

BBSR-  
Online-Publikation  
30/2024

# C<sup>3</sup> City Climate Canopies

von

Dr.-Ing. Ata Chokhachian  
Dongyuan Liu  
Gregor Grünkorn  
Prof. Dr.-Ing. Julian Lienhard  
Prof. Thomas Auer

## C<sup>3</sup> City Climate Canopies

Aufbau eines kombinierten Analyseverfahrens zur punktuellen Feststellung von Hitzeinseln und deren Reduzierung im urbanen Raum durch konstruktive Eingriffe

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wohnen, Stadtentwicklung  
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.55

Projektlaufzeit: 06.2021 bis 06.2023

## IMPRESSUM

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Fachbetreuerin

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“  
Dr. Katja Hasche  
katja.hasche@bbr.bund.de

### Autoren

Universität Kassel  
Fachgebiet Tragwerksentwurf – Institut für Architektur  
Fachbereich 06 Architektur, Stadt- und Landschaftsplanung  
Prof. Dr.-Ing. Julian Lienhard  
Dongyuan Liu, M. Sc.  
Gregor Grünkorn, M. Sc.

Technische Universität München  
TUARL Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen  
Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer  
Dr.-Ing. Ata Chokhachian

### Lektorat

Universität Kassel  
Fachgebiet Tragwerksentwurf – Institut für Architektur  
Fachbereich 06 Architektur, Stadt- und Landschaftsplanung  
Prof. Dr.-Ing. Julian Lienhard

### Stand

August 2023

### Gestaltung

Universität Kassel  
Fachgebiet Tragwerksentwurf – Institut für Architektur  
Fachbereich 06 Architektur, Stadt- und Landschaftsplanung

### Bildnachweis

Titelbild: Bernd L. Gölnitz

### Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

### Zitierweise

Chokhachian, Ata; Liu, Dongyuan; Grünkorn, Gregor; Lienhard, Julian; Auer, Thomas, 2024: C<sup>3</sup> City Climate Canopies: Aufbau eines kombinierten Analyseverfahrens zur punktuellen Feststellung von Hitzeinseln und deren Reduzierung im urbanen Raum durch konstruktive Eingriffe. BBSR-Online-Publikation 30/2024, Bonn.

Kurzfassung / Abstract	6
1 Einführung	7
1.1 Themenfelder	7
1.2 Untersuchungsgegenstand	10
1.2.1 Städtische Wärmeinseln und thermischer Komfort im Freien	10
1.2.2 Straßenschluchten, Innenhöfe und Plätze	11
1.2.3 Parallel und zentralgeraffte Membrandächer	11
1.2.4 Geometrievariation und Beschattungsbedarf	12
1.2.5 Thermischer Komfort in Städten	12
2 Problemstellung	13
2.1 Stand der Forschung/Baupraxis	13
2.1.1 Aktuelle Mikroklimamessmethoden	14
2.2 Forschungslücke/Entwicklungsbedarf	15
2.3 Begründung des Bundesinteresses	17
2.3.1 Klimaneutralität und Klimaanpassung von Gebäuden	17
2.4 Forschungsfragen	18
3 Forschungsansatz	19
3.1 Arbeitshypothesen	19
3.2 Methodischer Ansatz	20
3.2.1 Architektur und Städtebau	20
3.2.2 Konstruktive Umsetzung	20
3.2.3 Klimasimulation und Langzeitmessungen	20
4 Entwicklungen und Ergebnisse	22
4.1 Architektur und Städtebau	22
4.1.1 Typische Hitzeinseln im städtischen Raum	22
4.1.2 Erstellung von stadträumlichen Vergleichswerten	30
4.1.3 Typische räumliche Charakteristika	31
4.1.4 Typen von Stadträumen	32
4.1.5 Die Reihe als linearer, versetzter oder gekrümmter Raum	32
4.1.6 Plätze und Platztypen	37
4.1.7 Das Raumgefüge des Innenhofs	39
4.1.8 Bewertung von typischen räumlichen Charakteristika	46
4.1.9 Bewertungsmatrix zur Analyse versiegelte Flächen und Standortwahl	48
4.1.10 Versiegelungsanteile in den Städten	57
4.1.11 Prüfung bestimmter Kriterien am Beispiel des Shadowplatzes in Düsseldorf und der Hauptwache in Frankfurt am Main	63
4.1.12 Methodenbeschreibung Ergebnis	66
4.2 Konstruktive Umsetzung	67
4.2.1 Grundtypen der Fassaden	67
4.2.2 Bewertung des Brandschutzes bei Membrandächern	67
4.2.3 Anforderung an die Entwässerung bei Membrandächern	69
4.2.4 Anforderungen an das Bauen im Bestand in Bezug auf den Brandschutz	70
4.2.5 Entwicklung von Grundtypen für selbststabilisierende und wandelbare Tragwerkskonstruktionen	70
4.2.6 Verankerung in Fassaden/Befestigungstechnik	72

4.2.7	Mehrkriterien-Optimierung von Tragwerk und Klimaparametern	75
4.2.8	Tragwerkstypologien und Form-findung	77
4.2.9	Integrierte Entwurfsworkflow	88
4.3	Klimasimulation	89
4.3.1	Einflussparameter in Bezug auf Klimasimulation und Langzeitmessungen	89
4.3.2	Messungen	92
5	Digital Case Study	103
5.1	Untersuchung und Analyse städtebaulicher Strukturtypen am Beispiel Kassel	103
5.1.1	Case Study in Bezug auf städtebauliche-architektonische Kriterien	103
5.1.1.1	<i>Region</i>	103
5.1.1.2	<i>Stadt</i>	105
5.1.1.3	<i>Stadtteil</i>	108
5.1.1.4	<i>Gebäude</i>	110
5.1.1.5	<i>Innenhof</i>	111
5.1.2	Mehrlagige Verschattungsanlage und Porosität	112
5.1.3	Bewertungen nach mikroklimatischen Kriterien	113
5.2	Formfindung und Konstruktive Umsetzung	113
5.2.1	Formfindung	113
5.2.1.1	<i>Vertikales Gleichgewicht</i>	113
5.2.1.2	<i>Horizontales Gleichgewicht</i>	115
5.2.2	Statische Analyse und Verankerung	117
5.2.2.1	<i>FE-Berechnungsmodell</i>	119
5.2.2.2	<i>Variante I</i>	120
5.2.2.3	<i>Variante II</i>	122
5.3	Auswertung der klimatischen Randbedingungen	125
5.3.1	UTCI und Solarradiationsanalyse	125
5.3.2	Regenfluss Analyse	127
5.3.3	CFD-Analyse	129
6	Zusammenfassung und Ausblick	131
6.1	Im Rahmen des Forschungsprojektes neu Entwickelte Methoden und Ergebnisse	131
6.2	Ergebnisse der digitalen Case Study	132
6.3	Entwurfsempfehlungen	132
6.4	Übertrag der Forschung in die Lehre	135
6.5	Ausblick	138
7	Mitwirkende	139
8	Kurzbiographien	140
9	Literaturverzeichnis	141
10	Abbildungsverzeichnis	144
11	Tabellenverzeichnis	148
12	Anlagen	149
13	Bisherige Veröffentlichungen	150

---

## Kurzfassung / Abstract

Hitzeinseln in städtischen Gebieten entstehen durch fehlende Vegetation, Verdichtung und große thermische Massen. Mit zunehmender Verstädterung und dem fortschreitenden Klimawandel stellen sie eine wachsende Herausforderung für ein nachhaltiges und komfortables Leben in der Stadt dar. Während aktive Kühlsysteme energieintensiv sind, sind passive Maßnahmen wie das Pflanzen von Bäumen oder die Begrünung von Dächern nur bis zu einem gewissen Grad vorteilhaft (Manoli et al., 2019) und durch Bedingungen wie begrenzten Raum, Wachstumszeit und Wasserversorgung eingeschränkt. Es ist festzustellen, dass es keine Einheitslösung für die Eindämmung der städtischen Wärmeinsel gibt.

Das vorliegende Forschungsprojekt C<sup>3</sup>- City, Climate, Canopies stellt digitale Methoden vor, Architektur, Tragverhalten und Klimadesign integriert zu betrachten. Statische Aspekte wie die Formfindung der Membran, Verankerungskräfte und Bewegungsmechanismen wurden berücksichtigt; die Verschattungsleistung wurde anhand einer Strahlungsstudie unter Berücksichtigung des Standorts und der Topologie, einschließlich Platz, Straßenschlucht und Innenhof, untersucht. Die Wirksamkeit des vorgeschlagenen Entwurfsablaufs wurde anhand von Case-Studies demonstriert.

Als Teil der Forschung wurde eine Langzeitmessung durchgeführt, um die mikroklimatischen Auswirkungen eines wandelbaren Daches in der Stadt Buchs, CH, zu analysieren. Die Ergebnisse dieser Messung tragen dazu bei, die Auswirkungen von wandelbaren Dächern bei verschiedenen Hitzeereignissen (extrem bis mild) zu verstehen, wobei die Tages- und Nachtzyklen berücksichtigt werden.

Heat islands in urban environments are caused due to lack of vegetation, densification, and large amounts of thermal mass. They pose an increasing challenge to sustainable and comfortable urban living as urbanization and climate change increase. While active cooling systems are energy-intensive, passive measures such as trees planting or rooftop vegetation are only beneficial to a certain extent (Manoli et al., 2019) and limited by conditions such as available **space, growing time, and water sources**. It's safe to say that there is no one-fits-all solution to urban heat island mitigation.

The current research project C<sup>3</sup>- City, Climate, Canopies presents a digital design workflow that integrates structural design and climate design. Structural aspects such as anchoring forces, moving mechanism and membrane form-finding have been considered; shading performance has been investigated through a radiation study given the site location and its topology, including plaza, street canyon, and courtyard. The effectiveness of the proposed design workflow was demonstrated through design examples.

As part of the research, a long-term measurement experiment was set up to understand the microclimatic effects of a retractable roof in the city of Buchs, CH. The results of this measurement are beneficial to understand the impact of retractable roofs during different heat events (extreme to mild), taking into account the day and night components.

# 1 Einführung

## 1.1 Themenfelder

In den letzten Jahren ist das öffentliche Bewusstsein für die Auswirkungen der natürlichen und bebauten Umwelt auf das Wohlbefinden und die Gesundheit in Städten gewachsen. Obwohl dies ein ermutigendes Zeichen ist, fehlt es nach wie vor an fundiertem Wissen und objektiven Messungen über den Einfluss des städtischen Mikroklimas auf die Wahrnehmung des thermischen Komforts in freien städtischen Umgebungen. Vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels und seiner Auswirkungen auf das öffentliche Leben der Stadtbevölkerung besteht ein dringender Bedarf an einem besseren Verständnis der gegenwärtigen und zukünftigen Eigenschaften des städtischen Mikroklimas und der Umweltqualität in Städten.

Der Einfluss des thermischen Komforts bei Aktivitäten im Freien ist ein komplexes Thema, das klimatische und verhaltensbezogene Aspekte umfasst und sowohl numerische Ansätze als auch Feldmessungen erfordert, um komfortablere, gesündere und lebenswertere städtische Umgebungen zu verstehen, zu gestalten und zu erreichen.

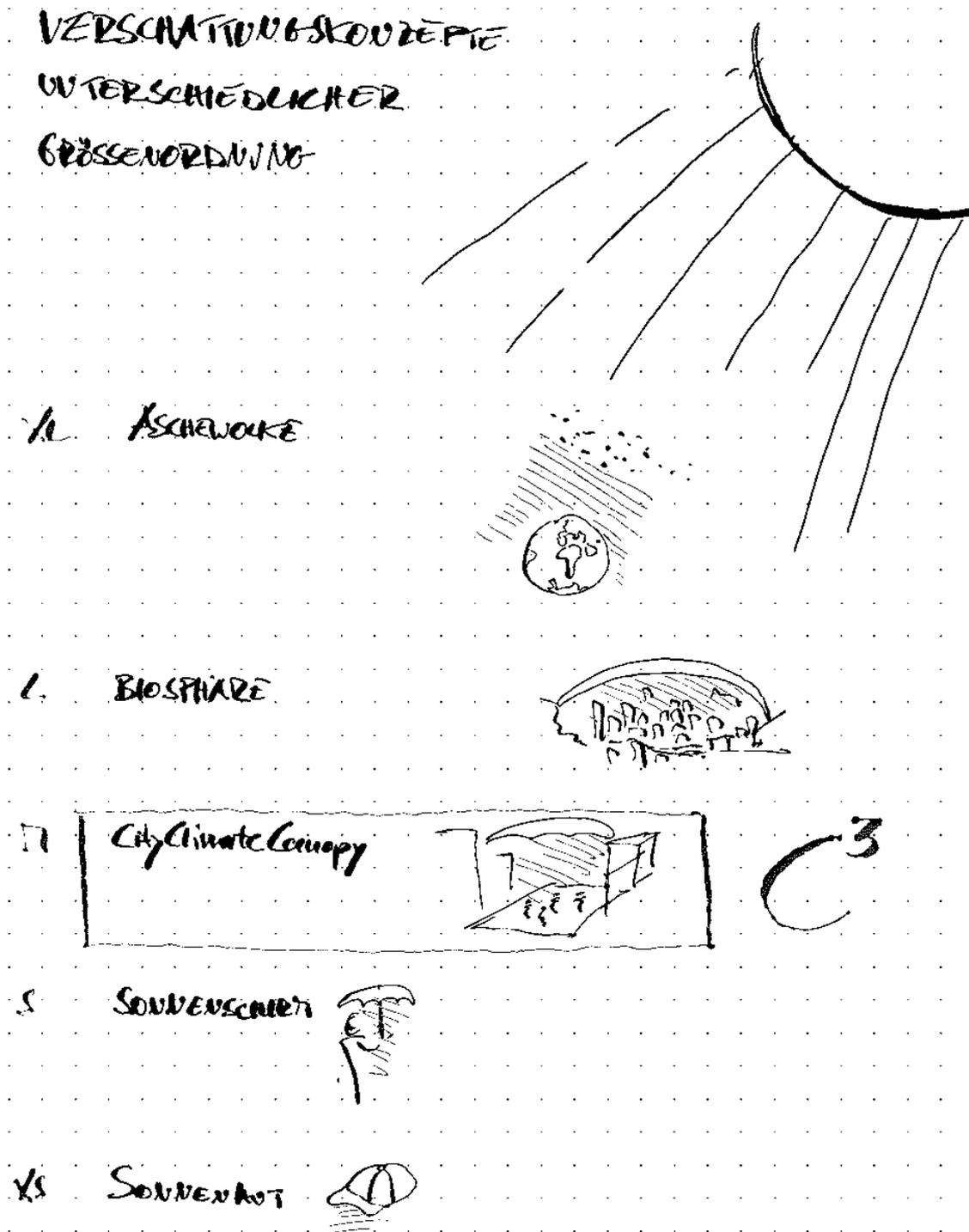
In diesem Zusammenhang haben sowohl Simulationen als auch experimentelle Studien gezeigt, dass eine der effektivsten Strategien zur Vermeidung von Oberflächenüberhitzung die Beschattung mit hohem Albedowert (weißen Oberflächen) ist. Textile Beschattungssysteme sind eine attraktive Option, wenn die Verwendung von Vegetation eingeschränkt ist, wandelbare Sonnenschutzvorrichtungen erwünscht sind oder eine flexible geometrische Gestaltung erforderlich ist. Ein traditionelles Beispiel für den Einsatz von textilem Sonnenschutz sind Toldos und Velas (Schattensegel) in mediterranen Städten, die typischerweise mit diesen Randbedingungen konfrontiert sind. Diese Vorrichtungen bestehen in der Regel aus einer Reihe von Sonnensegeln, die als Vordach in verschiedenen Höhen innerhalb der Straßenschlucht angebracht werden (Garcia-Nevado, 2020). Der offensichtlichste Effekt von Sonnensegeln ist die Reduzierung der Sonneneinstrahlung in die Straßenschlucht, auf Plätze und in Innenhöfe. Die Installation dieser Vorrichtungen verändert das Mikroklima der Straße jedoch auch auf andere Weise, indem nicht nur die Strahlungsflüsse, sondern auch die Lufttemperatur und die Windströmungen in der Straßenschlucht verändert werden. All diese Prozesse wirken sich auf die Energiebilanz der städtischen Oberflächen und damit auf deren Temperatur aus.

