

Zur Aktivierung von Bauteilen für Plusenergiegebäude in Metalleichtbauweise

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Vitali Reger

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Kuhnhenne
Prof. Dr.-Ing. Bernd Döring
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Daniel Pak

Tag der mündlichen Prüfung: 10.02.2023

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Kurzfassung

Mit dem Klimaschutzgesetz hat die Bundesregierung das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 vorgegeben. Die Versorgung von Neubauten sollte dafür bereits jetzt weitgehend unabhängig von fossilen Energieträgern erfolgen, da diese ansonsten absehbar Sanierungsfälle innerhalb der nächsten 20 Jahre darstellen. Erneuerbare Energien spielen zur Erreichung dieses Zieles eine wichtige Rolle. Eine gute Möglichkeit, erneuerbare Energien ohne viel zusätzlichen Aufwand nutzbar zu machen, besteht darin, bereits vorhandenen Komponenten des Gebäudes zusätzliche Funktionen zu geben. Hierzu können beispielsweise die Fassade oder das Dach solarthermisch aktiviert oder durch Photovoltaikmodule ergänzt werden. Auch Tiefgründungen können neben der statischen noch eine geothermische Funktion zur Aufnahme oder Abgabe von Wärme erhalten. Neben der Erzeugung bietet sich auch für die Übergabe der Wärme oder Kälte im Gebäude die Integration in Bauteile an. Dafür kann beispielsweise die Decke durch Strahlungsplatten aktiviert werden.

Als Beitrag zur Reduktion des Verbrauchs von nicht-erneuerbaren Energien im Gebäudesektor wird im Rahmen dieser Arbeit auf bauteilaktivierte Lösungen aus Stahl für Plusenergiegebäude in Metalleichtbauweise eingegangen; dabei wird der Begriff "bauteilaktiviert" weiter gefasst als bei der thermischen Aktivierung von Betondecken. So wird ein System zur thermischen Aktivierung von Stahltrapezprofilen an der Decke erläutert, welches Wärme zuführen oder bei Bedarf abführen kann. Darüber hinaus wird eine Lösung vorgestellt, die vorgehängte hinterlüftete Stahlfassade (VHF) solarthermisch zu aktivieren. Zusätzlich wird der Einsatz organischer Photovoltaikmodule (OPV) auf VHF sowie auf Stahlsandwichenelementen untersucht. Außerdem werden zwei Möglichkeiten zur geothermischen Aktivierung von Tiefgründungen mittels Stahlenergiepfählen gezeigt.

Die beschriebenen Systeme werden numerisch analysiert und anhand von Demonstratoren messtechnisch untersucht. Mit Hilfe von thermischen Gebäudesimulationen an einem Mustergebäude und einem Ansatz zur Vordimensionierung werden Dimensionierungsgrößen bestimmt und erforderliche Flächen für eine Photovoltaikanlage abgeleitet, um ein Plusenergiegebäude zu erzielen.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die untersuchten thermisch aktivierten Trapezprofile sind als bauteilintegriertes System für die Temperierung von Hallengebäuden besonders geeignet. Die erzielbaren Leistungen übersteigen im Kühlfall sogar die Werte klassischer geschlossener Kühldecken.

- Im Vergleich zu konventionellen Kunststoffabsorbern bieten die untersuchten solarthermisch aktivierten Fassadenpaneele die Möglichkeit, Wärme effektiver auf niedrigem Temperaturniveau zu gewinnen oder auf hohem Temperaturniveau an die Umgebung abzugeben.
- Die untersuchten OPV-Varianten können mit den Leistungen siliziumbasierter Systeme nicht konkurrieren. Das geringere Gewicht sowie die Applikation mittels Klebtechnik ermöglichen aber eine leichtere Integration in die Gebäudehülle und damit die zusätzliche Aktivierung großflächiger Bereiche.
- Für die untersuchten Stahlenergiepfähle können gute thermische Leistungen belegt werden. Koaxiale Stahlenergiepfähle können, je nach Randbedingungen, die Leistung, im Vergleich zu konventionellen Doppel-U-Erdsonden, verdoppeln und lassen sich darüber hinaus rückstandslos zurückbauen.
- Durch die stahlbasierten Lösungen lassen sich signifikante Sondenlängen und Solarthermieflächen einsparen, ohne einen Mehrverbrauch an Energie oder Einschränkungen am Komfort hinnehmen zu müssen.
- Für alle betrachteten Dämmniveaus und Gebäudetechnikkonzepte reicht eine siliziumbasierte PV-Anlage auf der Dachfläche aus, um im Jahresmittel mehr Energie zu produzieren als für den Betrieb benötigt wird. Eine reine OPV-Lösung ist im Fall einer verbesserten Dämmung in Kombination mit Geothermie möglich, falls neben dem Dach auch ein großflächiger Einsatz der OPV in den Fassaden erfolgt.

Summary

With the Climate Protection Act, the German government has set the goal of greenhouse gas neutrality by 2045. To achieve this, new buildings should already be supplied mainly independently of fossil fuels, as they will otherwise be renovation cases within the next 20 years. Renewable energies play an important role in achieving this goal. A good way to make renewable energies usable without much additional effort is to give already existing components of the building additional functions. Here, for example, the façade or the roof can be solarthermally activated or supplemented with photovoltaic modules. Deep foundations can also be given a geothermal function to absorb or release heat in addition to their static function. In addition to generation, integration into building components is also an option for the transfer of heat or cold in the building. Here, for example, the ceiling can be activated by radiation panels.

As a contribution to reducing the consumption of non-renewable energies in the building sector, this thesis deals with component-activated solutions made of steel for plus-energy buildings in lightweight metal construction; the term "component-activated" is defined more broadly than in the thermal activation of concrete ceilings. A system for the thermal activation of steel trapezoidal profiles at the ceiling is explained, which can supply heat or dissipate it if required. Furthermore, a solution is presented to activate the rear-ventilated steel façade (VHF) by solar thermal means. In addition, the use of organic photovoltaic modules (OPV) on VHF and on steel sandwich panels will be investigated. Furthermore, two possibilities for geothermal activation of deep foundations using steel energy piles are shown.

The described systems are analysed numerically and examined by measurements using demonstrators. With the help of thermal building simulations on a sample building and a pre-dimensioning approach, dimensioning variables are determined and the required areas for a photovoltaic system are derived in order to achieve a plus-energy building.

The results can be summarised as follows:

- The investigated thermally activated trapezoidal profiles are particularly suitable as a component-integrated system for the temperature control of hall buildings. The achievable performance in the cooling mode even exceeds the values of classic closed cooling ceilings.
- Compared to conventional plastic absorbers, the investigated solar thermal activated façade panels offer the possibility to gain heat more efficiently at

a low temperature level or to release it to the environment at a high temperature level.

- The investigated OPV variations cannot compete with the performance of silicon-based systems. However, the lower weight and the application by means of adhesive technology enable easier integration into the building envelope and thus the additional activation of large-area surfaces.
- Good thermal performance can be shown for the investigated steel energy piles. Depending on the boundary conditions, coaxial steel energy piles can double the performance compared to conventional double-U ground probes and can also be removed without leaving any residues.
- Using the steel-based solutions, significant probe lengths and solar thermal areas can be reduced without having to accept an increase in energy consumption or restrictions in comfort.
- For all considered insulation levels and building technology concepts, a silicon-based PV system on the roof surface is sufficient to produce more energy on an annual average than is needed for operation. A pure OPV solution is possible in the case of improved insulation in combination with geothermal energy if, in addition to the roof, large-scale application of OPV is also made in the façades.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Anlass	1
1.2	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	2
2	Grundlagen und Stand der Technik	4
2.1	Gebäudeenergiegesetz (GEG)	4
2.2	Systeme zur Übergabe von Wärme und Kälte	4
2.2.1	Konvektive Systeme	5
2.2.2	Strahlungsbasierte Systeme	5
2.3	Systeme zur Nutzung von Solarenergie	6
2.3.1	Solarthermie	6
2.3.2	Photovoltaik	9
2.4	Systeme zur geothermischen Energiegewinnung	11
2.4.1	Wärmepumpe	12
2.4.2	Erdwärmesonden	12
2.4.3	Erdwärmekollektoren und Erdwärmekörbe	14
2.4.4	Energiepfähle	15
2.5	Lasten- und Energiebedarfsermittlung von Gebäuden sowie Auslegung von Anlagenkomponenten	17
2.5.1	Kühllastbedarf nach VDI 2078	17
2.5.2	Heizlastbedarf nach DIN EN 12831-1	18
2.5.3	Energiebedarf nach DIN V 18599	18
2.5.4	Energiebedarf mittels numerischer Simulationen	18
2.5.5	Summenlinienmethode für die Auslegung von Anlagenkomponenten	18

2.6	Physikalische Grundlagen	19
2.6.1	Wärmetransport	19
2.6.2	Wärmeleitung	20
2.6.3	Konvektion	20
2.6.4	Strahlung	22
2.6.5	Wärmeübergang	23
2.7	Prüfung und Bewertung der Energieübergabe von thermisch aktivierten Systemen an den Raum	23
2.7.1	DIN EN 14240 und DIN EN 14037	23
2.7.2	Betriebskennlinie	24
2.8	Prüfung und Bewertung von solaren Systemen	25
2.8.1	DIN EN ISO 9806	25
2.8.2	Standardtestbedingungen und Normalbedingungen von PV-Modulen	26
2.9	Prüfung und Bewertung von geothermischen Systemen	27
2.9.1	VDI 4640	27
2.9.2	Verfahren nach Hellström	27
2.9.3	Numerische Berechnungen	27
3	Strahlungsbasierte Flächenheiz- und -kühlelemente	29
3.1	Einleitung	29
3.2	Thermisch aktiviertes Trapezprofil	29
3.3	Voruntersuchungen	30
3.3.1	Einflussfaktoren der radiativen Wärmeübergangskoeffizienten	31
3.3.2	Fazit der Parameterstudie	34
3.4	Planung und Erstellung des Demonstrators	35

3.4.1	Planung und Entwurf	35
3.4.2	Realisierung des Demonstrators	37
3.5	Bestimmung der Leistung thermisch aktivierter Trapezprofile	38
3.5.1	Thermischer Leistungsprüfstand	38
3.5.2	Messtechnische Untersuchungen	40
3.5.3	FEM-Simulationen	52
3.6	Zusammenfassung	64
4	Fassadenintegrierte Lösungen zur Nutzung erneuerbarer Energien	66
4.1	Einleitung	66
4.2	Solarthermischer Kollektor sowie Kombikollektor mit OPV als VHF	67
4.2.1	Kollektorpaneel	67
4.2.2	Planung und Erstellung des Demonstrators	67
4.3	Stahlsandwichkonstruktionen mit OPV	70
4.3.1	Glas-Sandwich-OPV	70
4.3.2	Planung und Erstellung des Demonstrators	70
4.4	Monitoring der Fassadendemonstratoren am Forschungsgebäude	77
4.4.1	Forschungsgebäude und Versuchsaufbau	77
4.4.2	Bestimmung der Leistung der organischen Photovoltaikmodule	82
4.4.3	Bestimmung der Leistung der solarthermisch aktivierten Fassade	86
4.5	Zusammenfassung	90
5	Geothermische Nutzung von Gründungspfählen	92
5.1	Einleitung	92
5.2	Stahlenergiepfähle	93
5.3	Planung und Erstellung der Demonstratoren	94

5.3.1	Planung und Entwurf	94
5.3.2	Realisierung der Demonstratoren	96
5.4	Analytische und numerische Bewertung des Potentials von Stahlenergiepfählen im Vergleich zu Erdsonden	99
5.4.1	Analytische Bewertung	99
5.4.2	Numerische Bewertung	102
5.5	Bestimmung der Leistung der Stahlenergiepfähle sowie der Bestandssonden	103
5.5.1	Messtechnische Untersuchungen	103
5.5.2	Modellierung und Validierung des numerischen Modells anhand von Messwerten	105
5.6	Wirtschaftliches und ökologisches Potential der Stahlenergiepfähle im Vergleich zu geothermisch aktivierten Betonpfählen	109
5.6.1	Vergleich zwischen Schneckenortbetonpfählen und Stahlrohrpfählen	111
5.6.2	Vergleich zwischen Stahlbetonfertigpfahl und Stahlrohrpfahl	113
5.6.3	Vergleich zwischen Betonpfahl und Stahlrohrpfahl hinsichtlich ökologischer Aspekte	114
5.6.4	Beurteilung der Herstellungskosten von Energiepfählen	116
5.7	Zusammenfassung	116
6	Gebäudesimulationen für Plusenergiegebäude mit aktivierten Bauteilen	118
6.1	Einleitung	118
6.2	Mustergebäude	118
6.3	Numerische Simulationen	121
6.3.1	Methodik	121
6.3.2	Heiz- und Kühllast sowie notwendige Flächen zur Temperierung	123
6.3.3	Heiz- und Kühlbedarf zur Auslegung der Komponenten	125

6.3.4	Ansatz zur Vordimensionierung und Abbildung der Gebäudetechnikkonzepte	128
6.3.5	Größenbestimmung der Komponenten	131
6.3.6	Betrachtung des thermischen Komforts	135
6.3.7	Bestimmung des elektrischen Energiebedarfs der Wärmepumpe	137
6.3.8	Dimensionierung und Optimierung des geothermischen Sondenfeldes	139
6.4	Plusenergiebetrachtung	144
6.4.1	Methodik	144
6.4.2	Dimensionierung der erforderlichen PV-Fläche	145
6.5	Zusammenfassung	149
7	Fazit und Ausblick	151
7.1	Fazit	151
7.2	Ausblick	155
8	Literaturverzeichnis	157
Anhang A	Simulationsparameter TRNSYS	I
A.1	Parameter konventionelles PV-Modul ($191 \text{ W}_p/\text{m}^2$)	I
A.2	Parameter OPV-Modul ($38 \text{ W}_p/\text{m}^2$)	I
A.3	Parameter monokristallines PV-Modul ($226 \text{ W}_p/\text{m}^2$)	I
A.4	Parameter polykristallines PV-Modul ($164 \text{ W}_p/\text{m}^2$)	II
A.5	Parameter geothermische Sondenleistung	II

1 Einleitung

1.1 Anlass

Die Reduktion des Verbrauchs von nicht-erneuerbaren Energien besitzt eine hohe politische und gesellschaftliche Priorität. Das Klimaschutzgesetz der Bundesregierung hat das Ziel, die Treibhausgasemissionen im Vergleich zu 1990 bis zum Jahr 2030 um bis zu 65 % zu reduzieren und 2045 eine weitgehende Treibhausgasneutralität zu erreichen [1]. Da auf den Gebäudesektor etwa 40 % des Gesamtenergieverbrauchs der Europäischen Union (EU) entfallen, ist die Reduzierung des Energieverbrauchs in diesem Bereich von großer Bedeutung. In der EU-Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden [2] werden Gebäude mit einem Energieverbrauch „nahe Null“ als Standard festgeschrieben. Darüber hinaus wurde von der Bundesregierung beschlossen, dass die Wärmeversorgung von Neubauten möglichst weitgehend unabhängig von fossilen Energieträgern erfolgen soll [3].

Diese Vorgaben werden auch in Zukunft weitere gesetzliche Verschärfungen hinsichtlich der Anforderungen an die Energieeffizienz und die energetische Qualität von Gebäudehüllen zur Folge haben sowie die Integration von erneuerbaren Energiequellen praktisch zwingend notwendig machen (Abbildung 1-1).

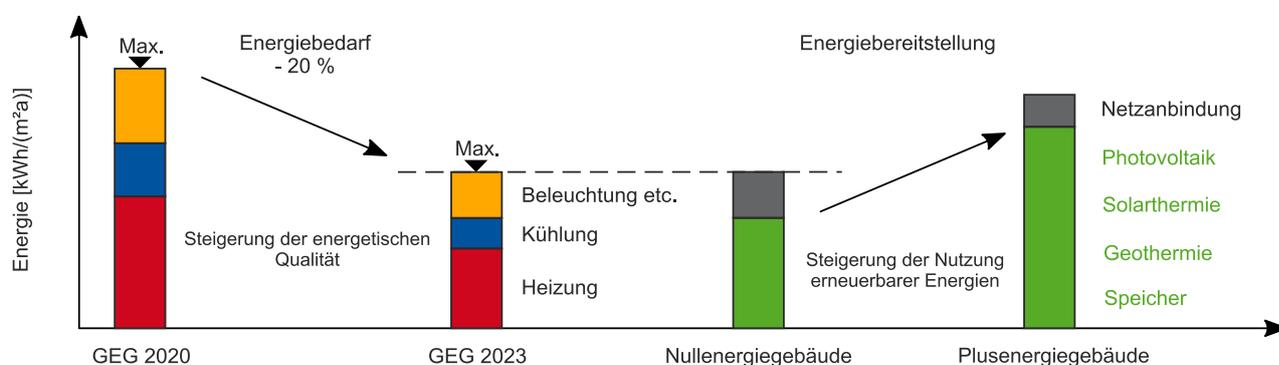


Abbildung 1-1: Anforderungen und Lösungsansätze im Gebäudesektor

Beim energieeffizienten Bauen ist es nicht mehr ausreichend, nur auf die Heizwärme zu blicken. Die Kühlung, die Beleuchtung, die Warmwasserbereitung, die Belüftung sowie die Nutzung erneuerbarer Energien muss miteinbezogen werden, um sowohl die gesetzlichen Anforderungen nach dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) zu erfüllen als auch Nullenergiegebäude zu ermöglichen. Wenn der benötigte Energiebedarf über erneuerbare Energien nicht nur gedeckt wird, sondern mehr Energie erzeugt werden kann, sind Plusenergiegebäude möglich. Dafür sind allerdings innovative Konzepte und effiziente Systeme zur Energienutzung und Integration von erneuerbaren Energien erforderlich.

Die vielfältigen Möglichkeiten des Werkstoffs Stahl zur Steigerung der Energiebereitstellung im Baubereich sind bisher nicht umfänglich und systematisch untersucht worden. Für den Einsatz energetisch aktivierter Bauteile aus Stahl zur Ermöglichung von Plusenergiegebäuden in Metalleichtbauweise fehlen Anhaltswerte für die Leistungsfähigkeit und Erfahrungswerte in der Umsetzung.

1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist ein Beitrag zur Reduktion des Verbrauchs von nicht-erneuerbaren Energien im Gebäudesektor. Um dafür erneuerbare Energien ohne viel zusätzlichen Aufwand nutzbar zu machen, können bereits vorhandene Gebäudekomponenten um energetische Funktionen erweitert werden. Dazu gehören sowohl die thermische Aktivierung von Innenbauteilen wie Decken für den Energieaustausch mit dem Raum als auch die thermische Aktivierung von Außenbauteilen für die Nutzung erneuerbarer Energien. Hier kommen eine solarthermische Aktivierung der Fassaden und eine geothermische Aktivierung von Gründungspfählen in Frage. Darüber hinaus ist eine Aktivierung der Gebäudehüllfläche für die Photovoltaik von Interesse. Die Kombination dieser Maßnahmen ermöglicht Plusenergiegebäude als wesentlichen Beitrag für das anvisierte Ziel.

Die Umsetzung erfolgt durch die systematische Untersuchung der Leistungsfähigkeit und der Praxistauglichkeit gebäudeintegrierter energetisch aktivierter Bauteile aus Stahl. Dafür werden ausgewählte Stahllösungen analysiert. Basierend auf diesen Erkenntnissen werden Demonstratoren entwickelt, experimentell und numerisch untersucht und quantitativ bewertet. Anhand eines Mustergebäudes in Metalleichtbauweise und eines Ansatzes zur Vordimensionierung werden für die einzelnen Komponenten Dimensionierungsgrößen bestimmt sowie notwendige PV-Flächen ermittelt, um ein Plusenergiegebäude zu ermöglichen. Die Ergebnisse dieser Arbeit tragen dazu bei, Investitionshemmnisse zu beseitigen und die Grundlage für einen großflächigen Einsatz der innovativen stahlbasierten Systeme für die Erschließung regenerativer Energien zu bilden. Damit wird ein Beitrag zum übergeordneten Ziel der Reduktion von nicht-erneuerbaren Energien ermöglicht.

Kapitel 2 beschreibt die Grundlagen und den Stand der Technik zur Energieübergabe an den Raum und der Nutzung von regenerativen Energiequellen wie der Solarthermie, der Photovoltaik und der Geothermie. Relevante Verfahren zur Last- und Energiebedarfsermittlung werden vorgestellt. Außerdem werden die physikalischen Grundlagen sowie die Verfahren zur Leistungsbestimmung der relevanten Systeme beschrieben.

Kapitel 3 behandelt strahlungsbasierte Flächenheiz- und -kühlelemente. Durch die Kombination aus Trapezprofilen und integrierten Strahlungsplatten werden thermisch aktivierte Trapezprofile erstellt. Für die Leistungsbestimmung der Demonstratoren wird ein thermischer Leistungsprüfstand entwickelt und für messtechnische Untersuchungen verschiedener Varianten verwendet. Ein FEM-Modell ermöglicht Detailuntersuchungen und wird anhand der Messwerte validiert.

In Kapitel 4 werden fassadenintegrierte Lösungen zur Nutzung erneuerbarer Energien behandelt. Es werden solarthermische Kollektoren vorgestellt, die sich unsichtbar in eine VHF integrieren lassen und somit die Fassade thermisch aktivieren können. Im Rahmen eines Monitorings werden die thermischen Leistungen mit Hilfe von Demonstratoren ermittelt und Kennwerte zur Einordnung sowie für die numerische Abbildung bestimmt. Außerdem werden Lösungen zur Applikation organischer Photovoltaik auf Stahlsandwichenelementen vorgestellt. Für verschiedene Varianten werden Leistung und Wirkungsgrad bestimmt und der mögliche Ertrag mit konventionellen PV-Modulen verglichen.

Die geothermische Nutzung von Gründungspfählen wird in Kapitel 5 behandelt. Stahlenergiepfähle mit verschiedenen Sondentypen werden vorgestellt. Das Leistungspotential wird mit analytischen und numerischen Methoden abgeschätzt und mit konventionellen Erdsonden verglichen. Mittels messtechnischer Untersuchungen wird die Leistungsfähigkeit anhand von Demonstratoren bestimmt und ein numerisches Modell validiert. Zusätzlich wird das wirtschaftliche sowie das ökologische Potential im Vergleich zu geothermisch aktivierten Betonpfählen betrachtet.

Kapitel 6 behandelt die kombinierte Anwendung der zuvor untersuchten Technologien anhand von Gebäudesimulationen. Dafür wird ein Mustergebäude definiert, dessen Energiebedarf für verschiedene Testreferenzjahre bestimmt und mit Hilfe eines Ansatzes zur Vordimensionierung die einzelnen Komponentengrößen ermittelt. Anhand des Mustergebäudes wird untersucht, ob der Energiebedarf über eine Photovoltaikanlage gedeckt werden kann, um das Ziel eines Plusenergiegebäudes zu ermöglichen. Die dafür erforderlichen PV-Flächen werden für verschiedene Varianten und Oberflächen bestimmt.

Abschließend werden die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf gegeben.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Gebäudeenergiegesetz (GEG)

Wie in Kapitel 1 bereits beschrieben besitzt die Reduktion des Verbrauchs von nicht-erneuerbaren Energien eine hohe politische und gesellschaftliche Priorität. Um die Treibhausgasemissionen zu reduzieren und erneuerbare Energien zu integrieren, sind daher bei Neu- und bei Umbauten gesetzliche Anforderungen nach dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) zu erfüllen.

Das Gebäudeenergiegesetz vereint das vorherige Energieeinsparungsgesetz (EnEG), die Energieeinsparverordnung (EnEV) und das Erneuerbare-Energien-Wärme-gesetz (EEWärmeG). Es enthält die Anforderungen an die energetische Qualität von Gebäuden, die Erstellung und die Verwendung von Energieausweisen sowie an den Einsatz erneuerbarer Energien in Gebäuden [4].

Nach GEG 2020 muss der Jahres-Primärenergiebedarf von Wohn- und Nichtwohngebäuden für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung, Kühlung und eingebauter Beleuchtung den Wert eines Referenzgebäudes um 25 % unterschreiten. Mit Einführung des GEG 2023 muss der Wert um 45 % unterschritten werden. Das Referenzgebäude ist ein Vergleichsgebäude mit gleicher Geometrie, Nutzfläche und Ausrichtung. Die Gebäudehülle und die Anlagentechnik des Referenzgebäudes müssen dabei nach den Vorgaben des GEG ausgeführt sein.

Des Weiteren sind im GEG Höchstwerte bezüglich des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) der wärmeübertragenden Umfassungsfläche einzuhalten. Das energetische Anforderungsniveau der letzten Energieeinsparverordnung für Neubauten und Sanierung wurde nicht verschärft.

2.2 Systeme zur Übergabe von Wärme und Kälte

Wärmeübergabesysteme hallenartiger Gebäude können grundsätzlich in zwei Kategorien unterteilt werden. Die Strahlungs- und Konvektionsanteile unterscheiden sich dabei je nach System. Es kann zwischen konvektiv arbeitenden Systemen (Lufttemperierung) und strahlungsbasierten Systemen (Umschließungsflächen-temperierung durch Wand-, Boden- und Deckensysteme) unterschieden werden.

2.2.1 Konvektive Systeme

Die Wärmeabgabe mittels erzwungener Konvektion erfolgt entweder mittels Warmluftzeuger durch die Verbrennung von Gas unmittelbar in dem Gerät oder mittels wasserbetriebener Warmluftheizter in Kombination mit Wärmetauschern. Der Raum wird dabei durch eine Warmluftdurchspülung temperiert. Die Bildung eines Wärmepolsters unter dem Dach führt zu einem vertikalen Lufttemperaturanstieg von bis zu 1 K/m. Mittels zusätzlicher Ventilatoren und einer erzwungenen Rezirkulation kann dieser auf ca. 0,35 K/m beschränkt werden [5 bis 8].

2.2.2 Strahlungsbasierte Systeme

Die Wärmeabgabe mittels Strahlung kann entweder durch wasserbetriebene Industriefußbodenheizungen über die Bodenplatte erfolgen oder über Flächen im oberen Wand- oder Deckenbereich. Beim Strahlungsprinzip werden durch die auftretende Strahlung die übrigen Raumflächen temperiert, die sich dadurch ebenfalls am Strahlungsaustausch beteiligen und auch einen Teil wieder konvektiv an den Raum abgeben. Im Decken- und oberen Wandbereich kommen gasbetriebene Hell- und Dunkelstrahler zum Einsatz sowie wasserbetriebene Deckenstrahlplatten. Beide Varianten werden punktuell an Wand oder Dach montiert und mit hohen Temperaturen betrieben. Dabei werden Temperaturen von bis zu 90 °C (Deckenstrahlplatten), 650 °C (Dunkelstrahler) oder 950 °C (Hellstrahler) benötigt [9]. Eine Verringerung dieser Temperaturen führt zu größeren notwendigen Flächen der Systeme.

Die wasserbasierten Systeme haben dabei den Vorteil, dass sie zu Heiz- und Kühlzwecken eingesetzt werden können. Ein großflächiger Einsatz ermöglicht dabei zusätzlich den effektiven Einsatz von Niedertemperaturquellen, da in solchen Fällen ein geringer Temperaturunterschied zwischen Wasser- und Raumtemperatur zur Temperierung ausreicht. Die operative Temperatur, welche als Maß für die thermische Behaglichkeit gilt, wird dabei nicht verändert. Diese setzt sich aus dem Mittelwert der Lufttemperatur und der mittleren Oberflächentemperatur der Umschließungsflächen zusammen [10]. Das bietet die Möglichkeit, die Lufttemperatur sowie die damit verbundenen Wärmeverluste über die Umschließungsflächen, ohne Einbußen bei der thermischen Behaglichkeit, zu reduzieren.

Fußbodenheizsysteme weisen dabei einen sehr geringen Temperaturanstieg von ca. 0,1 K/m auf, führen allerdings zu zusätzlichen Verlusten aufgrund der häufig nicht durchgängig gedämmten Bodenplatten und eignen sich aufgrund der thermischen Trägheit nur bedingt für eine sinnvolle Temperaturabsenkung außerhalb der Nutzungszeiten [5, 11]. Deckenstrahlplatten bestehen aus wasserdurchströmten

Rohren sowie einem Blech, welches mit den Rohren verbunden ist und die Übergabefläche zum Raum bildet. Sie werden in der Regel von der Decke abgehängt und führen zu einem Temperaturanstieg zwischen 0 und 0,3 K/m [6 bis 8]. Im Vergleich zur Warmluftheizung wird bei einer Strahlungsheizung also der untere Hallenbereich erwärmt. Somit steht die Wärme dort zur Verfügung, wo sie in erster Linie benötigt wird (Abbildung 2-1).

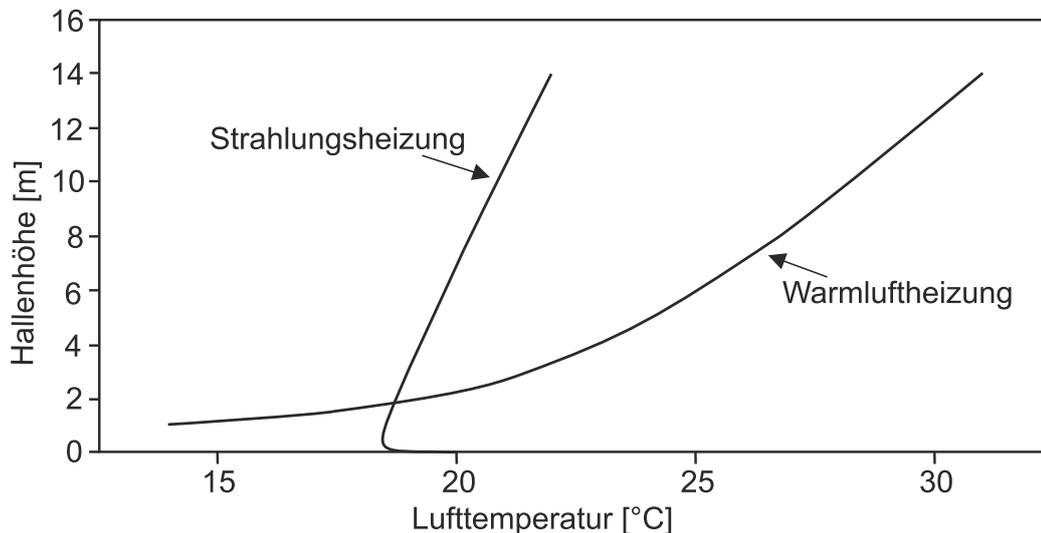


Abbildung 2-1: Lufttemperatur in Abhängigkeit der Höhe bei Strahlungs- und Warmluftheizung [12]

2.3 Systeme zur Nutzung von Solarenergie

2.3.1 Solarthermie

Aktuell gibt es drei verschiedene flüssigkeitsbasierte Technologien von solarthermischen Kollektoren, die im Baubereich zum Einsatz kommen. Alle basieren auf dem gleichen Prinzip: Eine dunkle Oberfläche wird von der Sonne beschienen, absorbiert die Strahlung und heizt sich dadurch auf. Mit dieser Absorberfläche verbunden sind flüssigkeitsdurchströmte Rohrleitungen, welche die Wärme abführen und dem hydraulischen Heizsystem zuführen. Die Unterschiede der verschiedenen Kollektortypen liegen in der Materialwahl und vor allem der Art der Wärmedämmung [13].

Der Wirkungsgrad eines thermischen Kollektors errechnet sich als Quotient aus dem vom Fluid abgeführten Wärmestrom zu der auf den Kollektor treffenden Globalstrahlung. Er hängt stark von der Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und Absorber ab, da mit höherer Differenz die thermischen Verluste zunehmen. Abbildung 2-2 zeigt den Wirkungsgrad der unterschiedlichen Kollektortechnologien im Verhältnis zur Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und Absorber. Zusätzlich

sind wirtschaftliche Temperaturbereiche für verschiedene Anwendungen dargestellt.

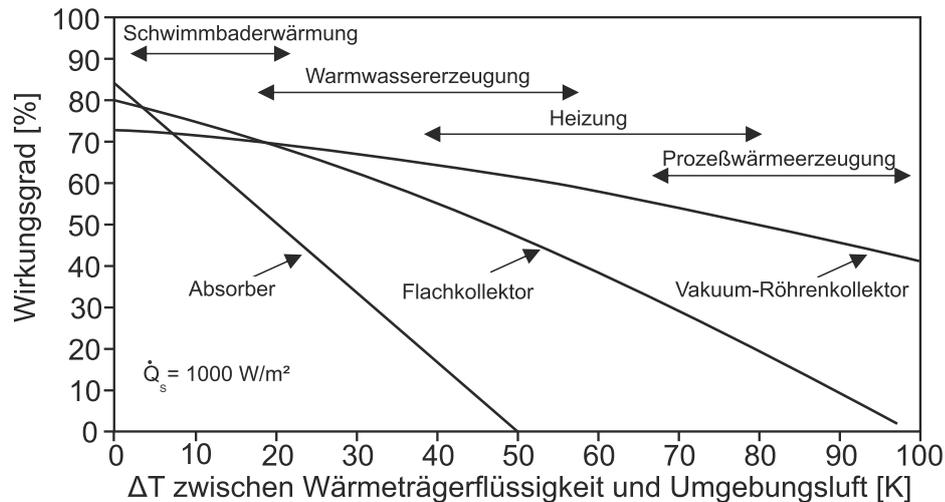


Abbildung 2-2: Wirkungsgrad von thermischen Solarkollektoren für eine ausgewählte Solareinstrahlung [14]

Der optische Wirkungsgrad beschreibt den Anteil des Sonnenlichts, der in Wärme umgewandelt wird, und kann bei einer Temperaturdifferenz von 0 K abgelesen werden. Durch thermische Verluste, welche durch lineare und quadratische Verlustkoeffizienten beschrieben werden, kann der Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz angegeben werden.

2.3.1.1 Flachkollektor

In Europa sind Flachkollektoren die am häufigsten eingebaute Kollektorart [15]. Bei diesem Kollektortyp wird die Rückseite des Absorbers gedämmt. Die sonnenzugewandte Seite ist mit einer Glasscheibe ausgestattet, so dass ein wärmeisolierter Raum entsteht, in dem die Absorberleitungen liegen [16].

Flachkollektoren erreichen einen Wirkungsgrad zwischen 40 und 80 % bei einer Bandbreite von Temperaturdifferenzen zwischen Absorber und Außenluft von bis zu 60 K. Das bedeutet, dass sich auch bei diffuser Strahlung relativ hohe Fluidtemperaturen einstellen, die für Heizungen mit hohen Vorlauftemperaturen und zur Trinkwassererwärmung genutzt werden können. Durch den Aufbau und die rechteckige, gerahmte Form lassen sich Flachkollektoren gut in eine Dacheindeckung oder die Gebäudehülle integrieren. Dabei sind allerdings die Abmessung und die Oberfläche systembedingt vorgegeben.

2.3.1.2 Vakuum-Röhren-Kollektor

Neben den Flachkollektoren existieren Vakuum-Röhren-Kollektoren. Bei diesen wird die Wärmedämmung der Absorberfläche erreicht, indem diese in einem Glasrohr eingebaut wird, welches evakuiert wird. Dadurch ergibt sich die charakteristische Ansicht von parallelen Glaszylindern. Mit Vakuum-Röhren-Kollektoren können die höchsten Fluidtemperaturen erreicht werden. Selbst bei einem Temperaturunterschied zur Außenluft von bis zu 80 K wird noch ein Wirkungsgrad von ca. 50 % erreicht. Somit finden diese Kollektoren vor allem Anwendung, wenn besonders hohe Absorberrtemperaturen, z.B. für Prozesswärme, oder große Mengen an Trinkwasser benötigt werden, oder wenn die Aufstellfläche begrenzt ist.

2.3.1.3 Offene Absorber

Die einfachste Ausführung von solarthermischen Kollektoren sind offene Absorber. Bei diesen werden unverglaste, wasserdurchströmte Matten, Schläuche oder Platten, in der Regel aus Kunststoff, auf Dächern oder als freistehende Elemente aufgestellt. Das Fluid durchströmt diese Leitungen und nimmt dabei die Umgebungswärme aus der Luft auf. Zusätzlich dient die meist schwarze Oberfläche als einfacher Absorber, so dass direkte Sonneneinstrahlung zu einer weiteren Erhöhung der Temperatur führt.

Wenn niedrige Vorlauftemperaturen knapp über der Außenlufttemperatur benötigt werden, bieten diese Absorber einen hohen Wirkungsgrad. So können Vorlauftemperaturen von bis zu 30 °C wirtschaftlich erreicht werden. Aufgrund der hohen Wärmeverluste durch fehlende Wärmedämmung nimmt der Wirkungsgrad allerdings schnell ab. Üblicherweise werden diese Kollektoren dort eingesetzt, wo im Sommer Fluidtemperaturen bis max. 40 °C gefordert werden, z. B. zum Temperieren von Schwimmbädern [13].

Eine weitere Anwendung liegt in der Regeneration von Langzeitspeichern, wie Geothermiefeldern oder Eisspeichern. Hier wird die Umweltwärme genutzt, um in den Sommermonaten dem Erdreich bzw. dem Eisspeicher Wärme zuzuführen, die in der Heizperiode entzogen wurde. In Kombination mit einer Wärmepumpe kann bei direkter Sonneneinstrahlung in der Übergangsjahreszeit sogar der Kollektorertrag unmittelbar einem Niedertemperaturheizsystem zugeführt werden.

2.3.1.4 PVT Module

Neben den vorgestellten solarthermischen Kollektoren sind sogenannte photovoltaisch-thermische (PVT) Module verfügbar. Diese bestehen aus kristallinen Zellen der Photovoltaik (PV), die rückseitig mit Flachkollektoren oder offenen Absorbern kom-

biniert werden [13]. Diese werden in der Regel im privaten Wohnungsbau eingesetzt, wobei es hier häufig eine Diskrepanz zwischen der optimalen Betriebstemperatur der PV-Module und dem gewünschten höheren Temperaturniveau der Solarthermie gibt. Flachkollektoren werden meist für die Trinkwassererwärmung genutzt, so dass es für die großen Erträge im Sommer keine Abnahme gibt und meist nur ein Teil der möglichen PV-Fläche mit thermischen Kollektoren kombiniert wird. Ferner handelt es sich bei den verfügbaren Kollektoren um Industrieprodukte, die auf Ertragssteigerung optimiert sind und additiv am Gebäude befestigt werden.

2.3.2 Photovoltaik

Die Photovoltaik hat in den vergangenen Jahrzehnten große technologische Fortschritte in der Zell- und Modulfertigung sowie der Entwicklung von leistungsfähigen Netzeinspeisegeräten zu verzeichnen [17]. Bis Ende 2021 ist der Anteil erneuerbarer Energien am Brutto-Stromverbrauch in Deutschland auf 42 % angestiegen (Abbildung 2-3). Die Photovoltaik stellt dabei mit 9 % bzw. 51 TWh im Jahre 2021 einen bedeutenden Bereich der erneuerbaren Energien dar. Ende 2021 waren über 2 Millionen Photovoltaikanlagen in Deutschland installiert, die zusammen etwas über 59 GW Leistung generieren [18].

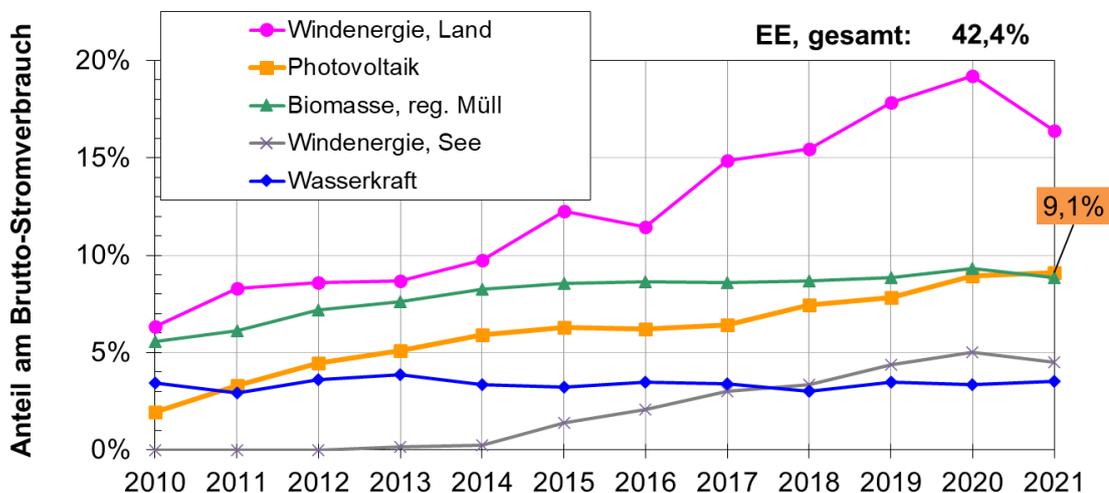


Abbildung 2-3: Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energien am Brutto-Stromverbrauch in Deutschland [18]

PV-Module bestehen aus Solarzellen, welche die Umwandlung der Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie ermöglichen. Derzeit gibt es am Markt verschiedene Technologien, die sich hinsichtlich ihrer Leistungsausbeute, Optik und Konfigurationsmöglichkeiten unterscheiden.

Der größte Teil dieser Photovoltaikanlagen besteht aus Silizium und ist auf horizontalen oder geneigten Flächen, wie z. B. Dächern, montiert. Die Integration von Photovoltaik in die Fassaden bietet darüber hinaus ein großes Potential, um ungenutzte (vertikale) Freiflächen von Gebäuden effizient nutzen zu können [18].

Organische Photovoltaik (OPV) stellt eine neue Technik der Dünnschichtsolarzellen dar. Das Produkt wird bereits auf verschiedene Art und Weise in die Gebäudehülle integriert bzw. auf ihr appliziert. Die Applikation auf Fassaden im Stahlleichtbau zeigt großes Potential, da hier meist sehr große ungenutzte Flächen, z. B. in Industriegebieten, vorhanden sind.

2.3.2.1 Kristalline Module

Solarzellen bestehen im Wesentlichen aus Halbleiterschichten. Diese Halbleiterschichten bestehen in der Regel aus dickschichtigem kristallinen (mono-/polykristallinen) Silizium, das heißt sie können in der Anordnung der einzelnen Atome unregelmäßig oder periodisch angeordnet sein [17].

Aufgrund des hohen Wirkungsgrades insbesondere bei direkter Sonneneinstrahlung werden kristalline Module vorrangig auf den Dachflächen von Gebäuden eingesetzt [18]. Hinsichtlich ihres Wirkungsgrades sind diesen Modulen in der Weiterentwicklung allerdings Grenzen gesetzt. Aktuell weisen monokristalline Zellen Wirkungsgrade von über 20 % auf. Der Wirkungsgrad von polykristallinen Zellen liegt bei ca. 17 % [17].

2.3.2.2 Dünnschichtmodule

Für die Anwendung in der Fassade kommen häufiger Dünnschichtmodule zum Einsatz. Diese bestehen in der Regel aus amorphem Silizium, wobei das Halbleitermaterial in dünnen Schichten auf ein Trägermedium aufgetragen wird, so dass auch flexible Module ermöglicht werden. Die Schichtdicke ist, im Vergleich zu kristallinen Modulen, um den Faktor 100 geringer [19]. Die Module haben einen geringeren Wirkungsgrad um ca. 10 %, sind dafür in verschiedenen Farben erhältlich und können somit auch in Kombination mit Colorglas für typische Glasfassaden verwendet werden. Nachteil dabei ist, dass die Abmessungen der Module vorgegeben werden und sich die Fassadenplanung nach den PV-Modulen richten muss, was die Akzeptanz bei Planern und Bauherren stark einschränkt [20].

Neben dem Wirkungsgrad sind auch die Herstellungskosten von amorphen Solarzellen und der daraus bestehenden Module pro Watt geringer. Deshalb kommen amorphe Solarzellen vor allem dort zum Einsatz, wo niedrige Investitionskosten angestrebt werden und Fläche keine Rolle spielt.

2.3.2.3 Organische PV

Die organische Photovoltaik besteht aus Halbleitern, die auf Kohlenstoffverbindungen basieren. Da die gesamte Zelle auf Kunststoffprodukten basiert, ist diese sehr dünn, leicht und in verschiedenen Farben oder Transparenzgraden erhältlich. Die organischen Solarzellen können auch auf flexiblen Materialien aufgebracht werden und zeichnen sich dadurch aus, dass für die Produktion der Module im Vergleich zu den anderen Zellarten weniger Energie aufgewendet werden muss [21].

Die flächenbezogene Leistung dieser Zellen ist allerdings deutlich geringer. Erste kommerzielle Produkte erreichen einen Wirkungsgrad von ca. 3 %, wobei ein hohes Potential in der Weiterentwicklung besteht [17, 22]. Im Vergleich zu siliziumbasierten Zellen ist die Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrades geringer und positiv, so dass kein Leistungsabfall durch Erwärmung der Zellen stattfindet und darüber hinaus eine höhere Ausnutzung diffuser Bestrahlungsbedingungen möglich ist [23]. Da der Materialaufwand gering ist, ist diese Technologie für Anwendungen interessant, bei denen Gewicht und Materialeinsatz die bestimmenden Faktoren darstellen und ausreichend Fläche zur Verfügung steht. Im Gewerbebau sind dies insbesondere die Fassadenflächen von hallenartigen Gebäuden, die mit Stahlsandwichelementen oder Vorhangfassaden ausgestattet sind.

2.4 Systeme zur geothermischen Energiegewinnung

Erdwärme wird im Allgemeinen als Geothermie bezeichnet. Die im Untergrund gespeicherte thermische Energie lässt sich zur Klimatisierung von Gebäuden und zur Trinkwassererwärmung verwenden [24]. Es wird zwischen oberflächennaher und tiefer Geothermie mit einer Grenztiefe von 400 m unterschieden [25]. In der Praxis wird bei der oberflächennahen geothermischen Nutzung jedoch selten eine Tiefe von 150 m überschritten, so dass in der Regel Temperaturen bis zu etwa 25 °C auftreten. Genehmigungsrechtlich lässt sich eine weitere Grenze bei 100 m festhalten. Ab dieser Tiefe werden zusätzliche Genehmigungsverfahren nach Bergrecht gefordert [25].

Die thermische Energie des oberflächennahen Erdreichs kann mit Hilfe von offenen Systemen wie Brunnenanlagen oder geschlossenen Systemen wie Erdwärmesonden, Erdkollektoren, Erdwärmekörpern und Energiepfählen entzogen und an einen Wärmepumpenkreislauf übertragen werden (Abbildung 2-4) [26, 27].

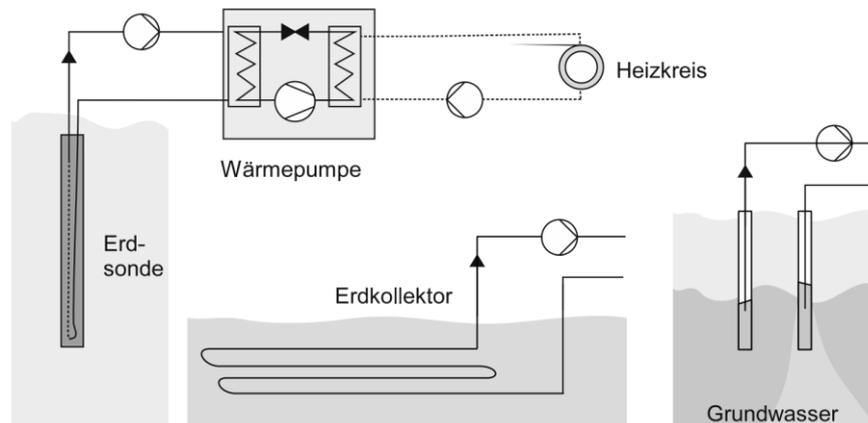


Abbildung 2-4: Mögliche Systeme zur Erschließung der oberflächennahen Geothermie [25]

2.4.1 Wärmepumpe

Mit Hilfe einer Wärmepumpe ist es möglich, der Umwelt Wärme zu entziehen und sie für Heizzwecke zur Verfügung zu stellen. In der Regel werden dabei Kompressionswärmepumpen eingesetzt [28]. Mit Hilfe eines thermodynamischen Prozesses wird innerhalb eines geschlossenen Kältemittelkreislaufs Energie in Form von Wärme von einem niedrigen Temperaturniveau unter Zufuhr von Antriebsenergie auf ein höheres Temperaturniveau gebracht. Dafür wird der Aggregatzustand eines Kältemittels durch Verdampfen, Verdichten, Verflüssigen und Expandieren ständig verändert [27]. Dadurch können die niedrigen Fluidtemperaturen in oberflächennahen geothermischen Anlagen, die meist zwischen 0 und 5 °C liegen auf die im Heizkreislauf benötigte Temperatur angehoben werden [29].

Die Leistungszahl (COP) gibt das Verhältnis von erzeugter Kälte- oder Wärmeleistung zur eingesetzten elektrischen Leistung an. Sie ist ein Indikator für die Effizienz einer Wärmepumpe in einem konkreten Betriebspunkt. Neben der Leistungszahl ist auch die Jahresarbeitszahl (JAZ) von Interesse. Sie gibt die Effizienz der Wärmepumpe im Jahresverlauf an und berechnet sich aus dem Verhältnis der erzeugten Wärme und der eingesetzten elektrischen Energie.

2.4.2 Erdwärmesonden

Bei Erdwärmesonden handelt es sich um vertikal oder schräg eingebrachte geschlossene Wärmeüberträger, welche in der Regel in Bohrungen mit Tiefen bis 100 m eingesetzt werden [30]. Erdwärmesonden werden hauptsächlich aus Kunststoffen auf der Grundlage von Polyethylen (PE) hergestellt [31].

2.4.2.1 Sondentypen

Für die Erschließung des Erdreichs stehen verschiedene Sondenvarianten zur Verfügung. Die häufigsten sind U-Sonden und Koaxialsonden (Abbildung 2-5) [27].

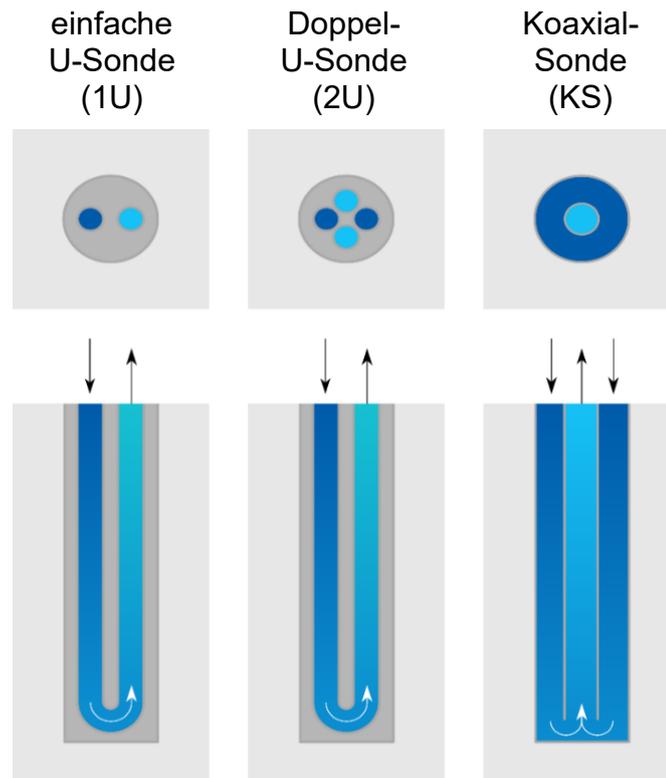


Abbildung 2-5: Typen von Geothermiesonden, oben: Querschnitt, unten: Längsschnitt

Einfache-U-Sonden bestehen aus einer Rohrschleife und haben häufig einen Durchmesser von 32 mm. Doppel-U-Sonden setzen sich aus paarweise gebündelten U-förmigen Rohrschleifen zusammen. Die häufigste Variante ist die Doppel-U-Sonde mit zwei Rohren. Das Fluid strömt dann in den Rohren nach unten und wieder nach oben.

Koaxialsonden zeichnen sich durch einen axialsymmetrischen Vor- und Rücklauf aus. Dabei liegt ein zentrales Rohr und ein weiteres koaxiales Außenrohr vor [24]. Das Fluid strömt beispielsweise in dem Ringspalt zwischen innerem und äußerem Rohr nach unten und dann im inneren wieder nach oben.

Die Sonden werden in eine zuvor erstellte Bohrung eingesetzt und der Ringraum mit einem Spezialbaustoff für Verfüllungen ausgefüllt, um den Anschluss an den Untergrund sicherzustellen.

Die Vorteile der Koaxialsonden liegen in der höheren thermischen Trägheit aufgrund der größeren Fluidmasse in der Sonde. Außerdem wird der gesamte Bohrlochradius thermisch erschlossen. Bei Doppel-U-Sonden sind nur die eingebetteten Kunststoffrohre im Kontakt mit dem Fluid. Tendenziell bedeutet dies eine bessere thermische Leistung für Koaxialsonden im Vergleich zu Doppel-U-Sonden.

2.4.2.2 Wärmetransport innerhalb der Erdwärmesonden

Der thermische Energietransport innerhalb der Erdwärmesonde erfolgt durch das Umpumpen einer Wärmeträgerflüssigkeit (Glykol-Wasser-Gemisch bzw. Sole). Das Fluid wird in den Untergrund geleitet. Durch thermische Wechselwirkungen mit dem Erdreich wird die Flüssigkeit erwärmt und steigt anschließend im anderen Strang der U-Schleife (U-Sonde) bzw. im Ringraum des Rohres (Koaxialsonde) wieder nach oben. Dort wird die Wärme direkt an einen Wärmepumpenkreislauf oder an einen Sekundärkreislauf übergeben. Die Temperatur des zirkulierenden Fluids sinkt durch die Wärmeabgabe und das Fluid fließt zur erneuten Erwärmung in die Sonde.

2.4.2.3 Kriterien zur Dimensionierung der Erdwärmesonden-Anlage

Die Dimensionierung von großen Erdwärmesonden-Anlagen erfolgt nach VDI 4640-2 in Abhängigkeit des erforderlichen Energie- und Leistungsbedarfs sowie unter Einhaltung der Temperaturgrenzen während des geplanten Betriebszeitraumes (i.d.R. 50 Jahre) über Berechnungen. Während des Heizbetriebs sollte die Eintrittstemperatur der Wärmeträgerflüssigkeit im Monatsmittel nicht niedriger als 0 °C sein. Im Kühlbetrieb ist zu beachten, dass die über die Sondentiefe gemittelte ungestörte Erdreichtemperatur nur um weniger als 15 K überschritten wird. [30]

Langfristig ist neben der reinen Übertragungsleistung der Erdwärmesonde auch die jährliche Wärmemenge (geothermische Ergiebigkeit) zu berücksichtigen, um eine Auskühlung bzw. Überhitzung des Erdreichs zu vermeiden. Nach einem Energieentzug im Betriebszeitraum liegt zunächst eine kurze Regenerationszeit der Untergrundtemperaturen vor. Später nähert sich die Temperatur asymptotisch dem Ausgangszustand an. Bei technisch richtiger Auslegung wird das ursprüngliche Temperaturfeld langsam wieder erreicht und der Einfluss der Anlage auf die Erdreichtemperatur bleibt lokal begrenzt. [32]

In Abhängigkeit von unterschiedlichen Randbedingungen sind in der VDI 4640-2 Anhaltswerte für die auf die Sondenlänge bezogenen Entzugsleistung von kleinen Erdwärmesonden-Anlagen in tabellarischer Form angegeben.

2.4.3 Erdwärmekollektoren und Erdwärmekörbe

Erdwärmekollektoren fungieren als horizontale Wärmeüberträger. Anhand der flächig ausgelegten Erdwärmetauscher wird die saisonal gespeicherte thermische Energie des oberflächennahen Untergrundes (bis in etwa 5 m Tiefe) erschlossen [32]. Hierzu werden die Rohre oder Kapillarrohrmatten 0,8 bis 1,6 m unterhalb der Erdoberfläche eingebaut [25].

Erdwärmerohre, die spiralförmig übereinander angeordnet sind, werden Erdwärmekörbe genannt. Sie werden ebenfalls in der saisonalen Zone des Erdreichs eingesetzt. Durch ihre Form sind letztere eine platzsparende Alternative zu Erdwärmekollektoren. [27]

Die maximale Entzugsleistung wird im Vergleich zu den tieferliegenden Erdwärmesonden hauptsächlich durch die hydrogeologischen und klimatischen Bedingungen des Einsatzortes beeinflusst [30]. Die Auslegung erfolgt nach VDI 4640-2 aufgrund der flächenbezogenen Angaben für die Wärmeentzugsleistungen. In Abhängigkeit von unterschiedlichen Randbedingungen sind Anhaltswerte in tabellarischer Form angegeben.

2.4.4 Energiepfähle

Bei Energiepfählen handelt es sich um thermisch aktivierte Gründungspfähle [31]. In Europa werden häufig Betonrammpfähle (Fertigteilpfähle) oder Betonbohrpfähle (Ortbetonpfähle) als Energiepfähle ausgebildet [33]. Die Nutzung von Betonpfahlgründungen zur Erdwärmegewinnung für Heiz- und Kühlzwecke hat sich als innovative Energietechnik in den vergangenen Jahren in Deutschland etabliert [34, 35]. Sie wurde bei zahlreichen Projekten realisiert (z. B. Maintower, Galileo, IG-Metall, Palaisquartier in Frankfurt) [36, 37]. Hierzu werden Rohrleitungen (meist aus Kunststoff) am Bewehrungskorb des Betonpfahls fixiert, wodurch sie vollständig von Beton umschlossen sind und keinen direkten Kontakt zum Erdreich aufweisen. Fertigrammpfähle werden bereits im Fertigteilwerk mit Wärmetauscherrohren ausgestattet [38]. Der Rohrdurchmesser liegt in der Regel zwischen 16 und 32 mm [33].

2.4.4.1 Anordnung und Anzahl der Wärmetauscherrohre im Pfahl

Absorberleitungen können im Pfahl mäander-, spiral- oder U-förmig eingebracht sein. Am weitesten verbreitet ist der Einsatz von mehreren U-Rohren, die durch einen Verteiler am Pfahlkopf zusammengeführt werden (Abbildung 2-6).

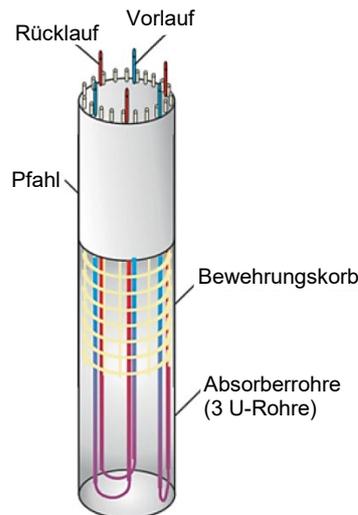


Abbildung 2-6: Energiepfahl mit drei U-Rohren als Absorberrohre [26]

Die Anzahl der Rohre wird nach konstruktiven und energetischen Gesichtspunkten festgelegt. Durch viele Absorberrohre wird zwar der Pfahlquerschnitt geschwächt, aber auch eine Reduzierung des Wärmeübergangswiderstandes im gesamten System erreicht. Der zuletzt genannte Effekt erfolgt jedoch nicht linear. Ab einer bestimmten Rohranzahl lässt sich kaum eine Verbesserung des Bohrlochwiderstandes hervorrufen und die gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen den Rohren nehmen zu [33].

2.4.4.2 Dimensionierung der Energiepfähle

Bei der Planung, Ausführung und Überwachung der Energiepfahlanlage ist darauf zu achten, dass der thermische Einfluss auf die Projektumgebung innerhalb des Toleranzbereiches liegt, ein hydraulischer Abgleich erfolgt und das Wärmetauschersystem entlüftet werden kann [39]. Um die gegenseitige Beeinflussung zwischen den Energiepfählen möglichst gering zu halten, sind Mindestabstände einzuhalten [31].

Darüber hinaus können die Pfähle unterschiedlich verschaltet sein. Bei einer Reihenschaltung liegt zwar ein größerer Durchfluss als bei einer Parallelschaltung vor, jedoch steigen mit zunehmender Leitungslänge die Druckverluste. Für mehrere Pfahlgruppen wird daher eine Kombination aus Reihen- und Parallelschaltungen angewandt [33].

Prinzipiell kann eine Anlage anhand von Richtwerten und dokumentierten Entzugsleistungen bemessen werden. Durch den Einsatz von Energiepfählen lassen sich Leistungen zwischen 10 und 800 kW generieren [27]. Da die tatsächliche Entzugsleistung jedoch unter anderem von örtlichen Rahmenbedingungen abhängt, erfolgt die Anlagendimensionierung in der Ausführungsplanung auf der Basis von systemangepassten Berechnungen und numerischen Simulationen [33].

2.4.4.3 Einbindetiefe der Energiepfähle und auftretende Erdreichtemperaturen

Energiepfähle werden im Vergleich zu üblichen Erdwärmesonden weniger tief in den Untergrund eingebaut. Mit einer Einbindetiefe von ca. 10 bis 30 m liegen die Pfähle in der saisonalen Zone des Erdreichs und teilweise auch unterhalb der neutralen Zone des Untergrundes (Abbildung 2-7). Durch letztere wird die Grenze definiert, ab der die jahreszeitlichen Temperaturänderungen nur noch weniger als 0,1 °C betragen. In Deutschland liegt die neutrale Zone allgemein zwischen 15 und 20 m und weist eine annähernd konstante Temperatur von etwa 10 °C auf. Unterhalb dieses Tiefenbereiches steigt die Erdreichtemperatur pro 100 m Tiefe im Mittel um 3 Kelvin. [31]

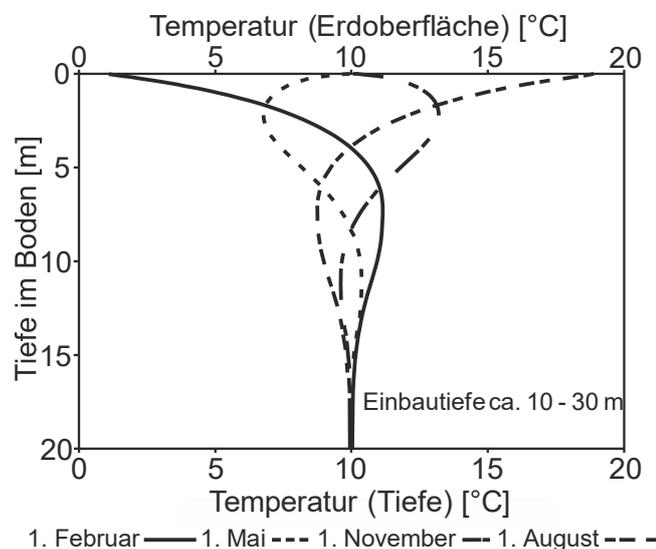


Abbildung 2-7: Jahreszeitliche Temperaturverteilung im Bereich von Energiepfählen [31]

2.5 Lasten- und Energiebedarfsermittlung von Gebäuden sowie Auslegung von Anlagenkomponenten

2.5.1 Kühllastbedarf nach VDI 2078

Mit Hilfe der Richtlinie VDI 2078 werden die Kühllast sowie die Raumtemperaturen von Gebäuden berechnet [40]. Dabei werden innere und äußere Wärmeeinträge zusammengestellt und so der Kühlbedarf in einem dynamischen Verfahren ermittelt. Den inneren Wärmequellen kommt eine immer wichtigere Bedeutung zu, da unter anderem die zunehmend höhere Wärmedämmung die Wärmezu- und -abfuhr in Gebäuden vermindert. Diese sind stark von der Nutzung und von der Art und Regelstrategie haustechnischer Anlagen abhängig. Die äußeren Lasten ergeben sich aus dem Standort und den Eigenschaften der Gebäudehülle.

2.5.2 Heizlastbedarf nach DIN EN 12831-1

Die Heizlast gibt an, wie viel Energie einem Raum bzw. einem Gebäude zugeführt werden muss, um eine definierte Temperatur, unter Berücksichtigung der Verluste über die Gebäudehülle zu ermöglichen. Für die Berechnung der Heizlast nach DIN EN 12831-1 werden dafür die gesamten Transmissionswärme- und Lüftungswärmeverluste für definierte Norm-Außentemperaturen sowie gegebenenfalls zusätzliche Aufheizleistungen ermittelt [41].

2.5.3 Energiebedarf nach DIN V 18599

Die DIN V 18599 stellt eine Methode zur Bewertung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden zur Verfügung. Die Norm ermöglicht die Beurteilung aller Energiemengen, die für den Betrieb eines Gebäudes notwendig sind, und berücksichtigt auch die gegenseitige Beeinflussung. Es erfolgt eine ganzheitliche Bewertung des Gebäudes, der Nutzung und der Anlagentechnik nach dem Monatsbilanzverfahren [42].

2.5.4 Energiebedarf mittels numerischer Simulationen

Mit Hilfe von numerischen Simulationen lässt sich der Energiebedarf von Gebäuden detailliert ermitteln. Dabei können neben den Transmissions- und Lüftungsverlusten sowie den internen Gewinnen auch die Einflüsse der Gebäudetechnik berücksichtigt werden. Eine Zeitschrittsimulation ermöglicht die stundenweise Auswertung sowie eine detaillierte Betrachtung von Extremwerten.

Das Simulationsprogramm TRNSYS [43] bietet sich dafür an, da seine mathematischen Modelle wissenschaftlich anerkannt sind und es ein weit verbreitetes modulares Simulationswerkzeug für Gebäude und Energiesysteme ist, welches verschiedene Komponenten über eigene Module (sogenannte "Types") abbilden kann [44].

2.5.5 Summenlinienmethode für die Auslegung von Anlagenkomponenten

Zur Abschätzung der Heiz- und der Kühlleistung der Wärme- bzw. Kälteerzeuger von Gebäuden kann die Summenlinienmethode verwendet werden [45]. Diese Methode ist hilfreich, wenn durch Wärmespeicher eine gewisse zeitliche Entkopplung zwischen Bedarf und Erzeugung erreicht werden kann und somit die Auslegung der Wärme- bzw. Kälteerzeuger nicht unmittelbar nach der maximalen Leistung erfolgen muss. Das Prinzip ist in Abbildung 2-8 dargestellt. Für einen 48-Stunden-Zyklus werden stündliche Energielastwerte integriert. Der Zyklus enthält die maximale Heizlast in der letzten Hälfte der 48 Stunden. Es wird eine Gerade durch den Ursprung und den Tangentenpunkt gezogen. Die Steigung dieser Geraden stellt die

Wärmepumpenleistung im Versorgungsprofil dar. Die daraus resultierende Wärmepumpenleistung deckt den Wärmebedarf dieser extremen 48-Stunden ab.

