

Klimaneutrale Quartiersentwicklung

Entwicklung eines planerischen Rahmenwerks zur Erstellung klimaneutraler Quartiere auf Grundlage der Nutzung erneuerbarer Energien und von CO₂-Kompensation anhand des Forschungscampus der Max-Planck-Gesellschaft in Martinsried

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades

Master of Science (M.Sc.)

an der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München.

Betreut von M.Sc. Markus Kleeberger, Univ. -Prof. Dr.-Ing Werner Lang
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

Eingereicht von Moritz Rafeiner
Mauthäuslstraße 45
81379 München
+49 176 46113751

Eingereicht am München, den 22.02.2024

Vereinbarung

zwischen

der Technischen Universität München, vertreten durch ihren Präsidenten,
Arcisstraße 21, 80290 München

hier handelnd der Lehrstuhl für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen
(Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Lang), Arcisstr. 21, 80333 München

– nachfolgend TUM –

und

Herrn Moritz Rafeiner.....

Mauthäuslstraße 45, 81379 München

– nachfolgend Autor –

Die Autorin / der Autor wünscht, dass die von ihr/ihm an der TUM erstellte Masterarbeit mit dem Titel

Entwicklung eines planerischen Rahmenwerks der Klimaneutralität in frühen Planungsphasen des Quartiers anhand des Campus für „Life Sciences“ der Max-Planck-Gesellschaft in Martinsried

auf mediaTUM und der Webseite des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen mit dem Namen der Verfasserin / des Verfassers, dem Titel der Arbeit, den Betreuer:innen und dem Erscheinungsjahr genannt werden darf.

in Bibliotheken der TUM, einschließlich mediaTUM und die Präsenzbibliothek des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen, Studierenden und Besucher:innen zugänglich gemacht und veröffentlicht werden darf. Dies schließt auch Inhalte von Abschlusspräsentationen ein.

mit einem Sperrvermerk versehen und nicht an Dritte weitergegeben wird.

Zu diesem Zweck überträgt die Autorin / der Autor der TUM zeitlich und örtlich unbefristet das nichtausschließliche Nutzungs- und Veröffentlichungsrecht an der Masterarbeit.

Die Autorin / der Autor versichert, dass sie/er alleinige(r) Inhaber(in) aller Rechte an der Masterarbeit ist und der weltweiten Veröffentlichung keine Rechte Dritter entgegenstehen, bspw. an Abbildungen, beschränkende Absprachen mit Verlagen, Arbeitgebern oder Unterstützern der Masterarbeit. Die Autorin / der Autor stellt die TUM und deren Beschäftigte insofern von Ansprüchen und Forderungen Dritter sowie den damit verbundenen Kosten frei.

Eine elektronische Fassung der Masterarbeit als pdf-Datei hat die Autorin / der Autor dieser Vereinbarung beigelegt. Die TUM ist berechtigt, ggf. notwendig werdende Konvertierungen der Datei in andere Formate vorzunehmen.

Vergütungen werden nicht gewährt.

Eine Verpflichtung der TUM zur Veröffentlichung für eine bestimmte Dauer besteht nicht.

Die Autorin / der Autor hat jederzeit das Recht, die mit dieser Vereinbarung eingeräumten Rechte schriftlich zu widerrufen. Die TUM wird die Veröffentlichung nach dem Widerruf in einer angemessenen Frist und auf etwaige Kosten der Autorin / des Autors rückgängig machen, soweit rechtlich und tatsächlich möglich und zumutbar.

Die TUM haftet nur für vorsätzlich oder grob fahrlässig verursachte Schäden. Im Falle grober Fahrlässigkeit ist die Haftung auf den vorhersehbaren Schaden begrenzt; für mittelbare Schäden, Folgeschäden sowie unbefugte nachträgliche Veränderungen der veröffentlichten Masterarbeit ist die Haftung bei grober Fahrlässigkeit ausgeschlossen.

Die vorstehenden Haftungsbeschränkungen gelten nicht für Verletzungen des Lebens, des Körpers oder der Gesundheit.

Meinungsverschiedenheiten im Zusammenhang mit dieser Vereinbarung bemühen sich die TUM und die Autorin / der Autor einvernehmlich zu klären. Auf diese Vereinbarung findet deutsches Recht unter Ausschluss kollisionsrechtlicher Regelungen Anwendung. Ausschließlicher Gerichtsstand ist München.

München, den 22.02.2024

München, den 22.02.2024

.....



(TUM)

(Autor)

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

München, 22.02.2024

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'R. Pfeiffer', written above a horizontal line.

München, 22.02.2024, Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Vereinbarung	I
Erklärung	III
Inhaltsverzeichnis	1
Kurzfassung.....	4
Summary	5
Danksagung	6
Abkürzungsverzeichnis	7
Glossar	8
1. Einführung	10
1.1. Zielsetzung und Forschungsfrage	12
2. Methodik.....	13
2.1. Aufbau des Kennwertesystems der Energieversorgung	13
2.2. Methodik zur Ermittlung der ökologischen CO ₂ - Kompensationsmaßnahmen.....	16
2.3. Anwendung des planerischen Rahmenwerks auf den Campus für „Life- Sciences“ der MPG in Martinsried.....	17
3. Grundlegende Emissionsquellen	19
3.1. Ausgangslage: Emissionen der Strom- und Wärmeversorgung	19
3.2. Ausgangslage: Emissionen der Baukonstruktion.....	21
3.3. Kennwertbildung der klimaneutralen Energieversorgung des Gebäudebetriebs	23
3.3.1. Kennwertbildung der Photovoltaikmodule zur klimaneutralen Stromversorgung des Quartiers.....	24
3.3.2. Kennwertbildung der Windräder zur klimaneutralen Stromversorgung des Quartiers	25
3.3.3. Kennwertbildung der Wärmerückgewinnung aus Servern zur klimaneutralen Wärmeversorgung des Quartiers.....	27
3.3.4. Kennwertbildung der Solarthermie zur klimaneutralen Wärmeversorgung des Quartiers.....	29
3.3.5. Kennwertbildung der Wärmerückgewinnung aus Abwasser zur klimaneutralen Wärmeversorgung.....	31
3.3.6. Anwendungs- und standortbedingte Ertragsverläufe der klimaneutralen Energieversorgung	32
3.4. Grundlagen der ökologischen Kompensation	34
3.4.1. Abgleich der Zeitschienen der Quartiersemissionen und der ökologischen Kompensationsmaßnahmen.....	36

3.5.	Kennwertbildung der ökologischen CO ₂ -Kompensationsmaßnahmen.....	37
3.5.1.	Kennwertbildung der Buche als CO ₂ -Einzelkompensationsmaßnahmen	38
3.5.2.	Kennwertbildung der Tanne als CO ₂ -Einzelkompensationsmaßnahme	40
3.5.3.	Kennwertbildung der Dachbegrünungen als bauwerksgebundene CO ₂ - Kompensationsmaßnahmen	41
3.5.4.	Kennwertbildung der Fassadenbegrünungen als bauwerksgebundene CO ₂ -Kompensationsmaßnahmen	43
3.5.5.	Kennwertbildung der Hecken als CO ₂ -Kompensationsmaßnahme durch Naturflächen	45
3.5.6.	Kennwertbildung der Moore als CO ₂ -Kompensationsmaßnahmen durch Naturflächen	46
3.5.7.	Kennwertbildung der Weideflächen als CO ₂ -Kompensationsmaßnahmen durch Naturflächen	48
3.5.8.	Kennwertbildung des Waldbodens als CO ₂ -Kompensationsmaßnahmen durch Naturflächen	49
3.6.	Vergleich ökologischer Kennwerte der CO ₂ -Kompensation	50
4.	Anwendung auf den Campus für „Life-Sciences“ der Max-Planck-Gesellschaft in Martinsried	52
4.1.	Größeneinordnung der bestehenden Bebauung in Martinsried.....	53
4.1.1.	Raumbedarf und Nutzungsverteilung des Campus für „Life Sciences“ in Martinsried.....	55
4.1.2.	Rahmenbedingungen der Simulation des modularen Laborgebäudes des Campus für „Life Sciences“	55
4.2.	Auswertung der Ergebnisse der IDA ICE Simulation und der Lebenszyklusanalyse des Laborgebäudes	57
4.2.1.	Flächenverfügbarkeit für die Anwendung des planerischen Rahmenwerks	60
4.3.	Anwendung der Kennwerte der klimaneutralen Energieversorgung auf das Laborgebäude	61
4.3.1.	Anwendung des Kennwerts der Photovoltaik auf den Strombedarf.....	61
4.4.	Anwendung der Kennwerte der klimaneutralen Wärmeversorgung	63
4.4.1.	Anwendung des Kennwerts der Wärmerückgewinnung von Servern	64
4.5.	Anwendung der ökologischen CO ₂ -Kompensationsmaßnahmen.....	66
4.5.1.	Kompensation durch ökologische Einzelmaßnahmen.....	66
4.5.2.	Kompensation durch die Kombination ökologischer Maßnahmen.....	68
4.5.3.	Sicherstellung der Klimaneutralität in der frühen Planungsphase durch quartiersgebundene Maßnahmen.....	72
4.6.	Wechselwirkung und zusätzlicher Nutzen der ökologischen Kompensationsmaßnahmen.....	75
4.7.	Übertragbarkeit des planerischen Rahmenwerks auf weitere Quartiersprojekte.....	77
5.	Ausblick: 100% Klimaneutrale Energieversorgung	82

5.1.1.	Ausbau erneuerbarer Energien im deutschen Stromnetz	84
5.1.2.	Speicherung überschüssiger elektrischer Energie im Quartier	85
5.1.3.	Dezentrale Stromversorgung mittels Biomasse-Kleinkraftwerken.....	87
6.	Fazit	88
6.1.1.	Skalier- und Übertragbarkeit des planerischen Rahmenwerks	88
6.1.2.	Sicherstellung der Energieversorgung des Quartiers.....	89
6.1.3.	Dauerhaftigkeit der ökologischen Kompensationsmaßnahmen	90
6.1.4.	Realisierbarkeit der Klimaneutralität in frühen Planungsphasen des Quartiers	91
	Literaturverzeichnis.....	93
	Abbildungsverzeichnis	99
	Tabellenverzeichnis	101
	Anhang 103	

Kurzfassung

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht in der Entwicklung eines planerischen Rahmenwerks, das die Klimaneutralität eines Quartiers in der frühen Entwurfsphase sicherstellt. Das Rahmenwerk ist aus Maßnahmen der erneuerbaren Energieversorgung und aus ökologischen Kompensationsmaßnahmen aufgebaut. Für die Maßnahmen werden Kennwerte gebildet, die den jährlichen Energieertrag und die CO₂-Gesamtbindung mit einer Bezugseinheit verknüpfen. Hierdurch werden eine Transparenz und Vergleichbarkeit der Maßnahmen hergestellt. Daneben ermöglicht diese Methodik die Skalier- und Übertragbarkeit der Maßnahmen auf weitere Quartiersprojekte. Die Anwendung des Rahmenwerks wird als Fallbeispiel anhand des Campus für „Life-Sciences“ der Max-Planck-Gesellschaft in Martinsried vorgestellt. Die Grundlage bilden hierfür die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse (LCA) eines modularen Forschungsgebäudes.

Die CO₂-Reduktion erfolgt durch die Modellierung eines klimaneutralen Energieversorgungssystems für das Laborgebäude. In diesem Rahmen dienen die Kennwerte der klimaneutralen Versorgungsmaßnahmen der Dimensionierung der Anlagengröße. Anhand des Abgleichs von Ertrag und Bedarf im Tagesverlauf wird die Klimaneutralität der Energieversorgung geprüft. Zur Deckung der Versorgungslücken der Stromversorgung werden in dieser Arbeit zwei Strategien aufgezeigt. Die erste Strategie besteht in dem gezielten Erzeugen einer Überkapazität, die durch einen Quartiersspeicher bedarfsgerecht verfügbar gemacht wird. Die zweite Strategie besteht in der Grundlastdeckung durch ein dezentrales Biomasse-Kleinkraftwerk. Die anschließende CO₂-Kompensation orientiert sich an den ökologischen Kennwerten dieser Arbeit. Hierbei wird eine Strategie zur quartiersgebundenen und zur ortsungebundenen Kompensation entwickelt.

Unter idealen Bedingungen kann grundlegend von einer Gültigkeit der Kennwerte bei weiteren Quartiersprojekten ausgegangen werden. Die Anwendung auf das Laborgebäude verdeutlicht die zentrale Stellung des Anteils der erneuerbaren Energien in der Stromversorgung. Daneben wird ersichtlich, dass die Dauerhaftigkeit und die Risikominimierung der ökologischen Maßnahmen von Bedeutung sind. Im zeitlichen Abgleich des CO₂-Abbaus in der Atmosphäre und der ökologischen CO₂-Bindung wird des Weiteren ein Ansatz für eine Methodik der zeitlichen Anpassung des Emissionsausgleichs aufgezeigt.

Summary

The objective of this paper is the development of a planning framework that ensures the climate neutrality of a neighbourhood in the early design phase. The framework is made up of renewable energy supply measures and ecological compensation measures. Key values are created for the measures that link the annual energy yield and the total CO₂ binding to a reference unit. This creates transparency and comparability of the measures. In addition, this methodology enables the measures to be scaled and transferred to other neighbourhood projects. The application of the framework is presented as a case study using the Max Planck Society's "Life Sciences" campus in Martinsried. The application of the established key values is based on the results of the life cycle analysis (LCA) of a modular research building.

The reduction of carbon dioxide is achieved by modelling a climate-neutral energy supply system for the laboratory building. In this context, the characteristic values of the climate-neutral supply measures are used to dimension the size of the components of the energy system. The climate neutrality of the energy supply is checked by comparing yield and demand over the course of the day. To cover the gaps in the electricity supply, two strategies are identified in this work. The first strategy consists of the intended generation of excess capacity, which is made available as required by a neighbourhood storage system. The second strategy consists of covering the base load with a decentralised small-scale biomass power plant. The subsequent compensation of carbon dioxide is based on the characteristic ecological values established in this study. Based on these values a strategy for neighbourhood-based and location-independent carbon dioxide offsetting is developed.

Under ideal conditions, it can be fundamentally assumed that the characteristic values are valid for further neighbourhood projects. The application to the laboratory building illustrates the central position of the share of renewable energies in the power supply. It is also clear that the durability and risk minimisation of the ecological measures are important. The temporal comparison of carbon dioxide degradation in the atmosphere and ecological carbon dioxide sequestration also shows an approach for a methodology for the temporal adjustment of emissions compensation.

Danksagung

Mein Dank gilt meinem Betreuer Markus Kleeberger, der mich durch alle Fragen mit stoischer Ruhe und unerschütterlicher Kompetenz begleitet hat. Daneben möchte ich mich herzlich bei dem Lehrstuhl für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen für einen unversiegbaren Quell der positiven Energie und des Willkommens bedanken.

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
MPG	Max-Planck-Gesellschaft
LCA	Lebenszyklusanalyse
CO₂-Äq.	Kohlenstoffdioxidäquivalente
m²	Quadratmeter
kWh	Kilowattstunde
MWh	Megawattstunde
K	Kelvin
BGF	Bruttogrundfläche
NRF	Nettoraumfläche
LP 1	Leistungsphase 1 (Grundlagenermittlung)
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
TGA	Technische Gebäudeausrüstung

Glossar

Klimaneutralität

Begriff, der ein Handeln beschreibt, das das Klima nicht negativ beeinflusst. Hierfür müssen Treibhausgase entweder vermieden oder ausgeglichen werden.

CO₂-Reduktionsmaßnahme

Eine Maßnahme, die zum Erreichen derselben Funktionalität und Zielsetzung weniger Treibhausgase ausstößt als die bestehenden Komponenten eines Systems.

CO₂-Kompensationsmaßnahme

Eine Maßnahme, die die bereits ausgestoßenen Emissionen ausgleicht. Hierfür muss das Element der Dauerhaftigkeit und der Zusätzlichkeit erfüllt sein und es darf keine Verlagerung der Emissionen stattfinden.

Jährlicher spezifischer Energiebedarf

Der jährliche Bedarf an Endenergie nach Verbraucher und Energieform.

Lastgang

Der Leistungsbezug eines Gebäudes oder Quartiers in einer anschaulichen Grafik über einen konkreten Zeitraum (Tag oder Jahr)

Treibhauspotential

Der Beitrag zur Erderwärmung, den ein Treibhausgas im Vergleich zu derselben Masse Kohlenstoffdioxid hat.

Reifephase

Der Zeitraum, in dem Vegetation die maximale Wuchshöhe und Trockenmasse erreicht. Sie folgt der Wachstumsphase und steht vor der Zerfallsphase.

Trockenmasse

Der Bestandteil einer Pflanze nach Abzug des in der Masse enthaltenen Wassers

Ökologie

Die Gesamtheit der Wechselbeziehung zwischen Lebewesen und ihrer Umwelt und ist gemäß ihrer ursprünglichen Definition eine Teildisziplin der Biologie.

Biodiversität

Die Fülle der biologischen Artenvielfalt in einem bestimmten Landschaftsraum. Die Artenvielfalt gilt sowohl für Tiere, Menschen als auch Pflanzen.

Photosynthese

Eine biochemische Reaktion, bei der energiereichere Biomoleküle aus energieärmeren Stoffen mit Hilfe von Sonnenenergie erzeugt werden. Hierbei wird gebundenes CO₂ mit Wasser zu Sauerstoff und Stärke umgewandelt.

Mikroklima

Die klimatischen Bedingungen in bodennahen Luftschichten, die sich nach lokalen Begebenheiten deutlich unterscheiden. Die Referenzfläche kann hierbei wenigen Quadratmetern entsprechen. Einflussfaktoren sind neben der Lufttemperatur und -feuchte beispielsweise die Oberflächentemperatur der Baukörper.

Klimazone

Beschreibt sich parallel zu den Breitengraden der Welt (östlich und westliche) erstreckende, geographische Bereiche, die durch vergleichbare klimatische Bedingungen charakterisiert sind, die nur in diesen Breitengraden bestehen.

Leistungsphase

Die einzelnen Leistungsschritte einer Gesamtplanung eines Architekten oder Ingenieurs. Die Gesamtplanung eines Gebäudes ist gemäß der HOAI in insgesamt 9 Leistungsphasen unterteilt.

1. Einführung

Die frühe Planungsphase eines Quartiers nimmt mit Blick auf die Klimaneutralität eine besondere Stellung ein. In dieser Planungsphase werden klimaschonende Maßnahmen in das Konzept einbezogen, die die CO₂-Neutralität des Quartiers bewirken. Zu diesen gehört die Reduktion der CO₂-Emissionen des Gebäudebetriebs durch den Einsatz erneuerbarer Energien (beispielsweise durch die Photovoltaik- und Solarthermie Module). Zu den Maßnahmen gehört ebenfalls die ökologische CO₂-Kompensation durch die Bauwerksbegrünung und die Vegetation auf den Freiflächen des Quartiers. Trotz der Möglichkeit, die Klimaneutralität in diesem Planungsschritt sicherzustellen, wird dies in der Praxis nicht in vollem Umfang gewährleistet. Hierfür fehlte bislang ein transparentes Rahmenwerk für den gesamtheitlichen Einsatz der Maßnahmen. Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit ein auf Kennwerten basierendes Rahmenwerk als Planungswerkzeug zum Erreichen der Klimaneutralität entwickelt. Der Aufbau des Rahmenwerks ist hierbei zweigeteilt. Einerseits werden die CO₂-Emissionen des Gebäudebetriebs durch Maßnahmen der klimaneutralen Energieversorgung gesenkt. Die verbleibenden CO₂-Emissionen der Energieversorgung und die der Baukonstruktion werden anschließend durch ökologische Maßnahmen kompensiert. Durch das Kennwertesystem wird ein klarer Bezug zwischen Fläche und reduzier- beziehungsweise kompensierbarer CO₂-Menge hergestellt. Neben der Entwicklung steht die Anwendung dieses Rahmenwerks auf den geplanten Campus für „Life-Sciences“ der Max-Planck-Gesellschaft in Martinsried im Fokus der Arbeit. Eine grafische Übersicht der untersuchten Maßnahmen ist in Abbildung 1 dargestellt.

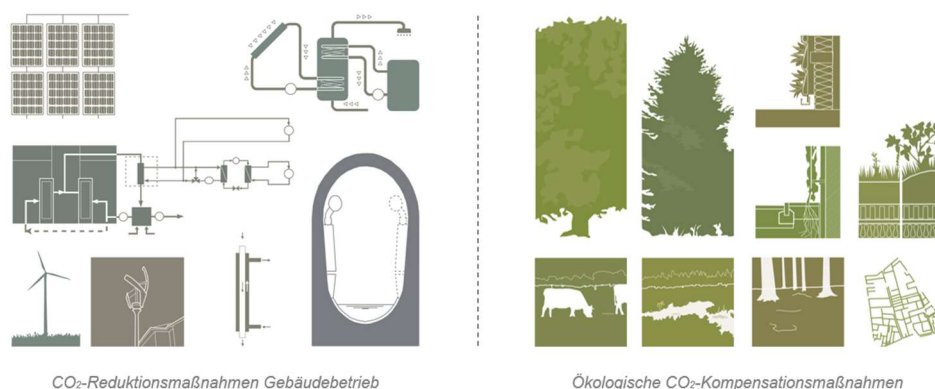


Abbildung 1: Grafische Darstellung des planerischen Rahmenwerks (maßstabslos)

In der Planung des Campus für „Life-Sciences“ der Max-Planck-Gesellschaft (fortan MPG genannt) in Martinsried stellt die Klimaneutralität einen Leitwert dar. Auf dem bestehenden Campus in Martinsried forschen die Institute für biologische Intelligenz und Biochemie. Der Bestand (dargestellt in Abb. 2) kann aus Sicht der Klimaneutralität und der Nachhaltigkeit jedoch nicht mehr mit der spitzenorientierten Forschung der Institute in Einklang gebracht werden. Die bestehende Bebauung soll daher einem neuen Campus für „Life-Sciences“ weichen, der „durch eine klimaschonende Bauweise eine weltweite Strahlkraft entwickelt“ (Projektziel der MPG). In diesem Kontext findet ein Forschungsprojekt des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen (TUM) in Zusammenarbeit mit der MPG statt. Das planerische Rahmenwerk der Klimaneutralität wird auf die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse (LCA) eines modularen Laborgebäudes des neuen Campus angewandt. Hierbei werden sowohl die CO₂-Reduktions- als auch die CO₂-Kompensationsmaßnahmen einzeln angewandt und anschließend in der Maßnahmenkombination untersucht. In einem weiteren Schritt werden Rückschlüsse auf die Übertragbarkeit auf weitere Quartiersprojekte gezogen.



Abbildung 2: Forschungsstandort der Max-Planck-Gesellschaft in Martinsried (Lageplan, maßstabslos)

1.1. Zielsetzung und Forschungsfrage

Das Ziel der Arbeit besteht in der Entwicklung eines Planungswerkzeuges, das die Planung und Bewertung von Klimaneutralität eines Quartiers in der Grundlagenermittlung (LP1) des Quartiers ermöglicht. Dieses Werkzeug befähigt Planersteller durch ortsgebundene Energieversorgungsmaßnahmen und durch ökologische Kompensationsmaßnahmen einen CO₂-neutral Quartiersentwurf zu konzipieren. Die Hypothese der Arbeit lautet daher wie folgt:

„Durch die Anwendung von Kennwerten kann die Klimaneutralität von Baumaßnahmen beurteilt und nötige Maßnahmen zur Verbesserung des CO₂-Fußabdrucks ermittelt werden.“

Die eingangs erwähnte Methodik des Kennwertesystem soll eine Skalier- und Übertragbarkeit auf weitere Quartiersprojekte herstellen. Durch die Kennwerte soll die bedarfsgerechte Dimensionierung der Komponenten der Energieversorgung (beispielsweise der notwendigen Fläche der Photovoltaikanlage) ermöglicht werden und die Ermittlung der Mengen der ökologischen Kompensationsmaßnahmen vereinfacht werden. Daher lautet die Forschungsfrage, die anhand der Anwendung auf den Campus für „Life-Sciences“ der Max-Planck-Gesellschaft in Martinsried überprüft und beantwortet werden soll:

„Wie muss ein planerisches Rahmenwerk aufgebaut sein, damit Maßnahmen zum Erreichen von Klimaneutralität ermittelt werden können und sich diese skalieren und auf weitere Quartiersprojekte übertragen lassen?“

Anhand des modularen Laborgebäudes des Campus für „Life Sciences“ (MPG) soll die Klimaneutralität auf Grundlage der Kennwerte durch die erneuerbare Energieversorgung und die ökologische CO₂-Kompensation untersucht werden.

2. Methodik

Die Arbeit lässt sich in zwei Abschnitte unterteilen, die jeweils einen eigenständigen, methodischen Ansatz verfolgen. In der Erarbeitung des ersten Abschnitts steht die Methodik des Kennwertesystems im Fokus. In der Einführung wird die Verknüpfung des durchschnittlichen Jahresertrags und der CO₂-Gesamtbinding bei Erreichen der Reifephase (siehe Kapitel 3.4 „Grundlagen der ökologischen Kompensation“) mit einer Bezugseinheit dargelegt. Aus dem so gebildeten Kennwert wird eine grafische Übersicht der Maßnahme entwickelt, die durch ein Beiblatt ergänzt wird. Dieses Beiblatt macht zwei zentrale Punkte deutlich. Für die klimaneutralen Versorgungsmaßnahmen stellt es den Ertrag im Tages- und Jahresverlauf und anwendungsbedingte Korrekturfaktoren dar. Für die ökologischen Kompensationsmaßnahmen zeigt es die Erneuerungsraten und die Korrekturfaktoren für die Bilanzierung der Maßnahmen.

Im zweiten Abschnitt steht die Methodik der Anwendung der Kennwerte auf den Campus für „Life Sciences“ im Fokus. Dies beginnt mit der Größeneinordnung des Energiebedarfs durch die Auswertung der Verbrauchszählerstände des Bestandscampus. Im nächsten Schritt wird für ein beispielhaftes, modulares Laborgebäude ein klimaneutrales Energiesystem anhand der Kennwerte entworfen. Die Methodik besteht hierbei in dem Gleichsetzen des jährlichen Bedarfs mit dem jährlichen Ertrag der Maßnahmen. Durch den Kennwert findet die Dimensionierung der Versorgungsmaßnahme statt. Der anschließende Abgleich des Tagesverlaufs von Energiebedarf und -Ertrag findet auf dem Beiblatt statt. Die Methodik der ökologischen Kompensation besteht in der Verteilung der CO₂-Menge auf verschiedene Maßnahmen, die in der Summe der Menge der Lebenszyklusemissionen entsprechen. Aus der Lebensdauer der Maßnahmen werden Erneuerungsraten gebildet, die dem Planenden einen Eindruck über die notwendige Dauerhaftigkeit verschaffen.

2.1. Aufbau des Kennwertesystems der Energieversorgung

Die Kennwerte der klimaneutralen Energieversorgung werden für Maßnahmen der Strom- und Wärmeversorgung entwickelt. Die Stromversorgungsmaßnahmen sind Photovoltaikmodule (mono- und polykristallin) und bauliche Windräder (unter einer

Höhe von 5 Metern). Die Kennwerte der Wärmeversorgung werden für die Solarthermie, die Wärmerückgewinnung aus Abwasser und die Nutzung von Serverabwärme entwickelt. Die Bezugseinheiten der Maßnahmen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Bezugseinheiten der klimaneutralen Energieversorgungsmaßnahmen

CO ₂ -Reduktionsmaßnahme	Energieart	Bezugseinheit
Photovoltaik (monokristallin)	Elektrische Energie [kWh/a]	Quadratmeter [m ²]
Windräder (<5m)	Elektrische Energie [kWh/a]	Stückzahl [-]
Solarthermie (Vakuumröhrenkollektoren)	Wärmeenergie [kWh/a]	Quadratmeter [m ²]
Wärmerückgewinnung aus Servern	Wärmeenergie [kWh/a]	Quadratmeter [m ²]
Wärmerückgewinnung aus Abwasser	Wärmeenergie [kWh/a]	Laufmeter [m]

Durch das lineare Verhältnis von Ertrag zu Bezugseinheit wird die Skalierbarkeit durch die Verknüpfung der beiden Parameter gewährleistet. Diese Methodik ermöglicht an der Gebäudehülle und auf Freiflächen des Quartiers eine bedarfsgerechte Anpassung auf den Energiebedarf. Das Kennwertesystem besteht deshalb vorrangig aus Maßnahmen, die sich nahtlos in ein Quartier einfügen und nur geringen Eingriff in das Gebäude- oder Freiflächenkonzept bedeuten.

Für die Maßnahmen der klimaneutralen Energieversorgung besteht ein Schema der Kennwertbildung. Dieses ist in Abbildung 3 dargestellt. Der Aufbau des Energiesystems anhand der Kennwerte wird im folgenden Abschnitt ausführlicher erläutert.

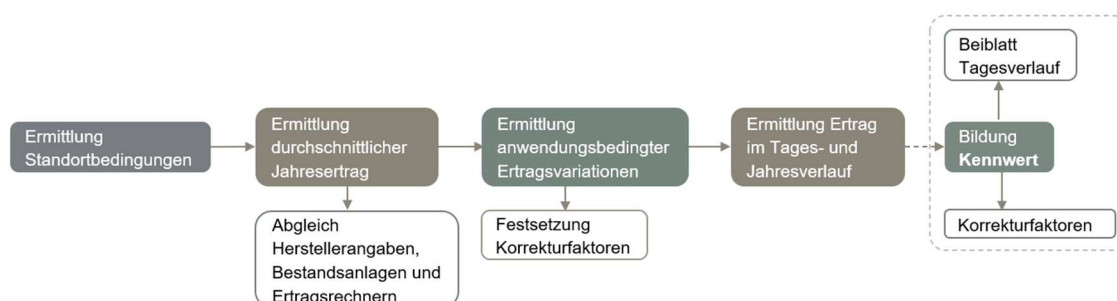


Abbildung 3: Kennwertbildung der CO₂-Reduktionsmaßnahmen

Die Kennwertbildung der Einzelmaßnahmen basiert auf zwei aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten. Diese bestehen in der Grundlagenermittlung und der Berechnung des jährlichen Energieertrags.

Für den ersten Schritt werden im Rahmen der Grundlagen (mittlere Jahressummen der Solarstrahlung, durchschnittliche Windgeschwindigkeiten) die Standortfaktoren mit dem größten Einfluss auf den jährlichen Ertrag ermittelt. Die Standortfaktoren gliedern sich in klimatische, städtebauliche und nutzungsbedingte Faktoren. Diese sind ausschlaggebend für den Energieertrag unter Realbedingungen und die wirtschaftliche Rentabilität der Versorgungsmaßnahmen. In Kapitel 3.3 („Kennwertbildung der klimaneutralen Energieversorgung“) werden die Standortfaktoren der Einzelmaßnahmen ausführlich beleuchtet.

Im zweiten Schritt wird der jährliche Energieertrag der Versorgungsmaßnahmen ermittelt. Hierfür kommen zwei Methoden zum Einsatz. In der ersten Methode wird auf Grundlage der Nennleistung durch ein Referenzverfahren der Jahresertrag errechnet. Dieser wird im Anschluss durch einen Ertragsrechner (für die Photovoltaik beispielsweise der „Solarserver“, siehe Anhang) für den Standort Martinsried mit den errechneten Werten abgeglichen. Diese Methodik findet für die Photovoltaik, die Windräder und die Solarthermie Anwendung. In der zweiten Methode findet eine Annäherung an den Jahresertrag durch die Datenauswertung bestehender Anlagen statt. Besonders die Wärmerückgewinnung aus der Kanalisation und aus der Serverfarm werden für die Versorgung eines Quartiers vergleichsweise selten eingesetzt. Dementsprechend existieren keine genormten Produkte, aus denen die Nennleistung und der Ertrag direkt ermittelt werden können. Daher wird aus der Anschlussleistung der jährliche Ertrag an Wärme ermittelt.

Die Korrekturfaktoren der Kennwerte ergeben in der Multiplikation mit dem Kennwert den tatsächlichen Energieertrag unter Realbedingungen. Für die Photovoltaik und die Solarthermie modifizieren die Korrekturfaktoren den Kennwert in Abhängigkeit des Aufstellungs- und Sonnenausrichtungswinkel. Die zugrunde liegende Ertragsvariation basiert auf Tabellen der Hersteller. Hierauf wird in Kapitel 3.3 („Kennwertbildung der klimaneutralen Energieversorgung“) ausführlicher eingegangen.

Neben den Korrekturfaktoren macht das Beiblatt die spezifischen Ertragsverläufe der Maßnahmen ersichtlich. Vor allem die Photovoltaik, die Windräder und die Solarthermie weisen charakteristische Ertragsverläufe auf. Dies wird in Kapitel 3.3.6 („Anwendungs- und standortbedingte Ertragsverläufe der klimaneutralen Energieversorgung“) ausführlich erläutert.

2.2. Methodik zur Ermittlung der ökologischen CO₂- Kompensationsmaßnahmen

Analog zu den klimaneutralen Energieversorgungsmaßnahmen steht der Gedanke der Skalierbarkeit in den ökologischen Kompensationsmaßnahmen zentral. Durch diesen Ansatz sollen die Maßnahmen flexibel auf Gebäudeoberflächen und Freiflächen angewendet werden können. Daneben sollen die Kennwerte durch die gewählte Methodik die Renaturierung von Ökosystemen außerhalb des Quartiers gewährleisten. Die Kennwertbildung folgt hierbei einer Methodik, die in Abbildung 4 dargestellt ist.

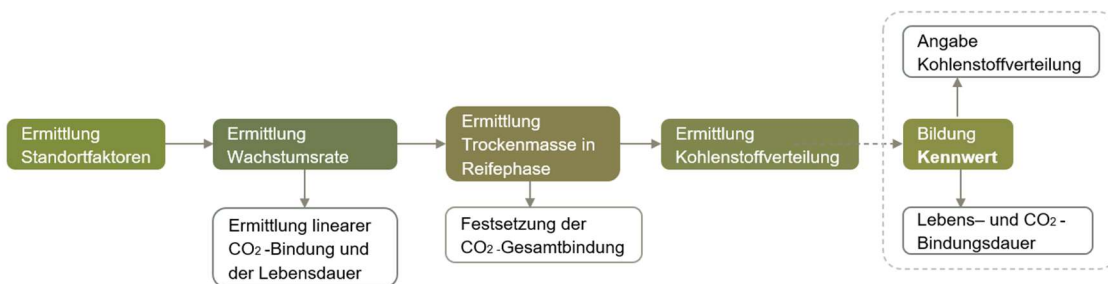


Abbildung 4: Kennwertbildung der CO₂-Kompensationsmaßnahmen

Wie Eingangs erläutert basiert die Kennwertbildung der Kompensationsmaßnahme auf der Verknüpfung der CO₂-Gesamtbindung bei Erreichen der Reifephase mit einer Bezugseinheit. In der Reifephase wird die maximale Trockenmasse und Wuchshöhe erreicht. Zur Berechnung der CO₂-Gesamtbindung werden drei Methoden angewandt. Die erste Methode besteht in der Analyse von Literaturkennwerten, aus denen die CO₂-Gesamtbindung übernommen wird. Der zweite Ansatz besteht in der Berechnung aus dem Gewicht der Trockenmasse. Falls zum Gewicht der Trockenmasse keine Daten vorliegen, wird anhand von Literaturkennwerten zur linearen CO₂-Bindungsrate (pro Jahr) und dem Zeitraum bis zum Erreichen der Reifephase die CO₂-Gesamtbindung ermittelt.

Die ökologischen Kompensationsmaßnahmen dieser Studie gliedern sich in drei Kategorien. Zu diesen zählen:

1. Einzelkompensationsmaßnahmen (Bäume)
2. Bauwerksgebundene Kompensation (Dach- und Fassadenbegrünung) und
3. Naturflächen

Die Wahl der Vegetationsarten leitet sich aus den unmittelbaren Standortbedingungen in Martinsried ab. Die ökologischen Kompensationsmaßnahmen sollen sich nahtlos in das Quartier und bestehende Ökosysteme einfügen können. Um dies zu gewährleisten wurden beispielsweise die Baumarten gemäß der Waldzusammensetzung in Nähe des Grundstücks in Martinsried gewählt. Daneben wurden die Fassadenbegrünungen der in Bayern typischen Bauteile für die Kompensationsmaßnahmen verwendet.

Anhand der beschriebenen Methodik entsteht somit ein Kennwert der ökologischen Kompensationsmaßnahme, der die CO₂-Bindung in der Reifephase mit einer Bezugseinheit verknüpft. Dieser Kennwert kann als Rechengröße zur Mengenermittlung der Kompensationsmaßnahmen genutzt werden. Ein Beiblatt ergänzt den Kennwert um zwei zentrale Elemente. Dies sind einerseits die Korrekturfaktoren (bei den Naturflächen) und die Erneuerungsraten.

Die Korrekturfaktoren der Naturflächen entstehen aus der Notwendigkeit der korrekten Bilanzierung. Bestandsböden haben teilweise schon erhebliche Mengen CO₂ gespeichert. Deshalb wird bei den Naturfläche in der Anwendung von versiegelten Böden ausgegangen, da hier durch die Naturfläche die gesamte Masse an CO₂ neu gebunden wird. Für die Anwendung auf einem Acker oder einer Grünfläche wird ein Korrekturfaktor eingeführt.