Die verschärfte klimatische Situation bildet den Ausgangspunkt für die Frage, ob und wie das Stadtklima durch punktuelle bauliche Maßnahmen positiv beeinflusst werden kann. Ist es möglich, den auch in Nord- und Mitteleuropa zunehmend auftretenden Hitzeinseln mit den Mitteln wandelbarer textiler Konstruktionen in Form von architektonischen Interventionen in der Stadt zu begegnen und darüber hinaus einen gesellschaftlichen Mehrwert zu generieren?

Diese Fragen führen zu der Idee, City Climate Canopies (C<sup>3</sup>) zu entwickeln, die stadträumliche, soziale und klimatische Mehrwerte generieren - im kleinen Maßstab, aber mit größtmöglicher Wirkung. Dabei ordnet sich das Projekt im Bereich der mittelgroßen Verschattungsanlagen mit ca 200 – 2.000 m<sup>2</sup> ein. Im Vergleich dazu kennen wir Maßnahmen kleine Verschattungsmaßnahmen wie den Sonnenhut (0,02m<sup>2</sup>) oder den Sonnenschirm (5-100m<sup>2</sup>) und Konzepte für großflächige Maßnahmen wie Biosphären (Ref Fuller) ( 50.000m<sup>2</sup> +) oder aktuell kontrovers diskutierte Ideen, das Klima durch Solar Radiation Management (SRM) mithilfe von künstlich in die oberen Atmosphäreschichten eingebrachten Aerosolen oder Aschewolken abkühlend zu beeinflussen (Borgmann, Albert, et al. 2012). Siehe dazu einleitende Abbildung 1.

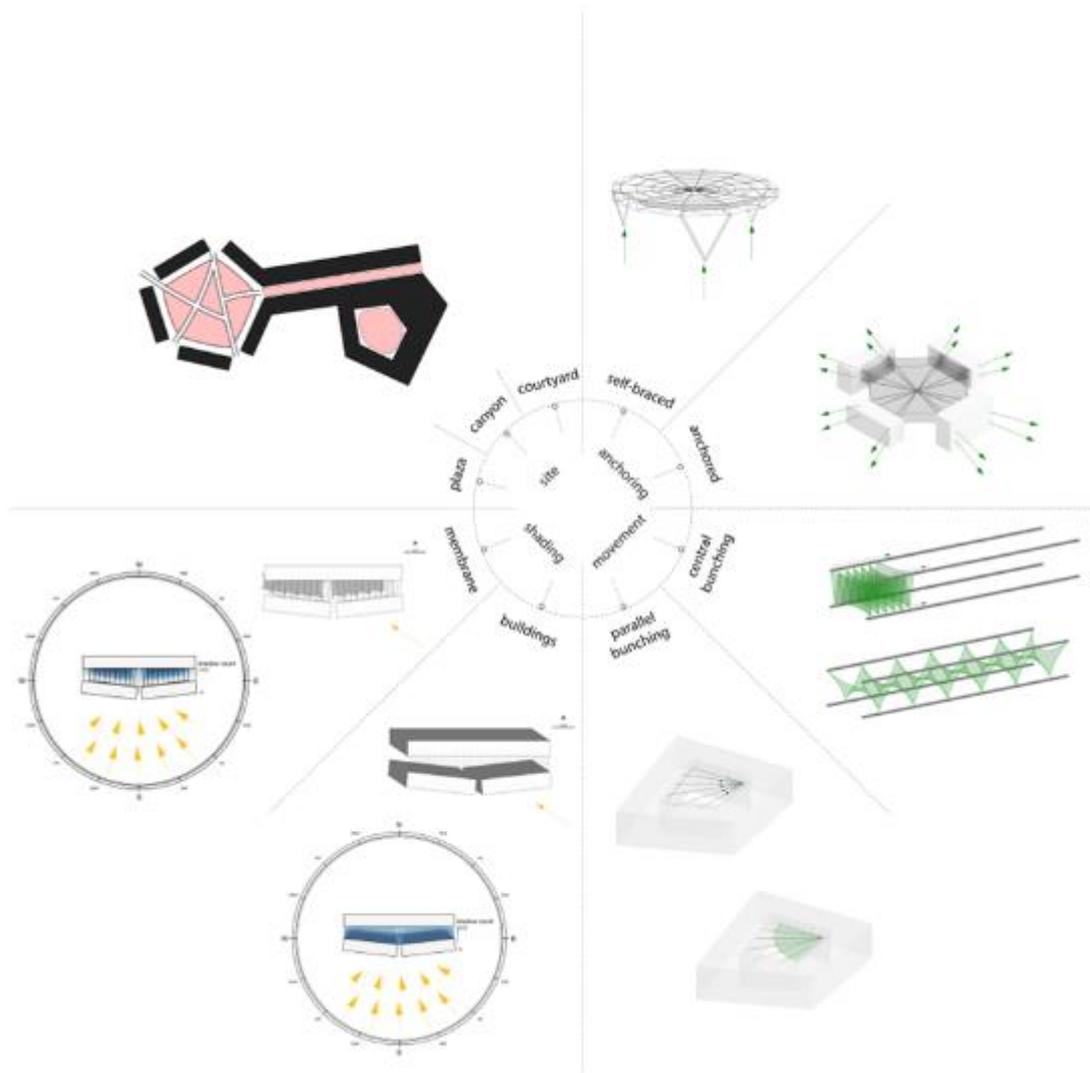
Innerhalb der betrachteten Größenordnung teilt sich das Projekt in die in Abbildung 2 dargestellten Themenfelder auf.

Abbildung 1  
Verschattungskonzepte unterschiedlicher Größenordnungen



(eigene Darstellung)

Abbildung 2  
Themenfelder des C<sup>3</sup> Projektes



(eigene Darstellung)

In den in Abbildung 2 dargestellten Themenfeldern werden folgende Einzelziele verfolgt:

- Die Analyse urbaner Topologien in Städten, in denen der Wärmeinseleffekt zunehmend innerstädtische Bereiche aufheizt.
- Die Untersuchung historischer Überdachungssysteme im Vergleich zu modernen Überdachungssystemen im stadträumlichen Kontext.
- Die Untersuchung konstruktiver wandelbarer Tragwerkssysteme und deren Funktion im innerstädtischen Raum.
- Die Erstellung von Klimasimulationen, die im Kontext des Hitzeinseleffektes verschiedene Szenarien abbilden, um die einzelnen Parameter des Wettereinflusses und deren Folgen zu definieren.

Übergeordnetes Ziel ist die Verbesserung des Mikroklimas in Städten und der Einsatz von baulichen Maßnahmen zur Reduzierung des Hitzeinseleffektes durch wandelbare Überdachungen.

Mit diesem interdisziplinären Ansatz adressiert City Climate Canopy C<sup>3</sup> sowohl konkrete konstruktive und klimatechnische als auch übergeordnete soziokulturelle und räumliche Fragestellungen der Stadtplanung. Mit dieser ganzheitlichen Ausrichtung wird der grundlegenden Frage nachgegangen, ob und wie das Klima im urbanen Raum durch architektonische Interventionen nachhaltig verbessert werden kann.

Dabei stehen folgende Fragen im Fokus:

- Welchen Einfluss haben städtische Wärmeinseln auf das Klima innerstädtischer Typologien in Abhängigkeit von der umgebenden Bebauungsstruktur, der versiegelten Oberflächenstruktur und der sommerlichen Sonneneinstrahlung auf einen bestimmten Platz, Innenhof oder eine Straßenschlucht?
- Welches Veränderungspotential ergibt sich durch die bauliche Maßnahme einer wandelbaren Überdachung im Bereich der notwendigen Maßnahme um ein behagliches Klima für die dort arbeitenden, wohnenden und sich temporär aufhaltenden Menschen zu garantieren?
- Wie können konkrete bauliche Maßnahmen unter Berücksichtigung der baukonstruktiven (Bestand, Entwässerung, Brandschutz), betrieblichen (Unterhalt und Wartung) sowie ökologischen (Material, Betriebsenergie und Rückbaubarkeit) Randbedingungen umgesetzt werden?

Je mehr Flächen innerhalb eines urbanen Stadtgebietes versiegelt sind, desto weniger Möglichkeiten gibt es, die Aufheizung des Klimas zu reduzieren und desto mehr heizt sich die nähere Umgebung auf. Ein wandelbares Dach verfolgt den Ansatz, den Raum/die Fläche über den Oberflächen durch eine geeignete Konstruktion in den überhitzten Sommermonaten durch Reflexion am Tag und abkühlende Belüftung in der Nacht zu einem angenehmen Ort zu machen.

## 1.2 Untersuchungsgegenstand

In den Untersuchungen werden verschiedene Themenbereiche von dem Fachgebiet Tragwerksentwurf und dem Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen analysiert und erforscht. Das Fachgebiet Tragwerksentwurf beschäftigt sich mit dem Entwurf und der Simulation effizienter Tragstrukturen für die Überdachungen von Straßenschluchten, Plätzen und Innenhöfe und mit der Prüfung der umgebenden Bebauungsstruktur im Bestand. Hierzu gehören die Untersuchung verschiedener Baumaterialien, Tragkonstruktionen und die städtebauliche Analyse der ausgewählten Orte.

Der Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen befasst sich mit der Entwicklung und Implementierung fortschrittlicher Technologien und nachhaltiger Konzepte im Bereich des Gebäude-Stadt-Kontextes. Dazu zählen energetische Optimierung, Klimatisierung, nachhaltige Materialien und innovative Gebäudetechnologien. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden neben den Simulationen auch Dauermessungen (als Vergleichsmessung) an einem wandelbaren Membrandach durchgeführt. Ursprünglich waren diese Messungen im Künstlerhof München geplant gewesen, wegen der Größe des Daches und einer bestehenden W-Lan Anbindung wurde sich dann jedoch für das Dach in der Metzgergasse Buchs, CH entschieden.

### 1.2.1 Städtische Wärmeinseln und thermischer Komfort im Freien

Eine wirksame Strategie zur Förderung der Begehbarkeit und zur positiven Beeinflussung der Gesundheit und des Wohlbefindens der Bürger besteht darin, ihnen mit Bäumen oder künstlichen Überdachungen und Strukturen Komfort zu bieten (Zhao, Sailor, and Wentz 2018). Es besteht kein Zweifel daran, dass Stadtbäume und lebende Strukturen eine optimale Lösung zur Minderung der städtischen Hitze darstellen.

In diesem Zusammenhang haben sowohl Simulationen als auch experimentelle Studien gezeigt, dass eine der effektivsten Strategien zur Vermeidung von Oberflächenüberhitzung die Verschattung ist. Textile

Beschattungssysteme sind eine attraktive Option, wenn die Verwendung von Vegetation eingeschränkt ist, wenn abnehmbare Sonnenschutzvorrichtungen wünschenswert sind oder wenn ein flexibles geometrisches Design erforderlich ist, um den unterschiedlichen Anforderungen in den verschiedenen Jahreszeiten gerecht zu werden (Hwang, Lin, und Matzarakis 2011).

Städte im Mittelmeerraum, die typischerweise mit diesen Einschränkungen konfrontiert sind, bieten ein traditionelles Beispiel für den Einsatz von textilem Sonnenschutz. Diese Vorrichtungen bestehen in der Regel aus einer Reihe von Sonnensegeln, die als Vordach in verschiedenen Höhen innerhalb der Straßenschlucht angebracht sind. Der offensichtlichste Effekt von Sonnensegeln ist eine Verringerung der in die Straßenschlucht eindringenden Sonnenstrahlung. Die Installation dieser Vorrichtungen verändert jedoch das Mikroklima der Straße auf andere Weise, indem sie nicht nur die Strahlungsflüsse, sondern auch die Lufttemperatur und die Windströmungen innerhalb der Straßenschlucht verändert. All diese Prozesse wirken sich auf die Energiebilanz der städtischen Oberflächen und damit auf deren Temperatur aus.

### 1.2.2 Straßenschluchten, Innenhöfe und Plätze

Straßenschluchten, Innenhöfe und Plätze gehören zu den häufigsten und repräsentativsten Bausteinen der Städte. Sie können durch freistehende Gebäude oder durch Zeilen gebildet werden, die Öffnungen zulassen oder ganz geschlossen sind. Jedoch gibt es verschiedene Arten von städtischen Räumen, die in urbanen Umgebungen vorkommen.

Jeder Raum hat seine eigenen Merkmale und Funktionen, die das städtische Leben prägen. Stadt- oder Straßenschluchten sind enge, hohe Straßen, die von hohen Gebäuden auf beiden Seiten flankiert werden. Sie entstehen oft in dicht bebauten Stadtzentren und sind charakteristisch für moderne Städte mit Hochhäusern. Außerdem bieten diese Schluchten oft beeindruckende architektonische Kulissen und sind wichtige Verkehrswege, in denen Geschäfte, Büros und Wohnungen zu finden sind. Allerdings können sie auch zu einer begrenzten Durchlüftung und Wärmeansammlung führen, was als "Urban Heat Island" Effekt bekannt ist.

Bei den Innenhöfen handelt es sich um halb oder vollständig umschlossene Räume innerhalb von Gebäudekomplexen. Sie können privat oder öffentlich zugänglich sein und dienen oft als ruhige Oasen inmitten des städtischen Trubels. Innenhöfe bieten einen geschützten Raum für Bewohner, Angestellte oder Besucher und können mit Grünflächen, Sitzgelegenheiten, Brunnen und anderen Elementen gestaltet sein.

Plätze sind offene und auch oft große Flächen in der Stadt, die als Treffpunkt und sozialer Knotenpunkt dienen. Sie sind häufig von Gebäuden, Geschäften und Restaurants umgeben und bieten viel Platz für Veranstaltungen, Märkte, Freizeitaktivitäten und kulturelle Veranstaltungen. Plätze sind wichtig, um das soziale Leben in der Stadt zu fördern und Gemeinschaft zu schaffen.

Jeder dieser städtischen Räume hat seine eigenen Vor- und Nachteile und spielt eine wichtige Rolle in der Gestaltung und Nutzung von städtischen Umgebungen. Die optimale Planung und Gestaltung von Stadtschluchten, Innenhöfen und Plätzen kann dazu beitragen, eine ausgewogene städtische Umgebung zu schaffen, die den Bedürfnissen der Bewohner und Besucher gerecht wird und eine lebenswerte Stadtlandschaft fördert. Trotz der unterschiedlichen Geometrien können ihre linearen und polygonalen abstrahierten Formen als grundlegende Randbedingungen für die Gestaltung von Schattendächern verwendet werden.

Diese Grundformen werden den folgenden Untersuchungen zugrunde gelegt und bilden die Basis für den Formfindungsprozess.

### 1.2.3 Parallel und zentralgeraffte Membrandächer

Bereits in den 1970er Jahren veröffentlichten Frei Otto und sein Team die Publikation IL5 Wandelbare Dächer (Otto and al. 1971), in der über umfangreiche Studien zu wandelbaren Membrandächern berichtet wurde. Das Projekt C<sup>3</sup> fokussiert sich auf die Konstruktionen der Parallelraffung und der Zentralbündelung für lineare bzw. polygonale Standortbedingungen wie in 1.2.2 erwähnt.

In der konstruktiven Umsetzung werden zwei Referenzprojekte aus der Praxis herangezogen. Das erste ist die Überdachung des Innenhofs des Rathauses von Wien, entworfen von sbp (Bergermann, Gugeler, & Keck, 2004), und das zweite ist die Überdachung der Metzgergasse der Stadt Buchs, Schweiz, über einer Geschäftsstraße, entworfen von Kugel Architekten mit str.ucture, GmbH aus Stuttgart.