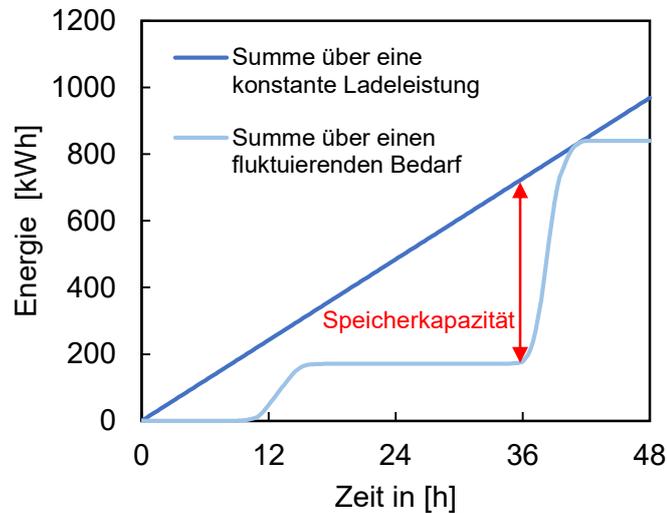


Abbildung 2-8: Veranschaulichung der Summenlinienmethode

Die benötigte Speicherkapazität (in kWh) lässt sich über den größten Abstand zwischen der Erzeugungsgerechten und dem integrierten Bedarfsprofil bestimmen.

2.6 Physikalische Grundlagen

2.6.1 Wärmetransport

Wärmetransport findet ursächlich und ausschließlich aufgrund von Temperaturdifferenzen ΔT zwischen einem Körper und der umschließenden Umgebung statt. Bei Betrachtung der Wärmeübertragung sind der Wärmestrom sowie die Wärmestromdichte von Bedeutung.

Der Wärmestrom \dot{Q} [W] beschreibt, wie viel Energie als Wärme pro Zeiteinheit über die Systemgrenze hinweg übertragen wird.

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \quad (2.1)$$

Die Wärmestromdichte \dot{q} [W/m²] fügt dem Wärmestrom einen Betrachtungsrahmen hinzu und beschreibt somit, wie viel Wärmestrom pro Fläche über die Systemgrenze hinweg übertragen wird.

$$\dot{q} = \frac{d\dot{Q}}{dA} \quad (2.2)$$

Die Übertragung von Wärme kann aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Beschaffenheiten der Elemente des Periodensystems sowie deren unterschiedlichen Bewegungsmuster durch drei verschiedene Transportarten erfolgen:

- Wärmeleitung
- Konvektion
- Wärmestrahlung

Die Übertragungsarten hängen dabei maßgeblich von der Umgebung, dem Aggregatzustand des Objekts und der Oberflächenbeschaffenheit ab. Alle drei Arten können gleichzeitig in einem Medium auftreten.

2.6.2 Wärmeleitung

Die Wärmeleitung beschreibt den Energietransport zwischen Molekülen in einem Medium. Dabei findet dieser Transport immer in Richtung der weniger energetischen Moleküle statt. Eine höhere Temperatur führt zu einer höheren kinetischen Energie der Moleküle.

Diese kinetische Energie wird über molekulare Wechselwirkung in Form von Stößen an die Moleküle mit einer niedrigeren kinetischen Energie übertragen. Somit findet ein Energietransport durch Wärmeleitung sowohl in festen, flüssigen als auch gasförmigen Materialien statt.

Die Wärmestromdichte hängt bei reiner Wärmeleitung allein von der Wärmeleitfähigkeit λ ab. Dies wird durch das Fouriersche Gesetz beschrieben [46], hier vereinfachend für einen eindimensionalen Wärmestrom angegeben.

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.3)$$

Eine sehr enge Molekularstruktur wirkt dabei äußerst positiv auf die Wärmeleitfähigkeit. Diese liegt zum Beispiel in homogenen Festkörpern wie Kupfer und Aluminium vor.

2.6.3 Konvektion

Wird Wärme von einem festen Körper zu einem umgebenden flüssigen oder gasförmigen Medium oder umgekehrt transportiert, spricht man von konvektiver Wärmeübertragung. Dabei findet der Wärmetransport, neben der Wärmeleitung, durch die makroskopischen Bewegungen des Mediums statt. Die konvektive Wärmeübertragung hängt somit auch von Prozessparametern, wie z.B. der Strömungsgeschwindigkeit des Mediums oder dem Turbulenzgrad, ab. Dabei wird zwischen zwei

verschiedenen Arten der Konvektion unterschieden. Erzwungene Konvektion bedeutet, dass die Strömung des Mediums durch eine externe aufgezwungene Druckdifferenz erzeugt wird (z.B. Ventilatoren, Pumpen, Wind). Wenn die Strömung durch Dichteunterschiede des Mediums infolge von Temperaturunterschieden hervorgerufen wird, spricht man von freier Konvektion.

Die Wärmestromdichte kann in Abhängigkeit eines Wärmeübergangskoeffizienten ausgedrückt werden, welcher die einzelnen Prozesse berücksichtigt.

$$\dot{q}_{conv} = h_{conv} \cdot (T_O - T_F) \quad (2.4)$$

Die Temperatur an der Oberfläche T_O sowie die Temperatur des Fluids T_F sind leicht zu ermittelnde Größen. Der Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion h_{conv} ist abhängig vom Strömungs- und Temperaturprofil des Fluids, den Stoffwerten sowie der Geometrie der Oberflächen.

Für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten bei Rohrströmungen existieren Berechnungsansätze in Abhängigkeit der Strömungsart, der Wärmeleitfähigkeit des Fluids und der Rohrgeometrie [47].

Bei Luftschichten wird für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten nach DIN EN ISO 6946 vereinfachend zwischen drei unterschiedlichen Situationen unterschieden: ruhende Luftschichten, leicht belüftete Luftschichten und stark belüftete Luftschichten [48].

Für stark belüftete Luftschichten, welche bei einer normalen Raumbofläche vorliegen, werden je nach Wärmestromrichtung Werte von 0,7 W/(m²·K) (abwärts), 2,5 W/(m²·K) (horizontal) und 5,0 W/(m²·K) (aufwärts) angegeben. Es ist somit einzig die Richtung des Wärmestroms für den Wert des Wärmeübergangskoeffizienten ausschlaggebend. Eine genauere Abbildung ermöglichen temperaturabhängige Ansätze wie die Basiskennlinie, welche abweichende Luftgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen berücksichtigen [49]. Weitere Situationen werden im VDI-Wärmeatlas beschrieben [46]. Dabei wird unter anderem auch zwischen freier und erzwungener Konvektion sowie einer Vielzahl an unterschiedlichen geometrischen Randbedingungen unterschieden.

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient bei ruhenden bzw. leicht belüfteten Luftschichten hängt neben der Richtung des Wärmestroms auch von der Temperaturdifferenz über den Luftraum sowie der entsprechenden Dicke der Luftschicht ab.

2.6.4 Strahlung

Elektromagnetische Strahlung kommt in verschiedenen Wellenlängenbereichen vor und kann als Wärme oder Licht wahrgenommen werden. Die Wärmestrahlung wird durch feste, flüssige und teilweise auch gasförmige Materialien emittiert und absorbiert, wenn der Körper eine thermodynamische Temperatur $T > 0$ K aufweist [50].

Durch die unterschiedlichen Temperaturen von Oberflächen findet zwischen diesen eine Netto-Energieübertragung statt. Diese Energie kann von der jeweils angestrahlten Fläche absorbiert, reflektiert und durchgelassen werden. Dabei ergibt die Summe aus absorbiertem, reflektiertem und durchgelassener Strahlung immer hundert Prozent der Gesamtstrahlung auf die Oberfläche. Den Körper bezeichnet man als schwarzen Strahler, wenn dieser den gesamten Netto-Energiefluss absorbiert bzw. emittiert.

Auch das Fluid, welches sich zwischen den beiden Oberflächen befindet, kann die Streuung, Emission und Absorption der Netto-Energieübertragung beeinflussen. Im Gegensatz zur Wärmeleitung und Konvektion wird jedoch kein Medium benötigt. Die Energieübertragung durch Strahlung ist somit auch im Vakuum möglich.

Die Wärmestromdichte durch Strahlung hängt von der thermodynamischen Temperatur des Körpers T , der Stefan-Boltzmann-Konstante σ und des Emissionsgrads ε ab.

$$\dot{q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.5)$$

Reale Strahler weisen einen Emissionsgrad auf, der bei den meisten nichtmetallischen Oberflächen zwischen 0,9 und 0,95 liegt. Bei metallischen Oberflächen ist eine große Streuung vorhanden, die auch zu deutlich niedrigeren Werten führen kann.

Für Flächen, die Strahlung austauschen, werden in der Literatur Sichtfaktoren bzw. Einstrahlzahlen φ_{ij} definiert, welche die optische Verbindung der Flächen beschreiben und somit die empfangene im Vergleich zur abgestrahlten Energiemenge in Verbindung setzen [51]. Damit lässt sich der Strahlungsaustausch zwischen einzelnen Flächen ermitteln.

$$\dot{Q}_{ij} = \varepsilon_i \cdot \varepsilon_j \cdot \sigma \cdot (T_i^4 - T_j^4) \cdot A_i \cdot \varphi_{ij} \quad (2.6)$$

Indem der Wärmestrom auf die Fläche und die Temperaturdifferenz bezogen wird, kann ein radiativer Wärmeübergangskoeffizient ermittelt werden. Näherungsweise lässt sich dieser für kleine Temperaturdifferenzen im Verhältnis zur absoluten Temperatur mit einer mittleren Temperatur T_m bestimmen.

$$h_{rad} = 4 \cdot \varepsilon_i \cdot \varepsilon_j \cdot \sigma \cdot T_m^3 \cdot \varphi_{ij} \quad (2.7)$$

Eine Bilanzierung mehrerer im Strahlungsaustausch stehender Flächen ist nach der Netto-Strahlungsmethode möglich [51]. Das resultierende Gleichungssystem lässt sich mittels Matrizenrechnung lösen. Dabei wird die emittierte Strahlung M und die reflektierte Strahlung der Bestrahlungsstärke E zur Helligkeit H zusammengefasst. Damit lässt sich der resultierende radiative Wärmestrom einer Oberfläche ermitteln.

$$\dot{Q}_i = A_i \cdot (H_i - E_i) \quad (2.8)$$

2.6.5 Wärmeübergang

Der Wärmeübergangskoeffizient von Oberflächen besteht aus einem konvektiven und einem radiativen Anteil, wird bei bauphysikalischen Anwendungen jedoch häufig zusammengefasst.

$$h_{ges} = h_{conv} + h_{rad} \quad (2.9)$$

Neben dem Temperaturunterschied ist der konvektive Wärmeübergang stark von der Strömung abhängig. Der radiative Wärmeübergang erfolgt auf elektromagnetischem Weg. Daher ist dieser neben dem Temperaturunterschied stark von der Geometrie und den Oberflächeneigenschaften abhängig.

2.7 Prüfung und Bewertung der Energieübergabe von thermisch aktivierten Systemen an den Raum

2.7.1 DIN EN 14240 und DIN EN 14037

Um die Leistungen unterschiedlicher Deckensysteme im Kühl- und im Heizfall vergleichen zu können, müssen labortechnische Leistungsprüfungen gemäß DIN EN 14240 bzw. DIN EN 14037 durchgeführt werden.

DIN EN 14240 beschreibt Prüfbedingungen und Verfahren zur Bestimmung der Kühlleistung von Kühldecken und gilt für sämtliche Bauarten von Kühlflächensystemen [52]. Eine Bestimmung der Heizleistung sieht diese Norm nicht vor. Allerdings existieren Ansätze zur Bestimmung der Heizleistung aus der Kühlleistung [14].

DIN EN 14037 beschreibt Prüfbedingungen und Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleistung frei abgehängter aktiver Systeme in hallenartigen Gebäuden [53]. Näherungsweise kann damit auch die Leistung von Systemen in Räumen mit geringerer Höhe bestimmt werden [14].

Die Leistung wird in beiden Normen über die Differenz aus Vor- und Rücklauf-temperatur $T_{w2} - T_{w1}$ sowie der spezifischen Wärmekapazität c_p und dem Massenstrom \dot{m} des Mediums im Leitungssystem berechnet.

$$\dot{Q}_i = c_p \cdot \dot{m} \cdot (T_{w2} - T_{w1}) \quad (2.10)$$

Mit:

\dot{Q}_i Kühl- bzw. Heizleistung [W]

c_p Spezifische Wärmekapazität des Mediums im Leitungssystem [J/(kg·K)]

\dot{m} Massenstrom des Mediums im Leitungssystem [kg/s]

T_{w2} Rücklauf-temperatur des Mediums im Leitungssystem [°C]

T_{w1} Vorlauf-temperatur des Mediums im Leitungssystem [°C]

Die spezifische Leistung \dot{q}_i kann anschließend über die aktive Deckenfläche A_a ermittelt werden.

$$\dot{q}_i = \frac{\dot{Q}_i}{A_a} \quad (2.11)$$

2.7.2 Betriebskennlinie

Die Bestimmung des Wärmeaustauschs eines Deckensystems mit der Umgebung erfolgt über die Berechnung der Wärmestromdichte \dot{q} der Oberflächen in W/m². Die ausgetauschte spezifische Wärmemenge, auch Wärmeleistung genannt, wird bei der Bewertung von thermisch aktivierten Systemen auf die Temperaturdifferenz zwischen operativer Raumtemperatur und mittlerer Wassertemperatur bezogen. Die mittlere Wassertemperatur wird aus Vor- und Rücklauf-temperatur des Wasserkreislaufes berechnet.

Die resultierende Betriebskennlinie des Deckensystems in W/(m²·K) gibt damit an wie die Wärmeaufnahme bzw. Wärmeabgabe des Systems variiert, bezogen auf diese Temperaturdifferenz. In Abbildung 2-9 wird eine Betriebskennlinie beispielhaft dargestellt. Die Funktion der Betriebskennlinie kann mit 10 W/(m²·K) beschrieben werden. Aus messtechnischen Untersuchungen abgeleitete Betriebskennlinien, wie die Basiskennlinie, sind in der Regel nur näherungsweise linear und können mit einem Exponenten versehen werden. Bei geringen Temperaturunterschieden ist der Einfluss der Nichtlinearität allerdings gering, so dass eine lineare Darstellung als hinreichend genau angesehen werden kann.

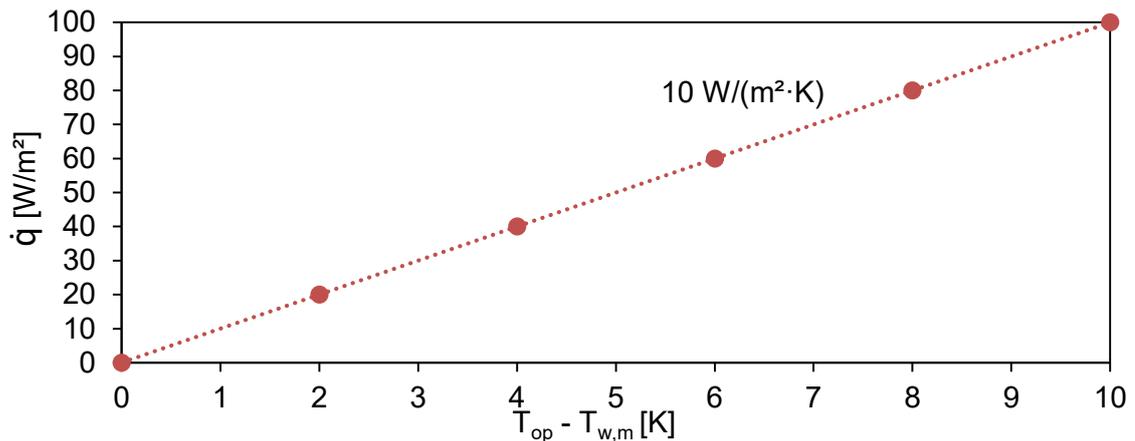


Abbildung 2-9: Beispielhafte Darstellung einer Betriebskennlinie mit der Funktion $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

2.8 Prüfung und Bewertung von solaren Systemen

2.8.1 DIN EN ISO 9806

DIN EN ISO 9806 legt Prüfverfahren für die Bewertung der thermischen Leistungsfähigkeit von Flüssigkeitskollektoren fest und gilt auch für Hybridkollektoren, die Wärme und Strom erzeugen [54].

Für die Abbildung des thermischen Ertrags solarthermischer Systeme kann in Anlehnung an diese Norm ein analytischer Ansatz verwendet werden. Dabei wird die optische Effizienz über einen Wirkungsgrad η_0 und die Einstrahlung I abgebildet. Die Modultemperaturabhängigkeit T_m wird über einen linearen Koeffizienten a_1 und einen quadratischen Koeffizienten a_2 für die Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur T_U abgebildet. Außerdem wird die Abhängigkeit der Leistung von der Windgeschwindigkeit über die Koeffizienten a_3 und a_6 in Zusammenhang mit dieser Temperaturdifferenz und der Einstrahlung abgebildet. Die freie Kühlung durch Strahlung wird ebenfalls über einen Koeffizienten a_4 berücksichtigt. Dazu wird das Konzept eines schwarzen Strahlers genutzt und die Differenz der vierten Temperaturpotenzen mit der Stefan Boltzmann Konstante σ multipliziert. Dabei kommt die Strahlungsdifferenz zur Himmelstemperatur T_H zur Anwendung. Die thermische Trägheit $\frac{\delta T_m}{\delta t}$ wird ebenfalls über einen Koeffizienten a_5 berücksichtigt. Bei der richtigen Wahl aller Koeffizienten lassen sich so die erwähnten Effekte kombiniert in einer Formel abbilden. Abhängig von der Kollektorfläche A kann die daraus resultierende Formel in allgemeiner Form in folgender Gleichung angegeben werden.

$$\begin{aligned} \dot{Q} = & \left(\eta_0 \cdot I - a_1 \cdot (T_m - T_U) - a_2 \cdot (T_m - T_U)^2 - a_3 \cdot v_w \cdot (T_m - T_U) \right. \\ & \left. + a_4 \cdot \sigma \cdot (T_m^4 - T_H^4) - a_5 \frac{\delta T_m}{\delta t} - a_6 \cdot v_w \cdot I \right) \cdot A \end{aligned} \quad (2.12)$$

2.8.2 Standardtestbedingungen und Normalbedingungen von PV-Modulen

Um Solarmodule miteinander vergleichen zu können, wird die Leistung unter Standardtestbedingungen (STC) ermittelt. Die solare Einstrahlung beträgt dabei 1000 W/m² bei einer Modultemperatur von 25 °C und einem definierten Spektrum des Sonnenlichts. Die ermittelte Leistung entspricht in der Regel nicht der realen und wird daher als W_p (Watt peak) bezeichnet [17].

Der Wirkungsgrad in der Photovoltaik η ist temperaturabhängig. So führen steigende Modultemperaturen bei Zellen aus Silizium zur Abnahme der Leistung um ca. 0,4 % / K Abweichung gegenüber den STC [55]. Diese Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrads kann durch einen Temperaturkoeffizienten γ beschrieben werden [25]. Der Nennwirkungsgrad η_0 ist in der Regel im Datenblatt des Moduls angegeben. Er stellt den Wirkungsgrad unter STC-Bedingungen dar. Damit ergibt sich der folgende Zusammenhang.

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 + \gamma \cdot (T_{Modul} - 25 \text{ } ^\circ\text{C})) \quad (2.13)$$

Die Parameter von Solarmodulen können auch unter Normalbedingungen (NOCT) ermittelt werden, die näher an realen Betriebsbedingungen liegen. Die solare Einstrahlung beträgt hierbei 800 W/m² bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s und demselben Spektrum des Sonnenlichts. Dabei wird auch die reale Modultemperatur bestimmt, welche sich in der Regel in einer Größenordnung von 45 °C befindet [55].

Die Performance Ratio (PR) ist der Zusammenhang zwischen realem und idealem Energieertrag einer Photovoltaikanlage und beschreibt die typischen Systemverluste durch Modulverschmutzung, Verschattung, Teillastbetrieb, Erwärmung sowie Leitungsverluste. Gute Anlagen erreichen Werte von über 0,8. Bei schlechten kann der Wert bei unter 0,6 liegen [55].

2.9 Prüfung und Bewertung von geothermischen Systemen

2.9.1 VDI 4640

Für die Dimensionierung geothermischer Anlagen steht die VDI Richtlinie 4640 zur Verfügung, die sich mit der thermischen Nutzung des Untergrundes befasst. In fünf Teilen werden allgemeine Grundlagen, genehmigungsrechtliche und umweltrelevante Aspekte, erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, unterirdische Wärmespeicherung, die direkte Nutzung ohne Wärmepumpe sowie Messverfahren zur Ermittlung der Leitfähigkeit des Untergrundes behandelt [32].

Auf Basis der Berechnung der Heizlast kann damit die Bemessung von geothermischen Systemen erfolgen. Die Entzugsleistung ist abhängig von den im Untergrund anstehenden Schichten und deren Wärmeleitfähigkeit. Je nach System lässt sich die benötigte Anzahl und Tiefe bzw. Fläche mit Hilfe der VDI 4640 bestimmen.

2.9.2 Verfahren nach Hellström

Das analytische Verfahren nach Hellström kann zur Bestimmung der Bohrlochwiderstände von Erdwärmesonden verwendet werden. Grundsätzlich wird die Effizienz von Wärmetauschern anhand der thermischen Widerstände innerhalb eines Sonden-Erdreichsystems beschrieben. Nach Hellström werden letztere zu sogenannten thermischen Bohrlochwiderständen zusammengefasst. Der thermische Widerstand zwischen dem Erdreich und den Absorberleitungen wird als äußerer Bohrlochwiderstand R_b definiert. Der interne Widerstand infolge des thermischen Kurzschlusses zwischen dem auf und ab fließenden Sondenfluid wird als innerer Bohrlochwiderstand R_a bezeichnet [56].

Die beiden Bohrlochwiderstände werden in Abhängigkeit von den Wärmeübergangskoeffizienten, den Querschnittsabmessungen des Bohrlochs und der Sondenrohre, der Anordnung der Rohre im Bohrloch und der Wärmeleitfähigkeit der Materialien bestimmt und können zu einem resultierendem Bohrlochwiderstand R_b^* zusammengefasst werden.

2.9.3 Numerische Berechnungen

Aufgrund der zahlreichen Parameter und der Komplexität des gesamten Wärmetransports vom Boden bis zum Wärmeträger können auch numerische Verfahren angewendet werden. Für die Berechnung der thermischen Vorgänge ist das Lösen von Differentialgleichungen mit Hilfe von Approximationsansätzen erforderlich.

Mit Hilfe spezieller Software kann dies basierend auf der Finite-Elemente-Methode (FEM), der Finite-Differenzen-Methode (FDM) oder der Finite-Volumen-Methode

(FVM) erfolgen. Hauptunterschied der Verfahren ist die Art der Diskretisierung des betrachteten Bereichs [57].

Die numerische Modellierung von laminaren und turbulenten Fluidströmungen ist mit Hilfe der numerischen Strömungsmechanik (CFD) möglich. Dabei werden strömungsmechanische Probleme approximativ gelöst. Häufig kommen dabei die zuvor genannten Methoden zum Einsatz.

3 Strahlungsbasierte Flächenheiz- und -kühlelemente

3.1 Einleitung

Hallengebäude zeichnen sich durch große zusammenhängende Flächen und hohe Raumhöhen aus. Die Temperierung kann sich dabei als anspruchsvoll erweisen. Die Anforderungen ergeben sich aufgrund der geometrischen und nutzungsbedingten Randbedingungen, die sich zum Teil deutlich von anderen Gebäuden unterscheiden.

So weisen Lager- und Industriehallen in der Regel große Öffnungen in Form von Hallentoren auf, die den Luftwechsel temporär beschleunigen und eine Veränderung der Raumtemperatur verursachen. Auswirkungen ergeben sich unter anderem auf die thermische Behaglichkeit von Personen und den Energiebedarf des Gebäudes.

Die Fassadengestaltung von Hallengebäuden erfolgt häufig in Leichtbauweise mittels Stahlsandwichelementen. Im Dachbereich kommen auch mit einer Außendämmung versehen Trapezprofile zum Einsatz. Der untere Abschluss erfolgt in der Regel mittels einer Bodenplatte, die im Randbereich gedämmt wird.

3.2 Thermisch aktiviertes Trapezprofil

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Stahltrapezprofil mit integrierten Strahlungsplatten untersucht. Es soll gezeigt werden, wie die im Stand der Technik genannten Vorteile eines großflächigen, strahlungsbasierten Systems in Kombination mit der Verwendung einer Niedertemperaturquelle in einer klassischen, im Gewerbebau häufig anzutreffenden Trapezprofilkonstruktion umgesetzt werden können.

Trapezprofile bieten sich an dieser Stelle an, da sie aufgrund ihrer Geometrie eine Integration von strahlungsbasierten Paneelen zwischen den Untergurten ermöglichen. Dadurch steht eine große Fläche zur Temperierung zur Verfügung. Gleichzeitig kann durch den Kontakt zu dem Stahltrapezprofil auch die verbleibende sichtbare Fläche in gewissem Umfang bei der Temperierung mitwirken. Abbildung 3-1 beschreibt exemplarisch eine solche Integration in ein Trapezprofil sowie einen resultierenden Wärmetransport zum bzw. vom Raum, dessen Abschluss das Trapezprofil bildet.

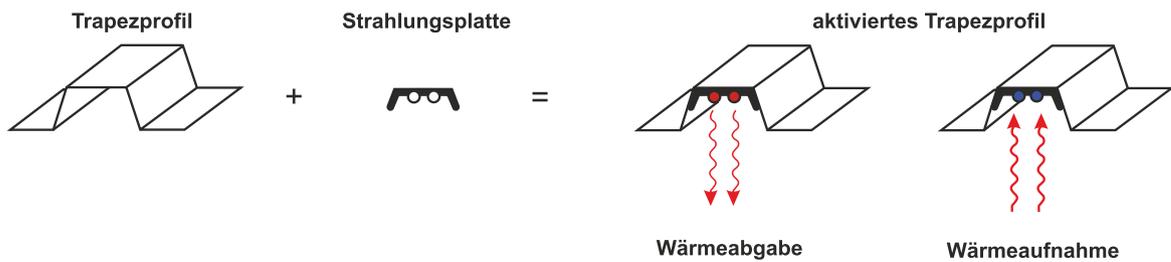


Abbildung 3-1: Prinzipskizze der Integration einer Strahlungsplatte in ein Trapezprofil sowie der Wärmetransport des aktivierten Trapezprofils

3.3 Voruntersuchungen

Um den Einfluss verschiedener Geometrien bzw. unterschiedlicher Positionierung der Strahlungsplatten abschätzen zu können, wird zunächst für ein exemplarisches Trapezprofil [58] eine lineare Vereinfachung der Geometrie durchgeführt (Abbildung 3-2).

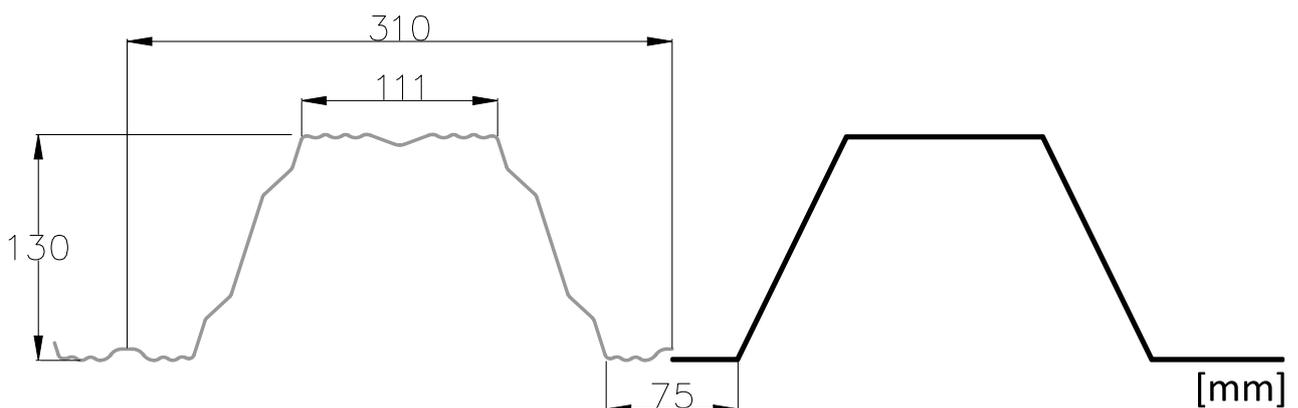


Abbildung 3-2: Verwendetes Trapezprofil für die Voruntersuchungen, links: realer Querschnitt, rechts: lineare Vereinfachung

Anschließend wird anhand eines exemplarischen Modells, bei dem die Strahlungsplatte im Obergurt montiert wird, eine Parameterstudie durchgeführt. Der radiative Wärmeübergangskoeffizient von Oberflächen h_{rad} ist stark von der Geometrie, den Oberflächeneigenschaften und den Temperaturen abhängig. Im Rahmen der Parameterstudie wurden die Einflussfaktoren untersucht. Für einen exemplarischen Temperaturfall werden für das gewählte Modell die radiativen Wärmeübergangskoeffizienten separat für jede einzelne Profiloberfläche ermittelt. Die Bezeichnung der einzelnen Oberflächen kann Abbildung 3-3 entnommen werden.

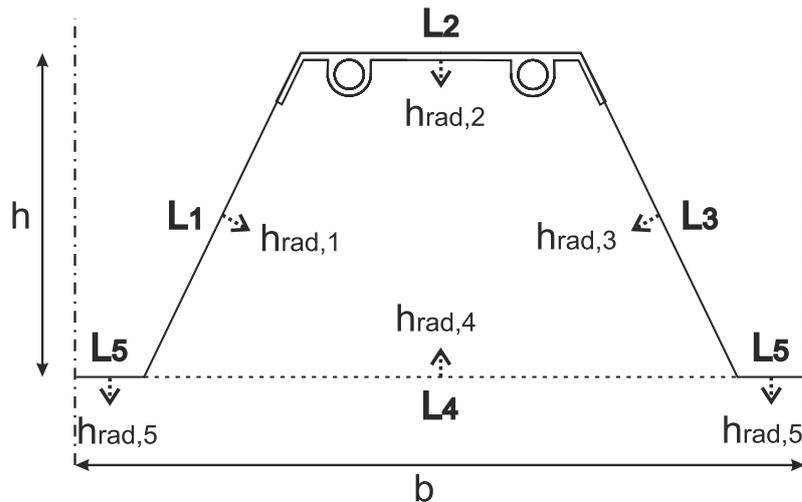


Abbildung 3-3: Oberflächenbezeichnungen und radiative Wärmeübergangskoeffizienten des verwendeten Trapezprofils für die Voruntersuchungen

Die Länge der einzelnen Oberflächen sowie angenommene Temperaturen für die Berechnung können Tabelle 3-1 entnommen werden. Die Temperatur der virtuellen Fläche L_4 symbolisiert hierbei die Raumtemperatur. Die Begrenzungsflächen L_1 und L_3 werden aufgrund der Symmetrie der Modelle als identisch angesehen.

Tabelle 3-1: Profilgeometrie und Temperatur

	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	b	h
Länge [mm]	144	111	144	235	37,5	310	130
Temperatur [°C]	26	35	26	20	24	-	-

3.3.1 Einflussfaktoren der radiativen Wärmeübergangskoeffizienten

Die radiativen Wärmeübergangskoeffizienten werden unter der Annahme von Temperaturen, Emissionsgraden sowie den geometrischen Randbedingungen bestimmt. Die gesonderte Betrachtung der Einflüsse kann verdeutlichen, wie sich dieser Wärmeübergangskoeffizient entwickelt. Die Einflüsse werden daher in einer Parameterstudie untersucht. Die Untersuchung erfolgt über die Ermittlung der radiativen Wärmeübergangskoeffizienten der einzelnen Oberflächen anhand des exemplarischen Modells.

3.3.1.1 Emissionsgrad

Abbildung 3-4 veranschaulicht das Verhältnis zwischen Emissionsgrad und radiativem Wärmeübergangskoeffizienten. Aus dem Diagramm ist zu erkennen, dass der Emissionsgrad der Profiloberfläche eine wichtige Rolle spielt. Der Wärmeübergangskoeffizient aller Oberflächen, inklusive Stege (L_1/L_3), nimmt mit steigendem Emissionsgrad ε bis 0,8 zu. Darüber hinaus steigen die radiativen Wärmeübergangskoeffizienten der Strahlungsplatte (L_2), des resultierenden Wertes zum Raum

(L₄) sowie des Untergurtes (L₅) weiter an. Beim Untergurt sowie bei der Strahlungsplatte kann eine deutliche Erhöhung beobachtet werden. Eine Ausnahme stellen die Stege dar, wo sich die Wärmeübergangskoeffizienten lediglich verdoppeln und ab einem Emissionsgrad von 0,8 nicht weiter steigen. Aufgrund der vergleichsweise hohen Temperaturdifferenzen innerhalb des Profils führen die Interaktionen zwischen den Teilflächen zu diesem Effekt. Ein geringerer Temperaturunterschied der Oberflächen würde auch im Stegbereich zu deutlich höheren Werten führen.

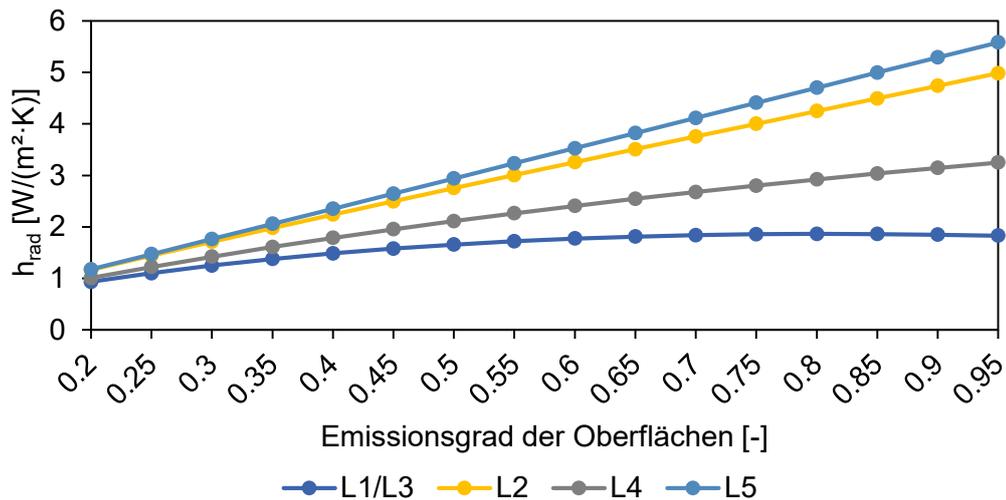


Abbildung 3-4: Entwicklung der radiativen Wärmeübergangskoeffizienten unter Einfluss des Emissionsgrads

3.3.1.2 Oberflächentemperaturen

Mittels einer Parametervariation wird der Einfluss des Temperaturunterschieds zwischen den Oberflächen betrachtet. Um den Einfluss der Temperaturen der Oberflächen zu verdeutlichen, werden die Temperaturunterschiede zwischen den Stegen (L₁/L₃) und der Strahlungsplatte (L₂) verändert. Die Oberflächentemperatur der Strahlungsplatte sowie die Raumtemperatur (L₄) werden dabei konstant gehalten.

Die Temperatur der Stege variiert dabei zwischen 34 und 25 °C. Abbildung 3-5 zeigt, dass sich der radiative Wärmeübergangskoeffizient der Strahlungsplatte mit steigendem Temperaturunterschied erhöht. Gleichzeitig verringern sich jedoch die radiativen Wärmeübergangskoeffizienten der Stege sowie der resultierende Wert zum Raum.

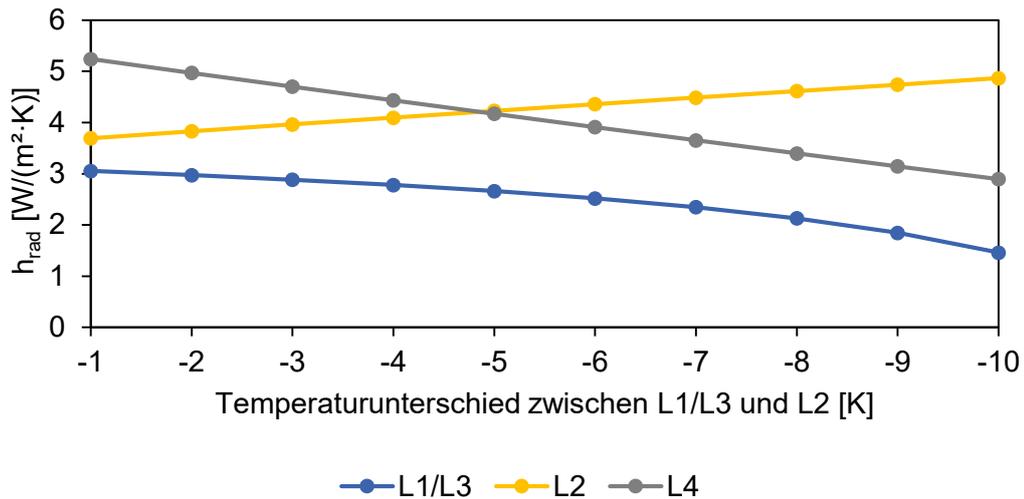


Abbildung 3-5: Entwicklung der radiativen Wärmeübergangskoeffizienten unter Einfluss von Temperaturunterschieden zwischen L_1/L_3 und L_2

3.3.1.3 Position der Strahlungsplatte

Im Rahmen einer weiteren Parametervariation wurde die Entwicklung der radiativen Wärmeübergangskoeffizienten aller Oberflächen unter dem Einfluss der Strahlungsplattenhöhe untersucht. Das Verhältnis a/h wird dabei von 0 bis 1 variiert. Dabei bezeichnet a den Abstand zwischen der Strahlungsplatte und dem Profilogergurt und h die Profilhöhe (Abbildung 3-6). Die Temperaturen aller Oberflächen bleiben in diesem Fall konstant und entsprechen den Werten in Tabelle 3-1.

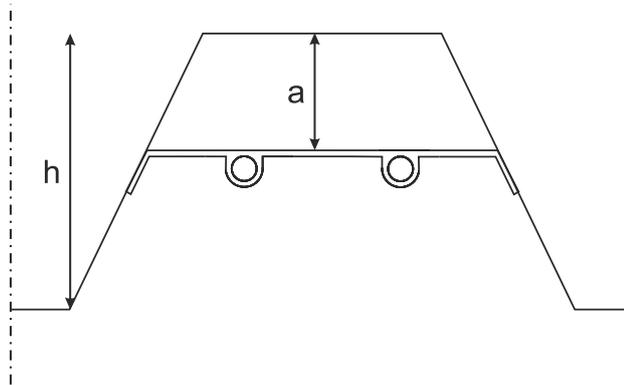


Abbildung 3-6: Variation der Positionierung der Strahlungsplatte

Die Strahlungsplatte (L_2) unterteilt die Stege (L_1/L_3) in einen oberen und einen unteren Teil. Der ermittelte Wärmeübergangskoeffizient bezieht sich hierbei auf die zum Raum hin orientierte untere Seite.

In Abbildung 3-7 ist zu erkennen, dass beim resultierenden Wert zum Raum (L_4) der größte Einfluss vorhanden ist. Der radiative Wärmeübergangskoeffizient steigt deut-

lich, wenn die Strahlungsplatte sich ausgehend vom Obergurt dem Untergurt annähert. Bei der Oberfläche der Strahlungsplatte (L_2) ist ebenfalls eine Erhöhung des radiativen Wärmeübergangskoeffizienten zu beobachten. Dabei nähert sich die Strahlungsplatte immer mehr der Wirkungsweise einer rein horizontalen Oberfläche an. Gleichzeitig wird der radiative Wärmeübergangskoeffizient der Stegflächen reduziert. Im Gegensatz zu anderen Einflussparametern, wie dem Emissionsgrad oder den Temperaturunterschieden, verändern sich hier die Einstrahlzahlen der einzelnen Oberflächen bei Variation der Position der Strahlungsplatte. Mit steigendem Verhältnis a/h erhöht sich die Einstrahlzahl zwischen Strahlungsplatte und Raum aufgrund des erhöhten direkten Strahlungsaustauschs.

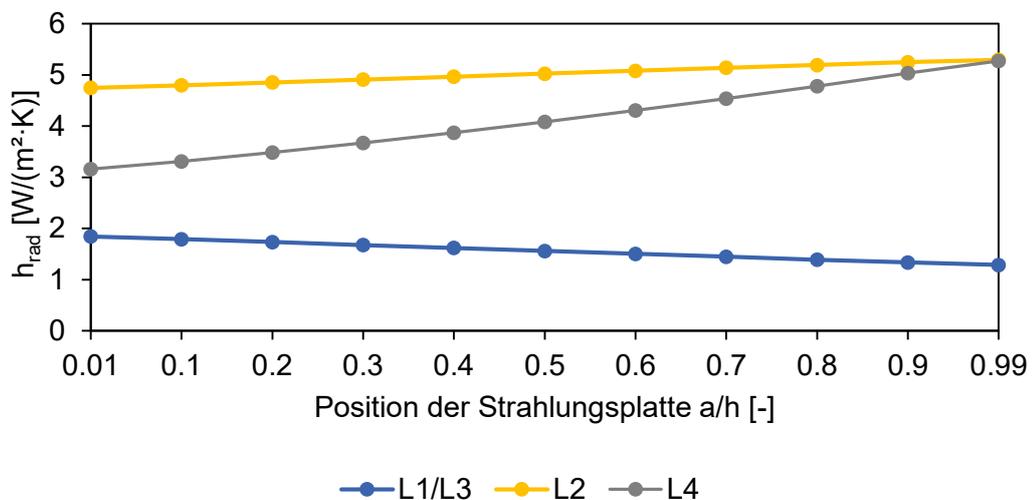


Abbildung 3-7: Entwicklung der radiativen Wärmeübergangskoeffizienten unter Einfluss der Position der Strahlungsplatte im Trapezprofil

3.3.2 Fazit der Parameterstudie

Die Auswertung der Parameterstudie zeigt auf, dass alle untersuchten Faktoren Einflüsse auf die radiativen Wärmeübergangskoeffizienten der jeweiligen Oberflächen aufweisen.

Der Emissionskoeffizient aller Oberflächen sollte möglichst hoch sein, um eine hohe Abstrahlung zu gewährleisten. Blanke Metalle würden zu einer unnötigen Reduktion des Strahlungsaustausches führen. Mittels gängiger Beschichtungen der Trapezprofile sowie der Strahlungsplatten wird aber bereits ein hoher Emissionskoeffizient von bis zu 0,95 realisiert [46].

Ein zunehmender Temperaturunterschied zwischen der Strahlungsplatte und den Stegen führt auf der einen Seite zu einer höheren Wärmeabgabe der Strahlungsplatte, auf der anderen Seite aber zu einer geringeren Abgabe durch die Stege und insgesamt zu einer Verringerung der Abgabe zum Raum. Ein guter Kontakt zwischen Strahlungsplatte und Steg kann den Temperaturunterschied verringern und

dazu beitragen, dass das gesamte Trapezprofil thermisch aktiviert wird und auch die Stege sowie der Untergurt sich an dem Wärmeaustausch beteiligen.

Eine Annäherung der Strahlungsplatte an den Untergurt führt zu einer Erhöhung des radiativen Wärmeüberganges der Strahlungsplatte. Die Oberfläche der Strahlungsplatte sowie der direkte Strahlungsaustausch zum Raum hin werden dadurch erhöht. Trotz der damit einhergehenden reduzierten Werte der Stege ist mit einer Leistungszunahme zu rechnen, da der Einfluss der Stege entsprechend verringert wird. Somit ist nach Möglichkeit eine Montage im unteren Bereich der Stege anzustreben.

3.4 Planung und Erstellung des Demonstrators

3.4.1 Planung und Entwurf

Aufgrund der Ergebnisse der Voruntersuchungen wurde ein Demonstrator für weitere messtechnische Untersuchungen entworfen und erstellt. Die thermisch aktivierten Trapezprofile bestehen aus zwei Hauptbestandteilen, den Trapezprofilen und den Strahlungsplatten (Abbildung 3-8).



Abbildung 3-8: Hauptbestandteile der thermisch aktivierten Trapezprofile, links: Trapezprofil, rechts: Strahlungsplatten

Das Trapezprofil stellt die lastabtragende Deckenkonstruktion dar. Für diese Arbeit wurden drei Trapezprofile mit einer Höhe von 130 mm, einer Rippenbreite von 310 mm und einer effektiven Breite von 930 mm verwendet [58]. Die Profile haben eine Dicke von 1 mm, sind aus einem S350 Stahl hergestellt und haben jeweils eine Spannweite von 2500 mm. Ein Detail des verwendeten Trapezprofils mit eingebauter Strahlungsplatte [59] wird in Abbildung 3-9 skizziert.

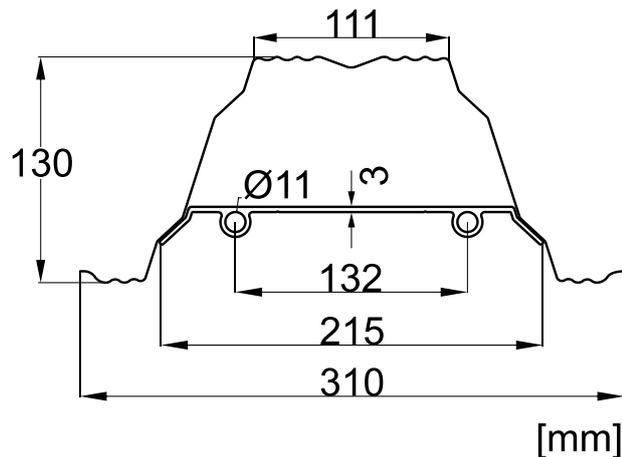


Abbildung 3-9: Detailskizze des verwendeten Trapezprofils mit integrierter Strahlungsplatte

Die Strahlungsplatten aus Aluminium wurden per Strangpressverfahren hergestellt und sind im Querschnitt genau auf die Breite im unteren Stegversatz der verwendeten Trapezprofile abgestimmt. Die Dicke der Strahlungsplatte beträgt 3 mm, der Flansche jeweils 2,5 mm und der Rohre 2,8 mm. Der durchflossene Durchmesser der eingebetteten Rohre beträgt 11 mm. Die Höhe der gesamten Strahlungsplatte beträgt 21,6 mm bei einer Länge von 2300 mm. Über Schraubverbindungen können die Strahlungsplatten passgenau im Stegversatz der Trapezprofile mit diesen verbunden werden. Dadurch werden die Strahlungsplatten in das Trapezprofil integriert und es entsteht eine homogene Optik der Decke (Abbildung 3-10).

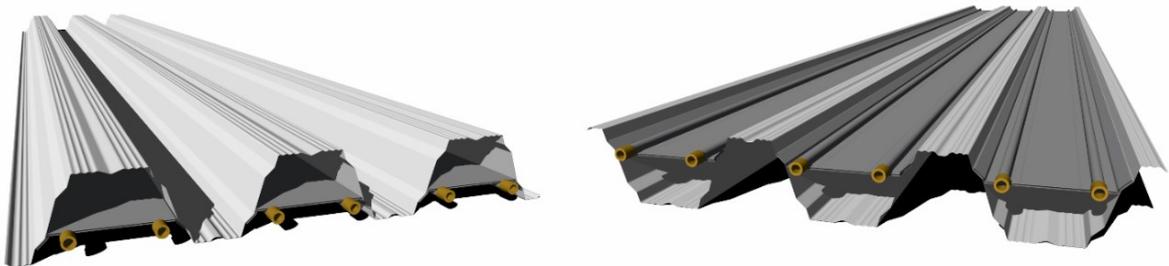


Abbildung 3-10: 3D-Darstellung des Demonstrators aus verschiedenen Perspektiven

Die Funktionsweise der Strahlungsplatten entspricht gewöhnlichen wasserführenden Systemen. Durch die Leitungsquerschnitte fließt ein Kühl- bzw. Heizmedium und es findet dadurch ein Wärmeaustausch über die Strahlungsoberflächen mit der Umgebung statt. Gleichzeitig findet eine Wärmeleitung zu den Trapezprofilen statt, die sich dann ebenfalls am Wärmeaustausch beteiligen können.

Durch das Aluminium sind die Strahlungsplatten besonders leicht. Eine zusätzliche Belastung infolge Eigengewichts, die das Trapezprofil tragen müsste, ist daher gering. Außerdem hat Aluminium eine verhältnismäßig gute Wärmeleitfähigkeit,

wodurch sich die Wärme in den Strahlungsplatten gleichmäßig und schnell ausbreiten kann.

3.4.2 Realisierung des Demonstrators

Für die Zusammensetzung zum Demonstrator wurden insgesamt acht Strahlungsplatten und drei Trapezprofile verwendet. Die Trapezprofile wurden zu einem Probekörper zusammengesetzt, so dass die acht Strahlungsplatten integriert werden konnten. Dadurch wurde ein nahezu quadratischer Demonstrator ermöglicht. Die Gesamtbreite der zusammengesetzten Trapezprofile beträgt 2555 mm, bei einer Spannweite von 2500 mm. Die Montage der vorgebohrten Strahlungsplatten an die Trapezprofile erfolgt über Schraubverbindungen. Die Länge der Strahlungsplatten beträgt 2300 mm, wodurch an den Enden Raum für die Verbindung der Anschlüsse verbleibt. Somit ergibt sich eine thermisch aktivierte Deckenfläche von ca. 5,75 m² als horizontale Projektion.

An den Enden der Strahlungsplatten wurden in die Rohre Gewinde gebohrt, so dass für die Leitungsanschlüsse Doppelnippel eingeschraubt werden konnten. Die Verbindung der einzelnen Rohre der Strahlungsplatten sowie der Anschluss zu den benachbarten Platten erfolgte mittels flexiblen Stahlflexleitungen (Abbildung 3-11). Somit wurde ein in Reihe geschalteter Wasserkreislauf umgesetzt.



Abbildung 3-11: Detailaufnahmen des Demonstrators, links: integrierte Strahlungsplatte, rechts: Anschluss mittels Stahlflexleitung

3.5 Bestimmung der Leistung thermisch aktivierter Trapezprofile

3.5.1 Thermischer Leistungsprüfstand

Die Durchführung von thermischen Untersuchungen an Probekörpern von großflächigen Deckensystemen erfordert einen großen Prüfraum, welcher bauphysikalische Anforderungen an den Wärmeschutz und die Luftdichtigkeit erfüllt. Die thermische Leistungsermittlung erfordert den Einsatz von verschiedenen Technikkomponenten, die in den Prüfstand integriert werden müssen. Dazu zählen Systeme zur Temperierung der Probekörper und des Prüfraumes, wie Umwälzthermostate oder Kühllastsimulatoren die jeweils eine definierte Wärmeleistung abgeben können. Zusätzlich ist eine Steuerungseinheit der Kühllastsimulatoren erforderlich um eine konstante Temperatur im Raum zu erzielen. Die Durchführung von Versuchen, bei welchen der Raum durch einen Probekörper beheizt wird, erfordert den Einbau eines zusätzlichen Kühlsystems, um die Wärme aus dem Prüfraum abzuführen. Temperatursensoren und Wärmestrommessplatten in Kombination mit einem System zur Datenerfassung ermöglichen die Analyse der Energieströme am und innerhalb des Deckensystems.

Für die Untersuchungen der Demonstratoren wurde im Rahmen dieser Arbeit ein thermischer Leistungsprüfstand entwickelt, der die zuvor genannten Kriterien erfüllt (Abbildung 3-12).

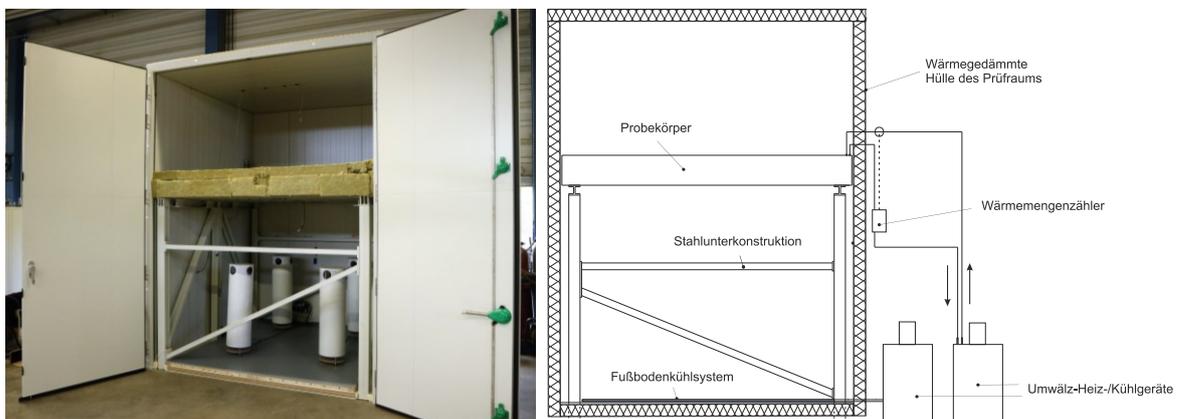


Abbildung 3-12: Thermischer Leistungsprüfstand, links: Aufnahme im geöffneten Zustand, rechts: Prinzipskizze des Aufbaus

Der Prüfstand hat eine Grundfläche von 2,6 x 2,6 m bei einer lichten Raumhöhe von 3,3 m. Die Hülle besteht aus Stahlsandwichelementen und schließt zur Vorderseite mit einer isolierten Kühlraumtür ab. Aufgrund der guten wärmetechnischen Eigenschaften der speziell für den Bau von Kühlkammern ausgelegten Sandwichelemente und der hohen Luftdichtigkeit der konstruktiven Längsfugen wurden diese für

den Aufbau gewählt. Die Daten der verwendeten Stahlsandwichelemente können Tabelle 3-2 entnommen werden.

Tabelle 3-2: Daten der verwendeten Stahlsandwichelemente im thermischen Leistungsprüfstand

	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Elementdicke [mm]	U-Wert [W/(m ² ·K)]
Wand/Decke	0,018	120	0,15
Boden	0,021	60	0,36

Die Gesamthöhe der eingesetzten Stahlunterkonstruktion aus I-Trägern beträgt 2 m und bietet somit ausreichend Platz für die benötigte Technik in beiden Prüfraumen die nach Einbau eines Probekörpers entstehen.

Um im Heizfall die Wärme aus dem Prüfraum abzuführen, ist zusätzlich ein Fußbodenkühlsystem integriert. Das modulare System besteht aus Polystyrol-Schaumelementen mit Aussparungen, in welche Wärmeleitbleche aus verzinktem Stahlblech eingelegt wurden. Dies erlaubt eine flexible Verlegung des Rohrsystems. Der Aufbau des Systems mit Wärmeleitblechen ermöglicht einen optimierten Kontakt zum Prüfraum über die Abdeckung mit einer lackierten Aluminiumplatte. Dadurch wird eine möglichst große Kühlfläche erzielt (Abbildung 3-13).



Abbildung 3-13: Integriertes Fußbodenkühlsystem im thermischen Leistungsprüfstand

Die eingesetzte Messtechnik besteht aus folgenden Komponenten:

Die angeschlossenen Umwälzthermostate [60] ermöglichen es, die Prüfkörper sowie den Boden mit einem konstanten Wasserstrom zu temperieren. Ein Wärmemengenzähler ermöglicht die Aufzeichnung und Dokumentation des Wasserkreislaufs.

Der Wärmemengenzähler besteht aus einer Messeinheit zur Erfassung des Volumenstroms über elektronische Abtastung sowie einen Pt500 Sensor zur Messung der Wassertemperaturen im Rücklauf [61]. Die Vorlauftemperatur des Wassers wird mit einer separaten Tauchhülse mit integriertem Pt500 Sensor gemessen. Die Messung der Oberflächentemperaturen sowie der Raumtemperatur erfolgt über Pt100 Sensoren [62]. Die gewählten Oberflächensensoren erreichen eine hohe Genauigkeit und können durch die kleinen Abmessungen auch an gewölbten Oberflächen angebracht werden. Die Messung der vom Probekörper abgeführten und aufgenommenen Wärmeströme erfolgt zusätzlich mit Hilfe von Wärmestrommessplatten [63]. Die zur konstanten Temperierung des Raums benötigte Heizleistung wird über Kühllastsimulatoren nach DIN EN 14240 erzeugt. Die Steuerung der Kühllastsimulatoren erfolgt über einen separaten Stromkreis, der über einen Kompaktregler gesteuert wird [64]. Für die Datenerfassung der Temperatursensoren sowie Wärmestrommessplatten kommt ein Universalmessverstärker mit 32 Kanälen für die Temperaturdaten der Pt100 Sensoren sowie 8 Spannungskanälen für die Wärmestrommessplatten zum Einsatz [65].

3.5.2 Messtechnische Untersuchungen

3.5.2.1 Einbau

Der Einbau des Demonstrators unterteilt den Prüfstand in zwei Prüfräume (Abbildung 3-14). Die beiden Prüfräume werden für die Versuchsdurchführung wärmetechnisch voneinander entkoppelt. Dazu werden die Lücken zwischen dem Demonstrator und den Wandelementen mit Mineralwolle abgedichtet. Eine in der Praxis vorhandene Dachdämmung auf der Oberseite des Trapezprofils wurde berücksichtigt, indem die Oberseite der Decke ganzflächig mit begehbaren Mineralwolle gedämmt wurde. Die Mineralwollplatten haben eine Dicke von 200 mm und eine Wärmeleitfähigkeit λ von $0,039 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



Abbildung 3-14: Eingebauter Demonstrator im thermischen Leistungsprüfstand, links: thermische Trennung zum oberen Prüfraum mittels Mineralwollplatten, rechts: Ansicht nach Montage der Sensoren

Für die Versuche wurden die einzelnen Strahlungsplatten in Reihe geschaltet, wodurch die Wirkungsweise eines einzelnen, thermisch aktiven Bauteils erzielt wird.

Um die Leistung des Demonstrators ermitteln und einschätzen zu können, wurden neben dem Vor- und Rücklauf (T_{w1} , T_{w2}) die Messstellen für die Temperaturmessungen so gewählt, dass möglichst viele unterschiedliche Bereiche eines Trapezes abgedeckt werden und die Temperaturdifferenz über die gesamte Profilhöhe erfasst werden kann. Neben dem Untergurt (T_u) und der Strahlungsplatte (T_s) wurden daher auch Sensoren für die Luft in der Hohlkammer oberhalb der Strahlungsplatte (T_h) und die Umschließungsflächen am Steg (T_{hs}) sowie am Obergurt (T_o) angeordnet. Weitere Temperatursensoren wurden im unteren Prüfraum an den Wandoberflächen (T_{wd}), am Boden (T_{bo}) sowie in Raummitte (T_{ru}) verteilt und für die Ermittlung der operativen Raumtemperatur verwendet. Darüber hinaus wurde die Raumtemperatur im oberen Prüfraum (T_{ro}) aufgezeichnet.

Zusätzlich wurden Wärmestrommessplatten im dritten, im fünften sowie im sechsten Trapez an den Strahlungsplatten angebracht, um die Größenordnung der ermittelten Leistungswerte überprüfen zu können.

Die Verteilung der angeschlossenen Sensoren am Demonstrator im thermischen Leistungsprüfstand sowie die weiteren Sensoren werden in Abbildung 3-15 dargestellt.

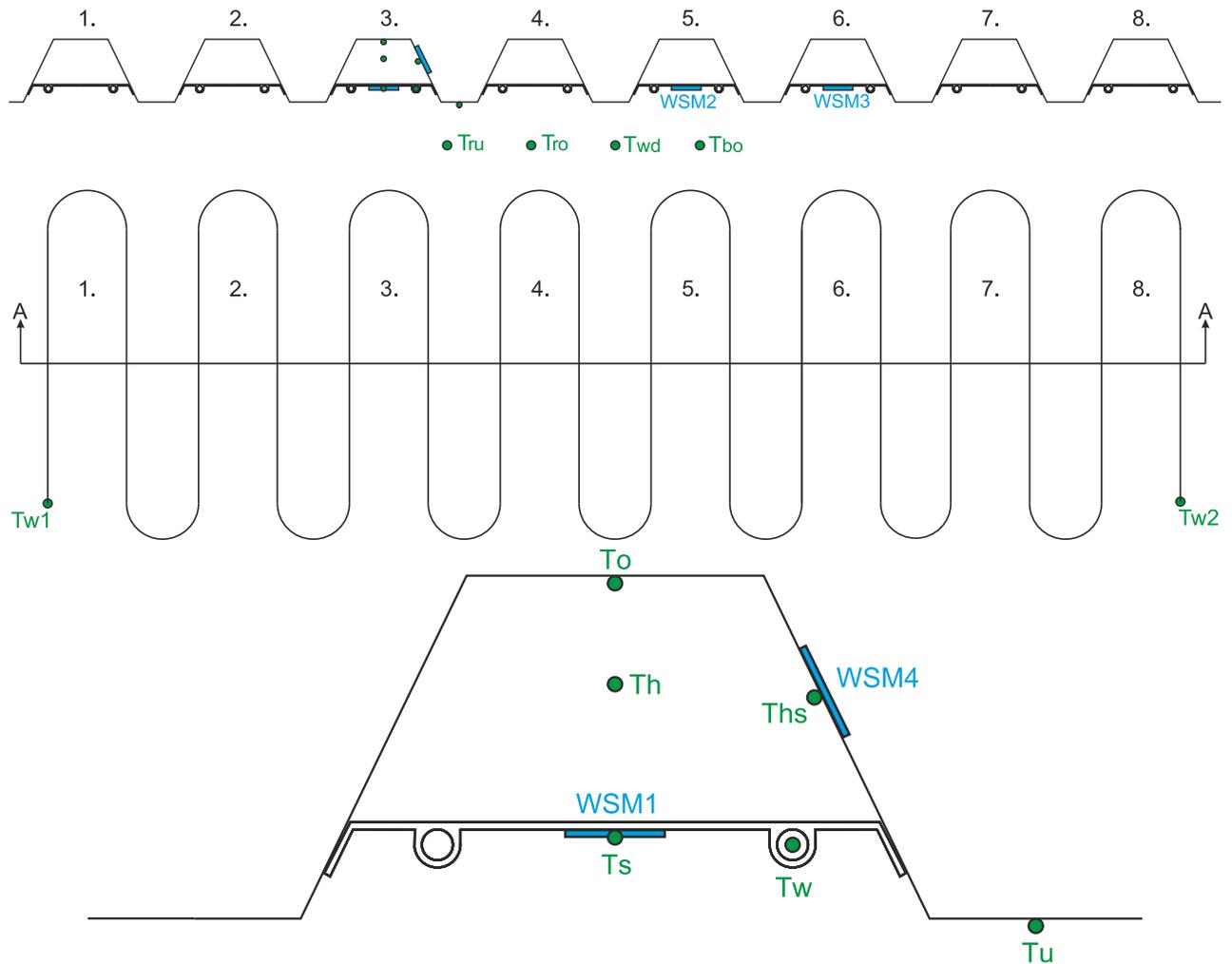


Abbildung 3-15: Verteilung der angeschlossenen Sensoren am Demonstrator, oben: Querschnitt A, mitte: Mäanderdarstellung der Rohre, unten: Querschnittsdetail des dritten Trapezes im Querschnitt A

3.5.2.2 Versuchseinstellung und -durchführung

Die Versuche werden in zwei unterschiedliche Fälle aufgeteilt. Dabei wird die sich einstellende mittlere Wassertemperatur der operativen Raumtemperatur gegenübergestellt. Ist die Wassertemperatur kleiner als die Raumtemperatur, führt der Wasserkreislauf Wärme aus dem Raum ab. Dies wird im weiteren Verlauf der Arbeit als Kühlfall bezeichnet. Entsprechend bezeichnet der Heizfall eine höhere Wassertemperatur als die vorhandene Raumtemperatur. Die Temperatur des Raumes wird in allen Messfällen konstant bei ca. 24 °C gehalten.

Die Untersuchung des Kühlfalls besteht insgesamt aus fünf durchgeführten Messungen. Es werden Vorlauftemperaturen von 14 bis 22 °C in 2 K Schritten betrachtet. Die Untersuchung des Heizfalls erfolgt ebenfalls in 2 K Schritten. Der Bereich der eingestellten Vorlauftemperaturen befindet sich zwischen 26 und 36 °C. Es werden entsprechend sechs Vorlauftemperaturen für den Heizfall untersucht.

Es werden zwei Messreihen durchgeführt. Innerhalb der ersten Messreihe werden alle Strahlungsplatten thermisch aktiviert. Für die zweite Messreihe wird nur jede zweite Strahlungsplatte thermisch aktiviert. Der durchschnittliche Massenstrom des Wassers ergibt sich zu 188 kg/h in der ersten Messreihe und zu 241 kg/h in der zweiten Messreihe, wodurch in beiden Fällen eine turbulente Strömung vorliegt.

Die Aufzeichnung der Temperaturmesswerte erfolgt alle 100 s bzw. der Wärmemengenzähler alle 900 s. Jeder Messfall wird bis zum Erreichen eines stationären Zustands durchgeführt und anschließend ein Zeitfenster von 2 h für die Auswertung betrachtet.

3.5.2.3 Leistungsbestimmung des Demonstrators im Prüfstand

Die Ermittlung der Kühl- bzw. Heizleistung \dot{Q}_i mittels der Temperatursensoren sowie des Wärmemengenzählers erfolgt in Anlehnung an DIN EN 14240, bzw. DIN EN 14037 nach Gleichung (2.10). Die Effektivität der Wärmeübertragung des Demonstrators im Heiz- und Kühlfall kann durch die spezifische Leistung im Kühlfall \dot{q}_k bzw. im Heizfall \dot{q}_h nach Gleichung (2.11) dargestellt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird bei der Auswertung ein Hauptaugenmerk daraufgelegt.

Um ein Gesamtbild von der Leistungsfähigkeit zu bekommen, werden die Ergebnisse der spezifischen Leistung \dot{q}_i im Verhältnis zur Differenz aus operativer Raumtemperatur T_{op} und gemittelter Wassertemperatur aus Vor- und Rücklauf $T_{w,m}$ gesetzt. Die ermittelte Betriebskennlinie lässt die Darstellung eines linearen Verlaufs zu. Ein Anstieg der Differenz aus operativer Raum- und mittlerer Wassertemperatur $T_{op} - T_{w,m}$ führt somit auch zu einem Anstieg der spezifischen Leistung \dot{q}_i .

Die Vor- und Rücklauftemperaturen des Wassers werden über Temperatursensoren an den Leitungen zu Beginn der ersten, bzw. am Ende der letzten Strahlungsplatte sowie über Tauchhülsen im Wärmemengenzähler ermittelt.

Weitere Randbedingungen für die Ermittlung der Leistung im stationären Zustand wurden wie folgt angenommen:

Die spezifische Wärmekapazität c_p wird aufgrund der niedrigen Temperaturunterschiede konstant mit 4182 J/(kg·K) angenommen. Der Massenstrom des Wassers \dot{m} wird kontinuierlich aufgezeichnet und fließt als gemittelter Wert in die Berechnung mit ein. Für die Ermittlung der spezifischen Leistung wird die aktive Fläche der Decke A_a mit 5,75 m² bestimmt. Hier erfolgt die Annahme, dass die Trapezprofile zwischen den Strahlungsplatten als temperierte Bestandteile mitwirken.