Daneben gibt die Erneuerungsrate die Anzahl an aufeinanderfolgenden Generationen an, die zum Ausgleich des emittierten CO₂ notwendig ist. Dies stellt keine verpflichtende Vorgabe dar, sondern ermöglicht dem Planenden die Einordnung der notwendigen Dauerhaftigkeit. Diese Thematik wird in Kapitel 3.4.1 ("Abgleich der Zeitschienen der Quartiersemissionen und der ökologischen Kompensationsmaßnahmen") ausführlich beleuchtet.

2.3. Anwendung des planerischen Rahmenwerks auf den Campus für „Life-Sciences“ der MPG in Martinsried

Die Planung zur Klimaneutralität des Campus für „Life Sciences“ untergliedert sich in zwei Arbeitsschritte. Der erste Schritt besteht in der Größeneinordnung des Energiebedarfs der bestehenden Bebauung und der Ermittlung des Flächen- und Nutzungs-

bedarfs des zukünftigen Campus. Der zweite Schritt besteht in der Anwendung der klimaneutralen Energieversorgungsmaßnahmen anhand der Kennwerte und des anschließenden Emissionsausgleichs. Für die Energieversorgung und die Kompensation werden die Maßnahmen einzeln und in der Kombination angewandt. Hierbei folgt die Anwendung einer Sequenz, die in Abbildung 5 dargestellt ist.

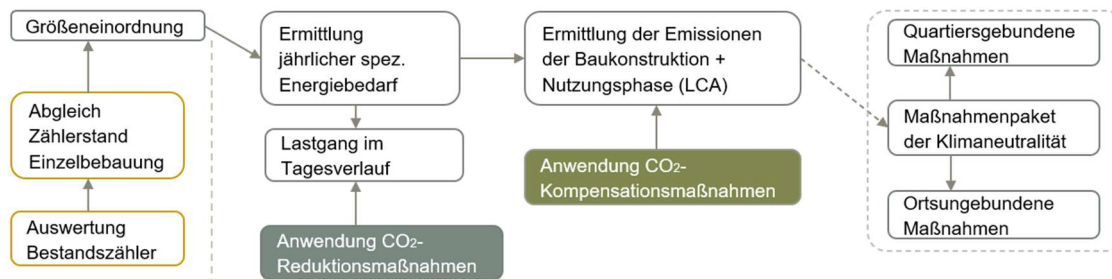


Abbildung 5: Prozessabfolge der Anwendung des planerischen Rahmenwerks

Die Größeneinordnung des Energiebedarfs basiert auf der Auswertung der Zählerstände des Stroms, der Wärme, des Gases und des Wasserverbrauchs des Bestandes. Der Zählerstand wird anschließend mit dem Zählerstand des Tierhauses abgeglichen. Dies ermöglicht mit Blick auf den geplanten Campus für „Life Sciences“ einen Rückschluss auf das zu erwartende Energiebedarfsprofil. Anschließend wird das Energiebedarfsprofil mit dem Flächen- und Nutzungsbedarf des zukünftigen Campus für „Life Sciences“ abgeglichen.

Im nächsten Schritt wird auf Grundlage der Kennwerte ein Energiesystem entworfen. Die Labornutzung macht zukünftig 58% des Flächenbedarfs des Campus für „Life Sciences“ aus. Ein modulares Laborgebäude wird deshalb stellvertretend für den gesamten Campus verwendet. Für dieses Laborgebäude wurde der jährliche Energiebedarf im Forschungsprojekt ermittelt. Aus diesem Energiebedarf wird der Lastgang des Stroms und der Wärme im Tagesverlauf für einen Januartag modelliert. Dies bildet die Grundlage für die Anwendung der klimaneutralen Energieversorgung in Einzelmaßnahmen und in der Kombination.

Der finale Schritt besteht in dem Ausgleich der Emissionen durch die ökologischen Kompensationsmaßnahmen. Hierbei wird zur Größeneinordnung die Menge und Fläche an Einzelkompensationsmaßnahmen durch die Kennwerte errechnet. Im zweiten Schritt wird eine gesamtheitliche Strategie durch quartiers- und ortsungebundene Maßnahmen entwickelt. Aus der Anwendung soll abschließend Rückschluss auf die Übertragbarkeit der Kennwerte auf weitere Quartiersprojekte gezogen werden.

3. Grundlegende Emissionsquellen

Die Zielsetzung des Kennwertesystems wurde bereits in der Einleitung erläutert. Durch die Anwendung der Kennwerte sollen die erneuerbaren Energien die fossilen Energieträger in der Energieversorgung verdrängen. Die verbleibenden Emissionen sollen durch die CO₂-Bindung und Speicherung der Vegetationsarten ausgeglichen werden. Durch die Einbringung der Maßnahmen in der Planungsphase soll hierdurch der Grundstein der Klimaneutralität gelegt werden. Doch welche Emissionsquellen eines Quartiers sind maßgebend? In welchen Größenordnungen befinden sich diese? Wie werden sich die Emissionsquellen in absehbarer Zukunft entwickeln? Um dies zu beantworten werden die drei zentralen Emissionsquellen eines Quartiers im Folgenden erläutert: Die graue Energie, die in den Gebäuden gebunden ist, die Wärmeversorgung und die Stromversorgung.

3.1. Ausgangslage: Emissionen der Strom- und Wärmeversorgung

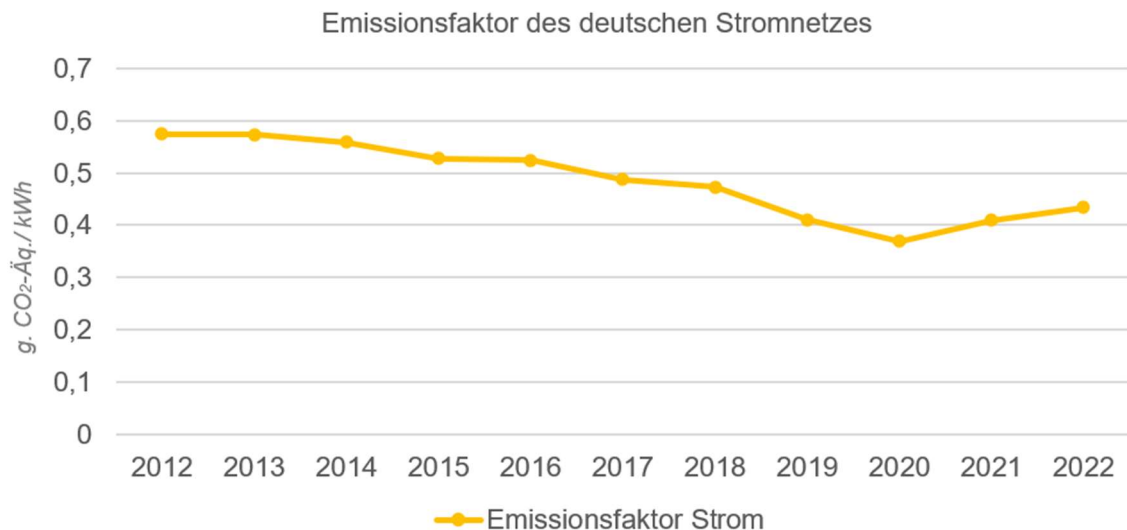


Abbildung 6: Entwicklung des Emissionsfaktors des deutschen Strommixes (Quelle: Lalon Sander)

Die Stromversorgung des untersuchten Quartiers erfolgt an erster Stelle über das deutsche Stromnetz. Der Strommix des Stromnetzes hat im Jahr 2022 einen Emissionsfaktor von 434 Gramm CO₂ Äquivalenten pro verbrauchter Kilowattstunde Endenergie und ist somit nicht klimaneutral [1]. Bereits heute (Stand 01.01.2024) wird zwar mehr als die Hälfte des Stroms aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen [1].

Hierzu zählen neben der Solarenergie die Windenergie, die Biomasse und die Wasserkraft. Besonders die Solar- und die Windenergie hängen jedoch von dem Wetter, der Tages- und der Jahreszeit ab. So wird an längeren Sommertagen mehr solare Energie in das Netz eingespeist während in Wintermonaten der Energieanteil der Windräder überwiegt. Versorgungslücken, die beispielsweise nachts und an windarmen Tagen entstehen, werden vorrangig durch Kohlekraftwerke und teilweise durch Erdgas gedeckt [1]. Zur Deckung der Versorgungslücken ist für Stromanbieter zudem der Zukauf von Strom aus dem Ausland günstiger, als Kohlekraftwerke zur Stromerzeugung in Deutschland zu betreiben. Somit ist der Emissionsfaktor des Stroms auch von dem Anteil der erneuerbaren Energien außerhalb Deutschlands abhängig. Hier liegt der Anteil nach Schätzungen bei über 50% [2]. Zum Zeitpunkt der Studie (und vor der klimaneutralen Schließung der Versorgungslücken) ist der Strommix nicht emissionsfrei. Die Anwendung der klimaneutralen Energieversorgungsmaßnahmen in einem Quartier ist daher für absehbare Zeit sinnvoll, um den Anteil der erneuerbaren Energien zu steigern.

Die Wärmeversorgung wird für Quartiere (Stand 01.01.2024) zunehmend durch klimafreundliche Fernwärme gesichert. Hierfür stehen in Deutschland 3.800 regionale Netze zur Verfügung [3]. Da die einzelnen Netze im Gegensatz zum Stromnetz nicht verbunden sind, muss der Emissionsfaktor einzeln betrachtet werden. Die Wärmequellen- und Erzeugung sind hierbei stark standortabhängig. So sind die Voraussetzungen für erneuerbare Wärmequellen wie die Geothermie oder Solarparks nur in einigen Regionen gegeben. Hierfür muss die Temperatur tieferer Erdschichten oder die Solareinstrahlungsdauer ausreichend sein. Im städtischen Kontext ist hingegen in Industriegebieten und Gewerbesiedlungen die unvermeidbare Abwärme eine Alternative. In bestehenden Netzen kommen häufig Brennstoffkombinationen vor, in denen auch fossile Energieträger wie das Erdgas oder die Braunkohle genutzt werden [3]. Dies wirkt sich auf die Emissionsbilanz des Wärmeverbrauchs aus. Für den Campus für „Life Sciences“ ist der Anschluss an das Fernwärmenetz des städtischen Betreibers SWM notwendig. Die Fernwärme wird hierbei aus drei Quellen gewonnen. Diese bestehen in Heizkraftwerken, Heizwerken und der Geothermie [4]. Durch die Lage Münchens im Molassebecken eignet sich besonders die hydrothermale Geothermie, die eine klimaneutrale Wärmeversorgung ermöglicht. Aufgrund der fossilen Energiequellen in den Heizwerken und den Heizkraftwerken, die Bedarfsspitzen abdecken, ist die Fernwärme jedoch nicht gänzlich klimaneutral. Aus diesem Grund ist die Integration der quartiersgebundenen, klimaneutralen Wärmeversorgung in der frühen Planungsphase sinnvoll.

3.2. Ausgangslage: Emissionen der Baukonstruktion

Zur dritten Emissionsquelle eines Quartiers zählt die Baukonstruktion. Doch wie unterscheiden sich die Materialien hierbei aus Sicht der Klimaneutralität? Wie sehr beeinflusst die Materialwahl die Minderung der Emissionen? Um dies zu beantworten wird im Folgenden das Konstruktionsmaterial Beton mit der Holzmassivbauweise verglichen. Über den Lebenszyklus der Materialien entstehen bei der Herstellung, dem Austausch und dem Rückbau Emissionen. Anhand des Betons werden die Emissionen über den Lebenszyklus untersucht. Hierfür wurde der Beton der Festigkeitsklasse „C20/50“ der Holcim GmbH des Frankfurter Werks gewählt [5]. Die gewählten Systemgrenzen umfassen die Herstellung des Betons einschließlich der Rohstoffgewinnung, dessen Einbau und Nutzung bis zur Entsorgung des fertigen Produkts. Der Beton besteht hierbei zu 70-90% aus Aggregaten, zu 10-17% aus Zement und zu weiteren 7-10% aus Wasser. Der Referenzfluss bezieht sich auf einen Kubikmeter (m³) unbewehrtem Beton. Die Emissionsdaten der Lebenszyklusphasen wurden der Datenbank Ökobaudat entnommen und sind im Anhang zu finden.

Für die Massivholzwand bildet die Ökobilanzierung von Brettsperrholz des Thünen-Instituts für Holzforschung [6] die Grundlage. Die Produkte bestehen aus mindestens drei rechtwinklig zueinander verklebten Nadelholzplatten und sind für tragende Konstruktionen gedacht. Der Referenzfluss ist ebenfalls ein Kubikmeter (m³) des Brettsperrholzes. Die Emissionen pro Lebenszyklusphase wurden der Datenbank Ökobaudat entnommen und sind im Anhang zu finden. Die Emissionen der Lebenszyklusphasen von Beton und Massivholzwänden im Vergleich ist in Abbildung 7 dargestellt.

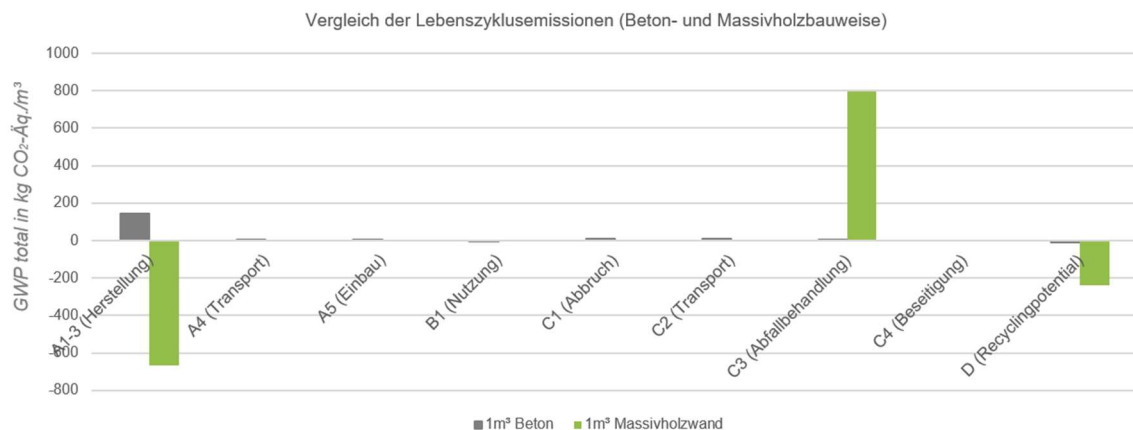


Abbildung 7: Lebenszyklusemissionen der Brettsperrholzplatten und des Beton als Baukonstruktionsmaterial im Vergleich (Referenzfluss 1m³)

Hierbei wird ersichtlich, dass der Beton in der Herstellung (A1-3) den größten Anteil an den Emissionen im Lebenszyklus verursacht. Dies ist vor allem auf die Herstellung des Zements zurückzuführen. Bei dessen Herstellung wird ein Gemisch aus Ton und Kalkstein zu kleinen Körnern zermahlen und anschließend in Öfen bei hohen Temperaturen gebrannt. Durch das Brennen entsteht im Vergleich der Lebenszyklusphasen eine überproportionale Menge CO₂. Die Rückgewinnung und das Recycling (Modul D) kann lediglich 6% der Emissionen der Herstellung ausgleichen.

Die Massivholzwand bindet im Gegensatz zum Beton in der Herstellungsphase CO₂ durch die Photosynthese der Bäume. Über den Lebenszyklus bindet und vermeidet die Massivholzwand mehr als sie emittiert. Lässt sich somit die Klimaneutralität der Konstruktion durch Holz sichern? In der Praxis kommen zumeist Bauteilaufbauten aus Materialkombinationen vor. Diese enthalten beispielsweise bei Geschossdecken Betonschichten oder Gummibeläge. Unterkellerungen und Fundamente werden auch beim Holzbau aus Beton gegossen während industriell gefertigte Produkte wie Fenster, Türen und Aufzüge die CO₂-Bilanz deutlich beeinflussen. Die CO₂-Bilanz der Baukonstruktion lässt sich durch das Material Holz zwar verbessern. Die Baukonstruktion muss jedoch auch zukünftig aufgrund kombinierter Bauteilaufbauten und Konstruktionen ökologisch kompensiert werden.

3.3. Kennwertbildung der klimaneutralen Energieversorgung des Gebäudebetriebs

Im Folgenden wird die Kennwertbildung der klimaneutralen Energieversorgungsmaßnahmen vorgestellt. In der Methodik wurde die Verknüpfung des jährlichen Energieertrags mit der Bezugseinheit der Maßnahme dargelegt. In diesem Kapitel wird die rechnerische Annäherung an den Jahresertrag aufgezeigt. Daneben wird das Beiblatt der Maßnahme vorgestellt. Aus dem Kennwert und dem Beiblatt wird final eine grafische Übersicht erstellt, die dem Planer als Grundlage für die Erstellung des Energiesystems dient.

Um das planerische Rahmenwerk möglichst überschaubar zu halten, wird für jede Versorgungsmaßnahmen ein stellvertretender Kennwert entwickelt. Beispielsweise wird für die Photovoltaik aufgrund des höheren Ertragspotential der jährliche Ertrag der monokristallinen Photovoltaikmodule verwendet. Eine Ausnahme stellt hierbei die Windenergie dar. Aufgrund der Unterteilung in 2 kW und 5 kW Windkraftanlagen muss hier immer eine Anpassung auf eines der Produkte stattfinden.

Eine Übersicht der jährlichen Endenergieerträge und der verknüpften Bezugseinheit ist in Tabelle 2 aufgelistet. Die Ermittlung der Energieerträge wird in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

Tabelle 2: Jahresertrag (Endenergie) der klimaneutralen Energieversorgungsmaßnahmen

CO₂-Reduktionsmaßnahme	Energieform	Endenergie / Jahr	Bezugseinheit
Photovoltaik (monokristallin)	Elektrische Energie	211 kWh/(m ² *a)	1m ²
Windräder (<5m)	Elektrische Energie	5.530 kWh*a	Stückzahl
Solarthermie (Vakuumröhrenkollektoren)	Wärmeenergie	392 kWh/(m ² *a)	1m ²
Wärmerückgewinnung aus Servern	Wärmeenergie	20,9 MWh/(m ² *a)	1m ²
Wärmerückgewinnung aus Abwasser	Wärmeenergie	20,05 MWh/(m*a)	1m (Laufmeter)

3.3.1. Kennwertbildung der Photovoltaikmodule zur klimaneutralen Stromversorgung des Quartiers

Für die Photovoltaik wird der Kennwert auf Grundlage des jährlichen Ertrags von monokristallinen Modulen gebildet. Durch Herstellerangaben von drei repräsentativen Produkten wird der Jahresertrag mit dem 1000fachen der durchschnittlichen Nennleistung pro Quadratmeter gebildet [4]. Anschließend wird das Ergebnis anhand des Ertragsrechner „Solarserver“ (online) für die Module abgeglichen, die am Standort Martinsried mit der ermittelten Nennleistung installiert sind. Das ergänzende Ergebnis des „Solarserver“-Ertragsrechner ist im Anhang in Tabelle 16 zu finden.

Aufgrund des hohen solaren Ertragspotentials des Standorts Martinsried kann davon ausgegangen werden, dass durch Intensität der Globalstrahlung während den Sonnenstunden den errechneten Jahresertrag vollständig gültig ist. Gemäß dem Energieatlas Bayern entspricht die Globalstrahlung für die Region um Martinsried im Jahresmittel einer Leistung von 1165-1179kWh/m² [5]. Der Abgleich mit den Ertragsrechnern zeigt, dass potenziell ein noch höherer Ertrag erreicht werden kann. Die errechneten Jahreserträge der untersuchten Produkte sind neben der Nennleistung und dem Ertrag im Jahresmittel in Tabelle 3 ersichtlich.

Tabelle 3: Nennleistung und Jahresertrag von Photovoltaikmodule im 35°-Winkel (Süden)

Hersteller	Nennleistung / m ²	Maximaler Ertrag / Jahr	Durchschnittlicher Ertrag / Tag
Boviet – Solarmodul BMV6610MS (mono)	205,9 Wp/m ²	205,9 kWh	0,6 kWh
JA Solar JAM54S30-415/MR	212,0 Wp/m ²	212,0 kWh	0,6 kWh
Trina Solarmodul VertexS	216,0 Wp/m ²	216,0 kWh	0,6 kWh
<i>Durchschnitt</i>	<i>211,0 Wp/m²</i>	<i>211,0 kWh</i>	<i>0,6 kWh</i>

Der Kennwert für einen Quadratmeter einer monokristallinen Photovoltaikanlage entspricht somit 211kWh pro Jahr. In der Methodik wurde bereits erläutert, dass der Kennwert durch ein Beiblatt ergänzt werden muss. Einerseits wird dem Planer hierdurch die Variation des Ertrags im Tages- und Jahresverlauf verdeutlicht. So beträgt der Ertrag im Sommer 80%, im Winter jedoch nur 15% [3]. Dies erklärt sich neben einer deutlich kürzeren Einstrahldauer der Sonne durch Schnee, der auf dem PV-Modul liegt. Zweitens ist dies der Sonnenstand in Abhängigkeit der Tageszeit, der den

Ertrag zusätzlich beeinflusst. Im Tagesverlauf erreicht das PV-Modul um 12:00 Uhr die Ertragsspitze, während zwischen 22:00 Uhr nachts und 4:00 Uhr morgens keine Elektrizität generiert wird. Das Beiblatt gibt des Weiteren Korrekturfaktoren an. Diese modifizieren den Kennwert entsprechend des Winkels, in dem das Modul aufgestellt und zur Sonne ausgerichtet ist. Ein PV-Modul, das in 90°-Winkel nördlich ausgerichtet ist, erreicht beispielsweise nur noch 29% des jährlichen Ertrags (61,19kWh) [10]. Die Korrekturfaktoren geben den prozentualen Faktor an, mit dem die Modulfläche multipliziert werden muss, um den berechneten Ertrag zu erreichen. Die Gliederung der Korrekturfaktoren wird im vertikalen Aufstellwinkel bei 0° (horizontal), 35° und 90° (vertikal) festgelegt. Für die Ausrichtung zur Sonne findet die Unterteilung in Süd, Ost und West als auch Nord statt. Der Kennwert der Photovoltaik-Module und das dazugehörige Beiblatt sind in Abbildung 8 dargestellt.

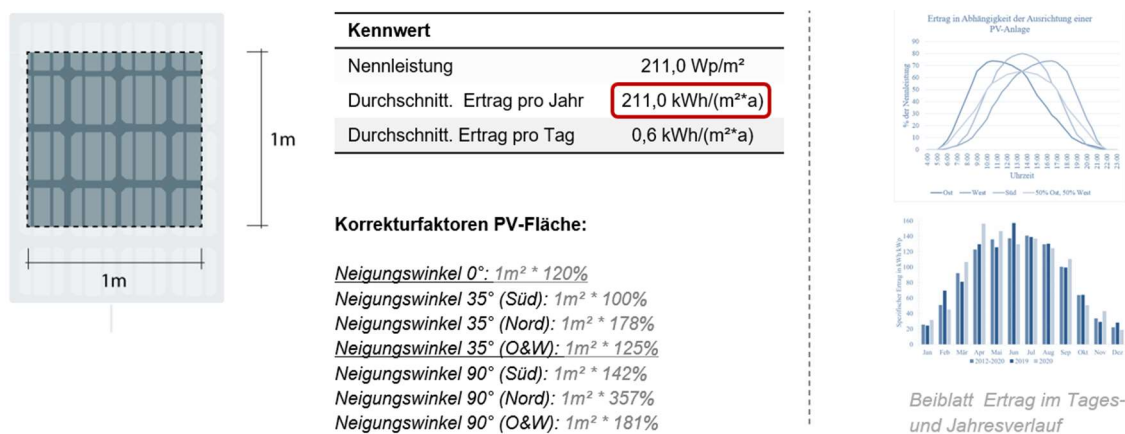


Abbildung 8: Kennwert der monokristallinen Photovoltaik-Module

3.3.2. Kennwertbildung der Windräder zur klimaneutralen Stromversorgung des Quartiers

Die untersuchten Windkraftanlagen bestehen aus Generatoren, die sowohl baulich (auf dem Gebäudedach) als auch auf Freiflächen im Quartier einsetzbar sind. Hierbei wird angenommen, dass im Durchschnitt 18,5% des Jahres der Wind ausreichend stark weht, damit die Windräder die Nennleistung erbringen [7]. Der jährliche Ertrag der Windräder errechnet sich somit aus der Multiplikation der Nennleistung und dem Zeitraum, in dem die Windräder die Nennleistung erbringen. Die Nennleistung- und Geschwindigkeit werden der Beschreibung repräsentativer Produkte von Herstellern horizontaler und vertikaler Windräder mit einer maximalen Höhe von 5 Metern ent-

nommen. Diese Windräder generieren bereits bei einer Windgeschwindigkeit von 1,5m/s elektrische Energie und erreichen die Nennleistung bei einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 13m/s. Zu empfehlen ist deshalb die Anbringung auf dem Gebäudedach, da hier höhere Windgeschwindigkeiten erreicht werden. Grundlegend muss für die Planung geprüft werden, ob die Windgeschwindigkeit des Standortes ausreichend ist. Hierfür ist eine Windstärke von mindestens 3 (3,4 – 5,4m/s) bis 5 (8,0 – 10,7m/s) notwendig [8]. Gemäß den Karten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) beträgt die durchschnittliche Windgeschwindigkeit in der Region um Martinsried 4,0 – 4,3m/s [4]. Dies bedeutet, dass die Windräder zwar starten und elektrische Energie generieren. Da eine Verdopplung der Windgeschwindigkeit eine Verachtfachung des Ertrags zur Folge hat, erbringen sie jedoch nur einen Bruchteil der Nennleistung. Aufgrund des nichtlinearen Verhältnisses von Ertrag und Windgeschwindigkeit und der nichtzyklischen Natur des Windes unterliegt der Ertrag der Windräder noch größeren Schwankungen als der der Photovoltaik [4]. Die Windräder, die die Grundlage des Kennwertes bilden, sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Abgleich von Nennleistung und jährlichem Endenergieertrag unterschiedlicher Windradhersteller

Hersteller	Nennleistung	Luftgeschwindigkeit (Nennleistung)	Durchschnitt Ertrag / Tag	Endenergie / Jahr
Rewindagic (Modell: FK-5000)	5.000 W	12 m/s	22 kWh	8.103 kWh/a
IstaBreeze® (Modell: i-2000W)	1.800 - 2.000 W	12 m/s	8 – 9 kWh	2.917 - 3.241 kWh/a
Bayoung (Modell: FK5KW)	4.500 – 4.999 W	12 m/s	20 – 23 kWh	7.293 – 8.101 kWh/a
Rewindagic (Modell: FS-2000)	2.000 W	13 m/s	9 kWh	3.241 kWh/a
<i>Durchschnitt</i>	<i>3.412,5 W</i>	<i>12 m/s</i>	<i>15 kWh</i>	<i>5.530 kWh/a</i>

Der Kennwert der Windräder liegt somit bei 5.530 kWh. Die Produkte unterteilen sich hierbei in Windräder mit einer Nennleistung von 2.000 W und 5.000 W, aus denen der jährliche Mittelwert gebildet wird. Für das Quartier ist jedoch eine Anpassung auf Windräder mit einer der beiden Nennleistungen notwendig. Das Beiblatt des Kennwertes macht zwei zentrale Planungsparameter ersichtlich. Einerseits muss die Anbringung des Windrades auf die lokalen Winde des Quartiers abgestimmt werden. Windbarrieren sollten möglichst verhindert werden und die Windräder für das Erreichen der

Nennleistung an einem möglichst hohen Punkt im Quartier angebracht werden. Um die tatsächliche Windgeschwindigkeit im Quartier zu ermitteln ist eine computergestützte Simulation notwendig, die eine präzise Windrose für den Standort und die Kubatur ermittelt. Das Beiblatt stellt hierfür eine exemplarische Windrose dar, die die Systematik erläutert. Daneben ist auf dem Beiblatt der spezifische Ertragsverlauf der Windkraftanlage dargestellt. Die Bedeutung des spezifischen Ertragsverlaufs wird in der Anwendung auf den Campus für „Life Sciences“ tiefer erläutert. Der entsprechende Kennwert der Windräder ist in Abbildung 9 ersichtlich.

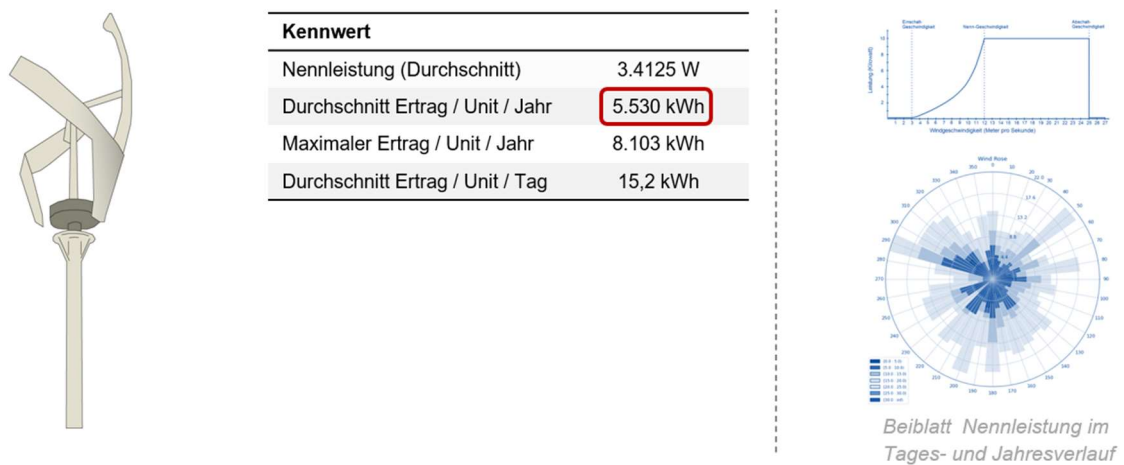


Abbildung 9: Kennwert der Windräder (Durchschnitt 2 kW – 5 kW)

3.3.3. Kennwertbildung der Wärmerückgewinnung aus Servern zur klimaneutralen Wärmeversorgung des Quartiers

Neben der klimaneutralen Stromversorgung des Quartiers steht die Verdrängung fossiler Energien in der Wärmeversorgung des Quartiers im Fokus. Besonders im Zuge von 5G-Netzwerken und Cloud-Computing stellen die Serverfarmen in Quartieren und benachbarten Gebäuden eine zuverlässige Wärmequelle dar. Durch die hohen Betriebstemperaturen von bis zu 80° Celsius, die die Server bei voller Auslastung erreichen, wird eine erhebliche Menge an Strom in Wärme umgewandelt. Hierbei erreichen die Rechenzentren eine spezifische Wärmelast von 6,5-10kW/m² pro IT-Raumfläche [11]. Diese Abwärme kann zur klimaneutralen Beheizung eines Quartiers genutzt werden oder bei entsprechendem Anschluss in das Fernwärmenetz eingespeist werden. Der Kennwert der Wärmerückgewinnung aus Servern leitet sich aus der Anschlussleistung bestehender Serverfarmen ab. Es kommen hierbei zwei Systeme der Wärme-

rückgewinnung zum Einsatz. Große Verbreitung haben die kostengünstigeren luftgekühlten Systeme [11]. Die warme Luft des Serverbetriebs wird hierbei durch eine Lüftungsanlage (in einer Abhangdecke) abgesogen und durch einen Wärmetauscher rückgewonnen. Eine gezielte Warm- und Kaltgangleitung ermöglicht die bedarfsgerechte Kühlung der Server mit frischer, kühler Luft. Weniger verbreitet sind die flüssiggekühlten Systeme der Wärmerückgewinnung aus Servern. Durch den direkten Kontakt der Server mit dem Kühlmittel wird ein höher Grad an Wärme rückgewonnen. Die flüssig gekühlten Systeme untergliedern sich in direkte und indirekte Systeme (je nach Kontakt mit den zu kühlenden Komponenten der Server). Die Installation und der Betrieb sind jedoch teurer als die der luftgekühlten Systeme. Der Ertrag an rückgewonnener Wärme entspricht grob dem 1,3 bis 1,5-fachen der IT-Last. Somit lässt sich aus dem Strombedarf der Server der durchschnittliche Jahresertrag direkt errechnen. Der Kennwert des planerischen Rahmenwerks basiert auf einer Studie der TH Mittelhessen zur Wärmerückgewinnung aus Serverfarmen in Offenbach (Frankfurt). Die Messungen sind in Tabelle 5 ersichtlich.

Tabelle 5: Studienergebnisse zur Wärmerückgewinnung aus Servern in Offenbach (Frankfurt)

Rechenzentrum	Anschlussleistung	IT-Last	IT-Fläche	Wärmeleistung
Maincubes	7,8 MW	6,0 MW	4200 m ²	1,85 kW/(m ² *a)
Main DC1	25,0 MW	16,0 MW	8000 m ²	3,13 kW/(m ² *a)
Cloud HQ	86,0 MW	56,0 MW	54000 m ²	1,59 kW/(m ² *a)
Main DC2	24,0 MW	16,0 MW	8000 m ²	3,0 kW/(m ² *a)
<i>Durchschnitt</i>	<i>35,7 MW</i>	<i>23,5 MW</i>	<i>18.550 m²</i>	<i>2,39 kW/(m²*a)</i>

Die spezifische Wärmeleistung der Rechenzentren beträgt 2,39 kW/m². Der Kennwert der Wärmerückgewinnung aus Servern entspricht somit 20,9 MWh/m² an Wärmeenergie pro Jahr. Dies entspricht 57,4 kWh/m² pro Tag. Ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlage ist erst durch einen eigenen, separaten Serverraum sinnvoll. Durch den Serverraum kann eine Anlage für die Wärmerückgewinnung wirtschaftlich betrieben und in das Energiesystem integriert werden. Die Wirtschaftlichkeit muss bei der Planung eines Quartiers vorab durch die geschätzte IT-Last und die Kosten der Komponenten geprüft werden. Die Anwendung des Kennwertes erfolgt im Gegensatz zur generellen Methodik in einem umgekehrten Prozess. Der Kennwert kann nicht auf den Wärmebedarf skaliert werden, sondern errechnet sich aus der geschätzten IT-Last der Server. Im Planungsprozess wird hierbei zuerst die Serveranzahl entsprechend des Be-

darfs geplant. Erst im Anschluss kann aus der Serverfläche der jährliche Ertrag errechnet werden, der zur Deckung des Bedarfs an Fernwärme genutzt werden kann. Der durchgehende Betrieb des Rechenzentrums sorgt für eine gleichbleibende Wärmelast, die wiederum zu einem über den Tag und über das Jahr gleichbleibenden Wärmeertrag führt. Dies ist in Wintermonaten von Vorteil, da eine zuverlässige Wärmequelle vorhanden ist. In den Sommermonaten kann die überschüssige Wärme hingegen in das Fernwärmenetz eingespeist werden. Der entsprechende Kennwert der Wärmerückgewinnung aus Serverfarmen ist in Abbildung 10 dargestellt.