Konkret handelt es sich dabei um leichte, klimaadaptive und flexible Membranüberdachungen, die durch ihre reflektierende Wirkung Hitzeinseln (Urban Heat Island – UHI) entgegenwirken, Schatten spenden und urbane (Begegnungs- und Nutz-) Räume erhalten und schaffen.

#### 1.2.4 Geometrievariation und Beschattungsbedarf

Die Planung von wandelbaren Membrandächern in bebauten Stadtgebieten zur Beschattung birgt zwei offensichtliche Herausforderungen, nämlich die Komplexität der Standortgeometrie und die unterschiedlichen Beschattungsanforderungen aufgrund des Schattenwurfs der umliegenden Gebäude. Im Falle eines parallel angeordneten Daches bedeutet dies, dass die Verankerungskräfte der Membran senkrecht zu den Schienen ausgerichtet und die Membranfelder so angeordnet werden müssen, dass sie effizient beschattet werden. Bei zentral gerafften Dächern müssen die Tragseile an tragfähige Verankerungspunkte angebunden werden oder in freistehende in sich die Kräfte kurzschließende Stahlkonstruktionen eingehängt werden. Auch hier muss die Membranform so optimiert werden, dass die Verankerungskräfte tangential zu den Tragseilen laufen und gleichzeitig eine effiziente Verschattung gewährleisten.

#### 1.2.5 Thermischer Komfort in Städten

Die Beschattungseffizienz eines Membrandachs kann durch Abzählen der Beschattungsereignisse an einem bestimmten Standort bewertet werden. Eine Stunde im Jahr, die einem bestimmten Sonnenwinkel entspricht, wird als ein Ereignis gewertet, wobei der Schattenwurf des bestehenden Gebäudes und der Membran berücksichtigt wird, ersterer als ein Beschattungsereignis von 1,0 und letzteres in Abhängigkeit vom Transmissionsgrad des Materials, da dieser die Beschattungsqualität beeinflusst (Garcia-Nevado, Beckers und Coch, 2020). Im Falle von PTFE-Gewebe liegt dieser Wert bei etwa 0,5 (Knippers, Cremers, Gabler und Lienhard, 2011). Mit dieser Zählmethode werden die topologischen und geometrischen Untersuchungen Orts- und Jahreszeitenspezifisch bewertet.

## 2 Problemstellung

Städtische Umgebungen gehören zu den Bereichen, die mit am stärksten vom Klimawandel betroffen sind. Die Art und Weise, wie wir unsere Städte gebaut haben, die verwendeten Materialien, die entworfenen Gebäude und die Kompaktheit wie die Städte gestaltet sind, schaffen unterschiedliche Mikroklimata. Diese Mikroklimata wirken sich täglich auf Millionen von Menschen auf der ganzen Welt in Form von Hitzestress aus. Darüber hinaus ist der so genannte urbane Wärmeinsel-Effekt (UHI) ein Nebenprodukt dieses veränderten Mikroklimas, das Wärmeinseln erzeugt, die den Kühlbedarf von Gebäuden und den Energieverbrauch erhöhen.

Um die Dimensionen des städtischen Mikroklimas zu verstehen und angenehme und lebenswerte Außenbereiche zu schaffen, müssen wir die Parameter, die das Klima auf menschlicher Ebene formen und verändern, im Detail untersuchen. Aus diesem Grund setzen wir Simulationen oder computergestützte Modellierungs- und Messverfahren ein, um Mikroklimadaten in bebauten Umgebungen zu erzeugen und zu erfassen.

### 2.1 Stand der Forschung/Baupraxis

Das städtische Mikroklima wurde erstmals im Jahr 1818 von Howard untersucht und beschrieben (Howard, 1833). Howard nutzte meteorologische Beobachtungen für verschiedene Regionen in der Umgebung, um daraus abzuleiten, dass die Lufttemperatur in der Stadt höher ist als in den umliegenden ländlichen Gebieten (Howard, 1833) und (Blake et al., 2011). T. R. Oke sammelte die Daten und analysierte die Wärmeschwankungen in einem Gebiet durch ein mathematisches Modell der Surface Energy Balance (SEB) (Oke, 2002). Mit der zunehmenden Fokussierung auf die globale Erwärmung und den Hitzestress begannen sich auch die Studien zum Mikroklima und dessen Zusammenhang mit globalen Mustern auf das menschliche Wohlbefinden zu konzentrieren (Masson et. al., 2020).

In diesem Forschungsbereich ist es für eine nachhaltige Stadtplanung entscheidend, die Mechanismen zu verstehen, die die städtischen Oberflächentemperaturen antreiben. Oberflächenüberhitzung hat negative Auswirkungen auf den menschlichen Komfort und den Energieverbrauch der Stadt. In den letzten Jahrzehnten wurde intensiv über die Wirksamkeit der verschiedenen Kühltechnologien (Garcia-Nevedo et al. 2020: 102458) geforscht, um den Außenkomfort in Städten zu verbessern. Es gibt zwei Hauptwege, um dieses Ziel zu erreichen:

- städtische Morphologien (Ali-Toudert et al., 2006); Vegetation (Park, 2019) und
- künstliche Beschattungseinrichtungen.

Die meisten der vorhandenen Studien konzentrieren sich auf die Auswirkungen von selbstbeschattenden Stadt-Geometrien und Schattenbäumen. Demgegenüber ist die Aufmerksamkeit, die dem künstlichen Sonnenschutz gewidmet wurde, weitaus geringer (Kántor et al., 2018). Textile Beschattungsvorrichtungen sind eine attraktive Option, wenn die Verwendung von Vegetation eingeschränkt ist, abnehmbare Sonnenschutzvorrichtungen ratsam sind oder eine flexible geometrische Gestaltung erforderlich ist. Eine aktuelle Studie zu Vordachkonstruktionen zeigt, dass hoch montierte Sonnensegel einen globalen Kühleffekt über der Straße haben, unabhängig von ihrer Ausrichtung. Die Absenkung der Bodentemperatur durch Sonnensegel erreicht bis zu 16°C, die der Fassadentemperatur bis zu 6°C (Garcia-Nevedo, 2018).

Als unumgängliche Basis ist hier das Klima einer der wichtigsten Faktoren. Es bestimmt, wie häufig die Menschen den öffentlichen Raum und die Außenbereiche nutzen. Der Schutz an heißen Sommertagen und der Effekt, Bereiche unter einem wandelbaren Dach durch Schattenwurf abzukühlen, gewinnt nicht nur punktuell und linear an Zuwendung, sondern auch flächenmäßig. Moderne wandelbare Überdachungssysteme stehen deswegen im Fokus des Klimawandels und werden die Bewohner in dem dynamischen System der Stadtstruktur zunehmend schützen müssen. Die bebaute und die natürliche Umwelt prägen das umgebende Mikroklima, das in räumlicher und zeitlicher Auflösung variiert.

Das städtische Mikroklima ist ein gemeinsamer Bereich von Klimaforschern und Stadtplanern. Betrachtet man jedoch die Geschichte der Stadtklimaforschung, so stellt man fest, dass sie sich mit diesem Thema in Bezug auf Maßstab, relevante Variablen, Messgrößen und Auflösung unterschiedlich auseinandergesetzt haben. Die Klimatologen interessierten sich mehr für die Phänomene der städtischen Wärmeinsel (Urban Heat Island, UHI) auf einer Mesoskala, während die Stadtplaner sich mehr mit den Umweltkräften auf und/oder zwischen den Gebäuden befassten. Trotzdem haben sich die Stadtklimatologen in den letzten Jahren zunehmend auf die Mikroskala verlagert, da die städtische Form und der Energieaustausch an der Oberfläche zwischen den Häuserschluchten in den Mittelpunkt solcher Studien gerückt sind. Darüber hinaus ist festzustellen, dass in den letzten Jahren Maßnahmen im Zusammenhang mit dem öffentlichen Raum und der städtischen Gesundheit, wie z. B. Komfort im Freien, Luftqualität und akustische Verschmutzung, in den Mittelpunkt mehrerer Werkzeugentwicklungen und Studien von Klimatologen, Computergestaltern und Stadtplanern gerückt sind.

### 2.1.1 Aktuelle Mikroklimamessmethoden

In Städten und im öffentlichen Raum herrschen transiente Bedingungen, wenn sich die Menschen zwischen Räumen bewegen, die sich in einem breiten Spektrum unterschiedlicher Umweltbedingungen befinden (Hensen, 1990). Dazu gehören Stufenwechsel, Temperaturschwankungen und zyklische Schwankungen, die das thermische Empfinden und den Komfort beeinflussen. Die vorübergehende Natur des thermischen Komforts wurde in Studien über Innenräume weithin diskutiert (Arens, 2006; Fiala, 2003; Kaynakli, 2005). Allerdings fehlt es im Allgemeinen an einem solchen Verständnis für Außenbereiche.

Die meisten allgemein verfügbaren meteorologischen Daten stammen von statischen Stationen, die wertvolle Informationen über das Stadtklima und UHI liefern können, indem sie Stationen im Stadtzentrum mit denen in den Vororten vergleichen. Solche Daten ermöglichen jedoch keine raum-zeitliche Bewertung der mikroklimatischen Bedingungen auf Straßenebene. Man könnte argumentieren, dass die alternative Methode der Simulationsansatz sein könnte, doch aufgrund der Komplexität solcher Modelle und der starken Abhängigkeit von detaillierten physikalischen Eingangsmodellen städtischer Artefakte haben Computermodelle in der Regel eine begrenzte Auflösung auf Fußgängerebene. Darüber hinaus sind diese Modelle bei der Vorhersage der menschlichen Wahrnehmung unter bestimmten mikroklimatischen Bedingungen begrenzt.

Die Erfassung von Daten auf menschlicher Ebene innerhalb der Anthroposphäre ist kein neuer Ansatz. Es gab bereits mehrere Prototypen mit unterschiedlichen Anwendungsbereichen zur Erfassung von Datenbahnen auf mikroskopischer Ebene, um die Interaktionen von Menschen mit der städtischen Umwelt zu verstehen und zu belegen.

Eines der allerersten tragbaren Instrumentensysteme zur Messung von Umweltparametern ist die Arbeit von Herrington und Vittumin aus dem Jahr 1977 in New York in Verbindung mit den physiologischen Reaktionen der menschlichen Nutzer der Räume (Herrington, 1977). In ihrer Studie kamen sie zu dem Schluss, dass das thermische Wohlbefinden des Menschen durch die Gestaltung der Räumlichkeiten in hohem Maße kontrolliert und verbessert werden kann. Diese Erkenntnis ist heutzutage nicht mehr neu, aber immer noch berücksichtigen viele Bauvorhaben eine solche Maßnahme nicht als Teil ihres Entwurfsprozesses.

Angetrieben von technologischen Fortschritten setzten Nakayoshi und Kanda ein Messsystem ein, das die von Personen erlebten mikroklimatischen Bedingungen und die entsprechenden physiologischen Reaktionen entlang einer bestimmten Fußgängerroute aufzeichnet, die aus verschiedenen städtischen Morphologien und Oberflächenumgebungen besteht (Nakayoshi, 2015). Die Schwankungen des Wärmeempfindens werden auf die Thermorezeptoren der Haut zurückgeführt, die auf subtile mikroklimatische Veränderungen reagieren (De Dear, 2011). Dies deutet darauf hin, dass der thermische Komfort von Fußgängern unter instationären Bedingungen im Freien in hohem Maße mit ihrer physiologischen Reaktion und ihrer thermischen Vorgeschichte zusammenhängt. Die folgende Tabelle fasst verschiedene Studien und Methoden zur Überwachung des Mikroklimas und sensorische Entwicklungen zusammen.

Tabelle 1  
Vergleich der Methoden und Instrumente zur Messung des Mikroklimas

Name	Jahr	Lufttemperatur	Luftfeuchtigkeit	Sonneneinstrahlung	Windgeschwindigkeit	Himmelsaussichtsfaktor	Globe Temperatur	GPS Koordinaten	Schallpegel	Luftqualität	Index	Modus	Stadt	Plattform	Referenz
MaRTy	2019	•	•	•	•			•			PET UTCI	M	Tempe	Industrielle Sensoren	(Middel, 2019)
-	2019	•	•	•	•		•				PET	M	Amsterdam	Industrielle Sensoren	(Klok, 2019)
-	2018	•						•			UHI	M Auto	Doha	T type Thermocouple wire	(Ferwati, 2018)
City Scanner	2018	•	•					•	•	•	-	M Auto	Cambridge	Open-Source-Sensoren	(Anjomshoaa, 2018)
-	2018	•	•	•	•			•			Tair	M Bike	Tokyo	Platinum resistance thermometer	(Yokoyama, 2018)
CityFeel	2017	•	•	•	•	•	•	•			PET	B	Geneva	Industrielle Sensoren	(Gallinelli, 2017)
-	2016	•						•			Tair LST	B	Vancouver	Industrielle Sensoren	(Tsin, 2016)
Urbmobi	2016	•	•	•				•				M Bus	Aachen		(Seidel, 2016)
-	2015	•	•	•	•		•				UTCI	M	Strasbourg	Industrielle Sensoren	(Kastendeuch, 2016)

## 2.2 Forschungslücke/Entwicklungsbedarf

Mit der Implementierung von Überdachungsstrukturen im urbanen Raum kann zur Reduzierung des Hitzestresses und damit einhergehend der Steigerung der Nutzungsqualität städtischer Freiräume sowie zur Minderung von UHIs und einer generell niedrigeren Belastung durch den Klimawandel beigetragen werden.

Das Forschungsprojekt adressiert die folgende Forschungslücke:

- Die Überprüfung historischer Überdachungssystemen im Vergleich gegenwärtiger Überdachungen im Kontext des urbanen Raums
- Es besteht die Notwendigkeit, Orte in urbanen Ballungsräumen, die zur Bildung von UHIs und einem vermehrten Hitzestress beitragen, soziokulturell und städtebaulich einzuordnen und zu lokalisieren.

Die Forschung untersucht das Potenzial von Überdachungen zur Minderung von Hitzestress in längeren Zeiträumen (saisonal).

Um das tatsächliche Ausmaß der Auswirkungen der Reduzierung von Hitzestress auf die menschliche Gesundheit, das Wohlbefinden und die Akzeptanz der Nutzer zu ermitteln, sind physiologische und psychologische Untersuchungen erforderlich. Zudem sollte die Möglichkeit der Verbesserung des städtischen Klimas durch gezielte architektonische Interventionen in Betracht gezogen werden. Dies könnte durch die

Schaffung von mikroklimatischen Bedingungen mittels anpassbarer textiler Dachstrukturen an städtischen Standorten geschehen, an denen eine Begrünung nicht realisierbar ist. Wandelbare Membranstrukturen erlauben das Verschatten bei direkter Sonneneinstrahlung und ermöglichen gleichzeitig ausreichend Luftzirkulation zur Abkühlung aufgeheizter Bausubstanz im eingefahrenen Zustand.

Außerdem haben Membranmaterialien eine hohe Albedo (= Rückstrahlvermögen der Oberfläche) und können einen Beitrag zur Verbesserung des städtischen Klimas und der Minimierung von UHIs leisten. Negative globale Erwärmungs-Effekte von Dachflächen/Straßen mit weißen Anstrichen treten durch den Luftraum und die Wandelbarkeit der flexiblen Überdachungen voraussichtlich nicht auf.

Der Klimawandel führt weltweit zu einem Anstieg der Umgebungstemperaturen sowie der Häufigkeit, Dauer und Intensität extremer Hitzeereignisse. Die Auswirkungen sind in städtischen Gebieten aufgrund der städtischen Wärmeinsel noch gravierender. Dieses Phänomen wird durch die gegenwärtige Urbanisierungsdynamik noch verstärkt.