Die Wärmestrommessplatten erzeugen in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte eine elektrische Spannung. Diese kann über gegebene Kalibrierfaktoren in eine

spezifische Leistung \dot{q}_i umgerechnet werden. Zur Ermittlung der Differenz aus operativer Raumtemperatur T_{op} und mittlerer Wassertemperatur $T_{w,m}$ werden die Messwerte der Temperatursensoren verwendet. Wie auch die Temperatursensoren können die Wärmestrommessplatten nur punktuell eingesetzt werden. Somit können diese auch lediglich zur punktuellen Überprüfung und Interpretation der Messwerte herangezogen werden.

3.5.2.4 Thermische Aktivierung des Stahltrapezprofils in jedem Trapez

Durch die Aufzeichnung der Vor- und Rücklauftemperaturen in jedem Messfall lassen sich die Betriebskennlinien unter Anwendung der zuvor beschriebenen Randbedingungen ermitteln.

Die Betriebskennlinien setzen sich als lineare Trendlinien aller aufgetragener Punkte zusammen. Die sich aus allen Kühlfällen ergebene Betriebskennlinie aus der Auswertung der Temperatursensoren sowie der Wärmemengenzähler ist in Abbildung 3-16, links dargestellt. Das System übertrifft konventionelle geschlossene Kühldecken, welche je nach Konstruktion eine Kühlleistung zwischen 7 und 10 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ermöglichen [14]. Die unterschiedlichen Messmethoden zeigen eine gute Übereinstimmung und weichen nur geringfügig voneinander ab.

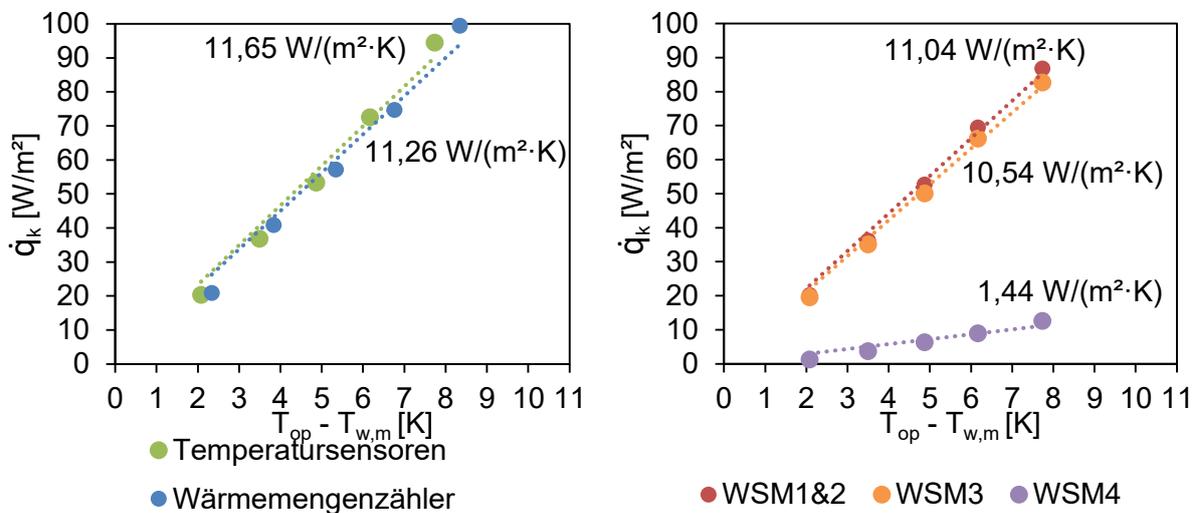


Abbildung 3-16: Betriebskennlinien aus der Auswertung für den Kühlfall, links: Temperatursensoren sowie Wärmemengenzähler, rechts: Wärmestrommessplatten

Für einen Vergleich mit den anderen Messmethoden, bei denen für die Berechnung eine gemittelte Wassertemperatur herangezogen wird, wurden die erfassten Daten der Wärmestrommessplatten im dritten (WSM1) sowie im fünften Trapez (WSM2) zusammengefasst, um einen rechnerischen Wärmestrom nahe der Deckenmitte zu erhalten.

In Abbildung 3-16, rechts sind die mit Hilfe der Wärmestrommessplatten ermittelten Betriebskennlinien dargestellt. Die Abweichung der Steigung zu den Messwerten, die mit Hilfe von Temperatursensoren und den Wärmemengenzählern ermittelt wurden, kann als gering bezeichnet werden. Somit bestätigen die punktuellen Messungen die Ergebnisse der anderen Messmethoden.

Da die Wärmestrommessplatten WSM1&2 und WSM3 zwischen den Leitungen der Strahlungsplatten befestigt wurden, liegen die Messwerte in einer ähnlichen Größenordnung. Die Ergebnisse der Wärmestrommessplatte WSM4, die im Stegbereich oberhalb der Strahlungsplatten befestigt wurde, sind deutlich geringer. Dies verdeutlicht, dass der Wärmetransport des aktivierten Trapezprofils überwiegend zum Raum hin erfolgt. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass auch ein horizontaler Wärmestrom in den Stegbereichen stattfindet, wodurch auch die benachbarten Hohlräume mit temperiert werden.

Die resultierenden Betriebskennlinien für die Heizfälle sind in Abbildung 3-17 dargestellt. Die unterschiedlichen Messmethoden weichen auch im Heizfall nur geringfügig voneinander ab.

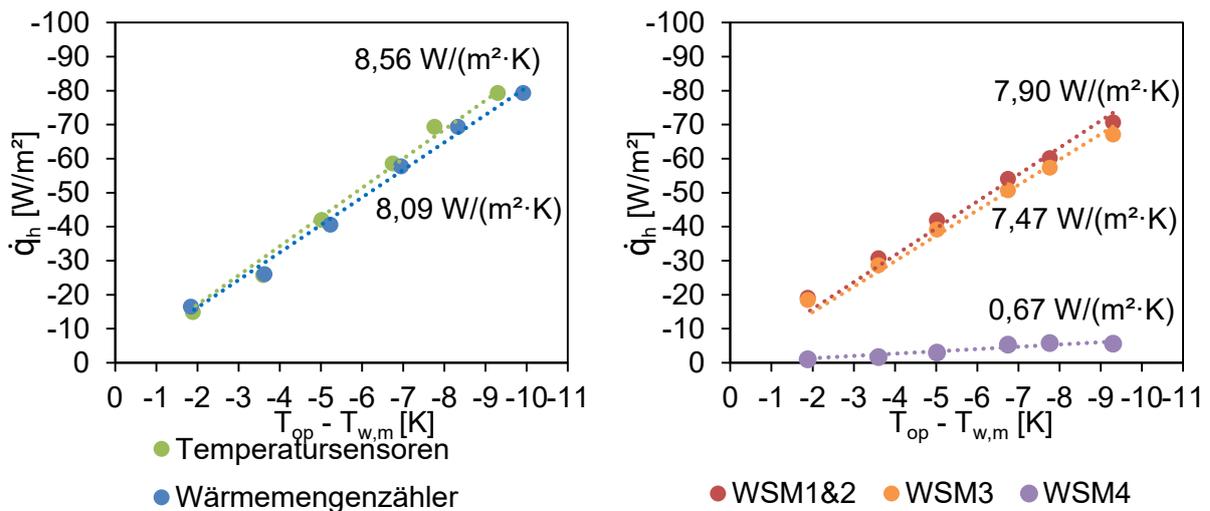


Abbildung 3-17: Betriebskennlinien aus der Auswertung für den Heizfall, links: Temperatursensoren sowie Wärmemengenzähler, rechts: Wärmestrommessplatten

Auf Grund der verringerten Konvektion ist bei gleicher Temperaturdifferenz im Heizfall im Vergleich zum Kühlfall die mögliche thermische Leistung reduziert. Dadurch verringert sich die Steigung der Betriebskennlinie im Vergleich zum Kühlfall auf ca. 72 %. Diese Größenordnung ist auch bei klassischen kombinierten Kühl- und Heizdecken vorzufinden. Ein Wert von 70 % findet sich in Ansätzen zur überschläglichen Ermittlung der Heizleistung aus der Kühlleistung [14].

3.5.2.5 Darstellung der Temperaturverteilung im Prüfstand am aktivierten Trapezprofil für Kühl- und Heizfall

Für exemplarische Fälle bei einer Raumtemperatur von 24 °C sowie einer Vorlauf-temperatur von 20 °C im Kühlfall (20/24 °C), bzw. 30 °C im Heizfall (30/24 °C) werden die aufgezeichneten Messwerte in Abbildung 3-18 dargestellt. Die Temperaturen beziehen sich dabei auf die Sensoren, die am dritten Trapez des Demonstrators der aktivierten Trapezprofildecke verbaut sind.

Die Temperatur des Hohlraums T_h über der Strahlungsplatte nähert sich der Wassertemperatur T_w an. Auch die Temperaturen der angrenzenden Flächen des Hohlraums (Strahlungsplatte T_s , Steg T_{hs} sowie Obergurt T_o) werden maßgeblich durch die Wassertemperatur beeinflusst. Der Sensor am Untergurt T_u weicht von diesen Werten jedoch deutlicher ab. Der Trapezprofiluntergurt hat keinen direkten Kontakt zu der Strahlungsplatte und ist zum Raum hin orientiert. Im Vergleich zur Raumtemperatur ist jedoch ein Temperaturunterschied vorhanden, so dass auch diese Bereiche sich an der Temperierung des Raumes beteiligen.

Ein Vergleich der Wärmestrommessplatten zeigt den geringen Wärmefluss im Stegbereich (WSM4) im Vergleich zu der abgegebenen Leistung der Strahlungsplatte (WSM1). Dies verdeutlicht, sowohl im Kühl- als auch im Heizfall, dass messbare Wärmeströme zum benachbarten Hohlraum hin festgestellt werden können. Neben der Wärmeleitung über das Trapezprofil erfolgt somit die Temperierung der Untergurte auch über eine Wärmeleitung der Luft durch die Hohlkammern.

Die Raumtemperaturen weichen nur geringfügig von der Sollraumtemperatur von 24 °C ab. Auch für die Temperaturen der Umgebungsflächen stellt sich eine Temperatur von etwa 24 °C ein. Lediglich die Bodentemperatur des Heizfalls hat aufgrund der zusätzlichen Kühlleistung des Bodens eine deutlich niedrigere Temperatur.

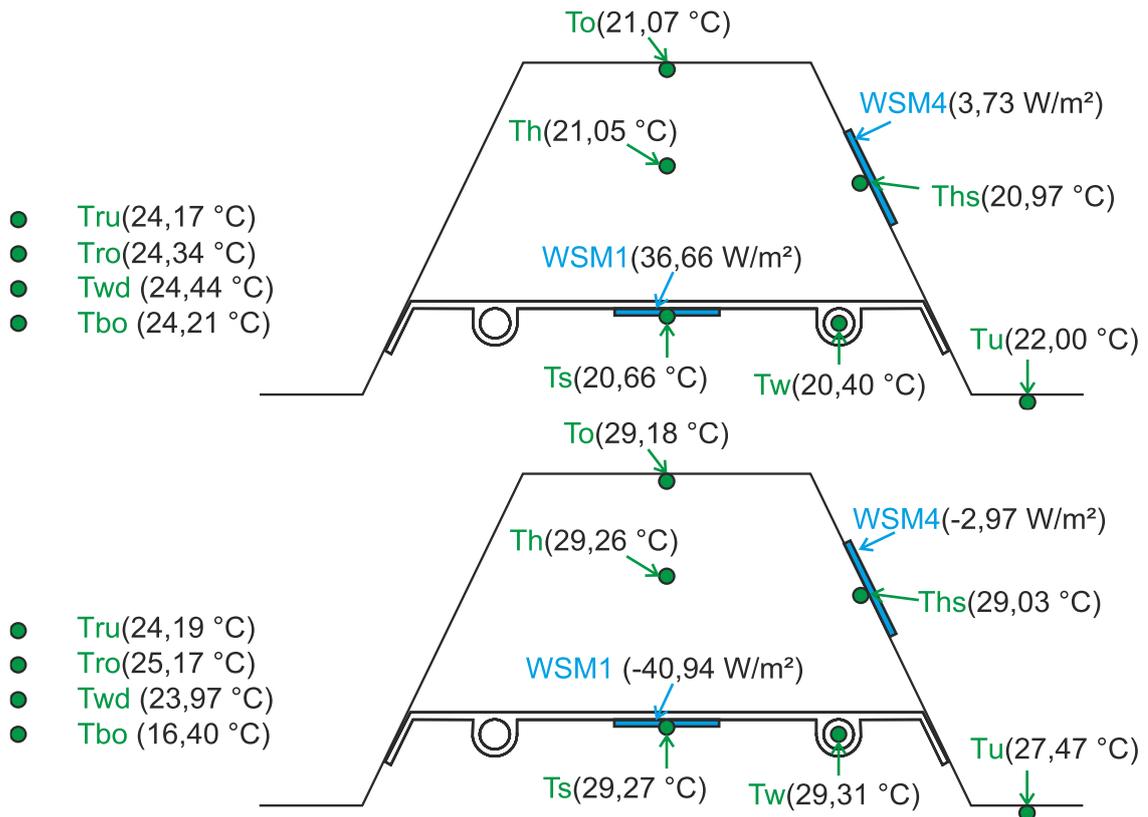


Abbildung 3-18: Gemittelte Messwerte der Sensoren im dritten Trapez, oben: Kühlfall 20/24 °C, unten: Heizfall 30/24 °C

3.5.2.6 Thermische Aktivierung des Stahltrapezprofils in jedem zweiten Trapez

Eine weitere Messreihe wurde mit einer reduzierten Anzahl an aktivierten Strahlungsplatten durchgeführt. Hierbei wurden, beginnend mit der ersten, nur die ungeradzahigen Trapeze des Stahltrapezprofils an den Wasserkreislauf angeschlossen und die zuvor durchgeführten Messfälle bei vergleichbaren Versuchsbedingungen wiederholt. Die Ergebnisse werden anhand der ermittelten Betriebskennlinien erläutert.

In Abbildung 3-19 sind die Betriebskennlinien für die Kühlfälle dargestellt.

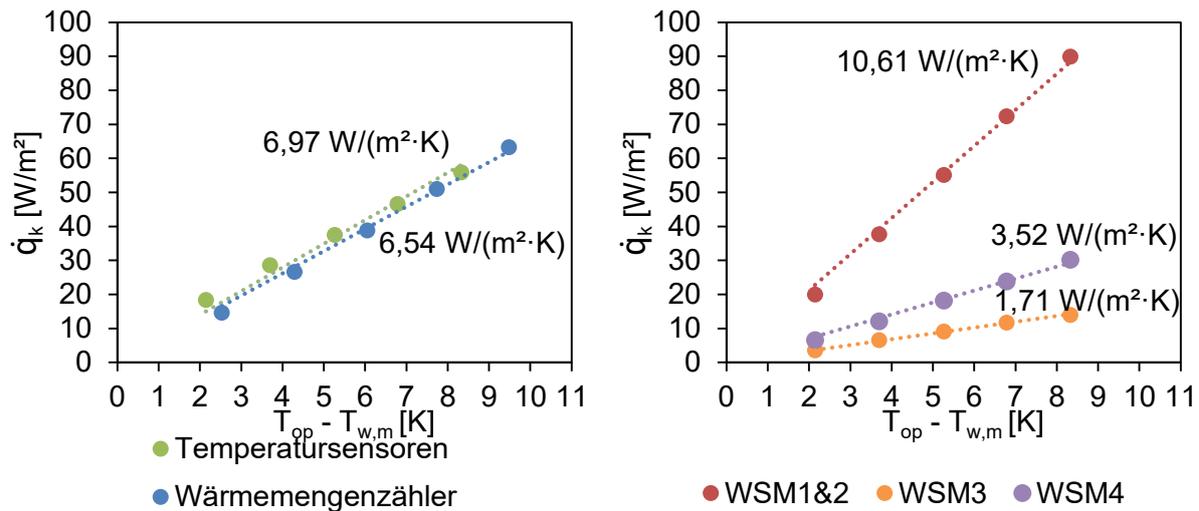


Abbildung 3-19: Betriebskennlinien aus der Auswertung für den Kühlfall bei reduzierter Aktivierung, links: Temperatursensoren sowie Wärmemengenzähler, rechts: Wärmestrommessplatten

Im Vergleich zu der voll aktivierten Decke ist die Steigung der Wärmestrommessplatten WSM1&2 annähernd gleich. Da die Wärmestrommessplatten nur punktuelle Messungen durchführen, führen annähernd gleiche Vorlauftemperaturen bei den aktivierten Strahlungsplatten zu vergleichbaren Leistungen. Auffällig ist die erhebliche Abweichung der Wärmestrommessplatte WSM3. Dies kann auf die Deaktivierung der sechsten Strahlungsplatte zurückgeführt werden. Die Steigung der Kennlinie reduziert sich dadurch um ca. 84 %. Durch den gemessenen Wärmestrom, an der nicht aktivierten Strahlungsplatte, kann ein Energietransport hin zu den nicht aktivierten Bereichen belegt werden. Bestätigt wird dieser Vorgang ebenfalls im deutlich erhöhtem Wärmestrom im Stegbereich der Wärmestrommessplatte WSM4. Hier hat sich der gemessene Wert mehr als verdoppelt. Aufgrund dieses Effektes kommt es zu einer zusätzlichen Temperierung durch die nicht aktivierten Bereiche. Dadurch wird die thermische Leistungsfähigkeit der gesamten Decke, bei einer Halbierung der Anzahl der wasserdurchströmten Bauteile, um lediglich 40 % reduziert. Die Betriebskennlinien der Ergebnisse im Heizfall sind in Abbildung 3-20 zusammengefasst.

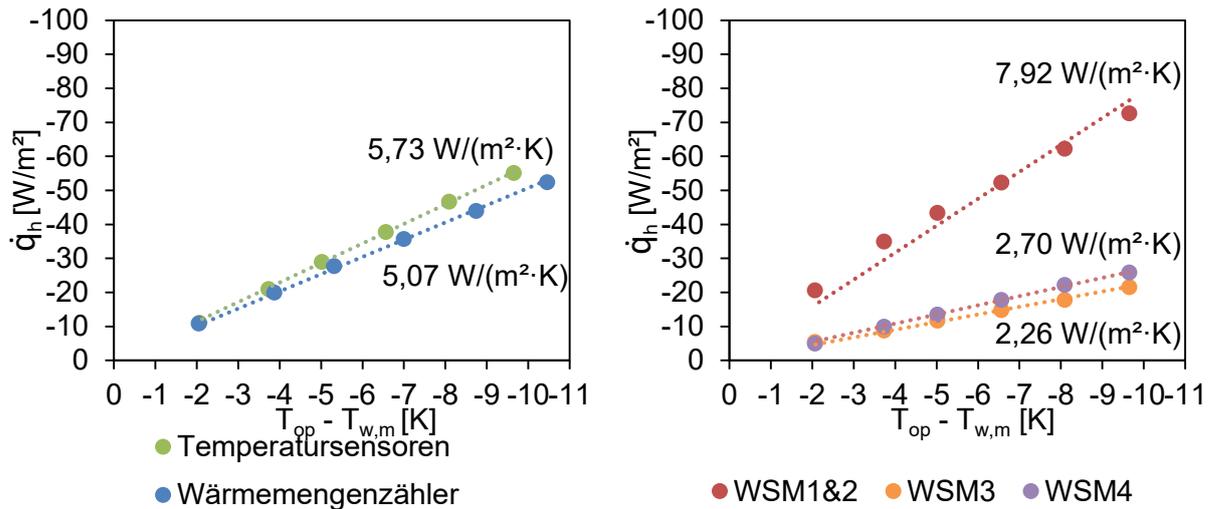


Abbildung 3-20: Betriebskennlinien aus der Auswertung für den Heizfall bei reduzierter Aktivierung, links: Temperatursensoren sowie Wärmemengenzähler, rechts: Wärmestrommessplatten

Im Vergleich zur vollständig aktivierten Decke reduziert sich die thermische Leistung um etwa 35 %. Die Veränderung durch die Reduktion der aktivierten Fläche hat somit eine vergleichbare Größenordnung im Heiz- und Kühlfall.

Der Energietransport zu den nicht aktivierten Bereichen ist auch im Heizfall sichtbar. Der erhöhte Wärmestrom im Stegbereich (WSM4) kann auch hier beobachtet werden. Die Wärmestrommessplatte WSM2 grenzt sich ebenfalls deutlich von den Wärmestrommessplatten an den aktivierten Strahlungsplatten ab. Im Vergleich zu der Aktivierung in jedem Trapez bleibt die Steigung an den aktivierten Strahlungsplatten annähernd gleich, während sich die Steigung der nicht aktivierten Strahlungsplatte um etwa 70 % reduziert. Im Vergleich zum Kühlfall fällt die Reduktion geringer aus, da der abweichende Wärmeübergang im Heizfall zu einem prozentual höheren Beitrag der nicht aktivierten Bereiche führt.

3.5.2.7 Visuelle Darstellung mittels Infrarotthermographie

Für eine visuelle Darstellung der Oberflächentemperaturen in ihrer räumlichen Verteilung wurden Aufnahmen mit der Infrarotkamera T1020 des Herstellers Flir erstellt, welche eine hohe thermische und optische Auflösung ermöglicht [66].

Abbildung 3-21 stellt die Vorderseite des thermischen Leistungsprüfstands mit geöffneten Türen dar. Der dargestellte Temperaturbereich beträgt 15 bis 34 °C. Die Aufnahme zeigt einen exemplarischen Heizfall, bei dem jede Strahlungsplatte aktiviert ist. Im Vergleich zum Prüfraum weist der Demonstrator durch die direkt temperierten Strahlungsplatten sowie die indirekt temperierten Trapezprofile eine deutlich höhere Temperatur auf.

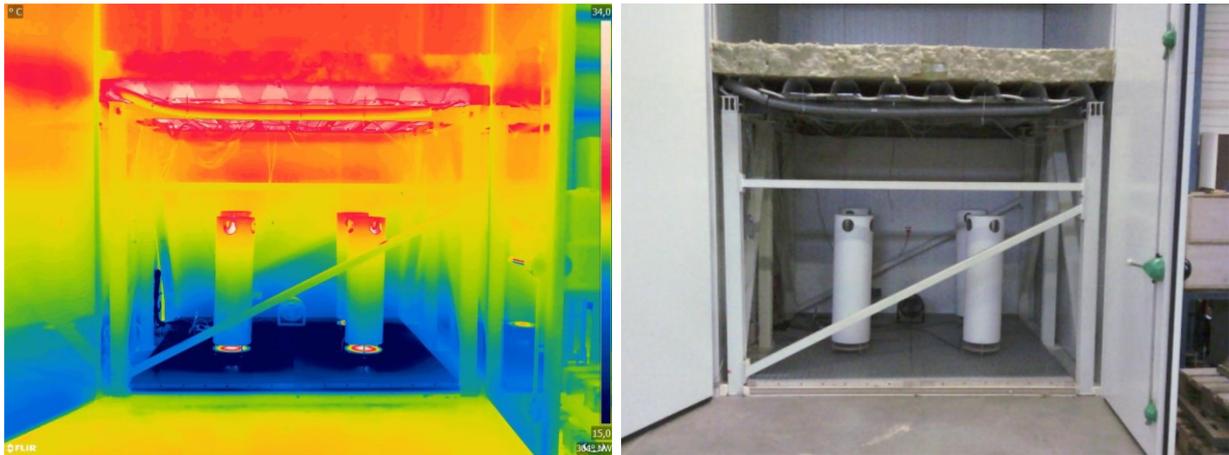


Abbildung 3-21: Infrarotaufnahme sowie Vergleichsbild des Demonstrators im Heizfall

In Abbildung 3-22 wird für einen exemplarischen Kühlfall die Deckenunterseite für einen Temperaturbereich von 17 bis 22 °C dargestellt. Es kann ein deutlicher Temperaturunterschied zwischen den Strahlungsplatten und den Untergurten des Trapezprofils betrachtet werden. Darüber hinaus ist sichtbar, dass der Untergurt von den Strahlungsplatten beeinflusst wird. Zum Randbereich hin ist eine abfallende Temperatur zu erkennen.

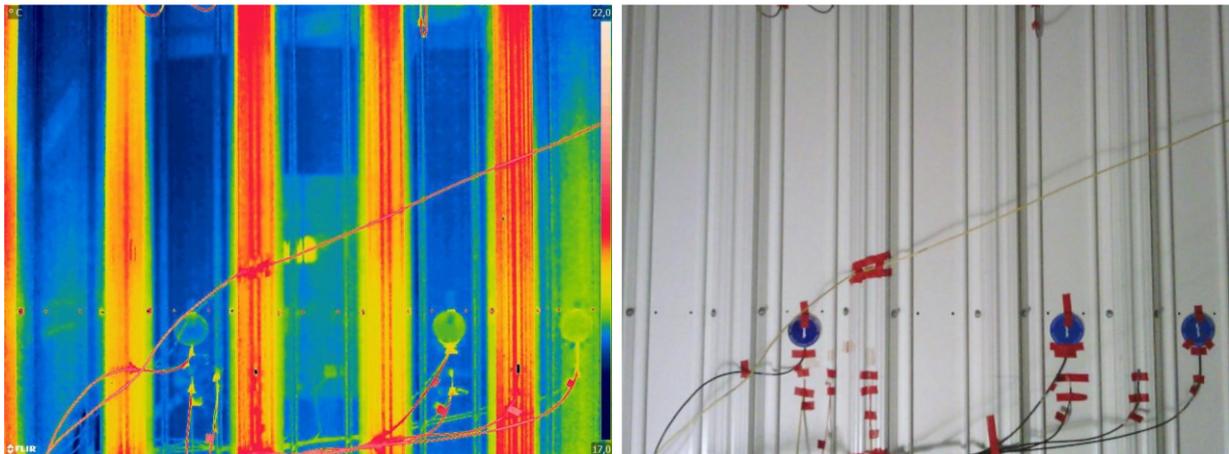


Abbildung 3-22: Infrarotaufnahme sowie Vergleichsbild der Deckenunterseite des Demonstrators im Kühlfall

Abbildung 3-23 stellt die Vorderseite des thermischen Leistungsprüfstands mit geöffneten Türen für einem exemplarischen Kühlfall dar. Der dargestellte Temperaturbereich beträgt 18 bis 28 °C. In diesem Fall ist jede zweite Strahlungsplatte aktiviert. Die durch die Strahlungsplatten temperierten Trapeze grenzen sich durch eine geringere Temperatur deutlich von den nicht temperierten Trapezen ab. Ein Energiefluss hin zu den Hohlräumen oberhalb der Untergurte ist sichtbar.

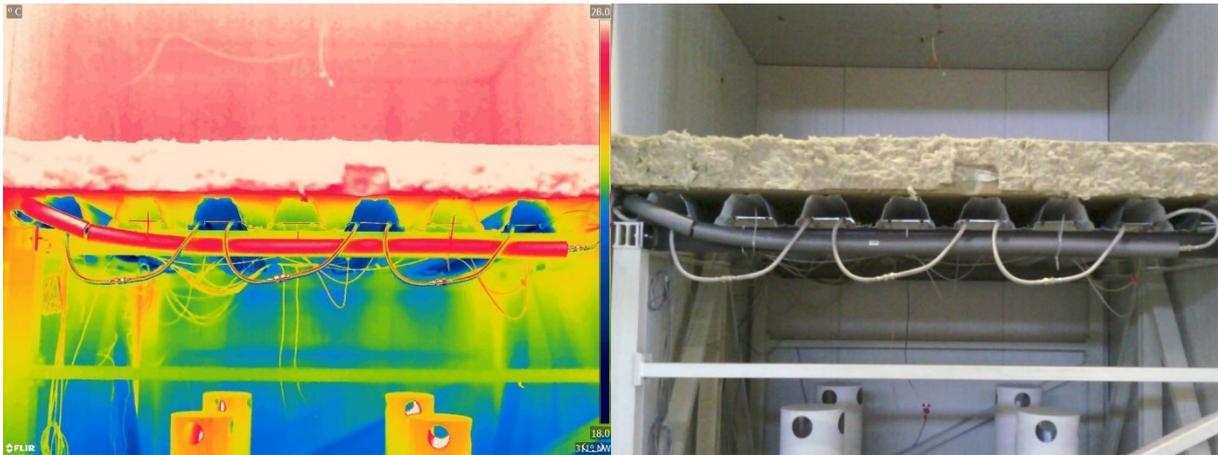


Abbildung 3-23: Infrarotaufnahme sowie Vergleichsbild des Demonstrators bei reduzierter Anzahl der aktivierten Strahlungsplatten im Kühlfall

Bei einer Detailbetrachtung im Heizfall wird deutlich, dass die nicht temperierten Strahlungsplatten ebenfalls zur Leistungsabgabe beitragen. In Abbildung 3-24 wird der gleiche Bereich der Deckenunterseite mit jeder und jeder zweiten aktivierten Strahlungsplatte für den Temperaturbereich von 25 bis 34 °C dargestellt. Im Fall der vollen Aktivierung ist eine gleichmäßige Temperierung aller Strahlungsplatten zu erkennen. Bei einer reduzierten Aktivierung grenzen sich die deaktivierten Strahlungsplatten deutlich von den aktivierten ab. Die Temperatur befindet sich jedoch oberhalb der Raumtemperatur. Zu erkennen ist ebenfalls, dass die Untergurte im Vergleich zu den deaktivierten Strahlungsplatten eine höhere Temperatur aufweisen. Somit ist ein Wärmefluss von den aktivierten Strahlungsplatten hin zu dem Trapezprofil darstellbar.

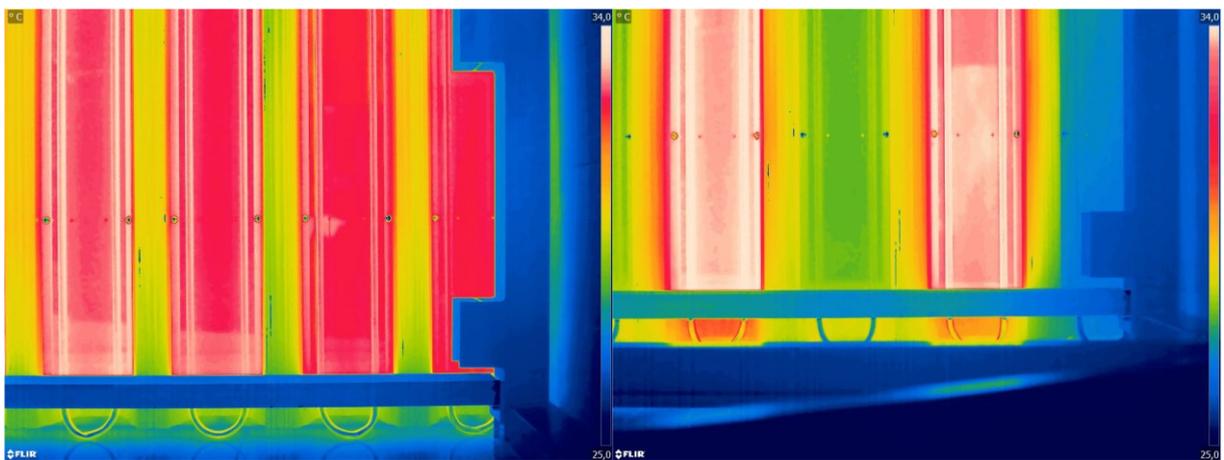


Abbildung 3-24: Infrarotaufnahme der Deckenunterseite des Demonstrators im Heizfall, links: Aktivierung jeder Strahlungsplatte, rechts: reduzierte Anzahl aktivierter Strahlungsplatten

3.5.3 FEM-Simulationen

Die numerische FEM-Simulation dient zum einen der Überprüfung von Sensitivitäten und der Temperaturverteilung innerhalb des Systems, zum anderen soll sie dazu herangezogen werden, in Zukunft ohne aufwändige Prüfverfahren eine Bemessung von aktivierten Trapezprofilen durchzuführen. Dabei wird sie in erster Linie zur Kalkulation der thermischen Leistung der Decke genutzt. Zur Validation der Modelle werden die ermittelten Temperaturen aus den messtechnischen Untersuchungen als Eingangsdaten für die Simulationen verwendet.

3.5.3.1 Simulationssoftware

Als Simulationssoftware kommt Marc Mentat (Version 2017.1.0) von der Firma MSC Software zum Einsatz. Marc Mentat eignet sich für fortgeschrittene nichtlineare Strukturanalysen, Kontaktberechnungen, komplexe Materialmodelle und multiphysikalische Analysen [67]. Im Rahmen dieser Arbeit kommt die Software zur Berechnung der Wärmeausbreitung zum Einsatz. Für diese Untersuchungen wurde das Modell für thermische Lastfälle verwendet, welches die Möglichkeit bietet in den eingegebenen Lastfällen die Wärmeübergangskoeffizienten h_{ges} in den Angriffspunkten der einzelnen Teilflächen einzugeben.

3.5.3.2 FEM-Modellierung

Die Modelle werden mit einer CAD-Software erstellt und in die Simulationssoftware implementiert. Für die Simulation des aktivierten Trapezprofils wird eine lineare Vereinfachung der Geometrie durchgeführt. Abbildung 3-25 zeigt den Querschnitt des Demonstrators mit integrierter Strahlungsplatte vor und nach der linearen Vereinfachung.

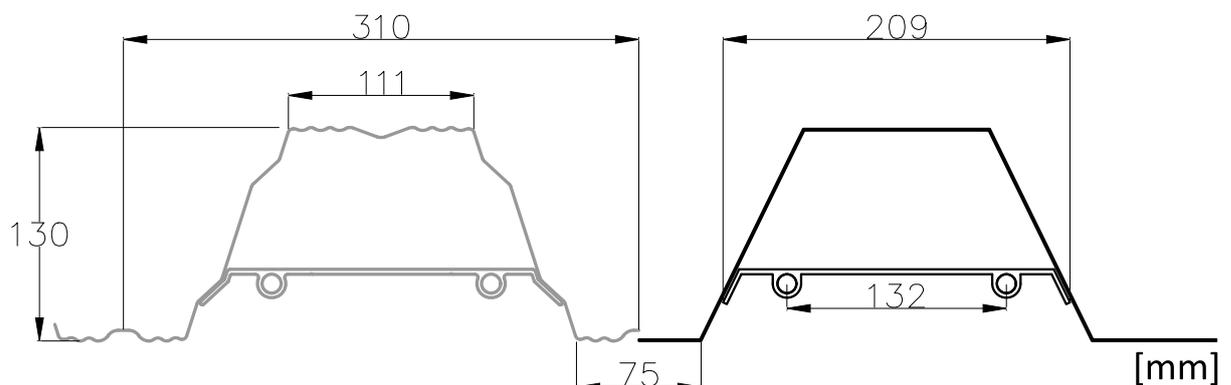


Abbildung 3-25: Verwendetes Trapezprofil mit integrierter Strahlungsplatte für die FEM-Modellierung, links: realer Querschnitt, rechts: lineare Vereinfachung

Das verwendete geometrische Modell für die Simulation des aktivierten Trapezprofils wird in Abbildung 3-26 dargestellt. Bei diesem Modell wird die Decke symmetrisch über eine Breite von 620 mm betrachtet. Insgesamt werden zwei eingebaute Strahlungsplatten modelliert, um eine Fallunterscheidung bezüglich der Anzahl an aktivierten Strahlungsplatten zu ermöglichen. Die Unterteilung in einzelne Bereiche wird maßgeblich auf Basis der unterschiedlichen Werte der Wärmeleitfähigkeit λ getroffen.

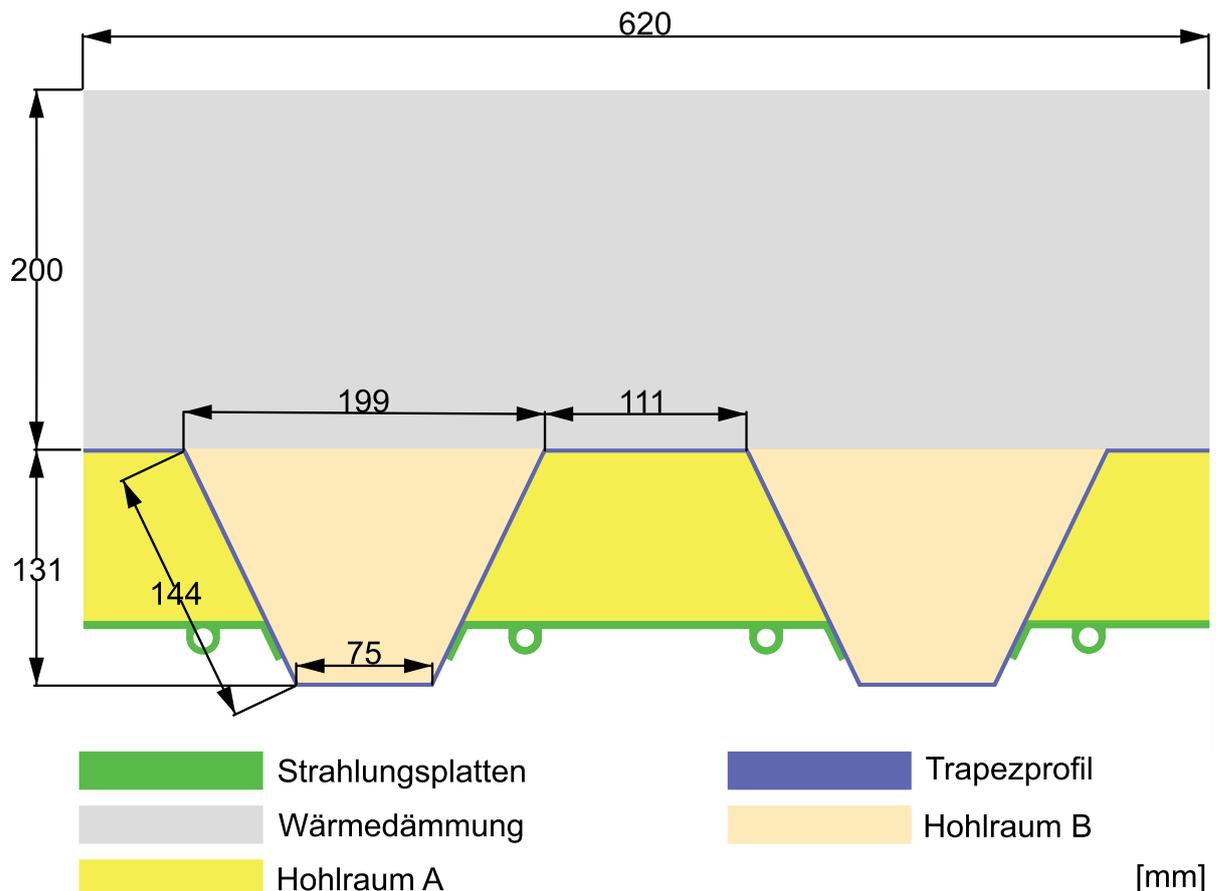


Abbildung 3-26: Geometrisches Modell für die FEM-Modellierung

3.5.3.3 Eingangswerte der Simulation

Für die Simulationen werden die aufgezeichneten Messwerte aus den Versuchen im thermischen Leistungsprüfstand verwendet. Von besonderem Interesse ist dabei das dritte Trapez des aktivierten Trapezprofils. An der angebrachten Strahlungsplatte und im Bereich um den Obergurt wurden mehrere Temperatursensoren für eine genauere Betrachtung angebracht. In Kombination mit der gemessenen Raumtemperatur lässt sich somit eine Simulation der Versuchsbedingungen erstellen. Weitere Eingangswerte der Simulation sind die Wärmeleitfähigkeiten der Materialien sowie die unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten an den jeweiligen Oberflächen.

Temperaturen

Für die Wassertemperatur werden gemittelte Messwerte des Wärmemengenzählers verwendet. Eine Temperaturänderung des Wassers mit fortlaufender Leitung im Querschnitt wird vernachlässigt. Die operative Raumtemperatur ergibt sich aus der Aufzeichnung der Luft- und Oberflächentemperaturen im Prüfraum. Die Messwerte der Temperatursensoren am Trapezprofil, bzw. an der Strahlungsplatte, werden für die Simulationen der jeweiligen Teilfläche zugeordnet.

Die Temperaturen der Oberflächen sind zunächst für die Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten erforderlich. Bei der Eingabe der Randbedingungen wird die Temperatur des angrenzenden Raums und der jeweilige Wärmeübergangskoeffizient verwendet.

Wärmeübergangskoeffizienten

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient wird je nach Wärmestromrichtung nach DIN EN ISO 6946 bestimmt. Im Heizfall erfolgt zusätzlich eine temperaturabhängige Approximation nach Glück [14], um eine thermisch bedingte Luftbewegung zu berücksichtigen.

Die Berechnung des radiativen Wärmeübergangskoeffizienten erfolgt auf Basis der Netto-Strahlungsmethode. Dabei werden für die jeweiligen Teilflächen die Einstrahlzahlen bestimmt sowie alle reflektierten Anteile und der körpereigene Emissionsanteil zu einer Gesamtenergiestromdichte, auch Flächenhelligkeit genannt, zusammengefasst. Daraus lässt sich der spezifische Wärmestrom der Teilflächen ermitteln, indem die Eigenemission um die absorbierten Anteile der übrigen Gesamtenergiestromdichten reduziert wird.

Wärmeleitfähigkeit

Für die Wärmeleitfähigkeit λ wird zwischen zwei Bereichen unterschieden. Zum einen wird für die eingesetzten Materialien eine feste Wärmeleitfähigkeit definiert. Diese hat nur eine geringe Temperaturabhängigkeit und wird konstant für alle Messreihen angesetzt. Die verwendeten Werte sind in Tabelle 3-3 aufgelistet.

Tabelle 3-3: Wärmeleitfähigkeit der Bauteile [68, 69]

	Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]
Trapezprofil	Stahl	50
Strahlungsplatte	Aluminium	235
Wärmedämmung	Mineralwolle	0,039

Im Bereich der Kontaktfläche zwischen Strahlungsplatte und Steg wurde die Annahme getroffen, dass aufgrund der punktuellen Verschraubung am Steg kein opti-

maler Kontakt vorliegt. Dies wurde mit einer Luftschicht von 0,5 mm und einer Wärmeleitfähigkeit λ von 0,025 W/(m·K) berücksichtigt. Zwei weitere Wärmeleitfähigkeiten ergeben sich für die Luft des Hohlraums A und des Hohlraums B. Aufgrund der unterschiedlichen konvektiven und radiativen Wärmeübergänge innerhalb dieser Räume wird je nach betrachtetem Fall eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit bestimmt, die von der Wärmestromrichtung und der Temperatur der Umschließungsflächen abhängig ist. Die Berechnung für unbelüftete Räume erfolgt auf Basis der DIN EN ISO 6946, in Abhängigkeit der aus den Versuchsserien ermittelten Temperaturen der Umschließungsflächen und führt zu äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten der Luft zwischen 0,4 und 0,6 W/(m·K).

3.5.3.4 Leistungsbestimmung des Modells mittels FEM

Die Bestimmung der spezifischen Leistung \dot{q} erfolgt auf Basis der berechneten Ergebnisse aus dem FE-Modell. Dafür wird zunächst die Differenz ΔT aus der Oberflächentemperatur jedes Elementes $T_{el,i}$ und der anschließenden Raumtemperatur $T_{op,i}$ ermittelt.

$$\Delta T = T_{el,i} - T_{op,i} \quad (3.1)$$

Die Leistung pro laufendem Meter Länge für jedes Element $\dot{Q}_{el,i}$ ergibt sich durch Multiplikation der Temperaturdifferenz ΔT mit dem für jede Oberfläche angegebenen gesamten Wärmeübergangskoeffizienten $h_{ges,i}$ und der jeweiligen Breite der Oberfläche des Elements $b_{el,i}$.

$$\dot{Q}_{el,i} = \Delta T \cdot h_{ges,i} \cdot b_{el,i} \quad (3.2)$$

Aus der daraus resultierenden Summe berechnet sich die Gesamtleistung des Modells \dot{Q} pro laufendem Meter Länge. Dividiert durch die projizierte Gesamtbreite des Modells b_{ges} ergibt sich daraus die spezifische Leistung des Modells \dot{q} .

$$\dot{Q} = \sum \dot{Q}_{el,i} \quad (3.3)$$

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{b_{ges}} \quad (3.4)$$

3.5.3.5 Thermische Aktivierung des Stahltrapezprofils in jedem Trapez Belüftungszustände der Hohlräume

Beim Verlegen der Trapezprofile und dem weiteren Dachaufbau sowie bei der Montage der Strahlungsplatten von unten an die Trapezprofile entstehen geschlossene Lufträume im Querschnitt. Die Luftbewegungen innerhalb dieser Hohlkammern sind in der Regel nicht bekannt. Ein Vergleich zwischen unbelüfteten Luftschichten, (Fall1) bzw. leicht belüfteten Luftschichten (Fall2) innerhalb der Hohlkammern im Simulationsmodell, ermöglicht die Einschätzung des Einflusses auf die Genauigkeit des Gesamtmodells. Im Vergleich zu der unbelüfteten Variante wird im zweiten Fall die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der Hohlräume in Anlehnung an die DIN EN ISO 10077-2 verdoppelt [70]. Bei profilierten Dächern muss die Brandweiterleitung über das Dach verhindert werden [71, 72]. Dafür kommen sogenannte Profulfüller aus Mineralwolle zum Einsatz, die den Luftraum zwischen Trapezprofil und weiterem Dachaufbau ausfüllen. Solche Profulfüller werden z. B. im Bereich von Durchdringungen oder Anschlüssen eingesetzt. Daher wurde zusätzlich im Heizfall ein weiterer Fall abgebildet, indem in Hohlkammer B statt der Luft ein Profulfüller mit einer Wärmeleitfähigkeit λ von 0,039 W/(m·K) abgebildet wird (Fall3).

Die Auswirkungen der Belüftungszustände auf das Simulationsmodell werden exemplarisch für jeweils einen Kühl- und Heizfall dargestellt.

Kühlfall 20/24 °C

Der Kühlfall 20/24 °C entspricht einer Vorlauftemperatur von ca. 20 °C bei ca. 24 °C Raumtemperatur, wodurch sich eine mittlere Wassertemperatur von ca. 20,4°C einstellt. Anhand des gewählten Querschnitts ist die Temperaturverteilung im stationären Zustand des untersuchten Demonstrators inklusive Dachdämmung für den unbelüfteten Zustand (Fall1) in Abbildung 3-27 dargestellt.

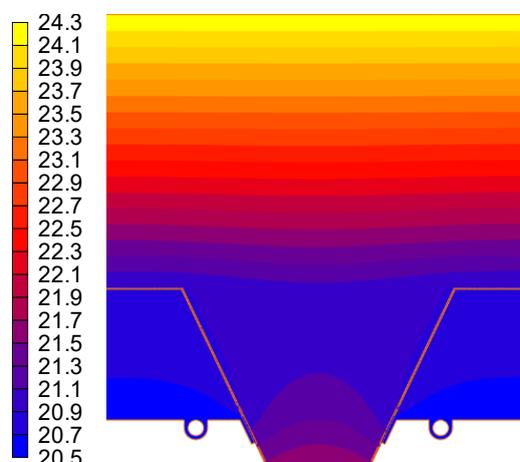


Abbildung 3-27: Temperaturverteilung des Demonstrators im Kühlfall 20/24 °C [°C]

Oberhalb der Strahlungsplatte stellt sich eine Temperatur nahe der Wassertemperatur ein. In der angrenzenden Hohlkammer B ist eine Erhöhung der Temperatur mit zunehmender Tiefe der Kammer zu erkennen.

Die Temperaturverläufe an der Unterseite des Trapezprofils für die unterschiedlichen Belüftungszustände sind in Abbildung 3-28 dargestellt. Zusätzlich zu den Temperaturverläufen der einzelnen Belüftungszustände werden die Temperaturen des Wassers sowie der an der Deckenunterseite angebrachten Temperatursensoren als farbige Punkte an der jeweiligen Stelle dargestellt.

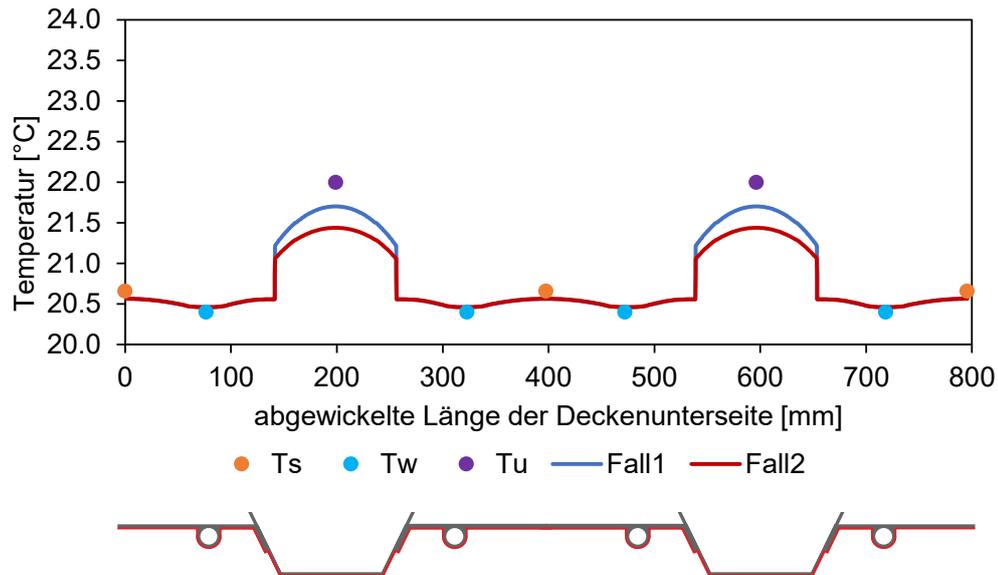


Abbildung 3-28: Simulierte Temperaturverläufe an der Unterseite des aktivierten Trapezprofils für unterschiedliche Belüftungszustände des Kühlfalls 20/24 °C, oben: Temperaturverlauf, unten: zugehörige Position an der Trapezprofilunterseite (rot)

Ein Vergleich der gemessenen Temperatur des Wassers T_w sowie der Strahlungsplatte T_s zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Temperaturen im Bereich der Strahlungsplatte für alle Fälle. Dort sind die Temperaturen nahezu identisch. Die Temperatur wird hier maßgeblich durch den direkten Kontakt zum temperierten Wasser und der guten Wärmeleitfähigkeit der Strahlungsplatte beeinflusst und kaum durch den restlichen Deckenaufbau. Im Stegbereich erfolgt eine Temperaturerhöhung und ein sichtbarer Temperaturunterschied zwischen den untersuchten Varianten. Im unbelüfteten Zustand führt die verringerte Wärmeleitfähigkeit der Luft in Hohlkammer B zu einem reduzierten Wärmestrom durch die Luft. Dadurch wird der Untergurt weniger stark temperiert, was sich in einer höheren Temperatur im Kühlfall widerspiegelt. Im Bereich der Untergurte ist eine geringe Abweichung zum Messwert, von ca. 0,5 K im Fall2, zu erkennen. Der Ansatz einer ruhenden Luftschicht im Fall1 führt zu einer besseren Abbildung des Versuches. Die verbleibende Abweichung von $< 0,2$ K kann im Rahmen der Genauigkeit der eingesetzten Temperatursensoren als gering bezeichnet werden.

Heizfall 30/24 °C

Der dargestellte Heizfall 30/24 °C entspricht einer Vorlauftemperatur von ca. 30 °C bei ca. 24 °C Raumtemperatur, wodurch sich eine mittlere Wassertemperatur von ca. 29,3 °C einstellt. Anhand des halben Modells ist die Temperaturverteilung im stationären Zustand des untersuchten Demonstrators für den unbelüfteten Zustand (Fall1) in Abbildung 3-29 dargestellt.

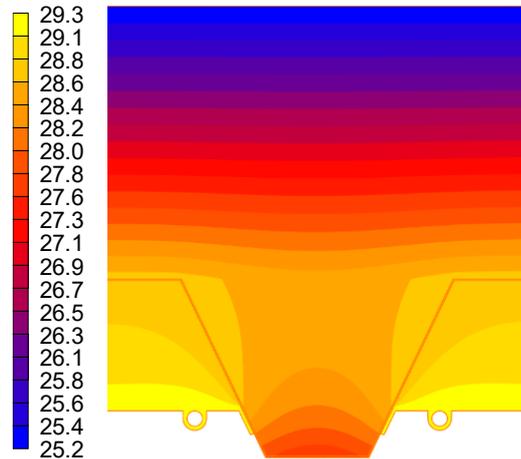


Abbildung 3-29: Temperaturverteilung des Demonstrators im Heizfall 30/24 °C [°C]

Auch im Heizfall stellt sich oberhalb der Strahlungsplatte eine Temperatur nahe der Wassertemperatur ein. In der angrenzenden Hohlkammer B ist ein Temperaturabfall mit zunehmender Tiefe der Kammer zu erkennen.

Die Temperaturverläufe an der Unterseite des Trapezprofils für die unterschiedlichen Belüftungszustände sind in Abbildung 3-30 dargestellt.

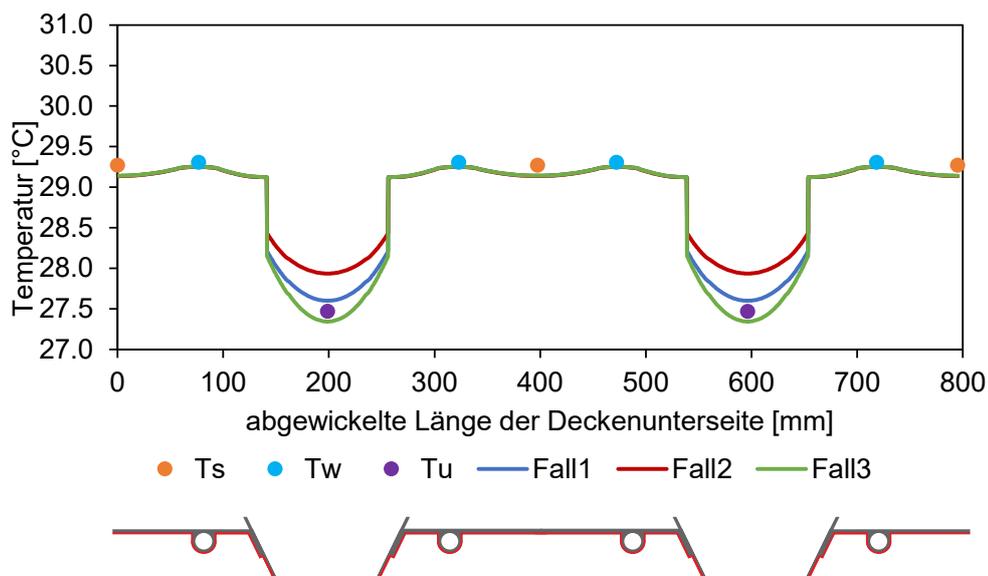


Abbildung 3-30: Simulierte Temperaturverläufe an der Unterseite des aktivierten Trapezprofils für unterschiedliche Belüftungszustände des Heizfalls 30/24 °C, oben: Temperaturverlauf, unten: zugehörige Position an der Trapezprofilunterseite (rot)

Ein Vergleich der gemessenen Temperaturen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Temperaturen im Bereich der Strahlungsplatte für alle Fälle. Aufgrund des höheren Temperaturunterschiedes im Heizfall erfolgt im Stegbereich ein höherer Temperaturabfall. Auch im Heizfall ist eine bessere Übereinstimmung mit den Messwerten im unbelüfteten Zustand der Hohlkammer B zu beobachten. Eine größere Reduktion der Wärmeleitfähigkeit durch einen Profillfüller (Fall3) führt zu einem weiteren Temperaturabfall im Untergurt.

Neben dem Einfluss auf die Temperaturverteilung, wurde die spezifische Leistung \dot{q}_i für die untersuchten Fälle ermittelt. Dafür wurden die Anteile der Strahlungsplatte, des Stegs sowie des Untergurts bestimmt. Tabelle 3-4 zeigt die Ergebnisse des Kühlfalls 20/24 °C und Tabelle 3-5 die Ergebnisse des Heizfalls 30/24 °C.

Tabelle 3-4: Verteilung der spezifischen Leistung \dot{q}_k des Kühlfalls 20/24 °C für verschiedene Belüftungszustände

	Fall1		Fall2	
	[W/m ²]	[%]	[W/m ²]	[%]
Strahlungsplatte	25,4	68,5	25,3	67,1
Steg	5,6	15,1	5,7	15,1
Untergurt	6,1	16,4	6,7	17,8
Summe	37,0	100,0	37,8	100,0

Tabelle 3-5: Verteilung der spezifischen Leistung \dot{q}_h des Heizfalls 30/24 °C für verschiedene Belüftungszustände

	Fall1		Fall2		Fall3	
	[W/m ²]	[%]	[W/m ²]	[%]	[W/m ²]	[%]
Strahlungsplatte	-26,8	63,2	-26,8	62,1	-26,8	64,0
Steg	-8,8	20,8	-9,0	20,9	-8,8	20,9
Untergurt	-6,8	15,9	-7,3	17,0	-6,4	15,2
Summe	-42,4	100,0	-43,2	100,0	-41,9	100,0

Da die Strahlungsplatten für 63 bis 69 % der gesamten Leistung verantwortlich sind, sind die Unterschiede der spezifischen Leistung zwischen den betrachteten Fällen gering. Die Temperaturunterschiede in den Untergurten führen zu geringen Veränderungen, da diese nur für ca. 16 % der Leistung verantwortlich sind. 15 bis 21 % können den Stegen zugeordnet werden. Aufgrund der reduzierten Konvektion bei der Wärmeübergabe der Strahlungsplatte kommt es im Heizfall zu einem verringerten Anteil der Strahlungsplatte an der Gesamtleistung bei gleichzeitig steigendem Anteil der Stege.

Vergleich mit messtechnischen Untersuchungen

Alle Messfälle aus den Versuchen wurden mit Hilfe der aufgezeichneten Temperaturen simuliert und für die gleichen Temperaturdifferenzen $T_{op} - T_{w,m}$ aus dem stationären Zustand für den unbelüfteten Zustand (Fall1) als Betriebskennlinie dargestellt. Diese werden für die Kühl- und die Heizfälle in Abbildung 3-31 angegeben. Für einen Vergleich sind außerdem die Betriebskennlinien des Wärmemengenzählers dargestellt.

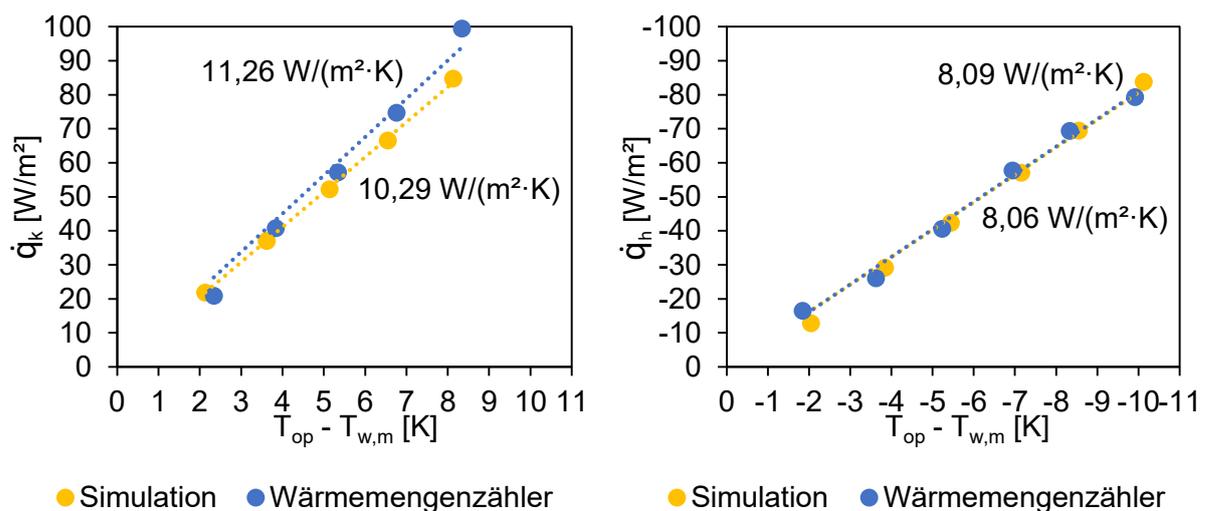


Abbildung 3-31: Betriebskennlinie aus den Simulationsergebnissen (Fall1) sowie aus der messtechnischen Auswertung, links: Kühlfall, rechts: Heizfall

Die lineare Steigung der Betriebskennlinie für die Kühlfälle ist etwas geringer als die Steigungen der Messwerte. Die Größenordnung ist allerdings vergleichbar. Die Betriebskennlinie der Heizfälle befindet sich nur geringfügig unterhalb der Steigung der Messwerte und bildet die gemessene Situation gut ab.

3.5.3.6 Reduktion der aktivierten Strahlungsplatten

Belüftungszustände der Hohlräume

Da bei einer Reduktion lediglich jeder zweite Obergurt aktiviert ist, wird in der Simulation nur die mittlere Strahlungsplatte temperiert.

Der Kühlfall 20/24 °C entspricht einer Vorlauftemperatur von ca. 20 °C bei ca. 24 °C Raumtemperatur wodurch sich eine mittlere Wassertemperatur von ca. 20,1 °C einstellt. Der Heizfall 30/24 °C entspricht einer Vorlauftemperatur von ca. 30 °C bei ca. 24 °C Raumtemperatur, wodurch sich eine mittlere Wassertemperatur von ca. 29,5 °C einstellt.

Die simulierten Temperaturverläufe an der Unterseite des Trapezprofils für den unbelüfteten Zustand (Fall1) sowie den leicht belüfteten Zustand (Fall2) sind in Abbildung 3-32 für den Kühlfall und in Abbildung 3-33 für den Heizfall dargestellt.

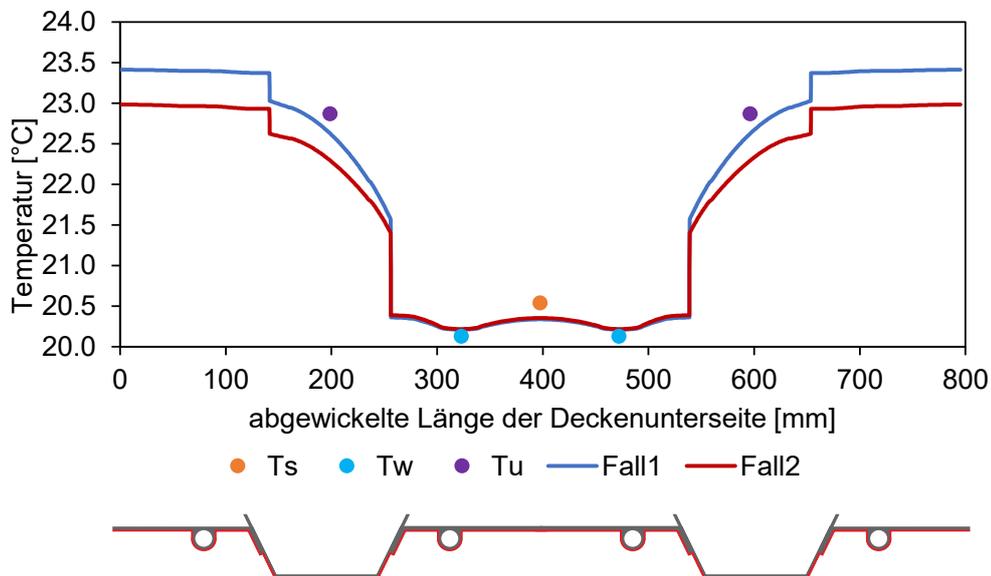


Abbildung 3-32: Simulierte Temperaturverläufe an der Unterseite des aktivierten Trapezprofils für unterschiedliche Belüftungszustände des Kühlfalls 20/24 °C bei Reduktion der aktivierten Strahlungsplatten, oben: Temperaturverlauf, unten: zugehörige Position an der Trapezprofilunterseite (rot)

Sowohl für den Kühlfall als auch für den Heizfall sind die Effekte der deaktivierten Strahlungsplatten deutlich zu erkennen. Im Bereich der linken und rechten Strahlungsplattenhälfte orientiert sich die Temperatur, mit steigendem Abstand von der aktivierten Strahlungsplatte, immer weiter in Richtung Raumtemperatur. Die gemessenen Temperaturen im Bereich der Strahlungsplatte entsprechen weitgehend der Simulation. Im Bereich der Untergurte bildet der unbelüftete Zustand die gemessene Temperatur ebenfalls gut ab. Der belüftete Zustand führt auch bei der Reduktion der aktivierten Strahlungsplatten zu einem geringeren Temperaturgradienten zwischen aktivierten Strahlungsplatten und den nicht aktivierten Bereichen.

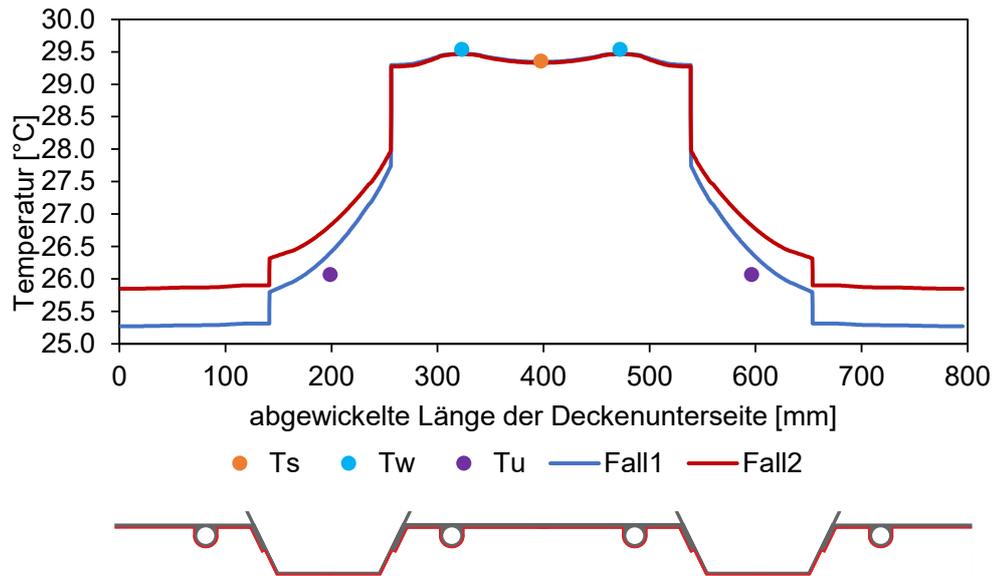


Abbildung 3-33: Simulierte Temperaturverläufe an der Unterseite des aktivierten Trapezprofils für unterschiedliche Belüftungszustände des Heizfalls 30/24 °C bei Reduktion der aktivierten Strahlungsplatten, oben: Temperaturverlauf, unten: zugehörige Position an der Trapezprofilunterseite (rot)

Neben der Temperaturverteilung wurde die spezifische Leistung \dot{q}_i für die untersuchten Fälle ermittelt. Dafür wurden die spezifischen Leistungen der Strahlungsplatte und des Stegs getrennt für den aktivierten (a.) und den nicht aktivierten Teil (n.a.) sowie des Untergurts ermittelt. Tabelle 3-6 zeigt die Ergebnisse des Kühlfalls 20/24 °C und Tabelle 3-7 die Ergebnisse des Heizfalls 30/24 °C.

