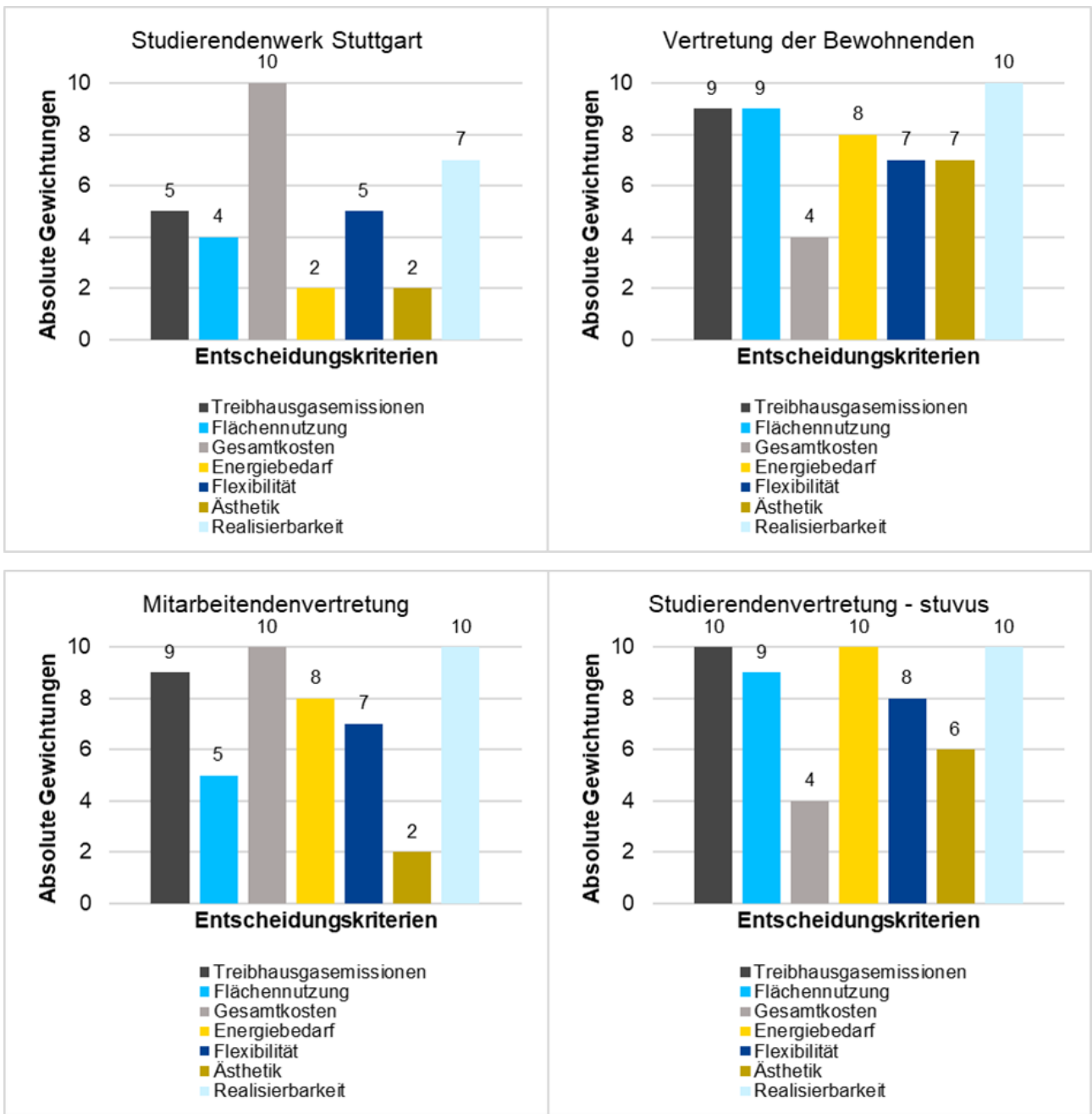
Realisierbarkeit: Der Gesamtwert für eine Energieversorgungsvariante wird als Durchschnittswert auf Basis individueller Bewertungen der Stakeholder (im Anschluss an eine Diskussion der Realisierbarkeit der Variante) ermittelt.

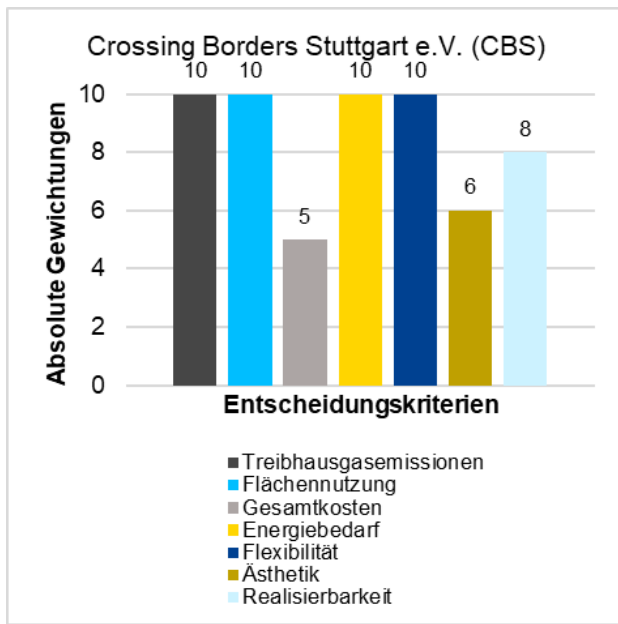
Zu den Rahmenbedingungen der Realisierbarkeit können im Einzelnen gehören:

- Technische Machbarkeit durch verfügbare Technologien und Passung zur bestehenden Infrastruktur
- Räumliche Integration durch ausreichend Fläche (z. B. für Großwärmepumpen, Heizzentralen, Wärmespeicher, Trassen)
- Rechtlich-regulatorische Umsetzbarkeit durch geringe baurechtliche, genehmigungsrechtliche oder energiewissenschaftliche Hürden
- Organisatorische Durchführbarkeit durch ausreichend verfügbare notwendige und kooperationsbereite Stakeholder (z. B. Eigentümer*innen, Energieversorger, Netzbetreiber, Kommune, Fachkräfte)

Anhang 3: Darstellung der absoluten Gewichte nach einzelnen Stakeholdern







Anhang 4: Steckbriefe zu den einzelnen Maßnahmen

Im Folgenden werden die 17 Maßnahmen steckbriefartig dargestellt. Neben einer kurzen Beschreibung werden die zentralen Arbeitsschritte sowie die beteiligten Akteure benannt. Abschließend erfolgt eine Einschätzung des Beitrags der jeweiligen Maßnahme zur Klimaneutralität sowie ihrer Umsetzbarkeit. Die Bewertung dieser beiden Aspekte erfolgte im Rahmen eines Abschlussworkshops durch die Teilnehmenden des Dialogprozesses.

Der Aspekt „Umsetzbarkeit“ berücksichtigt drei Kategorien: einfach, kompliziert und komplex. Als *einfach* gelten Maßnahmen mit standardisierter Vorgehensweise, die ohne größeren Vorlauf umgesetzt werden können. *Komplizierte* Maßnahmen erfordern die Auswahl zwischen mehreren Lösungswegen und damit die Einbindung spezifischer Fachkompetenzen, etwa durch vertiefende Studien oder technische Untersuchungen. *Komplexe* Maßnahmen umfassen zahlreiche miteinander verknüpfte Teilaspekte und erfordern die Beteiligung zahlreicher Akteure und Fachbereiche. Ihre Umsetzung setzt daher ein systemisches Vorgehen, abgestimmte Prozesse und eine sorgfältige Koordination voraus. Für weiterführende Informationen wird auf LEÓN ET AL. (2026) verwiesen.

Maßnahme 1	Suche und Auswahl von Standorten für Energiezentralen und thermische Speicher
Beschreibung	<p>Zur Dekarbonisierung des Wärmenetzes werden zusätzliche Wärmeerzeuger benötigt. Die geplante Großwärmepumpe am HLRS III stellt dabei einen zentralen Baustein dar. Ergänzend dazu sollten die bestehenden Wärmespeicher am Heizkraftwerk Pfaffenwald (HKW) zur kurzfristigen Leistungsbereitstellung mindestens erhalten und – abhängig von der zukünftigen Auslegung eines Spitzenlasterzeugers – ggf. ausgebaut werden. Sowohl Großwärmepumpen als auch thermische Speicher und mögliche Geothermieanlagen erfordern jedoch eine entsprechende Flächenverfügbarkeit.</p> <p>In enger Abstimmung mit einer Leistungsbedarfsplanung müssen daher Flächen und Standorte identifiziert und gesichert werden, die die erforderlichen Kapazitäten aufnehmen können. Dabei ist insbesondere der stellenweise anspruchsvolle Untergrund des Campus Vaihingen zu berücksichtigen.</p>
Arbeitsschritte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Durchführung einer Leistungsbedarfsplanung über die kommenden 20 Jahre. 2. Definition geeigneter Technologien und Festlegung der zusätzlich benötigten thermischen Leistung als Ergänzung zur Großwärmepumpe am HLRS III und dem HKW. 3. Ermittlung des erforderlichen Flächenbedarfs für Energiezentralen und thermische Speicher. 4. Klärung von Eigentums- und Nutzungsfragen und ggf. Beauftragung von Baugrundgutachten zur Bewertung der Standorttauglichkeit.
Beteiligte	Universitätsbauamt, Dezernat 8 (Planen und Bauen), Heizkraftwerk Pfaffenwald (HKW)
Beitrag zur Klimaneutralität	Gering bis mittel
Umsetzbarkeit	Komplex