Eine der größten Herausforderungen der nachhaltigen Stadtplanung in Städten ist daher die Abkühlung der bebauten Umwelt. Das Hauptziel einer klimagerechten Stadtplanung ist die Verwendung von Sonnenschutz im Sommer, ohne jedoch die Sonneneinstrahlung im Winter einzuschränken oder übermäßige Wasserressourcen zu verbrauchen. Wandelbare textile Sonnenschutzvorrichtungen erfüllen diese Anforderungen. Textile Beschattungsvorrichtungen sind eine attraktive Option, wenn die Verwendung von Vegetation eingeschränkt ist, wandelbare Sonnenschutzvorrichtungen ratsam sind oder eine flexible geometrische Gestaltung erforderlich ist.

Solche Konstruktionen werden traditionell in mediterranen Städten eingesetzt, um den sommerlichen Komfort für Fußgänger zu verbessern, vor allem in Einkaufsstraßen. Diese Vorrichtungen bestehen in der Regel aus einer Reihe von Sonnensegeln, die ein Vordach bilden und in verschiedenen Höhen über der Straße angebracht sind (Garcia-Nevado, 2021). Straßensonnensegel werden nicht nur an Orten mit traditionell heißen Sommern immer beliebter, sondern auch in Gebieten mit gemäßigttem Klima, die unter den zunehmenden Auswirkungen der globalen Erwärmung leiden. Die Forschungslücke, mit der wir uns in diesem Projekt befassen, besteht darin, das Potenzial von Straßensegeln zur Begrenzung der Überhitzung im Freien und folglich des thermischen Komforts von Fußgängern in gemäßigten Klimazonen wie Deutschland zu bewerten.

## 2.3 Begründung des Bundesinteresses

### 2.3.1 Klimaneutralität und Klimaanpassung von Gebäuden

Die Verbesserung des Mikroklimas in Städten und der Einsatz von Maßnahmen zur Reduzierung des UHI hat direkten Einfluss auf die Reduzierung des Kühlbedarfs von Gebäuden in Hitzeperioden. Dies führt zu einem geringeren Energiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Die Verwendung von nachhaltigen Baustoffen/Konstruktionsmethoden ist ein fester Bestandteil des Entwicklungsprozesses von C<sup>3</sup>. Durch lösbare Verbindungen und die Wahl kreislauforientierter Materialien ist C<sup>3</sup> im Kreislaufsystem von der Bauteilerstellung bis hin zum Rückbau und Recycling erdacht und bekämpft somit nicht nur die Folgen des Klimawandels, sondern berücksichtigt in der Entwicklung auch den Ursprung.

Der konstruktive Lösungsansatz in C<sup>3</sup> nutzt die Grundprinzipien des Leichtbaus, welcher vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie jüngst als Innovationstreiber und Garant für Ressourcen- und Energieeffizienz bezeichnet wurde (Oke, 1988).

Durch die qualitative Verbesserung des Stadtklimas kann die Aufenthalts- und Durchquerungsqualität von urbanen Außenräumen gesteigert werden. Indirekt kann so der Mobilitätswandel (Fuß, Fahrrad, soft traffic) gefördert werden, was sich direkt auf die Gesundheit und die Lebensqualität der gebauten Umwelt auswirkt.

C<sup>3</sup> kann durch die Anpassung an die Folgen des Klimawandels einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung einer klimaadaptiven Stadtentwicklung leisten und indirekt zur Stärkung der Robustheit und Resilienz von Gebäuden und Stadträumen beitragen (Statistisches Bundesamt, 2018). Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit und den Wissenstransfer der Disziplinen Architektur/Stadtplanung, Bauingenieurwesen und Mikroklimatologie soll das Projekt zur Entwicklung von Innovation für die Bau- und Planungspraxis beitragen.

Das Thema Außenkomfort und Mikroklima ist eines der Forschungsgebiete, die Potenzial und Bedarf für weitere Erforschung hat. Dieser Forschungsbereich hat im Zusammenhang mit urbaner Gesundheit und Hitzestress in Städten in den letzten Jahren im Zusammenhang mit dem Klimawandel an Sichtbarkeit gewonnen (Gales et al. 2006). Diese zunehmenden klimatischen Belastungen durch den Klimawandel haben besonders für urbane Ballungsräume spürbare Folgen (Stone, 2012); (Stone et al., 2012); (Witt et al. 2015) und damit für große Teile der Weltbevölkerung (Statista, 2020); (Statistisches Bundesamt, 2018). Das städtische Klima spielt somit eine immer bedeutendere Rolle für die Bevölkerung und das Klima insgesamt. Insbesondere innerstädtische Hitzeinseln (Urban Heat Island - UHI) belasten die städtischen Räume und beeinflussen über die lokale Wirkung hinaus auch die globale Erwärmung (Statistisches Bundesamt, 2018); (Jones et al., 1990); (Rizwan et al., 2008). Angetrieben von der Notwendigkeit neuer Methoden zur Untersuchung des Mikroklimas in Städten haben viele Wissenschaftler neue Berechnungsmethoden und Ansätze zur Datenerfassung erforscht, um das Verhalten städtischer Kontexte und dem sie umgebenden Mikroklima zu untersuchen. Mehrere Studien wurden durchgeführt, um das Materialverhalten von städtischen Oberflächen und ihren Beitrag zur Reduzierung von Hitzestress zu untersuchen (Chokhachian et al., 2017); (Chokhachian et al., 2017); (Chokhachian et al., 2020). Neben den Berechnungsmethoden gibt es mit dem Aufkommen neuer Sensortechniken und Datenerfassungsmethoden (Chokhachian et al. (2018: 94-104); (Aviv et al., 2021) neue Möglichkeiten, die langfristigen Auswirkungen von Vordächern auf das Mikroklima und die Reduzierung von Hitzestress in Städten zu untersuchen. Bisherige Forschungen beschäftigten sich bereits mit der UHIs-mindernden Wirkung weißer Oberflächen (Jacobsen et al., 2012); (Oleson et al., 2016) und der Verwendung **von hellen Membranen als 'cool roof application's (Pisello et al., 2016) oder als Zeltstrukturen (Battle, 1991)** Zum Einfluss wandelbarer und klimaadaptiver Textildächer auf das Stadtklima gibt es bisher keine grundlegenden Forschungen, sie werden aber in (Ruefenacht 2017) als grundsätzliche Strategie gegen UHIs aufgelistet.

## 2.4 Forschungsfragen

Zentrale Forschungsfragen des Projekts beschäftigen sich neben dem soziokulturellen und räumlichen Mehrwert mit der Albedo von Membranen und dessen Möglichkeiten zur positiven Beeinflussung des Klimas:

- Inwiefern beeinflussen leichte, reflektierende Oberflächen den Wärmeeffekt - lokal und global? Welchen Einfluss hat Luftzirkulation einer Überdachung auf den kühlenden Effekt im Gegensatz zu der Wirkung auf geschlossener Bausubstanz (Anstrich von Dachflächen mit weißer Farbe)
- Besteht die Möglichkeit einer Adaption und Skalierbarkeit von low-tech Ansätzen auf nord- und mitteleuropäische Stadträume?
- Können Überdachungen einen Mehrwert in klimatischer und gesellschaftlicher Form generieren?
- Inwiefern können flexible Membranüberdachungen ein Werkzeug für eine klimaresiliente Stadtentwicklung sein?
- Wie können die verschiedenen klimatischen und räumlichen Ansprüche ästhetisch und architektonisch zusammengebracht werden?
- Wie können Konzepte und Möglichkeiten des nachhaltigen Bauens in die Entwicklung integriert werden?
- Inwiefern sind flexible Membranüberdachungen nur durch die Konstruktion wandelbar oder auch mit dem Material der Membran so einsetzbar, dass das Material einen Abkühlungseffekt durch Luftzirkulation möglich macht?
- Welche Parameter spielen bei der Gestaltung des städtischen Mikroklimas eine Rolle?
- Welchen Nutzen hat der Einsatz von Überdachungen, um die Auswirkungen von Hitzewellen in Städten zu mildern?
- Welchen langfristigen Nutzen haben ausfahrbare Dächer zur Verringerung der Hitzebelastung und zur Verbesserung des städtischen Mikroklimas in Städten?
- Welchen Nutzen hat eine wandelbare Konstruktion in Bezug auf die Dauerhaftigkeit an einem Standort und welcher Vorteil entwickelt sich bei den Nutzern in Abhängigkeit der Bestandsräume?

## 3 Forschungsansatz

### 3.1 Arbeitshypothesen

Das Projekt zielt darauf ab, das Potenzial von wandelbaren Membrandächern und Vordächern zur Abschwächung des städtischen Hitzeinsel-Effekts und zur Verbesserung des städtischen Mikroklimas in Städten zu erforschen. Das Projekt geht davon aus, dass durch den Einsatz leichter, reflektierender Oberflächen mit hoher Albedo der Hitzestress verringert und der thermische Komfort in städtischen Räumen sowohl lokal als auch global verbessert werden kann.

Darüber hinaus geht das Projekt davon aus, dass Überdachungen in klimatischer und sozialer Hinsicht einen Mehrwert schaffen können, indem sie Schatten und Schutz bieten, den Wärmegewinn reduzieren und die Qualität von Außenräumen verbessern. Das Projekt untersucht, wie unterschiedliche klimatische und räumliche Anforderungen ästhetisch und architektonisch zusammengebracht werden können, um nachhaltige und klimaresistente Stadträume zu schaffen.

Eine weitere Hypothese des Projekts ist, dass wandelbare Dächer und Vordächer Möglichkeiten für nachhaltige Gebäudekonzepte bieten, die in bestehende städtische Räume integriert werden können. Die Forschung untersucht die Vorteile einer wandelbaren Konstruktion in Bezug auf die Dauerhaftigkeit am Standort und die Zufriedenheit der Nutzer. Es wird untersucht, welche Vorteile sich bei den Nutzern in Abhängigkeit von den bestehenden Räumen entwickeln können und wie sie zur Entwicklung von klimaresistenten und nachhaltigen Stadtplanungs- und Gestaltungsstrategien beitragen können.

Zusammengefasst lautet die Haupthypothese des Projekts:

Wandelbare Dächer können einen positiven Beitrag zur klimaresistenten Stadtentwicklung leisten, indem sie durch ihre hohe Albedo und Beschattungseigenschaften den Erwärmungseffekt lokal und global abmildern. Der Einsatz von leichten, reflektierenden Oberflächen und Vordächern kann einen klimatischen und sozialen Mehrwert schaffen, indem Hitzestress reduziert und das städtische Mikroklima verbessert wird. Die kühlende Wirkung durch Luftbewegung kann durch das Design und das Material der Membran erreicht werden, wodurch sie für Low-Tech-Ansätze in nord- und mitteleuropäischen Städten geeignet ist.

## 3.2 Methodischer Ansatz

### 3.2.1 Architektur und Städtebau

Im Zusammenhang verschiedener Ansätze in den Bereichen der konstruktiven Umsetzung und der Klimasimulation und Langzeitmessungen analysiert die Architektur im Kontext des Städtebaus die Zusammenhänge verschiedenen Gesichtspunkten.

Zur Identifikation von typischen Hitzeinseln im städtischen Raum werden Klimakarten der Städte herangezogen. Durch eine Bestandsanalyse werden räumliche und soziokulturelle Rahmenbedingungen, wie Gebäudegeometrie, Material, Höhen, Dichte, Setzung, Wegeverbindungen, Freiräume (begrünt und versiegelt) sowie Nutzungen und Aufenthaltsqualitäten aufgenommen. Die Ergebnisse sollen in einer SWOT-Analyse (Stärken, Schwächen, Risiken, Chancen) zusammengefasst und bewertet werden, um so Erkenntnisse über die räumlichen und soziokulturellen Konfigurationen von hitzebelasteten Orten in der Stadt zu gewinnen und die Auswirkungen der klimatischen Bedingungen auf das Nutzungsverhalten. Mit Hilfe dieser Daten sollen zwei gebaute Beispielorte (Case Studies) identifiziert werden, um dort mit Hilfe eines Befragungskatalogs das Nutzer\*innenverhalten und -empfinden zu untersuchen. Diese sollen zu Handlungsempfehlungen für eine digitale Case Study konkretisiert werden, die in die parametrischen Formfindungsprozesse einfließen und im weiteren Verlauf in ein spezifisches architektonisches Konzept und letztlich in einen Entwurf übersetzt werden.

- Die methodische Einschätzung und Weiterentwicklung der konkreten Analyseergebnisse werden auf Grundlage der oben genannten Analyseergebnisse erfolgen und sollen mit den umfassenden Resultaten eine Konkretisierung und Eingrenzung der umzusetzenden Ergebnisse in Bezug auf Konstruktion und Klima erreichen. Komplexe Stadtstrukturen sollen hier auf ein weniger komplexes Analysemodell herunter gefahren werden.

### 3.2.2 Konstruktive Umsetzung

Es werden bekannte Dachtypen analysiert und nach den Kriterien geometrische Anpassungsfähigkeit, Verankerungskräfte, Baukosten und sortenreine Rückbaubarkeit untersucht. Aus den Grundtypen werden mit Hilfe der isogeometrischen Analyse (Software Kiwi!3D) parametrische Grundformen entwickelt welche mit verschiedenen Neigungswinkeln und Öffnungsgraden in die Klimasimulation übertragen werden können. Gleichzeitig werden die Modelle in Bezug auf das architektonische Erscheinungsbild, die zu verankernden Lasten und den Materialaufwand ausgewertet. Für die Bewertung des Materialaufwandes wird der ökologische Fußabdruck mit Hilfe der Ökobaudat ausgewertet. Für die Case Study werden konkrete Dachentwürfe bis zu einem Detaillierungsgrad entsprechend der Entwurfsplanung LPH3 entwickelt und so detailliert auf o.g. Kriterien ausgewertet.

### 3.2.3 Klimasimulation und Langzeitmessungen

Methodisch gibt es zwei Hauptansätze für die Bewertung und Abschätzung des thermischen Komforts in Städten: einen simulationsbasierten Ansatz und einen auf Sensortechniken basierenden Ansatz. Die simulationsbasierten Methoden waren immer von der auf dem Hardwaresystem verfügbaren Rechenleistung abhängig. Mit dem Aufkommen von Cloud-Computing-Ressourcen ist es jedoch möglich, komplexe und mehrskalige Stadtmodelle mit angemessenem Zeitaufwand zu simulieren. Die Sensing-Methoden könnten als Validierungsstrategien oder zum Verständnis der Interdependenzen der Parameter in einem realen Fall eingesetzt werden. In dieser Forschungsarbeit setzen wir beide Methoden ein, um die Grenzen der einzelnen Methoden auszuloten und zu überwinden.

- Rechnergestützte Simulationen in Form von parametrischen Studien zur Analyse des Potentials wandelbarer Dächer auf UHIs.
- Unterstützung der Simulation durch Vor-Ort-Messungen.
- Methodisches Verständniss der wichtigsten Parameter aufbauen, um das Mikroklima in städtischen Umgebungen zu verstehen.

- Vor-Ort-Messungen an den bestehenden Dachstrukturen durchführen, um das thermische Verhalten und die Auswirkungen auf die unmittelbare Umgebung zu messen.
- Verwendung von Langzeitmessungen mit Unterbrechungen (12 Monate, 22.04.2022 – 31.05.2023), um die langfristigen Vorteile solcher Eingriffe zur Verbesserung des Mikroklimas in städtischen Gebieten unter Berücksichtigung des Tages- und Nachtverhaltens zu verstehen und zu prognostizieren.
- Computergestützte Modellierung verschiedener Designszenarien an unterschiedlichen Standorten und unter verschiedenen klimatischen Bedingungen, um die Durchführbarkeit von wandelbaren Dächern unter den jeweiligen Randbedingungen zu bewerten und den Designprozess so zu gestalten, dass sie einen maximalen Einfluss auf die Schaffung von lebenswerten Außenbereichen in Städten und öffentlichen Räumen haben.
- Um das Potential wandelbarer Dächer zur Reduktion von Hitzeinseln im urbanen Raum zu analysieren und mit Zahlen zu belegen sowie die optimalen Bedingungen deren Anwendung zu eruieren, werden rechnergestützte Simulationen in Form einer parametrischen Studie durchgeführt. Diese wird verschiedene Variablen wie Form und Größe des Canyons, Form, Neigung und Öffnungsgrad des Daches, Textilmaterialien, Regelungsvorgaben, Klimazonen und Wetterbedingungen betrachten. Die Ausgaberesultate beziehen sich immer auf die wahrgenommene Temperatur. Dafür wird der universelle thermische Klimaindex (UTCI) verwendet, der die "gefühlten" Temperaturen unter Einbeziehung des Lufttemperaturmodells, der Luftfeuchtigkeit, des Winds und der Strahlungstemperaturen anzeigt. Die Simulationen werden durch Vor-Ort-Messungen zur Kalibrierung sowie durch das Sammeln von Benutzer-Feedbacks unterstützt. Der Schritt der Entscheidungsfindung nach der parametrischen Studie und der Validierung der Simulationen wird von den Algorithmen des maschinellen Lernens profitieren, um Entwurfsszenarien zu optimieren und den Prozess mit Rückkopplungsschleifen zu informieren. Nutzung parametrischer Modelle zur Entwicklung einer weitspannenden Überdachung mit dem Fokus auf der passiven Reduktion von Überhitzung. Die parametrische Entwurfsmethodik verbindet verschiedene Aspekte, wie klimatische Bedingungen, architektonische Formfindung und konstruktive Anforderungen.