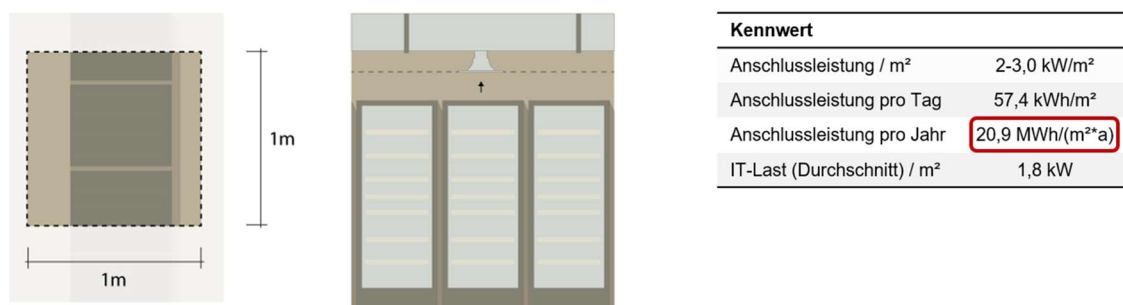


Abbildung 10: Kennwert der Wärmerückgewinnung aus Serverabwärme

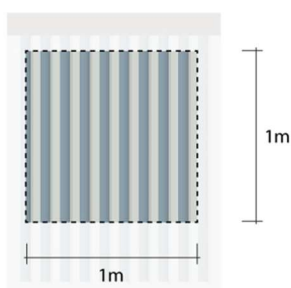
3.3.4. Kennwertbildung der Solarthermie zur klimaneutralen Wärmeversorgung des Quartiers

Solarthermie-module können in der Wärmeversorgung fossile Energieträger verdrängen und klimaneutrale Wärme bereitstellen. Die Kennwertbildung findet für die Vakuumröhrenkollektoren statt, da diese einen höheren Wirkungsgrad als die Flachkollektoren besitzen und ganzjährig geringe Wärmeverluste verursachen [12]. Das Berechnungsverfahren des jährlichen Ertrags basiert auf der Multiplikation der Nennleistung (kWp) mit den jährlichen Sonnenstunden, die gemäß dem Referenzverfahren für Deutschland mit 800h pro Jahr angenommen werden [14]. Die Nennleistung wurde den Herstellerangaben von drei repräsentativen Vakuumröhrenkollektoren entnommen. Die gewählten Module sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Abgleich der Nennleistung von Vakuumröhrenkollektoren unterschiedlicher Hersteller

Hersteller	Nennleistung / m ²	Endenergie / Jahr	Durchschnitt Ertrag / Tag
Ravensberger Solar (Modell: Zeus cpc 16 Röhrenkollektor)	445,6 Wp	356,0 kWh	1,0 kWh
WT CPC Vakuumkollektor HYH58-20 Röhren V2.0	410,0 Wp	328,0 kWh	0,9 kWh
Linuo Ritter (Modell: CPC XL1914)	615,4 Wp	492,0 kWh	1,3 kWh
<i>Durchschnitt</i>	<i>490,3 Wp</i>	<i>392,0 kWh</i>	<i>1,1 kWh</i>

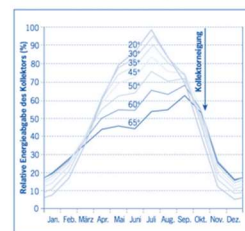
Unter Realbedingungen ist neben der Sonnenintensität, der maximalen Arbeitstemperatur und dem optischen Wirkungsgrad die Temperaturdifferenz zwischen der Außenluft und dem Innenraum für das Erreichen der Nennleistung entscheidend. Auf Grundlage des Kennwertes von 392 kWh/m²/a muss eine präzise Planung für den Standort des Quartiers erfolgen. Der Wärmeertrag der Kollektoren ist analog zur Photovoltaik von der Tages- und Jahreszeit abhängig. Durch das Wärmemedium im Kollektorkreislauf wird jedoch ein Pufferspeicher (Warmwasser-, Heizwärmespeicher oder Kombination) aufgewärmt [15]. Hierdurch kann die Wärme von einem bis zu mehreren Tagen gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt genutzt werden. Das Beiblatt modifiziert analog zur Photovoltaik durch Korrekturfaktoren den Kennwert entsprechend des Aufstellungswinkels und des Ausrichtungswinkels zur Sonne. Der entsprechende Kennwert und das Beiblatt zur Übersicht des Jahresverlaufs und der Korrekturfaktoren sind in Abbildung 11 dargestellt.



Kennwert	
Durchschnitt Ertrag pro Jahr	392 kWh/(m ² a)
Durchschnitt Ertrag pro Tag	1,06 kWh/m ²
Stagnationstemperatur	190°C

Korrekturfaktoren Solarthermie:

- Neigungswinkel -10°-10° (Süd): 1m² * 100%
- Neigungswinkel 30° (Süd): 1m² * 111%
- Neigungswinkel 30° (Ost-West): 1m² * 117%
- Neigungswinkel 50° (Süd): 1m² * 125%
- Neigungswinkel 50° (Ost-West): 1m² * 125%



Beiblatt Ertrag im Tages- und Jahresverlauf

Abbildung 11: Kennwert der Vakuumröhrenkollektoren (Solarthermie)

3.3.5. Kennwertbildung der Wärmerückgewinnung aus Abwasser zur klimaneutralen Wärmeversorgung

Der Kennwert der Wärmerückgewinnung aus Abwasser leitet sich aus dem jährlichen Ertrag des Wärmetauschers eines Kanalisationsrohrs ab und wird pro Laufmeter angegeben. Das Potential der Wärmerückgewinnung ist hierbei sehr groß. Die Abkühlung des Abwassers eines Kanalisationsrohr um lediglich 1 Kelvin ermöglicht die Rückgewinnung von 1,5 Kilowattstunden Wärme aus einem Kubikmeter Wasser [13]. Für die Wärmerückgewinnung aus der Kanalisation müssen zwei Bedingungen erfüllt sein: einerseits muss das Wärmeangebot durch die Temperatur des Abwassers ausreichend zur Verfügung stehen. Andererseits muss die Installation von Wärmetauschern an oder in dem Rohr möglich sein. Dies ist bei Gemeinden mit einer Durchschnittsbevölkerung von 3.000 – 5.000 Einwohner und einem mittleren Trockenwetterabfluss von 15 l/s gewährleistet [13]. Für die Installation des Wärmetauschers muss der Kanal einen Innendurchmesser von mindestens 800mm besitzen. Eine weitere Voraussetzung besteht in der örtlichen Nähe zwischen Kanalisationsrohr und Quartier. Obwohl das Abwasser als Wärmequelle im Vergleich zu Wind und Erde auch im Winter relativ hohe Temperaturen von 10-15°C erreicht, sinkt der Wirkungsgrad mit zunehmender Distanz von Wärmeentnahme zu Wärmeabnehmer [13]. Ein entscheidender Vorteil zu anderen Kennwerten besteht in der Kälteproduktion, die in den Sommermonaten durch den umgekehrten Effekt möglich ist. Hierbei wird das Wasser des Kanals als Wärmesenke genutzt. Eine Referenzanlage in Schaffhausen schafft hierdurch eine jährliche Kälteproduktion von 400 MWh [13]. Des Weiteren besteht ein Vorteil in der gleichbleibend hohen Temperatur in der Heizperiode und durch den Vorrat an Wärme, der durch den konstanten Wasserfluss rund um die Uhr gesichert ist. Daneben lässt sich durch die Länge des Wärmetauschers auf den Wärmebedarf des Quartiers eingehen.

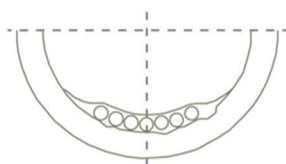
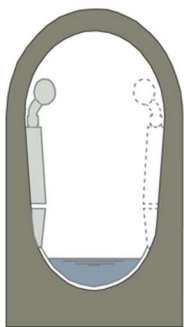
Für die Wärmerückgewinnung aus Abwasser stehen des Weiteren Fallrohrwärmetauscher, Duschwasserwärmetauscher und Grauwassertanks mit Wärmetauschern zur Auswahl. Zielsetzung des Kennwertesystems ist ein skalierbarer Kennwert, der den jährlichen Ertrag mit einer Bezugseinheit verknüpft. Obwohl ein Grauwassertank mit Wärmetauschern signifikant zur Senkung des Wärmebedarfs beiträgt, lässt sich vorab nur schwer eine Aussage über die Menge und Temperatur des Abwassers treffen. Dies hängt neben der Anzahl der Personen im Quartier erheblich von den Nutzungen der Fläche ab. Deshalb erfolgt in dieser Studie die Kennwertbildung der rückgewon-

nen Wärme ausschließlich aus der Kanalisation. Als Referenz für den Kennwert wird hierbei die durchschnittlich rückgewonnene Wärme aus Anlagen von vier Standorten ermittelt. Die Referenzanlagen und der Wärmeertrag sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Tabelle 7: Vergleich von Anlagen zur Wärmerückgewinnung aus der Kanalisation

Hersteller	Wärmeproduktion WP / Jahr	Kälteproduktion WP / Jahr	Länge WT	Wärmeproduktion / Laufmeter
Binningen (BL)	2.400 MWh	/	140 m	17 MWh/m
Zwingen (BL)	230 MWh	/	10 m	23 MWh/m
Schaffhausen (SH)	500 MWh	400 MWh	/	/
<i>Durchschnitt</i>	<i>1.043 MWh</i>	<i>/</i>	<i>/</i>	<i>20 MWh/m</i>

Aus den Bestandsanlagen leitet sich eine durchschnittliche Wärmeproduktion von 20 MWh pro Laufmeter und Jahr ab. Zu beachten ist bei der Verwendung des Kennwerts, dass der Wärmeertrag über die Heizperiode und nicht über das gesamte Jahr erbracht wird. Der entsprechende Kennwert der Wärmerückgewinnung aus Abwasser ist in Abbildung 12 ersichtlich.



Kennwert	
Anschlussleistung / m / Jahr	20,0 MWh/m
Anschlussleistung / m / Tag	54,8 kWh
Kühlleistung / m / Jahr	16,04 MWh

Abbildung 12: Kennwert der Wärmerückgewinnung aus Abwasser

3.3.6. Anwendungs- und standortbedingte Ertragsverläufe der klimaneutralen Energieversorgung

Die klimaneutralen Maßnahmen der Stromversorgung (Photovoltaik und Windenergie) generieren in spezifischen Tages- und Jahresverläufen elektrische Energie. So erreichen Photovoltaikmodule die Leistungsspitze im Tagesverlauf um die Mittagszeit während in der Nacht keine elektrische Energie generiert wird. Im Jahresverlauf wird im Sommer bis zu 70% der des Jahresertrags des Moduls erzeugt [20], wohingegen die

kürzeren Sonnenstunden im Winter und auf dem Modul liegender Schnee die Produktion von Strom beeinträchtigt. Der Ertrag (im Referenzmonat Februar) eines Quadratmeters eines monokristallinen Photovoltaikmoduls, das im 35°-Winkel Richtung Süden in Martinsried aufgestellt ist, ist in Abbildung 13 dargestellt.

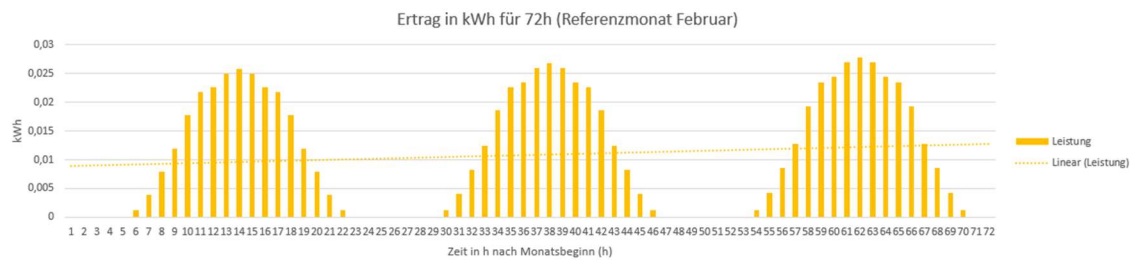


Abbildung 13: Ertrag einer monokristallinen Photovoltaikzelle im Tagesverlauf (Referenzmonat Februar)

Im Rahmen der Klimaneutralität muss der Energiebedarf über den gesamten Tag durch erneuerbare Träger gedeckt werden. Aus den Versorgungsmaßnahmen muss anhand der Kennwerte ein Energiesystem modelliert werden, das den Bedarf lückenlos deckt. Im Fall des Strombedarfs besteht für ein Bürogebäude eine Grundlast, die durch Server und die Lüftungsanlage auch nachts besteht.

Abbildung 14 verdeutlicht den zyklischen Ertrag der Photovoltaikmodule. Aus der beschriebenen Systematik der erneuerbaren Energieversorgung folgt, dass für ein Energiesystem auf Grundlage von 100% erneuerbaren Energien ein Abgleich des Ertrags und des Bedarfs im Tagesverlauf erfolgen muss. Hierbei können sich grundlegend die spezifischen Ertragsverläufe der Einzelmaßnahmen (in der Stromversorgung beispielsweise Photovoltaik und Wind) ergänzen.

Analog zur Stromversorgung muss die Wärmeversorgung durch die Maßnahmen lückenlos gedeckt werden. In der Kennwertbildung der Solarthermie wurde der zyklische Ertragsverlauf geschildert. In der Quartiersversorgung mit Wärme bestehen zwei erleichternde Umstände. Einerseits kann die erzeugte Wärme zu einem späteren Zeitpunkt konsumiert werden. Dies ist der Puffer-Speicherung zu verdanken. Daneben stehen durch die Wärmerückgewinnung aus Servern und der Kanalisation Quellen zur Verfügung, die dem Wärmespeicher über den Tag und das ganze Jahr verteilt eine gleichbleibende hohe Wärmemenge zuführen. Die Deckung des Energiebedarfs des Laborgebäudes des Campus wird in Kapitel 4.5 vorgestellt. In diesem Rahmen werden verschiedene Strategien der klimaneutralen Energieversorgung vorgestellt.

3.4. Grundlagen der ökologischen Kompensation

Der Begriff der Kompensation von Treibhausgasen enthält definierte Charaktereigenschaften, die eine Maßnahme erfüllen muss, um als Ausgleichsmaßnahme von Emissionen zulässig zu sein. Hierzu zählen der Festlegung des Umweltbundesamtes nach drei Hauptmerkmale [14]. Das erste Merkmal besteht in dem Charakter der Zusätzlichkeit [14]. Dies bedeutet, dass die Maßnahme nicht in sich selbst wirtschaftlich ist oder durch gesetzliche Vorschriften erfüllt werden muss und der gängigen Praxis eines Ortes entspricht. Der zweite Aspekt besteht in der Dauerhaftigkeit der CO₂-Bindung [14]. Bei der Renaturierung von Wäldern besteht beispielsweise das Risiko eines Waldbrandes oder des Schädlingsbefalls. Um die Dauerhaftigkeit nachzuweisen kann in Form einer Überkapazität ein Puffer eingeplant werden, der entsprechend einer Risikoanalyse quantifiziert wird. Der dritte Aspekt besteht in der Berechnung, dem Monitoring und der Verifizierung der CO₂-Bindung [14]. Zur Berechnung des Emissionsausgleichs müssen Qualitätsstandards genutzt werden, die unabhängig und extern geprüft werden können. Zu den international anerkannten Qualitätsstandards gehört beispielsweise der „Verified Carbon Standard“ [20]. Besonders zu prüfen ist in der Berechnung die Verlagerung von Emissionen. Diese entsteht bei der Durchführung eines Projektes, durch das an anderer Stelle die zu vermeidenden Emissionen doch auftreten. Ein Beispiel sind Weideflächen, die zur Renaturierung von Wäldern genutzt werden. Hierdurch könnten die Bauern an anderer Stelle Wälder roden, um Weidefläche für die Tierhaltung zu schaffen. Im Anschluss müssen die Maßnahmen validiert werden. Hierfür wird entsprechend der Vorgaben des Qualitätsstandards ein Projektplan erstellt. Dieser Plan hält beispielsweise Schritte in der Dokumentation und die verwendeten Zusätzlichkeitstests fest.

Bei der ökologischen Kompensation von Treibhausgasen ist der zeitliche Rahmen entscheidend, über den die Maßnahmen zum Ausgleich der Klimawirksamkeit erhalten bleiben müssen. Die Treibhausgase werden in der Atmosphäre durch natürliche Prozesse abgebaut. Die Verbleibdauer in der Atmosphäre ist ausschlaggebend für den notwendigen, zeitlichen Erhalt der Kompensationsmaßnahmen. Die Dauer, die beispielsweise zum natürlichen Abbau von Methan in der Atmosphäre benötigt wird, beträgt weniger als 15 Jahre [15]. Für das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid sind nach 1.000 Jahren jedoch noch 15% - 40% des Gases in der Atmosphäre messbar [15]. Da sich die Art der Treibhausgase nicht zweifelsfrei klären lässt wird der notwendige Er-

halt mit mindestens 1.000 Jahren angesetzt. Die Verbleibdauer in der Atmosphäre verschiedener Treibhausgase ist in Tabelle 8 ersichtlich.

Tabelle 8: Verweildauer von Treibhausgasen in der Atmosphäre

Treibhausgas	Chemische Formel	Klimawirksamkeit [CO ₂ -Äq.]	Nachweisbar in Atmosphäre
Kohlenstoffdioxid	CO ₂	1kg	>1.000 Jahre [7]
Methan	NH ₄	25kg	12,4 Jahre
Distickstoffoxid	NO ₂	298kg	121 Jahre
Fluorierte Kohlenwasserstoffverbindungen	HFKW, FKW, SF ₆ , NF ₃	140kg	>45 Jahre

Die Klimawirksamkeit der Treibhausgase wird durch ökologische Maßnahmen ausgeglichen. Dem Kompensationsprinzip liegt hierbei die Photosynthese zugrunde. Durch diese wandelt die Pflanze in einer endothermen Reaktion Kohlenstoffdioxid und Wasser zu Sauerstoff und in Stärke gebundenem Kohlenstoff (Arene) um [23]. Das Verhältnis der Koppelprodukte Sauerstoff und Stärke beträgt hierbei 1:3,67 [17]. Aus einem Kilogramm CO₂ werden somit 0,73kg Sauerstoff und 0,27kg Stärke, in der der Kohlenstoff gebunden ist. Aus den Stärkemolekülen bildet die Pflanze lange Fasern (Microfibril), die durch eine Übereinanderlagerung die Zellwand der Pflanzenzellen bildet. Dieser Prozess ist in Abbildung 14 dargestellt. Die Speicherung des Kohlenstoffs aus CO₂ findet somit an erster Stelle in der Zellwand statt.

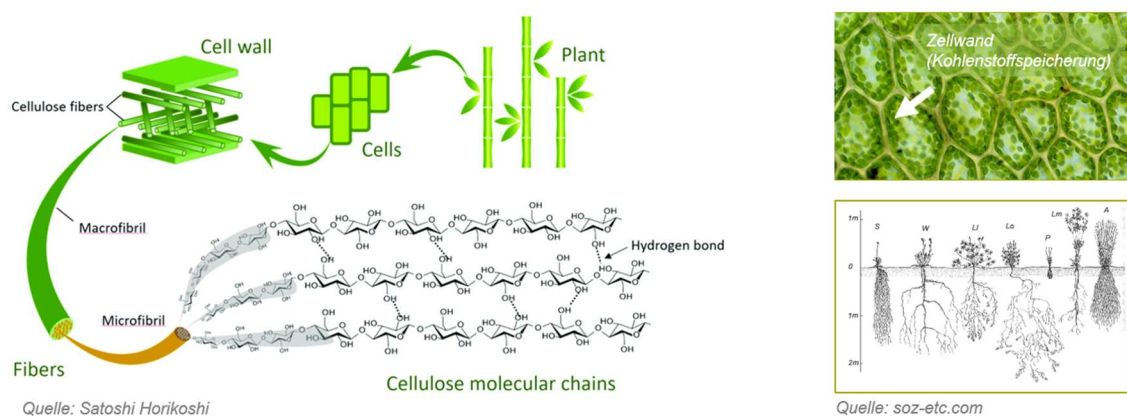


Abbildung 14: CO₂-Bindung und Kohlenstoffspeicherung in den Pflanzenzellen

Aus den Pflanzenzellen sind neben dem Stamm und den Ästen das Blattwerk und das Wurzelwerk aufgebaut. Somit wird die gesamte Pflanzenstruktur aus dem Kohlenstoff

aufgebaut, unabhängig von der Vegetationsart. Die CO₂-Gesamtbindung, die zur Kennwertbildung entscheidend ist, kann auf zwei unterschiedliche Methoden ermittelt werden. Der Kohlenstoffgehalt einer Pflanze entspricht bei Erreichen der Reifephase 50% des Gesamtgewichtes [17]. Aus der Photosynthese entsteht annäherungsweise 27% in Stärke gebundener Kohlenstoff [17]. Somit lässt sich aus Literaturkennwerten des statistischen Durchschnittsgewichts der Trockenmasse in der Reifephase das gebundene CO₂ errechnen. Diese Methodik liegt beispielsweise der Quantifizierung des gespeicherten CO₂ von Bäumen der bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft zugrunde. Analog hierzu wurde für die Fichte, Buche, Eiche und Kiefer entsprechend der Baumhöhe und des Stammdurchmessers auf Brusthöhe die CO₂-Gesamtbindung errechnet [18].

Der zweite Ansatz besteht im Abgleichen der linearen CO₂-Bindung und dem Zeitraum bis zum Erreichen der Reifephase der Kompensationsmaßnahme. Bei Erreichen der Reifephase hat die Vegetationsform die maximale Menge an CO₂ gebunden. Aus Literaturkennwerten zum Lebenszyklus lässt sich die Dauer bis zum Erreichen der Reifephase ermitteln. Das Wachstum erfolgt hierbei in einem nicht-linearen Prozess. Es lässt sich jedoch eine hypothetische, lineare Bindungsrate bilden. Diese kann mit Literaturkennwerten zur linearen CO₂-Bindung abgeglichen werden. So kann aus der Kombination dieser Datensätze die CO₂-Gesamtbindung errechnet werden, die als Kennwert dient. Diese Methodik wird anhand der Buche in Kapitel 3.5 vorgestellt.

3.4.1. Abgleich der Zeitschienen der Quartieremissionen und der ökologischen Kompensationsmaßnahmen

In den Grundlagen wurde die notwendige, zeitliche Abstimmung der ökologischen Kompensationsmaßnahmen zum Ausgleich der Klimawirksamkeit der Treibhausgase des Quartiers erläutert. Der Ausstoß der Treibhausgase geschieht zwar bereits vor dem Baubeginn bei der Herstellung der Materialien. Die Nutzungsphase stößt jedoch innerhalb von 50 Jahren den entscheidenden Anteil an Treibhausgasen aus. Wie bereits Eingangs erläutert wurde baut sich das emittierte CO₂ in der Atmosphäre nach der Nutzungsphase nur langsam ab. Die Kompensationsmaßnahmen (außer die Naturflächen) besitzen eine Lebensdauer deutlich unter 500 Jahren. Für die bauwerksgebundene Begrünung liegt diese sogar unter 100 Jahren. Der kompensierende Effekt erlischt somit bei Erreichen des Lebensendes. Um die entstandenen Treibhausgase

unter der Berücksichtigung des zeitlichen Aspekts ausgleichen zu können ist das Erarbeiten einer eigenen Methodik notwendig. Diese muss die lineare CO₂-Bindungsrate mit der CO₂-Gesamtbindung der Maßnahmen kombinieren. In dieser Arbeit wird vorerst die gesamte Menge an Treibhausgasen unabhängig der Zeitschiene des Laborgebäudes kompensiert. Hierdurch wird als Ausgleich der generellen CO₂-Konzentration der Atmosphäre entgegengewirkt. Die zeitliche Übereinstimmung der Kompensationsmaßnahmen und des Laborgebäudes, auf dessen Emissionen die Maßnahmen angewandt werden, ist in Abbildung 15 dargestellt.

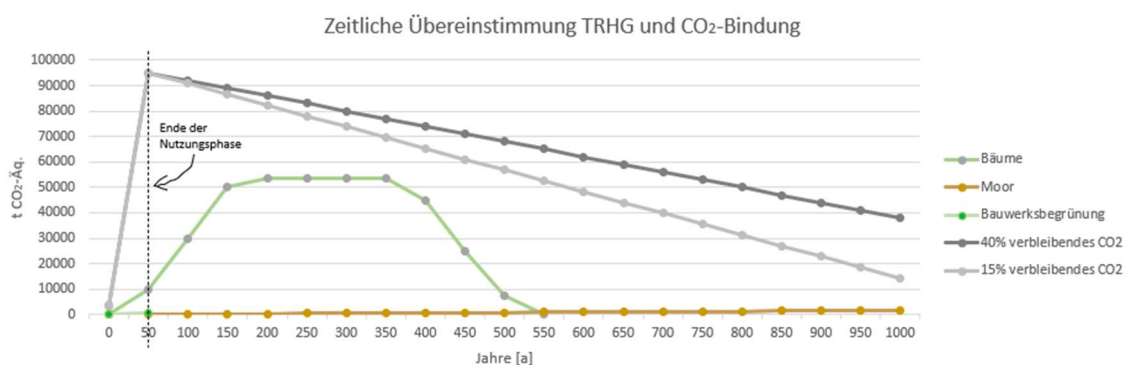


Abbildung 15: Zeitliche Übereinstimmung der emittierten Treibhausgase (modulares Laborgebäude) und der ökologischen Kompensationsmaßnahmen

3.5. Kennwertbildung der ökologischen CO₂ - Kompensationsmaßnahmen

Im folgenden Kapitel wird die Kennwertbildung der ökologischen Kompensationsmaßnahmen vorgestellt. In der Methodik wurde die Kennwertbildung anhand der Verknüpfung der CO₂-Gesamtbindung mit der Bezugseinheit dargelegt. Die Bezugseinheit ist für die Naturflächen und die bauwerksgebundenen Kompensationsmaßnahmen jeweils ein Quadratmeter. Für die Einzelkompensationsmaßnahmen ist dies die Stückzahl unter Berücksichtigung der notwendigen Fläche für das Wurzelwerk.

Aus der CO₂-Gesamtbindung der Maßnahme wird ein grafisch anschaulicher Kennwert geschaffen. Dieser wird durch ein Beiblatt ergänzt. Wie in der Methodik bereits erläutert wurde macht dieser die Erneuerungsrate und (bei den Naturflächen) die Korrekturfaktoren ersichtlich.

Die Kompensationsmaßnahmen, für die die Kennwerte anhand der CO₂-Gesamtbindung aufgebaut wurden, sind in Tabelle 9 aufgelistet. Im Folgenden Abschnitt wird die Kennwertbildung der einzelnen, ökologischen vorgestellt. Hierbei werden die Grundlagen, die Erneuerungsrate und die entsprechenden Korrekturfaktoren erläutert.

Tabelle 9: Übersicht der ökologischen CO₂-Kompensationsmaßnahmen

Kompensationsmaßnahme	CO ₂ -Bindung gesamt	Lineare Bindungsrate (pro Jahr)	Lebensdauer
Moor	2.570kg CO ₂ /m ²	1,7kg CO ₂ /m ² /a	/
Weidefläche	216kg CO ₂ /m ²	/	/
Waldfläche	403kg CO ₂ /m ²	/	/
Buche	2.000kg CO ₂	16,8kg CO ₂ /a	500 Jahre
Tanne	1.600kg CO ₂	20kg CO ₂ /a	400 - 600 Jahre
Hecke	670kg CO ₂ /m ²	13,4kg CO ₂ /m ² /a	300 Jahre
Int. Gründach	24kg CO ₂ /m ²	0,48kg CO ₂ /m ² /a	50 Jahre*
Ext. Gründach	12kg CO ₂ /m ²	0,24kg CO ₂ /m ² /a	50 Jahre*
Grünfassade (bodengebunden)	9,15kg CO ₂ /m ²	0,183kg CO ₂ /m ² /a	50 Jahre*
Grünfassade (fassadengebunden)	45,6kg CO ₂ /m ²	0,913kg CO ₂ /m ² /a	50 Jahre*

*Bezogen auf die Nutzungsphase des Gebäudes

3.5.1. Kennwertbildung der Buche als CO₂-Einzelkompensationsmaßnahmen

Der bayerischen Anstalt für Wald und Forst nach besteht die Waldzusammensetzung bei Martinsried aus einem Mischwald aus Tannen und Buchen [19]. Die Buche eignet sich deshalb als Kompensationsmaßnahme für den Campus für „Life Sciences“. In der Anwendung des Kennwerts wird davon ausgegangen, dass der Baum sich entweder in den regionalen Waldbestand einfügt oder direkt in dem Quartier in Martinsried im Rahmen der Freiflächenplanung angepflanzt wird.

Der Kennwert der Buche entspricht 2.000kg gebundenem CO₂ pro Baum. Aufgrund der Ressourcenversorgung und der nachbarschaftlichen Konstellationen wird von einem Erreichen der maximalen Wuchshöhe von 30 Metern in der Reifephase ausge-

gangen [20]. Um den Baum mit ausreichend Wasser und Nährstoffen zu versorgen muss das Wurzelwerk mindestens 15m² betragen, [21]. Die CO₂-Gesamtbindung leitet sich aus der Trockenmasse und der Höhe der Buche in diesem Stadium ab. Aus dem Bewertungsschema der Kohlenstoff-Speicherleistung der bayrischen Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft lässt sich für eine Buche in einer Höhe von 30 Metern und einem Stammdurchmesser von 25 Zentimetern eine gebundene CO₂-Menge von 1.500 – 2.500kg CO₂ feststellen [18]. Diese Menge wird im Schnitt nach 125 Jahren (Erreichen der Reifephase) erreicht [20]. Aus diesen Daten lässt sich eine lineare Bindungsrate ermitteln, die bei 16kg CO₂/Jahr liegt. Literaturkennwerte bestätigen diesen Wert und setzen ihn bei ca. 15,89kg CO₂/Jahr an [23]. Die Abhängigkeit von CO₂-Bindung, Trockenmasse und Kohlenstoffgehalt der Buche ist in Abbildung 16 dargestellt.

Wachstumsrate + Gesamtbindung (Buche):

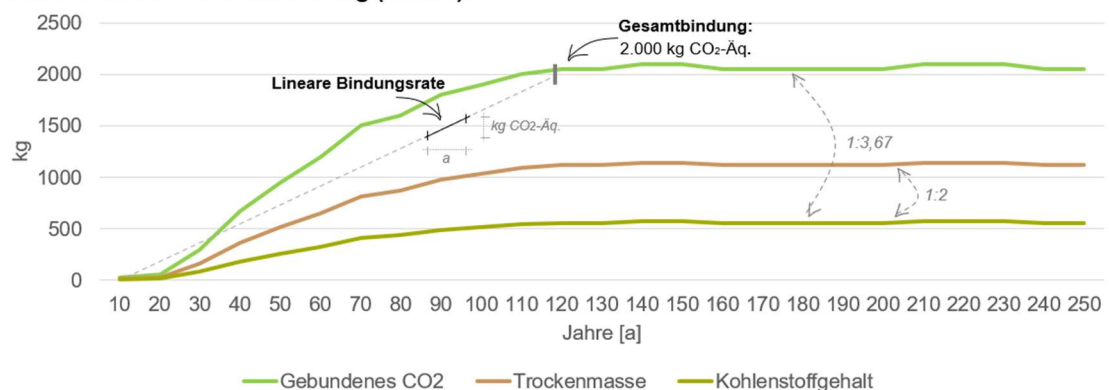


Abbildung 16: Methoden zur Ermittlung der CO₂-Gesamtbindung der Buche

Der Ort der Anwendung muss einen Fortbestand der Buche an der gleichen Stelle ermöglichen. Nach spätestens 500 Jahren erreicht die Buche im Regelfall das Ende des Lebenszyklus [24]. In der Zerfallsphase der Buche findet in einem umgekehrten Prozess die Freisetzung von CO₂ statt. Aufgrund der Verweildauer der Emissionen in der Atmosphäre müssen somit mindestens zwei aufeinanderfolgende Generationen der Buche gepflanzt werden. Solange dies im Quartier nicht zweifelsfrei gewährleistet werden kann ist die Renaturierung von bestehenden Ökosystemen vorzuziehen.

Der resultierende Kennwert der Buche, die Erneuerungsrate und die CO₂- Bindungsdauer sind in Abbildung 17 dargestellt.



Abbildung 17: Kennwert der Buche (CO₂-Einzelkompensationsmaßnahme)

3.5.2. Kennwertbildung der Tanne als CO₂-Einzelkompensationsmaßnahme

Der Kennwert der Tanne entspricht 1.600 kg gebundenem CO₂ pro Baum. Analog zur Kennwertbildung der Buche wird zuerst die Höhe (bei Erreichen der Reifephase) ermittelt. Aus der statistischen Durchschnittshöhe wird für den Kennwert eine Zielwuchshöhe von 40 Metern festgelegt [25]. Auf Grundlage des Bewertungsschemas der Kohlenstoffspeicherleistung der bayrischen Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft lässt sich hieraus eine Speicherung von 1.500 - 1.800 kg CO₂ ermitteln [18]. Diese gebundene Menge CO₂ in der Reifephase wird (für eine Weißtanne) nach 80 Jahren erreicht [26]. Aus diesen Daten resultiert eine lineare Bindungsrate von 20kg CO₂ pro Jahr. Literaturkennwerte bestätigen diesen Wert bei 20kg CO₂ [23]. Obwohl die Tanne als Nadelbaum insgesamt weniger CO₂ speichert, wächst sie deutlich schneller und erreicht die CO₂-Gesamtbindung des CO₂ schneller.

Der Kennwert, die Erneuerungsrate und die CO₂-Bindungsdauer sind in Abbildung 18 dargestellt.



Abbildung 18: Kennwert der Tanne (CO₂-Einzelkompensationsmaßnahme)

3.5.3. Kennwertbildung der Dachbegrünungen als bauwerksgebundene CO₂ - Kompensationsmaßnahmen

Für die Dachbegrünungen wurden zwei separate Kennwerte entwickelt. Diese bestehen in der extensiven und intensiven Dachbegrünung. Im Folgenden wird zuerst der Kennwert der extensiven Dachbegrünung erläutert. Typische Elemente des Dachaufbaus sind hierbei eine Wurzelschutzschicht, ein Drainage-System mit Wasserspeicherung, einer Steinwolle-Wachstumsmatte und eine Sedum-Mix-Vegetationsmatte [26]. Das Sedum (Dickblattgewächs) bindet hierbei die größte Menge CO₂ und speichert dies sowohl in Blättern, Halmen und in den Wurzeln der Wachstumsmatte. Aus Sicht der ökologischen Kompensation ist zu beachten, dass die Bindungsdauer vom Lebenszyklus des Gebäudes abhängig ist. Sobald die Bebauung das Ende des Lebenszyklus erreicht hat, wird sie zumeist abgerissen. Das CO₂, das in der Dachbegrünung gespeichert ist wird somit freigesetzt. Der Kennwert leitet sich aus dem in der Trockenmasse gespeicherten CO₂ ab. Dessen Masse beträgt bei einer Moos-Sedum Vegetation 12kg gespeichertem CO₂ pro Quadratmeter [32]. Hieraus ermittelt sich über die Nutzungsphase von 50 Jahren eine lineare Bindungsrate von 0,24kg CO₂/m² pro Jahr [27]. Aufgrund der begrenzten Lebensdauer der Bebauungen ist jedoch eine weiterführende CO₂-Kompensation frühzeitig vorzusehen.

Die extensive Dachbegrünung kann hierbei sowohl auf Flachdächern als auch Sattel- oder Pultdächern eingesetzt werden. Die CO₂-Bindung findet hauptsächlich durch Moose statt, die auf der Sedum-Matte wachsen. Aufgrund des geringeren Gewichts ist die extensive Dachbegrünung flexibel auf Dachformen anpassbar. Gleichzeitig bindet

sie deshalb weniger CO₂ als die intensive Dachbegrünung. Der Kennwert der extensiven Dachbegrünung ist in Abbildung 19 ersichtlich.

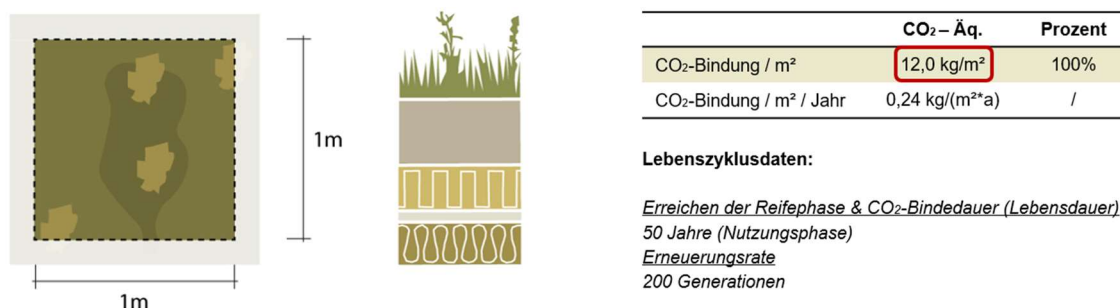


Abbildung 19: Kennwert der extensiven Dachbegrünung (Bauwerksgebundene CO₂-Kompensation)

Die intensive Dachbegrünung gleicht im Gegensatz zur extensiven Dachbegrünung einem zugänglichen Garten auf dem Gebäudedach. In Abhängigkeit der Schichtdicke sind neben Rasenflächen auch Stauden, Sträucher und Bäume möglich. Die Aufbau- dicke des intensiven Gründachs erreicht deutlich höhere Schichtdicken als die exten- sive Dachbegrünung. Dementsprechend sind die Lasten mit bis zu 3.000kg/m² deut- lich höher [28]. Die Anwendung eignet sich daher vorzugsweise auf Stahlbetonflach- dächern, die die Lasten des Dachaufbaus aufnehmen können. Für den Kennwert wird die Messung zur CO₂-Speicherung eines Stauden-Gehölze-Rasen verwendet. Das gespeicherte CO₂ beträgt 24kg CO₂/m² [32]. Hieraus ergibt sich eine lineare Bindungs- rate von 0,48kg gebundenem CO₂ pro Quadratmeter und Jahr. Das Verhältnis der Stauden kann über die Jahre zunehmen und eine Speicherung von bis zu 29kg CO₂/m² erreichen [32]. Da die Nutzungsphase mit 50 Jahren angesetzt ist wird das Wachstum zeitlich begrenzt und der geringere Wert als Kennwert etabliert. Der ent- sprechende Kennwert der intensiven Dachbegrünung ist in Abbildung 20 dargestellt.