Tabelle 3-6: Verteilung der spezifischen Leistung \dot{q}_k des Kühlfalls 20/24 °C für verschiedene Belüftungszustände bei Reduktion der aktivierten Strahlungsplatten

	Fall1		Fall2	
	[W/m ²]	[%]	[W/m ²]	[%]
Strahlungsplatte a.	13,7	56,2	13,7	50,3
Strahlungsplatte n.a.	3,1	12,5	4,7	17,4
Steg a.	2,8	11,3	2,8	10,3
Steg n.a.	0,7	2,7	0,9	3,4
Untergurt	4,2	17,3	5,0	18,6
Summe	24,4	100,0	27,2	100,0

Tabelle 3-7: Verteilung der spezifischen Leistung \dot{q}_h des Heizfalls 30/24 °C für verschiedene Belüftungszustände bei Reduktion der aktivierten Strahlungsplatten

	Fall1		Fall2	
	[W/m ²]	[%]	[W/m ²]	[%]
Strahlungsplatte a.	-13,2	51,3	-13,2	46,4
Strahlungsplatte n.a.	-3,4	13,1	-5,0	17,4
Steg a.	-3,9	15,3	-4,0	14,1
Steg n.a.	-1,0	4,0	-1,4	4,9
Untergurt	-4,2	16,2	-4,9	17,2
Summe	-25,8	100,0	-28,5	100,0

Die aktivierten Strahlungsplatten sind im unbelüfteten Zustand für 51 bis 56 % der gesamten Leistung verantwortlich. Trotz fehlender Aktivierung beteiligen sich die nicht aktivierten Strahlungsplatten mit zusätzlichen 13 %, was ungefähr der Größenordnung der aktivierten Stege entspricht. Der Untergurt und die nicht aktivierten Stege beteiligen sich zusammen mit ca. 20 % an der gesamten Leistung.

Im Fall einer Reduktion der aktivierten Strahlungsplatten ist der Einfluss des Belüftungszustands auf die Leistungsabgabe größer. Bei einer leichten Belüftung erhöht sich die Leistung um ca. 10 %. Die höhere Wärmeleitfähigkeit in Hohlkammer B führt zu einem größeren Wärmetransport zu den nicht aktivierten Bereichen, wovon die nicht temperierte Strahlungsplatte am meisten profitiert.

Vergleich mit messtechnischen Untersuchungen

Die Messfälle aus den Versuchen wurden mit Hilfe der aufgezeichneten Temperaturen simuliert und für die gleichen Temperaturdifferenzen $T_{op} - T_{w,m}$ aus dem stationären Zustand für den unbelüfteten Zustand (Fall1) als Betriebskennlinie dargestellt. Diese werden für die Kühl- und die Heizfälle in Abbildung 3-34 angegeben. Für einen direkten Vergleich sind außerdem die Betriebskennlinien des Wärmemengenzählers dargestellt.

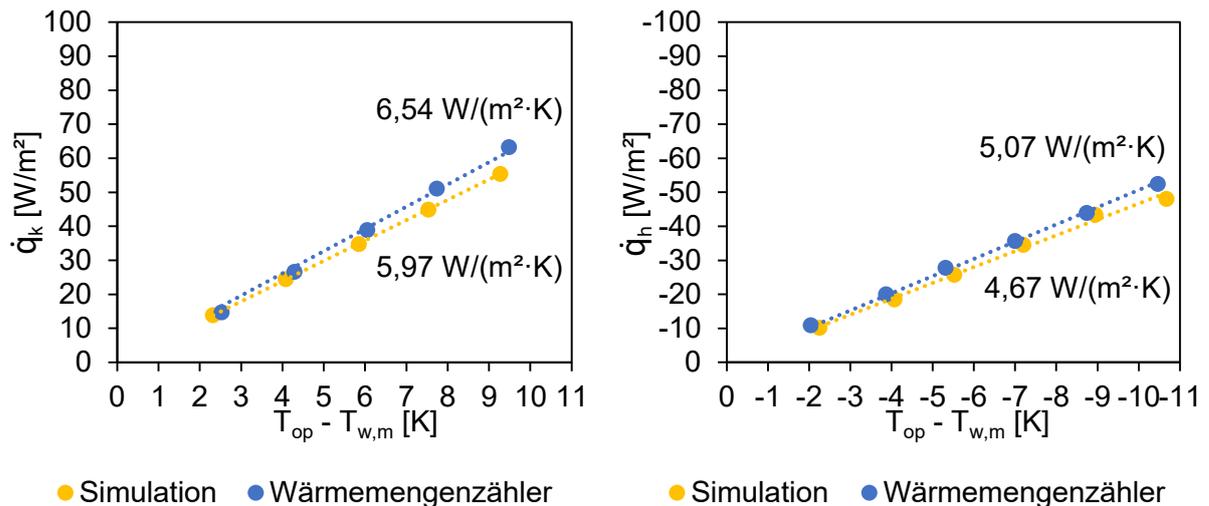


Abbildung 3-34: Betriebskennlinie aus den Simulationsergebnissen (Fall1) sowie aus der messtechnischen Auswertung bei Reduktion der aktivierten Strahlungsplatten, links: Kühlfall, rechts: Heizfall

Die lineare Steigung der Betriebskennlinie für die Kühlfälle ist etwas geringer als die Steigungen der Messwerte. Die Betriebskennlinie der Heizfälle befindet sich ebenfalls unterhalb der Steigung der Messwerte.

3.6 Zusammenfassung

Zur Temperierung von Hallengebäuden können neben den klassischen, im Raum installierten Systemen zur Wärmeübergabe, auch bauteilintegrierte Systeme verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Integration von Strahlungsplatten in Trapezprofile untersucht. Verschiedene Messmethoden mittels Temperatursensoren und Wärmemengenzähler wurden im Rahmen der messtechnischen Untersuchungen angewandt und ausgewertet. Die Messergebnisse zeigen insgesamt auf, dass bei den vergleichsweise geringen Temperaturdifferenzen eine lineare Näherung für die Betriebskennlinie ausreichend ist, und damit die Angabe ihrer Steigung zur Charakterisierung genügt.

Die Ergebnisse der Wärmemengenzähler lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die Betriebskennlinie für den Kühlfall kann mit $11,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ angegeben werden und übertrifft damit konventionelle geschlossene Kühldecken. Im Heizfall konnte eine Betriebskennlinie von $8,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ bestimmt werden. Die Methode mittels Temperatursensoren führte zu etwas höheren Werten. Die Abweichungen können im Rahmen der Messgenauigkeit aber als gering bezeichnet werden und sind hauptsächlich der unterschiedlichen Erfassung der Wassertemperatur zuzuschreiben.

Eine punktuelle Überprüfung mit Wärmestrommessplatten hat diese Ergebnisse ebenfalls bestätigt.

Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Stahltrapezprofils sowie der Strahlungsplatten aus Aluminium kann ein Wärmetransport hin zu den Untergurten nachgewiesen werden. Auch oberhalb der Strahlungsplatte kann ein Wärmetransport über die eingeschlossenen Lufträume, sowie durch die Stege, welche sich dazwischen befinden, belegt werden. Somit wird auch das Trapezprofil außerhalb der Strahlungsplatten thermisch aktiviert und beteiligt sich dadurch an der Wärme- bzw. Kälteübergabe zum Raum. Mittels Infrarotaufnahmen konnte dieser Wärmetransport auch sichtbar gemacht werden. Besonders deutlich wird dies bei einer reduzierten Anzahl aktivierter Strahlungsplatten. Eine Halbierung führt lediglich zu einer Reduktion der Leistungsabgabe um ca. 40 % auf $6,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ im Kühlfall und $5,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ im Heizfall.

Für eine Bemessung thermisch aktivierter Trapezprofile wurde ein numerisches FEM-Modell entwickelt. Die gemessenen Temperaturen im Bereich der Strahlungsplatte entsprechen in allen Fällen weitgehend der Simulation. Im Bereich der Untergurte, bzw. der nicht aktivierten Bereiche, bildet der unbelüftete Zustand in den Hohlkammern die gemessene Temperatur gut ab. Hinsichtlich der Leistungsbestimmung liegt dieser Fall auf der sicheren Seite und eignet sich somit für eine Bemessung.

Der belüftete Zustand führt aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit in den Hohlkammern zu einem geringeren Temperaturgradienten zwischen aktivierten Strahlungsplatten und den nicht aktivierten Bereichen, und somit auch zu höheren Leistungen vor allem bei Reduktion der aktivierten Strahlungsplatten. Der Einsatz von Profillüllern in den oberen Hohlräumen der Trapezprofile wirkt sich zwar auf die Temperaturen der Untergurte aus, hat aber auf die Gesamtleistung kaum Auswirkungen, da die Strahlungsplatten und der angrenzende Stegbereich für den größten Teil der Leistung verantwortlich sind.

Der in den messtechnischen Untersuchungen belegte Wärmetransport hin zu den Untergurten und die thermische Aktivierung des Trapezprofils außerhalb der Strahlungsplatten kann auch in den Simulationen gezeigt werden. Im Fall einer Reduktion der aktivierten Strahlungsplatten kommt es zu einer Verschiebung der Anteile hin zu den nicht aktivierten Bereichen. Die aktivierten Strahlungsplatten sind jedoch auch in diesem Fall für den größten Teil der Leistung verantwortlich.

4 Fassadenintegrierte Lösungen zur Nutzung erneuerbarer Energien

4.1 Einleitung

Üblicherweise kommen solarthermische Kollektoren dort zum Einsatz, wo ein hoher Bedarf an Trinkwarmwasser besteht, z.B. im Wohnbau oder in Schwimmbädern. Zur Heizungsunterstützung im Gewerbebau werden solarthermische Kollektoren kaum eingesetzt. Ursache ist der zeitliche Versatz zwischen Energiebedarf und zur Verfügung stehender Energie, da über solare Einstrahlung die höchste Wärmeleistung entsteht, wenn der Wärmebedarf im Gebäude am niedrigsten ist. Die Auslegung der Kollektoren erfolgt daher klassischerweise nach dem Trinkwarmwasserbedarf und nicht nach dem Wärmebedarf.

An dieser Stelle setzen allerdings moderne integrierte Gebäudetechnikkonzepte an. Insbesondere in der Kombination mit Flächenheiz- und -kühlsystemen, Geothermie oder Eisspeichern kann hier die Umweltwärme genutzt werden, um entweder das Heizsystem direkt anzusteuern oder den Speicher zu regenerieren. So werden die solaren Gewinne saisonal gespeichert. Über Aktivierung der Gebäudehülle können Speichervolumina und Geothermieanlagen deutlich geringer dimensioniert werden. Darüber hinaus bietet sich die Gebäudehülle auch als nächtliche Wärmesenke in Sommer an, um über Nacht abstrahlung die aktivierten Bauteilmassen oder einen Speicher herunterzukühlen.

Im Gewerbebau bieten sich die Fassadenflächen für solarthermische Kollektoren an. Über die großen Flächen kann Umweltwärme absorbiert werden. Dabei können die Volumenströme und Abmessungen der Kollektoren an den gewünschten Wärmebedarf und die Soll-Vorlauftemperaturen angepasst werden. Da hier in der Regel nicht die Fläche das bestimmende Limit darstellt, müssen keine Hochleistungskollektoren eingesetzt werden. Es können auch Kollektoren mit geringerer Leistung pro m² verwendet werden.

Die Fassadenflächen bieten sich ebenfalls für Photovoltaikmodule an. Aufgrund der großen Flächen sind auch hier Module mit geringerer Leistungsfähigkeit von Interesse, bei denen Gewicht und Materialeinsatz die bestimmenden Faktoren darstellen. Verfügbare OPV-Module sind dünn und leicht, lassen sich mit geringem Aufwand an den Fassadenoberflächen montieren und sind dafür besonders geeignet.

4.2 Solarthermischer Kollektor sowie Kombikollektor mit OPV als VHF

4.2.1 Kollektorpaneel

Für die großflächige Anwendung im Gewerbebau ist es erstrebenswert, dass der Kollektor gestalterisch in die Fassade integrierbar und möglichst unsichtbar ist. Er muss robust, dauerhaft wartungsarm und witterungsbeständig sein und eine einfache Montage ermöglichen.

Diese Ziele werden erreicht über die Kombination der Vorteile von Flachkollektoren und Schwimmbadabsorbern zu einer thermisch aktivierten vorgehängten hinterlüfteten Fassade (VHF). Dabei können verschiedenste Fassadenbekleidungen verwendet werden, die auf der Rückseite mit thermischen Absorberleitungen versehen werden. Aktivierte und nicht aktivierte Fassadenpaneele sind frei kombinierbar. Im Rahmen dieser Arbeit wird exemplarisch eine Paneelfassade aus gekanteten Stahlblechen vorgestellt, da dies eine übliche Fassadenbekleidung im Gewerbebau darstellt und die Metallbleche durch ihre gute thermische Leitfähigkeit vorteilhaft für die Kollektorleistung sind.

4.2.2 Planung und Erstellung des Demonstrators

Innerhalb des IGF-Forschungsvorhabens „Integrale Lösungen für Plusenergiegebäude 2.0 in Stahlleichtbauweise“ wurde von der FH Dortmund ein Demonstrator für solch einen solarthermischen Kollektor entwickelt (Abbildung 4-1). Für den Demonstrator wurde ein Fassadenraster von 60 cm gewählt. Die Metallpaneele haben eine Abmessung von 60 cm (Höhe) und 179 cm (Breite) und somit eine Fläche von 1,08 m². Als Unterkonstruktion wurden vertikal verlaufende T-Profile auf Konsolen gewählt. Die Paneele wurden in den Fugen sichtbar verschraubt. Diese Konstruktion ist in der Praxis unüblich. Sie wurde vor allem deshalb gewählt, weil sie in Eigenfertigung einfach herzustellen ist und die einzelnen Elemente für die Untersuchungen leicht zu montieren und zu demontieren sind. Für die Anwendung in Bauprojekten sind alle üblichen Unterkonstruktionen und Befestigungssysteme für Paneelfassaden möglich.

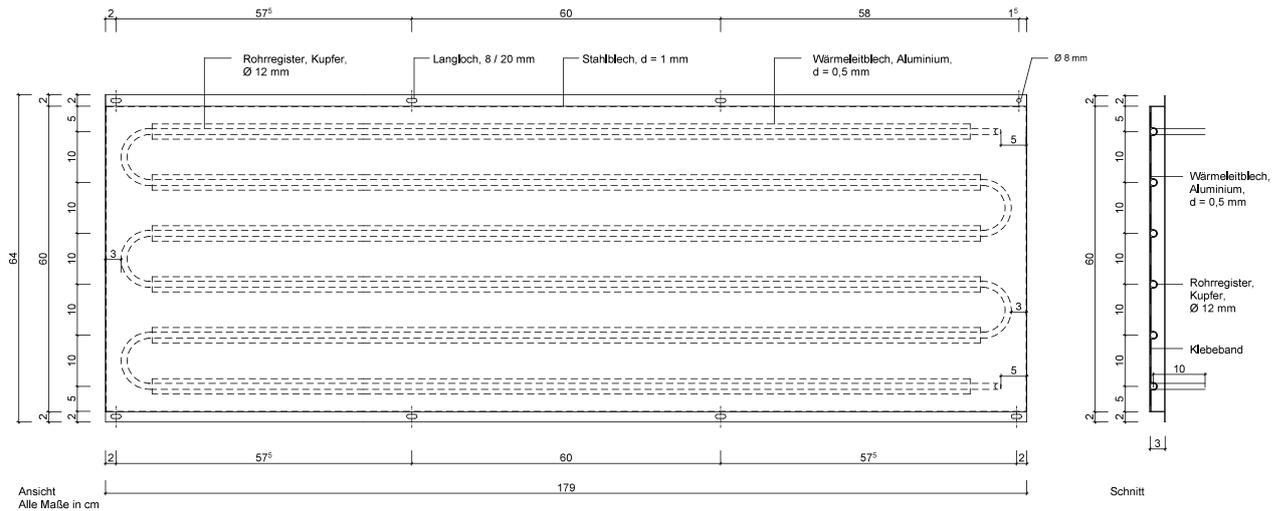


Abbildung 4-1: Werkstattplanung des Kollektors [73]

Für die Mustermodule wurde bandverzinktes Stahlblech mit einer Dicke von 1 mm gewählt (Abbildung 4-2). Bei der gewählten Abmessung bietet dieses eine ausreichende Steifigkeit und Widerstandsfähigkeit gegen Windlasten.



Abbildung 4-2: Rückansicht des Kollektors [74]

Die eigentlichen Absorberrohre bestehen aus Kupferrohr, das mäanderförmig gebogen wird. Der Durchmesser des Rohres beträgt 12 mm, die Wandstärke 0,35 mm. Zusätzlich werden die Rohre auf einer Seite D-förmig abgeflacht, um die Kontaktfläche mit dem Metallpaneel zu erhöhen.

Die Kupfermäander werden über Wärmeleitbleche auf dem Trägerblech fixiert. Diese Wärmeleitbleche bestehen aus 0,5 mm dicken und 87 mm breiten Feinblechen einer weichen Aluminiumlegierung. Diese weist eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit auf und lässt sich gut im Rollumformer auf die Geometrie der Absorberrohre anpassen.

Als Klebstoff wird ein doppelseitiges Acrylat-Klebeband verwendet. Durch den definierten Anpressdruck wird eine dauerhafte Verbindung gewährleistet. Die Klebfläche schafft die für den Korrosionsschutz erforderliche Materialtrennung zwischen Wärmeleitblech und Paneelfläche. Gleichzeitig ist sie aber so dünn, dass eine Wärmeübertragung von einem auf das andere Material stattfindet und so beide Bleche thermisch aktiv werden.

Zusätzlich wurde ein PVT-Modul (Kombination von PV und Solarthermie) erstellt. Als Grundlage für den Kombikollektor dient der fertige thermische Kollektor. Auf der Vorderseite wird eine organische Photovoltaikfolie aufgebracht. Diese verfügt über eine selbstklebende Fläche auf der Rückseite und wird damit auf die beschichtete Vorderseite der Fassadenpaneele geklebt.

Zum Einsatz kamen zwei Solarmodule des Typs HeliaSol 315-2000 von Heliatek [75]. Diese haben eine Abmessung von 315 x 2000 mm und eine Modulleistung von 24 W_p. Somit entspricht die Leistung ca. 38 W_p/m². Die gelieferten Module werden üblicherweise auf Flachdächern verlegt und waren daher mit Anschlüssen auf der Vorderseite versehen. Für die Anwendung in der Fassade gibt es auch rückseitige Anschlüsse, die von der Vorderseite nicht sichtbar wären. Um bei dem Demonstrator die Anschlussdosen zu verbergen, wurden Lisenenbleche gefertigt, die den Rand des Solarmoduls überdecken. Dadurch wird die besonnte Fläche verringert, so dass der fertige Kombikollektor die Abmessungen des solarthermischen Kollektors aufweist, was einer Leistung von ca. 41 W_p entspricht.

Im Zuge des Monitorings des Kollektors soll die gegenseitige Beeinflussung der Photovoltaik und der Solarthermie betrachtet werden. Dazu werden der thermische Kollektor und der Kombikollektor mit OPV zu einem Demonstrator zusammengesetzt. Abbildung 4-3 zeigt die Anordnung der Paneele des Demonstrators.



Abbildung 4-3: Anordnung der Paneele für den solarthermischen Demonstrator, oben: thermisch aktiviertes Panel mit Absorberleitungen auf der Rückseite, unten: Kombikollektor mit OPV [76]

4.3 Stahlsandwichkonstruktionen mit OPV

4.3.1 Glas-Sandwich-OPV

Organische Photovoltaikfolie weist einen nicht zu vernachlässigenden Nachteil auf. Entsprechend den Datenblättern ist sie der Brandschutzklasse E (normal entflammbar) nach EN 13501-1 zuzuordnen [75]. Wird organische Photovoltaikfolie also auf Gebäudehüllen angebracht, muss dies beim Brandschutzkonzept des Gebäudes berücksichtigt werden.

Als Glas-Sandwich-Fassade entstand deswegen im Rahmen dieser Arbeit die Idee einer Alternative als brandschutztechnisch verbesserte Lösung mit einer Glasabdeckung der PV-Module. Diese transmittiert weiterhin die Solarstrahlung und hält darüber hinaus Feuer von der Folie fern. Bereits auf dem Markt befindliche Sandwichelemente mit Glasabdeckung gelten als schwer entflammbar (Brandschutzklasse Bs2, d0 nach EN 13501-01) [77].

Eine thermisch vorgespannte Glasscheibe kann auf längsverlaufenden Silikonklebspuren aufgeklebt werden. Die organischen Photovoltaikfolien können in den Luftzwischenräumen zwischen den Silikonspuren verlegt werden. Damit wäre eine architektonisch ansprechende Lösung als eine alternative Anwendungsform geschaffen, die eventuell sogar Vorteile im Brandschutz aufweisen kann.

Für eine Bewertung dieser Konstruktion ist zu ermitteln, wie eine Glasscheibe den Wirkungsgrad der Solarzelle beeinflusst und ob die herrschenden Temperaturen in der Konstruktion sich auf die Photovoltaikfolie auswirken. Dies soll im Rahmen eines Monitorings untersucht werden, bei dem eine verglaste und eine unverglaste Ausführung betrachtet werden.

4.3.2 Planung und Erstellung des Demonstrators

Bei der gewählten OPV-Folie handelt es sich um ein gebrauchsfertiges Solarmodul, welches aus Photovoltaikfolie besteht und auch beim PVT-Kollektor in Kapitel 4.2 angewandt wurde. Dieses Solarmodul ist sowohl für die Anwendung auf dem Dach als auch auf Fassaden geeignet. Die Befestigung auf der Gebäudehülle erfolgt per Klebtechnik. Jede Folie verfügt auf der Rückseite über eine vollflächig klebende Schicht, die auf den meisten Oberflächen und Materialien haftet [75].

Die Dicke beträgt 1,6 mm, mit den Anschlussdosen kommen 15 mm dazu. Die Abmessungen betragen 2000 mm in der Länge und 315 mm in der Breite. Der aktive Solarzellenbereich misst 1,95 x 0,245 m (Abbildung 4-4).

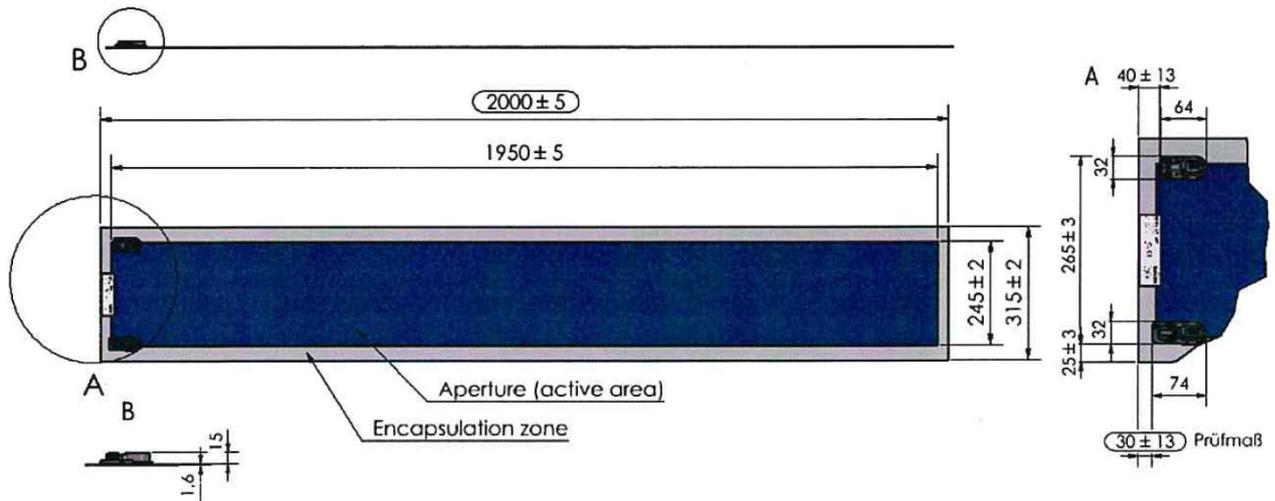


Abbildung 4-4: Abmessungen der gewählten OPV-Folie [75]

Um in der Gestaltung der Fassade variabler zu sein, werden zwei Demonstratoren vorab auf Sandwichelementen erstellt und erst im Anschluss an einem Forschungsgebäude montiert (Kapitel 4.4): ein Demonstrator, der die Variante mit Glas vor der Photovoltaikfolie zeigt (nachfolgend Demonstrator A genannt), und ein Demonstrator, der die organische Photovoltaikfolie in herkömmlicher Bauweise präsentiert (nachfolgend Demonstrator B genannt).

Die gewählten OPV-Folien haben eine Breite von 315 mm. Um drei Folien inklusive Klebfugen für die Verglasung je Sandwichelement platzieren zu können, wird ein Sandwichelement der Breite 1100 mm gewählt (Abbildung 4-5).

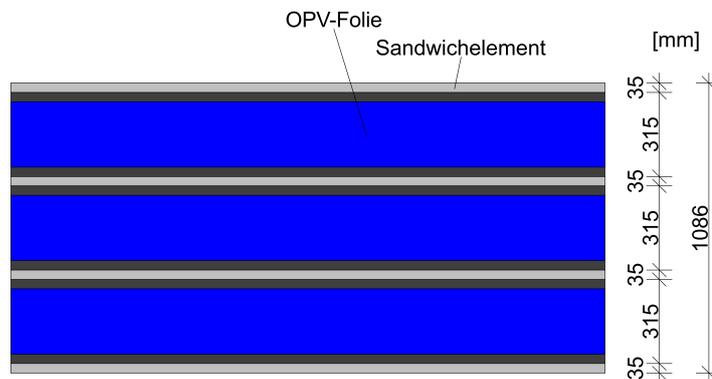


Abbildung 4-5: Abmessungen eines 1100 mm breiten Sandwichelements mit OPV-Folie

Der Bereich der Kabelanschlüsse soll abgedeckt werden. Dazu wird ein Hutprofil über den Bereich der Anschlussbuchsen, Anschlusskabel sowie der Kabeldurchführung geplant (Abbildung 4-6).

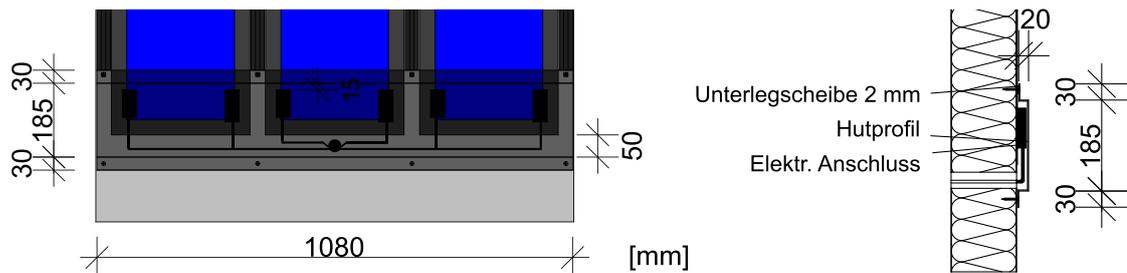


Abbildung 4-6: Hutprofil als Abdeckblech der Kabelanschlüsse, links: Draufsicht, rechts: Längsschnitt

Eine teilvorgespannte Glasscheibe (TVG) bietet eine gesteigerte Temperaturwechselbeständigkeit. Möchte man die Vorspannung und damit die Festigkeit erhöhen, könnte man auch Einscheibensicherheitsglas (ESG) für die Abdeckung verwenden, da diese Glasart eine höhere Festigkeit als TVG aufweist. Bei Versagen einer Glasscheibe durch äußere Einwirkungen oder innere Zwangsspannungen würde eine ESG-Scheibe in unzählige kleine Stücke zerbrechen (Abbildung 4-7, rechts) und in ihren Einzelteilen herunterfallen. Wählt man dagegen eine TVG-Scheibe, zeigt das Bruchbild grobe Scheibenstücke (Abbildung 4-7, links). Für vertikale Installationen eignet sich eher letztere, da die einzelnen Scheibenstücke sich an der Bruchstelle verkeilen können und auch den Kontakt zur Silikonverklebung nicht verlieren.

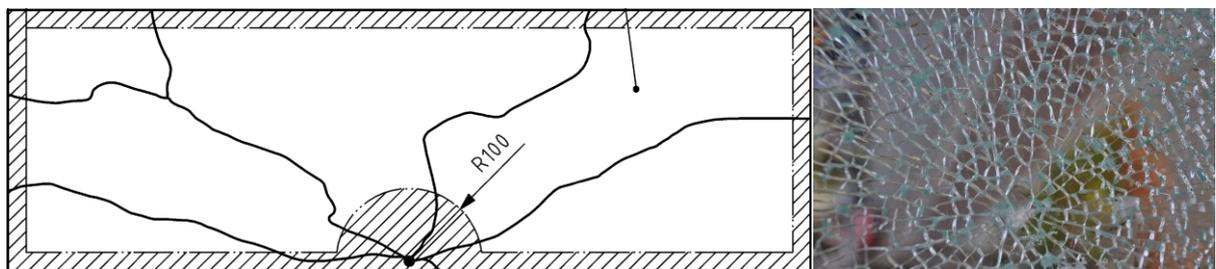


Abbildung 4-7: Bruchbilder, links: TVG [78], rechts: ESG [79]

Beim Herstellungsprozess von Glas fließt die Glasschmelze auf ein Zinnbad um abzukühlen. Dadurch entsteht Floatglas mit einer einseitigen Zinnbelastung. Einzelne Bestandteile des Zinns bleiben auf der in der Herstellung unten liegenden Seite haften. Um den Einfluss der zinnbelasteten Glasscheibe zu prüfen, werden für den Demonstrator A zwei Sandwichelemente mit je einer Glasscheibe geplant. Bei einer Scheibe wird die Zinnschicht nach innen, bei der anderen Scheibe nach außen zeigen.

Für den Demonstrator wurde 6 mm dickes Floatglas verwendet. Grundsätzlich kommen aber auch andere Gläser in Frage. Neben dem herkömmlichen Floatglas, welches auch Grünglas genannt wird (Abbildung 4-8, links), gibt es klareres Glas, welches Weißglas genannt wird (Abbildung 4-8, rechts). Weißglas hat einen reduzierten Grüntich durch einen geringeren Eisenanteil. Während normales 6 mm dickes

Floatglas ca. 82 % der Strahlungsenergie transmittiert, lässt Weißglas derselben Dicken ca. 89 % Strahlungsenergie durch [80].



Abbildung 4-8: Glasvarianten, links: Grünlas, rechts: Weißglas [81]

Die Breite der Glasscheiben wird der Breite der Sandwichelemente abzüglich der Fugenbreite von 10 mm auf 1090 mm angepasst. In der Länge der Glasscheibe muss der Bereich ab der Kabelabdeckung bis zur Oberkante der Photovoltaikfolien abgedeckt werden. Die Unterkante der Glasscheibe überlappt das Abdeckblech um 10 mm, so dass die Stecker und Kabel unter dem Blech gegen Schlagregen geschützt sind. Im oberen Bereich ragt das Glas 40 mm über die Photovoltaikfolien hinaus. Somit ergeben sich 1886 mm in der Länge der Glasscheibe und ein resultierendes Gesamtgewicht von 31 kg je Scheibe (Abbildung 4-9).

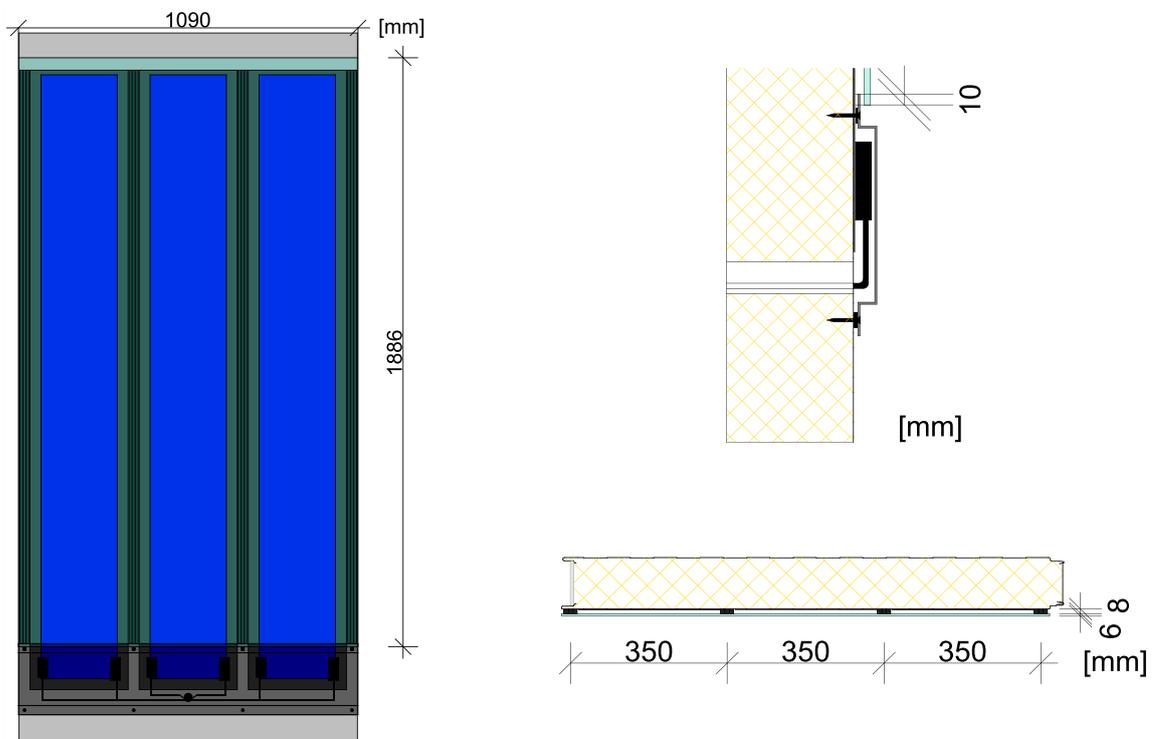


Abbildung 4-9: Abmessungen Glasscheibe, links: Draufsicht, rechts: Längs und Querschnitt

Oberhalb der Glasscheibe und unterhalb des Abdeckblechs wird Platz für die Verschraubung benötigt. Unterhalb des Abdeckblechs wird ein 100 mm breiter, oberhalb des Glases ein 80 mm breiter Bereich dafür reserviert. Somit kommt man auf eine Gesamtlänge von 2300 mm für jedes Sandwichelement der Demonstratoren.

Zum Verkleben von Glaselementen, bzw. bei Structural-Glazing-Montagen, wird grundsätzlich Silikonkleber verwendet (Abbildung 4-10). Dieser Klebstoff muss entweder durch die Europäische Leitlinie ETAG 002 zugelassen sein oder über eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) verfügen. Für spezielle Fälle ist es möglich, eine Zulassung im Einzelfall (ZiE) zu erhalten.

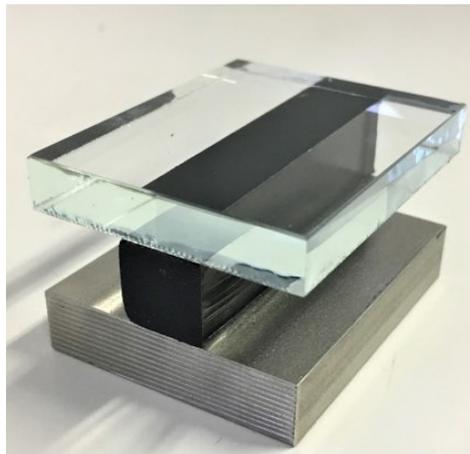


Abbildung 4-10: Beispiel einer Silikonverklebung von Glas und Stahl

Die Klebfugenabmessungen müssen nach ETAG 002, Teil 1 berechnet werden [82]. Eingangswerte sind die mechanischen Eigenschaften des Klebstoffs sowie die Einwirkungen durch das Gewicht der geklebten Glasscheibe und den Wind. Entsprechend werden die Mindestabmessungen der Klebfugen für die Demonstratoren zu 6 mm Dicke und 7,3 mm Breite berechnet. Die Fugenabmessungen wurden auf der sicheren Seite auf 8 mm Dicke und 10 mm Breite festgelegt. Eine verlorene Schalung gleicher Breite wird eingesetzt, um eine möglichst gerade Klebfugenkante zu erzielen und die Glasscheibe bei der Montage auf dem gewünschten Abstand zu halten (Abbildung 4-11).

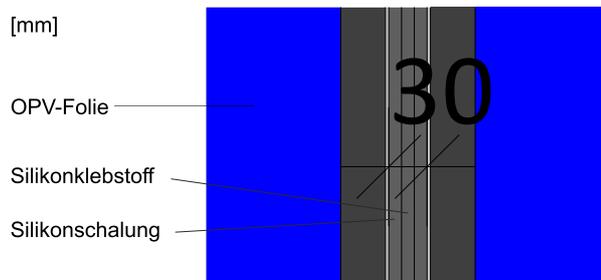


Abbildung 4-11: Darstellung der Klebfugenabmessungen inklusive der Schalung

Der finale Entwurf der Demonstratoren A und B sieht eine Verkleidung an den Außenkanten mit gekanteten Blechen vor. Eine Unterkonstruktion aus Stahl ermöglicht die nachträgliche Montage der Demonstratoren an der Fassade des Forschungsgebäudes (Abbildung 4-12).

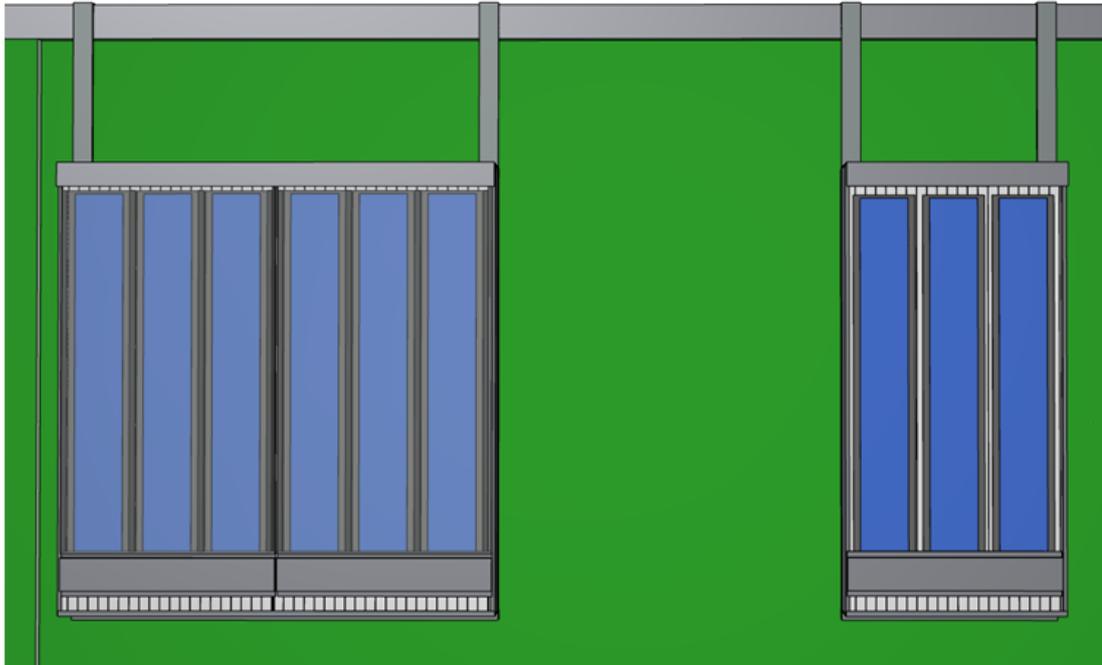


Abbildung 4-12: Demonstrator A (links) und Demonstrator B (rechts)

Die Applikation der Photovoltaikfolie auf den Sandwichelementen wird gemäß der Installationsanleitung des Herstellers durchgeführt [83]. Da das verwendete Sandwichelement eine Linierung der Deckschicht aufweist, kann die Folie entweder nur auf den Erhöhungen geklebt werden oder vollflächig. Um den Einfluss beider Möglichkeiten auf den Ertrag zu bestimmen, wird auf den Sandwichelementen die erste Folie vollflächig aufgeklebt und die zwei folgenden Folien nur auf den Erhöhungen (Abbildung 4-13). Durchgeführte mehrtägige Witterungsversuche haben zu keinen Änderungen der Verklebung geführt, für belastbare Aussagen wären hier Langzeitversuche erforderlich.



Abbildung 4-13: Angebrachte OPV-Folie, links: Detail der vollflächigen Verklebung, Mitte: Unterschiede in der Verklebung, rechts: Ansicht bei Tageslicht

Nach Anordnung der Temperatursensoren (Positionen, siehe Kapitel 4.4.2) werden die bearbeiteten Sandwichelemente auf die erstellten Unterkonstruktionen geschraubt. Zur Verklebung der Glasscheiben werden der Silikonklebstoff zwischen der angebrachten verlorenen Schalung aufgetragen und die Glasscheiben mit Hilfe von Abstandshaltern aufgelegt (Abbildung 4-14).



Abbildung 4-14: Montage der Glasscheiben, links: Einbringen des Silikonklebers, rechts: aufgeklebte Glasscheiben am Demonstrator A

Im Anschluss werden die Kantbleche angebracht, die Anschlusskabel der Photovoltaikfolie sowie der angebrachten Temperatursensoren auf die Rückseite geführt und mittels Hutprofilen abgedeckt (Abbildung 4-15).

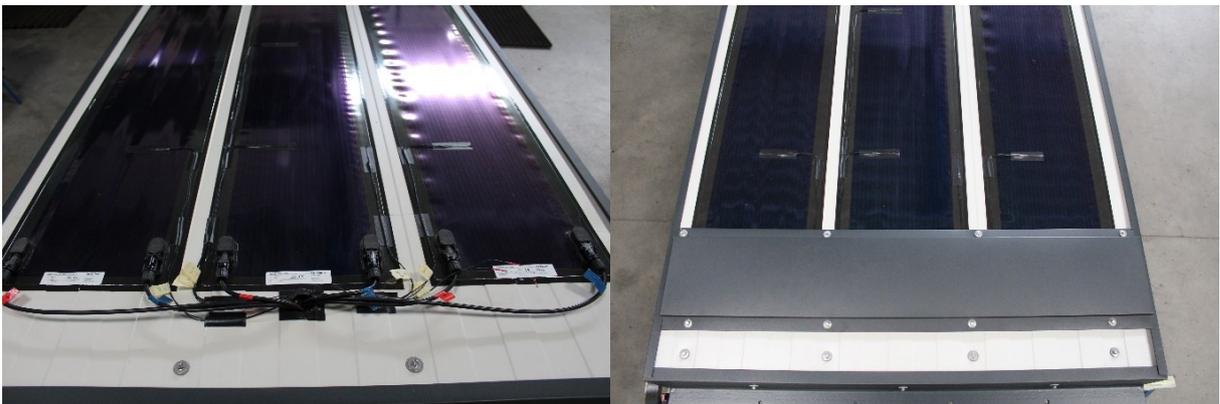


Abbildung 4-15: Montage des Hutprofils am Demonstrator B, links: Kabelanschlüsse vor der Montage, rechts: Ansicht nach der Montage

4.4 Monitoring der Fassadendemonstratoren am Forschungsgebäude

4.4.1 Forschungsgebäude und Versuchsaufbau

Das Forschungsgebäude für die Metalleichtbauweise des Lehr- und Forschungsgebiets Nachhaltigkeit im Metalleichtbau an der RWTH Aachen wurde für die Montage der Demonstratoren ausgewählt (Abbildung 4-16).



Abbildung 4-16: Forschungsgebäude, links: Ansicht, rechts: Standort

Da die West- sowie Südfassade des Gebäudes für ein laufendes Forschungsprojekt belegt waren, wurden die Demonstratoren auf der Ostseite (grüne Fassade) installiert.

Für das Monitoring wurden drei Fassadendemonstratoren geplant und gebaut: ein Demonstrator, der die Variante mit Glas vor der aufgeklebten organischen Photovoltaikfolie zeigt (Demonstrator A), und ein Demonstrator, der die organische Photovoltaikfolie in herkömmlicher aufgeklebter Bauweise präsentiert (Demonstrator B). Des Weiteren wurde, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, ein solarthermischer Demonstrator anhand einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade erstellt (Demonstrator C). Eine Hälfte dieses Solarkollektors ist ebenfalls mit organischer Photovoltaikfolie beklebt.

Die Aufteilung der Flächen ist in Abbildung 4-17 dargestellt. Die beiden Demonstratoren A und B werden auf der Fassadenfläche, die das Obergeschoss des Forschungsgebäudes verkleidet, platziert. Damit ist gewährleistet, dass die beiden Demonstratoren auf der gleichen Höhe montiert werden und zum Vergleich der Messdaten dieselben Bedingungen für beide Demonstratoren herrschen. Auf Höhe des Erdgeschosses ist der Demonstrator C angeordnet.

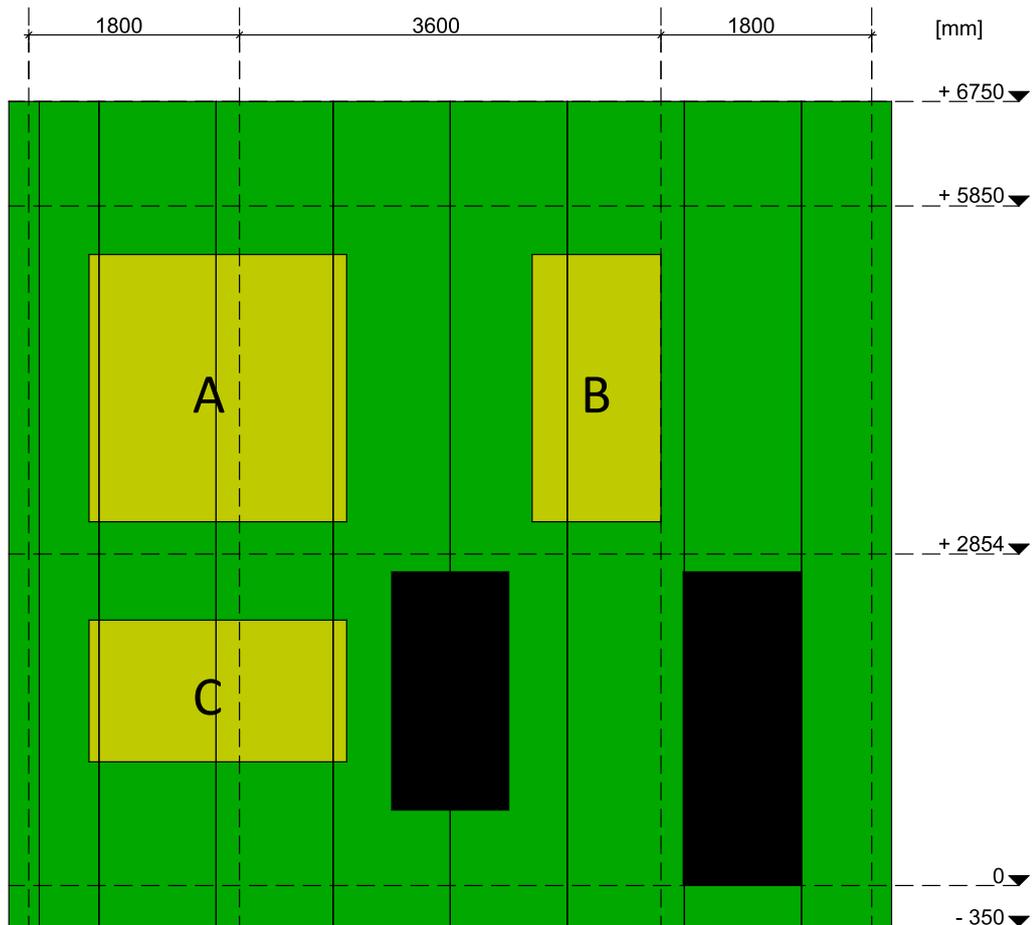


Abbildung 4-17: Anordnung der Demonstratoren auf der Ostfassade des Forschungsgebäudes

Mit Hilfe eines Autokrans werden die erstellten Demonstratoren A und B am Forschungsgebäude angebracht und an die Messeinrichtung angeschlossen. Zusätzlich wird Demonstrator C mittels einer Unterkonstruktion an der Fassade angebracht und ebenfalls mit der Messeinrichtung und dem Wärmepumpenkreislauf verbunden. Abbildung 4-18 zeigt die Realisierung der Demonstratoren am Forschungsgebäude. Die Aufteilung der Module auf die Demonstratoren kann Tabelle 4-1 entnommen werden.

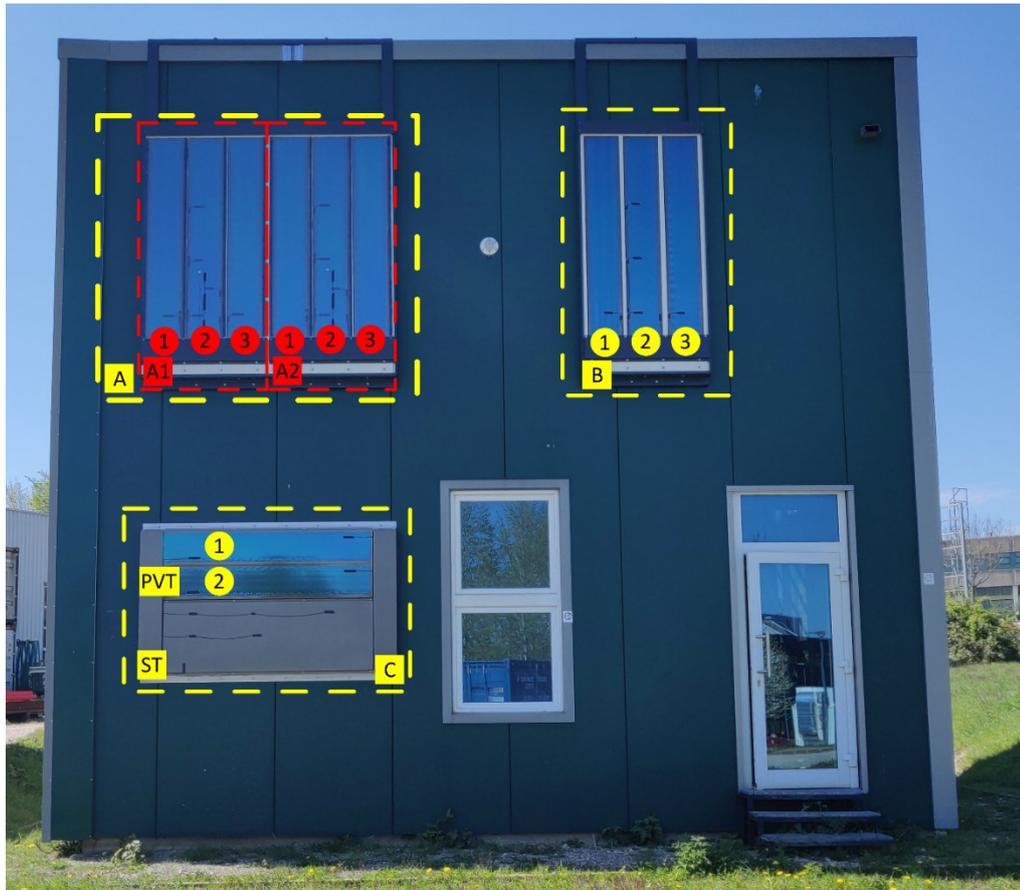


Abbildung 4-18: Realisierte Demonstratoren an der Ostfassade des Forschungsgebäudes

Tabelle 4-1: Aufteilung der Module auf die Demonstratoren

Demonstrator	Bereich	Modul	Merkmal
A	A1	A1.1 A1.2 A1.3	OPV mit Glas (Zinn innenseitig)
	A2	A2.1 A2.2 A2.3	OPV mit Glas (Zinn außenseitig)
B	B	B1 B2 B3	OPV
C	C	PVT1 PVT2	PVT (OPV+ST)
		ST	Solarthermie

Zur Vermessung der Fassadenpaneele mit organischer Photovoltaik (OPV) wurden verteilt auf die drei Demonstratoren insgesamt elf Photovoltaikmodule an der Ostfassade des Forschungsgebäudes angebracht.

Sechs der Module wurden im Demonstrator A hinter Glas auf den Sandwichelementen angebracht. Der Demonstrator A ist in die Bereiche A1 (Module A1.1, A1.2, A1.3) und A2 (Module A2.1, A2.2, A2.3) aufgeteilt. Das verwendete Glas ist ab Werk mit einer einseitigen Zinnbelastung versehen, die sich im Bereich A1 auf der fassadenseitigen Glasoberfläche und in Bereich A2 auf der von der Fassadenseite abgewandten Glasoberfläche befindet.

Bei Demonstrator B wurden drei Photovoltaikmodule (B1, B2, B3) ohne zusätzliche Glasschicht auf die Sandwichelemente aufgebracht.

Die verbleibenden beiden Module sind am Demonstrator C montiert worden (PVT1, PVT2). Diese Module sind auf einem Kollektorpaneel mit mäandernden Wasserrohren verklebt, so dass eine kombinierte thermische und elektrische Nutzung als PVT-Modul ermöglicht wird. Ein weiteres baugleiches Kollektorpaneel wird ohne aufgeklebte OPV als solarthermischer Referenzkollektor (ST) betrieben. Die solarthermischen Module werden mit dem Wasser-Glykol-Gemisch aus den angeschlossenen Geothermiesonden (Kapitel 5) durchströmt, welches eine Temperatur nahe der Erdreichtemperatur aufweist.

Ziel der Demonstrationsaufbauten ist die Leistungsbestimmung der OPV-Module und des Solarkollektors sowie die Bestimmung des Einflusses der Betriebstemperatur der jeweiligen Photovoltaikmodule auf den elektrischen Ertrag. Darüber hinaus soll eine Quantifizierung des Einflusses der Verglasung und ihrer Ausrichtung auf diese Kenngrößen der OPV-Module erfolgen.

Der Ertrag der OPV wird für jedes Modul separat aus der gemessenen Spannungsdifferenz und dem Stromfluss ermittelt. Zur Erfassung und zum Speichern der Daten werden Controller aus der Gebäude- und Industrieautomatisierung des Herstellers WAGO verwendet [84 bis 87] für die eine große Bandbreite an I/O-Modulen zur Verfügung steht. Die erzeugte elektrische Leistung wird dabei über ohmsche Leistungswiderstände in Wärme umgesetzt.

Neben der Leistung werden auch verschiedene Temperaturen und die Einstrahlung erfasst. Die Anordnung der Temperatursensoren ist in Abbildung 4-19 dargestellt. Durch die gewählte Positionierung wurden die Temperaturen der einzelnen OPV Solarflächen, der Luft hinter dem Glas, des Klebstoffs, sowie der Oberfläche des Sandwichelementes und des Solarkollektors erfasst. Zur Erfassung der Oberflächentemperatur der Solarflächen sind jeweils auf dem mittleren Modul einer Gruppe

aus drei OPV-Modulen der Demonstratoren A und B (A1.2, A2.2, B2) mehrere Temperatursensoren angebracht. Folglich werden Abschnitte des entsprechenden Moduls durch die Sensoren und die Zuleitung verschattet.

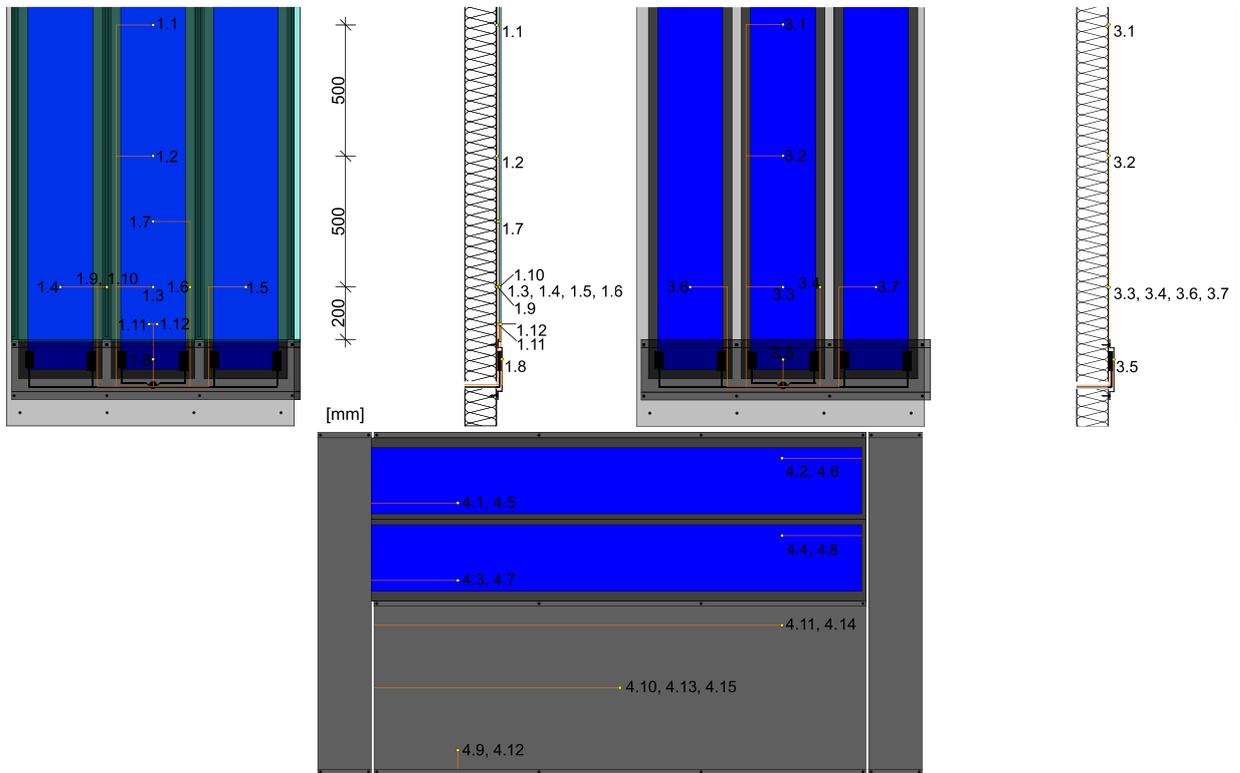


Abbildung 4-19: Platzierung der Temperatursensoren, oben links: Demonstrator A1, oben rechts: Demonstrator B, unten: Demonstrator C

Die Temperaturen werden mit 100k Ω -NTC-Widerständen [88] und die Solarstrahlung mit einem Sternpyranometer [89] an der Fassade erfasst. Die Registrierung der Messsignale erfolgt mittels WAGO Modulen [90, 91].

Beide Solarthermiemodule werden mit einem Wasser-Glykol-Gemisch und einem Massenstrom von ca. 270 kg/h betrieben. In beiden Modulen entspricht die Vorlauf-temperatur der Rücklauf-temperatur der Wärmepumpe. Zur Messung der Temperatur werden Pt500 Sensoren verwendet [92]. Der Massenstrom wird von einem Mehrstrahl-Durchflusssensor erfasst [93]. Die Temperatur wird mit einer Genauigkeit von $\pm 0,05$ K und der Massenstrom mit einer Genauigkeit von ± 2 % vom Rechenwerk des Wärmezählers erfasst [94].

4.4.2 Bestimmung der Leistung der organischen Photovoltaikmodule

Im Folgenden werden Messergebnisse aus der Untersuchung der organischen Photovoltaik (OPV) beschrieben. Dazu wird zuerst auf die Temperatur der Module unter Einstrahlung und im Anschluss auf den elektrischen Ertrag eingegangen. Die elektrische Leistung wird wie oben erläutert ermittelt und der Wirkungsgrad mit einem analytischen Modell abgeschätzt. Weiterhin wird ein Vergleich mit konventionellen PV-Modulen auf Basis numerischer Untersuchungen durchgeführt.

4.4.2.1 Auswertung der Temperaturdaten

In Abbildung 4-20 sind die durchschnittlichen Temperaturen für die organische PV auf der Solarthermie (PVT), dem verglasten Sandwichpaneel (OPV mit Glas), dem unverglasten Sandwichpaneel (OPV ohne Glas) sowie die Umgebungstemperatur für exemplarische Tage im Juli 2021 dargestellt.

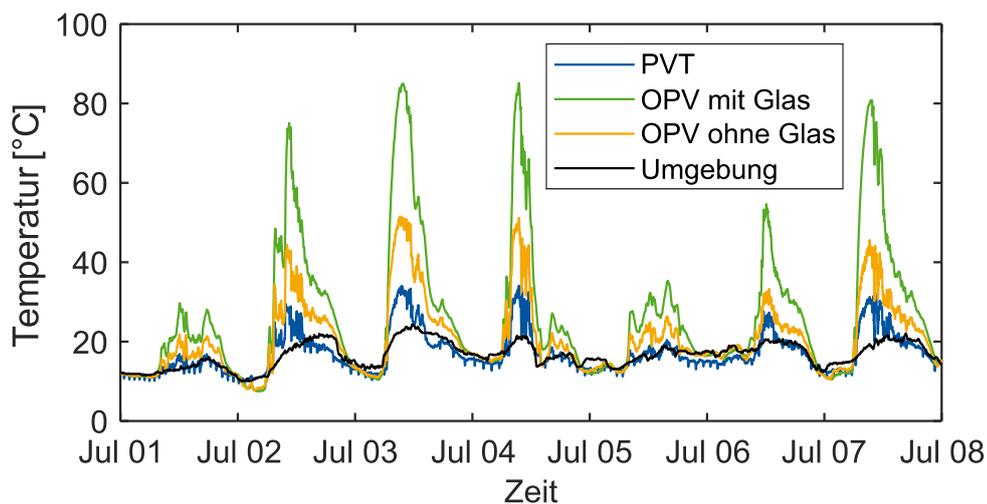


Abbildung 4-20: Repräsentativ ausgewählte Temperaturverläufe der organischen Photovoltaik sowie der Umgebung

Die Ausrichtung der Zinnbelastung des Glases hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Temperatur der Module. Die Ergebnisse aus Demonstrator A1 und A2 sind daher kombiniert ausgewertet worden. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die OPV hinter dem Glas Temperaturen über 80 °C erreicht. Dies liegt nah an der maximal angegebenen Betriebstemperatur von 85 °C. Beim Klebstoff wurden vergleichbare Temperaturen gemessen, so dass dort die maximal zulässige Temperatur von 150 °C deutlich unterschritten wird. Die OPV-Module auf dem Sandwichpaneel ohne Glasabdeckung erreichen eine maximale Temperatur von ca. 50 °C. Die PVT-Module, weisen mit bis zu ca. 30 °C die geringsten Temperaturen auf, da diese dauerhaft mit dem Fluid aus der Geothermieanlage (ca. 10 °C) gekühlt werden.

4.4.2.2 Auswertung der elektrischen Leistungsdaten

In Abbildung 4-21 ist der Ertrag der verschiedenen OPV-Module für die Monate April bis September 2021 dargestellt. Dieser steigt über die Monate April bis Juni kontinuierlich an. In den folgenden Monaten ist eine verringerte Einstrahlung für den rückläufigen Ertrag verantwortlich. Es ist ersichtlich, dass der Ertrag bei den PV-Modulen ohne Glas (B1 und B3) am größten ist, gefolgt von den PVT-Modulen, die einen 7 % geringeren Ertrag aufweisen. Die Abweichung ist auf die größere Abdeckung des Moduls durch die Lisenenbleche zurückzuführen. Der Ertrag der verglasten Module ist im Durchschnitt 12 % geringer für die Module A1.1 und A1.3 sowie 16 % geringer für die Module A2.1 und A2.3 im Vergleich zu den unverglasten Modulen B1 und B3. Es zeigt sich, dass die außenseitige Orientierung der zinnbelasteten Seite zu einer zusätzlichen Abminderung des Ertrags um ca. 4 % führt. Im Allgemeinen lässt sich festhalten, dass der Leistungsverlust durch die Anteile der Einstrahlung, die bereits am Glas reflektiert oder absorbiert werden, nicht durch eine Effizienzsteigerung infolge des Betriebs bei höherer Temperatur ausgeglichen werden. Ein Einfluss der Profilierung auf den Ertrag kann nicht aufgezeigt werden. Die vollflächig verklebten Module (A1.1, A2.1, B1) weisen keine signifikanten Unterschiede auf, im Vergleich zu den nur auf den Erhöhungen verklebten Modulen (A1.3, A2.3, B3). Der Ertrag der mittleren Module (A1.2, A2.2, B.2) fällt unabhängig von der Glasabdeckung geringer aus. Ursache ist die Verschattung durch die dort aufgebrauchten Temperatursensoren.

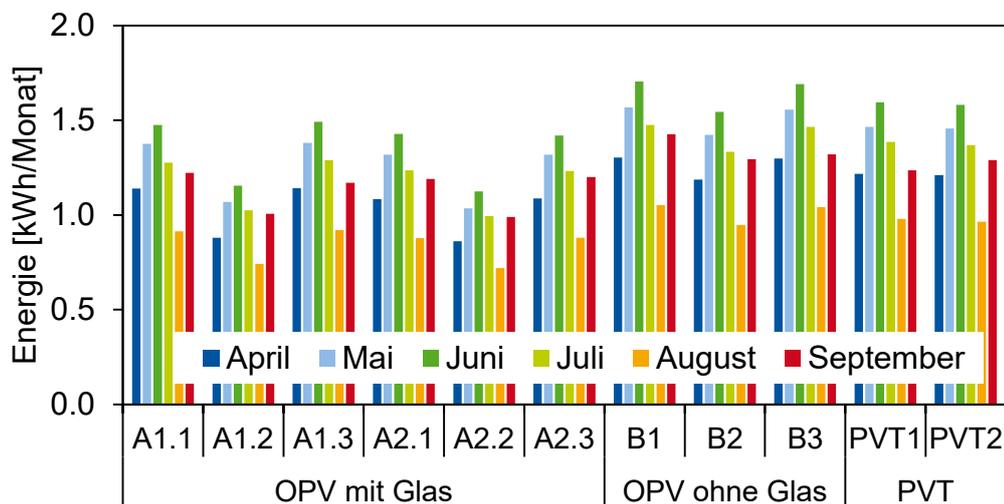


Abbildung 4-21: Ertrag der OPV für verschiedene Monate für jedes Modul

Der Wirkungsgrad in der Photovoltaik ist temperaturabhängig. Diese Temperaturabhängigkeit des Wirkungsgrads der OPV-Module kann durch einen Temperaturkoeffizienten nach Gleichung (2.13) beschrieben werden. Über eine Regression anhand der Fehlerquadrate zur gemessenen Leistung wird der Wirkungsgrad η_0 er-

mittelt, um die Effizienz der Module mit dem Nennwirkungsgrad des Herstellers vergleichen zu können. Dafür wird der vom Hersteller angegebene Leistungszuwachs von 0,22 % / K berücksichtigt.