## 4 Entwicklungen und Ergebnisse

### 4.1 Architektur und Städtebau

#### 4.1.1 Typische Hitzeinseln im städtischen Raum

Hitzeinseln im städtischen Raum sind Gebiete oder Standorte innerhalb einer Stadt, die im Vergleich zu ihrer umgebenden ländlichen Umgebung eine deutlich höhere Temperatur aufweisen. Diese Temperaturunterschiede entstehen aufgrund der städtischen Infrastruktur, des Energieverbrauchs, der Bebauungsdichte und anderer Faktoren. Hier sind einige Merkmale typischer Hitzeinseln im städtischen Raum:

- Straßen, Parkplätze, Gehwege und andere Flächen mit Asphalt- oder Betonbelägen speichern Wärme und geben sie wieder ab. Dadurch entsteht eine erhöhte Temperatur in diesen Bereichen.
- Hohe Gebäude dicht nebeneinander können die Luftzirkulation behindern und die Sonneneinstrahlung blockieren. Dadurch entsteht eine Ansammlung von Wärme in der Stadt.
- Ein Mangel an Bäumen, Parks und anderen Grünflächen reduziert den Schatten und die Verdunstung, die zur Kühlung beitragen. Ohne ausreichende Vegetation können sich Hitzeinseln bilden.
- Industrielle Aktivitäten und Gewerbegebiete erzeugen oft Wärme als Nebenprodukt. Dies kann zu erhöhten Temperaturen in diesen Gebieten führen.
- Fahrzeuge erzeugen Wärme, insbesondere bei Staus und starkem Verkehrsaufkommen. Straßen und Autobahnen können sich dadurch in Hitzeinseln verwandeln.
- Klimaanlage, Kühlsysteme und andere technische Einrichtungen in Gebäuden erzeugen Wärme, die in die Umgebung abgegeben wird und zur Hitzeinselbildung beitragen kann.
- Hohe Gebäude und enge Straßen können den Luftstrom blockieren und die Kühlung durch Wind verhindern. Dadurch bleibt die Wärme in der Stadt gefangen.

Diese Faktoren können dazu führen, dass städtische Gebiete im Vergleich zu ländlichen Regionen höhere Temperaturen aufweisen und somit zu Hitzeinseln werden.

Einige dieser negativen Auswirkungen sind:

- Hitzeinseln können zu erhöhter Luftverschmutzung führen, da die höheren Temperaturen die Bildung von bodennahem Ozon begünstigen, was negative Auswirkungen auf die Luftqualität und die Gesundheit der Bewohner haben kann. Zudem können städtische Wärmeinseln dazu führen, dass natürliche Ökosysteme beeinträchtigt werden, da Pflanzen und Tiere empfindlich auf die erhöhten Temperaturen reagieren.
- Hohe Temperaturen in städtischen Gebieten können zu Hitzestress, Hitzeerschöpfung und Hitzschlag führen, insbesondere für gefährdete Bevölkerungsgruppen wie ältere Menschen, Kinder und Personen mit gesundheitlichen Problemen. Hitzebedingte Gesundheitsprobleme wie Hitzschlag können lebensbedrohlich sein.
- Städtische Wärmeinseln können den Energieverbrauch in städtischen Gebieten erhöhen, da mehr Energie für die Kühlung von Gebäuden und Innenräumen benötigt wird, um die höheren Temperaturen auszugleichen. Dies führt zu höheren Emissionen von Treibhausgasen und verstärkt den Klimawandel.

Daher ist es wichtig, Maßnahmen zu ergreifen, um die Auswirkungen von Hitzeinseln zu mildern, wie zum Beispiel die Schaffung von Grünflächen, die Förderung nachhaltiger Bauweisen und die Verbesserung der urbanen Planung.

Eine Auswahl von 7 Städten, in denen sich die Charakteristik der innerstädtischen Überwärmung zeigt, soll diese Problematik verdeutlichen und konkret an Lösungsvorschlägen arbeiten.

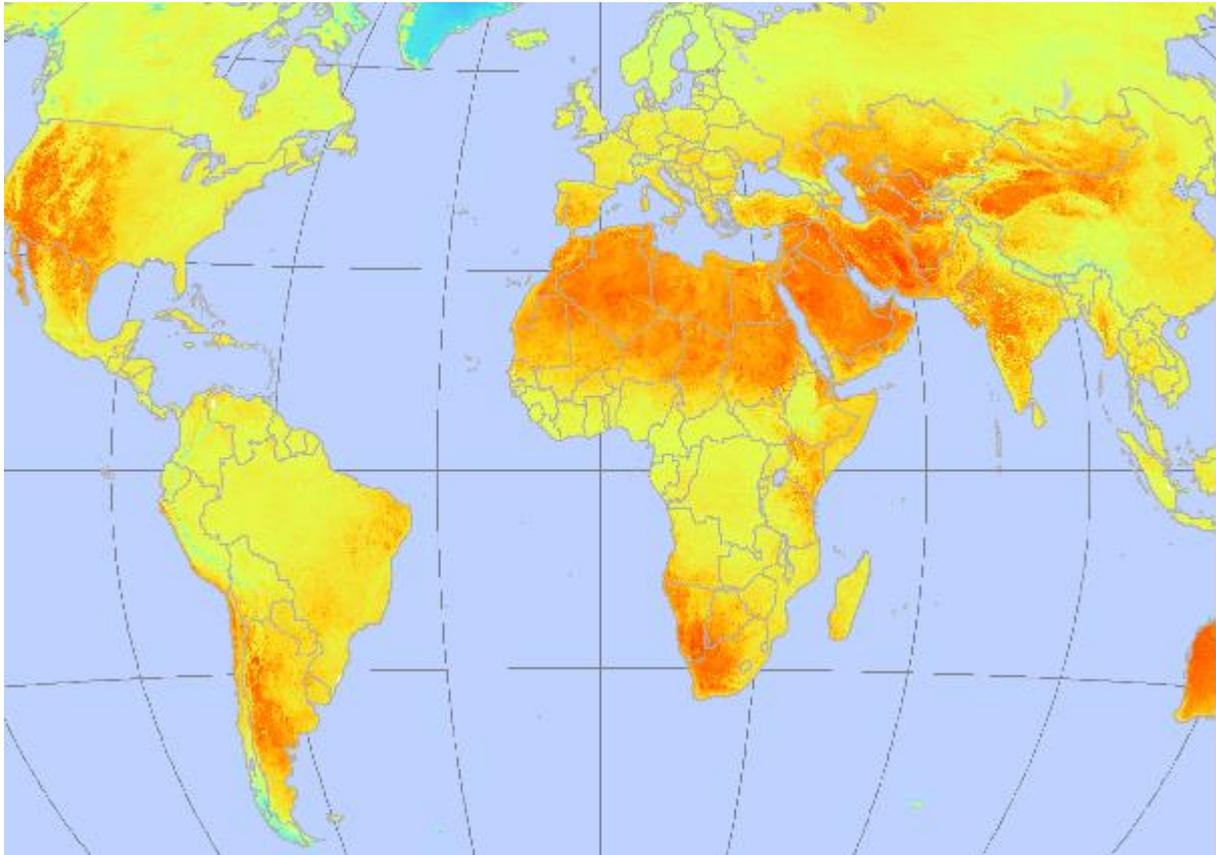
In einer ersten Betrachtung von stadträumlichen Bedingungen werden Klimaanalysekarten der Städte Berlin, Düsseldorf, Frankfurt, Hannover, München, Kassel und Stuttgart herangezogen und nebeneinandergelegt. Dabei werden die folgenden zu erfüllenden Grundkriterien für hitzebelastete Orte betrachtet:

- Die geografische Lage eines Ortes spielt eine entscheidende Rolle bei der Hitzebelastung. Standorte in tropischen oder subtropischen Breitengraden, in niedrig gelegenen Gebieten oder in geschützten Tälern haben tendenziell höhere Temperaturen. Demzufolge ergibt sich ein Fokus auf die Gemäßigte Zone, da durch den Klimawandel diese Regionen zunehmend wärmer werden.
- Städtische Gebiete sind oft hitzebelastet, da der sogenannte Urban Heat Island Effekt auftritt. Die Bebauung, der Mangel an Vegetation, die Anhäufung von Beton und Asphalt sowie der Energieverbrauch in Städten führen zu höheren Temperaturen im Vergleich zu den umliegenden ländlichen Gebieten.
- Die Wahl der Oberflächenmaterialien spielt eine Rolle bei der Hitzebelastung. Dunklere, absorbierende Materialien wie schwarzer Asphalt oder Beton können Wärme speichern und abstrahlen, was zu höheren Temperaturen führt, während helle, reflektierende Materialien dazu beitragen können, die Wärme zu reduzieren.
- Vegetationsbedeckung der Grünflächen und Vegetation tragen dazu bei, die Hitzebelastung zu reduzieren. Bäume und Pflanzen bieten Schatten und fördern die Verdunstungskühlung, was die Temperaturen senken kann.
- die Wasserverfügbarkeit kann die Hitzebelastung beeinflussen. Wasseroberflächen wie Seen oder Flüsse können kühlende Effekte haben, während Trockenheit und Wasserknappheit zu höheren Temperaturen führen können.
- die Topografie eines Ortes, wie die Ausrichtung zu Hängen oder das Vorhandensein von Schluchten, kann die Sonneneinstrahlung und die Wärmespeicherung beeinflussen.
- Klimaveränderungen können dazu führen, dass bestimmte Regionen insgesamt heißer werden. Dies kann auf globale Klimafaktoren wie den Treibhauseffekt zurückzuführen sein.

Diese Grundkriterien für hitzebelastete Orte sind wichtig, um Gebiete zu identifizieren, potenziell und gefährdete Regionen schneller heraus zu filtern und Maßnahmen zur Anpassung an Hitzebelastung zu entwickeln. Städte und Gemeinden können diese Faktoren berücksichtigen, um städtische Umgebungen zu gestalten, die den Herausforderungen von Hitzeinseln entgegenwirken und das Wohlbefinden der Bewohner verbessern.

Bei der Analyse handelt es sich um eine erste großmaßstäbige Betrachtung (M1:25.000), die in erster Linie Aufschluss über die typischen städtischen Strukturen/Nutzungen im Bereich von Hitzeinseln geben soll. Auf der Grundlage von Karten die Informationen über die globalen Oberflächentemperaturen im Sommer geben, können in verschiedenen Regionen der nördlichen und südlichen Hemisphäre Daten verstanden und analysiert werden. Wie in Abbildung 3 und Abbildung 4 zu sehen, liefern Satelliten gestützte Informationen über die Tageshöchsttemperatur und die Nachtminimumtemperatur um 13:30 Uhr (Lokalzeit) während der Sommermonate des Jahres 2013. Durch die räumliche Auflösung von ungefähr 1km werden hier sehr feine räumliche Details zur Verfügung gestellt und sind für die Analyse von lokalen Temperaturunterschieden und Hotspots sehr nützlich. Die Daten beziehen sich außerdem auf die Sommermonate der nördlichen und südlichen Hemisphäre im Jahr 2013. Sommerliche Temperaturen sind oft besonders relevant, da sie Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, die Landwirtschaft, die Ökosysteme und die städtische Umgebung haben können.

Abbildung 3  
max. Landoberflächentemperatur (LST) am Sommertag, 2013: Global



Quelle: <https://sedac.ciesin.columbia.edu/>

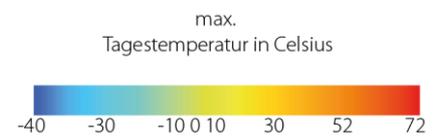
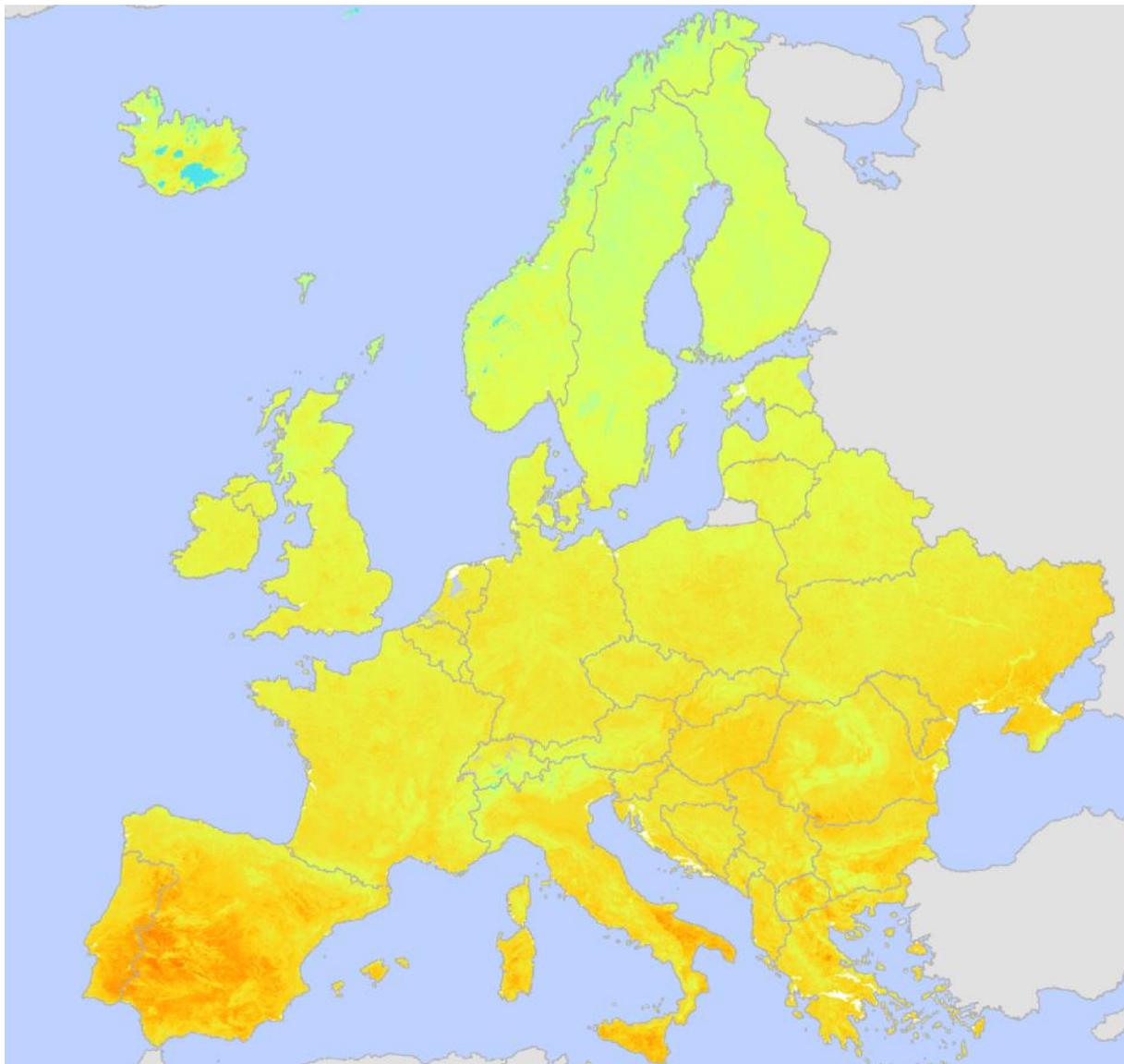