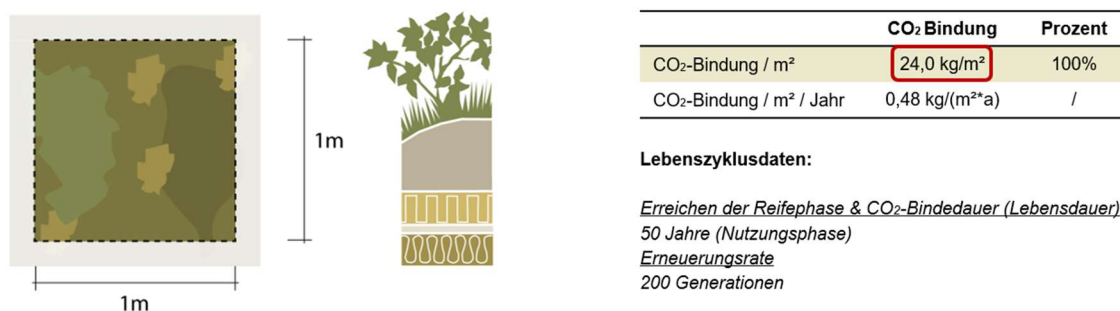


Abbildung 20: Kennwert der intensiven Dachbegrünung (Bauwerksgebundene CO₂-Kompensation)

Die Gründächer haben weitere wertvolle Funktionen in einem Quartier. So tragen sie zu einem effektiven Regenwassermanagement bei, indem der Regenwasserabfluss um 75% reduziert und verzögert wird [29]. Die Biofiltration mindert daneben die Schadstoffbelastung (Feinstaub, Smog) der Luft und bietet Lebensraum für Insektenarten wie Bienen und Hummeln.

3.5.4. Kennwertbildung der Fassadenbegrünungen als bauwerksgebundene CO₂-Kompensationsmaßnahmen

Für die Fassadenbegrünungen werden zwei separate Kennwerte gebildet. Diese bestehen in der boden- und der fassadengebundenen Begrünung. Der Hauptunterschied besteht hierbei in der konstruktiven Ausführung und der Art der Pflanzen, die verwendet werden. Beide Fassadenbegrünung binden CO₂ über den Lebenszyklus des Gebäudes in einer linearen Rate. Aufgrund der vielfältigen Pflanzen, die zur Begrünung in Frage kommen, wird das Erreichen der Reifephase mit dem Ende der Nutzungsphase (50 Jahre) gleichgesetzt.

Für die fassadengebundene Begrünung lässt sich ein großes Spektrum an Pflanzen verwenden. Hierzu zählen beispielsweise Stauden, Kleingehölze oder Ranken [31]. Die Versorgung der Pflanzen mit Wasser und Nährstoffen erfolgt durch ein automatisches Versorgungssystem. Für die Konstruktion sind zwei Ausführung weit verbreitet. Dies sind einerseits mit Substrat gefüllte Tröge an der Außenfassade, in denen die Begrünung in Pflanzengefäßen wächst. Andererseits sind dies die vertikalen Gärten und senkrechten Vegetationsflächen [30]. Diese untergliedern sich in modulare Systeme und flächige Konstruktionen. Hierbei kommen beispielsweise substrat-tragende Rinnensysteme, Textil-Substrat-Systeme oder die Direktbegrünung auf einer nährstofftragenden Wandschale in Frage [30]. Hierfür ist jedoch ein Schutz der Fassade gegen Feuchte und Durchwurzelung notwendig. Die fassadengebundene Begrünung ersetzt hierbei andere Materialien wie Faserzement, Glas oder Metallverkleidungen. Der konstruktive Aufwand ist deutlich höher als bei der bodengebundenen Fassade und hat gleichzeitig Einfluss auf die Gebäudekonstruktion. Auf der Kubatur des Gebäudes muss eine Unterkonstruktion anbringbar sein, die die Pflanzentröge halten kann. Der Kennwert basiert auf der linearen Bindungsrate von 0,913 kg CO₂ pro Quadratmeter [31]. Die CO₂-Gesamtbindung der fassadengebundenen Begrünung bildet sich aus der Multiplikation mit der Nutzungsphase (50a). Aufgrund der Flächenwirkung und

Wuchsdichte der Pflanze Parthenocissus Quinquefolia wird angenommen, dass sie in der Trockenmasse einer fassadengebundenen Begrünung entspricht. Der Kennwert und ist in Abbildung 21 dargestellt.

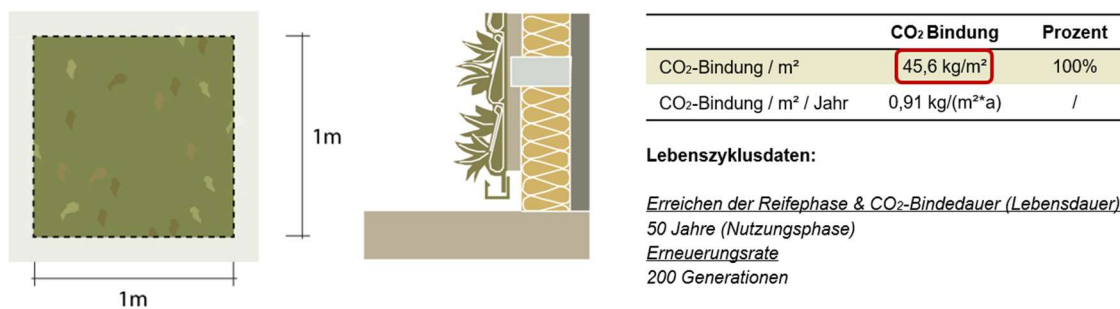


Abbildung 21: Kennwert der fassadengebundenen Begrünung (Bauwerksgebundene CO₂-Kompensation)

Die bodengebundene Fassadenbegrünung findet hingegen an einer fertigen Außenwand statt. Die Pflanze wird durch die direkte Verbindung zum Boden mit Wasser und Nährstoffen versorgt. Die Pflanzen untergliedern sich hierbei in Kletterpflanzen, die entweder durch Kletterhilfe oder eigenständig („Selbstklimmer“) an der Fassade entlang wachsen emporklimmen. Die selbstklimmenden Pflanzen sind beispielsweise der Wurzelkletterer und der Haftscheibenranker [31]. Diese klettern ohne Kletterhilfe und erreichen ihre Flächenwirkung nach 5-20 Jahren [31]. Die Schlinger, Spreizklimmer und spalierbaren Gehölze benötigen eine Kletterhilfe und erreichen ihre Flächenwirkung nach 3-12 Jahren [31]. Analog zur fassadengebundenen Begrünung wird die lineare Bindungsrate mit der Nutzungsphase (50a) multipliziert. Die zugrundeliegende Pflanzenart ist die Parthenocissus Tricuspidata, die zu den Weinrebengehäusen gehört [41]. Die lineare Bindungsrate beträgt hierbei 0,183 kg CO₂ [31]. Der Kennwert entspricht somit 9,15kg gebundenem CO₂ pro Quadratmeter. Aufgrund der beschränkten Wuchshöhe und der geringeren Trockenmasse bindet die bodengebundene Fassadenbegrünung deutlich weniger CO₂ als die fassadengebundene Begrünung.

Der entsprechende Kennwert der bodengebundenen Fassadenbegrünung ist in Abbildung 22 ersichtlich.

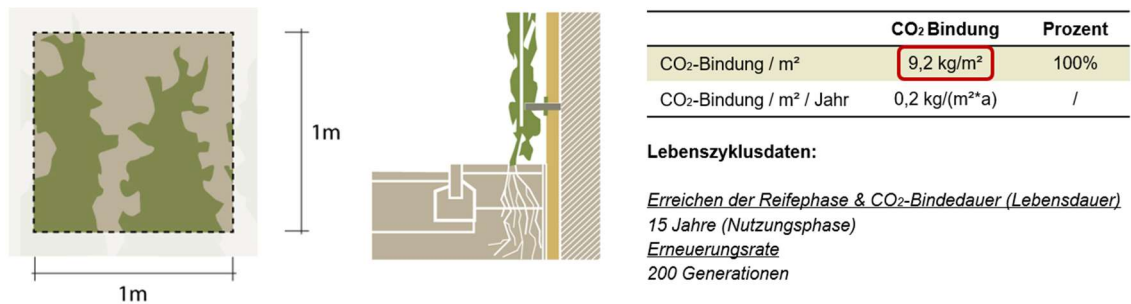


Abbildung 22: Kennwert der bodengebundenen Fassadenbegrünung (Bauwerksbezogene CO₂-Kompensation)

3.5.5. Kennwertbildung der Hecken als CO₂-Kompensationsmaßnahme durch Naturflächen

Die Naturflächen sind aus Freiflächen und Teilen von Ökosystemen aufgebaut, die CO₂ sowohl im Erdreich als auch in der überirdischen Vegetation gespeichert haben. Die Bezugseinheit ist hierbei der Quadratmeter, der mit der CO₂-Gesamtspeicherung verknüpft wird. Wie bereits in der Methodik erläutert haben zahlreiche Untergründe bereits CO₂ gespeichert. Für die korrekte Bilanzierung werden Korrekturfaktoren eingeführt.

Die Hecke ist als eine bewirtschaftete, lineare Struktur definiert, die aus mehrjährigen Sträuchern oder einer Kombination aus Bäumen und Sträuchern besteht und zumeist an landwirtschaftlich genutzte Flächen angrenzt [33]. Sie kann jedoch auch zur Freiflächengestaltung in einem Quartier genutzt werden. Die Datengrundlage des Kennwerts bilden die Ergebnisse des Projektes „CarbonHedge“, das die Kohlenstoffspeicherung von 64 Hecken untersucht hat. Die grundlegende Annahme in den Naturflächen ist, dass sie auf einer versiegelten Fläche angelegt werden. Der Kennwert besteht somit in dem gesamten, gebundenen CO₂ pro Quadratmeter der Hecke. Der gebundene Kohlenstoff der Hecke beträgt 163kg/m² [32]. Durch die Multiplikation errechnet sich ein Wert von 598 kg gebundenem CO₂ pro Quadratmeter einer Hecke [32].

In einem Quartiersprojekt werden Hecken oft auf Grünflächen angelegt. Somit ist nur in der Trockenmasse der Heckengewächse CO₂ neu gebunden. Um den notwendigen Korrekturfaktor zu berechnen wird die Differenz aus dem gespeicherten Kohlenstoff einer Hecke (163 kg/m²) [32] und eines Ackers (59 kg/m²) [32] gebildet und mit dem Faktor 3,67 multipliziert. Hieraus errechnet sich ein Wert von 381kg gebundenem CO₂

pro Quadratmeter einer Hecke. Somit wird bei einer Hecke auf einer bestehenden Grünfläche 217 kg CO₂ weniger pro Quadratmeter gebunden. Der Korrekturfaktor entspricht in diesem Fall 0,63. Für die Dauerhaftigkeit der Speicherung muss bewusst eine Freifläche gewählt werden, die über die Jahrhunderte bestehen kann. Die Heckenpflanzen wachsen bebauungsunabhängig nach weshalb die Lebensdauer für eine Hecke auf mindestens 500 Jahre angesetzt wird. Der Kennwert der Hecken ist in Abbildung 23 dargestellt.

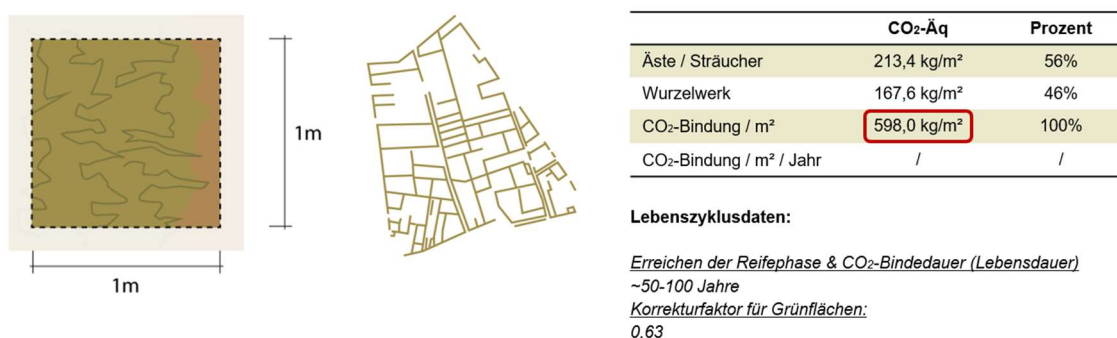


Abbildung 23: Kennwert der Hecken als CO₂-Kompensationsmaßnahme (Naturfläche)

In der Anwendung ist zu beachten, dass die Hecke die Funktion eines Biotopverbundelement erfüllt, das durch neuen Lebensraum für Tiere und Insekten die Biodiversität steigert. Des Weiteren wird im Sinne des Bodenschutzes die Belastung durch Düngemittel und Pestizide reduziert, wenn die Hecke an eine Ackerfläche angrenzt. Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch die energetische Nutzung der Heckenbiomasse als Brennholz. Dieses kann in Holzöfen zur Wärmebereitstellung genutzt werden [32].

3.5.6. Kennwertbildung der Moore als CO₂ – Kompensationsmaßnahmen durch Naturflächen

Die Moore zählen zu den effektivsten Kohlenstoffspeichern der Landlebensräume [34]. Im wassergesättigten Milieu werden abgestorbene Pflanzen und Organismen nicht vollständig zersetzt und es kommt zur Torfbildung [34]. Die Torfschicht am Boden des Moors wächst durch die Ablagerung des organischen Materials jedes Jahr um durchschnittlich 1mm [34]. Die CO₂-Bindung wird durch die Torfmoose gesteigert, die durch Wurzelreste CO₂ in den Torfschichten einlagern. Die CO₂-Speicherung kann sich hierbei über Jahrhunderte vollziehen [33].

Für das planerische Rahmenwerk wird der Kennwert als gesamt gebundenes CO₂ eines Quadratmeters eines Moors angesetzt. Hierfür liegen Messungen der bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft vor, die in einer maximalen Bodentiefe von 150cm Werte zwischen 600-800 Tonnen gebundenem Kohlenstoff pro Hektar ergeben haben [34]. Für den Quadratmeter errechnet sich durch die Multiplikation mit dem Faktor 3,67 eine gebundene CO₂-Menge von 2.202-2.936kg. Somit entspricht der Kennwert eines Moors einer Bindung von 2,57 Tonnen CO₂ pro Quadratmeter. Diese Gesamtbindung wird jedoch über einen Zeitraum von mehreren Jahrhunderten erreicht. Bei einer durchschnittlichen Wachstumsrate des Torfs von 1mm pro Jahr [33], entspricht dies einer linearen Bindungsrate von 1,7kg CO₂ pro Quadratmeter. Dies bedeutet, dass der Kennwert des Moors erst nach einem langen Zeitraum greift. In diesem Zusammenhang besteht eine weitere Strategie der Klimaneutralität in der Renaturierung von Mooren, die im Prozess der Austrocknung sind. Durch das Bewässern wird die Konservierung von organischer Masse (und CO₂) im Torf ermöglicht. Dieser Ansatz wird für das planerische Rahmenwerk jedoch nicht weiterverfolgt.

Für die Entstehung eines Moores müssen drei Bedingungen erfüllt sein. Erstens muss das Gebiet niederschlagsreich sein und es muss eine hohe Luftfeuchtigkeit geben [35]. Zweitens muss sich im Boden eine Schicht Wasser stauen können und die Produktion an Pflanzensubstanz muss deren Verluste durch Zersetzung übertreffen [35]. Die Eignung des Bodens für das Anlegen eines Moors lässt sich Moorbodenkarte für Bayern (MBK25) prüfen [36]. Drittens darf das Gebiet nicht übermäßig beschattet sein [35].

Unter den genannten Bedingungen lassen sich zur CO₂-Kompensation zwei Moorarten herstellen: die Hoch- und die Niedermoore [36]. Diese unterscheiden sich in der Bewässerungsart und des Höhenwachstums. Die Hochmoore haben keinen Kontakt mehr zum Grundwasser und werden nur noch durch Regenwasser ernährt. Der Name leitet sich von dem kontinuierlichen Höhenwachstum durch die Torfbildung ab [35]. Im Gegensatz dazu bilden sich die Niedermoore an einer kontinuierlichen Wasserquelle. Hierzu zählen beispielsweise, Flussniederungen, Mulden, Senken oder Hänge bei Quellaustritten [36]. Die Niedermoore entwickeln nicht dieselbe Höhenentwicklung wie die Hochmoore. Sie werden aber bis an die Oberfläche von nährstoffreichem Grund-, Quell- oder Sickerwasser durchsetzt [36].

Gemäß der Methodik wird der Korrekturfaktor und die Erneuerungsrate für die Moorfläche gebildet. Der Korrekturfaktor wird aus der Differenz der Kohlenstoffspeicherung zu einer Ackerfläche errechnet. Ein Acker hat gemäß den Ergebnissen des Projekts „CarbonHedge“ 216kg CO₂ gebunden [32]. Es ergibt sich somit ein Korrekturfaktor von 0,91. Als Lebensdauer wird ein Minimum von 1.000 Jahren angesetzt, da dieser Zeitraum zur vollständigen CO₂-Bindung entsprechend des Kennwerts notwendig ist. Hierbei muss ebenfalls beachtet werden, dass Moore von den Umweltbindungen abhängig sind. Hierzu zählt beispielsweise die aufgenommene Menge an Stickstoff. Eine durch die Landwirtschaft und den Autoverkehr bedingte Erhöhung des Stickstoffgehalts mindert die Aufnahmefähigkeit von CO₂ der Moore massiv [37]. Hierdurch kann es in einem gegenteiligen Effekt zur Freisetzung von CO₂ kommen. Die Moore lassen sich jedoch auch selbst landwirtschaftlich nutzen. So kann auf einem Moor Schilf für Reed-dächer gepflanzt werden, oder es können Photovoltaikmodule über dem Moor angebracht werden. Der resultierende Kennwert der Moore ist in Abbildung 24 dargestellt.

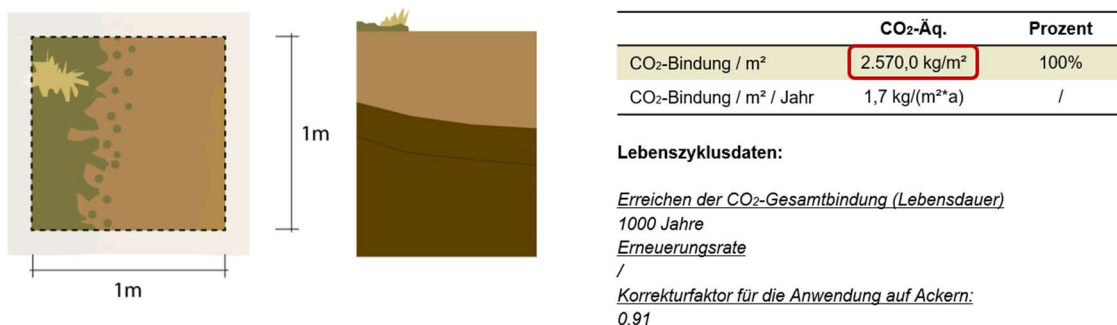


Abbildung 24: Kennwert der Moore als CO₂-Kompensationsmaßnahme (Naturfläche)

3.5.7. Kennwertbildung der Weideflächen als CO₂ - Kompensationsmaßnahmen durch Naturflächen

Landwirtschaftlich genutzte Flächen in Deutschland haben doppelt so viel CO₂ wie der Baumbestand der deutschen Wälder gespeichert [38]. Das CO₂ ist hierbei im Humus gespeichert, der (abgestorbene) pflanzliche und tierische Stoffe enthält. Das Weidevieh sorgt durch das Abkaufen der Pflanzen für einen zusätzlichen Wachstumsimpuls [39]. Dieser regt die Pflanzen und Wurzel zu weiterem Wachstum an, bei dem durch die Photosynthese weiteres CO₂ gebunden wird.

In der Kennwertbildung der Weideflächen wird davon ausgegangen, dass die CO₂-Speicherung des Bodens einer Weide der eines durchschnittlichen Ackers entspricht. Der Kennwert der Weide entspricht somit dem ermittelten Wert des Projektes „CarbonHedges“ von 217kg CO₂ pro Quadratmeter [32]. Der Korrekturfaktor wird für die Anwendung auf einer Moorfläche berechnet. Häufig werden Moorflächen als Dauergrünland für die Futtererzeugung trockengelegt. Hierbei tritt der gegenteilige Effekt zur CO₂-Speicherung ein. Für diesen Fall beträgt der Korrekturfaktor -10,9.

Der ermittelte Kennwert der Weideflächen und der Korrekturfaktor sind in Abbildung 25 dargestellt.

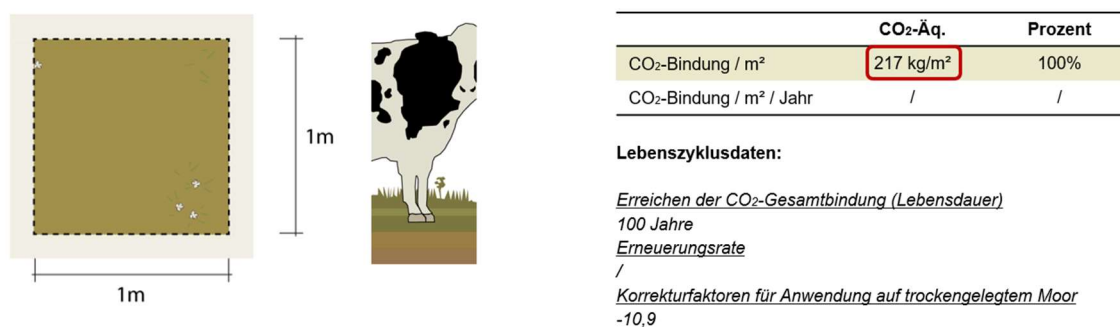


Abbildung 25: Kennwert der Weidefläche als CO₂-Kompensationsmaßnahme (Naturfläche)

3.5.8. Kennwertbildung des Waldbodens als CO₂ - Kompensationsmaßnahmen durch Naturflächen

Der Kennwert der Waldfläche dient als Ergänzung zur Renaturierung von Wäldern durch die Buche und die Tanne. Der Kohlenstoff liegt im Waldboden in karbonatischer Form (Gesteine) und organisch gebundener Form (Humus) vor [41]. Zu den Kohlenstoffspeichern des Waldbodens zählt ebenfalls das Totholz, das im Vergleich zum Humus nur kleine Mengen CO₂ speichert. Der Kennwert des Waldbodens besteht in der CO₂-Gesamtbindung eines Quadratmeters. Das bayerische Landesamt für Wald und Forstwirtschaft hat eine repräsentative Studie durchgeführt, die den Kohlenstoff von Braunerde (im Wald) bei 110 Tonnen pro Hektar angibt [34]. Hieraus errechnet sich eine CO₂-Gesamtbindung von 403 kg/m². Der Korrekturfaktor für die Anwendung auf einem Acker besteht in der Differenz der Böden. Während der Waldboden 403 kg CO₂-Äq./m² [34] speichert hat der Acker nur 217 kg CO₂-Äq./m² [32] gespeichert. Durch die Differenz in Höhe von 186 kg gebundenem CO₂ ergibt sich ein Korrekturfak-

tor von 0,46. Veränderungen des Kohlenstoffgehalts des Waldbodens sind nur schwer zu quantifizieren. Es wird daher für den Waldboden keine lineare Bindungsrate gebildet.

Der entsprechende Kennwert des Waldbodens und der Korrekturfaktor sind in Abbildung 26 ersichtlich.



Abbildung 26: Kennwertbildung der Waldböden als CO₂-Kompensationsmaßnahme (Naturfläche)

3.6. Vergleich ökologischer Kennwerte der CO₂-Kompensation

Die ökologischen Kompensationsmaßnahmen unterscheiden sich in der linearen CO₂-Bindungsrate und der Gesamtbindung des CO₂. Im Vergleich ist dies besonders im Hinblick auf den zeitlichen Abgleich der Klimawirksamkeit der Emissionen des Quartiers auf die Vegetation von Bedeutung. Ein Moor kann vergleichsweise große Mengen an CO₂ kompensieren, da es pro Quadratmeter eine hohe Bindungskapazität besitzt. Die Gesamtbindung wird jedoch durch eine geringfügige, jährliche Bindungsrate erreicht. Der Kennwert des Moors beginnt somit zu wirken, wenn die quartiersbezogenen Emissionen bereits anteilig durch natürliche Prozesse abgebaut wurden. Bäume erreichen den Kennwert hingegen mit durchschnittlich 100 Jahren schneller. Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Zerfallsphase bereits vor dem natürlichen Abbau des CO₂ in der Atmosphäre erreicht wird. Aus dem Vergleich der linearen Bindungsraten, der CO₂-Gesamtbindung und der Lebensdauer lässt sich folgern, dass die Maßnahmen durch den Planer so kombiniert werden müssen, dass die Emissionen des Quartiers zeitgenau ausgeglichen werden.

Die verschiedenen CO₂-Bindungsraten sind für die Anwendung der quartiers- und ortsungebundenen Kompensation entscheidend. Hier werden die Maßnahmen neben der Berücksichtigung der unterschiedliche Bindungskapazität pro Bezugseinheit unter dem Gesichtspunkt der Dauerhaftigkeit eingesetzt. Die quartiersgebundenen Maßnahmen wirken den Emissionen des Quartiers vergleichsweise schnell entgegen. Zu diesen Maßnahmen zählen die bauwerksgebundenen Maßnahmen, die Bäume und die Hecken. Gleichzeitig endet mit dem Rückbau des Quartiers und einhergehenden Änderungen der Freifläche die CO₂-Speicherung der Maßnahmen. Um diesen Aspekt in der Kompensation aufzugreifen muss entsprechend einer Risikoanalyse in den ortsungebundenen Maßnahmen ein Puffer eingeplant werden, der die freigesetzte CO₂-Menge aufnehmen kann. Die ortsungebundenen Kompensationsmaßnahmen sind in der Dauerhaftigkeit weniger beschränkt, da die Lebensdauer weder von der Nutzungsphase des Gebäudes oder sich ändernden Freiflächen des Quartiers betroffen sind. So kann der Fortbestand eines renaturierten Waldes oder eines renaturierten Biotops, in dem ein Moor angelegt wurde, als Naturschutzfläche definiert werden. Dies sichert die Dauerhaftigkeit auch rechtlich ab. Ein Überblick über die unterschiedliche CO₂-Bindungskapazität der Maßnahmen ist in Abbildung 27 dargestellt.

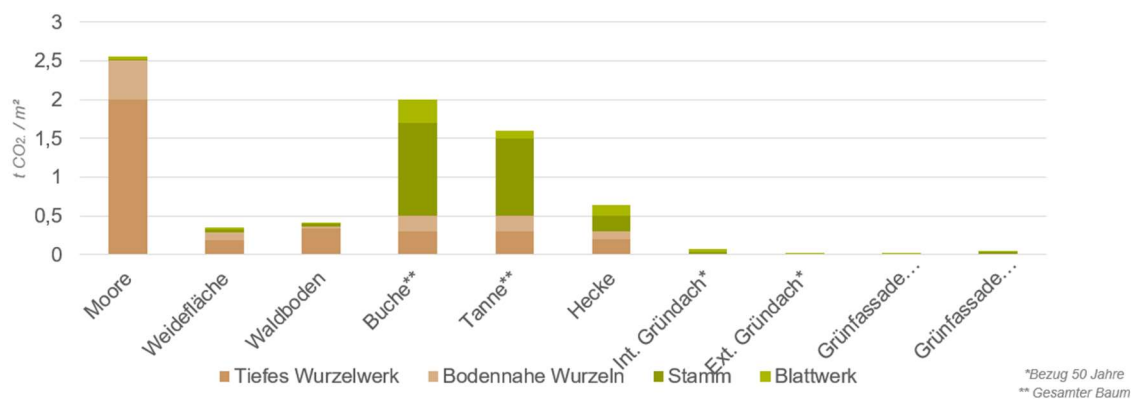


Abbildung 27: Übersicht der CO₂-Speicherungskapazität der Kompensationsmaßnahmen

Neben dem Aspekt der Dauerhaftigkeit weisen die Maßnahmen individuelle, zusätzliche Qualitäten auf. Im Vergleich der Maßnahmen wird ersichtlich, dass die ökologischen Kompensationsmaßnahmen sowohl oberirdisch, unterirdisch und bauwerksgebunden in Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zueinander treten. Die Kategorien der zusätzlichen Wirkungen, die hierdurch entstehen, betreffen neben der Biodiversität und der bauklimatischen Aspekte die Aufenthalts- und Lebensqualität des Quartiers. Dies wird in Kapitel 5 ausführlicher diskutiert.

4. Anwendung auf den Campus für „Life-Sciences“ der Max-Planck-Gesellschaft in Martinsried

In diesem Kapitel wird die Anwendung des planerischen Rahmenwerks auf den Campus für „Life Science“ der MPG vorgestellt. Zukünftig wird der Campus für „Life Sciences“ durch die Institute für Biochemie und Biologische Intelligenz genutzt. Ein zentrales Element der Forschung besteht hierbei im maschinellen Lernen (engl. Machine learning), durch das Wissen automatisch durch die Analyse von großen Daten generiert werden soll. Durch die hieraus erlangten Rückschlüsse über die Funktionen biologischer Systeme und deren molekularer Eigenschaften sollen individuelle Medikamente zur Behandlung von Patienten entwickelt werden [42]. Für die Nutzungen folgt hieraus, dass die elementaren Bestandteile des Campus in der Forschungsfläche, dem Tierhaus (für Versuchstiere) und dem Serverzentrum bestehen.

Zielsetzung des Quartierskonzepts ist die Klimaneutralität des gesamten Campus, welche anhand der Anwendung des planerischen Rahmenwerks auf eines der modularen Forschungsgebäudes erprobt wird. Die resultierende Menge an ökologischen Kompensationsmaßnahmen und die Fläche für die klimaneutrale Energieversorgung dienen als Grundlage für die weiterführende städtebauliche Quartiersplanung. Die Lebenszyklusanalyse des zugrunde liegende Laborgebäudes entstammt hierbei dem Forschungsprojekt des Lehrstuhls für Energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen (TUM) und der MPG. Der Flächen- und Nutzungsbedarf wurde durch das Projektteam der MPG ermittelt.

Die Anwendung erfolgt der in der Methodik beschriebenen Arbeitsschritte. Zu Beginn erfolgt eine Größeneinordnung anhand der Bestandszähler, der durch die Zählerstände des Tierhauses abgeglichen wird. Die Rückschlüsse werden in Bezug zu der Auswertung des Flächenbedarfs gesetzt. Im Anschluss findet die Integration der klimaneutralen Versorgungsmaßnahmen in das Energiekonzept statt. Hierfür werden die Kennwerte der klimaneutralen Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt. Im finalen Schritt werden die verbleibenden Emissionen durch die Vegetationsarten ausgeglichen. Hierfür werden zuerst die quartiersgebundenen Maßnahmen geprüft und im Anschluss eine Strategie für die ortsungebundenen Maßnahmen entwickelt.

4.1. Größeneinordnung der bestehenden Bebauung in Martinsried

Der Campus für „Life-Sciences“ gleicht in der Bruttogeschosfläche und in den Nutzungen der bestehenden Bebauung. Aus diesem Grund findet für die Größeneinordnung des zukünftigen Quartiers eine Auswertung der Zähler statt. Der Energieverbrauch gliedert sich hierbei in Strom-, Wärme-, Gas- und Wasserverbrauch. Der Verbrauch im Jahresverlauf für drei Referenzjahre (2020-2022) lässt Rückschlüsse auf die spezifische Energienutzung zu. Der Gesamtverbrauch und der Jahresverlauf sind in Abbildung 28 ersichtlich.

Jährlicher Energie-Verbrauch: Bestands-Campus (Gesamt)

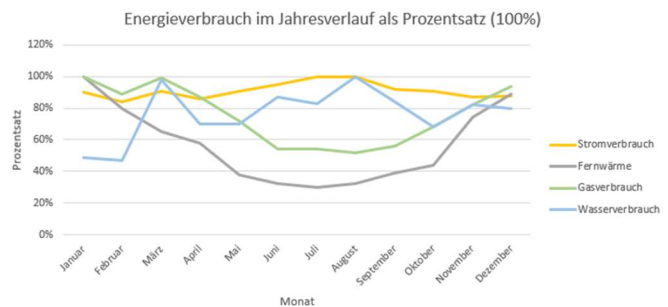
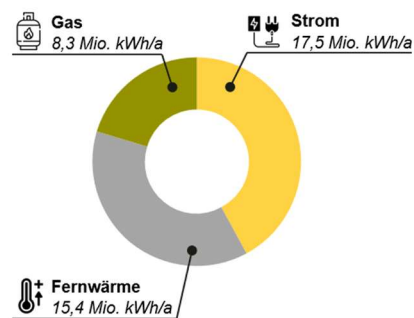


Abbildung 28: Endenergieverbrauch 2022 (gesamt und im gemittelten Jahresverlauf der Jahre 2020-2022) der Bestandsbebauung in Martinsried

Die Auswertung des Jahresverlaufs der Zähler macht das charakteristische Verbrauchsprofil des Fernwärmebedarfs über die Heizperiode ersichtlich. Der Strombedarf steigt lediglich in den Sommermonaten geringfügig an. Dies wird durch die Kühlung mit elektrischer Energie erklärt. Der Wasserverbrauch ist hingegen von den Jahreszeiten unabhängig und an erster Stelle von den spezifischen Nutzungen der Institute abhängig. Der Gasverbrauch wird zu 100% für das Tierhaus benötigt und ist mit der Nutzung für Forschungszwecke verknüpft.

Für eine präzisere Einordnung werden die Zähler des gesamten Campus mit dem des Tierhauses abgeglichen. Dieses wird durch das Institut für biologische Intelligenz genutzt und dient der Haltung von Tieren, die zu Forschungszwecken benötigt werden. In der Geschosfläche des Campus macht es einen Anteil von 10% aus. Der Anteil des Tierhauses am Energieverbrauch des gesamten Campus ist in Abbildung 29 ersichtlich.

Jährlicher Energie-Verbrauch:
Tierhaus (2020-2022)

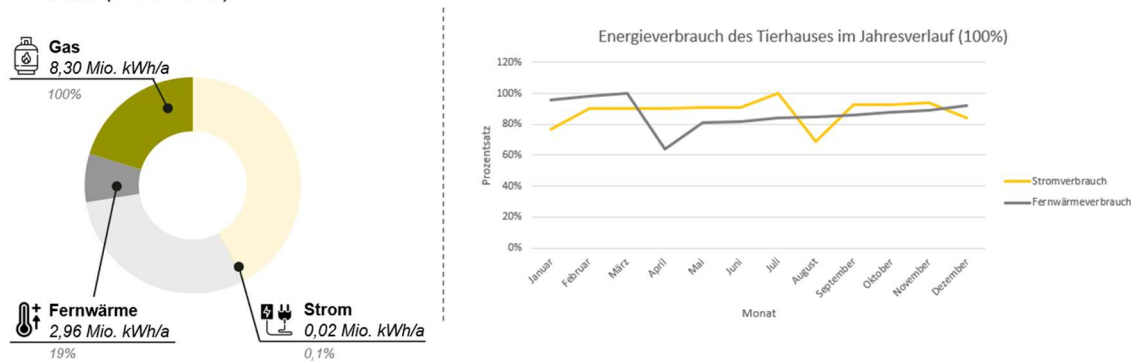


Abbildung 29: Auswertung der Zählerstände des Tierhauses (Biologische Intelligenz) des Jahres 2022 (gemittelter Jahresverlauf für die Jahre 2020-2022)

Durch den Abgleich der Zählerstände wird ersichtlich, dass der Bedarf des Tierhauses an Strom deutlich unter dem durchschnittlichen Verbrauch liegt. Bei einer BGF von 95.375m² liegt der durchschnittliche Stromverbrauch des gesamten Campus bei 183 kWh/m² pro Jahr. Der Stromverbrauch des Tierhauses (mit einer BGF von 9.679m²) liegt hingegen bei 17,5 kWh/m² pro Jahr. Während sowohl das Tierhaus als auch der Campus einen Grundbedarf an Strom benötigen erklärt sich die erhebliche Abweichung durch den hohen Energieverbrauch der Server der Max-Planck-Gesellschaft. Der Fernwärmebedarf entspricht hingegen dem prozentualen Anteil der Fläche des Campus. Der Gasverbrauch des Tierhauses, der ausschließlich auf dieses entfällt, erklärt sich durch die spezifischen Forschungszwecke der Institute.

Für dem Campus lassen sich anhand der Zählerauswertung drei Schlussfolgerungen ziehen. Erstens wird ersichtlich, dass der jährliche Verbrauch an Fernwärme dem charakteristischen Bedarfsprofil von Wohnbauten und Bürogebäuden entspricht. Die zweite Schlussfolgerung besteht in dem besonderen Fokus, der auf der Versorgung mit großen Mengen klimaneutralem Strom für den Campus liegen muss. Der hohe Stromverbrauch lässt sich durch den hohen Bedarf der Server für das maschinelle Lernen erklären. Einhergehend ist ein hoher Bedarf an elektrischer Energie zur Kühlung der Server anzunehmen. Die dritte Schlussfolgerung besteht in der Nutzerabhängigkeit des Wasser- und Gasverbrauchs. Die jährlichen Schwankungen lassen sich durch die spezifische Büro- und Forschungsnutzung des Campus erklären (Desinfektion des Geschirrs, Spülen in Kaffeeküchen etc.). Diese Schlussfolgerungen sind besonders mit Blick auf die Modellierung des Energiesystems entscheidend. Im nächsten Abschnitt wird das Raumprogramm des Campus für „Life-Sciences“ vorgestellt.