Das Ergebnis für η_0 ist für die verschiedenen Monate und Module in Abbildung 4-22 dargestellt. Außerdem ist der Nennwirkungsgrad des Herstellers abgebildet, der unter STC-Bedingungen ermittelt wird. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die Module ohne Verglasung die besseren Wirkungsgrade haben, was bereits bei der Auswertung des Energieertrages deutlich wurde. Die unverglaste Module haben einen durchschnittlichen Nennwirkungsgrad von ca. 3,3 % und die verglasten Module von ca. 2,7 %, wenn die mittleren Module nicht betrachtet werden. Beides ist deutlich geringer als der vom Hersteller angegebene Nennwirkungsgrad unter Standardtestbedingungen von 3,8 %. Dies kann an einem ungünstigen Verhalten bei Teilverschattung liegen, wonach der Minderertrag überproportional zur verschatteten Fläche ist. Im Vergleich zu klassischen siliziumbasierten Modulen mit einem Nennwirkungsgrad von bis zu 20 % [55] ist der Ertrag der OPV-Module als gering zu bezeichnen.

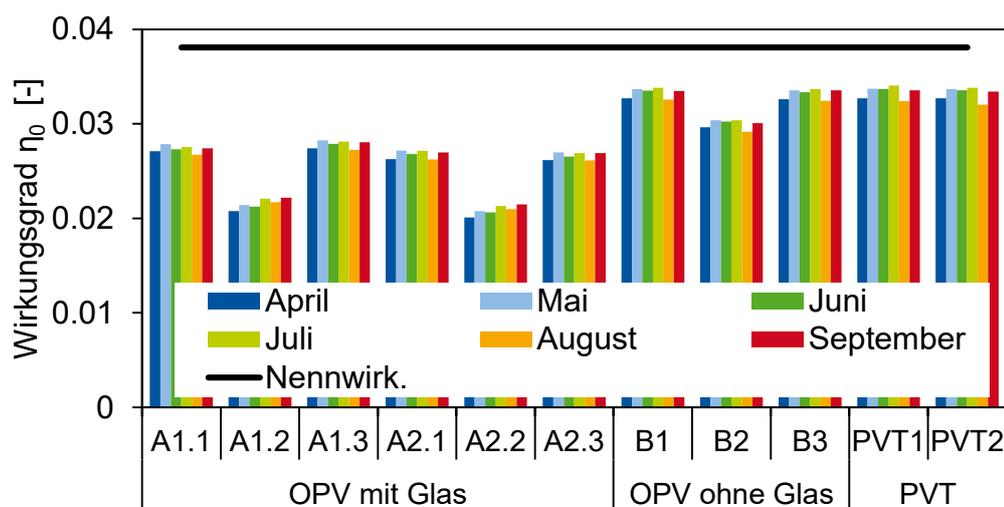


Abbildung 4-22: Ermittelter Wirkungsgrad für die OPV-Module und verschiedene Monate sowie Nennwirkungsgrad des Herstellers

Ein weiterer Indikator ist die Performance Ratio (PR), welche den Zusammenhang zwischen realem und idealem Energieertrag angibt. Die PR für die verschiedenen Module und Monate ist in Abbildung 4-23 angegeben. Hier zeichnet sich ein ähnliches Bild ab. Die unverglaste Module haben eine höhere PR als die verglasten Module. Diese haben im Durchschnitt eine PR von ca. 0,81 und die verglasten Module von ca. 0,70, wenn die mittleren Module nicht betrachtet werden. Die mittleren Module (A1.2, A2.2, B2) haben eine deutlich geringere PR aufgrund der zusätzlichen Verschattung der Module durch die Temperatursensoren. Die verminderte PR geht über einen einfachen linearen Effekt der verschatteten Fläche hinaus.

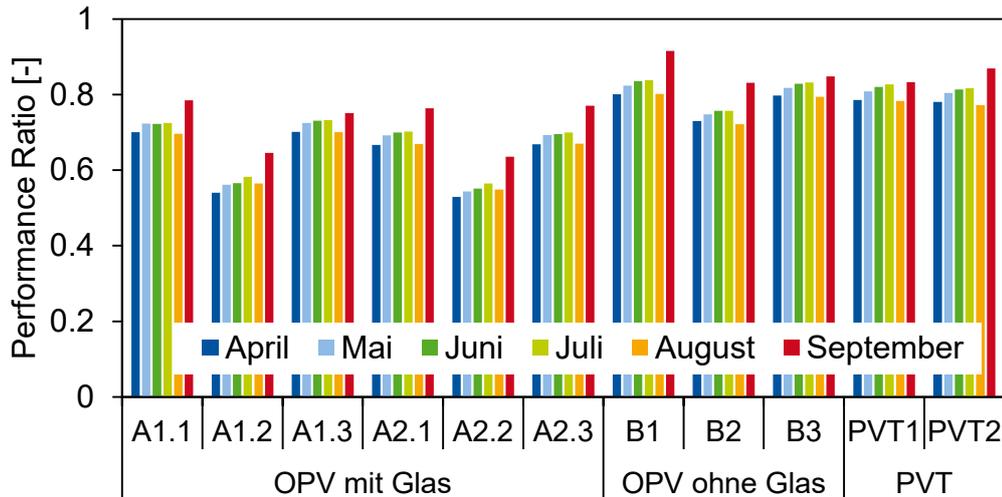


Abbildung 4-23: Performance Ratio der verschiedenen Module für verschiedenen Monate

Mit den ermittelten Parametern lässt sich der Ertrag für den Zeitraum, in welchen gemessen wurde, berechnen und vergleichen. Dazu werden der Wirkungsgrad mit der Einstrahlung multipliziert, sowie die Temperaturabhängigkeit berücksichtigt. Abbildung 4-24 zeigt die gemessene Leistung für Modul A1.1 sowie die berechnete Leistung für zwei exemplarische Tage. Daraus wird ersichtlich, dass der Ertrag über die bestimmten Parameter gut abgeschätzt werden kann.

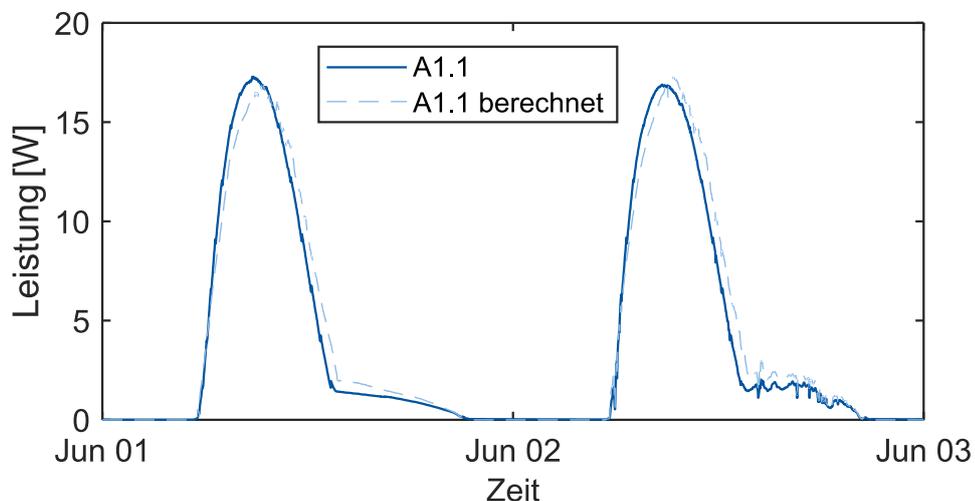


Abbildung 4-24: Vergleich der gemessenen mit der berechneten Leistung für zwei ausgewählte Tage am Modul A1.1

Zur Einordnung der Leistungsfähigkeit der OPV als fassadenintegrierte Anwendung sowie des Potentials konventionelle horizontale PV-Modulen aus Silizium auf dem Dach zu ersetzen, wurden numerische Simulationen durchgeführt. Die Berechnungen wurden mit TRNSYS und Type 103 erstellt, welcher die elektrische Leistung von PV-Modulen modelliert. Die entsprechenden Parameter zur Simulation sind in Anhang A.1 und Anhang A.2 zu finden.

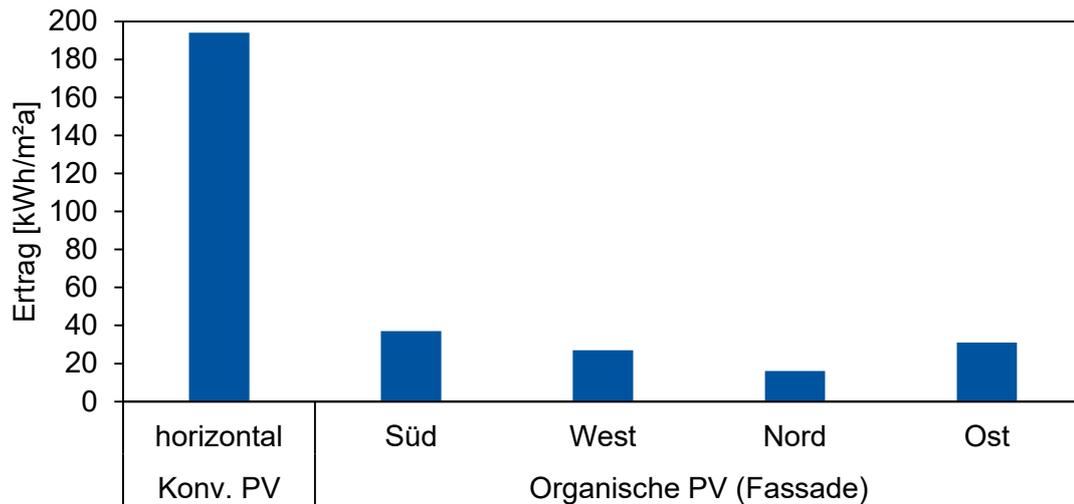


Abbildung 4-25: Berechneter Ertrag der verschiedenen PV-Module und Ausrichtungen

In Abbildung 4-25 ist der Ertrag für die verschiedenen PV-Module und Ausrichtungen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Erträge der konventionellen, siliziumbasierten PV-Module auf dem Dach mit $194 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ einen ca. fünffach höheren Ertrag im Vergleich zur besten OPV-Modul-Ausrichtung in der Fassade haben. Die OPV-Module liefern einen Ertrag zwischen 16 und $37 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Pro m^2 lassen sich somit lediglich 8 bis 19 % der Leistung einer konventionellen PV-Anlage auf dem Dach erzielen.

4.4.3 Bestimmung der Leistung der solarthermisch aktivierten Fassade

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus dem Vergleich der solarthermisch aktivierten Fassade (ST) als Referenzkollektor mit dem kombinierten Fassadensystem aus Solarthermie und Photovoltaik (PVT) beschrieben. Dazu wird zuerst auf die Temperaturentwicklung unter Einstrahlung und im Anschluss auf den thermischen Ertrag eingegangen. Mittels einer analytischen Abbildung des Ertrags werden darüber hinaus Leistungskennwerte bestimmt.

4.4.3.1 Auswertung der Temperaturdaten

In Abbildung 4-26 sind die Temperaturen für den Einlass und die Auslässe sowie die Umgebungstemperatur für einen exemplarischen Zeitraum im Juni 2021 dargestellt. Die Einstrahlungsdaten der Kollektoren für diesen Zeitraum können Abbildung 4-27 entnommen werden. Kurzfristige Temperatureinsparungen nach unten sind auf den taktenden Betrieb der Wärmepumpe als Wärmeverbraucher und der einhergehenden Auskühlung des Wasser-Glykol-Gemisches zurückzuführen. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die Solarthermiemodule ohne OPV (ST) unter Einstrahlung wärmer werden als die Module mit zusätzlich aufgebrachtener OPV (PVT). Dies

gilt insbesondere, wenn die Einstrahlung hoch ist. Mit abnehmender Strahlung nimmt die Temperaturdifferenz der beiden Varianten ebenfalls ab. Durch die Parallelschaltung erhalten die Module eine gemeinsame Vorlauftemperatur, weshalb eine unterschiedliche Effizienz nicht zu einem kontinuierlich anwachsenden Temperaturunterschied führt.

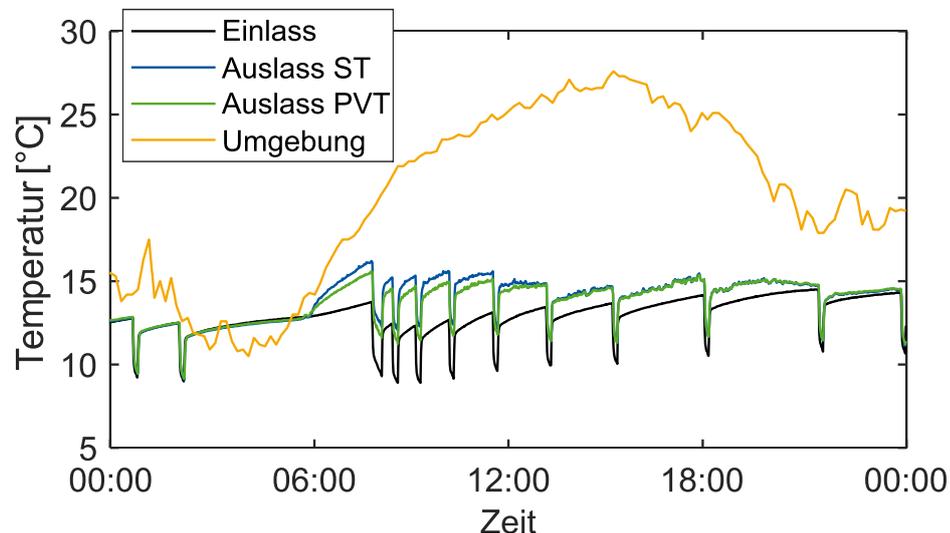


Abbildung 4-26: Temperaturverläufe eines exemplarischen Zeitraums für die beiden solarthermisch aktivierten Fassadenmodule sowie der Umgebungstemperatur

4.4.3.2 Auswertung der thermischen Leistungsdaten

In Abbildung 4-27 ist die solare Einstrahlung sowie die Leistung der beiden Solarthermiemodule für den exemplarischen Zeitraum dargestellt. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass das Solarthermiemodul ohne OPV unter hoher Einstrahlung einen deutlichen thermischen Mehrertrag gegenüber dem Modul mit OPV liefert. Bei geringer Einstrahlung führen beide Varianten zu ähnlichen Erträgen. Es zeigt sich sogar, dass die Module mit OPV bei geringer Einstrahlung einen leicht höheren Ertrag aufweisen. Da die Außentemperatur am dargestellten Tag zeitweise deutlich über der Vor- und Rücklauftemperatur liegt, kommt es auch zu Leistungsbeiträgen durch konvektiven Wärmeübergang aus der Luft. Die höheren Erträge des PVT-Moduls bei niedriger Einstrahlung deuten auf einen höheren thermischen Verlustkoeffizienten, der im Falle einer negativen Temperaturdifferenz zu höheren Wärmegewinnen aus der Umgebungsluft führt. Die Leistungsspitzen sind auf die Ein- und Ausschaltzeitpunkte der Wärmepumpe zurückzuführen.

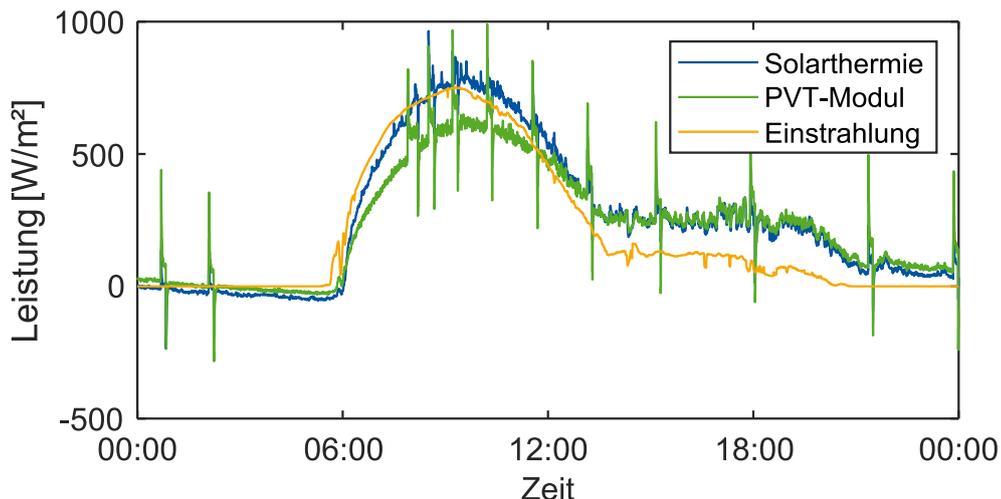


Abbildung 4-27: Leistungsverläufe der beiden Solarthermiemodule sowie der Einstrahlung

In Abbildung 4-28 ist der Ertrag für die beiden Module nach Monat sowie die summierte gemessene Einstrahlung dargestellt. Der Ertrag Q wird unterteilt in einen Ertrag bei vorhandener solarer Einstrahlung ($I>0$) und einen Ertrag bei fehlender solarer Einstrahlung ($I=0$).

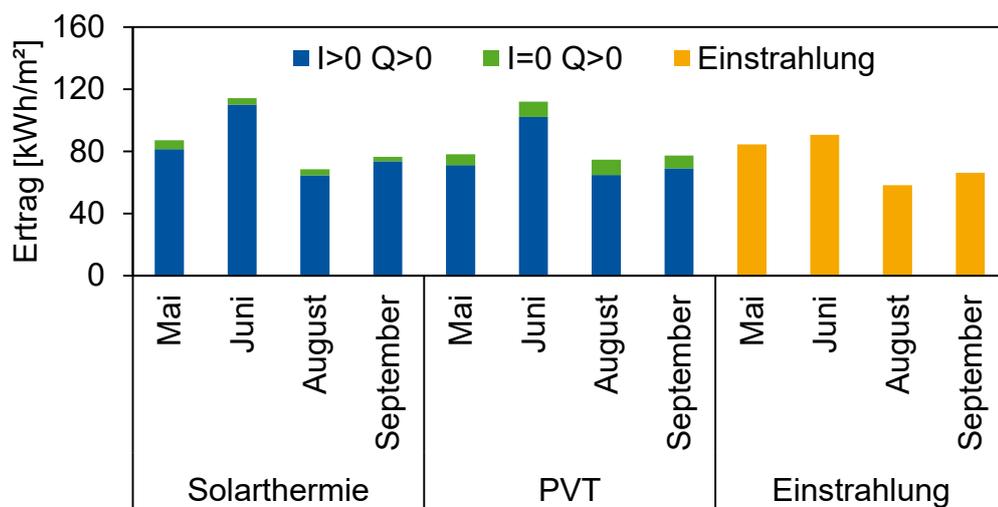


Abbildung 4-28: Ertrag der beiden Module sowie die gemessene Einstrahlung für verschiedene Monate

Aus der Abbildung wird deutlich, dass zwar der überwiegende Teil des Ertrags aus der solaren Einstrahlung resultiert, dass aber auch der Anteil anderweitig aufgenommener Wärme nicht vernachlässigt werden darf. Durch den Betrieb in Kombination mit der Wärmepumpe liegt die Vorlauftemperatur überwiegend unter der Außentemperatur, sodass zusätzliche Wärmegewinne aus der Luft erfolgen. Dies kann daran erkannt werden, dass der Ertrag unter Einstrahlung teilweise größer ist als die gemessene Einstrahlung an sich.

Im Nachfolgenden wird der Ertrag der Solarthermie mit einem analytischen Modell abgebildet. Notwendige Kennwerte des Wirkungsgrads sowie des Verlustkoeffizienten für die Anwendung in einem Simulationsmodell werden bestimmt und mit Literaturwerten verglichen.

Für die analytische Abbildung des thermischen Ertrags der Solarthermie wird ein Ansatz in Anlehnung an DIN EN ISO 9806 verwendet. Die in Gleichung (2.12) enthaltenen Koeffizienten a_1 bis a_6 werden durch ein Parameterfitting bestimmt. Dazu wird der quadratische Fehler der berechneten Leistung zur gemessenen Leistung minimiert. In Abbildung 4-29 sind die gemessenen Leistungen sowie die berechneten Leistungen aus der analytischen Abbildung für den Beispielzeitraum dargestellt. Es wird ersichtlich, dass der gewählte Ansatz den Ertrag der Module gut abbildet.

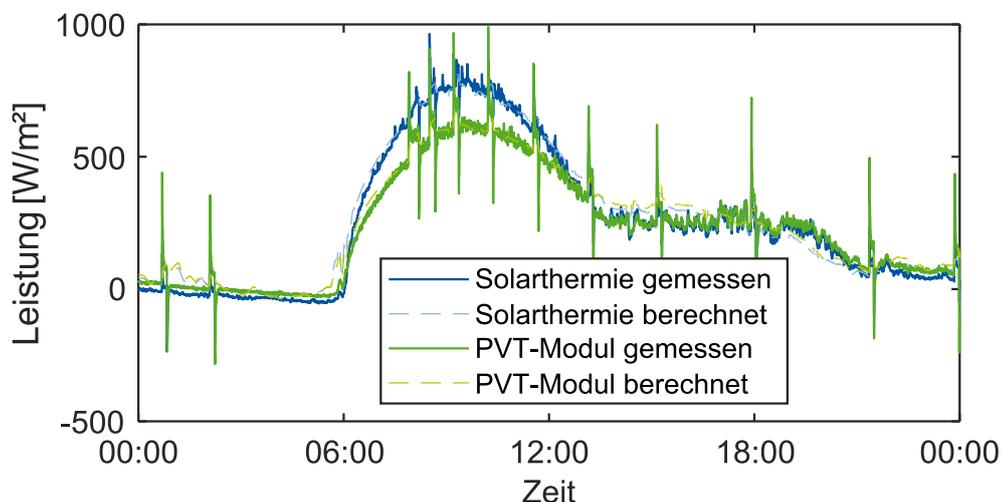


Abbildung 4-29: Gemessene sowie berechnete Leistungsverläufe der beiden Solarthermiemodule

Anhand des analytischen Modells können der optische Wirkungsgrad und der lineare Verlustkoeffizient bestimmt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-2 dargestellt. Diese Werte wurden bei einem Kurzzeitversuchsaufbau am Solar-Institut Jülich der FH Aachen ebenfalls bestimmt. Die hier dargestellten Kennwerte entsprechen in guter Näherung den am Solar-Institut Jülich gemessenen Ergebnissen.

Tabelle 4-2: Ermittelte Kennwerte der Solarkollektoren

	Optischer Wirkungsgrad [-]	Linearer Verlustkoeffizient [W/(m ² ·K)]
Solarthermiemodul	0,81	14,6
PVT-Modul	0,62	17,4

Das rein solarthermische Modul ist in der Lage, 81 % der eingehenden solaren Einstrahlung aufzunehmen. Das Solarthermie-Modul mit der OPV (PVT) verringert die optische Effizienz auf 62 %. Der lineare thermische Verlustkoeffizient ist bei dem PVT-Modul mit 17,4 W/(m²·K) um ca. 20 % größer als der Verlustkoeffizient des

solarthermischen Referenzkollektors. Eine mögliche Ursache hierfür könnte in der dunkleren Farbe und einem höherem Emissionskoeffizienten bei der thermischen Abstrahlung liegen. Darüber hinaus ist es möglich, dass der stoffliche Anschluss der OPV an die dahinterliegende Wärmetauscherplatte die wärmeabgebende Fläche vergrößert und es zu erhöhten konvektiven Wärmeverlusten kommt. Bei üblichen Kunststoffabsorbern liegt der optische Wirkungsgrad bei ca. 90 % und der thermische Verlustkoeffizient bei ca. $12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ [55]. Die Erträge der Solarthermiemodule können aufgrund der linearen Wärmeverlustkoeffizienten auch über der optischen Effizienz liegen. Dieser Fall kann vorliegen, wenn sich diese in ihrer Funktion umkehren, weil die Fluidtemperatur unterhalb der Umgebungstemperatur liegt.

4.5 Zusammenfassung

Fassadenflächen im Gewerbebau bieten sich für solarthermische Kollektoren und Photovoltaikanlagen an, um über ihre großen Flächen Solarenergie zu nutzen. Da hier in der Regel nicht die Fläche das bestimmende Limit darstellt, müssen keine Hochleistungsmodule eingesetzt werden. Mit Hilfe eines offenen Absorbers, der sich unsichtbar in eine VHF integrieren lässt, können Fassadenmaterialien thermisch aktiviert werden. Exemplarisch wurden Fassadenpaneele aus Stahlblech hergestellt und im Rahmen eines Monitorings messtechnisch untersucht. Eines dieser Fassadenpaneele wurde zusätzlich mit organischer PV beklebt, um die gegenseitige Beeinflussung dieser beiden Technologien zu bewerten. Darüber hinaus wurden verglaste und unverglaste OPV-Module auf Stahlsandwichenelemente appliziert und messtechnisch ausgewertet.

Es hat sich gezeigt, dass das Solarthermiemodul ohne OPV unter Einstrahlung wärmer wird und im Vergleich zu dem Modul mit zusätzlich aufgebrachtener OPV einen deutlichen thermischen Mehrertrag liefert. Die Ergebnisse der Untersuchungen der solarthermisch aktivierten Fassaden zeigen, dass diese als reines Solarthermiemodul mit einem optischen Wirkungsgrad von ca. 0,8 die solare Strahlung schlechter aufnehmen als übliche Kunststoffabsorber. Die PVT-Module liefern aufgrund der aufgeklebten OPV-Module durch die verringerte Wärmeleitfähigkeit eine deutlich geringere Leistung mit einem optischen Wirkungsgrad von ca. 0,6. Die Module sind jedoch trotzdem vielversprechend. Der thermische Verlustkoeffizient ist bei beiden Modulen hoch. Dieser konnte beim reinen Solarthermiemodul zu ca. $15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und beim PVT-Modul zu ca. $17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ bestimmt werden. Dies führt auf der einen Seite dazu, dass kaum hohe Temperaturen erreicht werden können. Auf der anderen Seite bedeutet dies, dass Wärme auf einem Temperaturniveau unter der Umgebungstemperatur effektiv eingesammelt werden kann. Außerdem bietet dies die

Möglichkeit der Rückkühlung in der Nacht, um die Wärme des Tages auf einem hohem Temperaturniveau aus dem Gebäude zu führen.

Der Einsatz von OPV-Modulen an der Fassade muss in den Brandschutzkonzepten der Gebäude berücksichtigt werden. Eine Verglasung könnte zu brandschutztechnischen Vorteilen führen. Es ist allerdings fraglich, ob der zusätzliche Aufwand hinsichtlich Kosten, Statik und Montage bei damit einhergehender Minderung des Ertrages zu einer sinnvollen Lösung führt.

Die abmindernde Wirkung des Glases auf den Ertrag kann, je nach Orientierung der zinnbelasteten Seite, mit 12 bis 16 % angegeben werden. Die verglasten Module haben einen durchschnittlichen Wirkungsgrad von ca. 2,7 % und die unverglasten Module von ca. 3,3 %. Mit den Leistungen von siliziumbasierten Systemen auf dem Dach können OPV-Systeme daher nicht konkurrieren. Je nach Orientierung der Fassaden lassen sich pro m² lediglich 8 bis 19 % der Leistung einer konventionellen horizontalen PV-Anlage auf dem Dach erzielen.

Dennoch weisen die OPV-Module Vorteile auf. Das geringere Gewicht sowie die Applikation mittels Klebtechnik ermöglichen eine leichtere Integration in die Gebäudehülle und damit die zusätzliche Aktivierung großflächiger Bereiche. Im Gegensatz zu den konventionellen Systemen führen sich erwärmende Module zu keinen negativen Auswirkungen auf den Ertrag. Eine Verglasung kann allerdings zu einer Annäherung an die maximal angegebenen Betriebstemperaturen führen. Der Wärmetransport über das Rohrregister bei dem PVT-Modul führte zu keinem signifikanten Einfluss auf die Leistung. Laut Herstellerangaben produzieren OPV-Module den Einsatz an Energie für ihre Herstellung innerhalb von Monaten anstatt von Jahren. Dies kann sie darüber hinaus ökologisch sinnvoller machen.

5 Geothermische Nutzung von Gründungspfählen

5.1 Einleitung

Ein wesentlicher Bestandteil der Planung eines Bauvorhabens ist das Gründungskonzept. Unterschieden werden zum einen Flachgründungen, welche die Verwendung von Einzelfundamenten einschließen oder Plattengründungen zur Sicherung des Bauwerks im Baugrund. Zum anderen werden bei nicht tragfähigen Böden (bspw. Tonen, Schluffen, Auffüllungen) Tiefgründungen verwendet, damit die einwirkenden Lasten in tieferliegende, tragfähige Schichten (z. B. Sand, Kies, Fels) abgetragen werden können (Abbildung 5-1). Im Vergleich zu Flachgründungen bieten sich Tiefgründungen als wirtschaftliche Alternative an, wenn dadurch große Fundamentmassen, Setzungen oder Wasserhaltungen vermieden werden können [95]. Zu den Tiefgründungen gehört die Pfahlgründung, welche im Rahmen dieser Arbeit untersucht wird.

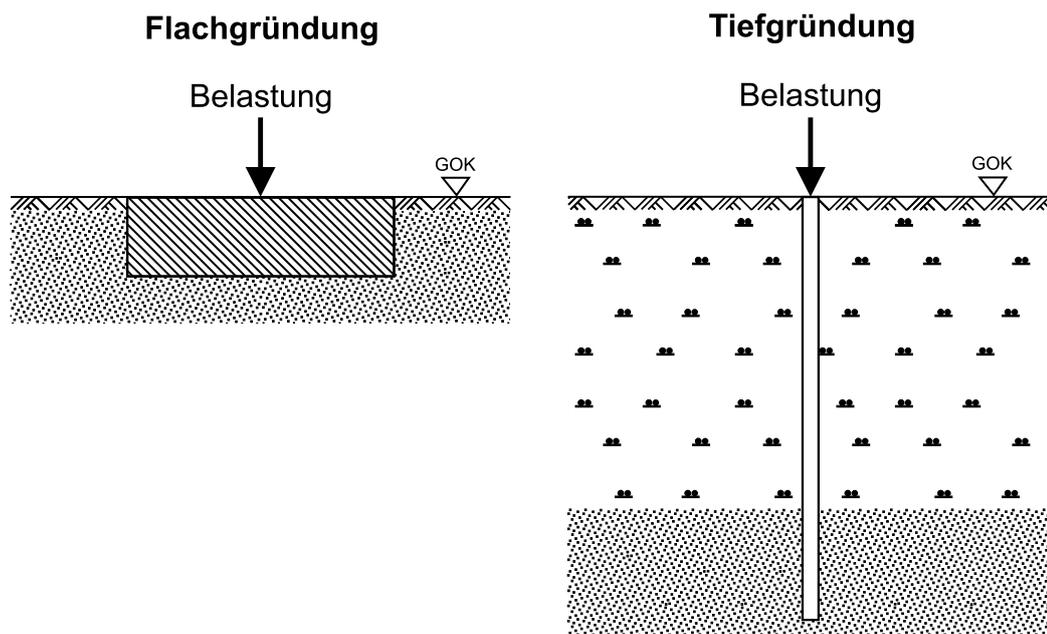


Abbildung 5-1: Gründungsarten: Flachgründung (links), Tiefgründung (rechts)

Für Pfahlgründungen werden unter anderem abhängig von der vorliegenden Verdichtungsfähigkeit des Baugrundes, dem Verdrängungsvolumen des Pfahles, der aufzunehmenden Belastung sowie unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit und den örtlichen Verhältnissen verschiedene Pfahlarten ausgewählt.

Nach den europäischen Pfahlherstellungsnormen werden Verdrängungspfähle (DIN EN 12699), Bohrspfähle (DIN EN 1536) und Mikropfähle (DIN EN 14199) unter-

schieden. Während bei Bohrpfählen Boden gefördert wird, bleibt dies bei der Anwendung von Verdrängungspfählen aus [96, 97]. In der Praxis kommen jedoch auch Pfahlssysteme zum Einsatz, mit denen der Untergrund teilweise verdrängt und gefördert wird. Eine eindeutige Zuordnung zur jeweiligen Norm ist daher häufig schwierig [98]. Pfähle mit einem kleinen Außendurchmesser von bis zu 300 mm bei Bohrpfählen bzw. 150 mm bei Verdrängungspfählen werden als Mikropfähle bezeichnet [99].

Neben Pfählen aus Beton, wie Ortbeton- oder Fertigteilepfählen, lassen sich Pfahlgründungen auch aus Stahl herstellen. Verschiedene Querschnittformen oder Wandstärken können dabei gewählt werden [39]. Diese werden in Segmenten auf die Baustelle geliefert und können unmittelbar in den Baugrund eingebaut werden. Vorteile der Stahlpfähle ergeben sich dadurch, dass bei einem Tiefgründungssystem aus Stahl keine zusätzliche Bewehrung durch Baustahl erforderlich ist und nur eine einfache Baustelleneinrichtung vorzusehen ist. Darüber hinaus tritt nur selten ein zusätzliches Verkehrsaufkommen auf der Baustelle auf, da es sich hierbei um ein Vollverdrängungssystem handelt und somit keine Aushubentsorgung erforderlich wird. Außerdem weist Stahl eine hohe Druck-/Zugfestigkeit und Elastizität auf, ist unempfindlich beim Transport und kann auch trotz relativ schmalen Querschnitt schräg eingebracht werden, um Horizontallasten aufnehmen zu können. Durch die hohe Materialfestigkeit bringt Stahl neben hoher Tragfähigkeit ebenfalls gute Rammeigenschaften mit und erzeugt beim Einbringen nur geringe Erschütterungen [100]. Darüber hinaus ermöglichen die mechanischen Eigenschaften des Stahls das rückstandslose Entfernen durch Herausziehen des Pfahls, wodurch das Material wieder dem Stoffkreislauf zugeführt werden kann.

5.2 Stahlenergiepfähle

Die Nutzung von Betonpfahlgründungen zur Erdwärmegewinnung für Heiz- und Kühlzwecke hat sich als innovative Energietechnik in den vergangenen Jahren in Deutschland etabliert. Dieses Prinzip ist auch in Verbindung mit Stahlpfählen möglich, wobei sich folgende Vorteile ergeben:

- Die Wärmeleitfähigkeit von Stahl ist deutlich größer als die Wärmeleitfähigkeit von Beton und verringert damit den thermischen Widerstand des Energiepfahls.
- Spezielle Pfähle oder größere technische Veränderungen sind nicht notwendig. Bestehende Pfahlssysteme können verwendet werden.

- Der Einbau der Rohre, die als Wärmetauscher innerhalb des Pfahls fungieren, ist einfacher als bei klassischen Betonpfählen und erfolgt nach dem Setzen der zunächst hohlen Pfähle. Die Art der Rohrführung hat dabei einen entscheidenden Einfluss auf den erzielbaren energetischen Ertrag [101].
- Für das abschließende Verfüllen können neben Beton auch andere Materialien mit höherer Wärmeleitfähigkeit verwendet werden [102].

Im Vergleich zu Erdsonden ergibt sich die Möglichkeit des Einsatzes in Bereichen, in denen die Nutzung von Erdsonden nicht möglich ist. Darüber hinaus ist eine größere Unabhängigkeit von der Grundstücksgröße gegeben, da durch die Gründungsfunktion zusätzlich die Gebäudefläche herangezogen werden kann.

Der Ausbau von Stahlrohren zu Energiepfählen ist bisher vereinzelt im asiatischen Raum erfolgt [33]. Die Kombination von Gründungspfählen aus Stahl und der geothermischen Nutzung des Untergrundes ist vielversprechend. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Vorteile anhand analytischer und numerischer Untersuchungen sowie verschiedener Demonstratoren dargestellt.

5.3 Planung und Erstellung der Demonstratoren

5.3.1 Planung und Entwurf

Drei Demonstratoren wurden im Rahmen dieser Arbeit geplant und gebaut – ein Stahlenergiepfahl mit einer Doppel-U Sonde und einer Länge von 9 m, ein Stahlenergiepfahl mit einer Koaxialsonde und einer Länge von 9 m sowie eine weitere Ausführung mit Koaxialsonde und einer Länge von 18 m.

Das Forschungsgebäude für die Metallleichtbauweise des Lehr- und Forschungsgebiets Metallleichtbau an der RWTH Aachen wurde für die Erstellung und den Anschluss der Demonstratoren ausgewählt (siehe Kapitel 4.4.1).

Abbildung 5-2 zeigt die Platzierung der drei geplanten Demonstratoren sowie der bereits bestehenden konventionellen Doppel-U-Erdsonden außerhalb des Forschungsgebäudes. Innerhalb des Gebäudes ist das Schaltschema abgebildet, welches die Anbindung an die Wärmepumpe und den Heizkreis darstellt. Alle Sonden können parallel betrieben werden. Für Einzelmessungen können die Demonstratoren sowie die Bestandssonden separat außer Betrieb genommen werden. Zur Messung der Temperatur werden Pt500 Sensoren direkt am Einlass und Auslass der Sonden verwendet [92]. Der Volumenstrom der verschiedenen Geothermiesonden wird jeweils von einem Mehrstrahl-Durchflusssensor [103] und der gesamte Volumenstrom über einen magnetisch induktiven Durchflussmesser erfasst [104]. Der

Massenstrom wird mit einer Genauigkeit von $\pm 6\%$ für die einzelnen Volumenströme und $\pm 0,4\%$ für den gesamten Volumenstrom, sowie die Vorlauf- und Rücklauf-temperatur mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1\text{ K}$ erfasst.

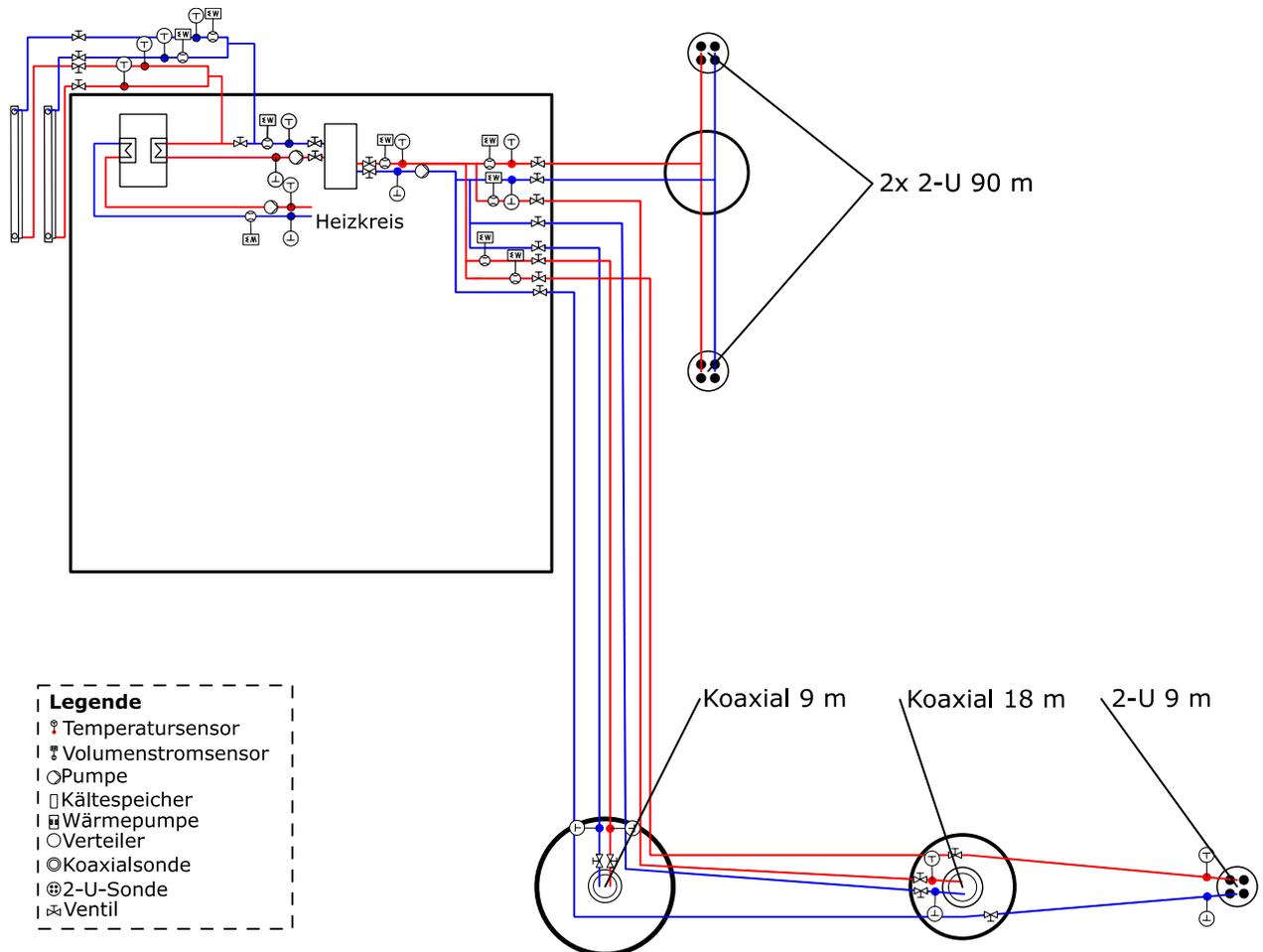


Abbildung 5-2: Anbindung der Demonstratoren an das hydraulische Schema des Forschungsgebäudes

Abbildung 5-3 zeigt den geplanten Querschnitt der beiden Sondenvarianten. Der Außendurchmesser der verwendeten Rohrstücke für die Demonstratoren wurde zu 170 mm gewählt. Bei einer Wandstärke von 10 mm verbleibt ein Innendurchmesser von 150 mm für die Sonden. Die Doppel U-Sonden haben, wie in der Praxis üblich [105], einen Durchmesser von jeweils 32 mm bei einer Wanddicke von 2,8 mm und werden als Sondenbündel mit einer Breite von ca. 110 mm in den Rohren platziert. Die Koaxialsonde hat einen Durchmesser von 42 mm bei einer Wanddicke von 3,7 mm und wird mittig in den Rohren angeordnet.

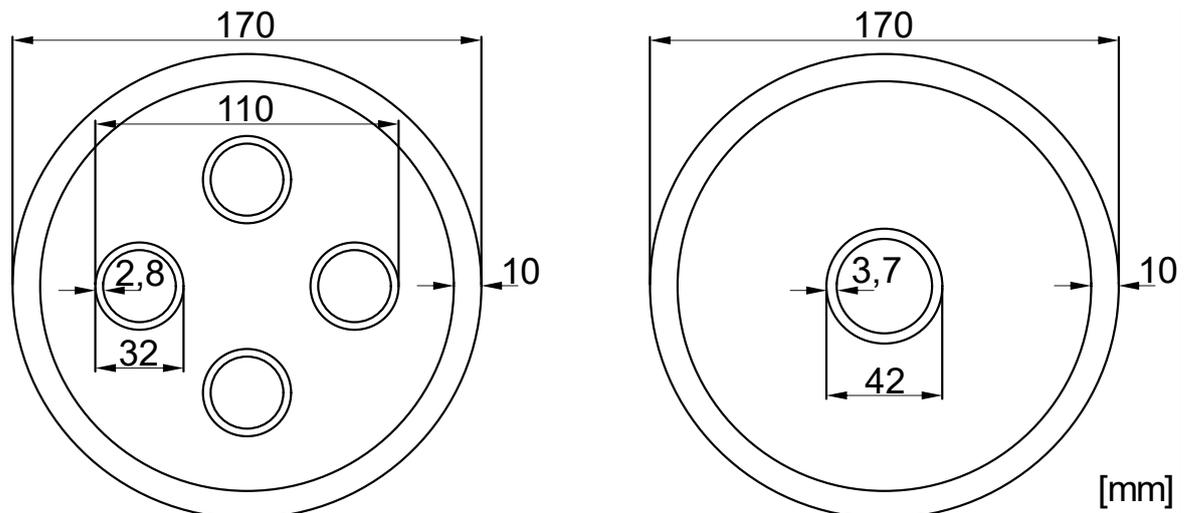


Abbildung 5-3: Querschnitt der geplanten Stahlenergiepfähle, links: Doppel-U-Sonde, rechts: Koaxialsonde

Die angestrebten Längen der Stahlenergiepfähle können aus 3 m langen Teilstücken zusammengesetzt werden. Beide Ausführungen weisen eine Bodenplatte auf, um den Rohrrinnenraum nutzen zu können. Die Koaxialausführung benötigt zudem einen Sondenkopf mit Anschlüssen für den Vor- und Rücklauf. Abbildung 5-4 zeigt die geplanten Stahlenergiepfähle mit beiden Sondentypen in der 9 m langen Ausführung.



Abbildung 5-4: Demonstratoren der Stahlenergiepfähle, oben: Doppel-U-Sonde, unten: Koaxialsonde

5.3.2 Realisierung der Demonstratoren

Für die Erstellung der Stahlenergiepfähle wurden spezielle Rohrelemente für Rammpfähle des Herstellers SSAB verwendet [106]. Diese bestehen aus einzelnen Rohrstücken sowie zugehörigen Muffen und Abschlussplatten für den Boden, die die einzelnen Bestandteile zu einem Gesamtpfahl verbinden (Abbildung 5-5).



Abbildung 5-5: Stahlpfahlkomponenten, links: Skizze der Bestandteile von Rammpfählen [107], Mitte: Stahlrohre, rechts: Verbindungsmuffen und Abschlussplatten

Dieses Vorgehen ist bei üblichen Pfählen erforderlich, um Pfähle beliebiger Länge herstellen zu können und tiefer liegende tragende Bodenschichten zu erreichen. Dafür sind Verbindungsarbeiten an den Rohrstücken erforderlich, die entweder mittels Muffen erfolgen oder alternativ durch Schweißen, wodurch auch eine Wasserdichtigkeit der Pfähle realisiert werden kann.

Durch den Rammvorgang werden die Muffen und die Rohre bereits kraftschlüssig miteinander verbunden. Um eine Wasserdichtigkeit zu garantieren, wurden die für die Demonstratoren verwendeten Innenmuffen an den Kontaktflächen zu den Rohrstücken zusätzlich verschweißt. Als unterer Pfahlabschluss wurde ein Felsschuh angeschweißt. Zur besseren Verdrängung der Erde beim Rammvorgang wurde zusätzlich ein konischer Aufsatz angebracht. Mittels Lichtbogenhandschweißverfahren wurde die Schweißarbeiten an den ersten Segmenten außerhalb der Baustelle durchgeführt, um das Schweißen vor Ort zu minimieren (Abbildung 5-6).



Abbildung 5-6: Schweißarbeiten, links: Innenmuffe an Rohrelement, Mitte: Felsschuh als unterer Pfahlabschluss, rechts: konischer Aufsatz

Da die örtlichen Bodenverhältnisse sich für einen klassischen Rammvorgang nur bedingt eignen, wurde zunächst eine Vorbohrung mittels Bohrschnecken durchgeführt. Um die Stahlpfähle später in den Boden rammen zu können, wurde für die Bohrschnecken, im Vergleich zu dem Pfahldurchmesser, ein etwas geringerer

Durchmesser gewählt. Für die Zugänglichkeit der Koaxialsonden und die Anschlüsse an die horizontalen Verteilleitungen wurde ein zusätzlicher Bodenaushub als Vorbereitung für einen Schachteinbau durchgeführt (Abbildung 5-7).



Abbildung 5-7: Bohr und Baggerarbeiten, links: Vorbohrung mittels Bohrschnecke, rechts: Vorbereitungen für den späteren Schachteinbau

Nach dem Ziehen der Bohrschnecken wurden die vorgefertigten Elemente der Pfähle positioniert und mittels eines Hydraulikhammers vorgerammt. Das wasserdichte Verschweißen der anschließenden Elemente erfolgte innerhalb der Baugrube. Die zu einem Pfahl verbundenen Bestandteile wurden anschließend bis zur vorgesehenen Tiefe in den Boden gerammt (Abbildung 5-8).



Abbildung 5-8: Ramm- und Schweißarbeiten vor Ort, links: Positionierung der Pfahlelemente, Mitte: Verbindung durch Schweißen, rechts: abschließendes Rammern

Zum Vergleich der verschiedenen Sondensysteme wird in einen der 9 m lange Pfähle ein Sondenfuß mit angeschlossenen Doppel-U-Sonden als Bündel eingesetzt und der Zwischenraum zwischen Sonden und Rohr mit einem Spezialbaustoff für umweltgerechte Verfüllungen verpresst. In die anderen Pfähle wird nur eine Sonde eingesetzt und mittels Abstandshaltern mittig angeordnet, um dadurch eine Koaxialsonde zu erzeugen (Abbildung 5-9).



Abbildung 5-9: Einführen der Sonden in die eingerammten Pfähle, links: Doppel-U-Sonde, rechts: Koaxialsonde

Ein selbst entwickelter Sondenkopf wird an die Koaxialsonde angeschlossen und wasserdicht mit dem Pfahl verschweißt. Dieser ermöglicht den Anschluss an die Anbindeleitungen zum Forschungsgebäude. Durch den Einsatz eines Schachtes oberhalb des Pfahls sind die Sondenköpfe für spätere Inspektions- und Entlüftungsarbeiten zugänglich (Abbildung 5-10).



Abbildung 5-10: Koaxialsondenkopf, links: Detail vor der Montage, Mitte: Anschluss an die Sonde, rechts: Anschluss an die Anbindeleitungen im Schacht

5.4 Analytische und numerische Bewertung des Potentials von Stahlenergiepfählen im Vergleich zu Erdsonden

5.4.1 Analytische Bewertung

Der Wärmewiderstand ist ein Maß für die Temperaturdifferenz, die in einem Objekt beim Durchleiten eines Wärmestromes entsteht. Je höher der Wärmewiderstand ist, desto weniger Wärme strömt bei gegebener Temperaturdifferenz durch das Objekt. Für eine geothermisch aktivierte Bohrung wird dieser Wärmewiderstand ermittelt

aus der Bohrlochtiefe l und der Temperaturdifferenz zwischen Fluid T_m und Erdreich T_{Erde} bezogen auf die Wärmeentzugsleistung \dot{Q} .

$$R_{Gesamt} = R_b^* + R_{Erde} = \frac{l \cdot (T_{Erde} - T_m)}{\dot{Q}} \quad (5.1)$$

Der gesamte Widerstand R_{Gesamt} setzt sich aus dem Widerstand des Bohrlochs R_b^* und dem des Erdreichs R_{Erde} zusammen. Der Widerstand des Bohrlochs, welcher Geometrie und Materialeigenschaften von Rohrmaterial, Füllmaterial und sonstigen Einbauten bis zum Rand des eigentlichen Bohrlochs sowie den Wärmeübergang vom Fluid zur Rohrwandung beinhaltet, kann analytisch nach Hellström bestimmt werden [56]. Dies kann für Doppel-U-Sonden sowie für Koaxialsonden erfolgen. Der Widerstand des Erdreichs ist abhängig von den Eigenschaften des Erdreichs und kann sich im Laufe der Betriebszeit verändern. In der VDI 4640 sind beispielhaft Entzugsleistungen pro Meter Tiefe für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten des Erdreichs sowie Volllaststunden für ein Doppel-U-System angegeben [30]. Mit der angegebenen Temperaturdifferenz kann der gesamte Widerstand für das Doppel-U-System berechnet werden. Mittels analytischer Berechnung des Bohrlochwiderstands der Sonde für Doppel-U- (2U) und Koaxialsonden (KS) kann der Ertrag pro Meter für einen koaxialen Stahlenergiepfahl mit gleicher Temperaturdifferenz und gleichem Widerstand des Erdreichs abgeschätzt werden.

$$\dot{Q}_{KS} = \frac{(T_{Erde} - T_m)}{R_{b,KS}^* + \left(\frac{(T_{Erde} - T_m)}{\dot{Q}_{2U}} - R_{b,2U}^* \right)} \quad (5.2)$$

In Abbildung 5-11 ist der analytisch bestimmte Bohrlochwiderstand, kategorisiert nach Strömung und Sondentyp, für den Querschnitt der Demonstratoren sowie für eine klassische Erdsonde mit gleichem Durchmesser dargestellt. Der abgebildete Wert ergibt sich als Mittelwert für Sonden mit einer Länge zwischen 5 und 100 m, wobei der Einfluss der Tiefe bei turbulenten Strömungsbedingungen vernachlässigbar ist. Der Bohrlochwiderstand liegt bei klassischen Doppel-U-Sonden (2U) sowie der Kombination mit einem Stahlmantelrohr (2U Stahl) bei ca. 0,2 (m·K)/W für laminare Strömungen und bei ca. 0,1 (m·K)/W für turbulente Strömungen. Für koaxiale Stahlenergiepfähle (KS) ist der Bohrlochwiderstand deutlich geringer. Er liegt bei 0,05 (m·K)/W für laminare Strömungen und bei 0,003 (m·K)/W für turbulente Strömungen. Durch den im Fall laminarer Strömung um ca. 74 % geringeren und im Fall turbulenter Strömung um ca. 97 % geringeren Widerstandswert im Vergleich zu Doppel-U-Sonden wird ersichtlich, welches Potential koaxiale Stahlenergiepfähle haben.

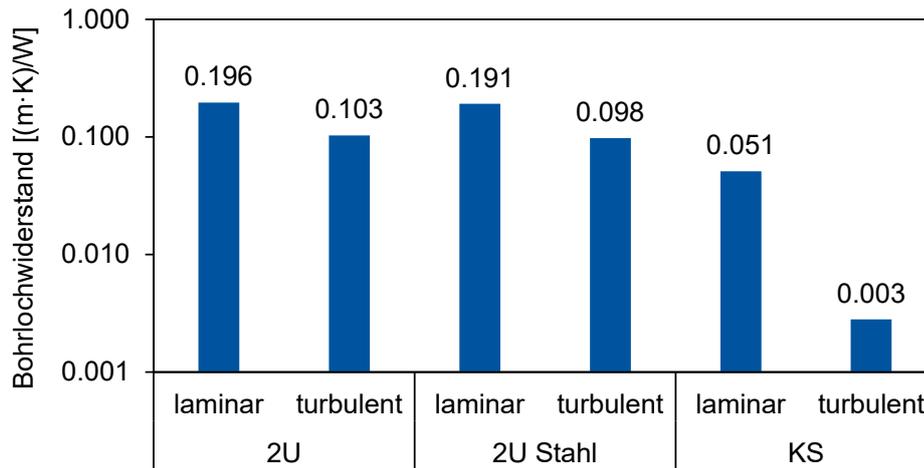


Abbildung 5-11: Bohrlochwiderstand je nach Strömung und Sondentyp (analytisch)

In Abbildung 5-12 sind die Ergebnisse der Berechnung der Entzugsleistung für einen reinen Heizbetrieb mit einer Austrittstemperatur der Wärmepumpe $> -5\text{ °C}$ dargestellt. Hier sind die Werte nach VDI 4640 für Doppel-U-Erdsonden gegen die analytisch berechneten Werte der coaxialen Stahlenergiepfähle für verschiedene Volllaststunden und Wärmeleitfähigkeiten des Erdreichs aufgetragen. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die coaxialen Stahlenergiepfähle einen deutlichen Mehrertrag liefern können. Bei schlecht wärmeleitendem Boden ($\lambda_E = 1\text{ W/(m·K)}$) ermöglichen diese einen Mehrertrag von 24 bis 44 % gegenüber den konventionellen Doppel-U-Erdsonden. Bei gut wärmeleitendem Boden ($\lambda_E = 4\text{ W/(m·K)}$) liegt der Mehrertrag sogar zwischen 81 und 125 %. Allgemein nimmt der relative Vorteil mit zunehmenden Volllaststunden ab. Der Wert für ein Erdreich mit einer Wärmeleitfähigkeit von 2 W/(m·K) liegt für 1200 Volllaststunden pro Jahr bei 52 W/m für Doppel-U-Erdsonden und bei 90 W/m für coaxiale Stahlenergiepfähle. Entsprechend kann ein großes Potential für die coaxialen Stahlenergiepfähle erwartet werden.

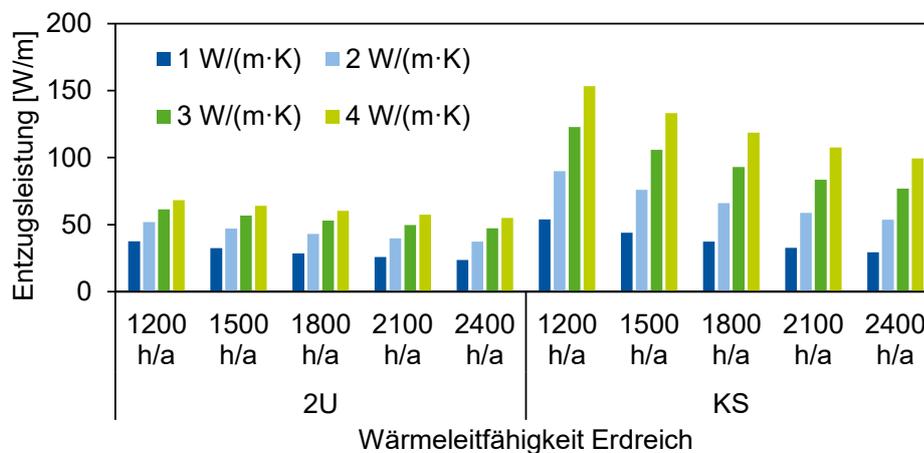


Abbildung 5-12: Entzugsleistung für eine Doppel-U-Sonde (2U) nach VDI 4640 und die analytische Berechnung der coaxialen Stahlenergiepfähle (KS) für verschiedene Volllaststunden und Wärmeleitfähigkeiten des Erdreichs

Zu beachten ist, dass die Werte nach VDI 4640 für Doppel-U-Erdsonden für eine definierte Anzahl an Vollaststunden angegeben sind und ein Auskühlen des Erdreichs für ihre spezifische Leistung mit einbeziehen. Folglich ist eine direkte Übertragung aufgrund der unterschiedlichen Entzugsleistungen nur begrenzt möglich.

5.4.2 Numerische Bewertung

Zur Einschätzung des Einflusses der Entzugsleistungen wurden für exemplarische Bedingungen CFD-Simulationen mit der Software Autodesk CFD 2019 durchgeführt [108]. Hierzu wurden eine konventionelle Doppel-U-Erdsonde, ein Doppel-U-Stahlenergiepfahl sowie ein koaxialer Stahlenergiepfahl jeweils mit einer Länge von 9 m innerhalb eines Erdreichs mit einem Durchmesser von 1 m modelliert, um eine ungestörte Einzelanlage abzubilden. Am äußeren Rand des Erdreichs und an der Unterseite wird eine Temperaturrandbedingung von 10 °C eingestellt. Am Sondenkopf wird vereinfachend angenommen, dass dort kein Wärmestrom stattfindet. Die Einlasstemperatur des Betriebsfluides für alle Fälle beträgt 0 °C. Für die konventionelle Doppel-U-Erdsonde wird ein Volumenstrom von 1,3 m³/h und für die Stahlkoaxialsonde von 2,9 m³/h eingestellt, um in beiden Fällen vergleichbar turbulente Strömungszustände zu erzielen. Das Erdreich wird mit einer Wärmeleitfähigkeit von 2,5 W/(m·K) und einer Wärmekapazität von 2500 kJ/(m³·K) abgebildet, was einem gut wärmeleitenden Boden entspricht (z. B. wassergesättigter Sand nach VDI 4640 [32]). Als Fluid wird ein Wasser-Glykol-Gemisch (29 Vol-% Glykol) verwendet [109]. Für die inneren Kunststoffrohre wurde eine Wärmeleitfähigkeit von 0,38 W/(m·K), für die Stahlmantelrohre 54 W/(m·K) und für das Verfüllmaterial der Erdsonde 1,5 W/(m·K) definiert.

Abbildung 5-13 zeigt die Berechnungsergebnisse der Temperaturdurchdringung mittels CFD-Simulation für die verwendeten exemplarischen Randbedingungen, sowohl für die konventionelle Doppel-U-Erdsonde (2U), den Doppel-U Stahlenergiepfahl (2U Stahl) als auch für den koaxialen Stahlenergiepfahl (KS) im stationären Zustand. Aus den Abbildungen ist zu erkennen, dass das Erdreich um die Doppel-U-Sonde mit Stahlmantelrohr kälter als bei der konventionellen Doppel-U-Sonde ist. Die hohe Wärmeleitfähigkeit des Stahls wirkt sich hier positiv aus. Das Erdreich um den koaxialen Stahlenergiepfahl ist deutlich kälter als um die Doppel-U-Sonden, was einem höheren Wärmeentzug aus dem Erdreich entspricht. Aus den Berechnungen ergeben sich Wärmeentzugsleistungen von 45 W/m für die konventionelle Doppel-U-Erdsonde, 50 W/m für den Stahlenergiepfahl mit Doppel-U-Sonde und 105 W/m für den koaxialen Stahlenergiepfahl. Damit besitzt der koaxiale Stahlenergiepfahl einen über 100 % höheren Ertrag im Vergleich zur konventionellen Doppel-

U-Erdsonde als auch zur Doppel-U-Sonde im Stahlenergiepfahl. Die Größenordnung des Potentials, welches sich bei der analytischen Betrachtung gezeigt hat, wird auch numerisch bestätigt. Der Unterschied zu den Entzugsleistungen nach VDI 4640 sowie dem analytischen Ansatz für die coaxialen Stahlenergiepfähle kann mit Abweichungen bei der Geometrie sowie den Materialparametern erklärt werden.

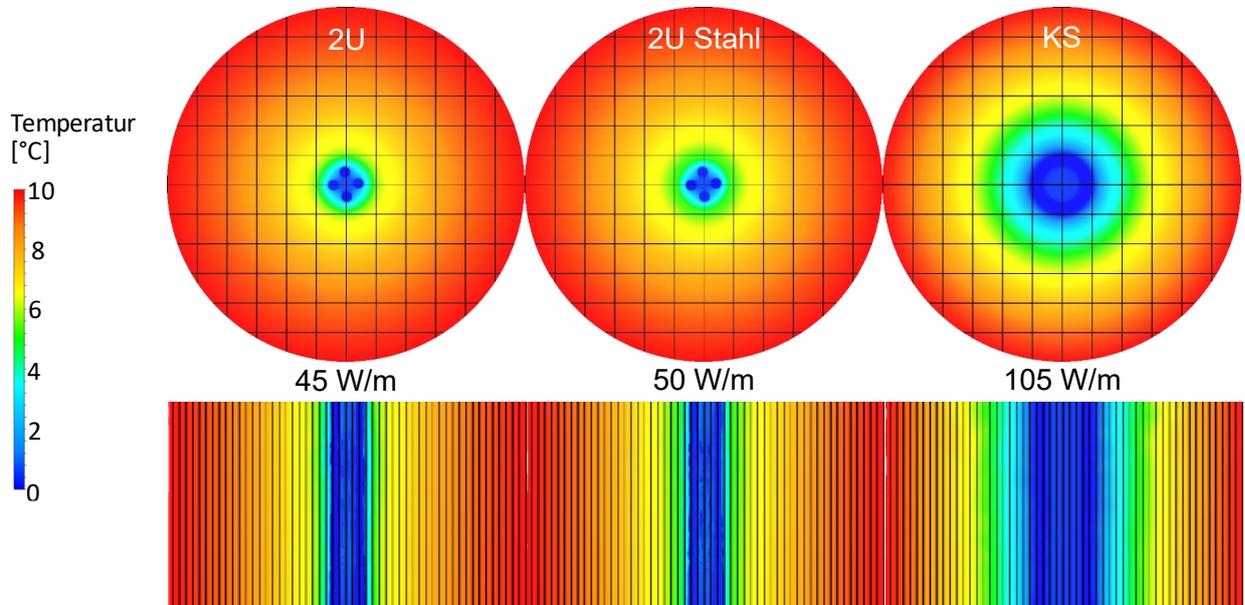


Abbildung 5-13: Berechnungsergebnisse der Temperaturdurchdringung mittels CFD für konventionelle Doppel-U-Erdsonde, Doppel-U Stahlenergiepfahl und coaxialen Stahlenergiepfahl, oben: Querschnitt, unten: Längsschnitt

5.5 Bestimmung der Leistung der Stahlenergiepfähle sowie der Bestandssonden

Im Folgenden werden Messergebnisse der Bestandssonden sowie der coaxialen Stahlenergiepfähle für exemplarische Zeiträume im Heizfall näher dargestellt. Dazu wird die Eintritts- und die Austrittstemperatur ausgewertet sowie die Entzugsleistung ermittelt. Anhand der Messwerte wird ein numerisches Modell validiert, welches beide Sondentypen abbilden kann. Weiterhin wird der Bohrlochwiderstand der Demonstratoren ermittelt.

5.5.1 Messtechnische Untersuchungen

Die Doppel-U-Bestandssonden haben eine Länge von 2 x 90 m. In Abbildung 5-14 sind die Temperaturen und Entzugsleistungen für die Doppel-U-Sonden für exemplarische 12 Stunden dargestellt. Ein Wärmeentzug findet zwischen der 7. und 10. Stunde statt. In diesem Zeitraum liegt die Eintrittstemperatur zwischen -2 und 2 °C.

Die Austrittstemperatur ist aufgrund der Länge der Sonden deutlich höher. Die Entzugsleistung liegt bei ca. 54 W/m. Dies entspricht auch den Literaturwerten für Doppel-U-Sonden dieser Längen und den entsprechenden Temperaturbedingungen.