Abbildung 4  
max. Landoberflächentemperatur (LST) am Sommertag, 2013: Europa



Quelle: <https://sedac.ciesin.columbia.edu/>

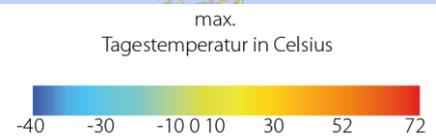
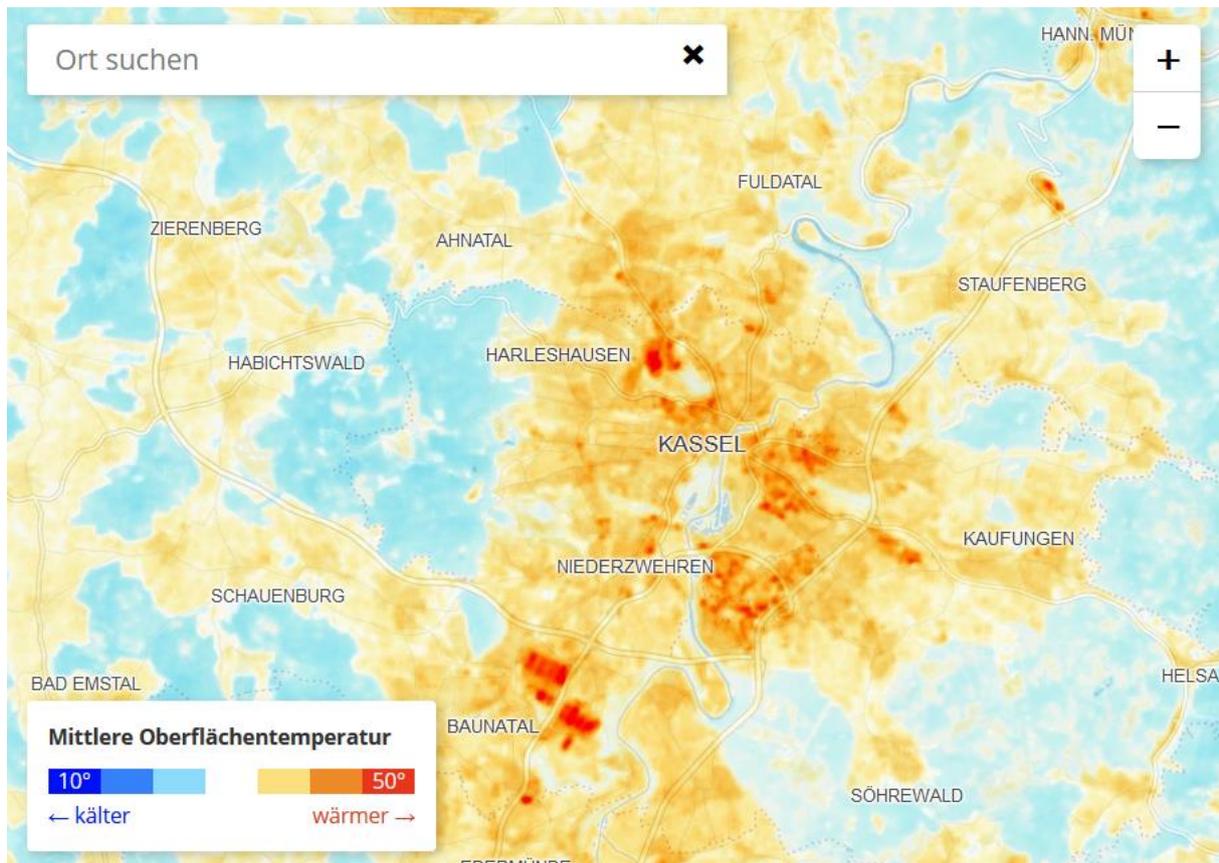


Abbildung 5  
Klimawandel: In der Hitze der Stadt - Hitzeinseln deutschlandweit erkunden



Quelle : <https://interaktiv.br.de/urbane-hitzeinseln>

Durch die Auswahl von Städten mit verschiedenen Charakteristika können Forscher ein besseres Verständnis der Faktoren gewinnen, die zu städtischen Wärmeinseln beitragen, und geeignete Maßnahmen zur Hitzevorsorge und -anpassung entwickeln. Unterschiedliche Stadtstrukturen und Bebauungen können unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen schaffen, die die Ausprägung von Hitzeinseln beeinflussen.

Eine solide Auswahl von repräsentativen Städten ermöglicht es, belastbare Schlussfolgerungen zu ziehen und geeignete Maßnahmen zur Reduzierung der Hitzebelastung in städtischen Gebieten abzuleiten. Dies ist von besonderer Bedeutung, da der Klimawandel und der Urban Heat Island Effekt zunehmend ernsthafte Herausforderungen für das städtische Leben darstellen und Maßnahmen zur Verbesserung des thermischen Komforts und des Wohlbefindens der Stadtbewohner erforderlich machen.

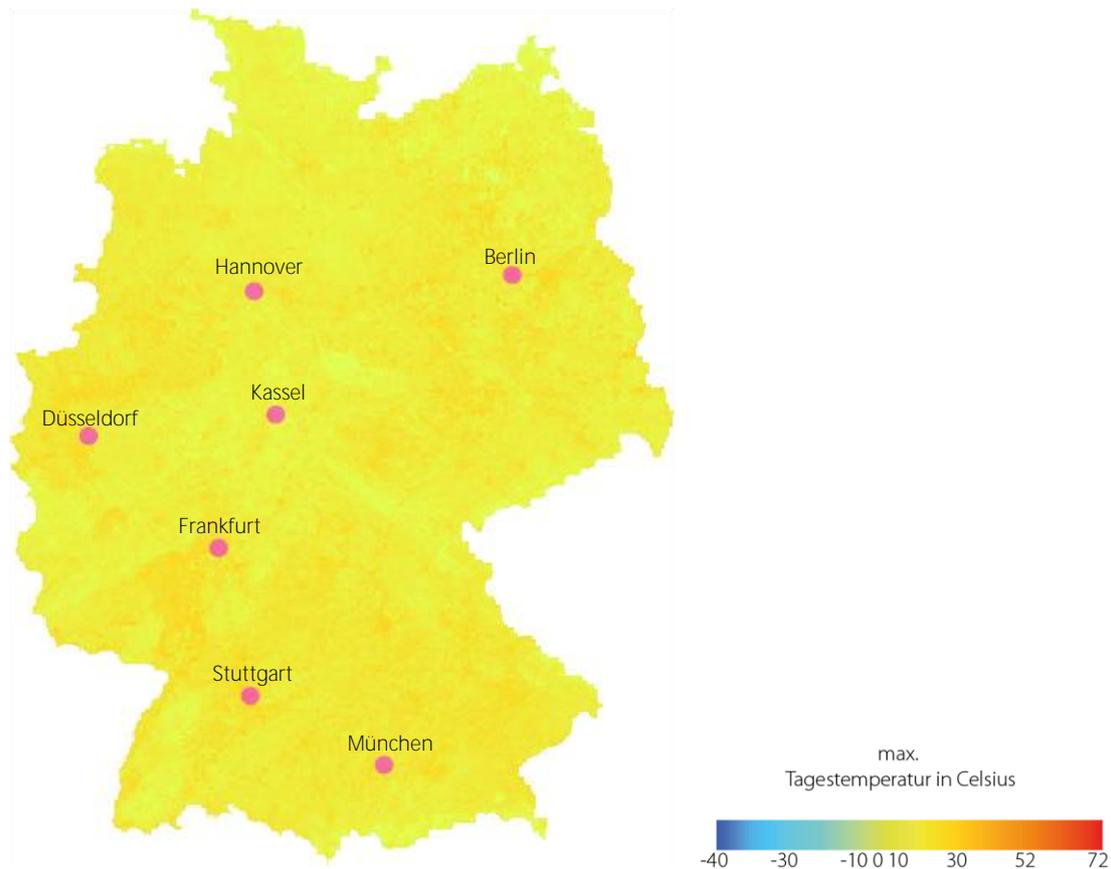
Jede der in Abbildung 6 genannten Städte hat ihre eigenen charakteristischen Merkmale und baulichen Eigenschaften, die sich auf das mikroklimatische Umfeld und die Ausprägung von städtischen Wärmeinseln auswirken können.

Die Untersuchung dieser Städte liefern wertvolle Erkenntnisse, Faktoren zu identifizieren, die zu städtischen Wärmeinseln beitragen. Dies kann es ermöglichen, gezielte Maßnahmen zur Hitzevorsorge und -anpassung zu entwickeln, die den lokalen Gegebenheiten gerecht werden.

Die Auswahl von Städten wie Hannover, Berlin, Düsseldorf, Kassel, Frankfurt am Main, Stuttgart und München bietet auch die Möglichkeit, regionale Unterschiede und Gemeinsamkeiten in Bezug auf den Urban Heat Island Effekt zu erforschen. Dies ist von besonderer Bedeutung, um maßgeschneiderte Strategien zur Verbesserung des thermischen Komforts und zur Minderung der Hitzebelastung in verschiedenen städtischen Kontexten zu entwickeln.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung könnten auch für andere Städte und Regionen von Interesse sein, die ähnlichen Herausforderungen im Zusammenhang mit städtischen Wärmeinseln gegenüberstehen. Eine solide Forschungsarbeit und Datengrundlage tragen dazu bei, effektive und nachhaltige Lösungen zur Bewältigung der Hitzebelastung in städtischen Gebieten zu finden und somit das Wohlbefinden und die Lebensqualität der städtischen Bevölkerung zu verbessern.

Abbildung 6  
max. Landoberflächentemperatur (LST) am Sommertag, 2013: Deutschland



Quelle : <https://sedac.ciesin.columbia.edu/>

Anhand von städtischen Klimaanalysekarten, die in den Abbildungen 7 bis 20 dargestellt sind, wurden spezifische Bereiche abgegrenzt, um den Analysefokus zu begrenzen. Das Forschungsvorhaben konzentriert sich somit hauptsächlich auf die Innenstädte.

Abbildung 7  
Klimaanalysekarte Berlin



Quelle: GEO-NET Umweltconsulting GmbH, 2015

Abbildung 8  
Berlin in google earth



Quelle: Google Earth

Abbildung 9  
Klimaanalysekarte Düsseldorf



Quelle: GEO-NET Umweltconsulting GmbH, 2015

Abbildung 10  
Düsseldorf in google earth



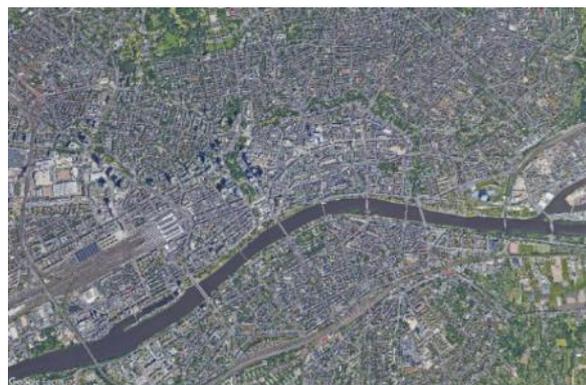
Quelle: Google Earth

Abbildung 11  
Klimaanalysekarte Frankfurt



Quelle: INEK GmbH, 2016

Abbildung 12  
Frankfurt in google earth



Quelle: Google Earth

Abbildung 13  
Klimaanalysekarte Hannover



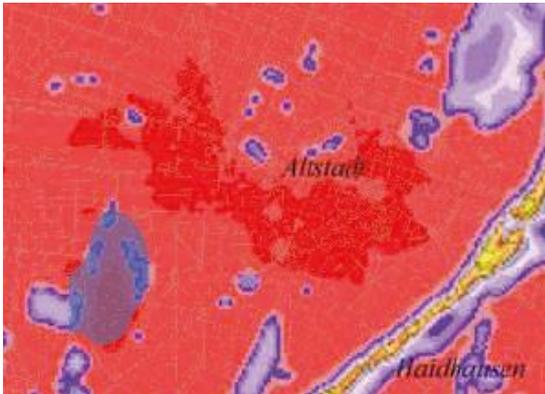
Quelle: GEO-NET Umweltconsulting GmbH, 2017

Abbildung 14  
Hannover in google earth



Quelle: Google Earth

Abbildung 15  
Klimaanalysekarte München



Quelle: GEO-NET Umweltconsulting GmbH, 2014

Abbildung 16  
München in google earth



Quelle: Google Earth

Abbildung 17  
Klimaanalysekarte Stuttgart



Quelle: Verband Region Stuttgart

Abbildung 18  
Stuttgart in google earth



Quelle: Google Earth

Abbildung 19  
Klimaanalysekarte Kassel



Quelle: INEK GmbH, 2019

Abbildung 20  
Kassel in google earth



Quelle: Google Earth

Im Weiteren werden die Grundkriterien verfeinert bzw. anhand ausgewählter Beispiele verfeinert bzw. vertieft. Die Auswahl der gewachsenen Städte mit historischem Anteil erfüllen die Kriterien, dass mindestens 2.000 Einwohner/km<sup>2</sup> in den betrachteten Gebieten leben.

Die Auswirkungen von Wärmeinseln sind enorm und entstehen dort wo verschiedene identifizierte Kriterien ineinandergreifen und in der Summe einen noch stärkeren Effekt auf die Mikrostandorte haben. Tagsüber heizt die Sonneneinstrahlung die Oberflächen von Straßen, Wegen, Gassen und Fassaden so auf, dass die Wärme zwar teilweise absorbiert werden kann, aber dennoch stetig ansteigen. Auch die Anordnung der Gebäude haben einen Einfluss auf die klimatischen Bedingungen vor Ort und lässt Aspekte der innerstädtischen Kühlung neu betrachten. Windströmungen in der Stadt haben einen gewissen Kühleffekt, der genutzt werden kann, um dichte Innenstädte vor Überhitzung zu schützen. Die Klimaanalysekarten zeigen deutlich aus der Sicht von oben, wie sich einzelne Gebiete entwickelt haben und wie die Verteilung der räumlichen Strukturen in den Städten stattfindet. Mit Hilfe von Wettersatelliten und mit Hilfe von Bodenmessungen werden Daten gesammelt, die die Temperaturunterschiede darstellen. Ländliche Gebiete werden ebenso sichtbar wie Stadtzentren, die die deutliche Erwärmung und deren Einfluss auf die innerstädtischen Bereiche zeigen.

Außerdem zeigen die Klimaanalysekarten deutlich, wie das Temperaturniveau ansteigt und auch die Anzahl der Kriterien stetig zunimmt. Ein wichtiges Kriterium in dieser Analyse ist die Versiegelung und der damit verbundene Versiegelungsgrad. Die Wärmespeicherung in Baustoffen wie Asphalt, Beton, Mauerwerk und konventionellen Dächern findet statt und die Dichte und Höhe der Bebauung trägt im Verhältnis zur Menge der Oberflächen dazu bei. Darüber hinaus werden Windströmungen gemessen, die den natürlichen Windströmungen entgegenwirken und somit die Wärmeanfuhr verringern.

#### 4.1.2 Erstellung von stadträumlichen Vergleichswerten

Die Erstellung von stadträumlichen Vergleichswerten bezieht sich in der Regel auf die Erfassung und Analyse von Daten, um Vergleichswerte oder Benchmarks für bestimmte stadträumliche Indikatoren zu etablieren. Diese Vergleichswerte ermöglichen es, die Leistung einer Stadt in Bezug auf verschiedene Aspekte zu bewerten und mit anderen Städten oder dem eigenen Fortschritt im Laufe der Zeit zu vergleichen.