Maßnahme 2	Installation von Großwärmepumpen zur Integration der oberflächennahen geothermischen Wärmequellen sowie der Abwärme der Kältezentrale Süd
Beschreibung	<p>Neben der geplanten Großwärmepumpe am HLRS III bedarf es langfristig noch weiterer Wärmeerzeuger, wenn das HKW nicht langfristig mit Biogas (oder Wasserstoff) betrieben wird. Die Installation einer Großwärmepumpe mit Wärmequelle Geothermie ist aus Gründen der Effizienz einer Großwärmepumpe mit Wärmequelle Umgebungsluft vorzuziehen. Die Sonden im Erdreich könnten weiterhin in den Sommermonaten durch Abwärme vom HLRS, die in dieser Zeit durch Kühlung abgeführt werden müsste, regeneriert werden.</p> <p>Die Abwärme der Kältezentrale Süd (circa 35 °C) kann mittels einer Großwärmepumpe durch Anhebung des Temperaturniveaus auf circa 85 °C genutzt werden und in das Wärmenetz eingespeist werden. Zukünftig ist mit einem steigenden Kältebedarf zu rechnen, da bis 2035 Neubauten mit Kältebedarf hinzukommen und aufgrund des Klimawandels mit einem steigenden Bedarf an Gebäudekühlung zu rechnen ist, was das Potenzial von etwa 25,6 GWh (entspricht 25 % des jährlichen Wärmeverbrauchs in 2023 der an das Wärmenetz angeschlossenen Gebäude) dieser Wärmequelle unterstreicht.</p>
Arbeitsschritte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Standortsuche und -wahl 2. Detaillierte Untersuchung der geologischen Gegebenheiten und künftiger Kältebedarfe 3. Prüfung einer Kombination mit der Maßnahme „Installation neuer Kältemaschinen“ 4. Detailplanung und Anlagenauslegung 5. Bau der Großwärmepumpen 6. Inbetriebnahme
Beteiligte	Heizkraftwerk Pfaffenwald (HKW), Universitätsbauamt (UBA), Dezernate 6 (Facility Management) und 8 (Planen und Bauen)
Beitrag zur Klimaneutralität	Hoch
Umsetzbarkeit	Kompliziert

Maßnahme 3	Absenkung der Vorlauftemperaturen im Wärmenetz
Beschreibung	<p>Die geplante Abwärmenutzung am HLRS III erfordert eine maximale Vorlauftemperatur von 85 °C im Wärmenetz. Zugleich sollte die Rücklauftemperatur 55 °C möglichst nicht überschreiten, um einen effizienten Betrieb der Abwärmezentrale sicherzustellen.</p> <p>Messungen zeigen jedoch, dass die tatsächlichen Vorlauftemperaturen derzeit im Durchschnitt rund 25 K über den Vorgaben der Technischen Anschlussbedingungen (TAB) liegen. Dies führt auch zu erhöhten Rücklauftemperaturen. Auffällig sind insbesondere die hohen Werte im Frühjahr – entgegen der typischen Netzbetriebslogik. Dies resultiert zum einen auf dem Zwei-Schicht-Betrieb am Heizkraftwerk Pfaffenwald, bei dem tagsüber die Wärmespeicher tagsüber mit hohen Temperaturen beladen werden, um die nächtliche Versorgung sicherzustellen. Zum anderen wirken auch noch andere Faktoren ein, die weiter analysiert werden müssen, z. B. die Überprüfung der Hausübergabestationen.</p> <p>Eine konsequente Einhaltung der TAB-Vorgaben würde nicht nur die Netzverluste reduzieren, sondern auch die Effizienz des Gesamtsystems steigern und die Integration der Abwärmezentrale am HLRS III deutlich verbessern.</p>
Arbeitsschritte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Hardware-Audit und Nachrüstung: Prüfung und ggf. Austausch fehlerhafter oder veralteter Sensorik, Ventile und Regelkomponenten in den Übergabestationen. Siehe auch Maßnahme 9. 2. Schrittweise Temperaturabsenkung: Anpassung der Heizkurven und Testbetrieb mit sukzessiver Senkung der Vorlauftemperaturen; parallele Überwachung der Rücklauftemperaturen und Komfortparametern. 3. Betriebs- und Datenanalyse: Auswertung der Testphase über mehrere Wochen zur Bewertung von Effizienzgewinnen, Stabilität und Rückwirkungen auf das Netz. 4. Skalierung und Standardisierung: Übertragung der erprobten Regelstrategien auf weitere Netzabschnitte und Erzeuger. 5. Stabiler Dauerbetrieb: Etablierung eines dauerhaft optimierten Temperaturniveaus im Netzbetrieb als Grundlage für die Integration der Abwärmezentrale am HLRS III.
Beteiligte	Dezernate 6 (Facility Management) und 8 (Planen und Bauen), Heizkraftwerk Pfaffenwald, Anschlussnehmer des Wärmenetzes, Universitätsbauamt
Beitrag zur Klimaneutralität	Hoch
Umsetzbarkeit	Kompliziert