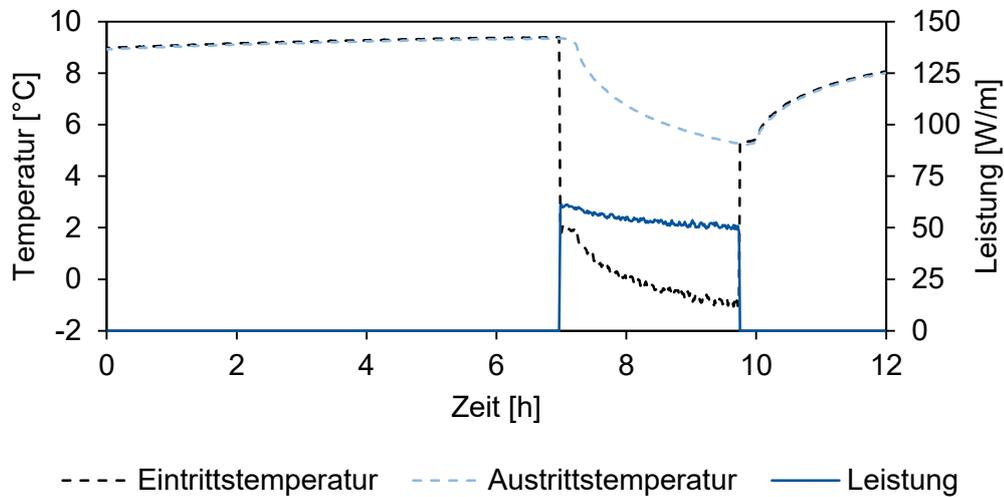


Abbildung 5-14: Messwerte der Temperaturen und Entzugsleistung der Doppel-U-Bestandssonden

Die Stahlenergiepfähle haben Längen von 9 m und 18 m in der coaxialen Ausführung und 9 m bei der Variante mit Doppel-U-Sonde. In Abbildung 5-15 sind die Temperaturen und die Leistungen pro Meter Tiefe der coaxialen Stahlenergiepfähle für einen ausgewählten Zeitraum von 12 Stunden dargestellt. Die Einlasstemperatur entspricht in der Größenordnung den Werten der Bestandssonden. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die coaxialen Stahlenergiepfähle nahezu nicht längenabhängig sind, da die Leistung pro Meter für beide Varianten annähernd gleich ist. Dies ist auch für längere Pfähle zu erwarten, da mit großen Volumenströmen gearbeitet wird. Die Leistung liegt mit ca. 110 W/m deutlich über denen der Bestands-Doppel-U-Sonde mit ca. 54 W/m. Dies lässt auf einen deutlich besseren thermischen Anschluss schließen.

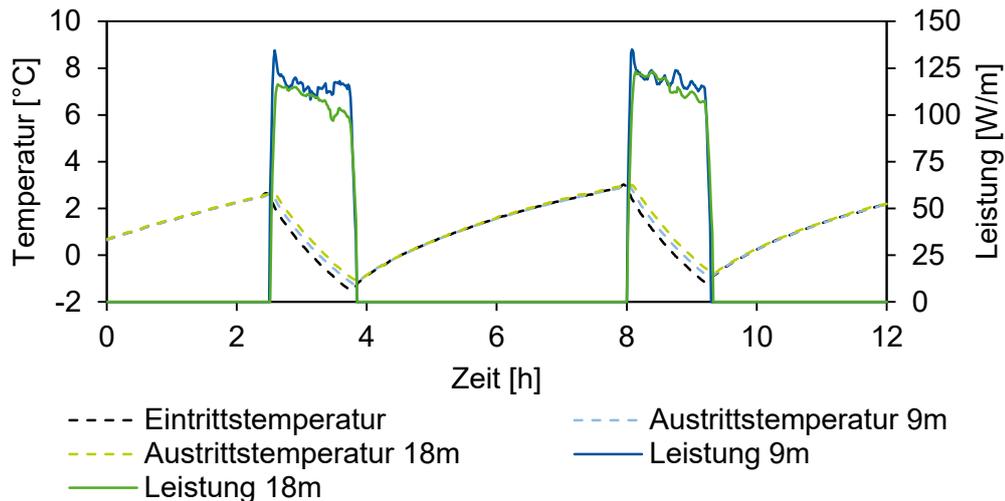


Abbildung 5-15: Messwerte der Temperaturen und Entzugsleistungen der coaxialen Stahlenergiepfähle

Zu beachten ist, dass durch die höhere Entzugsleistung das thermische Potential langfristig abnimmt. Dies kann gerade bei einem Betrieb über Jahrzehnte ohne Regeneration zu einem Absinken der Erdtemperatur führen. Über eine Regeneration des Erdreichs im Sommer durch Abwärme oder Solarthermie kann das Absinken der Temperatur allerdings verhindert werden. Eine gegebenenfalls vorhandene Grundwasserströmung kann sich hier aufgrund des Wärmeertrages ebenfalls positiv auswirken.

Aufgrund anlagentechnischer Einschränkungen konnten nur Messwerte im Heizfall aufgezeichnet werden. Die dargestellten Ergebnisse sind allerdings überwiegend vom linearen Verhalten der Temperaturen des Fluids abhängig. Bei einem entsprechenden Temperaturunterschied hätten die Ergebnisse im Kühlfall eine vergleichbare Größenordnung.

Die messtechnischen Untersuchungen der Stahlenergiepfähle mit Doppel-U-Sonde führten zu unplausiblen Leistungswerten. Es werden fehlerhafte Messwerte oder thermische Leistungen im Untergrund um die Sonde vermutet. Eine abschließende Lösung konnte im Rahmen der Arbeit nicht gefunden werden, weshalb auf eine Darstellung der Ergebnisse verzichtet wird.

5.5.2 Modellierung und Validierung des numerischen Modells anhand von Messwerten

Mit Hilfe des thermischen Simulationsprogramms TRNSYS18 kann das Verhalten von Geothermiesonden in einer Zeitschrittsimulation abgebildet werden. Durch den modularen Aufbau der Software in einzelne Module (Types), kann das Modell später im Rahmen einer Gebäudesimulation eingesetzt werden. Zur Simulation wird Type 557 verwendet. Mit Hilfe dieses Moduls kann ein vertikaler Wärmetauscher

abgebildet werden, der thermisch mit dem Erdreich interagiert. Das Modell erhält die Einlasstemperatur sowie den Massenstrom als Input. Für die Validierung des numerischen Modells werden die Doppel-U-Bestandssonden sowie die realisierten Stahlenergiepfähle mit koaxialen Sonden betrachtet.

Durch ein Fitting der Parameter der Erdreichtemperatur und der thermischen Eigenschaften des Erdreichs wird eine möglichst gute Übereinstimmung zu den Messwerten der Doppel-U-Bestandssonden angestrebt. In Abbildung 5-16 sind die Messwerte eines Beispielzeitraums von 100 h sowie die Berechnungsergebnisse des Modells dargestellt. Die Taktzeiten ergeben sich aus den Temperaturgrenzen der Wärmepumpe. In der Abbildung werden die Temperaturen und zusätzlich die Leistungen pro Meter Tiefe angegeben. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass das Modell das Verhalten gut abbildet, da sowohl die Austrittstemperaturen als auch die Leistungen gut übereinstimmen. Die Leistungsspitzen zu Beginn jedes Wärmepumpenbetriebs ergeben sich aufgrund der thermischen Trägheiten des Fluids, welches eine gewisse Zeit benötigt, um den gesamten Sondenweg zurückzulegen.

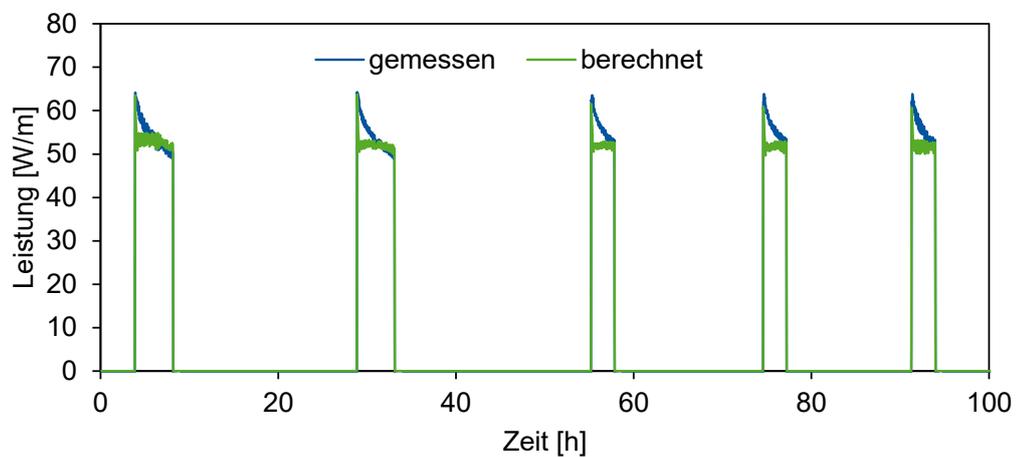
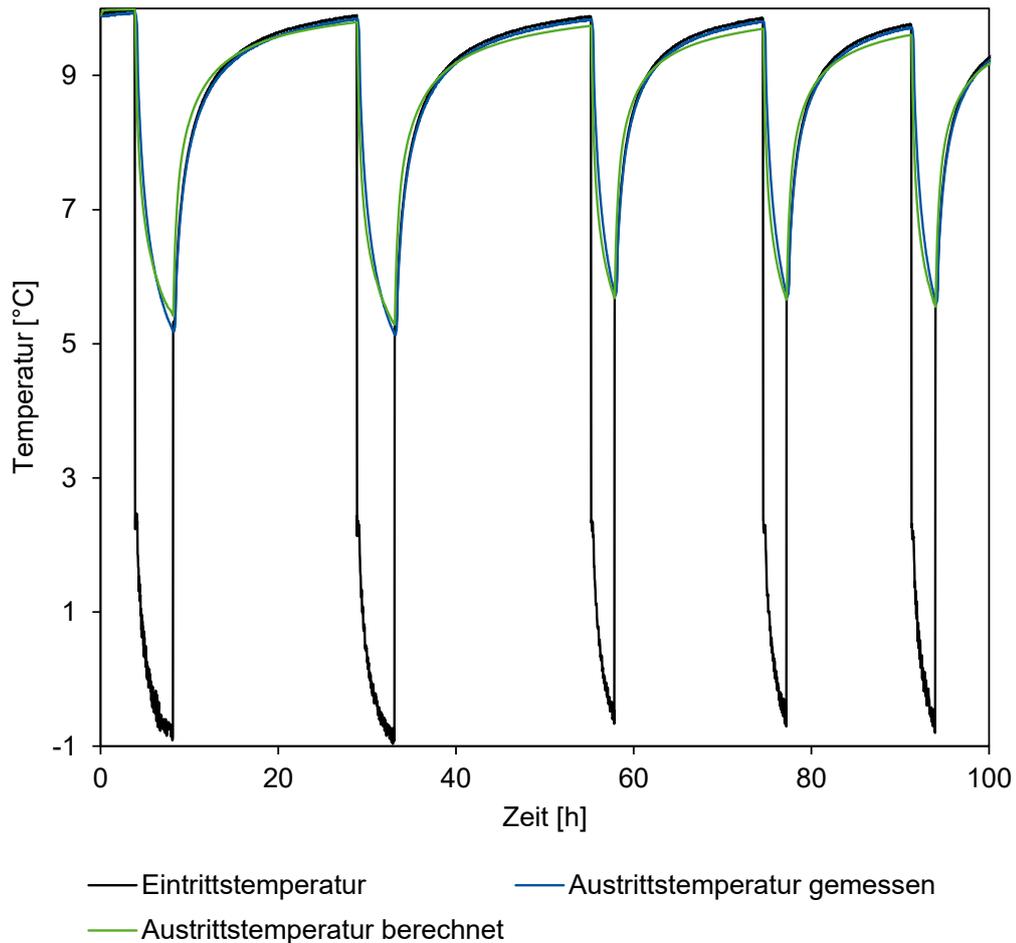


Abbildung 5-16: Gemessene und berechnete Werte der 2U-Sonde im Bestand, oben: Temperaturen, unten: thermische Leistung

Für exemplarische Zeiträume werden die Parameter der Stahlenergiepfähle an die Messwerte gefittet. Die Kennwerte für die Wärmeleitfähigkeiten der Materialien (Kunststoff: inneres Rohr KS und Rohr 2U (λ_P); Stahl: äußeres Rohr KS (λ_S); Füllung 2U (λ_F); Erdreich (λ_E)) werden dabei ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-1 dargestellt. Die Werte liegen in den erwarteten Bereichen der Literaturwerte.

Tabelle 5-1: Ermittelte Parameter der Stahlenergiepfähle sowie Literaturwerte der Wärmeleitfähigkeiten im Modell

	λ_P [W/(m·K)]	λ_S [W/(m·K)]	λ_F [W/(m·K)]	λ_E [W/(m·K)]
Koaxialsonde 9 m	0,304	54,153	-	1,964
Koaxialsonde 18 m	0,326	53,787	-	1,918
Stahl-Doppel-U-Sonde	0,357	-	2,02	1,921
Literaturwerte [110]	0,3-0,52	40-60	1,25-2,25	1,5-2,5

Mit den ermittelten Wärmeleitfähigkeiten, den thermischen Eigenschaften des Fluids sowie dem Massenstrom lassen sich aus den Messwerten abgeleitete Bohrlochwiderstände nach Hellström ermitteln. Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 5-17 zu finden. Diese Werte liegen im Bereich von mit Literaturwerten ermittelten Bohrlochwiderständen. Der Vorteil des verringerten Bohrlochwiderstandes der Koaxialsonden lässt sich folglich auch durch die Messdaten belegen. Im Vergleich zu der 2U-Ausführung ist eine Reduktion um ca. 73 % belegbar.

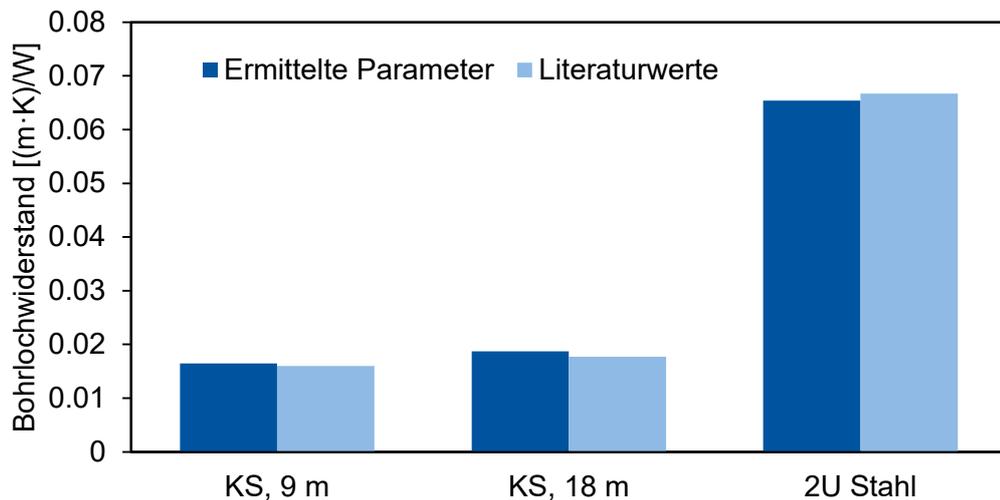


Abbildung 5-17: Aus Messwerten abgeleiteter Bohrlochwiderstand der Demonstratoren

Für die Validation des numerischen Modells wird in Abbildung 5-18 die 9 m lange Koaxialsonde dargestellt. Hier werden die Austrittstemperatur sowie die Leistung gezeigt. Die Laufzeit der Wärmepumpe ist an den Zeiträumen mit positiver Leistung zu erkennen. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die Simulation die Messwerte gut abbildet.

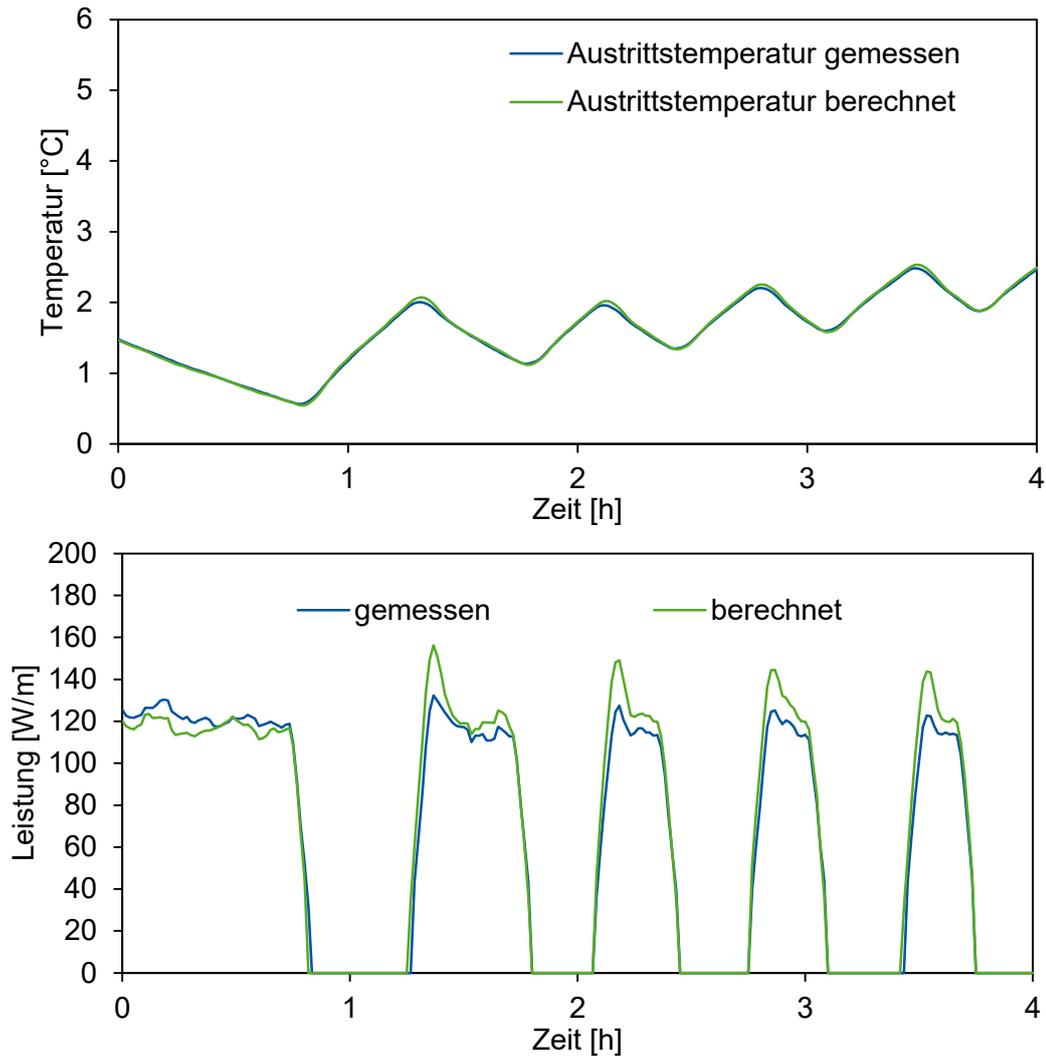


Abbildung 5-18: Gemessene und berechnete Werte des 9 m langen coaxialen Stahlenergiepfahls, oben: Austrittstemperatur, unten: Leistung

5.6 Wirtschaftliches und ökologisches Potential der Stahlenergiepfähle im Vergleich zu geothermisch aktivierten Betonpfählen

Zur Darstellung des Potentials der Stahlenergiepfähle im Vergleich zu Energiepfählen aus Beton werden die Herstellungsprozesse der verschiedenen Pfahlarten hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Aspekte untersucht und das Recyclingpotential dargestellt.

Sowohl Stahlpfähle als auch Betonpfähle können mit Hilfe verschiedener Einbaumethoden hergestellt werden. Unter der Berücksichtigung von wirtschaftlichen Gesichtspunkten, den Bauwerkslasten, den Platzverhältnissen, der Nachbarbebauung und der grundsätzlichen Baustellensituation wird über den Einsatz der notwendigen

Geräte und Materialien entschieden [111]. Im Rahmen der Arbeit erfolgt die Beurteilung der beiden Pfahlarten daher für ein exemplarisches Sondenfeld anhand eines Hallenbauwerks von 60 x 20 m mit einem Standort am Demonstrationsgebäude in Aachen.

Zur Vermeidung einer gegenseitigen thermischen Beeinflussung benachbarter Sonden wird in der VDI 4640 für Erdwärmesonden ein Mindestabstand von 6 m empfohlen [32]. Auf der Grundlage des gewählten Gebäudegrundrisses resultieren verschiedene Varianten zur Anordnung der Pfähle. Ein exemplarischer Rahmenabstand der Tragkonstruktion von 6 m führt zu 22 möglichen Stahlenergiepfählen, die gleichzeitig als Gründungspfähle fungieren (Abbildung 5-19). Neben den statisch erforderlichen Pfählen, können zusätzliche Pfähle zur reinen Energiegewinnung angeordnet werden. Unter Einhaltung der Mindestabstände können so bis zu 44 Pfähle auf der Grundrissfläche eingebaut werden. Würde der Abstand reduziert werden, lassen sich weitere Pfähle realisieren. In dem Fall würde die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Pfähle allerdings zu einer Reduktion der einzelnen Entzugsleistung führen.

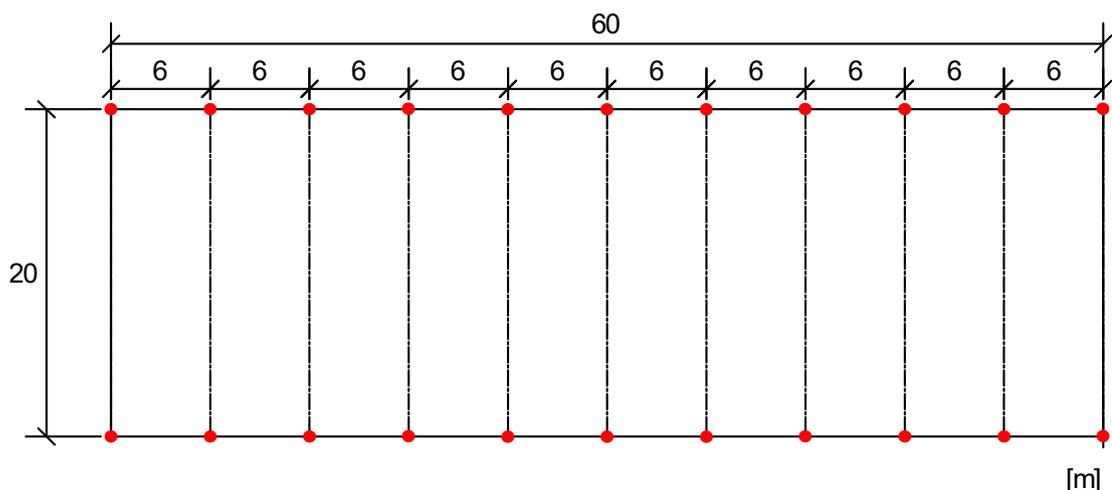


Abbildung 5-19: Exemplarische Anordnung von 22 tragenden Stahlenergiepfählen (rot) anhand eines exemplarischen Hallenbauwerks

Aus einer Tragfähigkeitsermittlung am betrachteten Standort geht hervor, dass eine Einbindetiefe von 9 m bei einem Rohrdurchmesser von 170 mm ausreicht, damit die maßgebende Stützenlast von 155 kN über die Stahlpfähle aufgenommen werden kann. Grundsätzlich erfolgt die Dimensionierung einer Pfahlgründung anhand der Statik des Bauwerks. Die Bestimmung der Anzahl und Anordnung der Pfähle nach energetischen Gesichtspunkten ist weniger wirtschaftlich. In einzelnen Fällen werden „verlorene Pfähle“ zur Erhöhung der Wärmeentzugsleistung eingesetzt [112]. Reine Energiepfahlanlagen fungieren daher häufig als Teilsystem zur Beheizung

und Kühlung von Gebäuden. Daher wird für den wirtschaftlichen Vergleich die Variante mit 22 Pfählen und einer Länge von 9 m herangezogen.

Die Ausführung dieser Pfähle kann anhand unterschiedlicher Verfahren erfolgen [111]. Im Rahmen des Vergleichs zwischen Stahlenergiepfählen und Betonenergiepfählen werden der Einbau von Stahlrohrpfählen (Verdrängungspfahl nach DIN EN 12699, die Schneckenortbetonpfahl-Herstellung (Bohrpfahl nach DIN EN 1536) und der Einsatz von Stahlbetonfertigteilepfählen (Verdrängungspfahl) betrachtet.

5.6.1 Vergleich zwischen Schneckenortbetonpfählen und Stahlrohrpfählen

Die Produktion von Ortbetonpfählen mit einem kleinen Durchmesser ist nur bedingt möglich. Aufgrund der geringen Zugfestigkeit des Materials ist der Einsatz von Bewehrungskörben aus Stahl erforderlich [113]. Dies hat wiederum zur Folge, dass aus konstruktiver Sicht eine nominelle Betondeckung zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit, dem Verbund und zur Berücksichtigung der Herstellungstoleranzen eingehalten werden muss [114]. Aus gerätetechnischer Sicht ist zusätzlich anzumerken, dass die geforderte Pfahlachse und der festgelegte Pfahlquerschnitt bei dünnen Ortbetonpfählen nur schwierig umzusetzen sind [115]. Daher wird in den folgenden Abschnitten für den Betonpfahl von einem größtmöglichen Durchmesser eines Mikropfahls von 300 mm ausgegangen [116].

Stahlrohrpfähle mit den zuvor genannten Abmessungen der Demonstratoren können flexibel unter verschiedenen örtlichen und technischen Rahmenbedingungen eingesetzt werden. Die Produktion erfolgt trocken, so dass eine saubere Baustelle gewährleistet werden kann und entsprechende Aufräumarbeiten entfallen. Da der Einsatz von Stahlrohren auch bei niedrigen Arbeitshöhen und beengten Platzverhältnissen möglich ist, eignen sich diese besonders für Gründungen in und unmittelbar neben Gebäuden. Die geringen Anforderungen an die räumlichen Gegebenheiten sind auf die kleineren Einbaugeräte zurückzuführen. Die 9 m langen Stahlrohrpfähle lassen sich in Segmenten einbauen, so dass für ihre Einbindung keine schwere mäklergeführte Ramme (mit Führungseinrichtung) an einem Rammgerät oder an einem Seilbagger (etwa 48 t) erforderlich ist.

Die Schneckenortbetonmethode ist hingegen witterungsabhängig. Zudem müssen unter Umständen Änderungen am Grundwasserhaushalt vorgenommen werden. Für die Herstellung werden im Vergleich zur Stahlpfahlinstallation entsprechend größere Bohrgeräte verwendet [117]. Das Ziehen der hierfür erforderlichen 9 m lan-

gen Förderbohrschnecke sowie die Einbringung des mit Erdwärmesonden ausgestatteten Bewehrungskorbs kann nur mit Hilfe eines Hydraulikbaggers mit einem entsprechend langen Ausleger ausgeführt werden [118].

Um die wesentlichen Unterschiede des Stahlpfahleinbaus gegenüber dem Schneckenortbetonverfahren herauszustellen, werden die Betriebskosten der Einbaugeräte, die Betriebsstoffkosten sowie die Lohnkosten zur Herstellung der 22 Pfähle für beide Pfahlarten auf Grundlage der Baugeräteliste 2015 [119] und der Zahlentafeln für den Baubetrieb [120] für die jeweils notwendigen Produktionsschritte ermittelt (Abbildung 5-20).

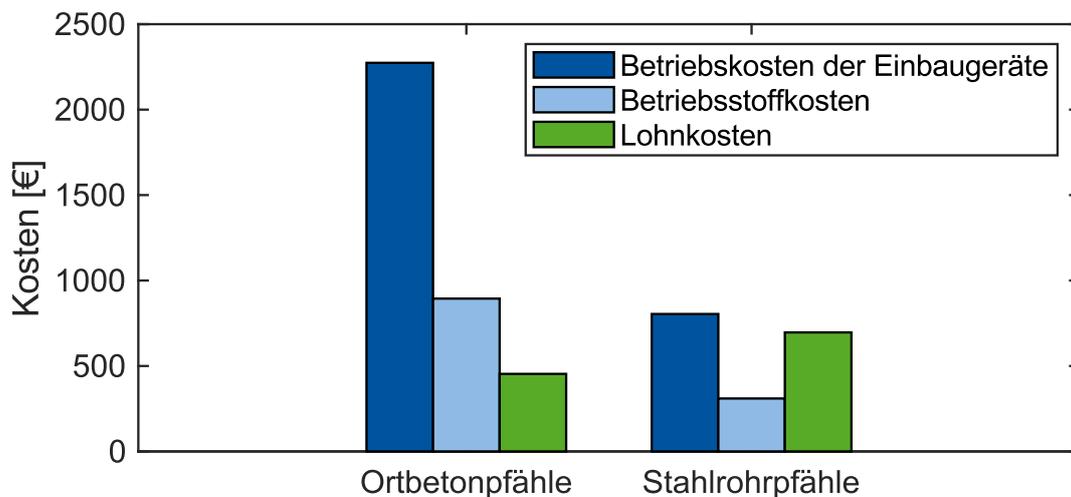


Abbildung 5-20: Betriebskosten der Baugeräte zur Herstellung der Schneckenortbeton- und Stahlrohrpfähle nach [119] und [120]

Beim Schneckenortbetonverfahren fallen demnach mit ca. 3600 € etwa doppelt so hohe Einbaukosten an als bei der Herstellung der Stahlrohrpfähle (ca. 1800 €). Diese Kostendifferenz ist darauf zurückzuführen, dass zur Herstellung der Ortbetonpfähle ein Hydraulikbagger mit angebautem Vertikalbohrkopf sowie eine 9 m lange Förderbohrschnecke eingesetzt werden. Für die Bohrung und Förderung des Bodens fallen mit ca. 3200 € etwa 90 % der gesamten Geräte- und Personalkosten aller Arbeitsschritte der Schneckenortbetonpfahl-Herstellung an.

Im Gegensatz zum Schneckenortbeton-Verfahren entstehen bei der Installation der Stahlrohrpfähle die höchsten Aufwendungen in der Summe der Betriebsstoff- und Lohnkosten. Dennoch liegt die Summe mit ca. 1000 € unter der der Schneckenortbetonpfahl-Herstellung von ca. 1350 €. Beim Einbau von Stahlrohrpfählen entstehen demnach Gerätekosten von ca. 800 €. Für die Herstellung der Schneckenortbetonpfähle liegen diese mit ca. 2300 € etwa dreimal so hoch. Da die Betriebsstoffkosten in Abhängigkeit von der Motorleistung des eingesetzten Baugeräts ermittelt werden, fallen letztere für die Stahlrohreinbringung (20 kW und 40 kW) mit ca. 300 € deutlich niedriger aus als für das Schneckenortbetonverfahren (150 kW).

Hinsichtlich der Personalkosten lässt sich festhalten, dass für die Stahlrohr-Variante zwei Hydraulikbagger verwendet werden und sich dementsprechend höhere Lohnkosten von ca. 700 € ergeben als bei der Schneckenortbetonpfahl-Herstellung. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die beiden Bagger nicht gleichzeitig bedient werden müssen, so dass die zuletzt genannten Kosten reduziert werden können. Für die Installation beider Pfahlarten werden zusätzlich zu den Baggerführern Hilfskräfte zur Ausführung von Bau- und Montagearbeiten eingesetzt. Die hierdurch entstehenden Kosten sind für den Vergleich zwischen Schneckenortbeton- und Stahlrohrpfählen vernachlässigbar, da sie für beide Einbaumethoden gleichermaßen angesetzt werden.

5.6.2 Vergleich zwischen Stahlbetonfertigpfahl und Stahlrohrpfahl

Stahlbetonfertigteilepfähle werden im Allgemeinen als quadratische Querschnitte mit Seitenlängen zwischen 20 und 45 cm hergestellt [121]. Der Ablauf ihres Einbaus entspricht dem der Stahlrohrpfähle. Ein wesentlicher Unterschied ergibt sich jedoch für die Anwendung der beiden Pfahlarten als Energiepfahl. Während die Installation der Wärmetauscher bei der Variante mit Stahlrohren vor Ort nach dem Rammen der Rohre erfolgt, werden die Sondenrohre beim Einsatz von Stahlbetonfertigteilepfählen bereits im Fertigteilwerk eingebaut [122]. Grundsätzlich können Stahlbetonfertigpfähle wie Stahlrohre in Teilstücken in den Baugrund eingebunden werden [123]. Die Wärmetauscher werden in der Praxis jedoch nur in Pfahlsegmenten mit Längen von 7 bis 13 m eingesetzt [124]. Die 9 m langen Pfähle zur Gründung des exemplarischen Hallenbauwerks lassen sich daher nur im Ganzen einbauen. Aus diesem Grund werden für die Installation der Stahlbetonfertigpfähle schwerere Baugeräte als für den Einbau der Stahlrohre erforderlich.

Die stündlichen Betriebskosten des Rammgeräts der Stahlbetonfertigpfähle liegen mit ca. 200 €/h etwa viermal höher als bei dem Einbaugerät des Stahlrohrpfahls [119]. Hierbei ist zu beachten, dass für den entstehenden Kostenaufwand im vorliegenden Fall die Betriebsdauer der Geräte maßgebend wird. Diese fällt für die Gründung des exemplarischen Hallenbauwerks mit Stahlbetonfertigpfählen (Einbau am Stück) deutlich geringer aus als beim Einsatz von Stahlrohren (Einbau in Segmenten). Eine Ermittlung der Kosten mit dem Zeitaufwand für beide Varianten ergibt jedoch, dass Stahlbetonfertigpfähle trotz der Zeitersparnis während ihres Einbaus für das vorliegende Beispiel höhere Kosten verursachen. Wenn die Betriebsdauer des Rammgeräts für 22 Stahlbetonpfähle mit 7,5 h der Hälfte der Betriebszeit des Rammgeräts der Stahlrohrpfähle entspricht, resultieren Betriebskosten inklusive

Lohnkosten von ca. 1700 € für das Rammgerät. Letztere sind mit 63% deutlich höher als die Betriebskosten inklusive Lohnkosten des Rammgeräts zur Einbindung der Stahlrohre.

5.6.3 Vergleich zwischen Betonpfahl und Stahlrohrpfahl hinsichtlich ökologischer Aspekte

5.6.3.1 Betriebsstoffmenge

Zur Veranschaulichung der ökologischen Gesichtspunkte werden zunächst die Betriebsstoffmengen der Einbaugeräte für die Herstellung der 22 Stahlrohr- bzw. Betonpfähle bestimmt. Diese werden in Abhängigkeit von der Motorleistung der verwendeten Geräte ermittelt. Auf der Grundlage, dass Erdbaugeräte und Lastkraftwagen auf der Baustelle durchschnittlich 0,2 l/kWh verbrauchen, resultieren für die einzelnen Pfahlarten die in Abbildung 5-21 dargestellten Betriebsstoffmengen [120].

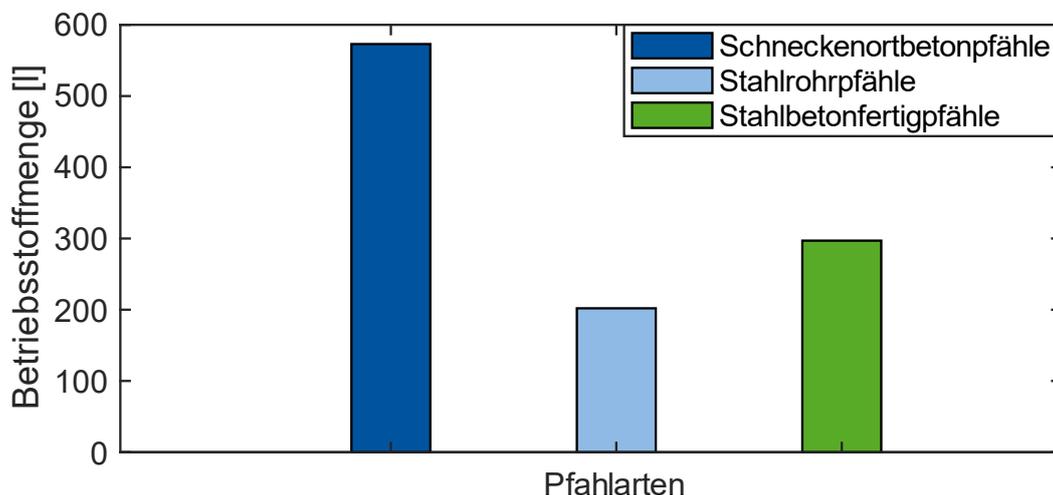


Abbildung 5-21: Betriebsstoffmengen der drei Pfahlarten

Während der Schneckenortbetonpfahl-Herstellung fällt demnach mit ca. 570 l der höchste Betriebsstoffmengenbedarf an. Für den Einbau von Stahlbetonfertigpfählen werden mit ca. 300 l trotz der Verwendung eines leistungsstarken Hydraulikbaggers (175 kW) vergleichsweise geringe Mengen benötigt. Dies ist auf die kürzere Einsatzdauer des Geräts zurückzuführen. Im gesamten Vergleich der Pfahlarten werden für die Variante mit Stahlrohrpfählen jedoch die geringsten Betriebsstoffmengen erforderlich. Mit einem Bedarf von ca. 200 l liegt bei der Installation von Stahlrohrpfählen gegenüber dem Schneckenortbetonverfahren eine Betriebsstoffeinsparung von 65 % und gegenüber der Anwendung von Stahlbetonfertigpfählen eine Verringerung von 32 % vor.

5.6.3.2 Recycling

Der Rückbau von sich in der Erde befindenden Betonpfählen ist mit einem hohen Aufwand verbunden. Eine Möglichkeit ist das Einrütteln eines Mantelrohres bei gleichzeitigem Freispülen des Pfahls [125]. Bei Erdwärmesonden werden teilweise aufwändige Überbohrungen durchgeführt. Aus wirtschaftlichen Gründen ist dies beim Beton aber problematisch. Im Bereich der mineralischen Bauabfälle wird Beton neben Zement, Mörtel, Putz und Estrich als Bauschutt aufgeführt. Dieser wird für die Wiederverwendung in einer Recyclinganlage zunächst grob zerkleinert. Betonverstärkungen wie Bewehrungsstähle werden aus den Bauteilen entfernt und das verbliebene Material in einem Brecher in verschiedene Kornfraktionen unterteilt [126]. Aus einem Bericht zum Aufkommen und Verbleib mineralischer Bauabfälle geht hervor, dass anhand des zuvor erklärten Verfahrens 78 % des Bauschutts in Deutschland recycelt werden. Der Anteil an recyceltem Bauschutt in Beton ist mit 25 % wiederum vergleichsweise gering [127]. Der Recycling-Beton weist zudem eine geringere Verträglichkeit gegenüber Frost und Tausalz auf als normaler Beton. Daher darf er nur innerhalb von Gebäuden benutzt werden [126].

Für die erneute Nutzung von Stahlpfählen müssen keine Techniken zur Sortierung des Materials in seine einzelnen Bestandteile wie bei der Aufbereitung von Betonpfählen durchgeführt werden. Die Stahlrohre werden mit Hilfe eines Zugeräts aus dem Baugrund entfernt. Da das Gerät in Abhängigkeit vom jeweiligen Anwendungsfall und den Abmessungen des eingesetzten Pfahls angepasst werden kann, ist das Ziehen aus technischer Sicht für Stahlrohrpfähle mit verschiedenen Durchmessern und Längen durchführbar. Die Anwendung bei Stahlenergiepfählen wurde bislang noch nicht durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zur ersten Erprobung ein zuvor eingerammtes Stahlrohr mit einem Durchmesser von 170 mm aus dem Boden gezogen (Abbildung 5-22).



Abbildung 5-22: Ziehen eines Stahlrohres aus dem Baugrund, links: Zugerät auf Unterkonstruktion, rechts: Zugerät mit eingespanntem Stahlrohr

Hierfür kommt ein Rohrziehgerät mit einer Zugkraft von 190 t und Abmessungen von 50 x 50 x 90 cm zum Einsatz. Es besteht aus vier symmetrisch zueinander angeordneten Hydraulikzylindern. Das Stahlrohr wird zwischen diesen nach oben gezogen. Bei der Anwendung ist zu beachten, dass das Ziehgerät auf einer ebenen und standfesten Oberfläche aufliegt. Die so wiedergewonnenen Stahlpfähle können für die Produktion von neuem Stahl verwendet werden. Die Sammelrate beim Stahl beträgt 99 % und der Anteil an recyceltem Stahl in der Stahlproduktion beträgt ca. 45 % [128].

5.6.4 Beurteilung der Herstellungskosten von Energiepfählen

In der Literatur werden für die geothermische Aktivierung von Gründungspfählen 15 €/m festgelegt. Die Horizontalanbindung kann mit 10 €/m abgeschätzt werden. [112] Auf Grundlage der Herstellungskosten der Pfähle (Betriebskosten der Einbaugeräte, Betriebsstoffkosten, Lohnkosten) des exemplarischen Hallenbauwerks resultieren für den Einsatz von Stahlenergiepfählen demnach Herstellungskosten von insgesamt 34 €/m. Ein höherer Durchmesser von 300 mm würde zu einem Anstieg der Herstellungskosten um 3 €/m führen. Die Herstellungskosten der geothermisch aktivierten Schneckenortbetonpfähle fallen mit 43 €/m entsprechend höher aus. Die Herstellungskosten von Stahlenergiepfählen können somit als vorteilhaft bezeichnet werden. In den zuvor angeführten Preisen sind jedoch keine Materialkosten enthalten. Als Vergleichswert können spezifische Kosten von Erdwärmesonden herangezogen werden die sich in einem Bereich zwischen 45 bis 75 €/m befinden [112].

5.7 Zusammenfassung

Stahlpfähle können neben der statischen Funktion auch geothermisch aktiviert werden und somit der Energiebereitstellung als Stahlenergiepfähle dienen. Dafür müssen die erforderlichen Sonden in Gründungspfähle aus Stahl integriert werden. Bei U-Sonden wird der entstehende Hohlraum dabei verfüllt. Bei Koaxialsonden strömt das Wärmeträgerfluid im gesamten Rohr. Drei Demonstratoren wurden geplant und realisiert: ein Stahlenergiepfahl mit einer Doppel-U Sonde und einer Länge von 9 m sowie zwei Stahlenergiepfähle mit einer Koaxialsonde und Längen von 9 m bzw. 18 m.

Es zeigte sich, dass mit Hilfe des Stahls der Wärmewiderstand des Bohrlochs zum Teil deutlich gesenkt werden kann. Ein großes Potential konnte vor allem bei der koaxialen Ausführung identifiziert werden. Aufgrund der besseren thermischen Eigenschaften des Stahls und dem besseren thermischen Anschluss der Sonden an

das Erdreich können so höhere Leistungen erzielt werden. Die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen zeigen, dass die neu entwickelten coaxialen Stahlenergiepfähle einen deutlichen Mehrertrag im Vergleich zu konventionellen Doppel-U-Erdsonden ermöglichen. Für den Standort der Demonstratoren in Aachen weist die coaxiale Ausführung ca. 110 W/m auf im Vergleich zu ca. 54 W/m für die Erdsonde. In der Doppel-U Ausführung konnte eine Leistungssteigerung von ca. 10 % im Vergleich zur konventionellen Doppel-U-Erdsonde numerisch gezeigt werden.

Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass diese Ergebnisse mit kurzen Betriebszeiten ermittelt wurden und keinen Betrieb über Jahre darstellen. Bei den großen Entzugsleistungen ist von einer stärkeren Abkühlung des Erdreichs auszugehen. Diese kann jedoch über eine thermische Regenerierung des Erdreichs abgefangen werden. Eine Kombination mit einem Solarkollektor oder aber Abwärme wäre z. B. möglich.

Anhand der Messwerte wurde ein erstelltes numerisches Modell validiert. Das Modell bildet das thermische Verhalten der Demonstratoren sowohl hinsichtlich der Auslasstemperaturen als auch der Leistungen der Doppel-U-Bestandssonden sowie der coaxialen Stahlenergiepfähle gut ab. Da die ermittelten Leistungen der konventionellen Doppel-U-Erdsonden auch gängigen Literaturwerten entsprechen, eignet sich das Modell für weitergehende numerische Untersuchungen anhand einer Gebäudesimulation.

Im Vergleich zu klassischen Erdsonden, die üblicherweise zur geothermischen Energienutzung verwendet werden, können sich durch Stahlenergiepfähle Kostenvorteile ergeben, da reine Sondenbohrungen vermindert werden. Im Vergleich zu anderen Pfahlarten konnten ebenfalls wirtschaftliche sowie ökologische Vorteile bei der Herstellung gezeigt werden. Da Stahl vollständig recyclebar ist, bieten sich Stahlenergiepfähle aufgrund der hohen Zugfestigkeit für einen Rückbau besonders an. Die untersuchte coaxiale Ausführung ermöglicht, das Fluid in der Sonde abzupumpen und den Stahlpfahl wieder zu ziehen. Mit Hilfe eines hydraulischen Zuggeräts konnte gezeigt werden, dass die Pfähle vollständig zurückgebaut und dem Wertstoffkreislauf zurückgeführt werden können.

6 Gebäudesimulationen für Plusenergiegebäude mit aktivierten Bauteilen

6.1 Einleitung

Unter dem Aspekt, dass fossile Energieträger endlich sind, hohe CO₂-Emissionen verursachen und darüber hinaus eine Abhängigkeit von den produzierenden Ländern in sich bergen, hat es eine große Bedeutung, dass Neubauten in Zukunft unabhängig von fossilen Energieträgern sind. Dies gewährleistet neben der Unabhängigkeit auch die angestrebte Verringerung der CO₂-Bilanz der Gebäude und schafft die Grundlage für die Realisierung von Plusenergiegebäuden.

Dafür ist es notwendig, den Energiebedarf von Gebäuden zu reduzieren und die Integration erneuerbarer Energiequellen zu maximieren. Da eine Verminderung des Energiebedarfs über eine Verbesserung der Hüllfläche nicht ausreichend ist, muss auch die Anlagentechnik der Gebäude betrachtet werden.

Neben der normativen Bestimmung des Energiebedarfs von Gebäuden bieten sich insbesondere dynamische Untersuchungen in numerischen Simulationen an, um den Bedarf verschiedener Systeme möglichst genau abzubilden. Eine Zeitschrittsimulation ermöglicht dabei eine detaillierte Analyse verschiedener Parameter. So kann der individuelle Bedarf ermittelt, die Anlagentechnik dimensioniert und die Integration erneuerbarer Energiequellen umgesetzt werden. Anhand von Parameteruntersuchungen können einzelne Einflussfaktoren identifiziert werden, um das Gesamtsystem zu optimieren.

6.2 Mustergebäude

Die numerischen Untersuchungen werden anhand eines zweiteiligen Mustergebäudes durchgeführt. Das Gebäude besteht aus einem typischen Hallengebäude mit Stahltragwerk, einer Fassade aus Stahlsandwich-elementen und einem Flachdach als Trapezblechkonstruktion mit aufliegender Wärmedämmung. Zusätzlich wird ein Büro als gedämmter Massivbau mit vorgehängter hinterlüfteter Fassade (VHF) angegliedert (Abbildung 6-1).

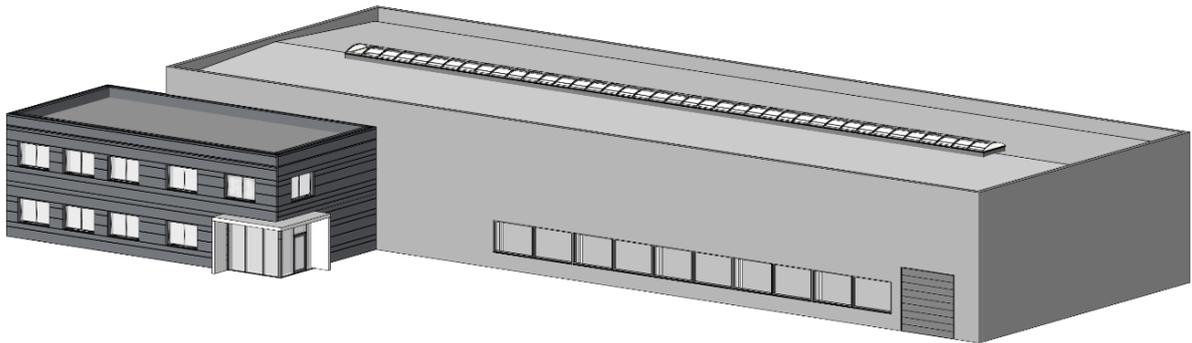


Abbildung 6-1: Darstellung des Mustergebäudes aus Halle und Büro

Anhand dieses Aufbaus können die zuvor untersuchten thermischen Systeme (aktivierte Stahltrapezprofile, Solarkollektoren, Stahlenergiefähle) in das Gebäude integriert werden.

Die Halle hat eine Länge von 60 m und eine Spannweite von 20 m, wodurch sich eine Grundfläche von 1200 m² bei einer Höhe von 9 m ergibt. Das angeschlossene zweigeschossige Büro hat eine Länge von 20 m und eine Breite von 10 m bei einer Höhe von 7,5 m, wodurch sich eine Grundfläche von 400 m² ergibt. Dieses ist auf der Südseite der Halle angegliedert.

Für die energetischen Simulationen des Mustergebäudes wird bei gleichem Gebäudelayout zwischen drei verschiedene Konfigurationen der thermischen Hülle unterschieden. Neben einem Fall, der die Mindestanforderungen nach GEG erfüllt, wird ein "Effizienz-Fall" mit verbesserten Werten sowie ein "Passiv-Fall" mit Werten, welche die Anforderungen an Passivhäuser erfüllen, betrachtet. Tabelle 6-1 zeigt die wesentlichen Parameter der drei Ausführungsvarianten im Bereich der untersuchten Gebäudehülle der Halle sowie des Büros.

Tabelle 6-1: Wesentliche Parameter der Ausführungsvarianten

	GEG Halle / Büro	Effizienz Halle / Büro	Passiv Halle / Büro
U-Wert [W/m ² K]			
Wand	0,35 / 0,28	0,20	0,15
Dach	0,35 / 0,20	0,20 / 0,18	0,15
Boden	0,35	0,20	0,15
Tor/Tür	2,90 / 1,80	1,50 / 1,30	0,80
Fenster	1,90 / 1,30	1,30 / 1,00	0,80
Lichtband	2,40 / -	1,45 / -	0,80 / -

Die verschiedenen Hüllflächenniveaus weisen unterschiedliche Wärmedurchgangskoeffizienten auf. Für die opaken Bauteile werden U-Werte zwischen 0,35 W/(m²·K) für die Mindestanforderungen nach GEG und 0,15 W/(m²·K) für die Anforderungen an ein Passivhausniveau betrachtet. Die Halle weist im Dachbereich ein Lichtband mit einem Flächenanteil von 10 % auf. Die Fensterflächenanteile der Fassaden betragen ca. 12 %. Zusätzlich werden zwei Tore in der Halle und zwei Türen im Büro abgebildet. Es kommen auch hier verschiedene Qualitäten zum Einsatz.

Für das Büro wurde eine Nutzung als Gruppenbüro und für die Halle als gewerbliche und industrielle Halle mit mittelschwerer Tätigkeit nach DIN V 18599-10 festgelegt, was den Nutzungsprofilen 2 bzw. 22.2 entspricht [129].

Es wurde ein differenziertes und in seinen Komponenten aufeinander abgestimmtes Energiekonzept entwickelt, um die zuvor untersuchten thermischen Systeme in das Gebäude zu integrieren und mittels Photovoltaik ein Plusenergiegebäude zu ermöglichen (Abbildung 6-2).

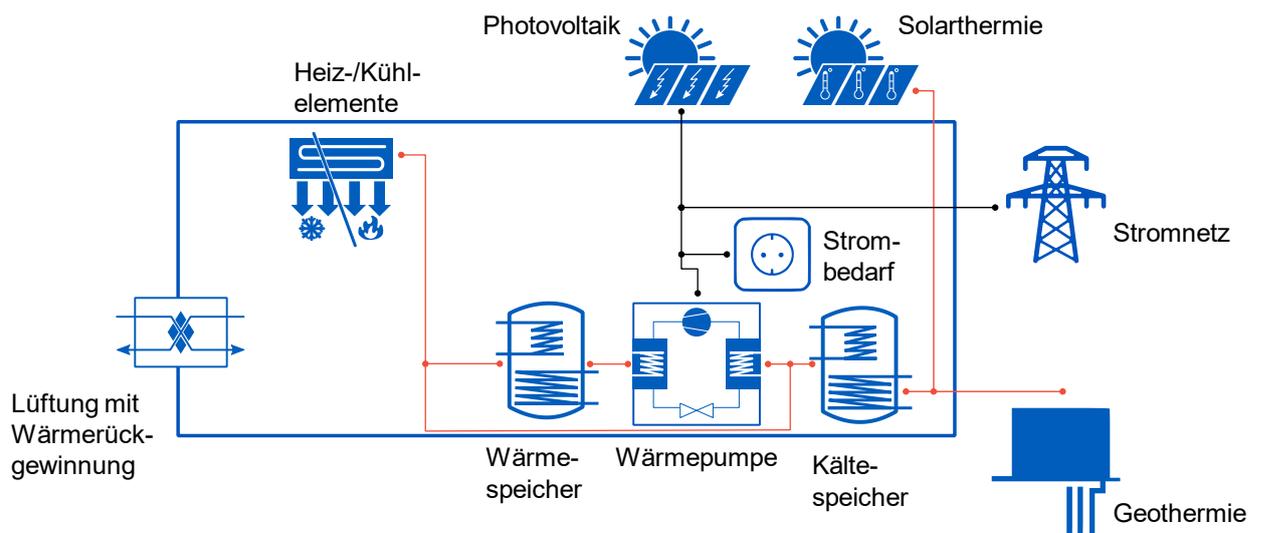


Abbildung 6-2: Energiekonzept des Mustergebäudes

Im Zentrum steht eine elektrisch betriebene Wärmepumpe. Die Stromversorgung erfolgt über eine Photovoltaikanlage auf dem Dach und das öffentliche Stromnetz. Als Wärmequelle greift die Wärmepumpe (gepuffert über einen Kältespeicher) auf Niedertemperatursolarthermiemodule und Geothermie zurück. Über den zwischengeschalteten Wärmespeicher ist eine zeitliche Entkopplung der einzubringenden Heizleistung von dem Betrieb der Wärmepumpe möglich.

Die Wärmeübergabe ans Gebäude erfolgt über strahlungsbasierte und deckenintegrierte Flächenheizelemente, welche so dimensioniert sind, dass sie mit niedriger Temperatur betrieben werden können. Im Sommer kann das Übergabesystem zur Kühlung eingesetzt werden. Dabei kann es aus dem Kältespeicher oder der Geothermie gespeist werden, wobei eine Regeneration dieser Wärmequellen für den Heizbetrieb erreicht wird, was die Leistungszahl im Heizfall verbessert und zu kleineren Abmessungen der Erdsonden für die Geothermienutzung beiträgt.

Ergänzt werden die gebäudetechnischen Komponenten durch eine Lüftungsanlage mit einem Wärmerückgewinnungsgrad von 75 %, um so die Lüftungswärmeverluste zu minimieren.

6.3 Numerische Simulationen

6.3.1 Methodik

Für die drei betrachteten Dämmniveaus des Mustergebäudes wurden Heiz- und Kühllastberechnungen zur Auslegung der notwendigen Flächen für die untersuchten Flächenheiz- und -kühlelemente durchgeführt. Dafür wurde das Mustergebäude geschossweise in drei Zonen unterteilt (Halle, Büro1, Büro2) und mit Hilfe des thermischen Gebäudesimulationsprogramms TRNSYS abgebildet. Im Anschluss wurden Detailuntersuchungen mit Hilfe des erstellten Simulationsmodells durchgeführt.

Mittels Jahressimulationen wurde der Heiz- und Kühlbedarf für sechs Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes [130] bestimmt. Als Referenzklima für Deutschland wurden Wetterdaten für den Standort Potsdam verwendet. Diese sind für die Jahre 2015 und 2045 jeweils ein durchschnittliches Jahr (15 bzw. 45), ein Jahr mit sehr warmem Sommerhalbjahr (15 Som bzw. 45 Som) und ein Jahr mit sehr kaltem Winterhalbjahr (15 Win bzw. 45 Win).

Anhand der Wetterdatensätze für 2015 wurden anschließend drei Systemvarianten untersucht. Die erste nutzt lediglich das Geothermiesystem als Niedertemperaturquelle für die Wärmepumpe und als Kühlung für das Gebäude. Die zweite Variante nutzt ausschließlich die Solarthermieanlage als Niedertemperaturquelle. Hier liefert

die Wärmepumpe auch die Kälte zur Kühlung des Gebäudes, wobei sie die überschüssige Wärme in den Wärmespeicher abführt. Diese überschüssige Wärme kann über einen inversen Betrieb der solarthermischen Module in den Nachtstunden an die Umgebung abgegeben werden. In der dritten Variante werden die vorherigen beiden Varianten kombiniert. Die Systemvarianten sind als Schema in Abbildung 6-3 dargestellt.

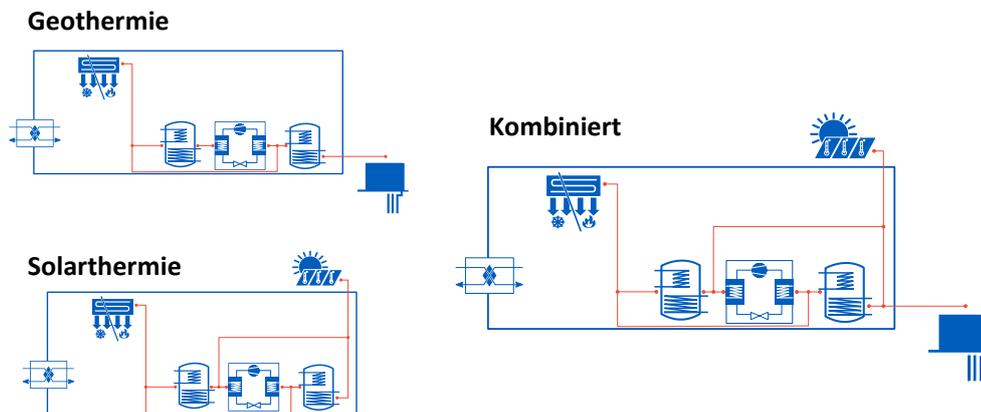


Abbildung 6-3: Systemvarianten des Gebäudetechnikkonzepts

Für die Fälle der Geothermie und der Solarthermie werden neben Komponenten, welche dem Stand der Technik entsprechen, auch die untersuchten stahlbasierten Lösungen betrachtet: Für das Geothermieszenario wird ein Fall mit einer konventionellen Doppel-U-Erdsonde (2U) und ein Fall mit einem coaxialen Stahlenergiepfahl (KS) untersucht. Für das Solarthermieszenario werden ein Kunststoffabsorber (NO) und die in die Stahlvorhangfassade integrierte Solarthermie (SVF) betrachtet. Im kombinierten Szenario kommen lediglich die stahlbasierten Komponenten zum Einsatz.

Der Ablauf der numerischen Untersuchungen zur Bestimmung der notwendigen Größen für die einzelnen Komponenten sowie der notwendigen PV-Dachfläche zur Erzielung eines Plusenergiegebäudes besteht aus folgenden Schritten:

1. Bestimmung der Heiz- und Kühllast für die Auslegung der Flächenheiz- und -kühlelemente
2. Berechnung des Heiz- und Kühlbedarfs zur Ermittlung der notwendigen Größen der Gebäudetechnik
3. Ermittlung der erforderlichen Heiz- und Kühlleistung der Wärmepumpe, des Wärme- und Kältespeichervolumens sowie der Größen für die geothermischen und solarthermischen Komponenten

4. Auswertung der Simulationen hinsichtlich Komfort und elektrischem Energiebedarf
5. Dimensionierung und Optimierung des geothermischen Sondenfeldes
6. Ableitung der erforderlichen PV-Dachfläche zur Erzielung eines Plusenergiegebäudes

6.3.2 Heiz- und Kühllast sowie notwendige Flächen zur Temperierung

Die Heiz- und Kühllast für die verschiedenen Dämmniveaus wurde durch numerische Simulationen mit TRNSYS bestimmt. Die Ergebnisse spezifisch zur Nutzfläche sind nach Halle und Büro getrennt in Abbildung 6-4 dargestellt.

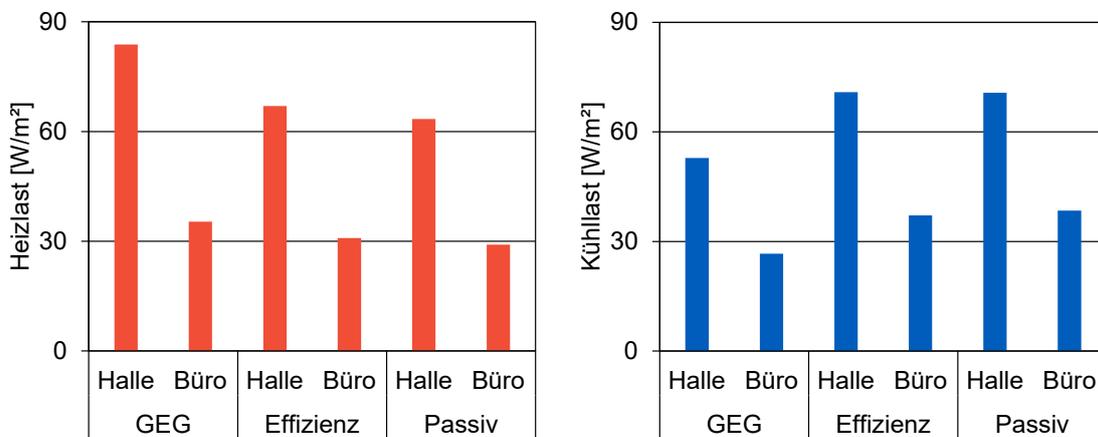


Abbildung 6-4: Heiz- und Kühllast des Mustergebäudes

Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die Heizlast für die Halle zwischen 84 und 63 W/m², bzw. zwischen 101 und 76 kW, liegt und mit zunehmendem Dämmniveau abnimmt. Die Kühllast liegt für die Halle zwischen 53 und 71 W/m², bzw. zwischen 63 und 85 kW. Hier nimmt die Last vom GEG zum effizienten Dämmniveau zu und bleibt bei weiterer Erhöhung des Dämmniveaus nahezu konstant. Die Last im Büro ist aufgrund des abweichenden Raumvolumens entsprechend geringer.

Die notwendige Fläche der Flächenheiz- und -kühlelemente für die Halle wird näherungsweise über einen linearen Ansatz (s. Kapitel 2.7.2) bestimmt. Dazu wird die flächenbezogene Leistung für verschiedene Fälle ermittelt, indem exemplarische Leistungen pro Fläche und Temperaturdifferenz mit ausgewählten Temperaturdifferenzen zwischen Fluid und Umgebung multipliziert werden. Dies ist in Abbildung 6-5 dargestellt. Dadurch können Systeme unterschiedlicher Leistungen verglichen werden. Die Leistungen der untersuchten strahlungsbasierten Heiz- und Kühlelemente aus Kapitel 3.5 sind ebenfalls abgebildet. Für die Aktivierung in jedem Trapez (Bezeichnung "jedes" in Abbildung 6-5) und in jedem zweiten Trapez (Bezeichnung "jedes 2." in Abbildung 6-5) wurden exemplarische Temperaturdifferenzen von 15 K

und 24 K im Heizfall sowie 8 K und 14 K in Kühlfall gewählt. Dadurch ergeben sich für beide Fälle Leistungen von ca. 120 W/m² im Heizfall bzw. 90 W/m² im Kühlfall, welche die zuvor ermittelten maximalen Lasten abdecken.

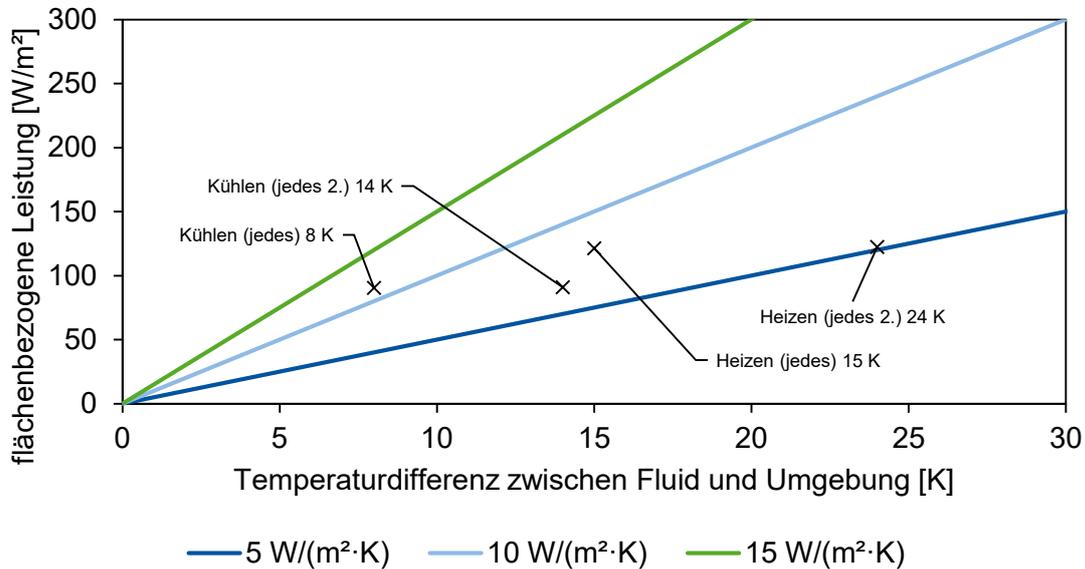


Abbildung 6-5: Flächenbezogene Leistung in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz

Mit der flächenbezogenen Leistung und der errechneten Heiz- und Kühllast kann im Anschluss die notwendige Fläche bestimmt werden. Dies ist in Abbildung 6-6 für den Heizfall und in Abbildung 6-7 für den Kühlfall für die zuvor gewählten Leistungen dargestellt. Zur Einordnung sind zusätzlich weitere Leistungen abgebildet. Die notwendige Fläche für die untersuchten strahlungsbasierten Flächenheiz- und -kühl-elemente ist für die verschiedenen Dämmniveaus (GEG, Effizienz, Passiv) bei einer Aktivierung in jedem ("jedes") und jedem zweiten Trapezprofil ("jedes 2.") abgebildet.