Auch um die Bereiche in einen kleineren Maßstab einzugrenzen, wurden auf Grundlage des Inhalts des jeweiligen Flächennutzungsplans verschiedene Kriterien festgelegt, die im Ergebnis dem Forschungsprojekt als städteräumliche Vergleichswerte zugrunde gelegt werden:

- Bautypologie
- Art der Nutzung

- Infrastruktur
- Lage in der Stadt
- Grün-/Blaustruktur

Die Betrachtung der Kriterien erfolgt auf der Grundlage von Flächennutzungsplänen und Stadtklimaanalysekarten, die i.d.R. auf den FNP beruhen und somit auf dieser Planungsebene in die Planung einfließen. **Ziel ist es, erste „steckbriefartige“ Erkenntnisse** zu den Hitzeorten in der Stadt zu gewinnen und daraus abzuleiten, welche Kriterien generell für Hitzeinseln gelten.

Im weiteren Verlauf der Gesamtanalyse wurden zusätzliche Faktoren betrachtet, die für die interdisziplinäre Zusammenarbeit der verschiedenen Institute von wesentlicher Bedeutung sind:

- Sonnenverlauf
- Selbstverschattung
- Hitzeinseleffektstärke
- Versiegelung nach Versiegelungsgrad
- Frequentierte Umgebung nach Nutzung in der nahen Umgebung
- Nutzung und Nutzer
- Vegetation
- Windströmungen
- Regenfluss
- Mengen der Nutzer
- Denkmalschutz
- Brandschutz

Die zusätzlichen Faktoren geben Auskunft über die Notwendigkeit der weiteren Maßnahmen die zu ergreifen sind, um den Mikrostandort vor dem Hitzeinseleffekt zu schützen.

#### 4.1.3 Typische räumliche Charakteristika

Für den Forschungsgegenstand sind 4 städtebauliche Strukturtypen im Stadtraum von Nutzen sowie die Lage in der Stadt und die Art der vorherrschenden Nutzung.

- Block
- Hof
- Reihe
- Zeile

Der Block gehört zu den traditionellen Grundbausteinen der Stadt. Er hat sich über Jahrhunderte hinweg als Strukturtyp im Gefüge der Stadt behauptet. Blöcke werden allseitig von Straßen umgeben und bilden damit eine eindeutige Grenze zum öffentlichen Raum. Der Block weist eine klare Zonierung zwischen vorne und hinten auf, zwischen einer der Straße zugewandten öffentlichen Seite und einer von der Straße abgewandten privaten Seite. Damit wird das Blockinnere zu einem introvertierten, meist ruhigen Bereich. Von besonderer Bedeutung ist die exponierte Ecksituation des Blocks, die sich aufgrund der Lagegunst für die Unterbringung **von Versorgungseinrichtungen (Läden, Gastronomie, ...) eignet** (Streicher, 2019 S.13).

Der Hof lässt sich typologisch von traditionellen Vorbildern wie dem allseitig umschlossenen Bauernhof oder der Klosteranlage ableiten. Er stellt einen städtebaulichen Strukturtyp dar, bei dem Gebäude einen Raum bzw.

eine Hoffläche umschließen. Dadurch entsteht ein von außen abgegrenzter, geschützter Bereich, zu dem sich die Hauseingänge hin orientieren. Von seiner Orientierung und Erschließung kann der Hof damit als Umkehrung des Blocks verstanden werden. Während beim Block die Gebäude von außen, von der Straßenseite her, erschlossen sind, werden die Gebäude des Hofes von innen, von der Hoffläche erschlossen. Die Hoffläche selbst ist für die Bewohner und andere Nutzer ein wichtiger Bezugs- und Begegnungsraum (Streicher, 2019 S.15).

Die Reihe ist einer der ältesten Bausteine der Stadt und zählt zu den Grundelementen, aus denen die meisten Städte und Dörfer gebaut sind. Sie kommt als Strukturtyp sowohl entlang von Erschließungswegen als auch als eigenständiges Anordnungsmuster zum Einsatz. Reihen entstehen durch eine lineare Addition von Gebäuden und Parzellen entlang einer Straße, die gerade, geknickt oder gekrümmt verlaufen kann. Die Ein- und Zugänge zu den Gebäuden sind jeweils zur Straße orientiert, während die eher privaten Freiflächen im rückwärtigen Bereich liegen (Streicher, 2019 S.15).

Die Zeilenbebauung ist in Deutschland in den 1920er Jahren als Reaktion auf die schlechten Wohnbedingungen in den verdichteten Blockstrukturen entstanden. Sie ist das Ergebnis einer Rationalisierung der Wohngrundrisse, der Serienfertigung in der Bauproduktion und der **Philosophie, „Licht, Luft und Sonne für alle“ zu gewährleisten. Zeilen sind linear angeordnete Baukörper und Parzellen, die sich bewusst vom Straßenraum ablösen und eigenen Gesetzen der optimalen Organisation und Orientierung zur Himmelsrichtung folgen.** Sie gelten als wenig urbaner Strukturtyp, nicht zuletzt deshalb, weil sich lediglich die Giebelseiten bzw. Zeilenköpfe zum öffentlichen Raum orientieren (Streicher, 2019 S.15).

Der Stadtraum wird in der weitesten Fassung des Begriffs alle durch Bauten gebildeten Hohlräume in Siedlungsstrukturen, also auch solche in Dörfern beschrieben. In dieser Definition fällt der Begriff zusammen mit dem **„Negativraum“, also dem von den Baukörpern und Anlagen freigelassenen Flächen** (Curdes, 1997 S.129).

Zudem ist hier maßgeblich die **Definition von „Raum“ im städtebaulichen Kontext wichtig. Raum, definitorisch** der von Volumen von Körpern freigelassene Zwischenraum in der städtischen und dörflichen Besiedelung und der Hohlraum im inneren von Gebäuden (Curdes, 1997 S.129).

#### 4.1.4 Typen von Stadträumen

Zwingend notwendig dafür werden folgende Typen von Stadträumen detaillierter als Raumgefüge betrachtet (Curdes, 1997 S.122 - 151; 234):

- Reihe = Canyons/Straßenschluchten = geschlossen, offen = linearer, versetzter, gekrümmter Raum
- Platz = Plätze = regelmäßiger, unregelmäßiger und linearer Platz
- Hof = Innenhof = geschlossen, offen, abgeschirmt und vernetzt u.a. auch Polygonal

#### 4.1.5 Die Reihe als linearer, versetzter oder gekrümmter Raum

Der Begriff des linearen Raumes wird hier als formaler Oberbegriff einer großen Zahl linearer Raumtypen benutzt, weil kein anderer neutraler Begriff verfügbar ist. Lineare Räume entstehen durch die Addition von Baukörpern oder von anderen vertikalen Elementen der Reihung. Die Aussagen zur Wirkung von linearen Räumen gelten auch für solche, in denen die Wandungen nicht völlig geschlossen sind, die aber durch Zwischenglieder (Mauern, Hecken, Bäume) eine ähnliche Wirkung wie geschlossene Straßen haben. Lineare Räume vereinigen folgende Prinzipien:

- Sie sind topologisch auf keine Begrenzung ausgelegt und bilden daher ein offenes, nicht begrenztes System der Reihung.
- Sie verlieren diese Eigenschaft nicht durch Formänderungen (Krümmungen, Knick, Gabelung, Ausweitung, Einengung).

- Sie sind Durchgangsräume zu entfernteren Zielen und zugleich Erschließungsraum für die in einem Teilabschnitt vorhandenen Nutzungen.
- Zusätzlich haben sie die Aufgabe der Tiefenanbindung untergeordneter Bereiche an die linearen Haupterschließungen.

Lineare Räume sind der häufigste Raumtyp. Vermutlich sind 90-95% aller gefassten Räume lineare Räume. Eine Besiedlung kann wohl ohne Platz, nicht aber ohne Straße existieren. Insofern sind sie eine unerlässliche Voraussetzung der Erschließung (Curdes, 1997 S.122).

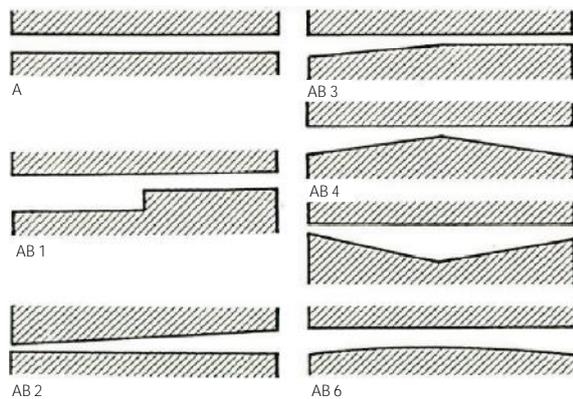
#### 4.1.5.1 Gerade lineare Räume

Die gerade Straße weist in den unbegrenzten Raum. Sie hat den Charakter des Fortführens. Gerade Straßen erleichtern die Fernorientierung im Stadtraum, wenn sie Sicht auf vertikale Merkzeichen freigeben. Durchgehende Straßen sind auch zur großräumigen Verknüpfung städtischer Teilbereiche und zur Anbindung an das Umland erforderlich. Große gerade Straßen können je nach dem Maßstab der Baustruktur auf den Menschen befreiend oder beängstigend wirken. Für Bewohner sehr langer, gerader und ungegliederter Straßen ist es oft schwer, sich dieser Straße zugehörig zu fühlen, wenn sie keine auf den menschlichen Maßstab bezogenen Teilräume anbietet, sondern lediglich Ausschnitt eines Kontinuums ist. Wir können durch einen Versatz oder durch ein geschlossenes Ende in der Länge begrenzte lineare Räume unterscheiden. Durch die Bildung von Abschnitten, Sequenzen und durch Individualisierung von Teilbereichen werden Aneignungen erleichtert. Der gerade lineare Raum ist typisch für die geplante Stadt. Besonders in der Form des baumbestandenen Boulevards haben große gerade Straßen eine wichtige Funktion zur Gliederung des Stadtkörpers. Gut gestaltete Boulevards sind Stadträume hoher Qualität. Mit ihren breiten Bürgersteigen und, bei entsprechender Lage, mit einem vielfältigen Angebot von Nutzungen an ihren Rändern vermögen sie wie kein anderer Stadtraum eine großstädtische Öffentlichkeit, ein Ambiente der Großzügigkeit zu erzeugen. Hohe gestalterische und klimatische Qualität haben auch breite gerade Stadtstraßen und Wohnstraßen mit begrünem Mittelstreifen (Curdes, 1997 S.124).

Gerade lineare Räume werden nach Curdes wie folgt definiert:

- Grundtyp A: Parallele Wanderung
- Typ AB 1: Parallele Wanderung, Breitensprung
- Typ AB 2: Nichtparallele Wanderung
- Typ AB 3,4,5: Mittelknick mit Mittenverengung oder Mittenerweiterung
- Typ AB 6: Kombiniertes Typ

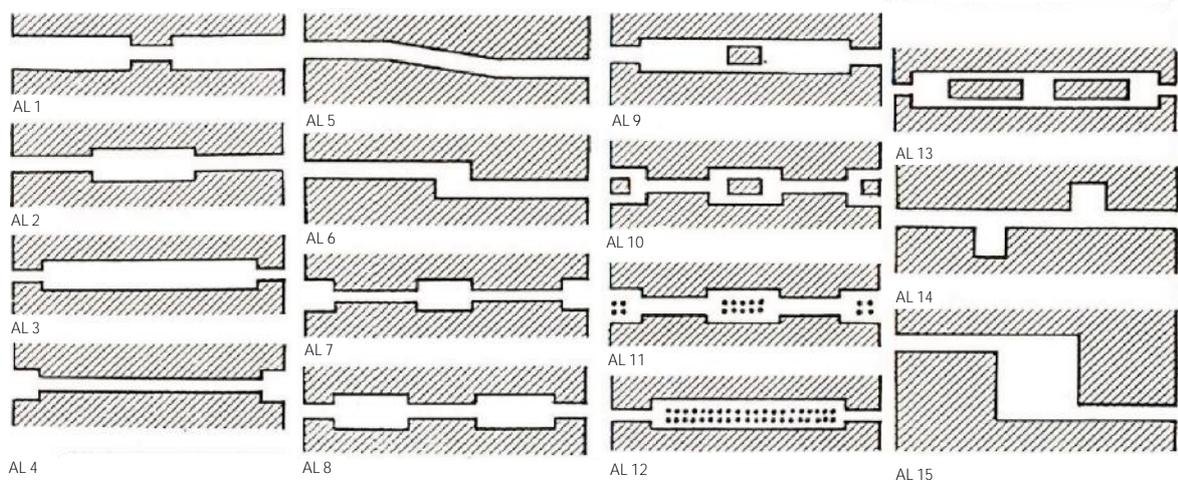
Abbildung 21  
Typen gerader Straßen



Quelle: Stadtstruktur und Stadtgestaltung, Gerhard Curdes, S. 124

Die unten aufgeführte Abbildung 22 Typologie der Längendifferenzierung wird vernachlässigt, da sie im Kontext die komplexen Zusammenhänge einer geführten Membranüberdachung unterbrechen würde und im konstruktiven Ausbau eher unwahrscheinlich ist. Nichtsdestotrotz können einerseits durch die Mittenerweiterung (AL 1) mehrere Räume genutzt werden oder auch durch die Mittenerweiterung (AL 2, AL 3), aber müssen hier die „Erweiterungen“ als eigene lineare Räume betrachtet werden.

Abbildung 22  
Typologie der Längendifferenzierung



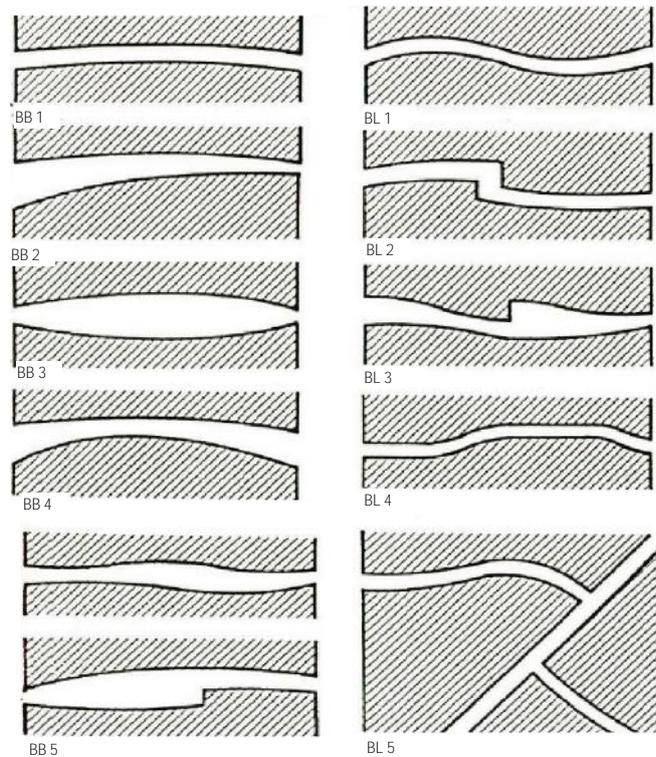
Quelle: Stadtstruktur und Stadtgestaltung, Gerhard Curdes, S. 125

#### 4.1.5.2 Gekrümmt lineare Räume

Der gekrümmte Raum ist der lineare Raum der ungeplanten Stadt und des Dorfes. Er ist in diesen Strukturen der Normalfall und ist deshalb ein ebenso grundlegender Typus wie die gerade Straße. Gekrümmte Räume haben eine völlig andere Wirkung als gerade. Sie erlauben keinen Blick in die Ferne, dienen also nicht wie die geraden der großräumigen Orientierung. Statt in die Ferne leiten sie den Blick in die Nähe auf die jeweils in das Blickfeld kommenden Teile der Straßenwandung. Gekrümmte Räume erzeugen durch ihre Geschlossenheit den Eindruck eines Binnenraumes. Die konkave Seite hat vor der konvexen Seite Vorteile der Belichtung und des Ausblicks. Hinsichtlich der Wahrnehmung im Straßenraum tritt dagegen die konkave Seite stärker in das Sichtfeld als die konvexe. Die Fassaden drehen sich stärker in die Blickachse und treten dadurch deutlicher hervor. Der gekrümmte Raum kann Zufälligkeiten der Stadtstruktur, Einmündungen von Straßen und topographische Probleme leichter in einem durchgehenden Linienzug aufnehmen als der gerade. Wenn

Krümmungen variiert werden, bekommen die Teilabschnitte eine eigenständige Raumindividualität (Curdes, 1997 S.126).