4.1.1. Raumbedarf und Nutzungsverteilung des Campus für „Life Sciences“ in Martinsried

Die Flächennutzung ist für den Energiebedarf des Quartiers entscheidend und bestimmt die Dimensionierung des Energiesystems anhand der Kennwerte daher maßgebend. Das Raumprogramm, die Brutto- und die Nettogrundfläche des Campus für „Life Sciences“ sind in Abbildung 30 dargestellt.



Abbildung 30: Raumbedarfsplan des Campus für „Life-Sciences“ in Martinsried

Der größte Flächenbedarf des Forschungscampus besteht mit 58% aus Labornutzungen, die aus modularen Laboren und zentrale wissenschaftliche Einrichtungen bestehen. Eine weitere, große Nutzung besteht zukünftig mit 10% des Raumbedarfs im Tierhaus, das für das Institut für biologische Intelligenz von Relevanz ist. Da der Raumbedarf an Laboren deutlich überwiegt, hat im Forschungsprojekt für ein modulares Labor eine Simulation des Energiebedarfs und eine Lebenszyklusanalyse eines Laborgebäudes stattgefunden. Wie Eingangs erläutert liegen die Forschungsergebnisse des untersuchten Laborgebäudes der Anwendung des planerischen Rahmenwerks zugrunde.

4.1.2. Rahmenbedingungen der Simulation des modularen Laborgebäudes des Campus für „Life Sciences“

Das simulierte, modulare Laborgebäude des Forschungscampus hat eine Bruttogeschossfläche von 9.650m² und besteht aus einer viergeschossigen Bauweise. Für den Endenergiebedarf wurde der jährliche Verbrauch an Strom und Fernwärme ermittelt. Im Folgenden werden die Rahmenbedingungen der Simulation erläutert. Für die Be-

rechnung der Emissionen, die durch den Energieverbrauch entstehen, wurde ein Emissionsfaktor von 0,589 kg CO₂/kWh für Strom und 0,242 kg CO₂/kWh für Fernwärme angenommen. Die Nutzungsphase entspricht hierbei 50 Jahren. Für die Berechnung der Emissionen der Baukonstruktion wurden Bauteilaufbauten für vier Konstruktionsarten erstellt. Zu diesen zählt die Basis-, die Stahlbeton-, die Holz- und die Ziegelbauweise. Der Aufbau des Innenausbaus und der Geschossdecken der Basisvariante sind in Abbildung 31 ersichtlich.

Geschossdecke Technik	Dicke [mm]	Lebensdauer [a]	Innenwand (tragend)	Dicke [mm]	Lebensdauer [a]
Epoxid Pulverlack	5	15	Kalkputzmörtel	20	50
Zementestrich	70	50	Beton (C30/37)	240	50
Beton (C30/37)	300	50	Kalkputzmörtel	20	50

U-Wert: 1,88W/(m²K)

Geschossdecke Büro	Dicke [mm]	Lebensdauer [a]	Geschossdecke Büro	Dicke [mm]	Lebensdauer [a]
Gummi-Bodenbelag profiliert EN 12199	5	20	Gummi-Bodenbelag profiliert EN 12199	5	20
Zementestrich	70	50	Zementestrich	60	50
Beton (C30/37)	300	50	Beton (C30/37)	300	50

U-Wert: 1,88W/(m²K)

U-Wert: 2,86W/(m²K)

U-Wert: 1,91W/(m²K)

Abbildung 31: Bauteilaufbau des Innenausbaus und der Geschossdecken des Laborgebäudes

Die Bauteilaufbauten der thermischen Hülle und die Schichten der Bodenplatte des Laborgebäudes sind in Abbildung 32 dargestellt. Der durchschnittlichen U-Wert der Gebäudehülle von 0,23 W/m²K entspricht hierbei bereits höchsten energetischen Standards.

Außenwand	Dicke [mm]	Lebensdauer [a]	Dach	Dicke [mm]	Lebensdauer [a]
Gipsputz (Gips-Kalk-Putz)	20	50	Beton (C30/37)	300	50
Beton (C30/37)	250	50	Dampfbremse PA	5	40
Mineralwolle	140	50	Mineralwolle-Dämmstoff	160	40
eLCA Luftschicht	50	100	Gummi-Bodenbelag profiliert EN 12199	6	30
Aluminiumprofil beschichtet	3	50	TPO/FPO Dach- und Dichtungsbahn	3	30
			Kies 16/32	100	30

U-Wert: 0,22W/(m²K)

Bodenplatte	Dicke [mm]	Lebensdauer [a]
Zementestrich	50	50
Bitumenbahn	5	50
Beton (C30/37)	300	50
XPS Dämmung	100	50
Sauberkeitsschicht	100	50

U-Wert: 0,29W/(m²K)

U-Wert: 0,20W/(m²K)

Abbildung 32: Bauteilaufbau der thermischen Hüllfläche des Laborgebäudes

4.2. Auswertung der Ergebnisse der IDA ICE Simulation und der Lebenszyklusanalyse des Laborgebäudes

Die Simulation und die Lebenszyklusanalyse eines modularen Laborgebäudes entstammen dem Forschungsprojekt zwischen dem Lehrstuhl für Energieeffizientes Planen und Bauen (TUM) und der MPG. Diese wurden durch das Forschungsteam erarbeitet. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulation und der Lebenszyklusanalyse der Baukonstruktion erläutert, die auf Grundlage der Emissionsfaktoren und der geschilderten Bauteilaufbauten ermittelt wurden. Bei der Baukonstruktion entfallen in der Basisvariante 59% der Emissionen auf die Herstellung der Materialien. Weitere 15% entfallen auf den Austausch, 5% auf die Entsorgung und 21% auf die technische Gebäudeausrüstung (TGA). Besonders fällt im Vergleich der Konstruktionsarten auf, dass sich durch die Verwendung von Holz die Emissionen zwar um 26,7% senken lassen, die Baukonstruktion dennoch nicht klimaneutral ist. Die Ergebnisse der LCA der Baukonstruktion sind in Abbildung 33 dargestellt.

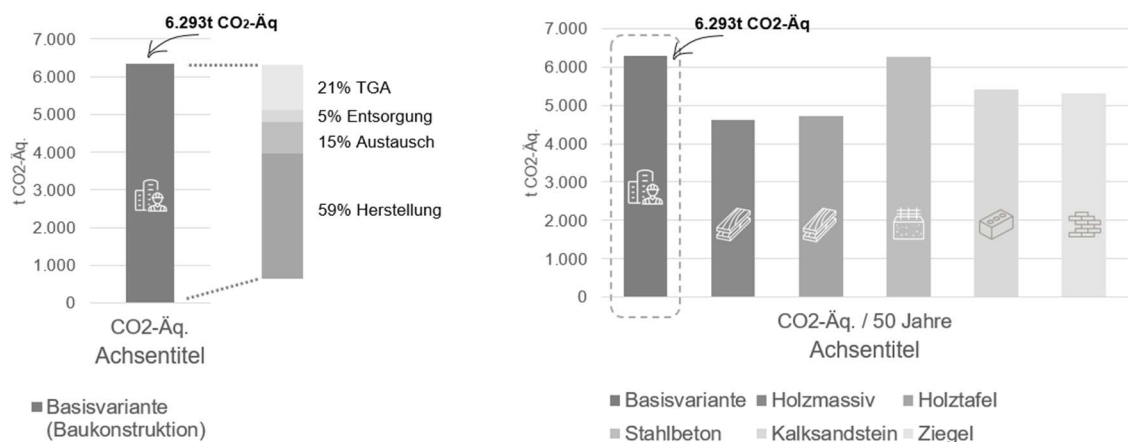


Abbildung 33: LCA-Ergebnis der Baukonstruktion in Tonnen CO₂-Äquivalenten

Der Energiebedarf, aus dem sich die Emissionen der Nutzungsphase ableiten, gliedert sich in die Strom- und Wärmeversorgung. Der größte Stromverbrauch entfällt mit 29% des jährlichen Strombedarfs auf die Server. Daneben stellen die Hilfsenergie der TGA (14%) und die elektrischen Arbeitshilfen (16%) einen entscheidenden Anteil des Energiebedarfs dar. Dies enthält beispielsweise den Strom, der in den Laboren aus der Steckdose bezogen wird und den Strom, der für Pumpen und Ventilatoren der Lüftungsanlage benötigt wird. Zusammengenommen macht dies knapp 60% des gesamten Stromverbrauchs aus. Der Fernwärmebedarf entspricht mit 9,8 kWh/m²/a der Energieeffizienzklasse eines kW-Effizienzhaus 40 und fällt deutlich geringer als der

Endenergiebedarf an Strom aus. Die aus dem Energiebedarf entstehenden Emissionen werden über die Nutzungsphase des Laborgebäudes (50 Jahre) als CO₂-Äquivalente ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 für den Strombedarf und in Tabelle 11 für den Wärmebedarf aufgelistet.

Tabelle 10: LCA-Ergebnis der Strombedarfs eines modularen Laborgebäudes

Energiebedarf Strom	Endenergie [kWh/a]	Endenergie [kWh/50a]	Emissionsfaktor [kg CO₂-Äq./kWh]	CO₂ [kg]
Beleuchtung	122.616	6.130.800	0,589	3.613.494
Kühlung	369.684	18.484.200	0,589	10.894.587
Hilfsenergie TGA	727.544	36.377.200	0,589	21.440.722
Elektr. Arbeitshilfen	493.436	24.671.800	0,589	14.541.559
Strombedarf Server	876.000	43.800.000	0,589	25.815.720
Trinkwarmwasser	44.240	2.212.000	0,589	1.303.753
<i>Summe</i>	<i>2.633.520</i>	<i>131.676.000</i>	<i>0,589</i>	<i>77.609.834</i>

Tabelle 11: LCA-Ergebnis des Fernwärmebedarfs eines modularen Laborgebäudes

Energiebedarf Heizung	Endenergie [kWh/a]	Endenergie [kWh/50a]	Emissionsfaktor [kg CO₂-Äq./kWh]	CO₂ [kg]
Fernwärme	941.156	47.057.800	0,242	11.632.688
<i>Summe</i>	<i>941.156</i>	<i>47.057.800</i>	<i>0,242</i>	<i>11.632.688</i>

Hierbei wird ersichtlich, dass die Emissionen der Stromversorgung mit 77.609.834t CO₂-Äquivalenten fast dem Siebenfachen der Emissionen der Wärmeversorgung entsprechen. Die Gegenüberstellung der Emissionen der Baukonstruktion und die der Energieversorgung (Abb. 34, linke Grafik) zeigt die erhebliche Differenz.

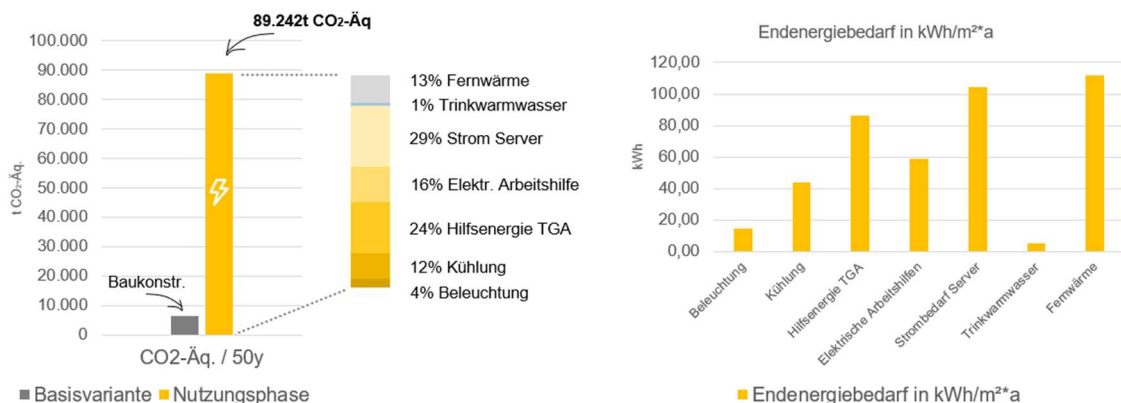


Abbildung 34: Emissionen der Nutzungsphase (50a) und spezifischer jährlicher Energiebedarf

Die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse verdeutlichen mit Blick auf die Klimaneutralität drei zentrale Aspekte. Erstens überwiegen die Emissionen des Strombedarfs über den Wärmebedarf deutlich. Dies liegt einerseits an der Tatsache, dass sich der Bedarf an Strom im Gegensatz zur Wärme nicht durch bauliche Maßnahmen weiter reduzieren lässt. Aufgrund des maschinellen Lernens wird durch den Serverbetrieb in dem Forschungsgebäude auch zukünftig viel Strom benötigt werden. Zweitens verdeutlichen die Ergebnisse die Bedeutung der Emissionsfaktoren. Durch den abweichenden Anteil erneuerbarer Energien in der Strom- und Wärmeversorgung erzeugt ein (hypothetisch) gleich großer Bedarf an Endenergie unterschiedlich hohe Emissionsmengen. Drittens wird ersichtlich, dass die Baukonstruktion aus Sicht der Klimaneutralität eine untergeordnete Rolle spielt. Hieraus lässt sich folgern, dass die Energieversorgung des Laborgebäudes eine entscheidende Rolle einnimmt.

Für die CO₂-Reduktion durch die klimaneutrale Energieversorgung ist die Modellierung der Lastgänge des Stroms und der Wärme im Tagesverlauf notwendig. Wie eingangs bereits erläutert müssen die Erträge der Maßnahmen den entsprechenden Lastgang lückenlos decken. Für das Laborgebäude wurden die Lastgänge aus dem ermittelten jährlichen Energiebedarf modelliert. Für den Wärmebedarf wurde auf Grundlage der Bestandszähler angenommen, dass 15% der jährlichen Wärmeenergie im Januar benötigt wird. Zur Modellierung des Tagesverlaufs wurde als Referenz ein Wärmebedarfsprofil für Bürogebäude zugrunde gelegt. Dieses befindet sich im Anhang unter Kapitel 4.4. Der tägliche Strombedarf besteht in einer Grundlast, die sich aus Servern und der TGA-Hilfsenergie zusammensetzt. Die weiteren Verbrauchskategorien fallen über den Tag verteilt an. Die Lastgänge des Laborgebäudes für einen Januartag sind in Abbildung 35 dargestellt und im Anhang in Tabelle 17 zu finden.

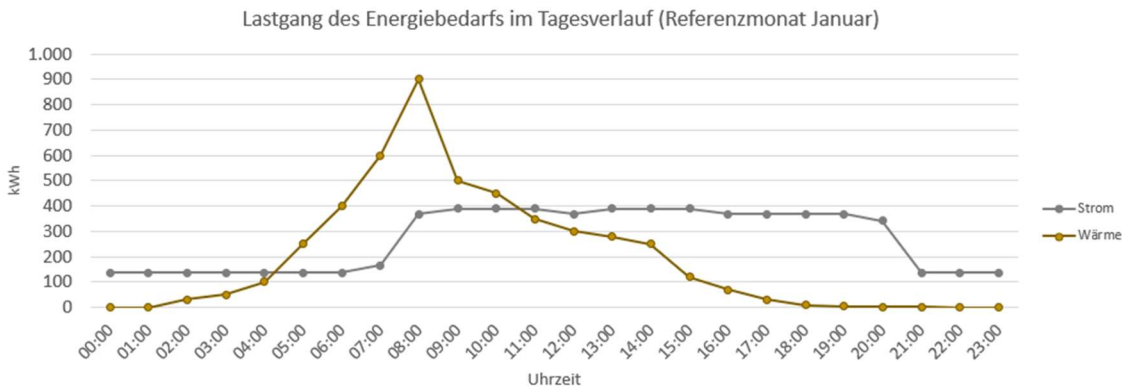


Abbildung 35: Lastgang des Laborgebäudes im Tagesverlauf (Strom- und Wärmebedarf)

Im Rahmen der klimaneutralen Quartiersentwicklung sollen die Maßnahmen des planerischen Rahmenwerks auf dem Campus in Martinsried Anwendung finden. Hierfür müssen die Verfügbarkeit und Größe der Freiflächen und der Gebäudehülle geprüft werden. Anschließend werden auf Grundlage der Flächen die Energieversorgung und die ökologische Kompensation durch ortsgebundene Maßnahmen separat geprüft. Final wird aus der Kombination durch ortsgebundene Maßnahmen die Klimaneutralität des Laborgebäudes untersucht.

4.2.1. Flächenverfügbarkeit für die Anwendung des planerischen Rahmenwerks

Die verfügbare Freifläche des Campus in Martinsried wurde auf Grundlage der Grundstücksgrenzen des Bayernatlas ermittelt. Abzüglich des Laborgebäudes stehen 154.224,5 m² an Freifläche für die Maßnahmen der klimaneutralen Energieversorgung und für die CO₂ - Kompensationsmaßnahmen zur Verfügung. Für das Laborgebäude wird von der Oberkante des Fertigfußbodens bis zur Oberkante des darüberliegenden Geschosses eine Höhe von 3,5 Metern bei einer 4-geschossigen Bauweise angenommen. Für die Breite des Laborgebäudes werden 24 Metern angenommen. Diese setzt sich aus einer Fluchtwegbreite von 2,2 Metern und einer Rauntiefe von jeweils 10,9 Metern zusammen. Somit stehen durch das Laborgebäude 2.412,5 m² Dachfläche und eine Fassadenfläche von 3.475,5 m² zur Verfügung. Die verfügbare Fläche ist in Abbildung 36 dargestellt.

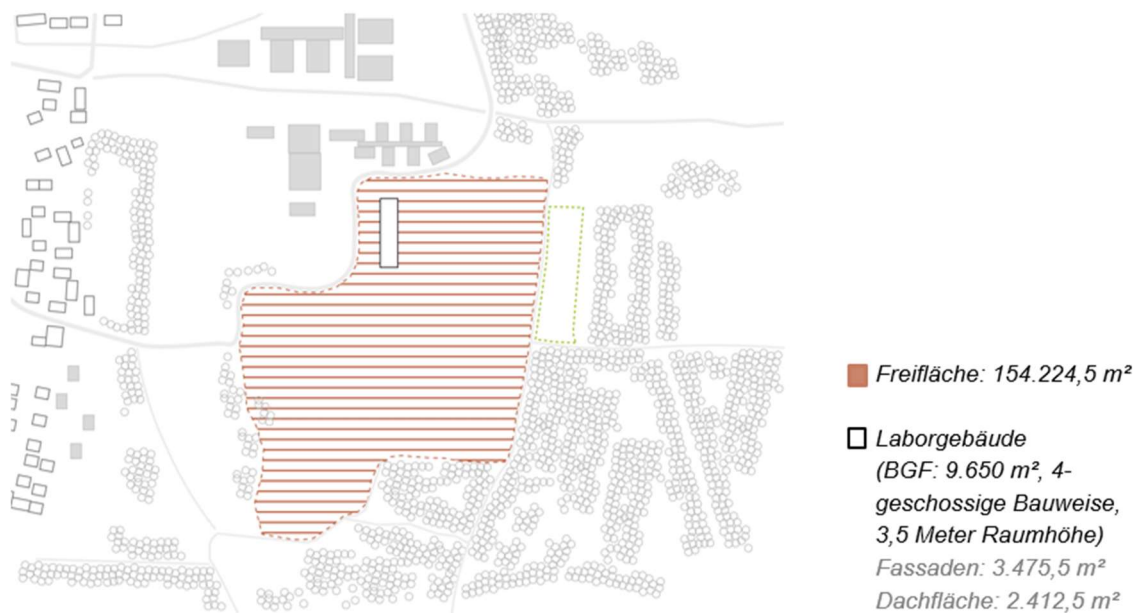


Abbildung 36: Verfügbare Freifläche und Hüllfläche des Laborgebäudes (Grundstück Martinsried)

4.3. Anwendung der Kennwerte der klimaneutralen Energieversorgung auf das Laborgebäude

Im Folgenden wird die klimaneutrale Energieversorgung anhand der Kennwerte für die Strom- und Wärmeversorgung untersucht. Wie bereits in der Methodik erläutert, wird hierfür aus dem Jahresbedarf an Energie die Menge (beziehungsweise Stückzahl) der Maßnahme ermittelt. Anschließend wird die Anbringung der Maßnahme auf dem Laborgebäude und auf der Freifläche geprüft. In einem finalen Schritt findet ein Abgleich des Ertrags und des Lastgangs im Tagesverlauf statt. Hierfür wird der modellierte Lastgang des Januartags verwendet.

4.3.1. Anwendung des Kennwerts der Photovoltaik auf den Strombedarf

Die Deckung des jährlichen Energiebedarfs wird durch die Photovoltaik als Einzelmaßnahme untersucht. Hierfür müssen die Photovoltaikmodule den Strombedarf des Laborgebäudes von 2.348.154 kWh pro Jahr decken. Die Module sollen hierbei in einem 35°-Winkel in Ausrichtung nach Süden neben dem Gebäude aufgestellt werden.

Gemäß dem Kennwert entspricht der Strombedarf einer Modulfläche von 11.129 m². Im nächsten Schritt wird die Deckung des Lastgangs im Tagesverlauf geprüft. In dem modellierten Januartag werden insgesamt 6433,3 kWh Strom pro Tag benötigt. Gemäß dem Beiblatt beträgt der Ertrag der PV-Anlage im Januar aufgrund der kürzeren Dauer und Intensität der Sonneneinstrahlung 3,3% des jährlichen Ertrags [43]. Dies entspricht einem durchschnittlichen Ertrag von 2.499,64 kWh Strom pro Tag, der zwischen 04:00 Uhr morgens und 22:00 Uhr abends erbracht wird. Abbildung 37 zeigt die Deckung des Strombedarfs durch den Ertrag im Januar.

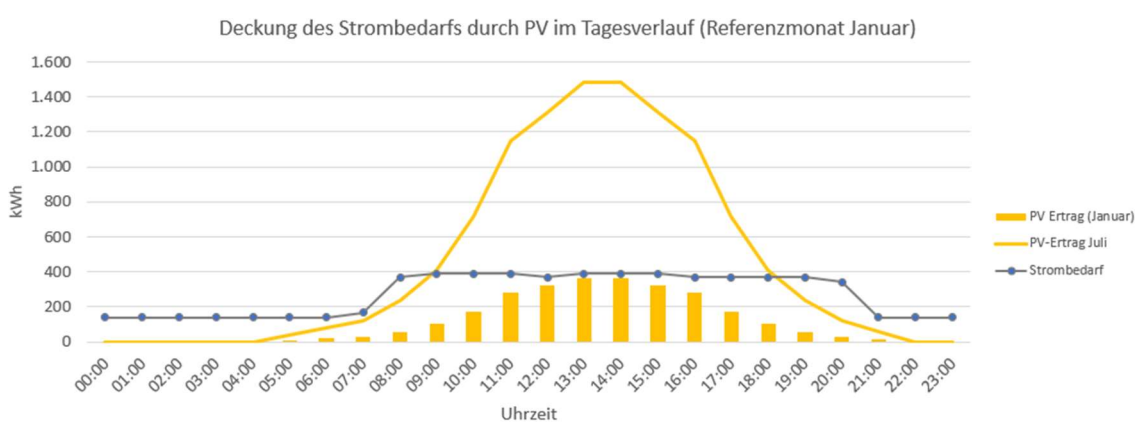


Abbildung 37: Deckung des Strombedarfs durch die Photovoltaik (35°-Winkel, Südausrichtung) im Januartag

Hierbei wird ersichtlich, dass die Photovoltaik während eines Januartags den Strombedarf insgesamt zu 40% klimaneutral decken kann. Im Hochsommer (Juli) entsteht durch die Photovoltaik hingegen ein Überschuss in Höhe von 64% an elektrischer Energie. Der Januarertrag entspricht somit knapp einem Viertel des Juliertrags. In der Anwendung als Einzelmaßnahme werden die Versorgungslücken ersichtlich. Diese bestehen einerseits nachts, da die Photovoltaik durch die Leistungsspitze gegen 12:00 den Bedarf tagsüber (anteilig) abdeckt. Des Weiteren entstehen durch den Strombedarf zu Tagesbeginn und um die Dämmerungszeit Versorgungslücken.

Lässt sich der Strombedarf des Januartags jedoch durch die Kombination der Kennwerte lückenlos decken? Um dies zu beantworten wird die Photovoltaik mit der Windenergie kombiniert. Hierbei wird Strombedarf zu 60% durch die Photovoltaik und 40% durch die Windräder gedeckt. Hieraus folgt, dass die Windräder 939.261 kWh/a erzeugen müssen. Dies wird entsprechend der Kennwerte durch 116 Windräder mit einer Nennleistung von 5.000 W gedeckt. In der Anwendung auf den Lastgang des Januartags wird von einem Wind ausgegangen, der von 22:00 Uhr des Vorabends bis 3:00 Uhr morgens mit einer Windgeschwindigkeit von 15m/s weht. Die Windräder ar-

beiten somit in diesem Zeitraum auf Nenngeschwindigkeit. Die Kombination der Erträge ist in Abbildung 38 ersichtlich.

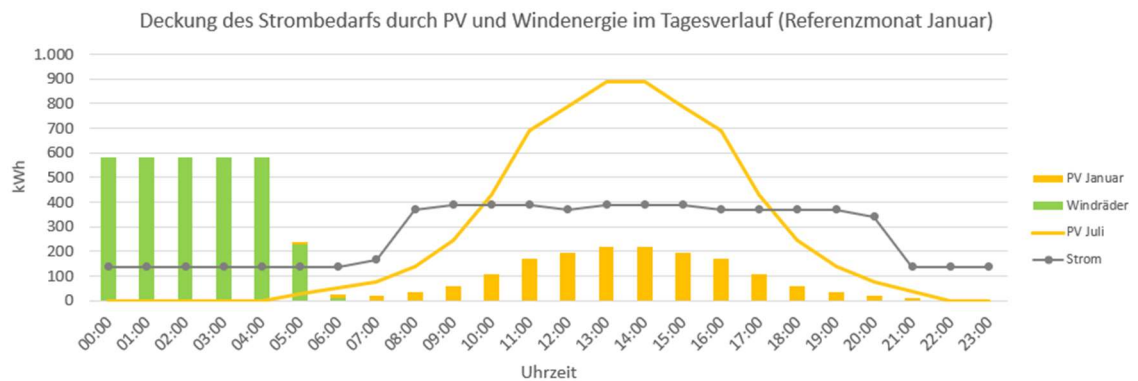


Abbildung 38: Deckung des Strombedarfs durch die Photovoltaik (35°-Winkel, Südausrichtung) und Windräder (Nennleistung 5 kW) im Januartag

Hierbei werden zwei zentrale Aspekte ersichtlich. Einerseits zeigt sich durch die Maßnahmenkombination, dass die Windräder den Strombedarf in kurzen Abständen decken können. Durch die Zufälligkeit und Unvorhersehbarkeit der Windgeschwindigkeit lässt sich die nächtliche Stromversorgung jedoch nicht garantieren. Es wird auch ersichtlich, dass die Windräder unter Nenngeschwindigkeit einen erheblichen Überschuss an Strom produzieren. Der Überschuss kann in das Stromnetz eingespeist werden oder einem Quartierspeicher zugeführt werden, der die Versorgungslücken klimaneutral deckt. Die Speicherung der elektrischen Energie wird in Kapitel 5 ausführlicher diskutiert. Der zweite zentrale Punkt besteht in der Aufteilung des Ertrags. Durch die Kombination der Maßnahmen wird rechnerisch der jährliche Bedarf mit dem Ertrag der Maßnahmen gleichgesetzt. Im Tagesverlauf des Januartags wird jedoch ersichtlich, dass durch die Aufteilung weniger elektrische Energie durch die Photovoltaik erzeugt wird, die im Vergleich zur Windenergie in zuverlässigeren Zyklen Erträge generiert.

4.4. Anwendung der Kennwerte der klimaneutralen Wärmeversorgung

Im Folgenden wird die Anwendung der Kennwerte der Wärmeversorgung auf den Bedarf des Laborgebäudes geprüft. Pro Jahr wird für das Laborgebäude der Wärmebeitrag von 941.156 kWh benötigt. Anhand der Bestandszähler wird geschätzt, dass 75%

der Wärme in der Heizperiode (Anfang Oktober bis Ende März) verbraucht werden. In der Heizperiode werden annäherungsweise 15% des jährlichen Bedarfs an Wärmeenergie im Januar verbraucht. Dies entspricht einem Tagesdurchschnitt von 4.705 kWh. Der Tagesverlauf erreicht hierbei die Bedarfsspitze zu Beginn der Arbeitszeit (zwischen 8:00 - 9:00 Uhr) und fällt über den Tag ab. Durch die Nachtauskühlung muss das Gebäude zu Arbeitsbeginn durch die Heizung auf Betriebstemperatur gebracht werden. Die hocheffiziente thermische Hülle verhindert übermäßige Transmissionswärmeverluste über den Tag. Daneben heizen interne Gewinne ((Menschen und Geräte) das Gebäude weiter auf, wodurch der sinkende Bedarf an Wärme im Tagesverlauf resultiert. Im Folgenden wird die Deckung des jährlichen Wärmebedarfs durch die Wärmerückgewinnung aus Servern vorgestellt.

4.4.1. Anwendung des Kennwerts der Wärmerückgewinnung von Servern

Der jährliche Ertrag an rückgewonnener Wärme der Server errechnet sich aus der IT-Last. Für das Laborgebäude wurde ein Stromverbrauch der Server von 876.000 kWh pro Jahr ermittelt. In der Kennwertbildung wurde das Verhältnis von IT-Last zu rückgewonnener Wärme auf das 1,4fache festgelegt. Durch die Server können somit 1.226 Mio. kWh an Wärme pro Jahr rückgewonnen werden, die zur Gebäudeheizung verfügbar sind. Dies entspricht einer täglichen Wärmeleistung von 3.360 kWh. Aufgrund der konstanten Betriebstemperatur der Server wird dem Laborgebäude über den Tag verteilt ein gleichgroßer Wärmeertrag zugeführt. Die Deckung des Wärmebedarfs eines Januartags durch die rückgewonnene Wärme der Server des Laborgebäudes ist in Abbildung 39 dargestellt.

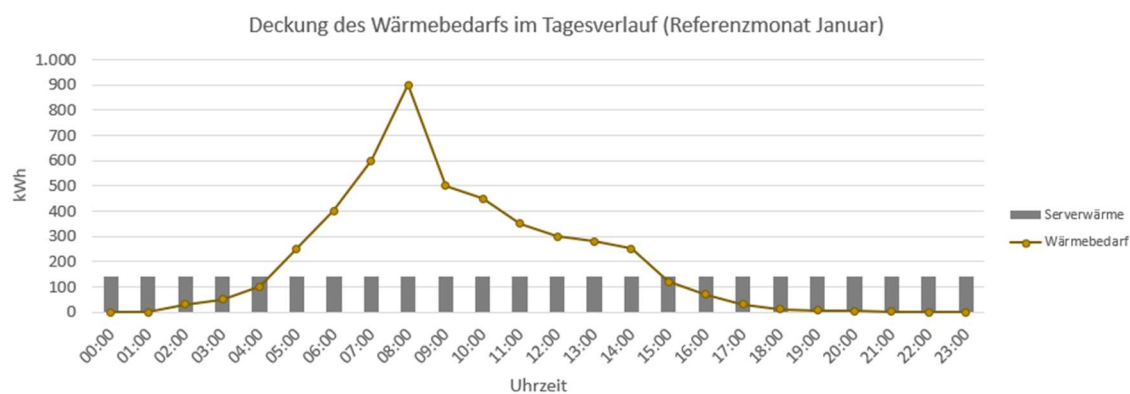


Abbildung 39: Anwendung des Kennwerts der Serverwärme auf den Lastgang des Laborgebäudes (Januartag)

Hierbei wird ersichtlich, dass der Ertrag über den Tag verteilt in derselben Größenordnung bleibt. Der Wärmebedarf erreicht hingegen eine Bedarfsspitze zum Arbeitsbeginn (08:00 Uhr) und senkt sich über den restlichen Tag ab. In Kapitel 3.3.6. wurde dargelegt, dass die Wärme einem Tagesspeicher zugeführt wird, der diese für Stunden oder Tage speichern kann [53]. Die nächtlichen Wärmeüberschüsse der rückgewonnenen Serverwärme lassen sich durch die Verbindung des Wärmespeichers mit dem Heizkreislauf tagsüber zur Deckung der Bedarfsspitze nutzen.

Hieraus lässt sich folgern, dass die rückgewonnene Wärme der Server außerhalb der Heizperiode (Anfang April bis Ende September) zur Beheizung des Laborgebäudes ausreichend ist. Der entstehende Überschuss kann als klimaneutrale Wärme in das Fernwärmenetz eingespeist werden. Während der Heizperiode entsteht im Januar ein weiterer Bedarf an 1.340 kWh Wärme. Dieser Bedarf kann entweder über einen Anschluss an das Fernwärmenetz oder durch die Kombination mit einer weiteren, klimaneutralen Versorgungsmaßnahme sichergestellt werden. Im Folgenden wird hierfür die Wärmerückgewinnung aus der Kanalisation in die Beheizung integriert.

Es wird angenommen, dass in unmittelbarer Nähe im Untergrund des Laborgebäudes ein Kanalisationsrohr der Gemeinde Martinsried verläuft, dass sich sowohl durch den Trockenwetterabfluss und den Rohrdurchmesser zur Installation eines Wärmetauschers eignet. Für den wirtschaftlichen Betrieb wird eine Mindestlänge von 10 Metern Angesetzt. Dies entspricht einer Wärmeproduktion von 200.000 kWh Wärmeenergie während der Heizperiode. Im Tagesschnitt sind dies 547,9 kWh und pro Stunde 22,8 kWh. Die Anwendung des Kennwerts der Wärmerückgewinnung und Servern in Kombination ist in Abbildung 40 dargestellt.

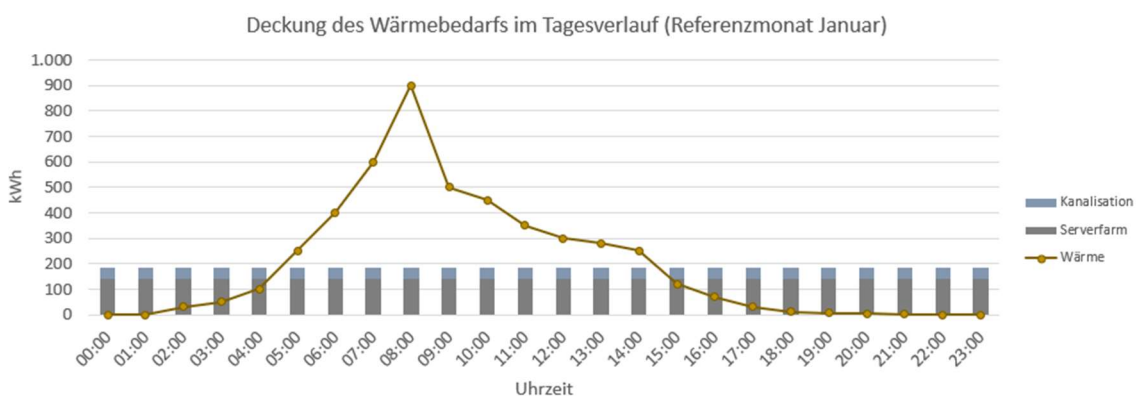


Abbildung 40: Kombination der Kennwerte des Wärmebedarfs (Wärmerückgewinnung aus Servern und der Kanalisation) zur Deckung des Lastgang eines Januartags

Durch die Kombination der Kennwerte kann der Wärmebedarf im Januar gedeckt werden. Der besondere Vorteil in dieser Kombination besteht darin, dass der Wärmetauscher der Kanalisation im Sommer zur Kühlung des Gebäudes genutzt werden kann. In einem umgekehrten Effekt wird die Kanalisation hierbei als Senke der Raumwärme genutzt. Abbildung 41 zeigt die installierten Maßnahmen der Energieversorgung an und um das Laborgebäude.

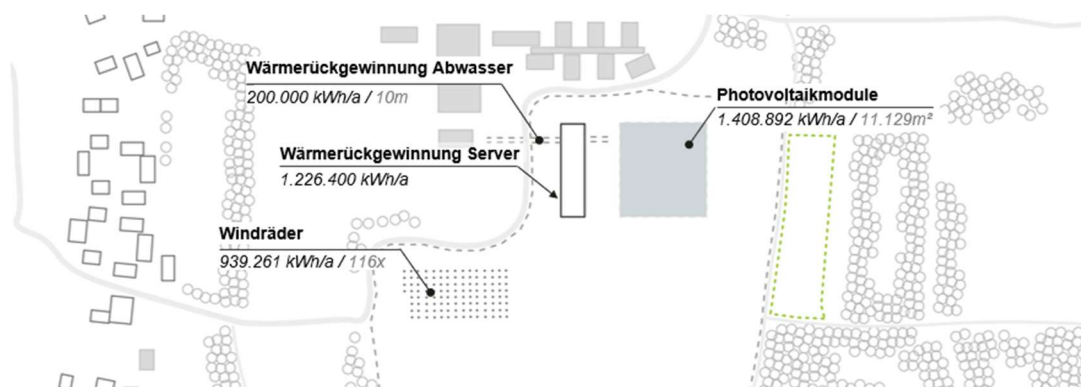


Abbildung 41: Strom- und Wärmeversorgung durch die quartiersgebundene Maßnahmenkombination

4.5. Anwendung der ökologischen CO₂-Kompensationsmaßnahmen

In diesem Kapitel wird die ökologische Kompensation der Emissionen des Laborgebäudes vorgestellt. In der Anwendung der klimaneutralen Energieversorgung wurden die Versorgungslücken in der Stromversorgung ersichtlich, die durch die klimaneutralen Versorgungsmaßnahmen entstehen. Neben den Emissionen der Versorgungslücken muss auch die Baukonstruktion ökologisch kompensiert werden. Dies wird zu Beginn in Einzelmaßnahmen und anschließend in der Kombination untersucht.