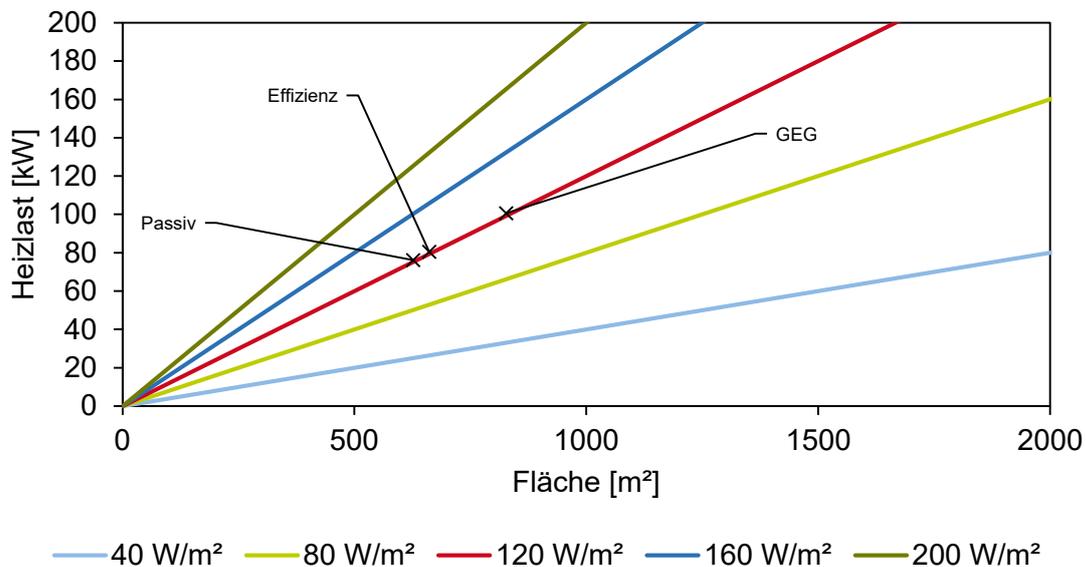


Abbildung 6-6: Notwendige Heizfläche für die ermittelten Heizlasten in Abhängigkeit der flächenbezogenen Leistung

Für die Heizlast der Halle von 101 kW (GEG-Fall) ergibt sich eine notwendige Fläche von ca. 825 m². Die Heizlast von 80 kW (Effizienz-Fall) führt zu einer notwendigen Fläche von ca. 660 m². Im Passiv-Fall ist für die Heizlast von 76 kW eine Fläche von ca. 625 m² erforderlich.

Die notwendige Fläche für die Kühllast der Halle von 63 kW (GEG-Fall) beträgt ca. 700 m². Die Kühllast von 85 kW (Effizienz- und Passiv-Fall) führt zu einer notwendigen Fläche von ca. 935 m².

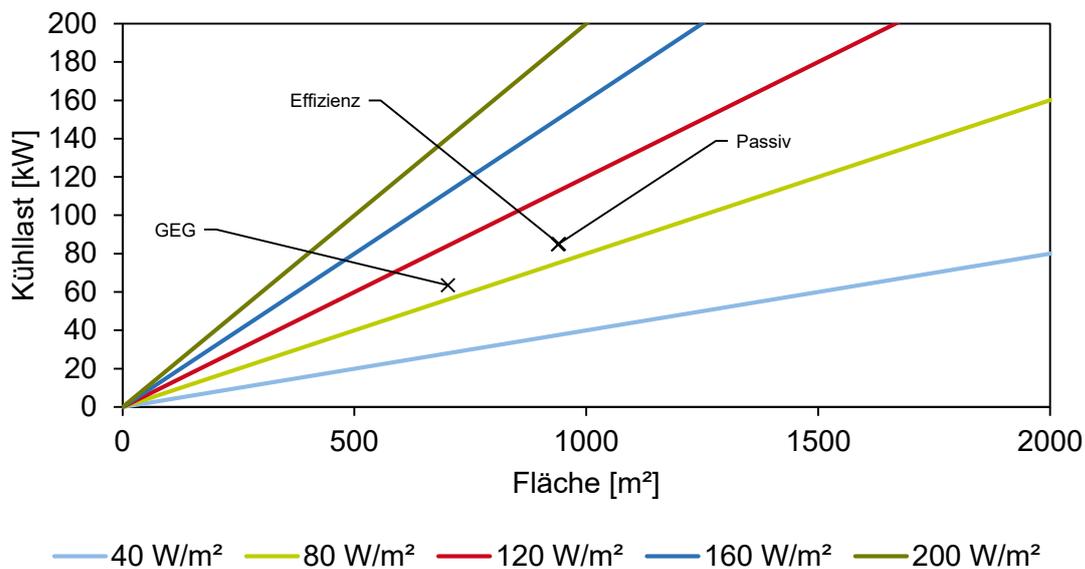


Abbildung 6-7: Notwendige Kühlfläche für die ermittelten Kühllasten in Abhängigkeit der flächenbezogenen Leistung

Beim Kühlfall ist darauf hinzuweisen, dass ein Temperaturunterschied von 14 K zu vermeiden ist, um Kondensationsprobleme zu verhindern. Für die Aktivierung in jedem zweiten Trapez müsste folglich die Fläche deutlich erhöht werden, um den Temperaturunterschied zu verringern.

Daraus folgt, dass die notwendige Fläche für die Flächenheiz- und -kühlelemente neben dem Energiebedarf auch stark von der Regelung und den damit verbundenen Temperaturdifferenzen abhängt. Für weitere numerische Untersuchungen wird eine vollflächige Aktivierung der Deckenoberflächen angenommen, um einen energetisch optimierten Betrieb der Wärmepumpe zu ermöglichen.

6.3.3 Heiz- und Kühlbedarf zur Auslegung der Komponenten

Zur Berechnung des Heiz- und Kühlbedarfs für das Gebäude wurde das erstellte Simulationsmodell in TRNSYS verwendet. Es beinhaltet Details zu den untersuchten Flächenheiz- und -kühlelementen sowie der entsprechenden Regelung. Für das

Hallengebäude sowie für das Büro wird eine Betriebskennlinie von $11,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ definiert. Die Deckenoberfläche wird dabei vollflächig thermisch aktiviert. Ein Proportionalregler wurde verwendet, um die Vorlauftemperatur basierend auf der aktuellen und der eingestellten Raumtemperatur zu regeln. Die Temperaturregelung erfolgt über eine Beimischschaltung aus dem Rücklauf.

Die Heiz- und Kühlbedarfsberechnungen basieren auf von der Umgebungstemperatur abhängigen Solltemperaturen für das Heiz-/Kühlsystem. Die Solltemperaturen stellen einen möglichst effizienten Wärmepumpenbetrieb sicher, da dadurch eine möglichst geringe Abweichung zur Raumtemperatur sichergestellt wird. Die Zonen-temperatur wird auf 21 bis 24 °C im Bürotrakt und 17 bis 26 °C im Hallenteil begrenzt. Außerhalb der Arbeitszeiten wird eine Abweichung der Raumsolltemperatur um 4 K ermöglicht. Es wird eine Vorlaufzeit von einer Stunde vor Beginn der Arbeitszeit angenommen.

Die Ergebnisse der Dämmniveaus sind in Abbildung 6-8 dargestellt. Der Energiebedarf zum Heizen und Kühlen für die drei Dämmniveaus und sechs Testreferenzjahre ist abgebildet. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass der Bedarf für das geringste Dämmniveau (GEG) von 125 bis 160 MWh/a reicht und der Heizbedarf dominierend ist. Beim mittleren Dämmniveau (Effizienz) liegt der Bedarf zwischen 95 und 120 MWh/a und der Kühlbedarf gewinnt an Bedeutung. Im Fall mit der besten Dämmung (Passiv) ist der Kühlbedarf dominierend und der Bedarf reicht von 76 bis 92 MWh/a. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass mit zunehmender Dämmung zwar der Energiebedarf sinkt, aber der Kühlbedarf zunimmt. Dies ist vornehmlich auf die inneren Wärmequellen zurückzuführen. Zukünftig ist mit einem geringeren Heizbedarf zu rechnen. Die extremen Testreferenzjahre verursachen einen höheren Energiebedarf. Mit zunehmender Dämmung sinkt allerdings der Einfluss der Testreferenzjahre.

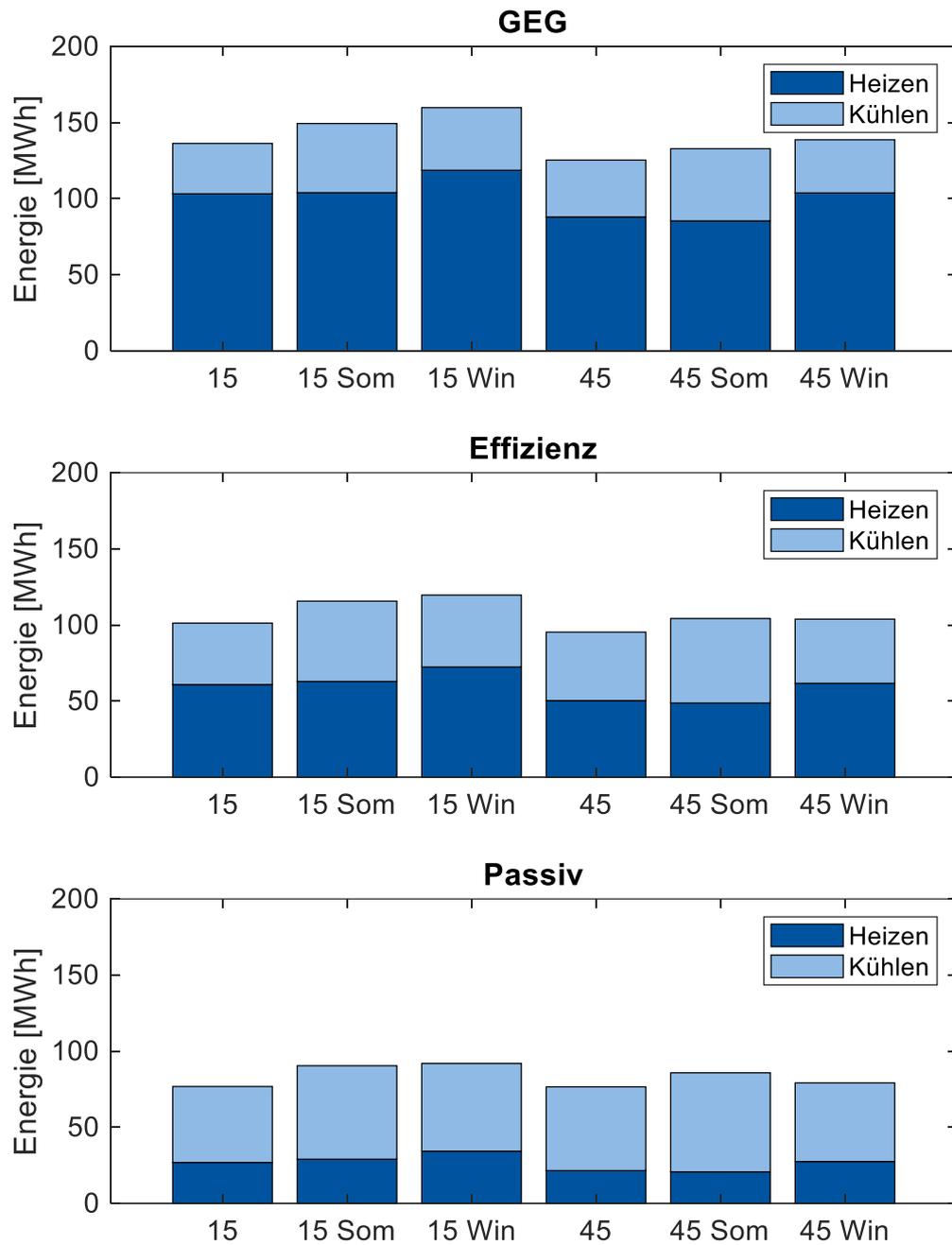


Abbildung 6-8: Heiz-/Kühlbedarf der drei Dämmniveaus für sechs Testreferenzjahre

6.3.4 Ansatz zur Vordimensionierung und Abbildung der Gebäudetechnikkonzepte

Zur Abbildung der Gebäudetechnikkonzepte in dem numerischen Simulationsmodell müssen die notwendigen Größen der einzelnen Komponenten ermittelt werden. Dafür wurde ein Ansatz zur Vordimensionierung der einzelnen Szenarien entwickelt, welcher im Folgenden näher beschrieben wird.

Für alle Szenarien wird die folgende Konfiguration angewandt: Es werden das gleiche Gebäude und die gleichen Regler wie bei der Berechnung des Heiz- und Kühlbedarfs verwendet. Die eingesetzte Sole/Wasser-Wärmepumpe wird durch Type 927 abgebildet, welcher eine einstufige Wärmepumpe modelliert. Der Massenstrom ist durch eine Temperaturdifferenz von 5 K bei Nennleistung definiert. Der Heizstab der Wärmepumpe hat eine Leistung von 100 kW. Der Ein-/Aus-Zustand der Komponenten wird von mehreren Reglern des Type 166 gesteuert, welcher die Funktion eines Thermostats abbildet. Type 158 wird verwendet, um die Wärme- und Kältespeicher mit einem Wärmeverlustkoeffizienten von $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ zu modellieren.

Zur Abschätzung der Heiz- und der Kühlleistung der Wärmepumpe \dot{Q}_{WP} wird die Summenlinienmethode verwendet. Die Auslegung der Wärme- bzw. Kälteerzeuger erfolgt folglich nicht unmittelbar nach der maximalen Last, sondern nach einem Zyklus von 48 Stunden, der diese Last enthält. Es wird angenommen, dass die Wärmepumpe im Auslegungspunkt betrieben werden kann und hier eine Leistungszahl COP von 4,75 hat.

Das Speichervolumen für den Wärmespeicher V_{warm} ergibt sich in allen Szenarien aus der in der Summenlinienmethode für die Wärmepumpe abgeleiteten Energiespeicherkapazität $E_h(\dot{Q}_{WP})$, geteilt durch die Wärmekapazität c_p von $4182 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, die Fluidichte ρ von $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, und eine angenommene Temperaturdifferenz ΔT zur minimalen und maximalen Fluidtemperatur von 10 K.

$$V_{warm} = \frac{E_h(\dot{Q}_{WP})}{c_p \cdot \rho \cdot \Delta T} \quad (6.1)$$

Die genaue Berechnung des Kältespeichers hängt vom Szenario ab. Besondere Ausprägungen werden daher im Folgenden beschrieben.

Geothermische Szenarien (2U) und (KS)

Die Wärmepumpenleistung \dot{Q}_{WP} wird auf das Ergebnis des Summenlinienverfahrens für die Heizleistung \dot{Q}_h gesetzt. Die geothermische Leistung \dot{Q}_{Geo} wird so ge-

wählt, dass das Maximum aus Kühlleistung \dot{Q}_k , welches sich aus der Summenlinienmethode ergibt, und der Bedarf an Umgebungswärme zur Deckung der Heizleistung, abdeckt wird.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{WP} &= \dot{Q}_h \\ \dot{Q}_{Geo} &= \max \left[\dot{Q}_k, \dot{Q}_{WP} \cdot \left(1 - \frac{1}{COP} \right) \right]\end{aligned}\quad (6.2)$$

Für exemplarische Parameter (Anhang A.5) wird die Wärmeleistung der Sonden durch eine TRNSYS-Simulation für 48 Stunden mit dem in Kapitel 5.5.2 validierten Type 557 für 90 m lange Sonden abgeschätzt. Der Durchschnitt dieses Zeitraums wird als thermische Leistung verwendet. Aus der Abschätzung ergeben sich für das Modell 54 W/m für Doppel-U-Erdsonden (2U) und 102 W/m für koaxiale Stahlenergiepfähle (KS), wodurch die in Kapitel 5.5 ermittelten Leistungen gut abgebildet werden. Bei einer angenommenen Temperaturdifferenz ΔT von 5 K zwischen Fluid und Erdreich entspricht das einer spezifische Leistungen k_i von 10,84 W/(m·K) (2U) bzw. 20,43 W/(m·K) (KS). Der Gesamtmassendurchfluss wird auf den ausgelegten Massendurchfluss pro Sonde, multipliziert mit der Anzahl der Sonden, gesetzt.

Die erforderliche Anzahl von Sonden n_i mit einer Länge l von 90 m wird aus der geothermischen Leistung mit der zuvor ermittelten spezifischen Leistung berechnet. Das Volumen des Kältespeichers V_{kalt} wird aus der in der Summenlinienmethode für die geothermische Leistung abgeleiteten Energiespeicherkapazität E_k (\dot{Q}_{Geo}) bestimmt.

$$\begin{aligned}n_i &= \frac{\dot{Q}_{Geo}}{k_i \cdot \Delta T \cdot l} \\ V_{kalt} &= \frac{E_k (\dot{Q}_{Geo})}{c_p \cdot \rho \cdot \Delta T}\end{aligned}\quad (6.3)$$

Solarthermische Szenarien (NO) und (SVF)

Mit Hilfe des Summenlinienverfahrens ist die Wärmepumpenleistung \dot{Q}_{WP} so ausgelegt, dass der maximale Heiz- und Kühlleistungsbedarf gedeckt wird. Der Hauptunterschied zu den geothermischen Szenarien besteht darin, dass die Wärmepumpe nun auch für den Kühlbedarf dimensioniert ist.

$$\dot{Q}_{WP} = \max \left(\dot{Q}_h, \frac{\dot{Q}_k}{1 - \frac{1}{COP}} \right)\quad (6.4)$$

Für die solarthermischen Szenarien wird Type 1 verwendet, welcher die thermische Leistung von Flachkollektoren abbildet. In dem Modell werden die im Abschnitt 4.4.3 bestimmten Parameter eingesetzt. Der Solarkollektor kann auch in Zeiten mit geringer oder keiner Einstrahlung durch Konvektion Wärme gewinnen oder abgeben. Der lineare Wärmeübergangskoeffizient für den solarthermischen Kollektor aus Stahl wird entsprechend der Versuche zu $15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ angenommen. Für den Kunststoffabsorber wird ein linearer Wärmeübergangskoeffizient von $12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ verwendet. Für die Sonneneinstrahlung wird die Südfassade betrachtet. Das Abkühlen des Warmwasserspeichers durch den Solarkollektor erfolgt, wenn die Speichertemperatur die Heizgrenztemperatur um 20 K überschreitet. Die Wärmepumpe wird zur Kühlung eingeschaltet, wenn die Solarthermieanlage den Kältespeicher nicht abkühlen kann. Der Gesamtmassenstrom wird auf den Auslegungsdurchfluss von $50 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ gesetzt, um beim Skalieren der Fläche den gleichen Massenstrom pro Modul zu gewährleisten.

Die benötigte solarthermische Fläche A_i wird durch Division des Bedarfs an Umgebungswärme durch den linearen Wärmeübergangskoeffizienten und einer Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur von 5 K ermittelt. Das Volumen des Kältespeichers V_{kalt} wird aus der in der Summenlinienmethode für den Bedarf an Umgebungswärme abgeleiteten Energiespeicherkapazität $E_k (\dot{Q}_{WP} \cdot (1 - \frac{1}{COP}))$ bestimmt.

$$A_i = \frac{\dot{Q}_{WP} \cdot \left(1 - \frac{1}{COP}\right)}{k_i \cdot \Delta T} \quad (6.5)$$

$$V_{kalt} = \frac{E_k (\dot{Q}_{WP} \cdot \left(1 - \frac{1}{COP}\right))}{c_p \cdot \rho \cdot \Delta T}$$

Kombiniertes Szenario (KS+SVF)

Die Wärmepumpenleistung \dot{Q}_{WP} ist durch das Ergebnis der Summenlinienmethode für die Heizleistung definiert. Die geothermische Leistung \dot{Q}_{Geo} ist so ausgelegt, dass der Bedarf an Umgebungswärme gedeckt wird.

$$\dot{Q}_{WP} = \dot{Q}_h \quad (6.6)$$

$$\dot{Q}_{Geo} = \dot{Q}_{WP} \cdot \left(1 - \frac{1}{COP}\right)$$

Für das kombinierte Szenario werden die gleichen Types, Parameter und Regler verwendet. Die Berechnung der erforderlichen Sonden n_i wird nicht verändert. Die

solarthermische Fläche A_i ist so ausgelegt, dass sie die Energie aus dem Wärmespeicher abführt (inverser Betrieb der Kollektoren), während die Wärmepumpe im Kühlbetrieb ist, um eine Überhitzung zu vermeiden. Die solarthermische Fläche wird daher wie zuvor erläutert berechnet, verwendet aber jetzt eine Temperaturdifferenz von 15 K über der Umgebungstemperatur. Das Kältespeichervolumen V_{kalt} kann entsprechend der Summenlinienmethode reduziert werden, da nun die Wärmepumpe und die Sonden gleichzeitig zur Kühlung genutzt werden können und dadurch die Energiespeicherkapazität $E_k (2 \cdot \dot{Q}_{Geo})$ entsprechend erhöht wird.

$$\begin{aligned}
 n_i &= \frac{\dot{Q}_{Geo}}{k_i \cdot \Delta T \cdot l} \\
 A_i &= \frac{\dot{Q}_{WP}}{k_i \cdot \Delta T} \\
 V_{kalt} &= \frac{E_k (2 \cdot \dot{Q}_{Geo})}{c_p \cdot \rho \cdot \Delta T}
 \end{aligned} \tag{6.7}$$

6.3.5 Größenbestimmung der Komponenten

Für die Dimensionierung der Wärmepumpe und der Speicher sowie für die Bestimmung der notwendigen Sondenlängen und der notwendigen Fläche der Solar Kollektoren, werden die Simulationen der Testreferenzjahre für das Jahr 2015 und drei verschiedener Dämmniveaus ausgewertet. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Abbildung 6-9 zeigt die Wärmepumpengröße der betrachteten Konzepte. Die Ergebnisse werden für die drei Gebäudeausführungen GEG, Effizienz und Passiv sowie für die verschiedenen Testreferenzjahre gezeigt. Die Wärmepumpennennleistung ist für alle drei Gebäudetechnikkonzepte ähnlich groß. Beim Effizienz- und Passivniveau ist aufgrund des größeren Kühlbedarfs ein höherer Leistungsbedarf im Solarthermieszenario zu erkennen. Die extremen Testreferenzjahre führen zu größeren Komponentengrößen. Generell sinkt die Größe mit ansteigendem Dämmniveau. Die durchschnittliche Größe für den GEG-Fall beträgt im Standardtestreferenzjahr ca. 57 kW, für den Effizienz-Fall ca. 39 kW und im Passiv-Fall ca. 30 kW. Durch das Zusammenspiel mit den thermischen Speichern ergeben sich hier deutlich kleinere Leistungen als bei der Heiz- und Kühllastberechnung des Gebäudes.

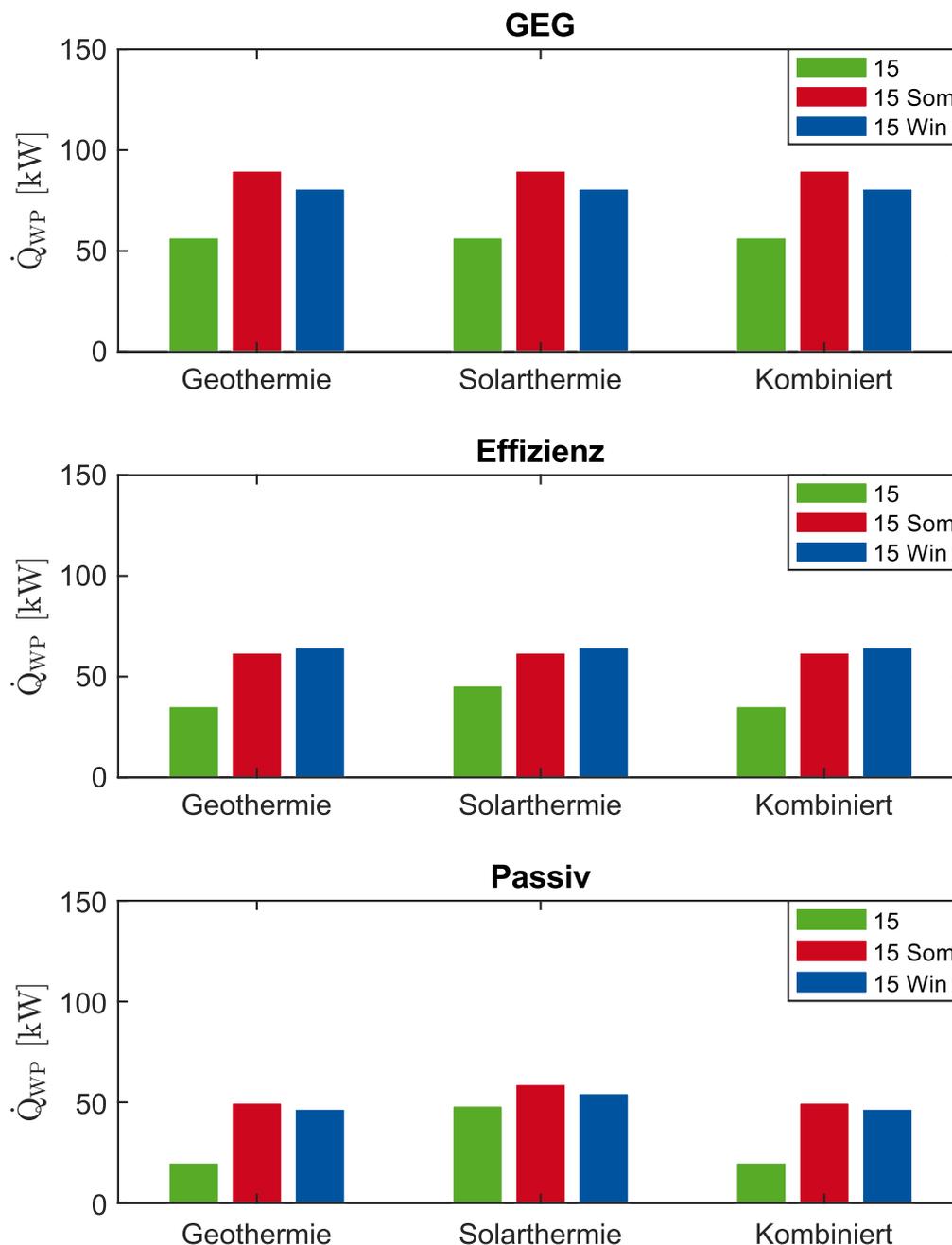


Abbildung 6-9: Wärmepumpennennleistung für die betrachteten Gebäudetechnikkonzepte

Abbildung 6-10 zeigt die Größe der Wärme- und Kältespeicher für die betrachteten Konzepte. Die Ergebnisse werden für die drei Gebäudeausführungen GEG, Effizienz und Passiv sowie für die verschiedenen Testreferenzjahre gezeigt. Die Größe des Kältespeichers steigt mit steigendem Dämmniveau an, da mehr Leistung gepuffert werden muss, um den Bedarf zu decken. Der Kältespeicher ist in den Szenarien Geothermie und Solarthermie größer als der Wärmespeicher. Die Größe des

Kältespeicher beträgt in diesen Fällen 19 bis 38 m³, die des Wärmespeichers liegt zwischen 10 und 20 m³. Im Fall der kombinierten Gebäudetechnik lässt sich die Kältespeichergröße annähernd auf die des Wärmespeichers reduzieren, da hier neben der freien Kühlung über die Geothermie auch die Wärmepumpe zum Kühlen genutzt werden kann.

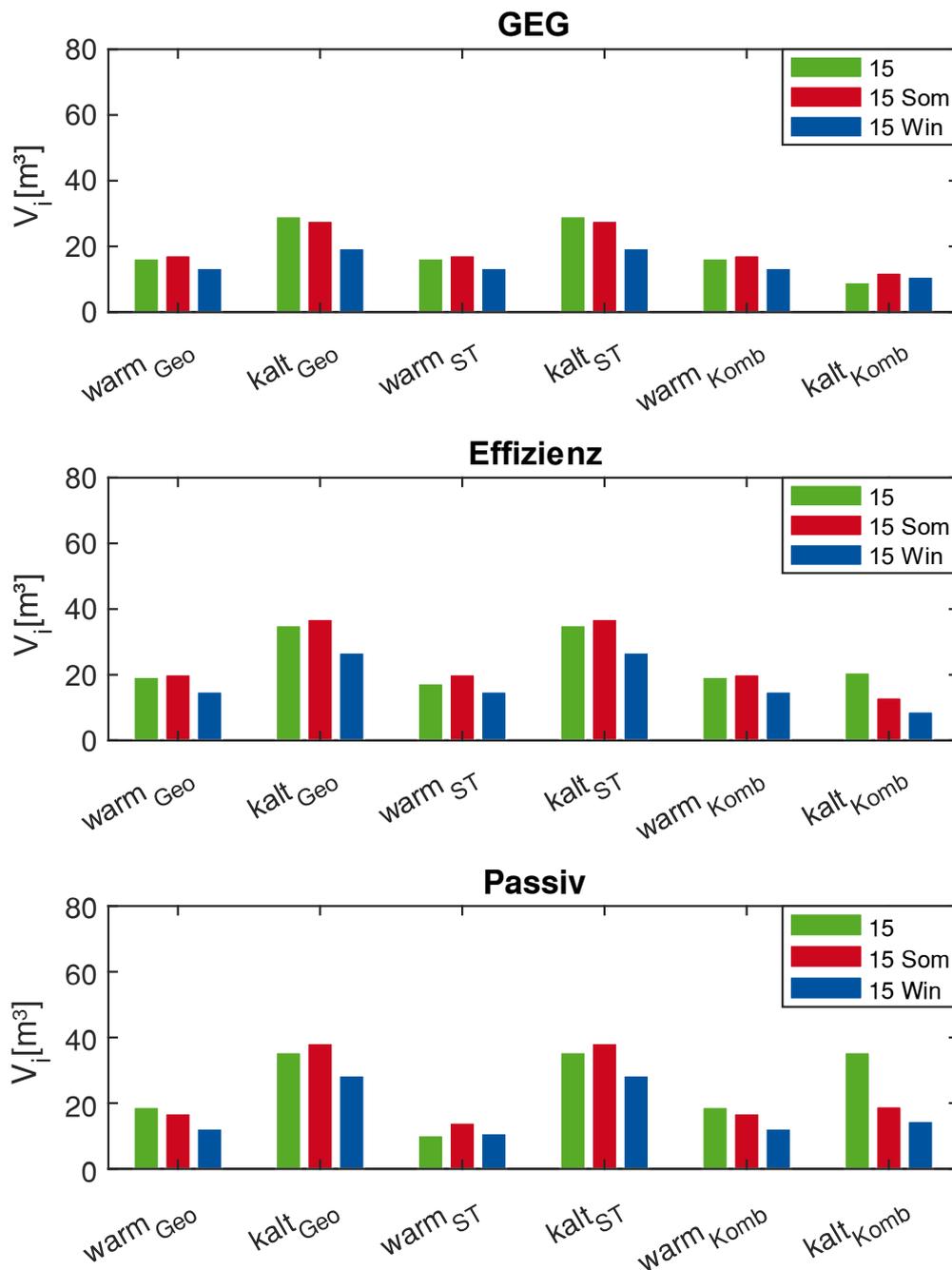


Abbildung 6-10: Speichergrößen für die betrachteten Szenarien

Abbildung 6-11 zeigt die resultierende Sondenlänge anhand der Anzahl von 100 m Sonden und die Größe der solarthermischen Fläche als Vielfaches von 10 m² für alle Szenarien. Die Ergebnisse werden für die drei Gebäudeausführungen GEG, Effizienz und Passiv sowie für die verschiedenen Testreferenzjahre gezeigt

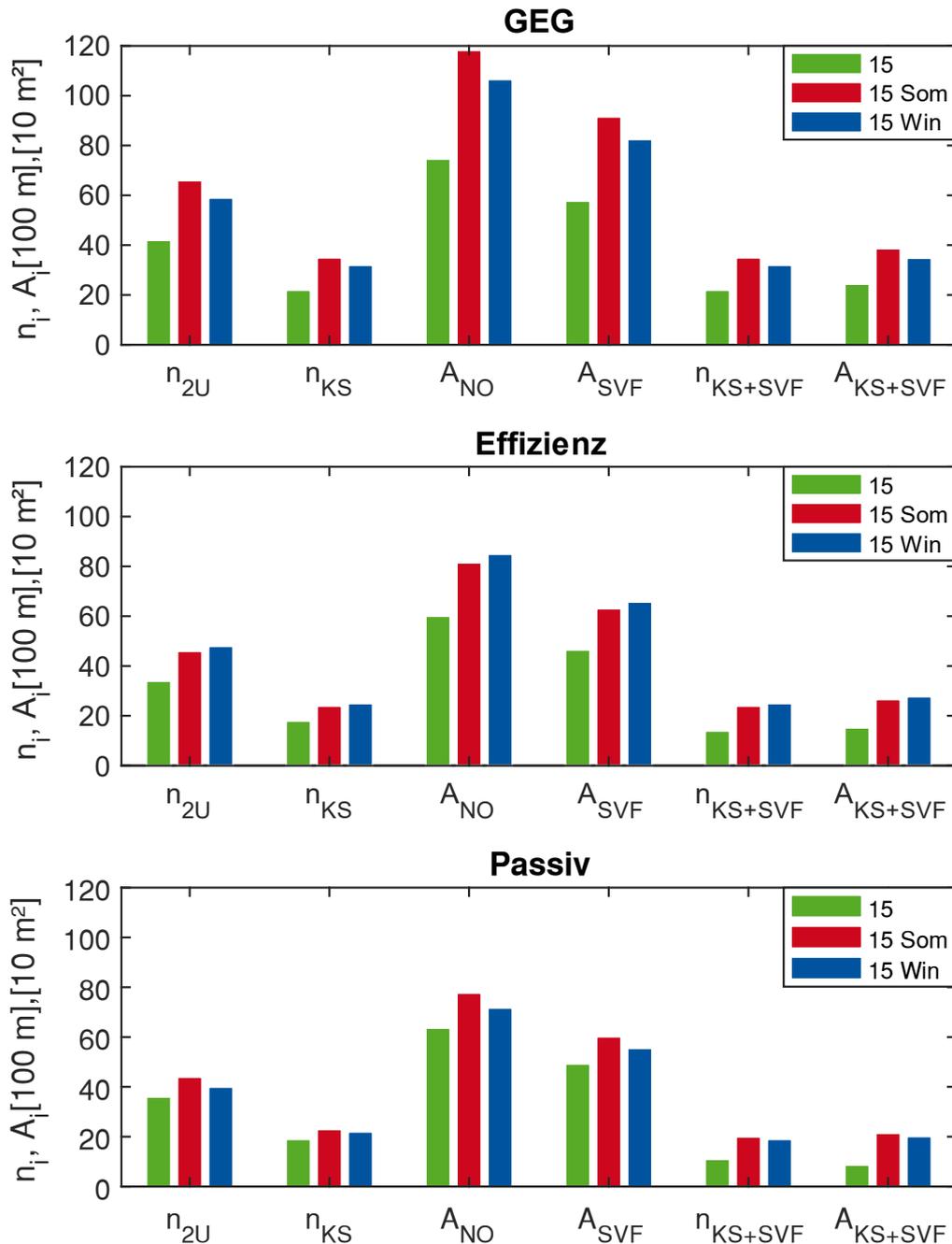


Abbildung 6-11: Geothermiesondenlängen und Solarthermieflächen für die betrachteten Szenarien in Einheiten von 100 m Sondenlänge sowie 10 m² Solarthermiefläche

Im Allgemeinen nimmt die erforderliche Bauteilgröße von GEG über Effizienz bis hin zum Passivniveau ab. Bei allen Gebäudeausführungen führen die extremen Testreferenzjahre zu größeren Bauteilgrößen. Es wird ersichtlich, dass die Stahlkomponenten (KS, SVF) zu deutlich kleineren Komponentengrößen als die konventionellen Systeme (2U, NO) führen. Koaxiale Stahlenergiepfähle benötigen mit 1800 bis 2200 m Sondenlänge im Standardtestreferenzjahr im Durchschnitt 53 % der Größe von Doppel-U-Erdsonden. Die solarthermische Fläche der Stahlvorhangfassade benötigt mit 465 bis 578 m² im Durchschnitt 77 % der Größe von Kunststoff-Solarwärmeabsorbern. Die Kombination der Stahlkomponenten aus dem solarthermischen und dem geothermischen System ermöglicht eine weitere Reduktion der einzelnen Größen.

6.3.6 Betrachtung des thermischen Komforts

Mit den zuvor bestimmten Größen der Komponenten wird eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Temperaturentwicklung im Mustergebäude durchgeführt.

In Abbildung 6-12 werden die Übertemperaturgradstunden dargestellt. Diese Werte werden berechnet, indem die Differenz der Temperatur zur maximal zulässigen Temperatur mit der Abweichungsdauer in Stunden multipliziert wird. In der DIN 4108-2 werden 500 Kh/a als Anforderungswert für Nichtwohngebäude genannt, die sich je nach Klimaregion auf eine maximale Innentemperatur zwischen 25 und 27 °C beziehen [131]. Die Ergebnisse werden für die Hallenzone (maximal zulässige Temperatur von 26°C), die verschiedenen Testreferenzjahre und verschiedene Komponentenszenarien dargestellt.

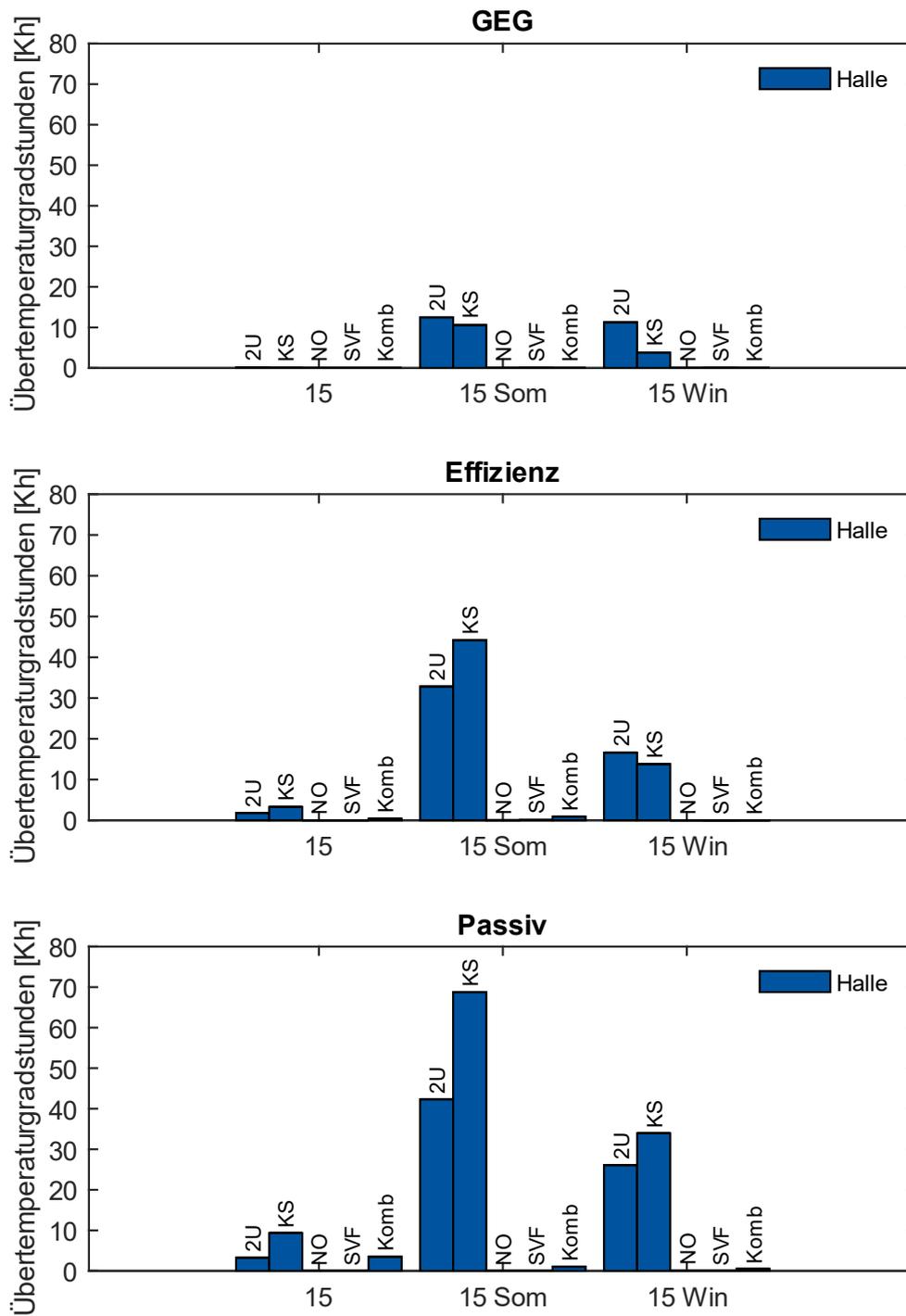


Abbildung 6-12: Übertemperaturgradstunden in der Hallenzone

In allen Fällen zeigt sich, dass die betrachteten Szenarien weit unter dem tolerierbaren Wert bleiben. Im Effizienz- und im Passiv-Fall sind im Vergleich zum GEG-

Fall bei den Geothermieszenarien höhere Werte zu erkennen, was auf den steigenden Kühlbedarf zurückzuführen ist. Gleichzeitig ist der Massenstrom des Kühlsystems begrenzt, wodurch niedrigere Temperaturen für ausreichende Kühlung sorgen müssten. Die freie Kühlung der geothermischen Szenarien macht sich in diesen Fällen bemerkbar. In den solarthermischen und kombinierten Szenarien werden in allen Fällen die Temperaturen eingehalten, da hier eine zusätzliche Kühlung über die Wärmepumpe erfolgt.

6.3.7 Bestimmung des elektrischen Energiebedarfs der Wärmepumpe

Mit den zuvor bestimmten Größen der Komponenten wird der Energiebedarf der Wärmepumpe für die verschiedenen Szenarien ermittelt.

Abbildung 6-13 zeigt den aus dem Simulationsmodell ermittelten gesamten elektrischen Energiebedarf der untersuchten Wärmepumpe der verschiedenen Gebäudeausführungen, Testreferenzjahre und Komponentenszenarien. Im Allgemeinen sinkt der Energiebedarf von GEG über Effizienz zu Passiv. Bei den geothermischen Szenarien sinkt der Energiebedarf im Durchschnitt für alle Testreferenzjahre um 39 % beim Effizienz- und 72 % beim Passivniveau im Vergleich zu GEG. Für die solarthermischen Szenarien sinkt der Energiebedarf im Durchschnitt für alle Testreferenzjahre um 24 % beim Effizienz- und 37 % beim Passivniveau. Für das kombinierte Szenario sinkt der Energiebedarf im Durchschnitt für alle Testreferenzjahre um 30 % beim Effizienz- und 54 % beim Passivniveau. Außerdem beträgt der Energiebedarf für geothermische Szenarien im Durchschnitt nur 46 % des Bedarfs in solarthermischen Szenarien und 73 % des Bedarfs in den kombinierten Szenarien, wobei der Vorteil mit steigendem Dämmniveau deutlich zunimmt.

Darüber hinaus verursacht der geothermische Fall mit Doppel-U-Erdsonden (2U) annähernd den gleichen Bedarf wie die coaxialen Stahlenergiepfähle (KS). Dies verdeutlicht, dass im Vergleich zu Doppel-U-Erdsonden etwa die Hälfte der Anzahl von coaxialen Stahlenergiepfählen ausreicht, um die gleiche thermische Leistung zu erzielen. Der Energiebedarf ist bei den solarthermischen Szenarien am höchsten, da die Wärmepumpe zur aktiven Kühlung eingesetzt werden muss. Auch in diesem Fall verursacht das Solarthermiesystem aus Stahl fast den gleichen Bedarf wie das konventionelle System aus Kunststoff und verdeutlicht den dadurch verringerten Flächenbedarf. Die Kombination aus dem solarthermischen System und dem geothermischen System führt zu einem 39 % geringeren Energiebedarf als das solarthermische Szenario. Die Kombination beider Systeme kann also den Kühlbedarf vollständig decken und den Energiebedarf im Vergleich zum alleinigen solarthermi-

schen Betrieb reduzieren. Darüber hinaus ist es möglich, die erforderlichen Komponentengrößen sowohl der geothermischen als auch der solaren Komponenten im Vergleich zu den einzelnen Technologieszenarien zu reduzieren.

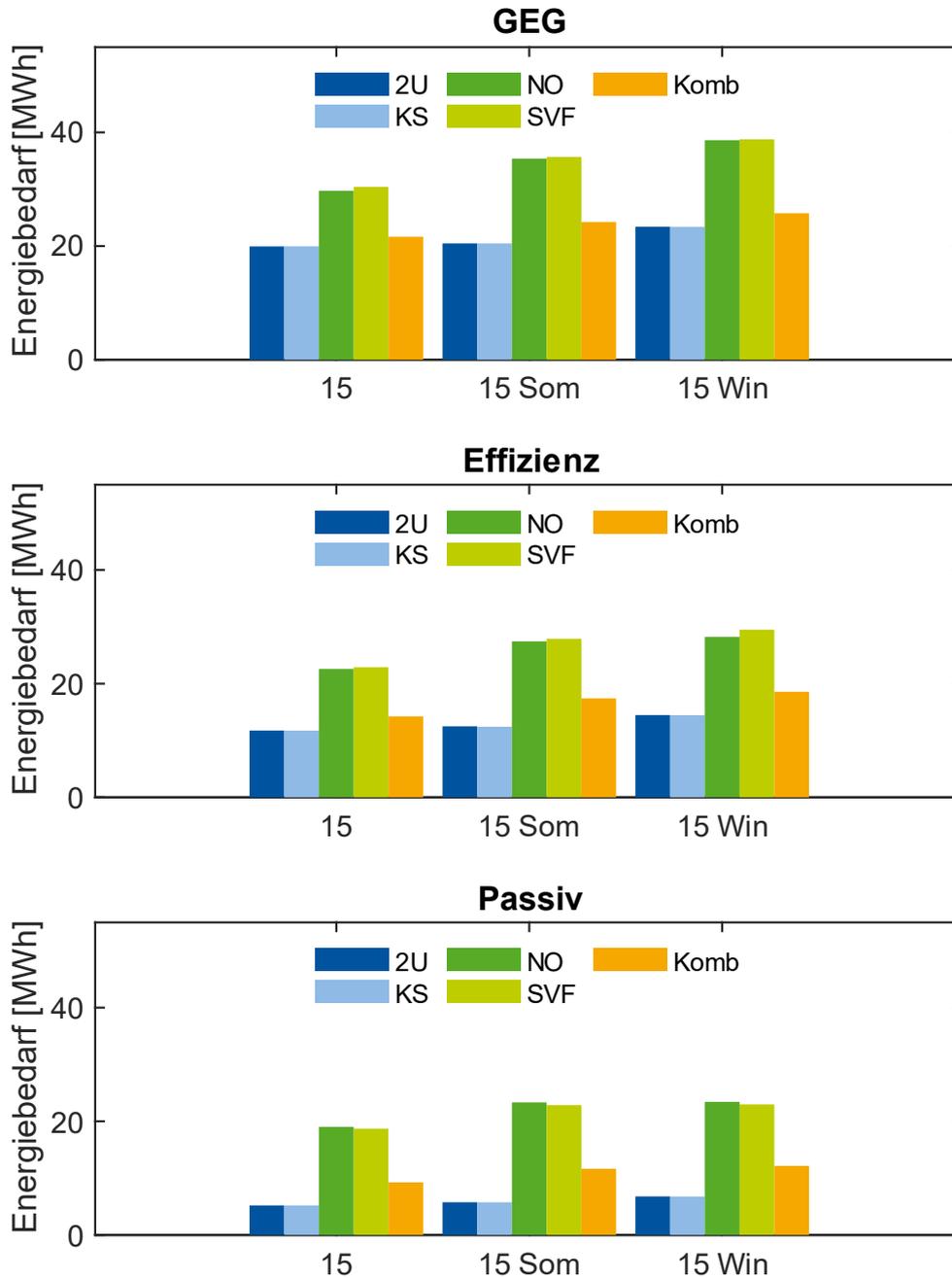


Abbildung 6-13: Elektrischer Energiebedarf für die Wärmepumpe

6.3.8 Dimensionierung und Optimierung des geothermischen Sondenfeldes

Neben den Maximalwerten der Heiz- und Kühllasten hängt die Dimensionierung der Geothermiesonden von der Verteilung der thermischen Energiemengen aus diesen Lasten im Jahresverlauf ab. Der Energieaustausch führt zu saisonalen Veränderungen der Temperaturen des Sondenfluids und des Bodens. Das Erdreich heizt sich über die zugeführte Energiemenge auf oder kühlt über die entzogene Energie ab, bis sich in Kombination mit Wärmeströmen aus der Umgebung ein Gleichgewicht einstellt. Bei einer periodischen Wiederholung des Lastprofils über Jahre, nähern sich die Temperaturverläufe dabei asymptotisch dem dynamischen Gleichgewicht an.

Die Dimensionierung von Sondenfeldern sollte so erfolgen, dass über die Betriebszeit für ein gegebenes Lastprofil die Maximalwerte der Fluidtemperaturen definierte Grenzwerte ($0^{\circ}\text{C}/20^{\circ}\text{C}$) nicht überschreiten. Es ist auf die Ausgeglichenheit zwischen Heizen und Kühlen zu achten, um die notwendigen Längen der Sonden möglichst gering zu halten. Unter Berücksichtigung der Temperaturgrenzen lässt sich damit das Feld an Geothermiesonden sowie die notwendigen Längen dimensionieren [132]. Zur Berechnung wurde das auf thermischen Bodenreaktionsfunktionen basierende GHEtool angewandt, bei dem unter Verwendung der simulativ bestimmten Lastprofile sowie der Bohrlochwiderstände die erforderlichen Tiefen verschiedener Sondenfelder bestimmt werden können [133].

In Abbildung 6-14 sind exemplarisch die maximalen Fluidtemperaturen der koaxialen Stahlenergiepfähle sowie die durchschnittliche Erdtemperatur für das Testreferenzjahr 2015 und die drei Gebäudeausführungen abgebildet. Es zeigt sich, dass bei einer Betrachtung von 20 Jahren die Temperaturverläufe für den GEG-Fall zu einer Abkühlung des Erdreichs führen. Dem Erdreich wird mehr Wärme entzogen als hinzugeführt, da beim GEG-Fall das Heizen überwiegt. Der Effizienz-Fall zeigt keine Temperaturveränderung über die Jahre, da sich der Wärmeentzug und die Wärmezufuhr die Waage halten. Beim Passiv-Fall wird das Erdreich erwärmt, da hier der Kühlbedarf des Gebäudes überwiegt. Entsprechend sollten die Temperaturen im gesamten Betriebszeitraum für die Auslegung der Sonden berücksichtigt werden. Der Einfluss dieser Temperaturveränderung über die Betriebszeit auf die Dimensionierung zeigt sich in den folgenden Detailuntersuchungen.

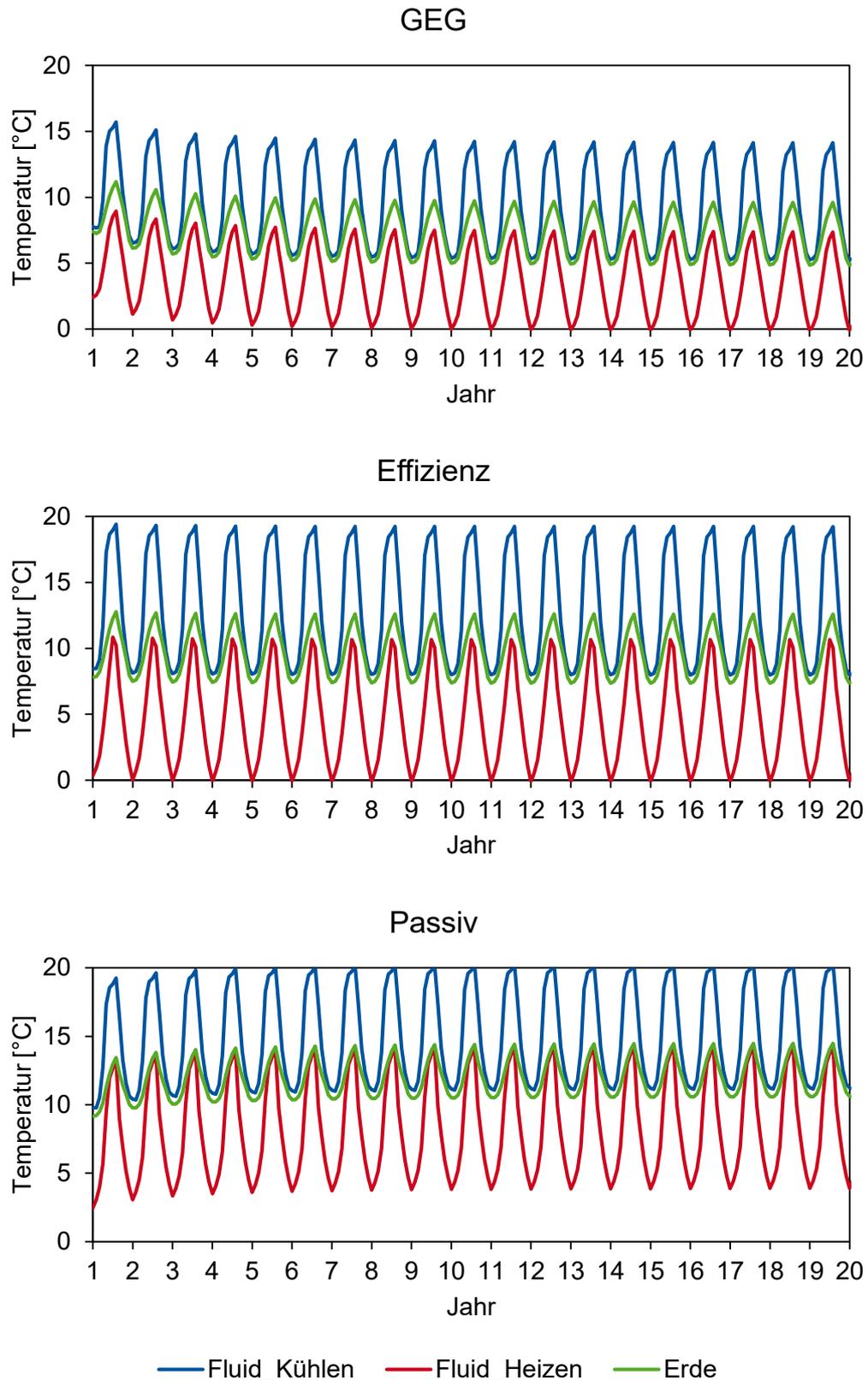


Abbildung 6-14: Temperaturverläufe des Fluids der coaxialen Stahlenergiepfähle sowie des Erdreichs über 20 Jahre

Die notwendige Sondenlänge wurde für ein Sondenfeld mit 6 x 20 Sonden und einem Abstand von 3 m zwischen den Sonden berechnet. Die gewählte Feldgröße

ermöglicht den Einsatz auf der Grundfläche der Halle des Mustergebäudes für statisch erforderliche Gründungspfähle sowie zusätzliche Pfähle zur reinen Energiegewinnung.

In Abbildung 6-15 sind die Ergebnisse der Dimensionierung für die konventionelle Doppel-U-Erdsonde und den coaxialen Stahlenergiepfahl jeweils für die betrachteten Gebäudeausführungen und Testreferenzjahre dargestellt. Hierbei wurde eine Wärmeleitfähigkeit von $1,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ für das Erdreich angesetzt. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die Sondenlänge für den coaxialen Stahlenergiepfahl deutlich geringer ist. Diese kann durch die besseren thermischen Eigenschaften im Durchschnitt um 38 % gegenüber der Länge der konventionellen Doppel-U-Erdsonde reduziert werden. Aufgrund der vergleichsweise ausgeglichenen Energiebilanz über das Jahr zeigt der Effizienz-Fall die niedrigsten Längen. Hier kann die Länge durch den coaxialen Stahlenergiepfahl um bis zu 47 % reduziert werden. Beim GEG-Fall wird ein Überschuss an Wärme und beim Passiv-Fall ein Überschuss an Kälte benötigt. Durch die Minimaltemperatur des Sondenfeldes im Heizfall (Wärmeentzug) und die Maximaltemperatur im Kühlfall (Wärmespeicherung) sind diese Überschussbedarfe maßgeblich für die Sondenlänge. Das Sondenfeld ist in diesen Fällen für den jeweils anderen Bedarf überdimensioniert und führt im Vergleich zum Effizienz-Fall zu einer Erhöhung der Sondenlängen um bis zu 60 %.

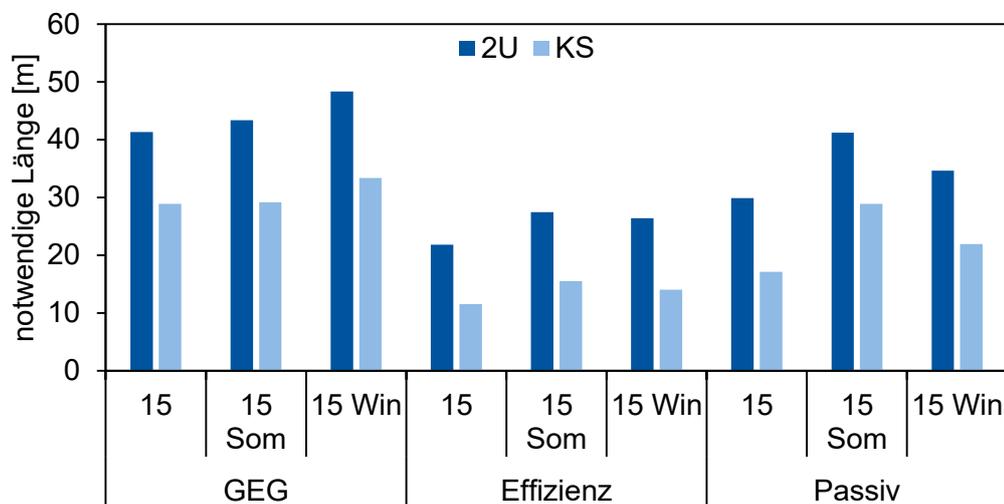


Abbildung 6-15: Geothermiesondenlänge eines 6x20 Feldes zur Deckung der Heiz- und Kühllasten

In Abbildung 6-16 ist die notwendige Länge für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten des Bodens, die untersuchten Sondentypen und verschiedene Dämmniveaus für das Testreferenzjahr 2015 abgebildet. Die Länge kann für Doppel-U-Erdsonden um 42 % reduziert werden, wenn das Erdreich eine Leitfähigkeit von $3,5$ statt $1,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ aufweist. Aufgrund des besseren thermischen Anschlusses kann für den coaxialen Stahlenergiepfahl in diesem Fall sogar eine Längenreduktion um

75 % erreicht werden. Dies zeigt, dass die coaxialen Stahlenergiepfähle insbesondere bei gut wärmeleitendem Boden von Vorteil sind. Die Länge der coaxialen Stahlenergiepfähle ist im Durchschnitt um 49 % geringer als die der Doppel-U-Sonden.

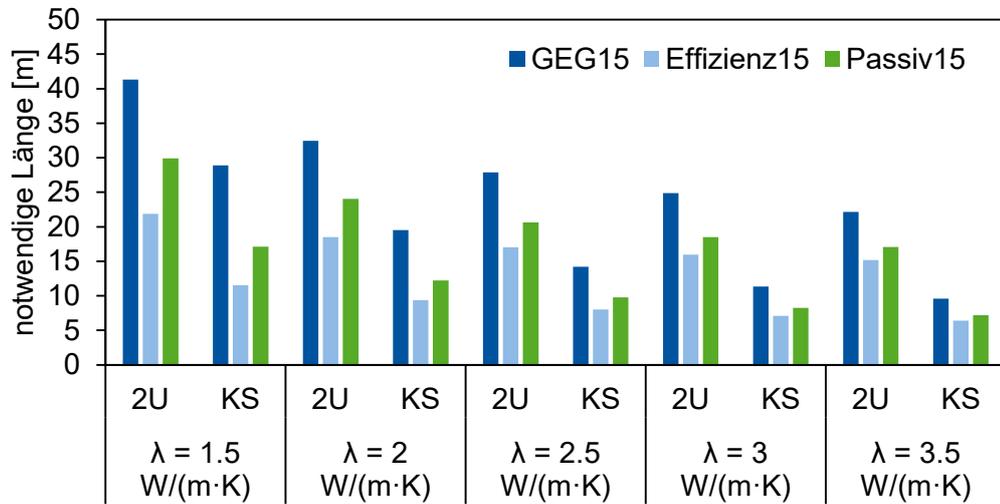


Abbildung 6-16: Geothermiesondenlänge eines 6x20 Feldes für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten des Bodens

Wenn die jährliche Energiebilanz (Heiz- und Kühlbedarf) durch Anpassung des geringeren Wertes ausgeglichen wird, ergeben sich, für eine Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs von 1,5 W/(m·K), die Längen aus Abbildung 6-17. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass gerade für den GEG-Fall (51 %) und den Passiv-Fall (36 %) die Längen deutlich reduziert werden können. Im Effizienz-Fall fällt die Reduktion deutlich geringer aus (7 %). Dies liegt an der bereits nahezu ausgeglichenen Jahresbilanz.

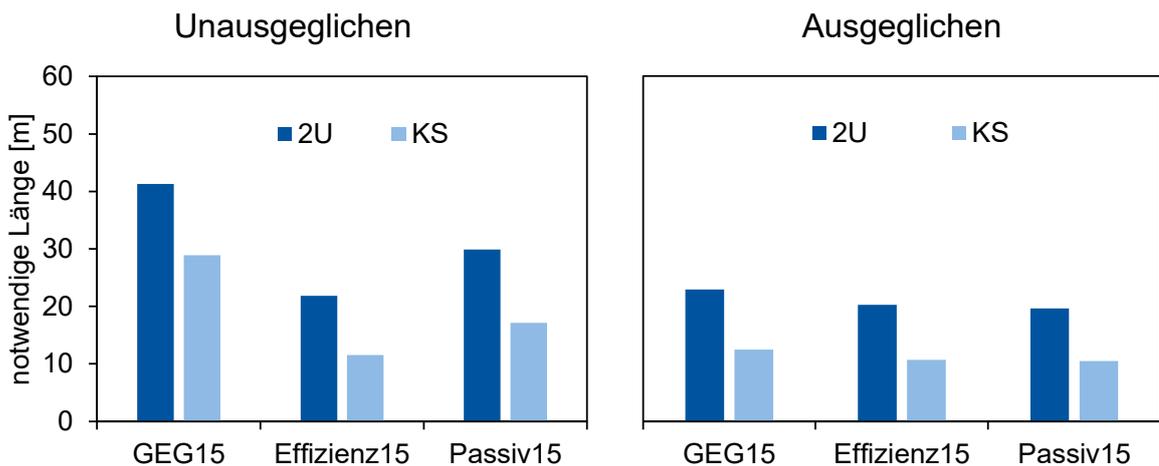


Abbildung 6-17: Geothermiesondenlänge eines 6x20 Feldes in Abhängigkeit der Jahresbilanz, links: unausgeglichen, rechts: ausgeglichen

Zur möglichen Reduktion der Anzahl verlorener Pfähle wurde eine Variation des Sondenfeldes ausgewertet. In Abbildung 6-18 sind die notwendigen Längen für das

6 x 20 und ein 3 x 10 Sondenfeld mit doppeltem Abstand dargestellt. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die Sondenlängen bei der reduzierten Anzahl deutlich größer sind. Diese sind im Durchschnitt 133 % länger für die konventionelle Doppel-U-Erdsonden und 98 % länger für die coaxialen Stahlenergiepfähle bei gleichzeitiger Reduktion der insgesamt erforderlichen Bohrmeter. Die Länge kann also aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung nicht einfach linear skaliert werden.

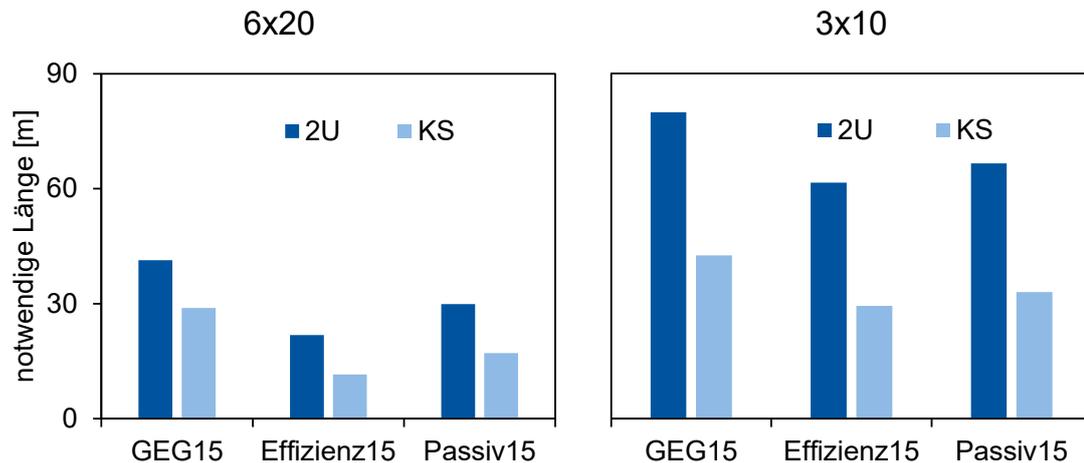


Abbildung 6-18: Geothermiesondenlänge verschiedener Sondenfelder, links: 6x20 Feld, rechts: 3x10 Feld

Die Jahresenergiebilanz kann mit einer Niedertemperatursolarthermieanlage ausgeglichen werden. Diese Anlage kann auf niedrigem Temperaturniveau Wärme einsammeln oder auf höherem Temperaturniveau Wärme an die Umgebung abgeben. Hierzu wurde die erforderliche Fläche für das Testreferenzjahr 2015 für die drei Dämmniveaus und verschiedene Ausrichtungen mit Hilfe des Simulationsmodells in TRNSYS berechnet. Als Parameter für die Module werden die Werte aus Tabelle 4-2 des untersuchten Solarthermiemoduls (ST) sowie des Solarthermiemoduls mit OPV (PVT) verwendet.

In Abbildung 6-19 sind die Ergebnisse der Berechnung dargestellt. Aus der Grafik wird ersichtlich, dass der Passiv-Fall aufgrund des höheren Kühlbedarfs in allen Ausrichtungen bis auf Norden größere Flächen für den Ausgleich benötigt als der GEG-Fall. Dies liegt an der Funktionsweise der Solarthermie, die primär die Wärme der Sonne einsammelt und entsprechend besser zum Heizen als zum Kühlen geeignet ist. Im Passiv-Fall werden für den untersuchten solarthermischen Kollektor 171 bis 207 m² benötigt, wobei die Nordseite den geringsten Flächenbedarf aufweist. Im GEG-Fall werden lediglich 75 bis 97 m² erforderlich, wenn die Nordseite vernachlässigt wird. Aufgrund des höheren Wärmeverlustes des PVT-Kollektors

würde sich dieser im Passiv-Fall anbieten, um die Flächen um bis zu 19 % zu reduzieren. Im Effizienz-Fall sind die resultierenden Flächen aufgrund der größeren Ausgeglichenheit sehr gering.