Maßnahme 4	Ausbau der PV-Anlagen auf Dachflächen sowie Prüfung von fassadenintegrierter PV-Anlagen
Beschreibung	Die Installation von Photovoltaik-(PV)-Anlagen auf den Gebäudedächern trägt sowohl zur Reduktion der Treibhausgasemissionen als auch zur Senkung der Strombezugskosten bei. Eine vollständige Nutzung des theoretischen PV-Potenzials auf den Dachflächen der Universitätsgebäude (10,6 MW _p) würde nicht zu Stromüberschüssen führen. Daher sollte Photovoltaik auf und an allen geeigneten Gebäuden – sofern technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll – konsequent ausgebaut werden.
Arbeitsschritte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Statische Überprüfung aller Dachflächen mit PV-Potenzial 2. Priorisierung der geeigneten Dachflächen auf Basis der wirtschaftlichen Umsetzbarkeit und Klärung der Finanzierbarkeit 3. Planung und Projektierung der PV-Anlagen 4. Umsetzung und Installation der PV-Systeme
Beteiligte	Universitätsbauamt (UBA), Dezernate 6 (Facility Management) und 8 (Planen und Bauen), Rektorat
Beitrag zur Klimaneutralität	Gering
Umsetzbarkeit	Kompliziert

Maßnahme 5	Einführung einer automatisierten Betriebsoptimierung des Energiesystems
Beschreibung	<p>Mit der Inbetriebnahme des HLRS III und die damit notwendige Erweiterung um die Abwärmezentrale (AWZ) steigt der elektrische Energiebedarf des Campus erheblich. Eine hierarchische, automatisierte Betriebsoptimierung ist daher notwendig, um Erzeuger, Speicher, Netz und Großverbraucher effizient und robust zu steuern.</p> <p>Die Optimierung bildet die Grundlage dafür, dass der Campus die Vorteile eines dynamischen Strompreises (vgl. Maßnahme 8) nutzen kann: Sie entscheidet in Echtzeit, wann Speicher geladen, Wärmepumpen betrieben oder HKW-Spitzen bereitgestellt werden. Damit entsteht ein System, das wirtschaftlich optimal, netzschonend und CO₂-ärmer arbeitet.</p>
Arbeitsschritte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Modell- und Regelkonzept: Entwicklung einer hierarchischen Steuerungsarchitektur (Supervisory + Low-Level). 2. Simulative Validierung: Testen der Regelstrategien in realitätsnahen Szenarien (Winterlast, Engpässe, Speicherbetrieb, AWZ-Schwankungen). 3. Hardware-Audit: Prüfung der Sensorik, Aktorik und Schnittstellenfähigkeit in HKW, AWZ, Speichern und Übergabestationen. 4. Pilotbetrieb: Einführung im Teilsystem (z. B. HLRS-Hauptstrang) mit Monitoring. 5. Roll-Out: Skalierung auf den gesamten Campus, inkl. Integration aller dynamischen Preis- und Netzsignale.
Beteiligte	Dezernate 6 (Facility Management) und 8 (Planen und Bauen), Heizkraftwerk Pfaffenwald, Rektorat, Universitätsbauamt
Beitrag zur Klimaneutralität	Mittel bis hoch
Umsetzbarkeit	Kompliziert

Maßnahme 6	Durchführung einer detaillierteren Stromnetzplanung
Beschreibung	<p>Die durchgeführten Lastflussberechnungen für das vom Heizkraftwerk betriebene Mittelspannungsnetz zeigen, dass sowohl im Status quo als auch in den betrachteten Zukunftsszenarien (PV-Ausbau, Ausbau der Elektromobilität, Abwärmezentrale am HLRS III, Wegfall des HKW) keine Überlastungen der untersuchten Netzkomponenten auftreten.</p> <p>Die Leitungsauslastungen liegen durchgehend unter 75 %, die zulässigen Spannungsgrenzen werden an allen Netzknoten eingehalten, und die Hochspannungs-/Mittelspannungs-Versorgungstransformatoren sind mit maximal 40 % ihrer Nennleistung ausgelastet. Nicht Bestandteil der Untersuchung waren die 10-kV-Stationen sowie die Schaltanlagen.</p> <p>Mögliche Engpässe, insbesondere bei Schutzeinrichtungen, Schaltgeräten oder Niederspannungstransformatoren, sind daher gesondert zu analysieren. Bei zusätzlichem Anschluss weiterer derzeit oder künftig geplanter Verbraucher (z. B. Großwärmepumpen oder Großverbraucher) ist eine erneute szenarienbasierte Netzberechnung erforderlich.</p>
Arbeitsschritte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Erhebung von Messdaten oder Modellierung der vorhandenen 10-kV-Stationen zur Lastflussberechnung 2. Auswertung der Messdaten und Simulationsergebnisse 3. Abschätzung der zusätzlichen Belastung in zukünftigen Szenarien 4. Evtl. Austausch der zu gering dimensionierten Betriebsmittel
Beteiligte	Heizkraftwerk Pfaffenwald (HKW), Universitätsbauamt
Beitrag zur Klimaneutralität	Gering
Umsetzbarkeit	Einfach bis kompliziert