4.5.1. Kompensation durch ökologische Einzelmaßnahmen

In einem ersten Schritt werden die Kompensationsmaßnahmen einzeln auf die gesamten Emissionen des Laborgebäudes (Nutzungsphase und Baukonstruktion) angewandt. Hierfür müssen 95.535 t CO₂-Äquivalente kompensiert werden. Exemplarisch werden die Mengen der bauwerksgebundenen Kompensationsmaßnahmen, der Na-

turflächen und der Bäume gemäß den Kennwerten ermittelt. Eine Übersicht der notwendigen Mengen und Flächen gibt Abbildung 42.

					
Anzahl / Menge:	59.709x	37.173m ²	442.291m ²	3.980.625m ²	2.095.065m ²
Kompensationsmaßnahme:	Tannen	Moorfläche	Weidefläche	Intensives Gründach	Fassadengebundene Begrünung
Erreichen der Reifephase:	80a	1.000a	/	50a	50a
Erneuerungsrate	2-3x	/	/	50x	50x

Abbildung 42: Ökologische CO₂-Kompensation eines Laborgebäudes des Campus für „Life-Sciences“ durch Einzelmaßnahmen

Aus der Kompensation durch Einzelmaßnahmen leitet sich ein Rückschluss für jede der drei Vegetationskategorien ab. Um die Emissionen des Laborgebäudes durch die Bauwerksbegrünung zu kompensieren werden Flächen benötigt, die die verfügbaren Hüllflächen eines Quartiers deutlich überschreiten. Hierfür muss die Begrünung zusätzlich an Bestandsbauten nachgerüstet werden. Daneben wird anhand der großen Erneuerungsrate ersichtlich, dass die Bauwerksbegrünung in 50 aufeinanderfolgend Generationen hergestellt werden muss, um das ausgestoßene CO₂ auszugleichen.

Anhand der Erneuerungsrate und unter Berücksichtigung der linearen CO₂-Bindungsrate (siehe Kennwertbildung) wird des Weiteren ersichtlich, dass die Bäume die Hauptlast des Emissionsausgleichs tragen können. Die notwendige Menge an Bäumen übersteigt jedoch die verfügbaren Flächen für einen quartiersgebundenen Ausgleich. Angesichts der Fläche von 15 m² für das Wurzelwerk wären hierfür über 716.505 m² notwendig. Die Kompensation durch Bäume muss daher vorrangig durch die ortsungebundene Renaturierung von Wäldern geschehen.

Unter den Naturflächen sticht das Moor durch die CO₂-Bindungskapazität deutlich hervor. Dieses kann bei der Anlegung auf einer versiegelten Fläche besonders viele Emissionen kompensieren. Wie in der Kennwertbildung jedoch erläutert wurde, greift der Kennwert erst, wenn das Quartier bereits rückgebaut und das Kohlenstoffdioxid bereits durch natürliche Prozesse in der Atmosphäre abgebaut wurde. Einen Vergleich der Maßnahmen gibt Tabelle 12 und listet die entsprechende Menge und Quadratmeterzahl auf.

Tabelle 12: Ökologische Einzelkompensationsmaßnahmen

Kompensationsmaßnahme	Menge / Quadratmeter	Reifephase + Erneuerung
Buche	47.767x	120 Jahre / 2-3x
Tanne	59.709x	80 Jahre / 2-3x
Moorfläche	37.173m ²	/
Weidefläche	442.291m ²	/
Waldboden	237.059m ²	/
Hecke	250.748m ²	100 Jahre / 2x
Fassadengebundene Begrünung	2.095.065m ²	50 Jahre / 200x
Bodengebundene Fassadenbegrünung	10.440.983m ²	50 Jahre / 200x
Extensives Gründach	7.961.250m ²	50 Jahre / 200x
Intensives Gründach	3.980.625m ²	50 Jahre / 200x

Aus Sicht der Dauerhaftigkeit und der Risikominimierung leitet sich aus den Erneuerungsraten der Einzelmaßnahmen ein weiterer Rückschluss ab. Findet die Kompensation der Emissionen durch eine Einzelmaßnahme statt, ist diese besonders großem Risiko möglicher Schäden ausgesetzt. Wird beispielsweise für die Kompensation ausschließlich eine Waldfläche mit Bäumen renaturiert, erhöht sich das Risiko des Kompensationsverlust durch einen Schädlingsbefall oder einen Waldbrand überproportional. Aufgrund der Risikominimierung und der zusätzlichen Funktionen der ökologischen Maßnahmen wird im Folgenden die Maßnahmenkombination untersucht.

4.5.2. Kompensation durch die Kombination ökologischer Maßnahmen

Die Planung der Vegetation in der Maßnahmenkombination gliedert sich in zwei Arbeitsschritte. Zu Beginn werden die Gebäudebegrünung auf die Kubatur angewandt und die Bäume und Hecken in das Freiflächenkonzepts integriert. Im zweiten Schritt wird ein Konzept für die ortsungebundenen Maßnahmen entwickelt. Hierbei stehen zwei Konzepte zentral: die Dauerhaftigkeit und die Pufferung durch eine Überkapazität an gespeichertem CO₂. Vorrangig geschieht dies durch das Anpflanzen von lokalen

Waldflächen auf dem Grundstück des Laborgebäudes und durch das Anlegen eines Moors.

Für die Quartiersbezogene Kompensation wird zuerst die Fläche der Bauwerkshülle und die zur Verfügung stehende Freifläche ermittelt. Für die bauwerksgebundene Kompensation stehen die ermittelten Flächen des Grundstücks in Höhe von 154.225 m² und die Dachfläche von 2.413 m² und der Fassaden von 3.476 m² zur Verfügung. Für die Fassade wird aufgrund der Fassadenöffnung 30% der Fläche abgezogen. Für das Gebäudedach wird 20% für Installationen der Haustechnik, Schächte und Schornsteine vorgesehen. Im Rahmen der Studie wird für die ökologische Maßnahmenkombination eine extensive Dachbegrünung und eine fassadengebundene Begrünung angenommen. Die Freifläche des Grundstücks werden neben den lokalen Buchen- und Tannenwaldflächen mit Hecken beplant und ein Moor angelegt. Die Maßnahmen im Quartier sind in Tabelle 13 ersichtlich. Die Anwendung der quartiersbezogenen Maßnahmen (Erster Schritt) ist in Abbildung 43 dargestellt.

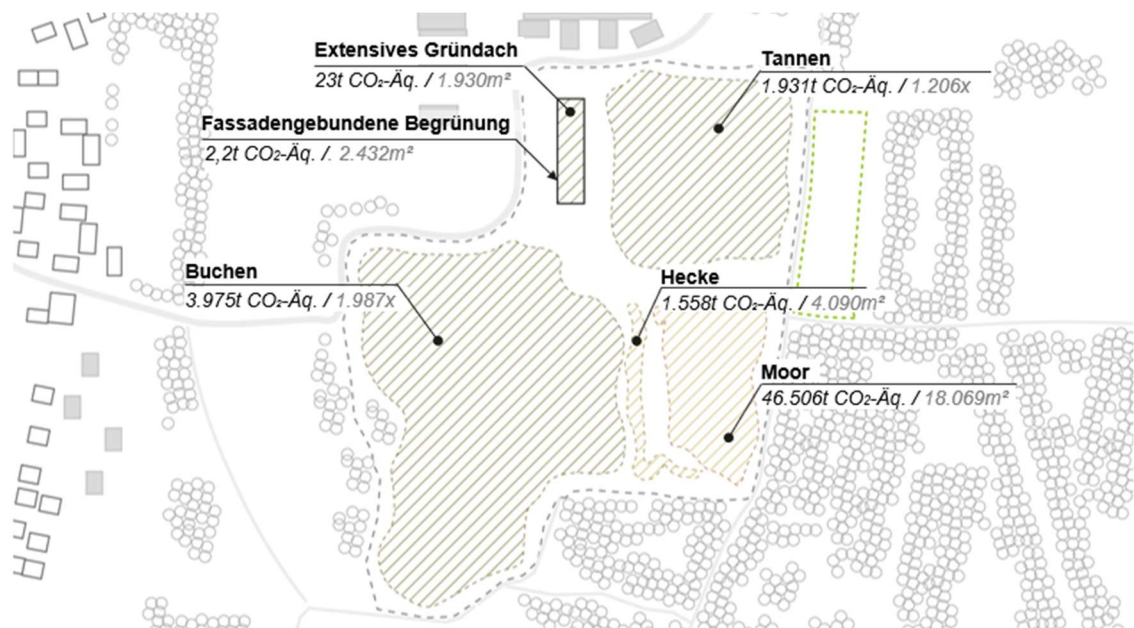


Abbildung 43: Quartiersbezogene, ökologische Kompensation der CO₂-Emissionen (MPG Martinsried)

Durch die untersuchte Maßnahmenkombination wird ersichtlich, dass 55,8% der Emissionen quartiersgebunden kompensiert werden können. Während die Bauwerksbegrünung prozentual nur eine geringe CO₂-Bindung erreicht besitzt das Moor eine große Kompensationsfähigkeit. Dieses gleich insgesamt 48% der gesamten Emissionen des Laborgebäudes aus. Die quartiersgebundene Kompensation gelingt aufgrund der großen Freiflächen in dieser Studie besser als es für den innerstädtischen Bereich

zu erwarten ist. Die ökologischen Kompensationsmaßnahmen des ersten Schritts sind in Tabelle 13 aufgelistet.

Tabelle 13: Quartiersgebundene, ökologische Kompensationsmaßnahmen

Kompensationsmaßnahme (Campus)	Menge / Anzahl	Lineare CO₂-Bindungsrate	CO₂-Gesamtbindung	Anteil Gesamtkompensation
Fassadengebundene Begrünung	2.432 m ²	2,2 t CO ₂ -Äq./a	111 t CO ₂ -Äq.	0,1%
Ext. Gründach	1.930 m ²	0,46 t CO ₂ -Äq./a	23 t CO ₂ -Äq.	0%
Hecken	4.090 m ²	15,6 kg CO ₂ -Äq./a	1.558 kg CO ₂ -Äq.	1,6%
Buchen	1.987 x	39,7 t CO ₂ -Äq./a	3.975 t CO ₂ -Äq.	4,1%
Tannen	1.206 x	19,2 t CO ₂ -Äq./a	1.931 t CO ₂ -Äq.	2%
Moorfläche	18.096 m ²	30,7 t CO ₂ -Äq./a	46.506 t CO ₂ -Äq.	48%
<i>Summe</i>	/	/	62.565 t CO ₂ -Äq.	55,8%

Im zweiten Schritt werden ortsungebundene Kompensationsmaßnahmen erarbeitet. Diese müssen die verbleibenden 44,2% der Emissionen durch Maßnahmen außerhalb des Campus ausgleichen. Zentral wird die Orts- und Vegetationswahl durch die Risikominimierung, die Dauerhaftigkeit und die Pufferung in Form einer Überkapazität bestimmt. Das Risiko gegenüber Schäden wird durch die Aufteilung in renaturierte Waldfläche, Weidefläche anstelle eines Zementwerkes und dem Anlegen eines Moors auf einem Acker gesenkt. Um die Dauerhaftigkeit der CO₂-Bindung zu sichern und eine Verlagerung der Emissionen zu vermeiden wird angenommen, dass das Zementwerk stillgelegt und die Ackerfläche vorerst nicht weiter benötigt wird. Der Forstenrieder Park bietet durch große Freiflächen, die mit Buchen und Tannen bepflanzt werden können, die Möglichkeit zur Renaturierung. Das Zementwerk ist das „bam | Asphalt Mischwerk“ an der Fürstenrieder Straße. Auf Grundlage der Grundstücksgrenzen des Bayernatlas wird eine Fläche von 47.009m² ermittelt, die als Weide genutzt wird. Das Moor, das an Stelle des Ackers in der Röntgenstraße angelegt wird, besitzt gemäß dieser Ermittlung eine Fläche von 17.417m². Die Renaturierung des Forstenrieder Park kann aufgrund der Größe des Waldes in der Menge der Bäume beliebig angepasst werden. Daher wird durch die Bäume 21,2% mehr gebundenes CO₂ eingeplant. Diese Überkapazität wirkt dem Rückbau des Campus für „Life Sciences“ und Änderungen der Freifläche entgegen. Die drei Maßnahmen sind in Abbildung 44 dargestellt.



Ortswahl:	Röntgenstraße	Bam I Asphaltmischwerk	Forstenrieder Park
CO ₂ -Kompensationsmaßnahme	Moorfläche	Weidefläche	Renaturierung Wald
Fläche / Menge	17.417m ²	47.009m ²	5.827x
CO ₂ -Äq. [t]	40.733t CO ₂ -Äq.	10.153t CO ₂ -Äq.	11.654t CO ₂ -Äq.
Korrekturfaktor	0,91	/	/

Abbildung 44: Kompensationsmaßnahmen außerhalb des Quartiers

Der Großteil des Emissionsausgleichs wird durch die Moore hergestellt. Durch das Anlegen eines Moors in einem Quartier entsteht neben der Austrocknung durch konkurrierende Nutzungen ein Risikofaktor. Beispielsweise kann die Moorfläche langfristig für Fahrradstellplätze oder Parkplätze attraktiver sein. Die Renaturierung des Waldes südlich der MPG ermöglicht hingegen einen flexiblen und risikoarmen Einsatz, da sowohl angrenzend als auch im Wald neue Bäume gepflanzt werden können. Zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit müssen Maßnahmen zum Waldschutz, wie beispielsweise regelmäßige Kontrollen durch Förster, getroffen werden. Die CO₂-Gesamtbindung der ortsungebundenen Kompensationsmaßnahmen ist in Tabelle 14 aufgelistet. Dazu ist die prozentuale Verteilung der Gesamtkompensation ersichtlich.

Tabelle 14: CO₂-Kompensationsmaßnahmen außerhalb des Quartiers

Ortsungebundene Kompensation	Menge / Anzahl	Lineare CO ₂ -Bindungsrate	CO ₂ -Gesamtbindung	Anteil Gesamtkompensation
Moorfläche (Röntgenstraße)	17.417 m ²	27 t CO ₂ -Äq./a	40.733 t CO ₂ -Äq.	42,6%
Weidefläche (Asphaltwerk)	47.009 m ²	1.015 t CO ₂ -Äq./a	10.153 t CO ₂ -Äq.	10,6%
Buchen (Bestandswald)	5.827 x	93 t CO ₂ -Äq./a	11.654 t CO ₂ -Äq.	12,2%
<i>Summe</i>	/	/	<i>62.540t CO₂-Äq.</i>	<i>65,4%</i>

In diesem Kapitel wurde ersichtlich, dass sich eine klare Prozessabfolge in der Anwendung der ökologischen Kompensationsmaßnahmen in einem Quartiersprojekt bildet. Doch welche Parameter sind mit Hinblick auf die Klimaneutralität in den einzelnen Schritten entscheidend? Was bedeutet dies für die Risikominimierung und die Dauerhaftigkeit der Vegetationsarten? Für die quartiersgebundene Kompensation bedeutet

dies, dass die Freiflächengestaltung den größeren Hebel als die bauwerksgebundene Begrünung bildet. Aus Sicht der Dauerhaftigkeit muss in der quartiersgebundenen Kompensation jedoch immer davon ausgegangen werden, dass sich aufgrund ändernder Nutzungen oder Freiflächen der kompensierende Effekt der Vegetation reduziert. Die langfristige CO₂-Bindung kann durch die ortsungebundenen Maßnahmen garantiert werden. In der Anwendung auf den Forstenrieder Park zeigt sich, dass sich die Bäume nahtlos in den bestehenden Wald einfügen können. Durch die Unterteilung auf drei Kompensationsstrategien reduziert sich zusätzlich das Risiko eines Schadenübertrags, der beispielsweise durch einen Waldbrand oder Schädlingsbefall entstehen würde. Daneben zeigt sich, dass das gezielte einplanen einer Überkapazität an gebundenem CO₂ in den ortsungebundenen Maßnahmen zur Risikominimierung sinnvoll ist. Des Weiteren können durch die ortsungebundenen Maßnahmen die zusätzlichen Funktionen der Biodiversität bewusst integriert werden.

Mit Blick auf die Zukunft der ökologischen Kompensation ist die Dynamik der Emissionsfaktoren anzumerken. Aufgrund der Energieversorgung der Nutzungsphase übersteigen die Emissionen die CO₂-Menge, die auf dem Campus in Martinsried kompensierbar wäre. In der LCA wurden jedoch starre Emissionsfaktoren über die gesamte Nutzungsphase von 50 Jahren angenommen. Dies bedeutet, dass sich innerhalb der 50 Jahre nach Fertigstellung des Laborgebäudes der Anteil der erneuerbaren Energien nicht ändern wird. Aufgrund der Treibhausgasminderungsziele Deutschlands von 88% bis zum Jahr 2040 [54] ist zu erwarten, dass durch die starren Emissionsfaktoren in der Studie eine ungewollte Überkapazität an gebundenem CO₂ eingeplant wird. Daher müssen dynamische Emissionsfaktoren in die Planung der Kompensationsmaßnahmen integriert werden.

4.5.3. Sicherstellung der Klimaneutralität in der frühen Planungsphase durch quartiersgebundene Maßnahmen

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Maßnahmen der klimaneutralen Energieversorgung und der Kompensation separat angewendet. Doch lässt sich durch die Kombination der Maßnahmen ein klimaneutrales Energieversorgungssystem modellieren? Können die ökologischen Kompensationsmaßnahmen auf der übrigen Fläche der MPG die Lebenszyklusemissionen des modularen Forschungsgebäuden kompensieren? Abbildung 45 gibt einen Eindruck über den Flächenbedarf der klimaneutralen

Energieversorgungsmaßnahmen, die sich direkt auf dem Grundstück einsetzen lassen. Aufgrund der gleichbleibend hohen Wärmequelle durch Server und Kanalisation wird angenommen, dass der Wärmebedarf klimaneutral gedeckt werden kann. Im Gegensatz hierzu unterliegt die klimaneutrale Stromversorgung im Quartier wetter-, tages- und der jahreszeitbedingten Versorgungslücken. Prinzipiell ist eine anteilige Deckung des Bedarfs durch die Maßnahmen möglich. In dieser Studie wird die Stromversorgung in die zu kompensierenden Emissionen jedoch voll aufgenommen. Somit müssen durch die ökologischen Kompensationsmaßnahmen die Emissionen der Stromversorgung und der Baukonstruktion des Laborgebäudes ausgeglichen werden. Abbildung 45 zeigt, dass dies für ein modulares Laborgebäude in Martinsried möglich ist. Dies wird an erster Stelle durch das Moor ermöglicht. Durch die hohe CO₂-Bindungskapazität des Moores kann daneben eine Überkapazität an CO₂ gebunden werden. Bei Quartiersprojekten im innerstädtischen Bereich ist jedoch die sehr begrenzte Freifläche zu beachten. Auf dieser konkurrieren neben der Vegetation und der Energieversorgung weitere Nutzungen wie Stellplätze oder Aufenthaltsmöglichkeiten.

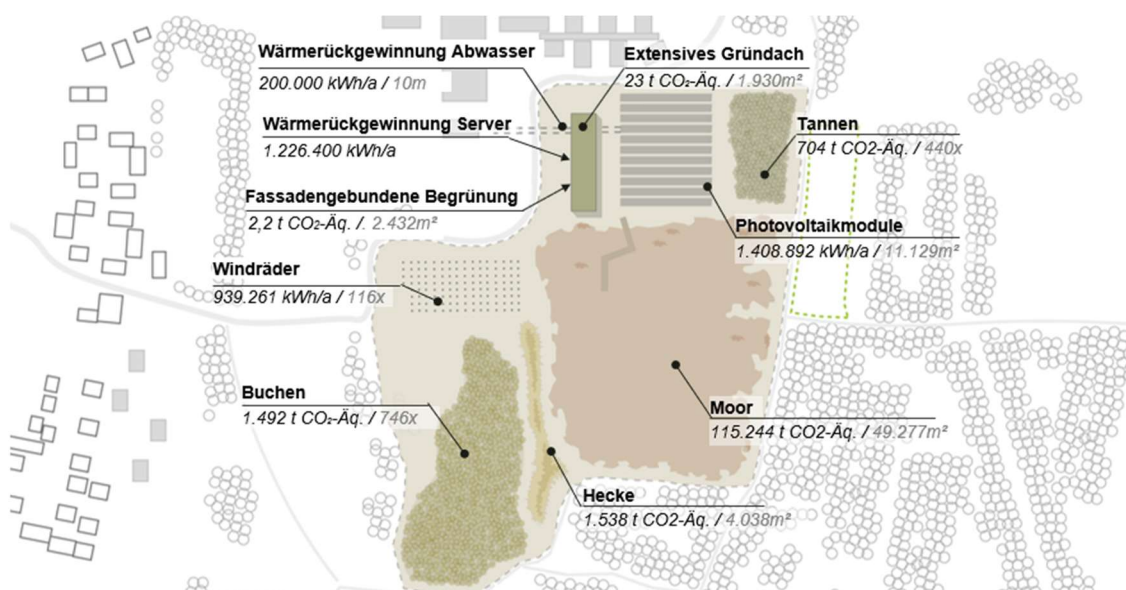


Abbildung 45: Klimaneutralität durch das planerische Rahmenwerk (Klimaneutrale Wärmeversorgung, anteilig klimaneutrale Stromversorgung und ökologische Kompensation auf den Freiflächen)

Die Maßnahmenkombination bietet für die klimaneutrale Energieversorgung Vorteile. Die Kombination der Photovoltaik und der Windräder beugt beispielsweise den jahresbedingten Ertragsschwankungen vor. Während die PV-Module in den langen Sommertagen durch hohe Strahlungsintensitäten einen großen Anteil der Endenergie liefern können die Windräder bei höheren Windgeschwindigkeiten im Winter die Hauptlast tragen. Auch in der Wärmeversorgung kann durch die Maßnahmenkombination poten-

ziellen Versorgungslücken vorgebeugt werden. Hierzu zählt beispielsweise das Warten der Server oder des Kanalisationsrohrs. Es besteht jedoch keine zwingende Notwendigkeit, die Maßnahmen miteinander zu kombinieren.

Auch in der ökologischen Kompensation entstehen durch die Maßnahmenkombination (wie in Abb. 45 dargestellt) Vorteile. Einerseits erfolgt hierdurch eine Risikominimierung, da das Schadensrisiko (und die einhergehende CO₂-Freisetzung) auf verschiedene Kategorien verteilt wird. Andererseits werden die Biodiversität und die positiven Wechselwirkungen bekräftigt. In diesem Kontext muss jedoch erwähnt werden, dass die Buchen, Tannen und Hecke aufeinanderfolgend angepflanzt werden müssen, da andernfalls die Wechselbeziehungen verloren gehen.

Abbildung 45 gibt einen Überblick über die Anzahl der Windräder, um 40% des jährlichen Bedarfs an klimaneutralem Strom zu erzeugen. Unter konkreten Anwendungsbedingungen muss die Abstandsfläche der Windräder eingehalten werden. Der Höchstwert der Landesbauordnungen beträgt 1H (Höhe) [56]. Bei einer Halterungshöhe von 7m und einer Rad-höhe von 1,5m entspricht die Abstandsfläche 8,5m [57]. Die sich daraus ergebenden Abstandsflächen sind in Abbildung 46 dargestellt.

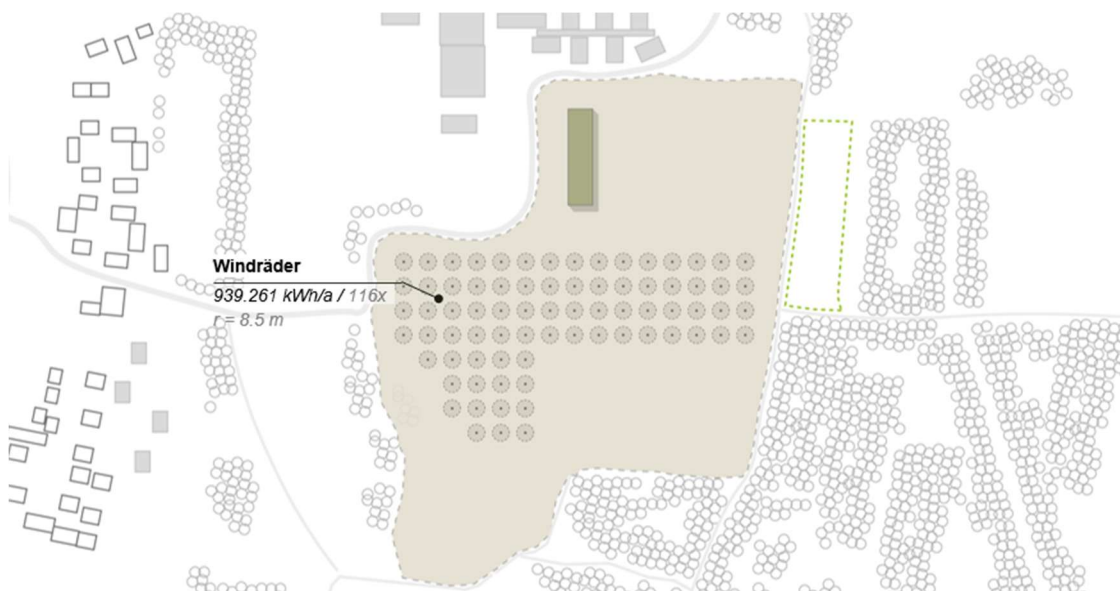


Abbildung 46: Klimaneutrale Stromversorgung durch Windräder, inklusive Abstandsfläche 1H (r = 8,5m)

4.6. Wechselwirkung und zusätzlicher Nutzen der ökologischen Kompensationsmaßnahmen

Die ökologischen Kompensationsmaßnahmen besitzen neben der Klimawirksamkeit einen weiteren Nutzen. Dieser lässt sich in drei Kategorien feststellen: in der Biodiversität, dem Mikro- und Stadtklima und der Aufenthaltsqualität des Quartiers. Umso mehr Maßnahmen miteinander kombiniert werden, desto größer wird der gesamtheitliche Effekt durch gegenseitige Abhängigkeit und Bekräftigung. In diesem Abschnitt werden die zusätzlichen Effekte der Maßnahmen erläutert. Abbildung 47 zeigt eine Übersicht der Wechselwirkungen und der einzelnen Unterkategorien.

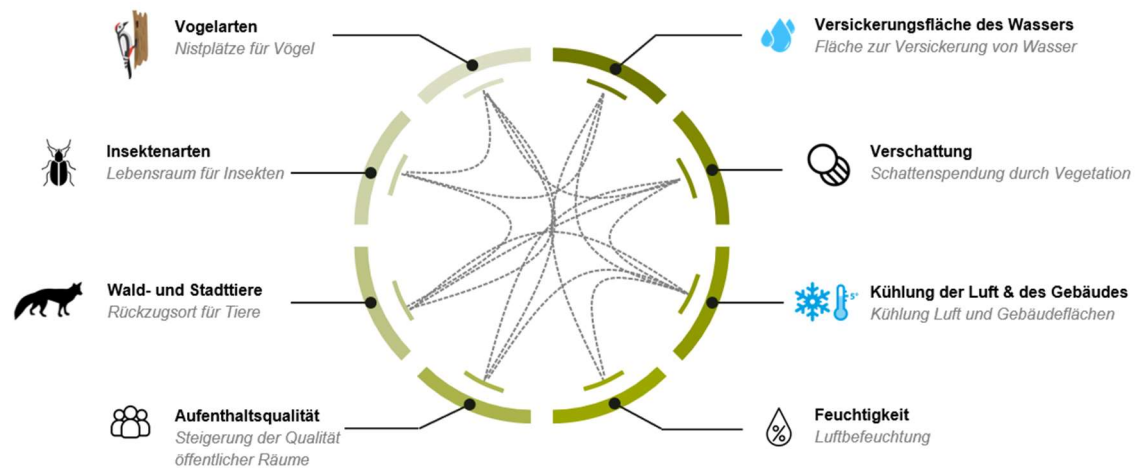


Abbildung 47: Wechselwirkung und Abhängigkeiten der ökologischen Kompensationsmaßnahmen

Die erste Kategorie betrifft die Biodiversität in einem Quartier. Durch die Integration der ökologischen Maßnahmen in das Quartierskonzept wird die Vielfalt der lebenden Organismen gefördert. Durch die Maßnahmen werden ebenfalls die Ökosystemfunktionen von Biotopen und Lebenssystemen gefördert, die an das Quartier angrenzen. Der Ausbau des Ökosystems macht es artenreicher, wodurch es stabiler ist und mit Störungen besser umgehen kann.

Die Kategorien der Wechselbeziehungen betreffen neben der Vegetation auch die Stadt- und Waldtiere und die Insekten. Als Beispiel hierfür lässt sich das Bestäuben der Pflanzen durch Insekten nennen, die in den Gewächsen wiederum Lebensraum finden. Zu den Wechselbeziehungen zählt auch die Nahrungskette, in der die Tier- und Pflanzenarten in einem Quartier zueinanderstehen. Während Gewächse für Käfer und Würmer die Nahrungsquelle darstellen bilden die Insekten für zahlreiche Vogelarten

ten die Nahrungsgrundlage. Somit entsteht ein komplexes Gefüge der Artenabhängigkeit in einem Quartier.

Zur zweiten Kategorie zählt das Mikroklima des Quartiers. Dieses wird durch die Temperatur, Luftfeuchte und Geschwindigkeit der bodennahen Luftschichten beeinflusst, weshalb das Mikroklima stark von den vorhandenen Oberflächen (Boden, Wand, Dächer) und deren thermischen Eigenschaften abhängig ist [55]. Bäume wirken sich deutlich auf das Mikroklima aus. Sobald der Baum die Reifephase erreicht und die volle Wuchshöhe besitzt, schützt er versiegelte Bodenflächen vor der Überhitzung und kühlt gleichzeitig die Luft des Quartiers. Die hierdurch gekühlte Luft kann in das bauklimatische Konzept des Quartiers integriert werden und Luft vorkühlen, die durch die Lüftungsanlage genutzt wird. Daneben reinigt die Begrünung die Luft und filtert Schadstoffe. Feinstaub lagert sich an Vegetationsflächen deutlich einfacher ab als auf versiegelten Flächen wie Beton und Asphalt [44]. Bäume weisen eine hohe Gesamtoberfläche auf, auf der der Feinstaub haften bleibt. Der Kühlungseffekt des Quartiers wird ebenfalls durch die Bauwerksbegrünung erzielt. Die Blätter der Grünfassaden und die Mose des Dachs nehmen die Sonnenstrahlung auf und verhindern hierdurch eine übermäßige Erhitzung der darunter liegenden Gebäudehülle. Im Winter entsteht der gegenteilige Effekt indem die Grünfassade eine Verbesserung der Dämmeigenschaft des Gebäudes zur Folge hat. Hierdurch kann der Wärmebedarf für ein Wohngebäude signifikant gesenkt werden [45].

Im Rahmen des Mikroklimas spielt die Wasserableitung und die Versickerungsfläche eine entscheidende Rolle. Durch die Naturflächen und das Pflanzen von Bäumen kann das Regenwasser aufgenommen und durch ein verbundenes System an Versickerungsflächen einem Hochwasser vorgebeugt werden. Gründächer entlasten daneben die Kanalisation indem Wasser während der Regenphase gespeichert und für die Photosynthese genutzt oder zu einem späteren Zeitpunkt abgeleitet wird.

Die dritte Kategorie besteht in der gesteigerten Aufenthaltsqualität des Quartiers. Durch den regulierenden Effekt des Mikroklimas der Kompensationsmaßnahmen können die Bewohner die Freiflächen des Quartiers komfortabler für den Aufenthalt nutzen. Während die Gebäudeoberflächen und die Luft des Quartiers im Sommer gekühlt werden bieten die Bäume Schutz vor Regen und Schnee. Daneben steigern die Grünflächen durch den Kontakt mit Stadt- und Waldtieren die Naturverbundenheit der Bewohner. Die positive Wirkung der Begrünungen fördert das psychische Wohlbefinden

der Bewohner und der neuronale Zusammenhang kann wissenschaftlich nachgewiesen werden [46]. Einen Überblick über die zusätzlichen Funktionen der Einzelmaßnahmen gibt Tabelle 15.

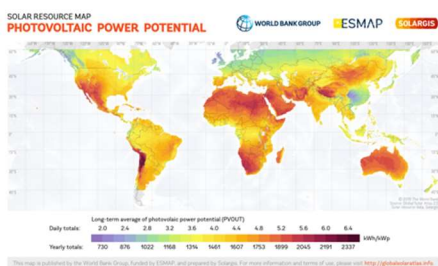
Tabelle 15: Zusätzliche Funktionalität der ökologischen Kompensationsmaßnahmen

	Buche	Tanne	Waldboden	Weidefläche	Moorfläche	Extensives Gründach	Intensives Gründach	Bodengebundene Grünfassade	Fassadengebundene Begrünung
Versickerungsfläche (Regenwasser)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	/
Feinstaubfilterung im Quartier	✓	✓	/	/	/	✓	✓	✓	✓
Lebensraum Insekten	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Oberflächenkühlung des Quartiers	/	/	/	/	/	✓	✓	✓	✓
Luftkühlung im Quartier	✓	✓	/	/	/	✓	✓	✓	✓

4.7. Übertragbarkeit des planerischen Rahmenwerks auf weitere Quartiersprojekte

Um einen wirkungsvollen Hebel für die Klimaneutralität von Quartiersprojekten zu garantieren muss sich das planerische Rahmenwerk auf weitere Projekte übertragen lassen. Unter idealen Bedingungen kann davon ausgegangen werden, dass die Kennwerte in der Anwendung auf weitere Quartiersprojekte gültig sind. Hierfür müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein. Das Ertragspotentialen der klimaneutralen Versorgungsmaßnahmen muss gleichwertig oder höher sein und das Quartiersprojekt in der gemäßigten Klimazone realisiert werden. In diesem Kapitel werden die Grenzen der Übertragbarkeit des Kennwertesystems geprüft. Die Übertragbarkeit der klimaneutralen Stromversorgung wird durch zwei zentrale Punkte gehemmt: die standortbedingte

Variation des Ertrags und die Notwendigkeit der Anpassung auf individuelle Kubaturen. Zu den standortbedingten Faktoren zählt die solare Einstrahlungsdauer und die Windgeschwindigkeit. Das Ertragspotential wurde im Kennwertesystem für den Standort Martinsried ermittelt. Die mittleren jährlichen Jahressummen schwanken gemäß dem Solaratlas in Deutschland zwischen dem Norden- und dem Süden zwischen 987 kWh/m² und 1374 kWh/m² [59]. Auf globaler Sicht variiert der Ertrag entlang der Breitengrade noch deutlicher. Dies bedeutet, dass die Kennwerte der Photovoltaik generell für Quartiersprojekte südlich des Breitengrades von Martinsried anwendbar sind. Für Quartiersprojekte nördlich des Breitengrades muss eine Prüfung im Einzelfall erfolgen. Das Ertragspotential der Windräder besteht nach Breitengrad in einer gegenteiligen Verteilung zur Sonneneinstrahlung. Gemäß dem globalen Windatlas weisen nordische Länder ein deutlich höheres Ertragspotenzial auf [60]. Analog zur Photovoltaik muss für den Kennwert in südlichen Breitengraden eine Prüfung im Einzelfall erfolgen. Der zweite Punkt, der die Übertragbarkeit begrenzt, ist die Notwendigkeit der individuellen Anpassung auf die Kubatur und den Stadtraum. Windräder produzieren beispielsweise je nach Höhe der Anbringung in einem Quartier unterschiedlich hohe Erträge. Daneben schwankt die Windgeschwindigkeit von Ort zu Ort noch mehr als die Solareinstrahlung. Daraus folgt, dass für die Windräder trotz des Kennwertes eine orts- und kubaturspezifische Planung erfolgen muss. Abbildung 48 stellt das Ertragspotential der Solareinstrahlung und der Windgeschwindigkeiten gemäß der Breitengrade dar.



Photovoltaik Power Potential



Global Wind Atlas

Abbildung 48: Variation des Ertragspotentials der PV und der Windräder nach Breitengrad

Aus Sicht der Wärmeversorgung wirken sich neben den Breitengraden die städtebaulichen Faktoren und die Quartiersnutzung auf die Übertragbarkeit der Kennwerte aus. Zu den städtebaulichen Faktoren zählt für die Wärmerückgewinnung aus der Kanalisation beispielsweise das ortsspezifische Wasserversorgungssystem. Das Rohr, an dem der Wärmetauscher installiert wird, muss in unmittelbarer Nähe des Quartiers geführt werden, damit die Wärmequelle möglichst nahe an Wärmeverbraucher liegt. Zu den

städtebaulichen Faktoren zählen aber auch beispielsweise Stadtbausteine und Typologien wie Hochhäuser, die die Solarthermie Kollektoren verschatten können.