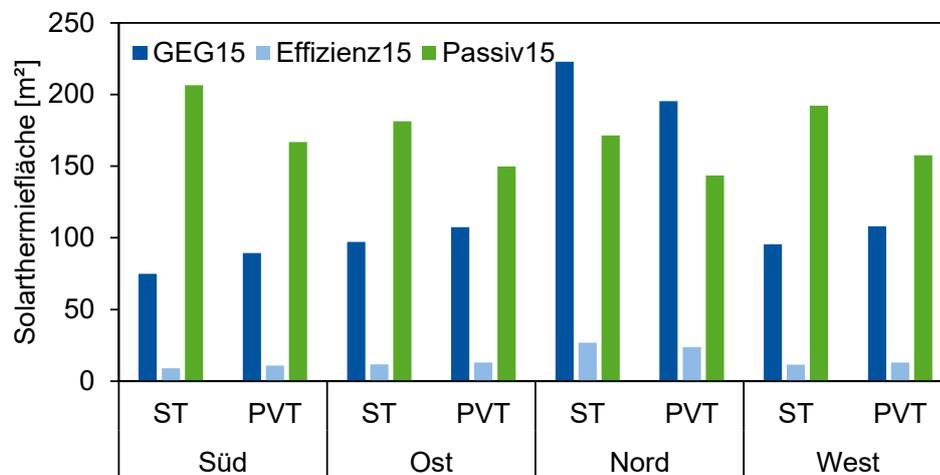


Abbildung 6-19: Zum Bilanzausgleich benötigte Größe der untersuchten solarthermischen Kollektoren (ST) sowie der Kombikollektoren mit OPV (PVT) nach Ausrichtung und Gebäudetyp

6.4 Plusenergiebetrachtung

6.4.1 Methodik

Für Plusenergiegebäude existiert aktuell keine anerkannte einheitliche Definition. Verschiedene Ansätze unterscheiden sich etwa hinsichtlich Systemgrenzen bei der Energiebereitstellung, der Art der Bilanzierung und der betrachteten Zeiträume [134]. Um beim Mustergebäude das bilanzielle Ziel eines Plusenergiegebäudes zu erreichen, muss der Energiebedarf geringer sein als die erzeugte Energie mittels Photovoltaik am Gebäude. Bei dem gewählten Ansatz wird dafür der jährliche Energiebedarf der Wärmepumpe, der Beleuchtung, des Trinkwarmwassers sowie der Belüftung berücksichtigt und einem möglichen Ertrag verschiedener PV-Systeme gegenübergestellt.

Der elektrische Energiebedarf für die Beleuchtung wird dafür nach DIN V 18599 bestimmt, wobei im GEG-Fall die Referenzausführung mit Leuchtstofflampen und im Effizienz- und Passiv-Fall für eine LED Beleuchtung berücksichtigt wird [135]. Der elektrische Energiebedarf des Trinkwarmwassers sowie der Belüftung wird ebenfalls nach DIN V 18599 bestimmt [136, 137]. Die notwendige PV-Fläche A_{PV} wird zunächst für eine auf dem Dach installierte siliziumbasierte PV-Anlage ermittelt. Dafür wird der jährliche Energiebedarf der einzelnen Verbraucher E_i durch den Jah-

resgewinn der PV-Anlage pro Quadratmeter geteilt. Der flächenbezogene Energieertrag der PV-Paneele e_{PV} wird mit TRNSYS und dem Type 103 für ein exemplarisches Modul mit einer Leistung von $191 \text{ W}_p/\text{m}^2$ (Anhang A.1) ermittelt. Es wird eine horizontale Montage und eine Performance Ratio PR von 0,8 angenommen.

$$A_{PV} = \frac{E_{Wärmepumpe} + E_{Beleuchtung} + E_{Trinkwarmwasser} + E_{Lüftung}}{e_{PV} \cdot PR} \quad (6.8)$$

Anschließend wird für die gleichen Randbedingungen die notwendige Fläche für eine OPV-Anlage mit einer Modulleistung von $38 \text{ W}_p/\text{m}^2$ (Anhang A.2) bestimmt und erörtert, wie sich abweichende Leistungen bei dem siliziumbasierten System sowie die Fassadenintegration des OPV-Systems auf den Ertrag und den Flächenbedarf auswirken.

6.4.2 Dimensionierung der erforderlichen PV-Fläche

Die benötigten PV-Dachflächen des siliziumbasierten Systems zur Erzielung eines Plusenergiegebäudes für die verschiedenen Szenarien sind in Abbildung 6-20 dargestellt. Die Anteile der einzelnen Energieverbraucher in Form des elektrischen Energiebedarfs der Wärmepumpe, der Beleuchtung, des Trinkwarmwassers (TWW) sowie der Lüftung sind abgebildet.

Alle Ergebnisse liegen unterhalb von 600 m^2 , was der halben Dachfläche der Halle entspricht. Daher ist es in allen Szenarien möglich, ein Plusenergiegebäude mittels einer konventionellen PV-Anlage zu erreichen. Der Passiv-Fall erfordert die geringste PV-Fläche. Im geothermischen Szenario ist in diesem Fall bereits eine Fläche von 300 m^2 ausreichend. Eine Betrachtung aller Szenarien führt hier zu einer durchschnittlichen Reduktion von 32 % der erforderlichen Fläche im Vergleich zum GEG-Fall. Bereits im Effizienz-Fall ist der Flächenbedarf 25 % geringer als im GEG-Fall. Neben dem verringerten Bedarf der Wärmepumpe macht sich in beiden Fällen die effizientere Beleuchtung bemerkbar, welche die erforderliche Fläche bereits um 15 % reduziert.

Es zeigt sich, dass der Heiz- und Kühlbedarf, der über die Wärmepumpe gedeckt wird, nicht der primäre Einflussfaktor auf die PV-Fläche im Gewerbebau ist. Der Anteil der übrigen Energieverbraucher ist größer und erhöht sich weiter mit zunehmendem Dämmstandard der Gebäudehülle.

Abbildung 6-21 zeigt einen Vergleich der erforderlichen PV-Dachfläche zwischen einer klassischen siliziumbasierten PV-Anlage und der untersuchten organischen PV zur Deckung des Energiebedarfs des Mustergebäudes für das Testreferenzjahr 2015. Aufgrund des geringeren Wirkungsgrades der OPV liegt hier die erforderliche

Fläche je nach Fall und Szenario zwischen 1300 und 2300 m². Da die Dachfläche des Mustergebäudes in ihrer Größe beschränkt ist und der nutzbare Bereich durch Öffnungen und Wartungsbereiche zusätzlich reduziert wird, schließt sich eine alleinige OPV Nutzung auf dem Dach aus.

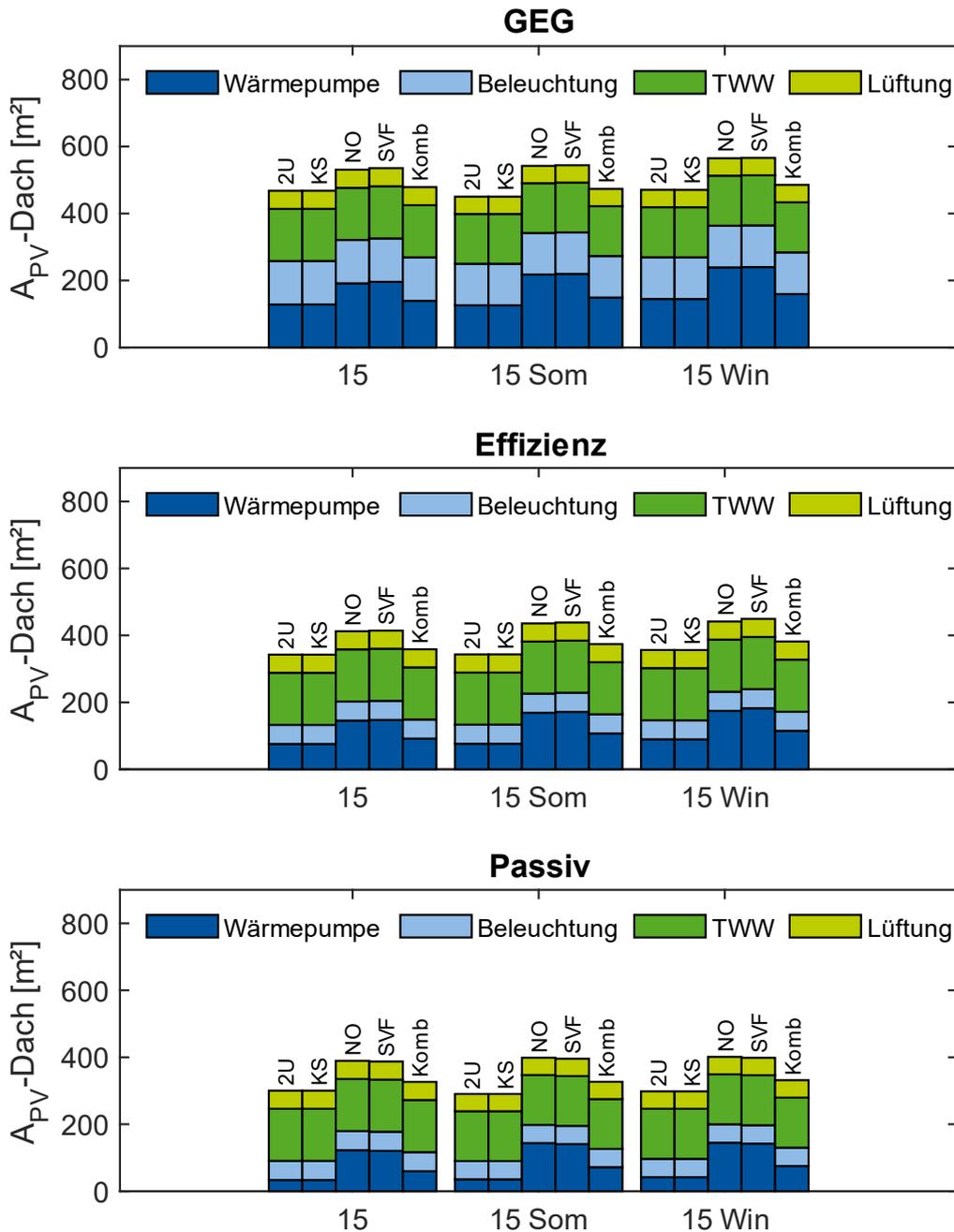


Abbildung 6-20: Erforderliche PV-Dachfläche eines siliziumbasierten Systems zur Erzielung eines Plusenergiegebäudes

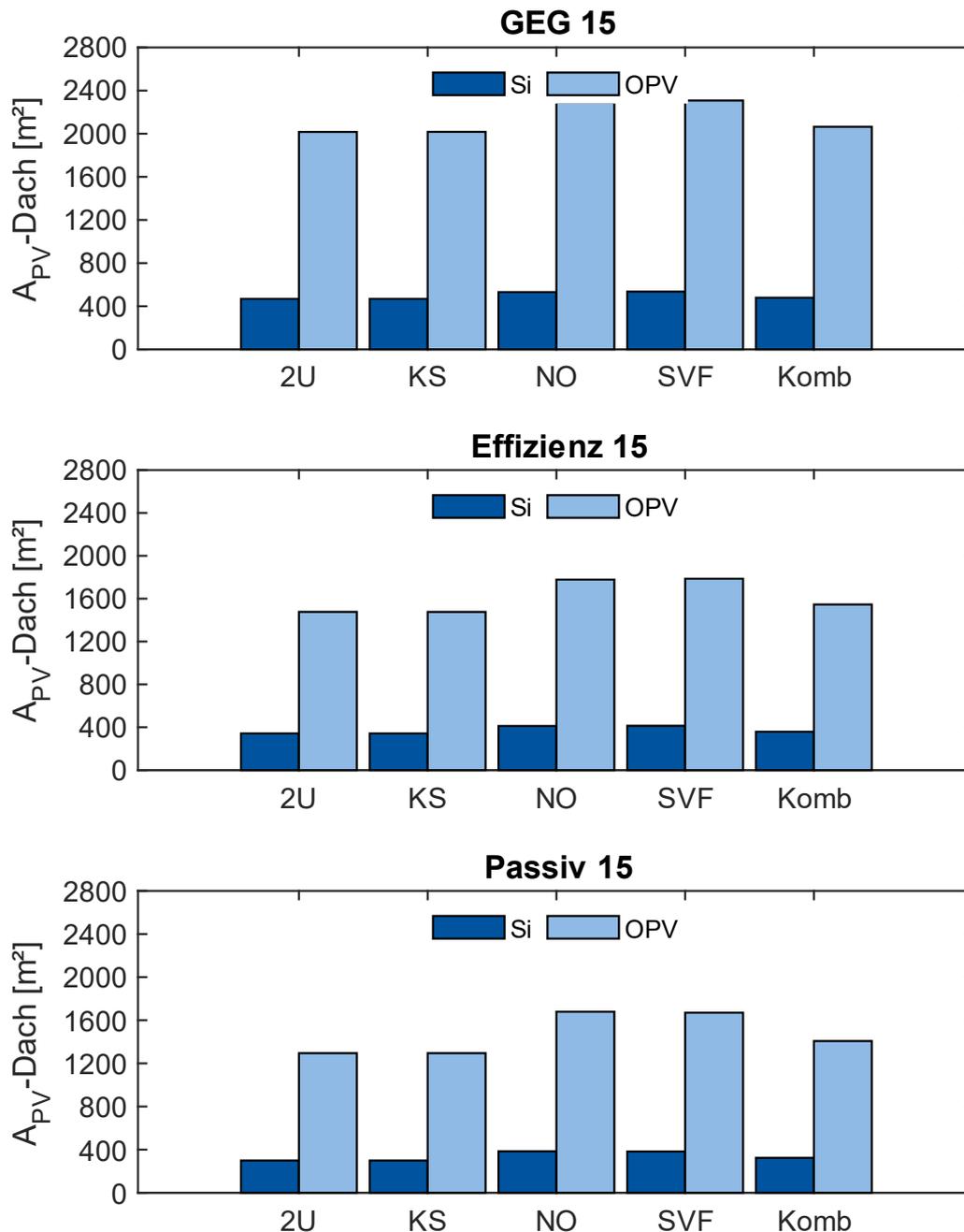


Abbildung 6-21: Vergleich der erforderlichen PV-Dachfläche zwischen einer klassischen siliziumbasierten PV-Anlage (Si) und der untersuchten OPV zur Erzielung eines Plusenergiegebäudes

Die in Kapitel 4.4.2 untersuchten OPV-Module können im Jahresverlauf auf dem Dach ca. 23 % der Leistung einer klassischen, siliziumbasierten, horizontalen PV-Anlage erzeugen (Abbildung 6-22). Folglich sind bei der alleinigen Dachnutzung große Flächen erforderlich, um Plusenergiegebäude zu erzielen. Verfügbare freie

Flächen in der Fassade könnten jedoch dafür genutzt werden, den Energieertrag mittels OPV zu steigern. Im Vergleich zu der siliziumbasierten PV-Anlage auf dem Dach lässt sich, je nach Ausrichtung pro m^2 , 8-19 % der Leistung zusätzlich erzeugen.

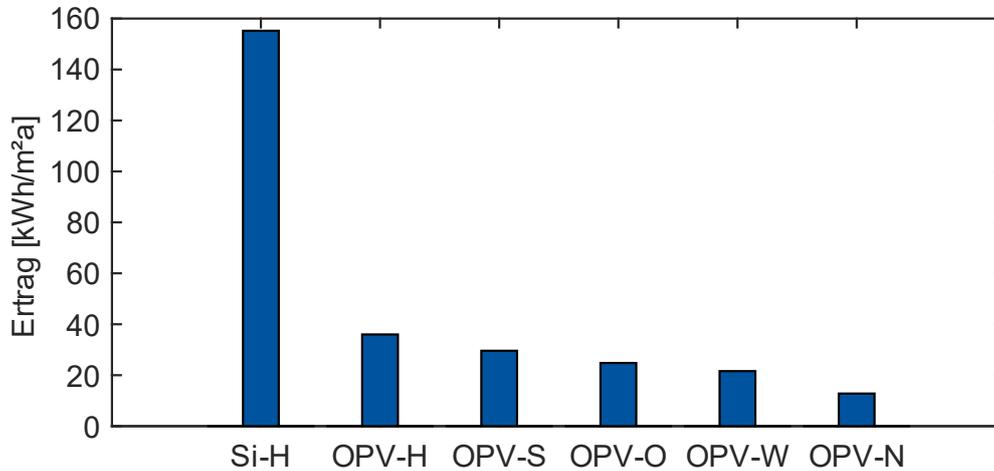


Abbildung 6-22: Flächenbezogener Jahresertrag horizontaler und vertikaler PV-Module

Der potentielle Ertrag der verschiedenen PV-Systeme lässt sich aus Abbildung 6-23 für beliebige Flächen ableiten. Für konventionelle siliziumbasierte Systeme sind drei verschiedene Modulleistungen horizontaler Module abgebildet. Für die untersuchten OPV-Module sind neben der horizontalen auch die fassadenseitigen Ausrichtungen berücksichtigt.

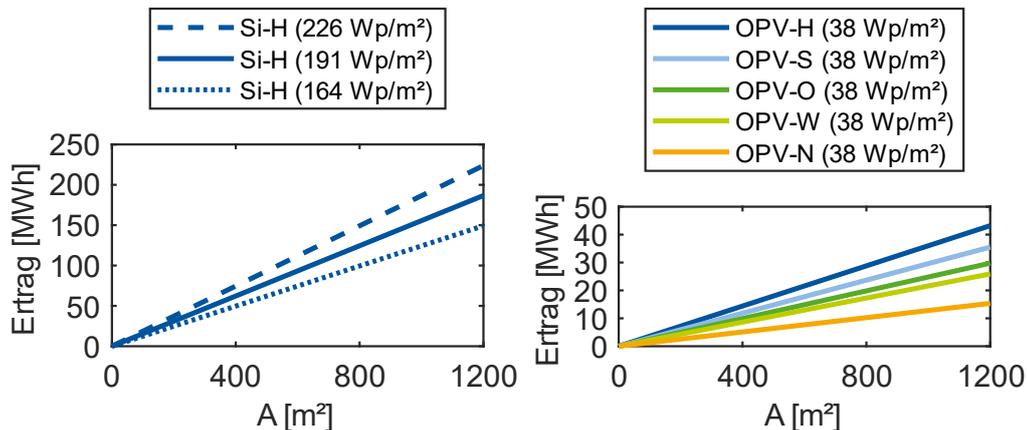


Abbildung 6-23: Potentieller Ertrag verschiedener PV-Systeme in Abhängigkeit der Fläche, links: siliziumbasierte PV-Module, rechts: OPV-Module verschiedener Orientierungen

Im Vergleich zu dem betrachteten siliziumbasierten Modul, wird durch die Variation der Modulleistungen, in einem Bereich zwischen 164 und 226 W_p/m^2 für exemplarische mono- sowie polykristalliner Module (Anhang A.3 und A.4), bei den klassischen Systemen der Ertrag und der damit verbundene Flächenbedarf auf dem Dach in einer Größenordnung von ca. 20 % verändert. Das Potential der OPV ist deutlich

geringer und die Orientierung wirkt sich spürbar auf den Flächenbedarf aus. Der zusätzliche großflächige Einsatz in der Fassade kann allerdings den Gesamtertrag deutlich steigern.

Abbildung 6-24 zeigt den Ertrag der Systeme für verschiedene PV-Dachflächen bei einer angenommenen exemplarischen Anwendung der OPV auf 83 % der Bruttofassadenflächen der Halle des Mustergebäudes, was ca. 1200 m² entspricht. Dadurch ist ein zusätzlicher Ertrag von ca. 26 MWh möglich. Durch die Kombination mit der Fassade lässt sich so der Flächenbedarf auf dem Dach deutlich reduzieren. Für den minimalen Bedarf im Testreferenzjahr 2015 (Min, Passiv+Geothermie) sind bei einer siliziumbasierten Anlage 135 m² ausreichend. Auch eine komplette OPV-Lösung lässt sich in diesem Fall mit 600 m² OPV auf dem Dach realisieren. Zur Deckung des maximalen Bedarfs (Max, GEG+Solar) lässt sich die siliziumbasierte Fläche auf 370 m² reduzieren. Für eine reine OPV-Lösung wäre in dem Fall eine nutzbare Fläche von 1600 m² auf dem Dach erforderlich.

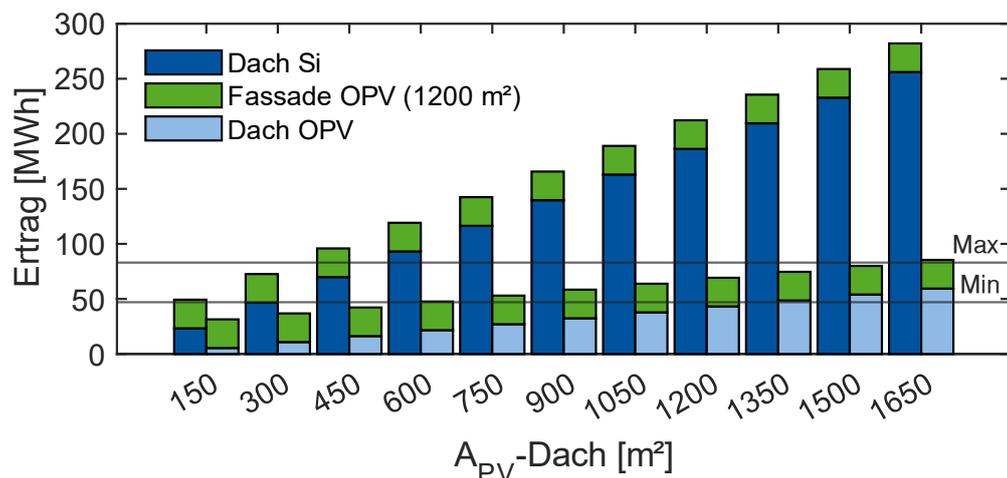


Abbildung 6-24: Potentieller Ertrag verschiedener PV-Systeme für unterschiedliche PV-Dachflächen sowie minimaler und maximaler Bedarf der untersuchten Fälle

6.5 Zusammenfassung

Anhand eines Mustergebäudes wurden numerische Simulationen für unterschiedliche Gebäudeausführungen und Gebäudetechnikkonzepte durchgeführt. Bei den Qualitäten der Gebäudehülle wurden neben dem gesetzlichen Mindestniveau eine effizientere und eine Passivhausvariante betrachtet. Es zeigte sich, dass bei Einhaltung der Mindestanforderungen des GEG der Heizbedarf überwiegt. Eine Verbesserung der U-Werte führt allerdings auf der anderen Seite zu einer Erhöhung des Kühlbedarfs, welcher bei der Passivhausausführung überwiegt.

Die Gebäudetechnikkonzepte basieren auf einer Wärmepumpe als zentralem Element. Im ersten Konzept wird die Geothermie als Wärmequelle für die Wärmepumpe und als Wärmesenke für die Kühllast des Gebäudes genutzt. Dabei werden konventionelle Doppel-U-Erdsonden mit einem coaxialen Stahlenergiepfahl verglichen. Im zweiten Konzept wird Solarthermie als Wärmequelle oder -senke für die Wärmepumpe genutzt. Hier wird ein konventioneller Kunststoffabsorber mit einem in die Stahlvorhangfassade integrierten Solarkollektor verglichen. Das dritte Konzept kombiniert die Stahlvarianten der vorherigen Konzepte.

Es zeigte sich, dass durch die stahlbasierten Lösungen signifikante Sondenlängen und Solarthermieflächen eingespart werden können, ohne einen Mehrverbrauch an Energie oder Einschränkungen am Komfort hinnehmen zu müssen. Für den exemplarischen Boden lassen sich die Sondenlängen um fast 50 % und die Solarkollektorflächen um über 20 % reduzieren. Die konkrete Einsparung ist von den thermischen Eigenschaften des Bodens, der Dimensionierung des Sondenfeldes und der Gebäudeausführung abhängig. Wenn darauf geachtet wird, dem Erdreich nicht mehr Wärme zu entziehen als ihm zugeführt wird, können weitere Sondenlängen eingespart werden. Hierbei kann die in die Stahlvorhangfassade integrierte Solarthermieanlage einen entscheidenden Beitrag leisten und den Heiz- und Kühlbedarf des Gebäudes ausgleichen.

Der Energiebedarf für die geothermischen Szenarien beträgt im Durchschnitt nur 47 % des Bedarfs der solarthermischen Szenarien und 75 % des Bedarfs in den kombinierten Szenarien, wobei der Vorteil mit steigendem Dämmniveau deutlich zunimmt. Durch die Kombination beider Systeme lassen sich Übertemperaturgradstunden im Gebäude in allen Fällen vermeiden und die erforderlichen Komponentengrößen im Vergleich zu den einzelnen Technologieszenarien reduzieren.

Aus den Berechnungen lässt sich feststellen, dass für alle betrachteten Fälle die Umsetzung eines Plusenergiegebäudes möglich ist. Neben der Wärmepumpe sind vor allem die anderen Energieverbraucher für den Energiebedarf verantwortlich, der dafür ausgeglichen werden muss. Für alle betrachteten Dämmniveaus und Gebäudetechnikkonzepte reicht eine siliziumbasierte PV-Anlage auf der Dachfläche aus, um im Jahresmittel mehr Energie zu produzieren als für den Betrieb benötigt wird. Eine reine OPV-Lösung ist im Fall einer verbesserten Dämmung in Kombination mit Geothermie möglich, falls neben dem Dach auch ein großflächiger Einsatz in den Fassaden erfolgt.

7 Fazit und Ausblick

7.1 Fazit

Um mit Hilfe von Plusenergiegebäuden in Zukunft auch im Gewerbebau weitgehend oder vollständig auf fossile Energieträger verzichten zu können, bedürfen die Gebäude eines ganzheitlichen Heiz- und Kühlsystems, in welchem alle lokalen Energiequellen und -senken vernetzt werden. Die zentrale Schaltstelle kann dabei eine Wärmepumpe sein, die für alle Anwendungen die geforderten Wassertemperaturen bereitstellt. Um die Effizienz der Wärmepumpe zu maximieren, müssen die Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rücklauf möglichst niedrig sein und die Oberflächen der Wärmeüberträger entsprechend groß.

Als Beitrag zur Reduktion des Verbrauchs von nicht-erneuerbaren Energien im Gebäudesektor wurden dafür im Rahmen dieser Arbeit bauteilaktivierte Lösungen aus Stahl untersucht, Demonstratoren umgesetzt sowie Anhaltswerte für die Leistungsfähigkeit ermittelt.

Thermisch aktivierte Trapezprofile

Zur Temperierung von Hallengebäuden können neben den klassischen, im Raum installierten Systemen zur Wärmeübergabe auch bauteilintegrierte Systeme verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Integration von Strahlungsplatten in Trapezprofile für verschiedenen Fälle untersucht und anhand von Demonstratoren messtechnisch ausgewertet.

Die Leistungsfähigkeit der thermisch aktivierten Trapezprofile konnte belegt werden. Die Betriebskennlinie für den Kühlfall kann hierfür mit $11,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ angegeben werden und übersteigt somit die Leistungsfähigkeit klassischer geschlossener Kühldecken. Im Heizfall konnte eine Betriebskennlinie mit einer Steigung von $8,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ bestimmt werden. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Stahltrapezprofils sowie der Strahlungsplatten aus Aluminium kann ein Wärmetransport hin zu den Untergurten nachgewiesen werden. Somit wird auch das Trapezprofil thermisch aktiviert und beteiligt sich dadurch an der Wärme- bzw. Kälteübergabe zum Raum. Besonders deutlich wird dies bei einer reduzierten Anzahl aktivierter Strahlungsplatten. Eine Halbierung führt lediglich zu einer Reduktion der Leistungsabgabe um ca. 40 %.

Aufgrund der Integration des Systems und der thermischen Mitwirkung der Trapezprofile können größere Flächen genutzt werden, wodurch die notwendigen Temperaturunterschiede zwischen Wasser- und Raumtemperatur reduziert werden können. Der Einsatz von Niedertemperaturquellen wie der Geothermie wird dadurch

ermöglicht. Die operative Temperatur wird dabei nicht verändert. Dies bietet die Möglichkeit, die Lufttemperatur sowie die damit verbundenen Wärmeverluste über die Umschließungsflächen, ohne Einbußen bei der thermischen Behaglichkeit, zu reduzieren. Die so entstehenden großflächigen strahlungsbasierten Heiz- und Kühlflächen ermöglichen eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Raum ohne nennenswerte vertikale Temperaturgradienten und führen zu einer hohen thermischen Behaglichkeit.

Handelsübliche Heiz- und Kühlflächen werden in der Regel über Abhangkonstruktionen am Tragwerk bzw. der Dachkonstruktion befestigt. Neben dem baulichen Aufwand beeinflussen diese Systeme den Raum und sind zudem anfällig für Ablagerungen und Verschmutzungen. Durch eine Integration der Heiz- und Kühlflächen in die Trapezprofile und aufgrund des geringen Konvektionsanteils bei der Energieübergabe wird die Verschmutzungsproblematik reduziert und es entsteht eine gleichmäßige und annähernd ebene Optik.

Die Energieübergabe kann bei entsprechender Verschaltung der aktivierten Trapezprofile nach Bedarf verteilt bzw. gesteuert werden. Bei unterschiedlichen Tätigkeitsbereichen innerhalb eines Raumes, bzw. Gebäudebereichen mit abweichenden Randbedingungen wie Toröffnungen, können in diesen Bereichen die Vorlauftemperaturen verändert und gezielt an den Bedarf angepasst werden.

Die Integration der Strahlungsplatten in das Trapezprofil anhand des Demonstrators lässt sich auf beliebige Geometrien anwenden. Bezüglich der Leistungsabgabe und der Optik hat sich gezeigt, dass eine Integration im unteren Bereich am vorteilhaftesten ist. Durch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte numerische Modell ist eine Vorbemessung verschiedener Trapezprofilgeometrien möglich.

Fassadenintegrierte Lösungen zur Nutzung erneuerbarer Energien

Fassadenflächen im Gewerbebau bieten sich geradezu an, um über ihre großen Flächen Solarenergie zu nutzen. Solarthermische Kollektoren und Photovoltaikanlagen mit geringeren flächenspezifischen Leistungen werden in diesem Zusammenhang interessant. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Lösung vorgestellt wie man Fassadenmaterialien einer VHF aus Stahlblech thermisch aktiviert und mittels optionaler organischer PV auch für die Stromproduktion nutzen kann. Darüber hinaus wurden verglaste und unverglaste OPV-Module auf Stahlsandwichelemente appliziert und die Demonstratoren messtechnisch ausgewertet.

Die Ergebnisse der Untersuchungen der solarthermisch aktivierten VHF zeigen, dass diese als reines Solarthermiemodul mit einem optischen Wirkungsgrad von ca. 0,8 die solare Strahlung schlechter aufnehmen als übliche Kunststoffabsorber. Die

PVT-Module weisen aufgrund der aufgeklebten OPV-Module und der einhergehenden verringerten Wärmeleitfähigkeit einen optischen Wirkungsgrad von ca. 0,6 auf. Der thermische Verlustkoeffizient konnte beim reinen Solarthermiemodul zu ca. $15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und beim PVT-Modul zu ca. $17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ bestimmt werden, was höher ist als bei üblichen Kunststoffabsorbieren.

Die untersuchten solarthermisch aktivierten Kollektorpaneele sind trotzdem vielversprechend, da sie dadurch die Möglichkeit bieten, Wärme auf niedrigem Temperaturniveau zu gewinnen oder auf hohem Temperaturniveau an die Umgebung abzugeben. Dies ist gerade dann sinnvoll, wenn das Erdreich nicht geothermisch aktiviert werden kann. Sollte dies möglich sein, kann die Solarthermie dazu genutzt werden, eine Unterkühlung oder Überhitzung des Erdreichs zu verhindern.

Eine optische Beeinträchtigung der Gebäudehülle durch die unsichtbare thermische Aktivierung mittels rückseitig angebrachter offener Absorber findet nicht statt und öffnet somit diese Technologie für weitere Anwendungsmöglichkeiten auch in architektonisch anspruchsvollen Szenarien.

Die untersuchten OPV-Systeme können mit den Leistungen von siliziumbasierten PV-Modulen auf dem Dach nicht konkurrieren. Für die verglasten Module konnte ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von ca. 2,7 % und für die unverglasten Module ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von ca. 3,3 % ermittelt werden. Je nach Orientierung der Fassaden lassen sich pro m^2 lediglich 8 bis 19 % der Leistung einer konventionellen horizontalen PV-Anlage auf dem Dach erzielen.

Der Wirkungsgrad der OPV-Module lässt sich allerdings durch weitere technische Entwicklung steigern. Da diese noch verhältnismäßig neu auf dem Markt sind und entsprechendes Potential nicht ausgeschöpft ist, ist in Zukunft auch damit zu rechnen.

Im Gegensatz zu den konventionellen Systemen führen sich erwärmende Module zu keinen negativen Auswirkungen auf den Ertrag, da organische PV nicht temperatursensitiv ist. Eine Verglasung kann allerdings zu einer Annäherung an die maximal angegebenen Betriebstemperaturen führen.

Das geringere Gewicht sowie die einfache Applikation mittels Klebtechnik auf verschiedenen Oberflächen ermöglichen eine leichtere Integration in die Gebäudehülle und damit die zusätzliche Aktivierung großflächiger Bereiche.

Im Vergleich zu konventionellen siliziumbasierten Zellen sind die Herstellungskosten der Module geringer. Laut Herstellerangaben produzieren OPV-Module den Einsatz an Energie für ihre Herstellung innerhalb von Monaten anstatt von Jahren. Dies kann sie darüber hinaus ökologisch sinnvoller machen.

Geothermische Nutzung von Gründungspfählen

Neben der statischen Funktion können Stahlpfähle auch geothermisch aktiviert werden und somit der Energiebereitstellung als Stahlenergiepfähle dienen. Die Integration der dafür erforderlichen Sonden in Gründungspfähle aus Stahl wurde im Rahmen dieser Arbeit erfolgreich umgesetzt. Koaxiale Demonstratoren unterschiedlicher Länge sowie eine Ausführung mit Doppel-U-Sonde wurden dafür geplant, realisiert und messtechnisch untersucht.

Mit Hilfe des Stahls kann der Wärmewiderstand des Bohrlochs zum Teil deutlich gesenkt werden. Insbesondere die koaxiale Ausführung zeigt hier ein großes Potential aufgrund des direkten Kontakts zum Boden und der höheren Oberfläche. Aufgrund der thermischen Eigenschaften des Stahls und dem besseren thermischen Anschluss der Sonden an das Erdreich können so höhere Leistungen erzielt werden. Die neu entwickelten koaxialen Stahlenergiepfähle ermöglichen je nach Randbedingungen einen deutlichen Mehrertrag im Vergleich zu konventionellen Doppel-U-Erdsonden. Für das Erdreich am Standort in Aachen liefern diese Stahlenergiepfähle ca. 110 W/m im Vergleich zu ca. 54 W/m für die Erdsonden. In der Doppel-U Ausführung konnte eine Leistungssteigerung von ca. 10 % gezeigt werden. Beide Ausführungen haben das Potential erforderliche Sondenlängen zu reduzieren.

Bei der Dimensionierung ist darauf zu achten den Boden nicht zu überhitzen oder zu unterkühlen, indem zu viel Wärme eingeführt oder extrahiert wird. Dabei kann die Solarthermie helfen, indem das Erdreich über den Ertrag der Solarthermie erwärmt, bzw. in der Nacht heruntergekühlt wird.

Im Vergleich zu klassischen Erdsonden, die üblicherweise zur geothermischen Energienutzung verwendet werden, können sich durch Stahlenergiepfähle Kostenvorteile ergeben, da reine Sondenbohrungen vermindert werden. Im Vergleich zu anderen Pfahlarten konnten wirtschaftliche sowie ökologische Vorteile dargestellt werden. Größter Vorteil aus ökologischer Sicht ist die Möglichkeit, die Stahlenergiepfähle rückstandlos zu entfernen, was im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch gezeigt wurde.

Plusenergiegebäude mittels der untersuchten Technologien in Gebäudesimulationen

Mit Hilfe eines Mustergebäudes wurden numerische Simulationen verschiedener Varianten durchgeführt. Die Gebäudetechnikkonzepte beinhalteten die untersuchten stahlbasierten Technologien und wurden mit konventionellen Systemen der Geothermie und der Solarthermie in verschiedenen Technologieszenarien verglichen.

Anhand eines Ansatzes zur Vordimensionierung wurden für die einzelnen Komponenten Dimensionierungsgrößen bestimmt. Durch die stahlbasierten Lösungen lassen sich signifikante Sondenlängen und Solarthermieflächen einsparen, ohne einen Mehrverbrauch an Energie oder Einschränkungen am Komfort hinnehmen zu müssen. Die Solarkollektorflächen lassen sich um über 20 % reduzieren, die Sondenlängen um ca. 50 %, wobei die konkrete Einsparung von den thermischen Eigenschaften des Bodens, der Dimensionierung des Sondenfeldes und der Gebäudeausführung abhängt. Wenn darauf geachtet wird, dem Erdreich nicht mehr Wärme zu entziehen als ihm zugeführt wird, können weitere Sondenlängen eingespart werden. Hierbei kann die in die Stahlvorhangfassade integrierte Solarthermieanlage einen entscheidenden Beitrag leisten und den Heiz- und Kühlbedarf des Gebäudes ausgleichen. Im Vergleich zu den einzelnen Technologieszenarien lassen sich so beide Komponentengrößen weiter reduzieren.

Für die betrachteten Dämmniveaus und Gebäudetechnikkonzepte des Mustergebäudes reicht eine siliziumbasierte PV-Anlage auf der Dachfläche aus, um im Jahresmittel mehr Energie zu produzieren als für den Betrieb benötigt wird. Eine reine OPV-Lösung ist im Fall einer verbesserten Dämmung in Kombination mit Geothermie möglich, falls neben dem Dach auch ein großflächiger Einsatz in den Fassaden erfolgt. Folglich können auch im Gewerbebau Plusenergiegebäude in Metalleichtbauweise zum übergeordneten Ziel der Reduktion von nicht-erneuerbaren Energien im Gebäudesektor beitragen.

7.2 Ausblick

Für die thermische Aktivierung von Stahltrapezprofilen konnten viele Vorteile aufgezeigt werden. Die Integration der dafür notwendigen Strahlungsplatten in die Trapezprofile sollte in Zukunft weiter optimiert werden. Ziel muss es sein, die notwendigen Arbeitsschritte zu verringern und vorgefertigte universelle Systeme zu entwickeln. Weitergehende Untersuchungen könnten sich daher mit stärker vorgefertigten Systemen befassen, die den Einsatz in verschiedenen Stahltrapezprofilen ermöglichen.

Die unsichtbare Integration solarthermischer Anlagen in großflächige Fassadenteile hat ein großes Potential in modernen Gebäudetechnikkonzepten zum Einsatz zu kommen. Dafür müssen zukünftig aber auch Konzepte zum Anschluss der einzelnen Module sowie Auswirkungen auf die Hydraulik untersucht werden.

Der Einsatz von OPV-Modulen an der Fassade muss in den Brandschutzkonzepten der Gebäude berücksichtigt werden. Eine Verglasung könnte zu brandschutztechnischen Vorteilen führen, was in weiteren Versuchen überprüft werden sollte. Bei einer Verglasung sind allerdings die maximalen Temperaturen hinter dem Glas zu beachten und Lüftungsmöglichkeiten vorzusehen, um den Betrieb der Module nicht zu gefährden. Es ist fraglich, ob der zusätzliche Aufwand hinsichtlich Kosten, Statik und Montage bei damit einhergehender Minderung des Ertrages zu einer sinnvollen Lösung führt. Auf der anderen Seite eröffnet eine Glasabdeckung viele gestalterische Möglichkeiten und die Option einer unsichtbaren Energieproduktion großflächiger Fassadenteile. Daher sollte dieser Ansatz in Zukunft weiter untersucht werden.

Stahlenergiepfähle wurden hinsichtlich der potentiellen Leistung und der Integrationsmöglichkeit ins Gründungskonzept als überzeugende Lösung präsentiert. Eine Herausforderung der Stahlenergiepfähle sind die Verbindungsstellen der einzelnen Segmente sowie der Anschluss an den Kopf bzw. die Bodenplatten. Die Zusammensetzung aus einzelnen Rohrstücken sowie weiteren Bestandteilen hat auf der Baustelle den Vorteil, auf die individuelle Situation vor Ort eingehen zu können. Eine Optimierung der einzelnen Bestandteile sowie eine größere Vorfertigung eröffnet allerdings die Möglichkeit einer schnelleren Bauausführung und die Verringerung von potentiellen Schwachstellen an den Verbindungsstellen der Elemente. Hier könnten weitere Untersuchungen anschließen, um marktgerechte Systeme für einen großflächigen Einsatz dieser Technik zu entwickeln.

Für eine bilanzielle Bewertung von Plusenergiegebäuden könnte in Zukunft auch der individuelle Stromverbrauch durch die Nutzung des Gebäudes berücksichtigt werden. Darüber hinaus kann die Berücksichtigung der sogenannten grauen Energie (Energieeinsatz für die Erstellung und Entsorgung des Gebäudes sowie der einzelnen Komponenten) dazu beitragen, Plusenergiegebäude auch über den Lebenszyklus zu bewerten.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) - Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist
- [2] Europäisches Parlament: Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, 2010
- [3] Bundesregierung: Integriertes Energie- und Klimaprogramm (IEKP) der Bundesregierung, 2007
- [4] Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze vom 08.08.2020. GEG, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. 2020
- [5] DIN V 18599-5:2018-09. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen*
- [6] Bolsius, J.: Raumlufthygiene in modernen Hallengebäuden – beheizt mit Gasinfrarot-Heizstrahlern, Hochschule Zittau/Görlitz 2011
- [7] Oschatz, B. u. Bolsius, J.: Thermische Behaglichkeit in modernen Hallengebäuden – beheizt mit Hellstrahlern, Hochschule Zittau/Görlitz 2011
- [8] Oschatz, B., Rosenkranz, J. u. Bolsius, J.: Untersuchungen zur thermischen Behaglichkeit in Hallengebäuden mit Luftheizungen, Hochschule Zittau/ Görlitz 2013
- [9] Klocke, B., Heimlich, F. u. Petermann, H. (Hrsg.): Handbuch der Gasverwendungstechnik. Greening of gas – Technologien für die Energiewende. gwf edition. Essen: Vulkan-Verlag 2020
- [10] DIN EN ISO 7730 Berichtigung 1:2007-06. *Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005, Berichtigungen zu DIN EN ISO 7730:2006-05*
- [11] Oschatz, B.: GAEEH Gesamtanalyse Energieeffizienz von Hallengebäuden, ITG Dresden und Universität Kassel FB Bauphysik 2011
- [12] EnergieAgentur.NRW: Beheizung von Hallen und hohen Räumen 2007
- [13] Schabbach, T.: Solarthermie. Wie Sonne Zu Wärme Wird. Technik Im Fokus Ser. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg 2021
- [14] Recknagel, H. u. Schramek, E.-R. (Hrsg.): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik. München: Oldenburg 2007
- [15] Kaltschmitt, M., Streicher, W. u. Wiese, A. (Hrsg.): Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Springer eBook Collection. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2020
- [16] Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T. u. Zeumer, M.: Energie Atlas. Nachhaltige Architektur. Edition Detail. München, Basel: Inst. für Internationale Architektur-Dokumentation; De Gruyter 2007
- [17] Wesselak, V. u. Voswinckel, S.: Photovoltaik. Wie Sonne zu Strom wird. Technik im Fokus. Berlin, Heidelberg: Springer 2016
- [18] Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Wirth, H., Freiburg 2022
- [19] Holinski, S. R.: a-Si:H, a-SiO:H und $\mu\text{-Si:H}$ Schichten für Siliziumdünnschichtsolarzellen, Ruhr-Universität Bochum Dissertation 2015

- [20] Deutsches Architektenblatt: Wie man gebäudeintegrierte Photovoltaik vereinfacht. Interview mit Prof. Susanne Rexroth, 2021. <https://www.dabonline.de/2021/08/31/susanne-rexroth-gebäudeintegrierte-photovoltaik-einfacher-dach-fassade/>, abgerufen am: 22.09.2021
- [21] Dyakonov, V. u. Pfeiffer, M.: Organische Solarzellen. In: FVS, PV-Uni-Netz, Workshop. 2003
- [22] Li, N., McCulloch, I. u. Brabec, C. J.: Analyzing the efficiency, stability and cost potential for fullerene-free organic photovoltaics in one figure of merit. *Energy & Environmental Science* 11 (2018) 6, S. 1355–1361
- [23] Fey, T.: Charakterisierung von organischen Solarzellen an einem neu aufgebauten Laser-basierten DSR-Messplatz, Technische Universität Dresden Dissertation 2015
- [24] Wesselak, V., Schabbach, T., Link, T. u. Fischer, J.: Regenerative Energietechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2013
- [25] Wesselak, V., Schabbach, T., Link, T. u. Fischer, J.: Handbuch Regenerative Energietechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2017
- [26] Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H. u. Neu, T.: Handbuch Oberflächennahe Geothermie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2018
- [27] Stober, I. u. Bucher, K.: Geothermie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2020
- [28] Koenigsdorff, R.: Oberflächennahe Geothermie für Gebäude. Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl. 2011
- [29] Adam, D., Markiewicz, R.: Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauwerke: Teil 1: Theoretische Grundlagen. *Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift* (2002) Vol. 147 (4), S. 120–138
- [30] VDI 4640 Blatt 2:2019-06. *Thermische Nutzung des Untergrunds -Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*
- [31] Prinz, H. u. Strauß, R.: Ingenieurgeologie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2018
- [32] VDI 4640 Blatt 1:2010-06. *Thermische Nutzung des Untergrunds -Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*
- [33] Bauer, M., Freeden, W., Jacobi, H. u. Neu, T. (Hrsg.): Handbuch Oberflächennahe Geothermie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2018
- [34] Katzenbach, R., Clauß, F., Waberseck, T., Vogler, M. u. Adamietz, U.: Aktuelle Entwicklungen bei Energiepfahl- und Erdwärmesondenanlagen, In: Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 76, (2007)
- [35] Brandt, W. u. Hanschke, J.: Große Energiepfahlanlage in der Hansestadt Rostock (Mecklenburg-Vorpommern) in der Realisierung, In: GtV Nachrichten (Fachblatt der geothermischen Vereinigung Deutschland) ARGE H.S.W./AETNA, (2003)
- [36] Von der Hude, N. u. Sauerwein, M.: Energiepfähle in der praktischen Anwendung, In: Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 76, (2007)
- [37] Katzenbach, R., Vogler, M. u. Adamietz, U.: Hochleistungsenergiepfähle zur Nutzung der Geothermie im Hochhausbau, In: Österreichische Geotechniktagung 6, Wien, (2007)
- [38] Geowisse, D. G. f. u. Geotechn, D. G. f. (Hrsg.): Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie - Planung, Bau, Betrieb und Überwachung - EA Geothermie. Des Ar-

- beitskreises "Geothermie" der Fachsektion Hydrogeologie (FH-DGG) und der Fachsektion Ingenieurgeologie (FI-DGGT/DGG). Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 2015
- [39] Kempfert, H.-G. (Hrsg.): Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle" - EA-Pfähle. Berlin: Ernst 2012
- [40] VDI 2078:2015-06. *Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)*
- [41] DIN EN 12831-1:2017-09. *Verfahren zur Berechnung der Raumheizlast - Teil 1: Raumheizlast*
- [42] DIN V 18599-1:2018-09. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger*
- [43] Transsolar Energietechnik GmbH: Trnsys18, 2021. <https://trnsys.de/trnsys18>, abgerufen am: 16.09.2021
- [44] Fouad, N. A. (Hrsg.): Bauphysik-Kalender 2015. Simulations- und Berechnungsverfahren. Bauphysik-Kalender, Bd. 15. Berlin: Ernst & Sohn 2015
- [45] Vavříčka, R.: The most common mistakes when designing a hot water storage tank, In: REHVA European HVAC Journal, Volume 55, Issue 4, (2018)
- [46] VDI: VDI-Wärmeatlas. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg 2013
- [47] Glück, B.: Wärmeübertragung. Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren. Bausteine der Heizungstechnik Berechnung, Software. Berlin: Verl. für Bauwesen 1990
- [48] DIN EN ISO 6946:2018-03. *Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren (ISO 6946:2017); Deutsche Fassung EN ISO 6946:2017*
- [49] DIN EN 1264-2:2021. *DIN EN 1264-2: 2021-08. Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung – Teil 2: Fußbodenheizung: Prüfverfahren für die Bestimmung der Wärmeleistung unter Benutzung von Berechnungsmethoden und experimentellen Methoden*
- [50] Herwig, H. u. Moschallski, A.: Wärmeübertragung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2009
- [51] Baehr, H. D. u. Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2019
- [52] DIN EN 14240:2004-04. *Lüftung von Gebäuden - Kühldecken - Prüfung und Bewertung; Deutsche Fassung EN 14240:2004*
- [53] DIN EN 14037-5:2016-12. *An der Decke frei abgehängte Heiz- und Kühlflächen für Wasser mit einer Temperatur unter 120 °C - Teil 5: Offene oder geschlossene Deckenheizflächen - Prüfverfahren für die Wärmeleistung; Deutsche Fassung EN 14037-5:2016*
- [54] DIN EN ISO 9806:2018-04. *Solarenergie – Thermische Sonnenkollektoren – Prüfverfahren (ISO 9806:2017); Deutsche Fassung EN ISO 9806:2017 Deutsche Fassung EN ISO 9806:2017*
- [55] Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme. Technologie – Berechnung – Klimaschutz. 2019
- [56] Hellström, G.: Ground heat storage. Thermal analyses of duct storage systems. - 1: Theory. Lund: Dep. of Mathematical Physics, Lund Univ 1991
- [57] Munz, C.-D. u. Westermann, T.: Numerische Behandlung gewöhnlicher und partieller Differenzialgleichungen. Ein anwendungsorientiertes Lehrbuch für Ingenieure. Springer eBook Collection. Berlin: Springer Vieweg 2019

- [58] RUUKKI Construction: Load-Bearing Sheet T130M-75L-930. <https://www.ruukki.com/building-envelopes/products/roof-structure/load-bearing-sheets/load-bearing-sheets-detail/load-bearing-sheet-t130m-75l-930#properties>, abgerufen am: 03.04.2019
- [59] RUUKKI Construction: Technische Skizze, Radiant profile Ruukki.dwg. 2019
- [60] Thermo Scientific: AC200 Einhängethermostate. <https://www.thermofisher.com/document-connect/document-connect.html?url=https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets%2FLED%2Fbrochures%2Frefrigerated-heated-bath-circulators-brochure-BRTCBATHS-EN.pdf>, abgerufen am: 16.09.2021
- [61] NZR: Wärmehähler WZ-CD. Datenblatt, 2006
- [62] RSPRO: Platin-Widerstand Pt100 und Pt1000- Dünnschichtdetektoren. Datenblatt, 2021. <https://docs.rs-online.com/396e/0900766b816ded9e.pdf>
- [63] Hukseflux: HFP01 Heat flux plate. Datenblatt, 2021. https://www.hukseflux.com/uploads/product-documents/HFP01_v2114.pdf
- [64] JUMO: dTRON 304/308/316 Kompaktregler mit Programmfunktion. Datenblatt, 2021. <https://www.jumo.net/attachments/JUMO/attachmentdownload?product-group=703041&language=de>
- [65] MEASURpoint: DT8874 Ultra-Accurate Measurement for Temperature and Voltage. Datenblatt. <https://www.mccdaq.de/PDFs/specs/MEASURpoint-Datasheet.pdf>, abgerufen am: 16.09.2021
- [66] Flir: T1020. HD-Wärmebildkamera. <https://flir.netx.net/file/asset/4603/original/attachment>, abgerufen am: 29.04.2022
- [67] MSC Software GmbH: Marc - Erweiterte nichtlineare Simulation. <https://www.mssoftware.com/de/marc>, abgerufen am: 27.08.2020
- [68] Albert, A. (Hrsg.): Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Köln: Reguvis 2020
- [69] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium. Berlin, Heidelberg: Springer 2014
- [70] DIN EN ISO 10077-2:2018-01. *Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten - Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen (ISO 10077-2:2017); Deutsche Fassung EN ISO 10077-2:2017*
- [71] Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (Muster-Industriebau-Richtlinie - MIndBauRL), Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz, Amtliche Mitteilungen 2019
- [72] DIN 18234-1:2018-05. *Baulicher Brandschutz großflächiger Dächer - Brandbeanspruchung von unten - Teil 1: Geschlossene Dachflächen - Anforderungen und Prüfung*
- [73] Schmöle GmbH: Werkstattzeichnung des Kollektors, Menden 2019
- [74] Döring, B., Blanke, T., Götsche, J., Kuhnhenne, M., Reger, V., Hachul, H. u. Ebbert, T.: Gewerbehallen auf dem Weg zum Plusenergiegebäude 2.0. TGA Fachplaner (2022) 04, S. 38–43
- [75] HeliaSol® 315 - 2000 - The organic solar film product - Technisches Datenblatt, Heliatek GmbH, Dresden 2019
- [76] Reger, V., Kuhnhenne, M., Ebbert, T., Hachul, H., Blanke, T. u. Döring, B.: Nutzung erneuerbarer Energien durch thermische Aktivierung von Komponenten aus Stahl. Stahlbau 89 (2020) 6, S. 512–519
- [77] iconic skin GmbH: GSP® Glass Sandwich Panel, Gersthofen 2019. <https://www.iconic-skin.com/gsp/pur>

-
- [78] DIN EN 1863-1:2012-02. *Glas im Bauwesen - Teilvorgespantes Kalknatronglas - Teil 1: Definition und Beschreibung; Deutsche Fassung 1863-1:2011*
- [79] Baunetz_Wissen: Einscheibensicherheitsglas (ESG). <https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/funktionsglaeser/einscheibensicherheitsglas-esg-159097>, abgerufen am: 24.09.2020
- [80] GlassTime - Technisches Handbuch, Guardian Europe S.à r.l., Dudelange 2012
- [81] Guardian Glass: Guardian UltraClear®. <https://www.guardianglass.com/eu/de/produkte/marken/ultraclear>, abgerufen am: 28.09.2020
- [82] ETAG 002-1:3. Änderung 2012-05. *Guideline for european technical approval of Structural Sealant Glazing Kits (SSGK) - Part 1: Supported and unsupported systems (ETAG 002)*
- [83] Heliatek GmbH: Installations- und Betriebsanleitung HeliaFilm® / HeliaSol® in Pilotinstallationen v1.1 S. 1, 7, Dresden 2019
- [84] WAGO: Controller PFC200; 2 x ETHERNET, RS-232/-485, CAN, CANopen. 750-8204, 2021. <https://www.wago.com/de/sps/controller-pfc200/p/750-8204>, abgerufen am: 16.09.2021
- [85] WAGO: 2-Kanal-Analogeingang; AC/DC 0 ... 1 A; Differenzeingang. 750-475, 2021. <https://www.wago.com/de/io-systeme/2-kanal-analogeingang/p/750-475>, abgerufen am: 16.09.2021
- [86] WAGO: 2-Kanal-Analogeingang; AC/DC 0 ... 1 A; Differenzeingang. 753-475, 2021. <https://www.wago.com/de/io-systeme/2-kanal-analogeingang/p/753-475>, abgerufen am: 16.09.2021
- [87] WAGO: 2-Kanal-Analogeingang; DC 0 ... 10 V; Single-Ended. 750-467, 2021. <https://www.wago.com/de/io-systeme/2-kanal-analogeingang/p/750-467>, abgerufen am: 16.09.2021
- [88] CONRAD: TTS2A104F4363RY Temperatursensor -40 bis +100 °C 100 kΩ 4360 K radial bedrahtet, 2021. <https://www.conrad.de/de/p/tts2a104f4363ry-temperatursensor-40-bis-100-c-100-k-4360-k-radial-bedrahtet-557287.html>, abgerufen am: 16.09.2021
- [89] Fischer Barometer: Sternpyranometer, 2021. <https://fischer-barometer.de/media/pdf/cc/dc/37/D461105.pdf>, abgerufen am: 16.09.2021
- [90] WAGO: 8-Kanal-Analogeingang; DC 0 ... 10 V/±10 V; Single-Ended. 750-497, 2021. <https://www.wago.com/de/io-systeme/8-kanal-analogeingang/p/750-497>, abgerufen am: 16.09.2021
- [91] WAGO: 2-Kanal-Analogeingang; 0 ... 20 mA; Single-Ended; 16 Bit. 750-472, 2021. <https://www.wago.com/de/io-systeme/2-kanal-analogeingang/p/750-472>, abgerufen am: 16.09.2021
- [92] metherm: Temperaturfühler für Wärme- und Kältezählung, 2021. https://www.metherm.de/user/product_files/datenblatt-temperaturfuehler.pdf, abgerufen am: 16.09.2021
- [93] metherm: Mehrstrahl-Trockenläufer Volumenmessteil, 2021. https://www.metherm.de/user/product_files/datenblatt-mth.pdf, abgerufen am: 16.09.2021
- [94] metherm: Ultraschall - Wärmezähler MULTICAL 603, 2021. <https://www.metherm.de/de/waermezaehler/ultraschall-waermezaehler/ultraschall-waermezaehler-multical-603/>, abgerufen am: 16.09.2021
- [95] Arz, P., Schmidt, H., Seitz, J. u. Semprich, S.: Beton-Kalender, Jahrgang 1994, Band 2, Abschnitt D. Ernst & Sohn
- [96] DIN EN 12699:2015-07. *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Verdrängungspfähle; Deutsche Fassung EN 12699:2015*
-

- [97] DIN EN 1536:2015-10. *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bohrpfähle; Deutsche Fassung EN 1536:2010+A1:2015*
- [98] Witt, K. J. u. Smoltczyk, U. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch Teil 3. Gründngen und geotechnische Bauwerke. Berlin, München: Wilhelm Ernst & Sohn 2018
- [99] DIN EN 14199:2015-07. *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Mikropfähle; Deutsche Fassung EN 14199:2015*
- [100] Pigisch, N. u. Adam, Dietmar Univ. Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn.: GRÜNDUNGEN AUF NICHT AUSREICHEND TRAGFÄHIGEM UNTERGRUND. Wien 2003
- [101] Miyara, A., Tsubaki, K., Inoue, S. u. Yoshida, K.: Experimental study of several types of ground heat exchanger using a steel pile foundation, In: Renewable Energy, Heft Nr. 36, (2011)
- [102] Uotinen, V.-M., Repo, T. u. Vesamaki, H.: Energy piles – ground energy systems integrated to steel foundations piles, In: NGM 2012 Proceedings of the 16th Nordic Geotechnical Meeting, Copenhagen, (2012)
- [103] metherm: Durchflusssensor IMF für Wärme- und Kältemessstellen, 2021. https://www.metherm.de/user/product_files/datenblatt-imf.pdf, abgerufen am: 16.09.2021
- [104] metherm: Magnetisch-induktiver Durchflussmesser SITRANS F M, 2021, abgerufen am: 16.09.2021
- [105] Planung und Erstellung von Erdwärmesonden. Merkblatt Nr. 3.7/2, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Stand: 2012
- [106] SSAB: RR-and-RD-piles - Design and installation manual. <https://ssabwebsitecdn.azureedge.net/-/media/files/en/infra/ssab-rr-and-rd-piles---design-and-installation-manual.pdf>, abgerufen am: 29.04.2019
- [107] STRUCTURAL STEEL PILES WITH HOLLOW SECTIONS AND RIGID SPLICES, European Assessment Document EAD, 2014
- [108] Autodesk, Inc.: Autodesk CFD - Simulationssoftware für numerische Strömungsmechanik, 2020. <https://www.autodesk.de/products/cfd/overview>, abgerufen am: 26.02.2020
- [109] pro KÜHLSOLE GmbH: glykosol n. Kälte- und Wärmeträgerflüssigkeit auf Basis Monoethylenglykol für technische Anwendungen, 2020. <https://www.prokuehlsole.de/produkte/download>, abgerufen am: 24.03.2020
- [110] Engineering ToolBox: Thermal Conductivity Coefficients for common Solids, Liquids and Gases, 2003. https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html, abgerufen am: 30.09.2021
- [111] Witt, K. J. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch, Teil 3. Berlin: Ernst & Sohn 2018
- [112] Hanschke, T.: Planung, Errichtung und Betrieb von Energiepfahlanlagen. Stuttgarter Geothermietag. Stuttgart 2008
- [113] Grimm, R.: Beton -Die wichtigsten Eigenschaften, 2014. <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe-des-bauens/beton-eigenschaften-druckfest-zugempfindlich/>, abgerufen am: 23.10.2021
- [114] Leitfaden über Kontraktorbeton für Tiefgründungen, Arbeitsgruppe "Beton" von EFFC und DFI, 2018
- [115] Geotechnik II und Grundlagen der Geotechnik II. Unterlagen zur Vorlesung, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Ziegler, Sommersemester 2020
- [116] Kempfert, H.-G. (Hrsg.): Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle". EA-Pfähle. Berlin: Ernst 2013
- [117] Witt, K. J. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch Teil 2. Geotechnische Verfahren, Bd. 2. Ernst & Sohn 2017

-
- [118] Kaiser, H.: Energiepfähle, In: Fachgespräch Erdwärmesonden: Thermische Auswirkungen, Sonderformen der Nutzung, Idstein, (2008)
- [119] Hauptverband der deutschen Bauindustrie e.V.: BGL Baugeräteliste 2015. Gütersloh: Bauverlag BV GmbH 2015
- [120] Krause, T. u. Ulke, B.: Zahlentafeln für den Baubetrieb. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2016
- [121] ENGEL, A.: GRUND-, ERD- UND DAMMBAU. Pfahlgründungen. München: CARL HANSER Verlag GMBH 2012
- [122] Schröder, B. u. Hanschke, T.: Energiepfähle -umweltfreundliches Heizen und Kühlen mit geothermisch aktivierten Stahlbetonfertigpfählen. Bautechnik 80 (2003) 12, 925-927
- [123] Centrum Pfähle: Technische Daten - Centrum Pfähle, 2020. <https://www.centrumpfaehle.de/pfahltypen/centrum-pfahl/technische-daten/>, abgerufen am: 21.12.2020
- [124] Mindestlänge der Stahlbetonenergiepfahl-Segmente. Telefonisch. Kaufbeuren, Bayern 2020
- [125] Tiefgründungen. Bemessung und Ausführung; Beiträge zum 19. Christian Veder Kolloquium, Bd. 21. Graz 2004
- [126] Nordwig, H.: Baustoff-Recycling: Wie Bauschutt wiederverwendet werden kann. Bayerischer Rundfunk (2020)
- [127] Mineralische Bauabfälle Monitoring 2016. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2016, Kreislaufwirtschaft Bau, 2016
- [128] bauforumstahl: Bauen mit Stahl. https://bauforumstahl.de/upload/documents/Bauen_mit_Stahl.pdf, abgerufen am: 25.01.2021
- [129] DIN V 18599-10:2018-09. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*
- [130] Deutscher Wetterdienst: Testreferenzjahre (TRY), 2021. <https://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre>, abgerufen am: 13.09.2021
- [131] DIN 4108-2:2013-02. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*
- [132] Peere, W., Picard, D., Cupeiro Figueroa, I., Boydens, W., and Helsen, L.: alidated combined first and last year borefield sizing methodology. Brugge (Belgium) 2021
- [133] Peere, W.: GHEtool, 2021. <https://github.com/wouterpeere/GHEtool>, abgerufen am: 13.09.2021
- [134] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie: Planungsleitfaden Plusenergie, Wien 2012. https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/berichte/endbericht_1256_annex_b_grundlagen.pdf, abgerufen am: 24.03.2021
- [135] DIN V 18599-4:2018-09. *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung*
- [136] DIN V 18599-8:2018-09. *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 8: Nutz- und Endenergiebedarf von Warmwasserbereitungssystemen*
- [137] DIN V 18599-6:2018-09. *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 6: Endenergiebedarf von Lüftungsanlagen, Luftheizungsanlagen und Kühlsystemen für den Wohnungsbau*
-

Anhang A Simulationsparameter TRNSYS

A.1 Parameter konventionelles PV-Modul (191 W_p/m²)

	Einheit	Wert
Kurzschlussstrom	[A]	10,31
Leerlaufspannung	[V]	40,3
Strom im besten Betriebspunkt	[A]	9,78
Spannung im besten Betriebspunkt	[V]	32,5
Kurzschlussstromänderung pro Kelvin	[A/K]	0,005
Leerlaufspannung pro Kelvin	[V/K]	-0,1249
Anzahl an Zellen	[-]	60
NOCT Temperatur	[°C]	44
Fläche	[m ²]	1,6632

A.2 Parameter OPV-Modul (38 W_p/m²)

	Einheit	Wert
Kurzschlussstrom	[A]	1,04
Leerlaufspannung	[V]	38
Strom im besten Betriebspunkt	[A]	0,83
Spannung im besten Betriebspunkt	[V]	28,9
Kurzschlussstromänderung pro Kelvin	[A/K]	0,00104
Leerlaufspannung pro Kelvin	[V/K]	-0,0608
Anzahl an Zellen	[-]	60
NOCT Temperatur	[°C]	44
Fläche	[m ²]	0,63

A.3 Parameter monokristallines PV-Modul (226 W_p/m²)

	Einheit	Wert
Kurzschlussstrom	[A]	6,58
Leerlaufspannung	[V]	75,63
Strom im besten Betriebspunkt	[A]	6,08
Spannung im besten Betriebspunkt	[V]	65,8
Kurzschlussstromänderung pro Kelvin	[A/K]	0,00382
Leerlaufspannung pro Kelvin	[V/K]	-0,1784
Anzahl an Zellen	[-]	104
NOCT Temperatur	[°C]	44
Fläche	[m ²]	1,7677

A.4 Parameter polykristallines PV-Modul (164 W_p/m²)

	Einheit	Wert
Kurzschlussstrom	[A]	9,29
Leerlaufspannung	[V]	38,11
Strom im besten Betriebspunkt	[A]	8,8
Spannung im besten Betriebspunkt	[V]	31,5
Kurzschlussstromänderung pro Kelvin	[A/K]	0,00465
Leerlaufspannung pro Kelvin	[V/K]	-0,1181
Anzahl an Zellen	[-]	60
NOCT Temperatur	[°C]	44
Fläche	[m ²]	1,68

A.5 Parameter geothermische Sondenleistung

	Einheit	KS	2U
Bohrloch			
Anzahl	[-]	2	2
Tiefe	[m]	90	90
Äußerer Radius (R.)	[m]	0,07	0,07
Innerer R. äußeres Rohr	[m]	0,065	-
Äußerer R. inneres Rohr	[m]	0,045	0,016
Innerer R. inneres Rohr	[m]	0,037	0,013
Zentrumsabstand	[m]	-	0,07
Wärmeleitfähigkeit Füllung	[W/(m·K)]	40	1,3
Wärmeleitfähigkeit Rohr	[W/(m·K)]	40	0,42
Fluidzirkulation	[-]	-1	1
Referenztemperatur	[°C]	10	10
Referenzmassenstrom	[kg/h]	2500	362
Einlasstemperatur	[°C]	5	5
Einlassmassenstrom	[kg/h]	5000	724
Speichervolumen			
Lufttemperatur	[°C]	0	0
Initialtemperatur	[°C]	10	10
Radiale Regionen	[-]	30	30
Vertikale Regionen	[-]	30	30
Wärmeleitfähigkeit	[W/(m·K)]	1,3	1,3
Wärmekapazität	[kJ/(m ³ ·K)]	2016	2016