Maßnahme 7	Installation neuer Kältemaschinen
Beschreibung	<p>Im Rahmen dieser Maßnahme werden neue Kältemaschinen für die zentrale Kälteversorgung des Campus zum schrittweisen oder vollständigen Ersatz der bisher verwendeten Kältemaschinen installiert. Dies ist in den nächsten Jahren erforderlich, da die bisher verwendeten Kältemaschinen das Kältemittel R 134a mit einem hohen Treibhausgaspotenzial verwenden und deren Betrieb daher zukünftig nicht mehr zulässig ist.</p> <p>Zusätzlich ermöglichen die vorhandenen Kältemaschinen keine Nutzung der Abwärme, wie dies zukünftig geplant ist (vgl. Maßnahme 2).</p>
Arbeitsschritte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Detaillierte Untersuchung künftiger Kältebedarfe 2. Detailplanung 3. Installation der Kältemaschinen 4. Inbetriebnahme
Beteiligte	Heizkraftwerk Pfaffenwald (HKW), Universitätsbauamt (UBA)
Beitrag zur Klimaneutralität	Hoch
Umsetzbarkeit	Kompliziert

Maßnahme 8	Evaluation von möglichen Kosteneinsparungen durch die Nutzung eines dynamischen Strompreises
Beschreibung	<p>Die Nutzung eines dynamischen Strompreises bietet die Möglichkeit, die variablen Marktpreise im Stromhandel gezielt für die wirtschaftliche und flexible Steuerung des Energiesystems am Campus Vaihingen einzusetzen. Durch die Anpassung der Betriebsweise der Energiesystemkomponenten (Erzeugung, Last, Speicher) kann die Betriebseffizienz optimiert und die Wirtschaftlichkeit (bspw. durch Kosteneinsparungen) gesteigert werden.</p> <p>Gleichzeitig erfordert die Umsetzung eines dynamischen Preismodells besondere organisatorische und technische Voraussetzungen. Dazu zählen ein deutlich höherer Automatisierungsgrad, geeignete Lieferverträge und neue Anreizstrukturen. Auch das alltägliche „Handling“ des Tarifs muss geklärt werden, beispielsweise durch die Zusammenarbeit mit externen Dienstleistern zur operativen Steuerung. Zudem darf der Forschungsbetrieb der Universität nicht beeinträchtigt werden. Hier kommt einer transparenten und zielgruppengerechten Kommunikation an die Beschäftigten besondere Bedeutung zu. Da dynamische Tarife ein Preisrisiko beinhalten, sollte zudem eine Kombination verschiedener Tarifmodelle geprüft werden, um Kostensicherheit und Flexibilität gleichermaßen zu gewährleisten.</p>
Arbeitsschritte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Evaluation der Machbarkeit 2. Technische und organisatorische Vorbereitung der Umsetzung 3. Anpassung der Betriebsweise
Beteiligte	Heizkraftwerk Pfaffenwald, Rektorat
Beitrag zur Klimaneutralität	Gering
Umsetzbarkeit	Einfach bis kompliziert

Maßnahme 9	Justierung und Nachrüstung der thermischen Hausübergabestationen
Beschreibung	Der Einsatz von funktionsfähigen und korrekt eingestellten Hausübergabestationen (HÜS) führt zu einer Effizienzsteigerung der Wärmeerzeugung, geringeren Druck- und Wärmeverlusten des Wärmenetzes, einer höheren Systemstabilität, zu geringeren Hilfsenergiebedarfen und damit auch zu geringeren Kosten und Treibhausgasemissionen. Auch wenn durch die Nachrüstung von Wärmeübertragern das Temperaturniveau im Netz geringfügig angehoben wird, bietet die dadurch mögliche hydraulische Entkopplung zwischen dem Netz im Gebäude und dem Wärmenetz den Vorteil einer deutlich erhöhten Betriebssicherheit sowie einer regelungstechnisch vereinfachten Betriebsführung.
Arbeitsschritte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bestandsaufnahme und Prüfung aller HÜS im Wärmenetz. 2. Analyse, Austausch und Justierung von Ventilen und Anpassung von Regelparametern zur Sicherstellung einer Temperaturspreizung zw. Vor- und Rücklauf im Wärmenetz von ≥ 30 K bei minimalem Massenstrom, durch Simulationen ermittelt. 3. Nachrüstung HÜS mit Wärmeübertragern an allen Wärmenetzanschlüssen, an welchen bislang keine vorhanden sind.
Beteiligte	Dezernate 6 (Facility Management) und 8 (Planen und Bauen), Heizkraftwerk Pfaffenwald, Universitätsbauamt, Anschlussnehmer des Wärmenetzes
Beitrag zur Klimaneutralität	Hoch
Umsetzbarkeit	Einfach

Maßnahme 10	Energetische Sanierung von Gebäuden
Beschreibung	Zur energetischen Sanierung zählt zum einen die Verbesserung der Gebäudehülle, d. h. Wärmedämmung von Dach, Fassade und Kellerdecke, sowie der Austausch von Fenstern und zum anderen die Optimierung oder Erneuerung haustechnischer Anlagen. Zu den haustechnischen Anlagen gehört u. a. die zentrale oder dezentrale Trinkwarmwasserbereitung, sowie die raumluftechnischen (RLT) Anlagen und zugehörige Nachrüstungen einer Wärmerückgewinnung. Weiterhin kann eine Überprüfung oder Nachrüstung von Gebäudeleittechnik maßgeblich zur Wärme- bzw. Energieeinsparung beitragen, insbesondere wenn sie beispielsweise mit einer präsenzabhängigen Steuerung der Temperatur und dem Luftwechseln in den Räumen einhergeht.
Arbeitsschritte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Flächendeckende Bestandsaufnahme und Digitalisierung des Zustandes der Gebäudehülle, der haustechnischen Anlagen und der Gebäudeleittechnik. 2. Definition von Priorisierungskriterien (hohe spezifische und absolute Wärmeverbräuche im Vergleich zu Wärmebedarfen; Dachsanierung, wenn Voraussetzung für PV-Anlagen, ...). 3. Planung und Umsetzung der priorisierten Sanierungs- und Nachrüstungsmaßnahmen.
Beteiligte	Universitätsbauamt, Dezernat 6 (Facility Management) und 8 (Planen und Bauen), Gebäudebetreiber, Rektorat
Beitrag zur Klimaneutralität	Mittel
Umsetzbarkeit	Kompliziert