Des Weiteren limitiert die Nutzungsabhängigkeit die Anwendung der Kennwerte der Wärmeversorgung. Für das Forschungsgebäude kommt die Wärmerückgewinnung aus Servern in Frage, da für das maschinelle Lernen ein Rechenzentrum benötigt wird. Für ein Quartier, das nur aus Wohnnutzungen besteht, lässt sich dieser Kennwert der klimaneutralen Wärmeversorgung jedoch nicht nutzen. Aus Sicht der Wärmeversorgung stellt dieser jedoch durch den gleichbleibenden Ertrag über das Jahr hinweg eine zuverlässige Wärmequelle dar.

Die Kennwerte der ökologischen Kompensationsmaßnahmen behalten bei Quartiersprojekten innerhalb derselben Klimazone ihre Gültigkeit. Die hemmenden Faktoren der ökologischen Kompensation bestehen in der Begrenzung auf die gemäßigte Klimazone, in den konkurrierenden Nutzungen der Fläche, in den konstruktiven Grenzen und in der Notwendigkeit der Bilanzierung. Die in dieser Studie entwickelten Kompensationsmaßnahmen sind für die Anwendung auf den Standort Martinsried optimiert. So wurden beispielsweise die Baumarten entsprechend der Waldzusammensetzung im Großraum München gewählt. Ein Quartiersprojekt, das außerhalb der gemäßigten Klimazone realisiert wird benötigt hierfür die Entwicklung eigenständiger Kennwerte. Diese können in einem eigenen Maßnahmenpaket für die entsprechende Klimazone zusammengefasst werden. Aus Sicht der Dauerhaftigkeit und der ökonomischen Realisierbarkeit der Maßnahmen ist dies besonders relevant. Im Vergleich ist der Grunderwerb in Deutschland deutlich kapitalintensiver als in anderen Ländern. Daneben besteht in Deutschland aufgrund des Wohnungsmangels eine größere Notwendigkeit, Freiflächen, Wälder und Moorflächen für das Wohnen umzunutzen. Die ortsungebundene Kompensation, für die ein Wald auf einer Ackerfläche renaturiert oder ein Moor angelegt wird, kann daher aus Sicht der Dauerhaftigkeit effizienter auf kostengünstigen Flächen durchgeführt werden. Die Klimazone, die für die ökologischen Kompensationsmaßnahmen des planerischen Rahmenwerks die idealen Voraussetzungen bietet, ist in Abbildung 49 dargestellt.

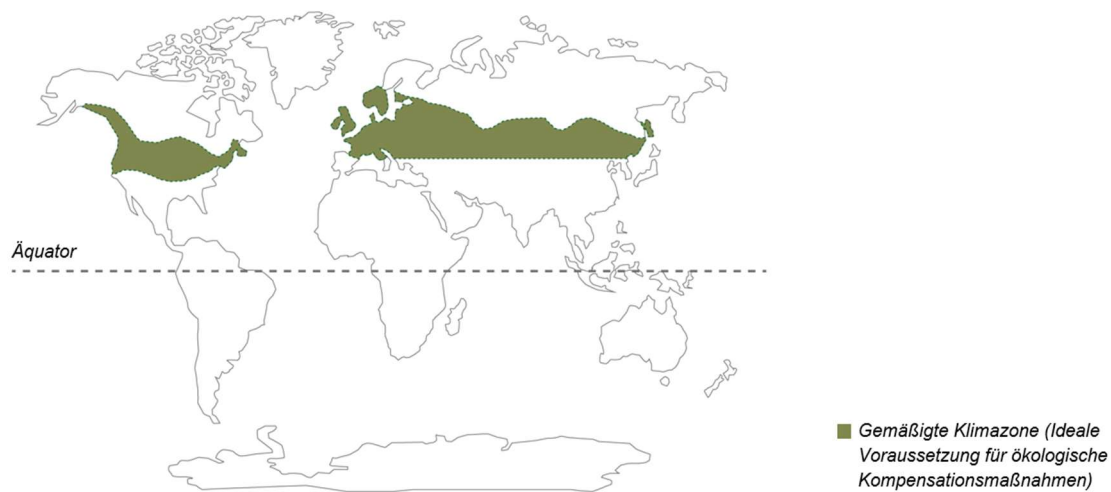


Abbildung 49: Einsatzbereich der ökologischen Kompensationsmaßnahmen des planerischen Rahmenwerks

Der zweite, begrenzender Faktor sind die konkurrierenden Nutzungen der Fläche in einem Quartier und der angrenzenden Grundstücke. Für ein Quartier muss präzise abgewogen werden, durch welche Nutzung der größte Mehrwert für die Gemeinde entsteht. Hierbei konkurrieren die Nutzungen der Viehzucht (Nahrung), der Wohnfläche, des Acker- und der Waldfläche. Während sich die Ackerfläche, die an einen Wald angrenzt, gut für die Renaturierung eignet, kann sich dies in einer Gemeinde mit akuter Wohnungsnot besser für die Umnutzung als Wohnfläche anbieten. Aus Sicht der sozialen Nachhaltigkeit muss daher die bestmögliche Nutzung der Fläche abgewogen werden.

An dritter Stelle müssen konstruktive Grenzen in der Anwendung der ökologischen Kompensationsmaßnahmen berücksichtigt werden. Der Kennwert gibt durch die CO₂-Gesamtbindung eine skalierbare Rechengröße vor. Unter Realbedingungen sind den Maßnahmen durch Wuchshöhen und spezifische Maximallasten jedoch Grenzen gesetzt. Die bodengebundene Grünfassade ist beispielsweise in der Wuchshöhe mit maximal 25 Meter beschränkt [61]. Während Efeu diese Wuchshöhen erreicht, ist der Hopfen bereits bei einer Wuchshöhe von 6 Metern ausgewachsen [61]. In diesem Kontext limitiert auch der Entwurf der Quartiersgebäude durch die Konstruktionsart den Einsatz der ökologischen Kompensationsmaßnahmen. Bei großflächigen Verglasungen ist der Einsatz der Fassadenbegrünungen beispielsweise nur reduziert möglich. Des Weiteren wird die Vegetation durch städtebauliche Aspekte gehindert. So kann ein Baum, der über einer Tiefgarage angepflanzt wird, nicht die volle Haftung und Wuchshöhe erreichen, da sich das Wurzelwerk nicht entfalten kann.

Der vierte, hemmende Faktor ist die Notwendigkeit der korrekten Bilanzierung in der Anwendung der CO₂-Kompensationsmaßnahmen. Der Kennwert der Kompensationsmaßnahmen stellt eine Abstraktion dar, die auf Grundlage von Durchschnittswerten erstellt wurde. Unter Realbedingungen unterscheidet sich die tatsächliche CO₂-Bindung der Untergründe und die der verwendeten Vegetationsarten von dem Kennwert. Darüber hinaus unterscheiden sich ebenfalls die Aufbauten der versiegelten Fläche und des darunter gespeicherten CO₂. In der konkreten Anwendung muss daher auf Grundlage der Kennwerte eine spezifische Messung der Kohlenstoffspeicherung des Bodens stattfinden und eine fundierte Berechnung des zukünftig gebundenen CO₂ erfolgen.

5. Ausblick: 100% Klimaneutrale Energieversorgung

In der Auswertung der Lebenszyklusanalyse wurde der übermäßige Anteil der Energieversorgung an den Emissionen des Laborgebäudes ersichtlich. Doch wie werden sich die Emissionsfaktoren der Wärme und des Stroms zukünftig entwickeln? Sollte der Fokus der Planer auf dem Senken des Wärmebedarfs oder dem Ausbau der erneuerbaren Energien in der Stromversorgung liegen? Um dies zu beantworten wurde die Sensitivität der zwei zentralen Parameter der Lebenszyklusanalyse gegenübergestellt. Die Parameter sind der Fernwärmebedarf pro Quadratmeter und der Anteil erneuerbarer Energien in der Stromversorgung, der durch den Emissionsfaktor des Stroms repräsentiert wird. Anhand des jährlichen Energiebedarfs wurde die Emissionsmenge über die Nutzungsphase von 50 Jahren berechnet und anschließend in die notwendige Anzahl an Buchen zur ökologischen Kompensation umgerechnet. Das Resultat der Sensitivitätsanalyse ist in Abbildung 50 dargestellt.

		Emissionsfaktor Strom [Gramm CO ₂ -Äq. / kWh]										
		0,8841	0,8252	0,7662	0,7073	0,6483	0,5894	0,5305	0,4715	0,4126	0,3536	0,2947
Jährlicher Fernwärme- bedarf [kWh/m ²]	167,91	66.932	63.052	59.171	55.291	51.410	47.530	43.649	39.769	35.888	32.008	28.127
	156,72	66.351	62.470	58.590	54.709	50.829	46.948	43.068	39.187	35.307	31.426	27.546
	145,52	65.769	61.888	58.008	54.127	50.247	46.366	42.486	38.605	34.725	30.844	26.964
	134,33	65.187	61.307	57.426	53.546	49.665	45.785	41.904	38.024	34.143	30.263	26.382
	123,13	64.606	60.725	56.845	52.964	49.084	45.203	41.323	37.442	33.562	29.681	25.801
	111,94	64.024	60.143	56.263	52.382	48.502	44.621	40.741	36.860	32.980	29.100	25.219
	100,75	63.442	59.562	55.681	51.801	47.920	44.040	40.159	36.279	32.398	28.518	24.637
	89,55	62.861	58.980	55.100	51.219	47.339	43.458	39.578	35.697	31.817	27.936	24.056
	78,36	62.279	58.398	54.518	50.637	46.757	42.877	38.996	35.116	31.235	27.355	23.474
	67,16	61.697	57.817	53.936	50.056	46.175	42.295	38.414	34.534	30.653	26.773	22.892
	55,97	61.116	57.235	53.355	49.474	45.594	41.713	37.833	33.952	30.072	26.191	22.311

Abbildung 50: Sensitivitätsanalyse des Emissionsfaktor (Strom) und des jährlichen Bedarfs an Fernwärme

Die Sensitivitätsanalyse verdeutlicht, dass die Lebenszyklusanalyse sehr sensitiv auf den Anteil der erneuerbaren Energien in der Stromversorgung reagiert. Die Halbierung des Emissionsfaktor des Stroms durch die erneuerbaren Energien senkt die Anzahl der notwendigen Buchen um 50%. Die Halbierung des Bedarfs an Fernwärme pro Quadratmeter senkt die Anzahl der notwendigen Buchen um lediglich 3,7%. Dies hat zwei Gründe. Einerseits entspricht der Endenergiebedarf an Strom einem Vielfachen des Wärmebedarfs. Wie bereits in Kapitel 4.4 dargelegt wurde wird dieser Bedarf aufgrund des maschinellen Lernens auf dem Campus für „Life Sciences“ auch zukünftig hochbleiben. Bauliche Maßnahmen können diesen Bedarf nicht reduzieren, da dieser von der spezifischen Nutzung abhängig ist. Die zweite Ursache ist in den Emissionsfaktoren zu finden. Die ausgestoßenen Emissionen einer Kilowattstunde Strom sind

mehr als doppelt so hoch wie die einer Kilowattstunde Fernwärme. Bei (hypothetisch) gleichgroßem Bedarf an Endenergie ergibt sich somit die doppelte Emissionsmenge.

Mit Blick auf die Klimaneutralität bedeutet dies, dass ein besonderer Fokus auf den Anteil der erneuerbaren Energien in der Stromversorgung gelegt werden muss. In Kapitel 4.5 wurde ersichtlich, dass durch die erneuerbaren Energien wiederkehrende Versorgungslücken in der Stromversorgung entstehen. Zukünftig nimmt deshalb die Deckung dieser Lücken eine entscheidende Rolle ein. Das deutsche Stromnetz kann vorrangig zur Deckung genutzt werden. Hierdurch werden der Emissionsfaktor und somit die Emissionsmenge des Laborgebäudes vom Strommix des deutschen Netzes abhängig. Wie bereits in Kapitel 2 erläutert wurde ist der Strommix aktuell (Stand 20.02.2023) nicht klimaneutral. Gemäß den Zielen der Bundesregierung die CO₂-Emissionen bis 2050 um 88% zu senken [54] würde dies bedeuten, dass der Baustart des Campus für „Life Sciences“ erst nach dem Jahr 2050 beginnen kann. Die Hürden und notwendigen Maßnahmen für 100% klimaneutralen Strom durch das deutsche Netz wird in Abschnitt 5.1.1. erläutert.

Durch die Reduktion des Emissionsfaktor des Stroms wird der zeitliche Abgleich der Kompensationsmaßnahmen und der emittierten Treibhausgase erleichtert. Das gebundene CO₂ der Bäume gleicht somit den Großteil der Quartiersemissionen zeitgenau aus. Um dies zu veranschaulichen wurde für den zeitlichen Verlauf drei Varianten modelliert, die sich in den Emissionsfaktoren unterscheiden. Die Basisvariante setzt diesen bei dem Faktor der Studie (0,589 g CO₂-Äq./kWh) an, die zwei weiteren Varianten senken den Faktor jeweils um 25% und um 50%. Der zeitliche Abgleich ist in Abbildung 51 dargestellt.

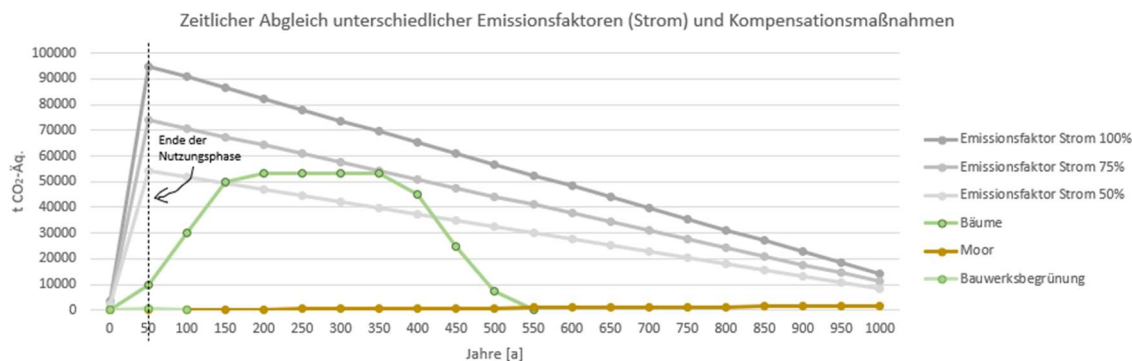


Abbildung 51: Abgleich der ökologischen Kompensation mit den Lebenszyklusemissionen unterschiedlicher Stromemissionsfaktoren (Szenario 1: 100%, Szenario 2: 75%, Szenario 3: 50%)

Um sich der autarken, klimaneutralen Stromversorgung eines Quartiers durch ortsgebundene Maßnahmen zu nähern kommen zwei Strategien in Frage. Die erste Strategie besteht in der bewussten Erzeugung einer Überkapazität, die durch einen Quartierspeicher aufgenommen wird und bedarfsgerecht die Versorgungslücken decken kann. Die zweite Strategie besteht in der Deckung der Grundlast durch ein dezentrales Kleinkraftwerk, das aus Biomasse Strom erzeugt. Für beide Strategien wird eine eigenständige Methodik benötigt, die den zyklischen und Tages- beziehungsweise Jahresabhängigen Ertragsverlauf integriert. Zuvor werden erst die Wege und Hürden für 100% klimaneutralen Strom durch das deutsche Stromnetz diskutiert.

5.1.1. Ausbau erneuerbarer Energien im deutschen Stromnetz

Aufgrund der fossilen Energieträger (Kohle und Erdgas) kann das deutsche Stromnetz die Grundlast und die Versorgungslücken eines Quartiers noch nicht klimaneutral decken. Würde sich das Stromnetz zukünftig ausschließlich mit erneuerbaren Energieträgern betreiben lassen, die in Deutschland verfügbar sind? Welche Hürden stehen dem Ausbau erneuerbarer Energien entgegen und welche politischen Schritte sind hierfür notwendig? Die Umstellung des Strommix des deutschen Stromnetzes zu 100% erneuerbarer Energien ist grundsätzlich bis zum Jahr 2050 möglich [62]. Das Institut für solare Energiesysteme des Fraunhofer-Instituts hat hierfür ein physikalisches Modell des deutschen Stromnetzes entworfen, das keine fossilen Energieträger mehr benötigt und bei dem kein Stromaustausch mit den Nachbarländern stattfinden muss [62]. Der Betrieb dieses Netzes ist mit Ressourcen möglich, die sich ausschließlich in Deutschland finden lassen. Auch aus ökonomischer Sicht sind die Gesamtkosten für Bau, Erhalt und Finanzierung nicht höher als die Kosten, die heute für die Versorgung mit Strom notwendig sind. Darüber hinaus können die steigenden Kosten für die fossilen Energieträger Erdöl und Erdgas umgangen werden. Es fallen lediglich Reinvestitionskosten an, um die Anlagen in Stand zu halten. Es gibt hierbei nicht nur ein optimales System, das die 100% klimaneutrale Energieversorgung durch das deutsche Stromnetz bei gleichbleibenden Kosten sichern kann. Offensichtlich ist jedoch, dass ein massiver Ausbau der erneuerbaren Energien notwendig ist. Hierzu zählt neben dem Ausbau von Windkraftanlagen auf dem Land als auch auf der See der großflächige Ausbau von Photovoltaikanlagen [62].

Auf dem Weg zur 100% klimaneutralen Stromversorgung steigert die Einführung und der Ausbau von intelligenten Stromsystemen (engl. Smart grids) die Effizienz der erneuerbaren Energieträger im Stromnetz [63]. Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromnetz steigen besonders die Anforderungen an die Verteilnetze [63]. Durch die regelungstechnische Steuerung wird die Auslastung verbessert, indem das Angebot besser auf den Bedarf abgestimmt wird [63]. Die intelligenten Stromsysteme übernehmen hierbei nicht nur die Aufgabe, elektrische Energie von den Übertragungsnetzen aufzunehmen, die den Strom an den Endverbraucher weitergeben, sondern haben zunehmend auch die Aufgabe, dezentral erzeugten Strom in höhere Netzebenen einzuspeisen [63]. Sobald die großflächige Speicherung elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen möglich ist, kann diese durch die intelligenten Stromnetze passgenau auf den Bedarf verfügbar gemacht werden. Bis das deutsche Stromnetz zu 100% aus erneuerbaren Energieträgern versorgt wird stellt die Speicherung überschüssiger elektrischer Energie im Quartier eine Alternative dar. Die Speicherung wird im nächsten Abschnitt erläutert.

5.1.2. Speicherung überschüssiger elektrischer Energie im Quartier

Der Speicherung elektrischer Energie geht das Erzeugen einer Überkapazität voraus. Die erneuerbaren Energien werden momentan (Stand: 20.02.2024) vom Stromnetz genommen, sobald ein Überangebot an elektrischer Energie existiert [64]. Dieser Überschuss soll durch einen Quartiersspeicher aufgenommen werden, der diesen bedarfsgerecht zur Deckung der Versorgungslücken und Grundlast verfügbar macht. Anhand des Laborgebäudes wird der Flächenbedarf der Photovoltaik für den notwendigen Überschuss ermittelt. Um den Lastgang des Laborgebäudes mit 100% klimaneutralen Strom zu decken muss die Photovoltaik im Januar einen Überschuss erzeugen, der durch die Speicherung den gesamten Tagesbedarf decken kann. Dies entspricht einem Bedarf von 6.433,3 kWh. Um pro Tag einen Überschuss zu erzeugen, der über den ganzen Monat die Versorgungslücken decken kann, müssen im Januar 192.999 kWh an Strom erzeugt werden. Bei einer durchschnittlichen Erzeugung von 3,3% des jährlichen Ertrags im Januar muss die Fläche der PV-Module von 11.129 m² auf 27.717 m² erhöht werden. Dies entspricht einer Steigerung von 240%. Der Abgleich des angepassten Ertrags und des Lastgangs ist in Abbildung 52 dargestellt.

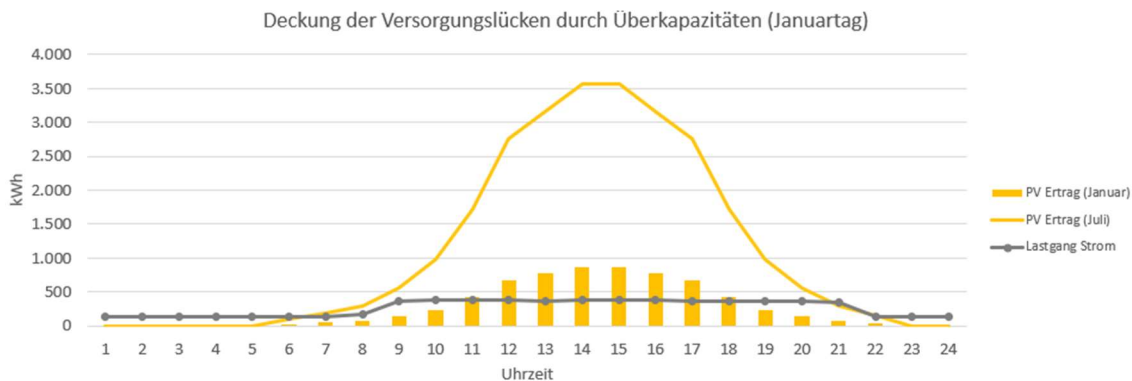


Abbildung 52: Klimaneutrale Stromversorgung durch die Speicherung gezielter Überkapazitäten

Die elektrische Energie kann durch zwei verschiedene Speichermedien aufgenommen werden. An erster Stelle sind dies Batterien, die als Quartierspeicher genutzt werden. Für Wohnquartiere können im Rahmen der Speicherung wirtschaftliche Modelle integriert werden, die zur Anmietung oder Kauf der Speicherkapazität dienen [65]. Neben der Erhöhung der Eigenverbrauchsquote stärkt der Quartierspeicher die soziale Gemeinschaft und die Identifikation der Bewohner mit dem Quartier. Darüber hinaus kann der Speicher neben der Gebäudeversorgung auch Elektroautos laden und hierdurch die nachhaltige Mobilität stützen [65]. In Groß-Ulm kann in einer Wohnbausiedlung ein Quartierspeicher beispielsweise für 25 Haushalte bis zu 274 kWh Strom zwischenspeichern [66]. Die Eigenverbrauchsquote steigt hierdurch auf bis zu 70% [66]. Höhere Speicherkapazitäten sind beispielsweise durch die Kraftwerksbatterie von Bosch möglich. Am Standort Heilbronn kann diese 5MW an Energie speichern und wieder freigeben [67].

Die zweite Möglichkeit der Speicherung elektrischer Energie besteht in flüssigem Wasserstoff, der in Tanks gelagert wird. Der überschüssige Strom der erneuerbaren Energien wird zur Spaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff genutzt. Die „Power-to-Gas“ Technologie basiert auf der Elektrolyse [68]. Für den Quartiersbedarf an Elektrizität wird der Wasserstoff zur Erzeugung von Strom genutzt. Dies geschieht in einer Brennstoffzelle, in der Wasserstoff mit Sauerstoff reagiert und durch die Reaktionsenthalpie eine Turbine angetrieben wird [68]. Das Abfallprodukt dieses Prozesses ist kein Kohlenstoffdioxid, sondern lediglich Wasser [68]. Bisher wird diese Technik jedoch nur für industrielle Zwecke genutzt und geht mit einem Sicherheitsrisiko, der großen Speicherung von Wasserstoff in Tanks in einem Quartier, einher.

5.1.3. Dezentrale Stromversorgung mittels Biomasse-Kleinkraftwerken

Eine Alternative zur Stromspeicherung in einem Quartier stellt die dezentrale Stromerzeugung durch ein Kleinkraftwerk dar. Im Rahmen der Quartiersentwicklung muss dieses als Teil der Versorgungsstruktur mitgeplant werden. Zu den infrage kommenden Energieträgern kommen für die Kraftwerke Biomasse und Biogas [69]. Durch diese wird tages- und jahresunabhängig Strom erzeugt, der neben dem Grundbedarf die Versorgungslücken abdecken kann. Ein Vorteil ergibt sich hierbei durch die Nähe zum Quartier. Aufgrund der geringeren Übertragungsstrecken können hierdurch Übertragungs- und Trafoverluste reduziert werden [69]. Abbildung 53 zeigt die Integration eines Kleinkraftwerks, das für das Labor die Grundlast durch eine stündliche Stromproduktion von 137,5kWh deckt.

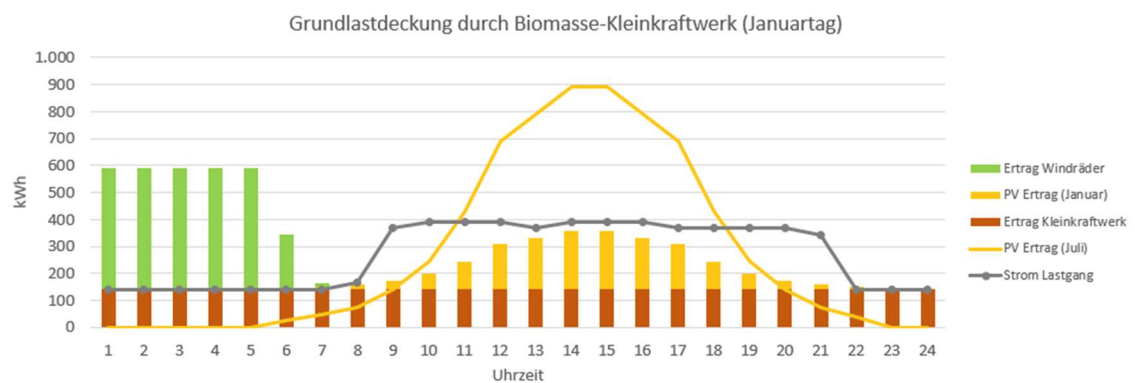


Abbildung 53: Strombedarfsdeckung des Laborgebäudes mittels Biomasse-Kleinkraftwerk

Als Referenz lässt sich hierfür die Müllverbrennungsanlage „Amager Bakke“ in Kopenhagen anführen. Die Müllverbrennungsanlage erzeugt jährlich aus 400.000 Tonnen Müll Elektrizität für 62.500 Haushalte [70]. Durch die Kraftwärme-Kopplung werden zusätzlich 160.000 Haushalte mit Fernwärme versorgt [70].

Aus Sicht der Versorgungssicherheit muss jedoch sowohl bei der Speicherung überschüssigen Stroms als auch bei der Versorgung durch Kleinkraftwerke ein Anschluss des Quartiers an das deutsche Stromnetz vorhanden sein.

6. Fazit

Die Anwendung des planerischen Rahmenwerks verdeutlicht die Komplexität der Sicherstellung der Klimaneutralität in frühen Planungsphasen des Quartiers. Besondere Herausforderungen sind das klimaneutrale Energieversorgungssystem und die effektive, langfristige Kompensation der Emissionen durch ökologische Maßnahmen. In diesem Kapitel wird ein Fazit über das planerische Rahmenwerk gezogen. Hierbei wird das Kennwertesystem mit Blick auf die Skalier- und Übertragbarkeit betrachtet. Daneben wird die Realisierbarkeit der Klimaneutralität in frühen Planungsphasen abschließend bewertet.

6.1.1. Skalier- und Übertragbarkeit des planerischen Rahmenwerks

Der Methodik des planerischen Rahmenwerks liegt die Verknüpfung des jährlichen Energieertrages beziehungsweise der gebundenen CO₂-Menge und einer Bezugseinheit zugrunde. Die Skalierbarkeit der Maßnahmen baut hierauf auf. Doch lässt sich durch diese Methodik auf den Energiebedarf und die Emissionen des Quartiers bedarfsgenau eingehen? In der Energieversorgung wurde durch die Anwendung der Kennwerte ersichtlich, dass durch diese Methodik der jährliche Ertrag rechnerisch dem Quartiersbedarf gleichgesetzt werden kann. Im Tagesverlauf generieren die Maßnahmen in spezifischen Verläufen Energie. Aufgrund der Abhängigkeit der klimaneutralen Stromversorgungsmaßnahmen (PV und Windräder) von der Tages- und der Jahreszeit entstehen wiederkehrende Versorgungslücken. Zwar lassen sich durch die sommerliche Überkapazität fossile Energieträger in dem Strommix verdrängen. Aufgrund der Unvorhersehbarkeit der Windgeschwindigkeit lässt sich die Deckung der Grundlast des Quartiers im Winter nicht garantieren. Hieraus folgt, dass das Kennwertesystem aus Sicht der Klimaneutralität um eine eigenständige Methodik erweitert werden muss, die die lückenlose Deckung des Energiebedarfs ermöglicht.

Unter idealen Bedingungen und mindestens gleichhohen Ertragspotentialen kann die Gültigkeit der Kennwerte in der Übertragung auf weitere Quartiersprojekte angenommen werden. Um dies Sicherzustellen muss neben den mittleren Jahressummen der Sonneneinstrahlung und der Windgeschwindigkeiten die städtebaulichen und nutzungsspezifischen Faktoren geprüft werden. Die Kennwerte stellen hierbei einen abs-

trakten Richtwert dar. Grundsätzlich muss eine orts- und bedarfsgerechte Anpassung und Planung des Energiesystems des Quartiers stattfinden.

Die beschriebene Methodik stellt die Skalierbarkeit der ökologischen Kompensationsmaßnahmen einfacher her, da hier lediglich eine Anpassung des gebundenen CO₂ auf die ausgestoßenen Treibhausgase stattfinden muss. In der Skalierbarkeit sind jedoch durch konstruktive Bedingungen Grenzen gesetzt. Als Beispiel lässt sich hierfür die Fassadenbegrünung anführen, da diese in der Wuchshöhe durch ökologische Faktoren begrenzt wird und auf die Fassadenöffnungen (Türen, Fenster, Lüftungsauslässe) spezifisch angepasst werden müssen. Aus Sicht der Skalierbarkeit stellt die Kompensation durch einen Einzelkennwert, der auf die Emissionsmenge angepasst wird, ein Risiko dar. So erhöht beispielsweise das Anpflanzen einer Monokultur an Buchen das Risiko eines Waldbrandes überproportional. Dies hätte das Freisetzen des gebundenen CO₂ zur Folge. Unter idealen Bedingungen kann innerhalb der gemäßigten Klimazone von einer Übertragbarkeit der ökologischen Kompensationsmaßnahmen auf weitere Quartiersprojekte ausgegangen werden. Analog zur Kennwertbildung der Buche und Tanne kann das Rahmenwerk um weitere Bäume wie die Fichte oder die Lärche erweitert werden. Die Begrenzung auf die gemäßigte Klimazone ist für die Klimaneutralität ein entscheidendes Hemmnis, da der Grundstückserwerb in anderen Breitengraden günstiger ist und die Fläche nicht für den Wohnungsbau benötigt wird. In jedem Fall muss nach der Anwendung der Kennwerte eine konkrete Bilanzierung der Maßnahmen erfolgen, um eine präzise CO₂-Menge zu ermitteln, die gebunden wird.

6.1.2. Sicherstellung der Energieversorgung des Quartiers

Die Studie hat die zentrale Bedeutung des Anteils der erneuerbaren Energien in der Stromversorgung hervorgehoben. Auch zukünftig wird der Strombedarf aufgrund der Quartiersnutzungen und der Weiterentwicklung der Rechenzentren (beispielsweise für 5G oder Cloud Computing) hoch bleiben. Im Abgleich des Ertrages der klimaneutralen Versorgungsmaßnahmen und des Energiebedarfs im Tagesverlauf wurden die Versorgungslücken deutlich. Durch die Abhängigkeit vom deutschen Stromnetz zur Deckung der Versorgungslücken steigen die Emissionen der Nutzungsphase des untersuchten Laborgebäudes überproportional. Zur klimaneutralen Deckung der Versorgungslücken sind zwei Ansätze denkbar. Der erste besteht in der Erzeugung und

Speicherung überschüssigen Stroms und der zweite in der Stromversorgung durch ein dezentrales Biomasse-Kleinkraftwerk. Für die Speicherung der überschüssigen, elektrischen Energie kommen entweder Batterien oder Wasserstoffspeicher in Frage. Die Integration eines Biomasse-Kleinkraftwerkes reduziert zwar Übertragungs- und Trafoverluste, bedeutet jedoch auch höhere Investitionskosten. Aus Sicht der Versorgungssicherheit ist auch zukünftig ein Anschluss des Quartiers an das deutsche Stromnetz notwendig. Auf lange Sicht wird auf Grundlage des Emissionsminderungsziels der Bundesregierung der Emissionsfaktor des deutschen Stromnetzes unter den bisherigen Wert von 435g/kWh [2] sinken. Bis dies realisiert ist stellen die zwei vorgestellten Strategien eine Annäherungsmethode an die klimaneutrale Stromversorgung dar.

Die Wärmeversorgung eines Quartiers gelingt durch die Kombination der Maßnahmen. Dies liegt einerseits an dem gleichbleibend hohen Ertrag, der in der Heizperiode durch die Wärmerückgewinnung aus Serverbetrieb und Kanalisation ganzjährig dem Wärmespeichertank zugeführt wird. Daneben heizen die Wärmequellen das Heizmedium des Puffer-Speichers auf, wodurch die Wärme auch zu einem späteren Zeitpunkt durch den Heizkreislauf zur Verfügung gestellt werden kann. Die Hemmnisse der Wärmeversorgung bestehen in den städtebaulichen Voraussetzungen und den spezifischen Nutzungen des Quartiers. Für die Anwendung muss beispielsweise ein Rechenzentrum oder ein Kanalisationsrohr mit ausreichendem Durchmesser in unmittelbarer Nähe des Quartiers vorhanden sein.

6.1.3. Dauerhaftigkeit der ökologischen Kompensationsmaßnahmen

In der Kennwertbildung der ökologischen Kompensationsmaßnahmen wurde anhand der Erneuerungsraten der große Zeitraum ersichtlich, über den die Maßnahmen zum Ausgleich der Treibhausgase erhalten bleiben müssen. Hieraus lässt sich folgern, dass auf Grundlage der linearen CO₂-Bindung und der CO₂-Gesamtbindung eine eigenständige Methodik für den zeitgenauen Abgleich entwickelt werden muss. Während die Bauwerksbegrünung einen geringen, kurzfristigen, abfedernden Effekt zeigt können die Bäume aus zeitlicher Sicht die Hauptlast der Emissionen ausgleichen. Die Moore erreichen die CO₂-Gesamtbindung hingegen erst nach einem langen Zeitraum. Im Rahmen der Dauerhaftigkeit der Maßnahmen sind auch die möglichen Änderungen der Freifläche oder der Nutzungen in einem Quartier zu beachten. Diese treten bereits

ein, wenn sich ein Großteil der ausgestoßenen Emissionen immer noch in der Atmosphäre befindet. Mit dem Rückbau des Quartiers endet jedoch auch der kompensierende Effekt eines Teils der ökologischen Maßnahmen.

Um die Dauerhaftigkeit der ökologischen Kompensationsmaßnahmen zu gewährleisten kann die durch den Rückbau freigesetzte CO₂-Menge als Überkapazität in die ortsungebundenen Kompensationsmaßnahmen integriert werden. Besonders durch die Maßnahmenkombination bekräftigen sich durch die gegenseitigen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen die zusätzlichen Effekte. Hierbei entstehen aus Sicht der Dauerhaftigkeit zwei zentrale Aspekte. Einerseits müssen die konkurrierenden Nutzungen einer Fläche abgewogen werden, um den Fortbestand der ökologischen Kompensationsmaßnahmen zu sichern. So kommen für einen Acker neben der Nahrungsmittelproduktion die Nutzung als Wohn- oder Industriefläche, als Wald oder als Weidefläche in Frage. Hieraus folgt, dass die Ortswahl in der Planung anhand dieser Abwägung stattfinden muss. Daneben sollten (wie im vorherigen Kapitel erwähnt) aus Sicht der Risikominimierung mehrere, differenzierte Kompensationsmaßnahmen gewählt werden, die geographisch voneinander getrennt sind. In diesem Zusammenhang ist frühzeitig die Verlagerung von Emissionen zu prüfen, die entstehen würde, wenn durch die ökologischen Maßnahmen die Emissionen an anderer Stelle doch auftreten würden.

Abschließend lässt sich feststellen, dass sich in der ökologischen Kompensation ein klarer Planungsprozess darstellt. Dieser beginnt mit den quartiersbezogenen Maßnahmen, die in der Bauwerksbegrünung und der Freiflächenplanung bestehen. Für die anschließende, ortsungebundene Kompensation eignet sich besonders die Renaturierung von Wäldern und bestehenden Ökosystemen. In diesen Prozess lässt sich neben der zeitlichen Methodik ein System zur Risikoanalyse- und Quantifizierung integrieren.

6.1.4. Realisierbarkeit der Klimaneutralität in frühen Planungsphasen des Quartiers

In dieser Arbeit wurde ein planerisches Rahmenwerk entwickelt, dass die Klimaneutralität in den frühen Planungsphasen garantiert. Das Kennwertesystem gibt hierbei klare Richtwerte vor, die eine Transparenz und Vergleichbarkeit der Maßnahmen herstellen. Doch welche zusätzlichen Planungsschritte müssen in der Realität vorgenommen werden? Einerseits muss nach der Anwendung der Kennwerte eine präzise Planung

des Energiesystems erfolgen, da der Ertrag der Versorgungsmaßnahmen über den Tag und das Jahr Schwankungen und Ausfällen ausgesetzt ist. Daneben weicht die Vegetation in der Realität von der CO₂-Gesamtbindung der Kennwerte ab. Während hier beispielsweise eine idealisierte Wuchshöhe der Bäume festgelegt ist, können diese in der Realität aufgrund von Ortsbedingungen deutlich höher oder kleiner werden. Deshalb muss auch für die ökologischen Kompensationsmaßnahmen nach der Anwendung der Kennwerte eine präzise Bilanzierung stattfinden.