Maßnahme 11	Etablierung einer Koordinierungsgruppe zur Steuerung und Begleitung der Energiewende am Campus Vaihingen
Beschreibung	Für die erfolgreiche Umsetzung der im Dialogprozess erarbeiteten Maßnahmen zur Transformation hin zu einem klimaneutralen Energiesystem am Campus Vaihingen soll eine regelmäßig stattfindende Austauschrunde eingerichtet werden. Diese dient der weiteren Konkretisierung der Maßnahmen (z. B. Festlegung klarer Verantwortlichkeiten, zeitlicher Meilensteine und verfügbarer Budgets), dem Monitoring des Fortschritts sowie der Anpassung von Strategien bei veränderten Rahmenbedingungen.
Arbeitsschritte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bildung einer Arbeitsgruppe mit Vertretungen aller relevanten Akteure am Campus Vaihingen. 2. Benennung einer Koordinationsperson für Organisation, Dokumentation und Kommunikation. 3. Festlegung der Arbeitsweise (Turnus, Entscheidungswege, Protokolle, etc.). 4. Regelmäßige Treffen zur Abstimmung, Fortschrittskontrolle und strategischen Anpassung. 5. Einbindung weiterer Stakeholder bei spezifischen Fragestellungen.
Beteiligte	Rektorat, Universitätsbauamt, Heizkraftwerk Pfaffenwald, weitere Akteure am Campus Vaihingen
Beitrag zur Klimaneutralität	Mittel bis hoch
Umsetzbarkeit	Einfach

Maßnahme 12	Analyse der Energienachfrage bis 2040 zur Auslegung des zukünftigen Energiesystems
Beschreibung	Zur Vermeidung einer Überdimensionierung von Energieerzeugungsanlagen (z. B. Geothermie-Großwärmepumpen) wird eine Abschätzung der zukünftigen Bedarfe für Strom, Wärme und Kälte bis 2040 erstellt. Dabei werden verschiedene Szenarien entwickelt, die zentrale Einflussfaktoren wie geplante Neubauten und Sanierungen, Veränderungen bei Forschungsanlagen, Home Office, neue Bürokonzepte (u. a. Shared Desk), die Flächenreduktionsvorgabe des Landes, Hybridlehre, sinkende Studierendenzahlen sowie neue Mobilitätskonzepte und zukünftige Kühlungsbedarfe am Campus Vaihingen berücksichtigen. Ziel ist eine realistische und belastbare Grundlage für die Auslegung der zukünftigen Wärme-, Kälte- und Stromversorgung, um einen effizienten und wirtschaftlichen Betrieb sicherzustellen.
Arbeitsschritte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sammlung der zentralen Einflussfaktoren auf die Energienachfrage bis 2040 für den Campus Vaihingen. 2. Abschätzung der Veränderung bzw. Reduktion der Energienachfrage auf Basis von Szenarien. 3. Prüfung von Maßnahmen, die für eine gebäude- oder raumweise regelbare Energienachfrage entsprechend der Nachfrageszenarien notwendig sind. 4. Abschätzung der Auswirkungen der Nachfrageszenarien auf die geplanten Maßnahmen am Campus Vaihingen.
Beteiligte	Universitätsbauamt, Dezernate 6 (Facility Management) und 8 (Planen und Bauen)
Beitrag zur Klimaneutralität	Mittel
Umsetzbarkeit	Komplex

Maßnahme 13	Zentralisierung der IT zur Steigerung der Energieeffizienz
Beschreibung	<p>Derzeit existieren an vielen Instituten und Verwaltungseinheiten der Universität Stuttgart dezentrale Serverräume, die oft energetisch ineffizient klimatisiert, baulich nicht optimiert oder überdimensioniert sind. Die Substitution aller dezentralen Serverräume durch die am TIK vorhandene zentrale IT-Infrastruktur würde dazu führen, dass die Betriebsstrategien und Anlagen zur Kühlung des zentralen Serverraums energetisch effizienter gestaltet werden können, die Abwärmenutzung z. B. durch die Einbindung in das Wärmenetz ermöglicht wird, der Hardwareeinsatz durch die Reduzierung redundanter Infrastruktur wie der Klimaanlage, der Brandmeldetechnik, etc. gesenkt wird, das Energie- und Rechenkapazitätsmanagement zentralisiert und energetisch optimiert werden können. Zusätzlich ist von diesen Maßnahmen eine deutliche Kosteneinsparung zu erwarten.</p>
Arbeitsschritte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Flächendeckende Bestandsaufnahme der Server-Räume der Institute und Verwaltungseinheiten sowie Rücksprache zu Serverraumanforderungen. 2. Identifizierung eines Ortes für die zentrale IT-Infrastruktur. 3. Iterative Planung und schrittweise Migration dezentraler Server in zentrale IT-Infrastrukturen. 4. Außerbetriebnahme energetisch ineffizienter Serverräume und Kühlanlagen. 5. Nutzung von Abwärme aus den Rechenzentren, sofern technisch möglich, zur Unterstützung der Wärmeversorgung.
Beteiligte	Dezernat 6 (Facility Management), Energiemanager, universitäre Einrichtungen mit Server-Räumen, Universitätsbauamt, Rektorat
Beitrag zur Klimaneutralität	Mittel
Umsetzbarkeit	Kompliziert bis komplex

Maßnahme 14	Abschätzung von Veränderungen in der Personalstruktur und Identifikation von Weiterbildungsbedarfen
Beschreibung	Im Zuge der Transformation zu einem klimaneutralen Energiesystem am Campus Vaihingen wird das Heizkraftwerk Pfaffenwald (HKW) schrittweise verkleinert oder umstrukturiert werden müssen. Gleichzeitig übernimmt das HKW neue Aufgaben, wie z. B. den Betrieb der Abwärmezentrale am HLRS III. Ziel der Maßnahme ist es, Auswirkungen auf die Personalstruktur frühzeitig zu identifizieren, bestehendes Personal aktiv in den Transformationsprozess einzubinden und die notwendigen Kompetenzen durch Weiterbildungen, Schulungen oder Umschulungen systematisch aufzubauen.
Arbeitsschritte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Analyse der zukünftigen Aufgaben und Kompetenzprofile 2. Einbindung des HKW-Personals in den Transformationsprozess 3. Entwicklung eines Weiterbildungs- und Umschulungskonzepts 4. Anpassung der Personalstruktur (falls erforderlich) 5. Begleitung und Verstetigung
Beteiligte	Heizkraftwerk Pfaffenwald, Rektorat, Dezernat 4 (Personal), Personalrat, externe Weiterbildungspartner
Beitrag zur Klimaneutralität	Mittel
Umsetzbarkeit	Einfach

Maßnahme 15	Erarbeitung einer Versorgungsstrategie zur Deckung von Sonderbedarfen durch Forschungsversuche
Beschreibung	Im Rahmen der Forschungsaktivitäten an bestehenden sowie zukünftigen Prüfständen – insbesondere dem Höhenprüfstand und dem Windkanal – treten unregelmäßige, jedoch teilweise sehr hohe elektrische Lastspitzen sowie ein zeitweiliger Bedarf an Prozessdampf auf. Derzeit werden diese Sonderverbraucher über ein separates Sondernetz versorgt. Zur bilanziellen Kompensation und damit zur Senkung des Leistungspreises erhöht das Heizkraftwerk (HKW) während dieser Lastspitzen seine Stromeinspeisung in das Normalnetz. Dies führt zu hohen Netzlasten im vom HKW-betriebenen Mittelspannungsnetz und ist technisch nicht zwingend erforderlich.
Arbeitsschritte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ermittlung des tatsächlichen Leistungs- und Energiebedarfs der Sonderverbraucher (Lastspitzen, Energiebedarf, Dampfbedarf). 2. Bewertung der aktuellen Versorgungsstrategie mit HKW sowie Prüfung alternativer Optionen wie Batteriespeicher oder Versorgung aus dem Hochspannungsnetz. 3. Entwicklung optimaler Betriebsstrategien für die ausgewählte zukünftige Versorgungsstruktur.
Beteiligte	Heizkraftwerk Pfaffenwald, Forschungsinstitute mit Sonderverbrauchern
Beitrag zur Klimaneutralität	Gering
Umsetzbarkeit	Kompliziert bis komplex

Maßnahme 16	Sensibilisierung von betroffenen Personengruppen für Veränderungen
Beschreibung	Zur erfolgreichen Umsetzung struktureller Veränderungen – wie der Reduktion von 30 % der Arbeitsflächen, der Realisierung von Baustellenmaßnahmen oder der Einführung von Shared-Desk-Konzepten – ist die aktive Einbindung und Sensibilisierung der Mitarbeitenden entscheidend. Ziel ist es, Akzeptanz zu schaffen, Informationslücken zu schließen und Betroffene frühzeitig in Entscheidungs- und Planungsprozesse einzubinden.
Arbeitsschritte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Festlegen, welche Veränderungen umgesetzt werden. 2. Formulieren der zentralen Argumente: Warum ist die Veränderung notwendig? Was sind die Vorteile? 3. Identifikation aller betroffenen Gruppen (Institute, Verwaltungseinheiten, Lehrende, Studierende, ...). 4. Kommunikations- und Beteiligungskonzept entwickeln. 5. Kommunikations- und Beteiligungsformate durchführen (z. B. Infoveranstaltungen, Internet, Aushänge, Workshops, Fokusgruppen). 6. Umsetzung und Begleitung des Veränderungsprozesses.
Beteiligte	Rektorat, Dezernat 6 (Facility Management) und 8 (Planen und Bauen), Fakultäten und Institute, Verwaltungseinheiten, Personalrat, Gleichstellungs- und Schwerbehindertenvertretung
Beitrag zur Klimaneutralität	Mittel bis hoch
Umsetzbarkeit	Kompliziert bis komplex