Mit Blick auf die ambitionierten Ziele der Bundesregierung der Senkung der Treibhausgasemissionen wird sich der Anteil der erneuerbaren Energien in der Strom- und Wärmeversorgung kontinuierlich erhöhen. Hieraus folgt, dass sich die Klimabilanz von Quartieren zukünftig bessern wird, da die Versorgungslücken über die öffentlichen Netze klimaneutral geschlossen werden können. Sobald die Energie zu 100% aus erneuerbaren Quellen gewonnen wird besteht im Rahmen der Klimaneutralität die Herausforderung in dem Senken der Emissionen der Baukonstruktion.

In diesem Zusammenhang ist die notwendige Langlebigkeit des Quartiers hervorzuheben. Das planerische Rahmenwerk legt die Grundlage für ein klimaneutrales Quartiersprojekt. In der Planung müssen jedoch zukunftsweisende Entscheidungen mit Blick auf sozial nachhaltige Nutzungen, die Integration klimafreundlicher Mobilitätskonzepte und die Identifikation der Bewohner durch eine sinnstiftende Quartiersgestaltung getroffen werden. Durch das Zusammenbringen dieser Aspekte behält das Quartier auch über die kommenden Jahrzehnte und Jahrhunderte seine Aktualität und seinen Erhaltungswert.

Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt, „umweltbundesamt.de“, Umweltbundesamt, 16 10 2023. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Kraftwerke>. [Zugriff am 16 11 2023].
- [2] L. Sander, „Strommix Deutschland: Wie hoch ist der Anteil erneuerbarer Energien?“, 17 August 2023. [Online]. [Zugriff am 06 November 2023].
- [3] Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., „Überblick - Fakten und Antworten zur Fernwärme“, AGFW, [Online]. Available: <https://www.agfw.de/energiewirtschaft-recht-politik/energie-wende-politik/ueberblick-fakten-und-antworten-zu-fernwaerme>. [Zugriff am 16 12 2023].
- [4] SWM, „M/Fernwärme“, [Online]. Available: <https://www.swm.de/geschaeftskunden/fernwaerme>. [Zugriff am 08 01 2024].
- [5] Ökobaudat, „Prozess-Datensatz: Beton C20/25 XC1 XC2 F3 16 M ECOPact, Rezept Nummer DI3234-BHFS Version 1, Transportbetonwerk Balve, Germany (de)“, [Online]. Available: https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=75db1c10-6002-4fa2-9cc9-aae4fb7e8345&version=00.01.000&stock=OBD_2023_I&lang=de. [Zugriff am 08 01 2024].
- [6] Ökobaudat, „Prozess-Datensatz: Brettsper Holz (Durchschnitt DE)“, [Online]. Available: https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=8c4eb262-9ae6-4ace-8f3d-0b06f2007f3e&version=00.00.027&stock=OBD_2023_I&lang=de. [Zugriff am 08 01 2024].
- [7] TECHMASTER, „Ertrag einer Photovoltaikanlage: Was bedeutet kWh pro kWp?“, TECHMASTER, 26 10 2019. [Online]. Available: <https://www.techmaster.de/2019/10/26/ertrag-einer-photovoltaikanlage-was-bedeutet-kwh-pro-kwp/#:~:text=Als%20Faustregel%20gilt%3A%20Eine%20Photovoltaikanlage,run d%206.900%20kWh%20Ertrag%20rechnen..> [Zugriff am 01 01 2024].
- [8] Energie-atlas Bayern, „Energie-atlas Bayern“, [Online]. Available: <https://www.karten.energieatlas.bayern.de/start/?c=685406,5375455&z=8&l=atki s,4a204108-1905-45a4-a119-4d1553058864&t=solar>. [Zugriff am 16 12 2023].
- [9] „pv-portal-thueringen.de“, Photovoltaik Portal Thüringen, [Online]. Available: <https://www.pv-portal-thueringen.de/planungshilfe/>. [Zugriff am 17 11 2023].
- [10] J. Bukrhardt, „Photovoltaik Neigungswinkel – Tabelle, Ertrag & Optimum“, 26 06 2022. [Online]. Available: <https://echtsolar.de/photovoltaik-neigungswinkel/>. [Zugriff am 14 01 2024].
- [11] stromrechner.com, „Wieviel Strom produziert ein Windrad?“, Stromrechner.com, [Online]. Available: <https://stromrechner.com/wie-viel-strom-produziert-ein-windrad/>. [Zugriff am 01 01 2024].
- [12] Wikipedia, „Wikipedia“, [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Windkraftanlage#Anlauf->

- _und_Abschaltwindgeschwindigkeit. [Zugriff am 16 12 2023].
- [13] K.-. u. U. Deutscher Wetterdienst, „Windkarten zur mittleren Windgeschwindigkeit,“ [Online]. Available: https://www.dwd.de/DE/leistungen/windkarten/deutschland_und_bundeslaender.html. [Zugriff am 17 11 2023].
- [14] N. Kümpel, „wegatech.de,“ 15 09 2023. [Online]. Available: <https://www.wegatech.de/ratgeber/kleinwindkraftanlage/#:~:text=Doch%20mit%20wieviel%20Ertrag%20kann,etwa%20100%20kWh%20pro%20Jahr..> [Zugriff am 17 11 2023].
- [15] P. D.-I. S. L. (Projektleitung), „Abschlussbericht zum Forschungsprojekt "Innovative Abwärmenutzung aus Rechenzentren in Hessen am Beispiel Offenbach",“ p. 64, 2023.
- [16] G. Doormann, „Solaranlagen Portal,“ Solaranlagen Portal, 06 07 2023. [Online]. Available: <https://www.solaranlagen-portal.com/solarthermie/kollektoren/vergleich-flachkollektor-roehrenkollektor>. [Zugriff am 16 12 2023].
- [17] Ofenseite.com, „Sparen mit Sonnenenergie: Wie Sie Ihren Solarertrag berechnen,“ Ofenseite.com, 23 05 2023. [Online]. Available: <https://www.ofenseite.com/solarthermie-ertrag-berechnen>. [Zugriff am 01 01 2024].
- [18] Ingenieurbüro Junge, „Thermische Solaranlage,“ [Online]. Available: <https://www.xn--ing-bro-junge-0ob.de/html/solarthermie.html#:~:text=Daraus%20k%C3%B6nnen%20in%20Deutschland%20je,kWh%20an%20Sonnenw%C3%A4rme%20gewonnen%20werden..> [Zugriff am 01 01 2024].
- [19] B. K. Rene Buri, „Wärmenutzung aus Abwasser - Leitfaden für Inhaber, Betreiber,“ Bern / Zürich, 2004.
- [20] K. Janßen, „Photovoltaik-Ertrag – so viel leistet Ihre PV-Anlage,“ Grünes Haus, 11 01 2024. [Online]. Available: <https://gruenes.haus/photovoltaik-pv-ertrag/#:~:text=Ertrag%20von%20Photovoltaik%20im%20Jahresverlauf,Monat%20ist%20dabei%20der%20Juni..> [Zugriff am 17 01 2024].
- [21] Umwelt Bundesamt, „Freiwilliger Ratgeber zur CO2-Kompensation durch Klimaschutzprojekte“.
- [22] Umwelt Bundesamt, „Die Treibhausgase,“ 14 11 2022. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>. [Zugriff am 16 12 2023].
- [23] V. MRasek, „Deutschlandfunk.de,“ 15 11 2015. [Online]. Available: <https://www.deutschlandfunk.de/1-jahrtausend-der-lange-atem-des-co-100.html>.
- [24] S. Horikoshi, „Synthesis of Recyclable Magnetic Cellulose Nanofibers from Ionic Liquids for Practical Applications in Separation Science,“ *ResearchGate*, p. 743, 2021.
- [25] Stiftung Unternehmen Wald, „wald.de,“ [Online]. Available: <https://www.wald.de/waldwissen/wie-viel-kohlendioxid-co2-speichert-der-wald-bzw-ein-baum/>. [Zugriff am 16 12 2023].
- [26] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, „Kohlenstoffspeicherung von Bäumen,“ [Online]. Available: <https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/mb-27-kohlenstoffspeicherung-2.pdf>. [Zugriff am 16 12 2023].

- [27] W. Freitag, „Wald, Waldnutzung,“ Historisches Lexikon Bayerns, 12 01 2012. [Online]. Available: https://www.historisches-lexikon-bayerns.de/Lexikon/Wald,_Waldnutzung. [Zugriff am 16 12 2023].
- [28] Baumschule direkt, „Rotbuche im 1L Container, 30-50cm,“ [Online]. Available: <https://www.baumschuledirekt.de/Laubhecken/Rotbuche/Rotbuche-Buche-Fagus-sylvatica-im-1L-Container-30-50cm::702.html>. [Zugriff am 16 12 2023].
- [29] S. Hein, „Wertholzproduktion mit Buche, Eiche, Esche und Ahorn,“ Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden Württemberg, 04 10 2007. [Online]. Available: <https://www.waldwissen.net/de/waldwirtschaft/waldbau/bestandesspflege/wertholzproduktion-im-laubholz>. [Zugriff am 16 12 2023].
- [30] A. G. Feldhaus, „Rotbuche,“ Mein schöner Garten, 31 10 2023. [Online]. Available: <https://www.mein-schoener-garten.de/pflanzen/rotbuche/rotbuche>. [Zugriff am 16 12 2023].
- [31] C. Schulz, „Wieviel CO2 speichert ein Baum pro Jahr?,“ 09 12 2022. [Online]. Available: <https://www.fortomorrow.eu/de/post/co2-baum>. [Zugriff am 16 12 2023].
- [32] Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, „Biologisches Alter von Bäumen,“ [Online]. Available: <https://totholz.wsl.ch/de/walddynamik/alte-waldbestaende-und-altholzinseln/alter-von-baeumen/#:~:text=Als%20ungef%C3%A4hre%20artenspezifische%20maximale%20Altersgrenzen,europ%C3%A4ischen%20Eiben%20Linden%20und%20Arven..> [Zugriff am 16 12 2023].
- [33] Wikipedia, „Tannen,“ [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Tannen>. [Zugriff am 16 12 2023].
- [34] H. U. Bucher und M. Sieber, „Faktenblätter zur Weisstanne,“ Fachstelle für Gebirgswaldpflege (GWP), [Online]. Available: https://www.gebirgswald.ch/tl_files/gebirgswald/de/01_Dokumente_GWP/Weisstanne/FaktenblaetterTanne_gesamt.pdf. [Zugriff am 29 12 2023].
- [35] Optigrün - Die Dachbegrüner, „Extensive Dachbegrünung. Naturnahe Vegetation mit minimalem Pflegeaufwand,“ [Online]. Available: <https://www.optigruen.de/fachthemen/extensive-dachbegruenung>. [Zugriff am 16 12 2023].
- [36] T. S. I. A. Herfort Susanne, „CO2-Bindungsvermögen der für die Bauwerksbegrünung typischen Pflanzen,“ Saarbrücken, 2012.
- [37] Verband für Bauwerksbegrünung, „grünstattgrau.at,“ 26 03 2009. [Online]. Available: <https://www.gruenstattgrau.org/wp-content/uploads/2016/10/Kohlendioxid.pdf>. [Zugriff am 16 12 2023].
- [38] Zinco, „Intensive Dachbegrünungen - gepflegte Gartenanlagen auf genutzten Flachdächern,“ [Online].
- [39] Umwelt Bundesamt, „Urbanscape - Dachbegrünung mit System,“ [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgenanpassung/werkzeuge-der-anpassung/tatenbank/urbanscape-dachbegruenung-system>. [Zugriff am 17 12 2023].
- [40] Fachvereinigung Bauwerksbegrünung E.V. (FBB), „Grüne Innovation Fassadenbegrünung,“ p. 12.
- [41] Bundesverband Gebäudegrün e.V. (BuGG) Berlin, „Förderrichtlinie Dach- und Fassadenbegrünung - Machbarkeitsstudie,“ Berlin, 2022.

- [42] Wikipedia, „Dreispitziige Jungfernebe,“ Wikipedia, [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Dreispitziige_Jungfernebe. [Zugriff am 15 01 2024].
- [43] S. Drexler, „Klimaschutz durch Hecken: Erste Ergebnisse aus dem Projekt CarbonHedge,“ Thünen-Institut für Agrarklimaschutz, Braunschweig, 2021.
- [44] Nabu.de, „Die unterschätzten Klimaschützer - Moore als Kohlenstoffspeicher,“ [Online]. Available: <https://www.nabu.de/natur-und-landschaft/moore/moore-und-klimawandel/13340.html>. [Zugriff am 17 12 2023].
- [45] C. S. Daniel Klein, „Die Kohlenstoffbilanz der bayerischen Forst- und Holzwirtschaft,“ Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, 2012.
- [46] Wikipedia, „Moore,“ Wikipedia, [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Moor>. [Zugriff am 16 12 2023].
- [47] D. K. S. H. R. R. B. U. M. S. Friedericke Bleckmann, „Kompost nutzen, Moore schützen,“ Bayerisches Landesamt für Umwelt, Otilien, 2017.
- [48] S. Giesler, „Bioökonomie - BW,“ © BIOPRO Baden-Württemberg GmbH, 14 06 2022. [Online]. Available: <https://www.biooekonomie-bw.de/fachbeitrag/aktuell/klimaschutzfaktor-moore-co2-binden-statt-freisetzen>. [Zugriff am 17 12 2023].
- [49] Bundesinformationszentrum Landwirtschaft, „Wieviel CO2 binden landwirtschaftlich genutzte Böden?,“ 10 08 2023. [Online]. Available: <https://www.landwirtschaft.de/landwirtschaft-verstehen/wie-funktioniert-landwirtschaft-heute/wie-viel-co2-binden-landwirtschaftliche-boeden>. [Zugriff am 16 12 2023].
- [50] Deutschlandfunk, „Beste Böden entstehen, wenn Tiere grasen,“ 20 12 2017. [Online]. Available: <https://www.deutschlandfunk.de/landwirtschaft-beste-boeden-entstehen-wenn-tiere-grasen-100.html>. [Zugriff am 17 12 2023].
- [51] A. Schubert, „Organisch gebundener Kohlenstoff im Waldboden,“ *LWF aktuell*, pp. 11-14, 2010.
- [52] Max-Planck-Institut für Biochemie, „Karsten Borgwardt - Forschungsabteilung maschinelles Lernen und Systembiologie,“ [Online]. Available: <https://www.biochem.mpg.de/de/borgwardt>. [Zugriff am 29 12 2023].
- [53] A. Kühl, „PV-Ertrag - So viel Strom produziert deine Photovoltaikanlage,“ Zolar, 14 12 2023. [Online]. Available: <https://www.zolar.de/blog/photovoltaik-ertrag>. [Zugriff am 29 12 2023].
- [54] D. Brumme, „Wärmespeicher: Solarthermie aus der Konserve – was geht?,“ 16 08 2016. [Online]. Available: <https://blog.paradigma.de/waerme-speichern-ueberblick/>. [Zugriff am 16 01 2024].
- [55] Umweltbundesamt, „Treibhausgasminderungsziele Deutschlands,“ Umweltbundesamt, 02 05 2023. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgasminderungsziele-deutschlands>. [Zugriff am 16 01 2024].
- [56] P. Jüttemann, „Abstände von Kleinwindkraftanlagen zu Gebäuden und Nachbarn,“ [Online]. Available: <https://www.kleinwindkraftanlagen.com/basisinfo/abstaende/>. [Zugriff am 20 02 2024].
- [57] Amazon, „2000W Windkraftanlagen Vertikale 24v 48v 96V 220V Windgenerator für Heimgebrauch Windräder Weiß Grün Klinge 2KW Windturbine (48V mit weißer Klinge),“ [Online]. Available: https://www.amazon.de/Windkraftanlagen-Vertikale-Windgenerator-Heimgebrauch-Windturbine/dp/B0CB8234J6/ref=asc_df_B0CB8234J6/?tag=googshopde

Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Dezentrale_Stromerzeugung. [Zugriff am 16 01 2024].

- [73] Wikipedia, „Amager Bakke,“ Wikipedia, 17 11 2023. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Amager_Bakke. [Zugriff am 16 01 2024].
- [74] Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB), „DGNB veröffentlicht Studie zu CO₂-Emissionen von Bauwerken,“ Stuttgart, 2021.
- [75] Genway, „amazon.com,“ Amazon, [Online]. Available: https://www.amazon.de/Genway-Windkraftanlage-Netzkopplung-Windgenerator-Hocheffizient/dp/B0BLJL7P5S?source=ps-sl-shoppingads-lpcontext&ref_=fp_lfs&smid=A1U77STPQZHHQK&th=1. [Zugriff am 16 12 2023].
- [76] J. Muntendorf, „Wieviel Kohlenstoffdioxid (CO₂) speichert der Baum bzw. der Wald?,“ Stiftung Unternehmen Wald, [Online]. Available: <https://www.wald.de/waldwissen/wie-viel-kohlendioxid-co2-speichert-der-wald-bzw-ein-baum/#:~:text=B%C3%A4ume%20speichern%20CO2%20%E2%80%93%20Kohlendioxid%20Kompensation,Verbrennung%20des%20Baumes%20wieder%20frei.> [Zugriff am 29 12 2023].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grafische Darstellung des planerischen Rahmenwerks (maßstabslos)	10
Abbildung 2: Forschungsstandort der Max-Planck-Gesellschaft in Martinsried (Lageplan, maßstabslos).....	11
Abbildung 3: Kennwertbildung der CO ₂ -Reduktionsmaßnahmen	14
Abbildung 4: Kennwertbildung der CO ₂ -Kompensationsmaßnahmen	16
Abbildung 5: Prozessabfolge der Anwendung des planerischen Rahmenwerks	18
Abbildung 6: Entwicklung des Emissionsfaktors des deutschen Strommixes (Quelle: Lalon Sander)	19
Abbildung 7: Emissionen der Brettsperrholzplatten als Baukonstruktionsmaterial.....	21
Abbildung 8: Kennwert der monokristallinen Photovoltaik-Module	25
Abbildung 9: Kennwert der Windräder	27
Abbildung 10: Kennwert der Wärmerückgewinnung aus der Serverabwärme	29
Abbildung 11: Kennwert der Vakuumröhrenkollektoren (Solarthermie)	30
Abbildung 12: Kennwert der Wärmerückgewinnung aus Abwasser	32
Abbildung 13: Ertrag einer monokristallinen Photovoltaikzelle im Tagesverlauf	33
Abbildung 14: CO ₂ -Bindung und Kohlenstoffspeicherung in den Pflanzenzellen.....	35
Abbildung 15: Zeitliche Übereinstimmung der Treibhausgase und der Kompensationsmaßnahmen	37
Abbildung 16: Methodik der Kennwertbildung einer Buche	39
Abbildung 17: Kennwert der Buche (CO ₂ -Einzelkompensationsmaßnahme)	40
Abbildung 18: Kennwert der Tanne (CO ₂ -Einzelkompensationsmaßnahme)	41
Abbildung 19: Kennwert der extensiven Dachbegrünung (Bauwerksbezogene CO ₂ -Kompensation)	42
Abbildung 20: Kennwert der intensiven Dachbegrünung (Bauwerksbezogene CO ₂ -Kompensation)	42
Abbildung 21: Kennwert der fassadengebundenen Begrünung (Bauwerksbezogene CO ₂ -Kompensation)	44
Abbildung 22: Kennwert der bodengebundenen Fassadenbegrünung (Bauwerksbezogene CO ₂ -Kompensation)	45
Abbildung 23: Kennwert der Hecken (Naturfläche)	46
Abbildung 24: Kennwert der Moore (Naturfläche)	48
Abbildung 25: Kennwert der Weidefläche als CO ₂ -Kompensationsmaßnahme (Naturfläche)	49
Abbildung 26: Kennwertbildung der Waldböden als CO ₂ - Kompensationsmaßnahme (Naturfläche)	50
Abbildung 27: Übersicht der CO ₂ -Speicherung der Kompensationsmaßnahmen	51
Abbildung 28: Endenergieverbraucht (gesamt und im Jahresverlauf) der Bestandsbebauung in Martinsried	53
Abbildung 29: Auswertung der Zählerstände des Tierhauses (Biologische Intelligenz).....	54
Abbildung 30: Raumbedarfsplan des Campus für „Life-Sciences“ in Martinsried	55

Abbildung 31: Bauteilaufbau des Innenausbaus und der Geschossdecken des Laborgebäudes	56
Abbildung 32: Bauteilaufbau der thermischen Hüllfläche des Laborgebäudes	56
Abbildung 33: LCA-Ergebnis der Baukonstruktion in Tonnen CO ₂ -Äquivalenten.....	57
Abbildung 34: Spezifischer jährlicher Energiebedarf und Emissionen der Nutzungsphase (50a)	59
Abbildung 35: Lastgang des Laborgebäudes im Tagesverlauf	60
Abbildung 36: Verfügbare Freifläche und Hüllfläche des Laborgebäudes (Martinsried).....	61
Abbildung 37: Deckung des Strombedarfs durch die Photovoltaik (35°-Winkel, Südausrichtung) im Januartag.....	62
Abbildung 38: Deckung des Strombedarfs durch die Photovoltaik (35°-Winkel, Südausrichtung) und die Windräder im Januartag	63
Abbildung 39: Anwendung des Kennwerts der Serverwärme auf den Lastgang des Laborgebäudes.....	64
Abbildung 40: Kombination der Kennwerte des Wärmebedarfs (Wärmerückgewinnung aus Servern und der Kanalisation)	65
Abbildung 41: Energieversorgung durch die Maßnahmenkombination.....	66
Abbildung 42: Ökologische CO ₂ -Kompensation eines Laborgebäudes des Campus für „Life-Sciences“	67
Abbildung 43: Quartiersbezogene Kompensation der CO ₂ -Emissionen (MPG Martinsried)	69
Abbildung 44: Kompensationsmaßnahmen außerhalb des Quartiers.....	71
Abbildung 45: Quartiersgebundene Klimaneutralität durch das planerische Rahmenwerk	73
Abbildung 46: Windräder inklusive Abstandsfläche 1H (r = 8,5m)	74
Abbildung 47: Wechselwirkung und Abhängigkeiten der ökologischen Kompensationsmaßnahmen.....	75
Abbildung 48: Variation des Ertrags der PV und der Windräder nach Breitengrad	78
Abbildung 49: Einsatzbereich der ökologischen Kompensationsmaßnahmen des planerischen Rahmenwerks	80
Abbildung 50: Sensitivitätsanalyse der Emissionen der Energieversorgung	82
Abbildung 51: Optimierung der ökologischen Kompensation durch verbesserten Emissionsfaktor (Strom)	83
Abbildung 52: Klimaneutrale Stromversorgung durch die Speicherung überschüssigen Stroms	86
Abbildung 53: Bedarfsdeckung des Laborgebäudes mittels Biomasse-Kleinkraftwerk.....	87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bezugseinheiten der klimaneutralen Energieversorgungsmaßnahmen	14
Tabelle 2: Jahresertrag an Endenergie der klimaneutralen Energieversorgungsmaßnahmen	23
Tabelle 3: Nennleistung und Jahresertrag von Photovoltaikmodule im 35°-Winkel (Idealbedingungen)	24
Tabelle 4: Abgleich von Nennleistung und jährlichem Endenergieertrag unterschiedlicher Windradhersteller	26
Tabelle 5: Studienergebnisse zur Wärmerückgewinnung aus Servern in Offenbach (Frankfurt).....	28
Tabelle 6: Abgleich der Nennleistung von Vakuumröhrenkollektoren unterschiedlicher Hersteller	30
Tabelle 7: Vergleich von Anlagen zur Wärmerückgewinnung aus der Kanalisation	32
Tabelle 8: Verweildauer von Treibhausgasen in der Atmosphäre	35
Tabelle 9: Übersicht der CO ₂ -Kompensationsmaßnahmen	38
Tabelle 10: LCA-Ergebnis der Strombedarfs eines modularen Laborgebäudes	58
Tabelle 11: LCA-Ergebnis des Fernwärmebedarfs eines modularen Laborgebäudes	58
Tabelle 12: Ökologische Einzelkompensationsmaßnahmen	68
Tabelle 13: Quartiersbezogene Kompensationsmaßnahmen.....	70
Tabelle 14: CO ₂ -Reduktionsmaßnahmen außerhalb des Quartiers.....	71
Tabelle 15: Zusätzliche Funktionalität der Kompensationsmaßnahmen.....	77
Tabelle 16: Ermittlung des jährlichen Ertrags auf Grundlage von Ertragsrechner.....	103
Tabelle 17: Lastgang Laborgebäude I.....	104
Tabelle 18: Lastgang Laborgebäude II.....	104

Anhang

Kapitel 3.2. Ausgangslage der Emissionen der Baukonstruktion

Ökobaudat: Beton C20/25 Holcim Werk in Frankfurt:

https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=75db1c10-6002-4fa2-9cc9-aae4fb7e8345&version=00.01.000&stock=OBD_2023_I&lang=de

Indikator ↕	Einheit ↕	Herstellung A1-A3	Transport A4	Einbau A5	Nutzung B1	Abbruch C1	Transport C2	Abfallbehandlung C3	Beseitigung C4	Recyclingpotential D
Globales Wärmepotentialtotal (GWP-total)	kg CO ₂ e	145.5	3.26	1.329	-5.076	8.64	9.43	3.785	0	-9.441

Ökobaudat: Brettsperrholz Thünen-Institut für Holzforschung:

https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=8c4eb262-9ae6-4ace-8f3d-0b06f2007f3e&version=00.00.027&stock=OBD_2023_I&lang=de

Indikator ↕	Einheit ↕	Rohstoffbereitstellung A1	Herstellung A1-A3	Transport A2	Herstellung A3	Einbau A5 Entsorgung Verpackung (Standardszenario)	Transport C2	Abfallbehandlung C3	Recyclingpotential D energetisch (Standardszenario)	Recyclingpotential D stofflich
Globales Erwärmungspotentialtotal (GWP-total)	kg CO ₂ -Äqv.	-731	-669.6	9.119	52.28	1.767	0.641	798.7	-238.7	-11.18

Kapitel 3.3.1. Kennwertbildung der Photovoltaik

Tabelle 16: Ermittlung des jährlichen Ertrags auf Grundlage von Ertragsrechner (solarserver.com)

Hersteller	Nennleistung / m ²	Ertragsrechner	Berechneter Ertrag / Jahr
Boviet – Solarmodul BMV6610MS (mono)	205,9Wp	Solarserver	262kWh
JA Solar JAM54S30-415/MR	212Wp	Solarserver	269kWh
Trina Solarmodul VertexS	216Wp	Solarserver	274kWh
<i>Durchschnitt</i>	<i>211Wp</i>		<i>268,3kWh</i>

Quelle Solarserver:

<https://www.solarserver.de/pv-anlage-online-berechnen/>

Kapitel 4.4. Auswertung der Ergebnisse der IDA ICE Simulation und der Lebenszyklusanalyse des Laborgebäudes

Modellierter Lastgang des Laborgebäudes im Tagesverlauf auf Grundlage des Energiebedarfs:

Tabelle 17: Lastgang Laborgebäude I

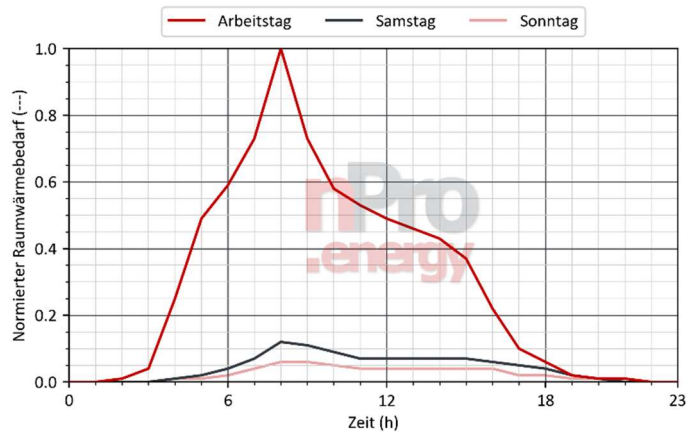
<i>Uhrzeit</i>	<i>00:00</i>	<i>01:00</i>	<i>02:00</i>	<i>03:00</i>	<i>04:00</i>	<i>05:00</i>	<i>06:00</i>	<i>07:00</i>	<i>08:00</i>	<i>09:00</i>	<i>10:00</i>	<i>11:00</i>
<i>Strombedarf [kWh]</i>	137,5	137,5	137,5	137,5	137,5	137,5	137,5	165,5	369,2	389,4	389,4	389,4
<i>Wärmebedarf [kWh]</i>	0	0	30	50	100	250	400	600	900	500	450	350

Tabelle 18: Lastgang Laborgebäude II

<i>Uhrzeit</i>	<i>12:00</i>	<i>13:00</i>	<i>14:00</i>	<i>15:00</i>	<i>16:00</i>	<i>17:00</i>	<i>18:00</i>	<i>19:00</i>	<i>20:00</i>	<i>21:00</i>	<i>22:00</i>	<i>23:00</i>
<i>Strombedarf [kWh]</i>	369,2	389,4	389,4	389,4	369,2	369,2	369,2	369,2	341,2	137,5	137,5	137,5
<i>Wärmebedarf [kWh]</i>	300	280	250	120	70	30	10	5	3	2	0	0

Bedarfsprofil von „npro“ für Büroräume:

<https://www.npro.energy/main/de/load-profiles/office>



Kapitel 5. Ausblick: 100% klimaneutrale Energieversorgung

Lebenszyklusemissionen für den Parameter Emissionsfaktor Strom [g. CO₂/kWh] und den jährlichen Bedarf an Fernwärme [kWh/m²]:

Tabelle 19: Lebenszyklusemissionen für variierende Emissionsfaktoren und Fernwärmebedarf

		<i>Emissionsfaktor Strom [g. CO₂/kWh]</i>										
Jährlicher Fernwärmebedarf [kWh/m ²]		0,8841	0,8252	0,7662	0,7073	0,6483	0,5894	0,5305	0,4715	0,4126	0,3536	0,2947
	167,91	133.86	126.10	118.34	110.58	102.82	95.059	87.298	79.537	71.776	64.015	56.254
		4.442	3.458	2.475	1.492	0.509	.525	.541	.558	.574	.591	.608
	156,72	132.70	124.94	117.17	109.41	101.65	93.896	86.135	78.374	70.613	62.852	55.091
		1.129	0.146	9.162	8.179	7.196	.212	.229	.245	.262	.278	.295
	145,52	131.53	123.77	116.01	108.25	100.49	927.32	84.971	77.210	69.449	61.688	53.927
		7.816	6.833	5.850	4.866	3.883	8.99	.916	.932	.949	.966	.982
134,33	130.37	122.61	114.85	107.09	99.330	91.569	83.808	76.047	68.286	60.525	52.764	
	4.504	3.520	2.537	1.553	.570	.587	.603	.620	.636	.653	.669	
123,13	129.21	121.45	113.68	105.92	98.167	90.406	82.645	74.884	67.123	59.362	51.601	
	1.191	0.208	9.224	8.241	.257	.274	.290	.307	.323	.340	.357	

	111,94	128.04 7.878	120.28 6.895	112.52 5.911	104.76 4.928	97.003 .945	89.242 .961	81.481 .978	73.720 .994	65.960 .011	58.199 .027	50.438 .044
	100,75	126.88 4.566	119.12 3.582	111.36 2.599	103.60 1.615	95.840 .632	88.079 .648	80.318 .665	72.557 .681	64.796 .698	57.035 .715	49.274 .731
	89,55	125.72 1.253	117.96 0.269	110.19 9.286	102.43 8.303	94.677 .319	86.916 .336	79.155 .352	71.394 .369	63.633 .385	55.872 .402	48.111 .418
	78,36	124.55 7.940	116.79 6.957	109.03 5.973	101.27 4.990	93.514 .006	85.753 .023	77.992 .039	70.231 .056	62.470 .073	54.709 .089	46.948 .106
	67,16	123.39 4.627	115.63 3.644	107.87 2.661	100.11 1.677	92.350 .694	84.589 .710	76.828 .727	69.067 .743	61.306 .760	53.545 .777	45.784 .793
	55,97	122.23 1.315	114.47 0.331	106.70 9.348	98.948 .364	91.187 .381	83.426 .397	75.665 .414	67.904 .431	60.143 .447	52.382 .464	44.621 .480

Berechnungsansatz: $(\text{Jährlicher Fernwärmebedarf [kWh/(m}^2\text{a)]} * \text{Emissionsfaktor Fernwärme [g CO}_2\text{-Äq./kWh]} + \text{Jährlicher Strombedarf [kWh/a]} * \text{Emissionsfaktor Strom [g CO}_2\text{-Äq./kWh]}) * 50a$

Tabelle 20: Anzahl der notwendigen Buchen in Abhängigkeit der Lebenszyklusemissionen

		<i>Emissionsfaktor Strom [g. CO2/kWh]</i>										
Jährlicher Fernwärmebedarf [kWh/m ²]		0,8841	0,8252	0,7662	0,7073	0,6483	0,5894	0,5305	0,4715	0,4126	0,3536	0,2947
	167,91	66.932	63.052	59.171	55.291	51.410	47.530	43.649	39.769	35.888	32.008	28.127
	156,72	66.351	62.470	58.590	54.709	50.829	46.948	43.068	39.187	35.307	31.426	27.546

	145,52	65.769	61.888	58.008	54.127	50.247	46.366	42.486	38.605	34.725	30.844	26.964
	134,33	65.187	61.307	57.426	53.546	49.665	45.785	41.904	38.024	34.143	30.263	26.382
	123,13	64.606	60.725	56.845	52.964	49.084	45.203	41.323	37.442	33.562	29.681	25.801
	111,94	64.024	60.143	56.263	52.382	48.502	44.621	40.741	36.860	32.980	29.100	25.219
	100,75	63.442	59.562	55.681	51.801	47.920	44.040	40.159	36.279	32.398	28.518	24.637
	89,55	62.861	58.980	55.100	51.219	47.339	43.458	39.578	35.697	31.817	27.936	24.056
	78,36	62.279	58.398	54.518	50.637	46.757	42.877	38.996	35.116	31.235	27.355	23.474
	67,16	61.697	57.817	53.936	50.056	46.175	42.295	38.414	34.534	30.653	26.773	22.892
	55,97	61.116	57.235	53.355	49.474	45.594	41.713	37.833	33.952	30.072	26.191	22.311

Berechnungsansatz: $(\text{Jährlicher Fernwärmebedarf [kWh/(m}^2\text{a)]} * \text{Emissionsfaktor Fernwärme [g CO}_2\text{-Äq/kWh]} + \text{Jährlicher Strombedarf [kWh/a]} * \text{Emissionsfaktor Strom [g CO}_2\text{-Äq./kWh]}) * 50\text{a} / 2.000 \text{ kg CO}_2\text{/Buche}$

Tabelle 21: Lebenszyklusemissionen bei variierenden Emissionsfaktoren (Strom): 100%, 75% und 50%

Zeitschiene der CO ₂ -Emission [a]	Lebenszyklusemissionen bei Emissionsfaktor Strom 100% [t CO ₂ -Äq.]	Lebenszyklusemissionen bei Emissionsfaktor Strom 75% [t CO ₂ -Äq.]	Lebenszyklusemissionen bei Emissionsfaktor Strom 50% [t CO ₂ -Äq.]
0	3.500	2.730	1.995
50	95.000	74.100	54.150

100	90.750	70.785	51.727
150	86.500	67.470	49.305
200	82.250	64.155	46.882
250	78.000	60.840	44.460
300	73.750	57.525	42.037
350	69.500	54.210	39.615
400	65.250	50.895	37.192
450	61.000	47.580	34.770
500	56.750	44.265	32.347
550	52.500	40.950	29.925
600	48.250	37.635	27.502
650	44.000	34.320	25.080
700	39.750	31.005	22.657
750	35.500	27.690	20.235
800	31.250	24.375	17.812
850	27.000	21.060	15.390
900	22.750	17.745	12.967

950	18.500	14.430	10.545
1.000	14.250	11.115	8.122

Berechnungsansatz: (Emissionen der Baukonstruktion [t CO₂-Äq.] + Endenergiebedarf Wärme pro Jahr [kWh/a] * Emissionsfaktor Wärme [g CO₂-Äq./kWh] * 50a + Endenergiebedarf Strom pro Jahr * Emissionsfaktor [g CO₂-Äq./kWh] * 50a)

Hinweis: In der Berechnung wird angenommen, dass die Emissionen, die bei der Herstellung der Baukonstruktion anfallen bereits vor dem Baubeginn des Quartiers emittiert wurden. Die Emissionen für Austausch und Rückbau werden anteilig in die Nutzungsphase eingerechnet. Die lineare Abbaurate des CO₂ wird unter Berücksichtigung der Angabe des Umweltbundesamtes (siehe: „Grundlagen der ökologischen Kompensation“) ermittelt.