Maßnahme 17	Einbindung von Studierenden und wissenschaftlichen Mitarbeitenden in der Umsetzung von Maßnahmen
Beschreibung	Zur Unterstützung der Energiewende an der Universität Stuttgart sollen Studierende und wissenschaftliche Mitarbeitende aktiv in die Umsetzung von Maßnahmen eingebunden werden. Dies umfasst beispielsweise die regelmäßige Kontrolle und Bewertung von Hausübergabestationen hinsichtlich Effizienz, Temperaturführung und Regelverhalten. Im Rahmen von Abschlussarbeiten können Studierende in interdisziplinären Teams Messungen durchführen, Optimierungspotenziale identifizieren und gemeinsam mit der technischen Gebäudeausrüstung konkrete Verbesserungsvorschläge erarbeiten und diese umsetzen. Dadurch wird nicht nur das Energiesystem des Campus kontinuierlich verbessert, sondern es entsteht zugleich ein praxisnahes Lern- und Forschungsfeld, das Wissen über nachhaltige Wärmeversorgung stärkt und innovative Lösungen fördert.
Arbeitsschritte	<ol style="list-style-type: none"> 1. Definition von konkreten Prüf- und Analyseaufgaben 2. Ausschreibung an relevanten Fakultäten (z. B. Energietechnik, Maschinenbau, Architektur) 3. Vor-Ort-Begehungen und Datenerhebung 4. Datenanalyse und Bewertung 5. Präsentation der Ergebnisse 6. Umsetzung der Maßnahmen
Beteiligte	Dezernate 6 (Facility Management) und 8 (Planen und Bauen), Heizkraftwerk Pfaffenwald, Fakultäten und Institute, wissenschaftliche Mitarbeitende, Studierende
Beitrag zur Klimaneutralität	Hoch
Umsetzbarkeit	Einfach



Impressum

Herausgeber



Stuttgart Research Initiative
„Discursive Transformation of Energy Systems“ (SRI DiTEnS)

c/o Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart
Heßbrühlstraße 49a
70565 Stuttgart

+49 (0)711 6858780-0
sekretariat@ier.uni-stuttgart.de
<https://www.iier.uni-stuttgart.de>

Veröffentlicht am

13.04.2026

Wissenschaftliche Leitung

Kai Hufendiek^{1,6}, Markus Blesl^{1,6}, Cordula Kropp^{2,6}, Michael Resch³, Krzysztof Rudion⁴
und Konstantinos Stergiaropoulos⁵

Projektleitung

Pascal Häbig

Autorenschaft

Pascal Häbig^{1,6}, Abdul Azzam^{1,6}, Johannes Beck⁴, Marco Djuric³, Harald Drück⁵, Nils Egger^{2,6}, Tobias Fritz³, Peer Huber⁵, Franziska Lauth^{2,6}, Christian D. León^{2,6}, Stefanie Lott⁵, Fabian Ostertag^{1,6}, Tim Schaffitzel^{1,6}, Kilian Türk³, Jan Vollmer^{1,6}, Jonas Winkler^{1,6}, Uwe Wössner³, Markus Blesl^{1,6}, Cordula Kropp^{2,6}, Michael Resch³, Krzysztof Rudion⁴, Konstantinos Stergiaropoulos⁵ und Kai Hufendiek^{1,6}

Bitte zitieren als

Häbig, Pascal; Azzam, Abdul; Beck, Johannes; Djuric, Marco; Drück, Harald; Egger, Nils; Fritz, Tobias; Huber, Peer; Lauth, Franziska; León, Christian D.; Lott, Stefanie; Ostertag, Fabian; Schaffitzel, Tim; Türk, Kilian; Vollmer, Jan; Winkler, Jonas; Wössner, Uwe; Blesl, Markus; Kropp, Cordula; Resch, Michael; Rudion, Krzysztof; Stergiaropoulos, Konstantinos und Kai Hufendiek (2026): Ergebnisbericht zum Mock-Up des DiTEnS-Dialogprozesses am Universitätscampus Vaihingen; Stuttgart Research Initiative „Discursive Transformation of Energy Systems“ (SRI DiTEnS); Stuttgart.

DOI

10.18419/opus-18264

Förderung

Das Projekt Stuttgart Research Initiative „Discursive Transformation of Energy Systems“ (SRI DiTEnS) wird durch die Carl-Zeiss-Stiftung gefördert.

¹ Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)

² Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung der Universität Stuttgart (ZIRUS)

³ Höchstleistungsrechenzentrum Stuttgart (HLRS)

⁴ Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH)

⁵ Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)

⁶ STRise – Stuttgart Research Initiative on Integrated Systems Analysis for Energy