Abbildung 23  
Typologie gekrümmter linearer Räume



Quelle: Stadtstruktur und Stadtgestaltung, Gerhard Curdes, S. 126

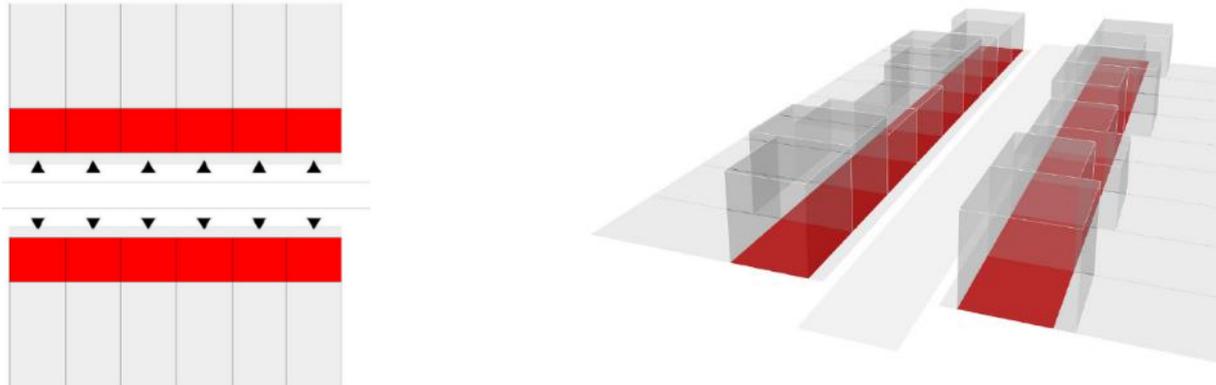
Gekrümmte lineare Räume werden nach Curdes wie folgt definiert:

- Grundtyp B: Gekrümmter Raum mit parallelen Wandungen
- Typ BB1 - BB 3: Gekrümmter Raum mit parallelen Wandungen, aber weniger starr
- Typ BB 4: Beidseitig konvex und konkav gekrümmte Wandungen
- Typ BB 4: Beidseitig konvex und konkav gekrümmte Wandungen
- Typ BB 5: gekrümmter Raum mit Breiten differenzierung durch Bildung von Abschnitten

Außerdem lässt sich nach Streicher das Grundprinzip einer Reihenbebauung innerhalb eines Ortes auf „gerade lineare Räume“ und „gekrümmt lineare Räume beziehen.

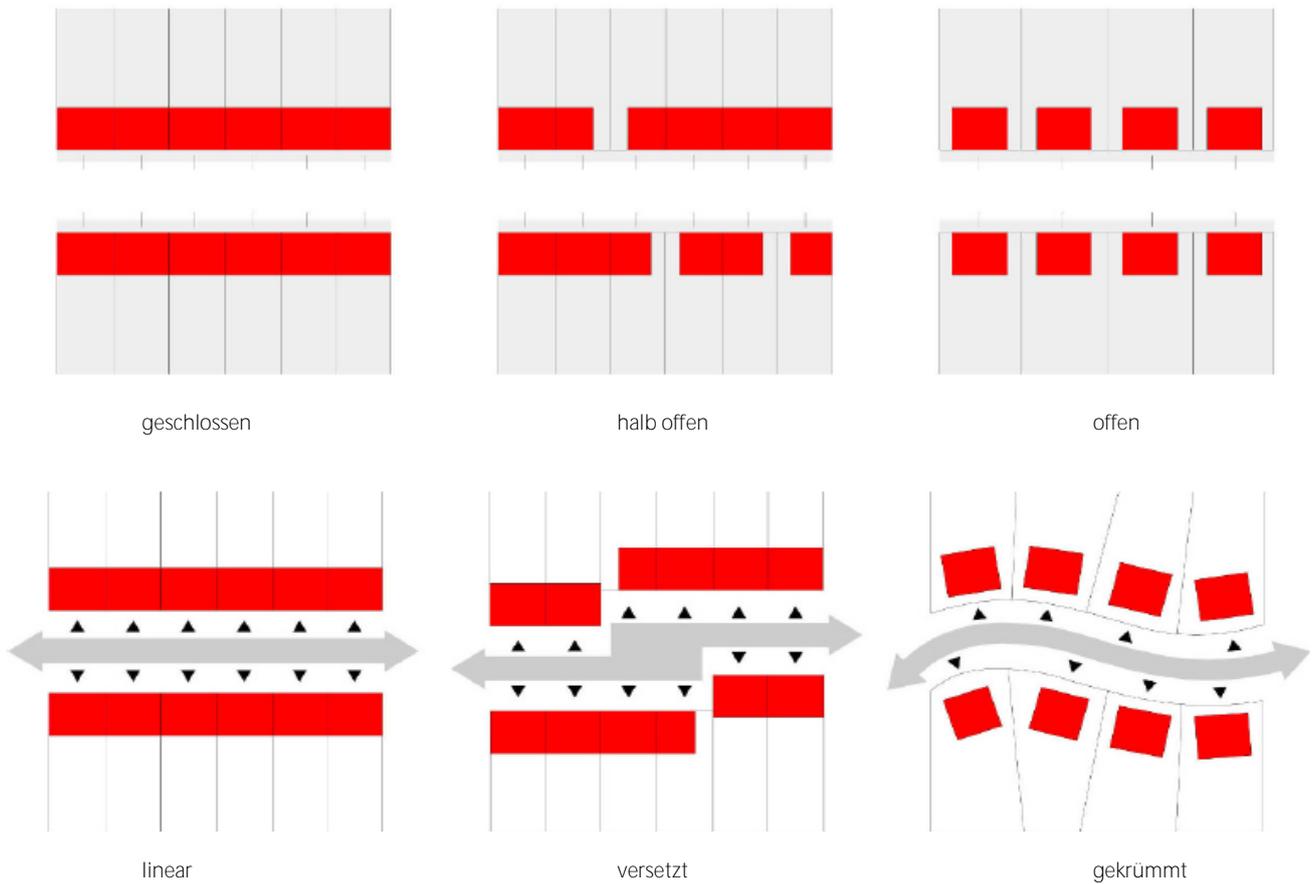
Reihen entstehen durch lineare Addition von Gebäuden und Parzellen entlang einer Straße. Die Gebäude können sich in einer offenen oder geschlossenen Bauweise aneinanderreihen und vielfältigste räumliche Muster annehmen (Streicher, 2017 S. 99).

Abbildung 24  
Reihe, Grundprinzip und Prinzipskizze



Quelle: Städtebauliches Entwerfen, Christ Streicher S. 67

Abbildung 25  
Reihe, Formen und Erschließung



Quelle: Städtebauliches Entwerfen, Christ Streicher S. 67

Tabelle 2  
Straßenschlucht

Stadt-Kennzeichen	Energetische Auswirkungen
<i>I. Straßenschlucht-Geometrie</i>	
a) größere Oberfläche	Mehrfachreflexion von kurzwelliger Strahlung à größere Absorption von kurzwelliger Strahlung
b) größere Horizonteinengung	geringere effektive Ausstrahlung
c) verminderte Windgeschwindigkeit	geringerer turbulenter Wärmetransport
<i>II. Luftverunreinigung</i>	größere atmosphärische Gegenstrahlung
<i>III. Wärmeemissionen von Gebäuden und aus Verbrennungsprozessen</i>	anthropogen erzeugte Wärme
<i>IV. Baumaterialien</i>	
a) größere Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität	erhöhte Wärmespeicherung
b) größere Wasserundurchlässigkeit	geringere Verdunstung (geringerer turbulenter Strom latenter Wärme)

Quelle: Energetische Ursachen der urbanen Wärmeinsel bzw. des urbanen Wärmearchipels in der Urban Canopy Layer (nach OKE, 1982)

Straßenschluchten werden in den weiteren Untersuchungen einen besonderen Stellenwert haben, da sie wie in Tabelle 2 zuerkennen ist, vermehrt Kennzeichen aufweisen, die im Zusammenhang der interdisziplinären **Analyse im Ergebnis einige gute Resultate erzielen werden. Diese „Stadt-Kennzeichen“ verbinden die energetischen Grundlagen der urbanen Wärmeinseln mit den Auswirkungen in den später erläuterten Stadtgebieten.**

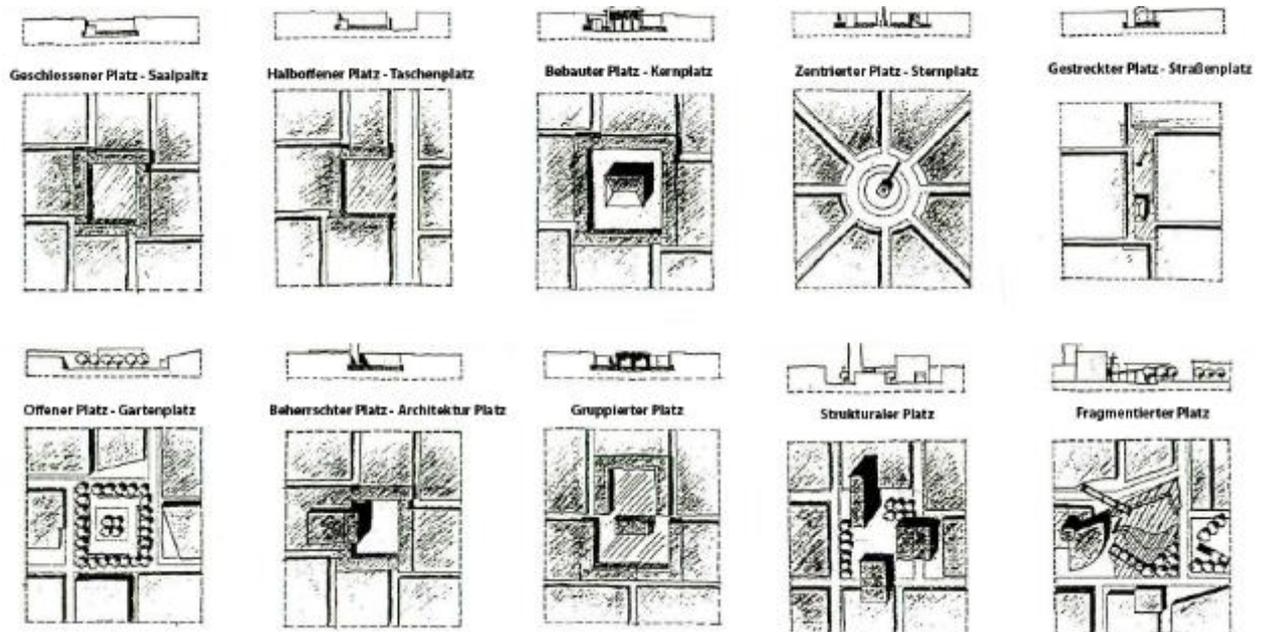
Intensiv genutzte Flächenstrukturen finden sich insbesondere in europäischen Stadtzentren. Sie dienen der Unterbringung unterschiedlicher Nutzungen auf einer maximal ausgenutzten Fläche. Lediglich Straßen und der öffentliche Raum stellen freie Flächen innerhalb der intensiven Bebauung dar (Streicher, 2017).

- Linear offene/geschlossenen Reihenbebauung
- versetzt offene/geschlossene Reihenbebauung
- gekrümmt offene/geschlossene Reihenbebauung

#### 4.1.6 Plätze und Platztypen

Platea (lat.) bedeutete ursprünglich "breiter Raum" zwischen den Häuserreihen. Ebenfalls im lateinischen bedeutet "placo" ebene Fläche und nichts anderes ist mit "piazza" gemeint. Umgangssprachlich bedeutet Platz bei uns sowohl "von Bebauung ausgesparter Raum" als auch einfach "verfügbarer Raum". In diesen Umschreibungen sind zwei wesentliche Eigenschaften angesprochen: Verfügbarkeit und Aussparung. Plätze sind offenbar etwas ganz Besonderes und Wichtiges gewesen. Sie waren komplementäre Pufferräume zur Bebauung: Sozialraum als notwendige Ergänzung des Individualraumes. Von Anfang an ist mit "platea" also auch die enge Beziehung zwischen umgrenzenden Gebäuden und dem breiteren Raum dazwischen strukturell gemeint. Breiter Raum bedeutet wiederum, dass es über die täglichen Notwendigkeiten der Erschließung hinaus ein "Mehr" an freiem Raum gegeben haben muss, eine für verschiedene Zwecke nutzbare Verfügungsfläche (Curdes, 1997 S.129).

Abbildung 26  
Funktion und Gestalt von Plätzen



Quelle: Stadtstruktur und Stadtgestaltung, Gerhard Curdes, S. 136

#### 4.1.6.1 Regelmäßige Grundformen

Die Grundformen geometrischer Figuren sind das Quadrat, das Dreieck und der Kreis. Diese reinen Formen kommen auch als Grundflächen von Plätzen vor. Die einfachste Variation dieser Formen ist die mittige Teilung. Auch diese Formen kommen als Plätze vor. Eine weitere Variation ist die Stauchung oder Streckung. Der Kreis verformt sich zur Ellipse, das Dreieck wird stumpf- oder spitzwinklig, aus dem Quadrat entsteht der Rhombus. Weitere geometrische Formen sind regelmäßige Vielecke wie das Oktagon, kreuz- und sternförmige Plätze und schließlich alle Plätze mit einer zwei- bis vierseitigen Klappsymmetrie. Historisch entstanden regelmäßige Plätze, wie in Abb. 25 zu sehen sind, sind logischer Teil der regelmäßigen Stadt. Im Barock wurden sie vereinzelt im gewollten Kontrast zu unregelmäßigen Umgebungen geplant. Es lagen also in beiden Fällen solide Gründe vor. Dennoch hatten und haben regelmäßige Plätze ihre aus der Form herrührenden Probleme. Allgemein gilt auch heute noch, dass völlig regelmäßige Platzformen langweilig und unattraktiv sind. Sie können dann positiv wirken, wenn sie durch eine regelmäßige und reiche Architektur gefasst sind. Ästhetische Reize gehen aber eher von Unregelmäßigkeiten und kleinen Störungen aus. Noch immer gilt Sittes Grundsatz, dass die Geschlossenheit der Plätze ein weit wichtigeres Merkmal ihrer Brauchbarkeit ist als die Figur ihres Grundrisses (Curdes, 1997 S.136).

#### 4.1.6.2 Unregelmäßige Grundformen

Als unregelmäßig werden hier alle Platzformen bezeichnet, die keiner Klappsymmetrie folgen, die entweder nur aus gekrümmten oder aus einem Gemisch von geraden und gekrümmten Wandungen bestehen und sich keiner exakten geometrischen Form zuordnen lassen. Als unregelmäßig gelten hier auch historisch bedingte Verformungen ehemals geometrischer Plätze. Während regelmäßige Grundformen Produkt eines Gestaltungswillens sind, entstehen unregelmäßige Formen, wie schon beschrieben, eher als Ergebnis eines Prozesses in kleinen Schritten und aufgrund lokaler topographischer Bedingungen. Strukturelle und funktionale Anforderungen wirken also viel stärker als Formale auf die Platzbildung ein. Der häufigste unregelmäßige Platz ist der Gabelungsplatz. Er entsteht als Reaktion auf die schwierige spitze Ecke einer Straßengabelung und schafft Sichtraum, Manövrierraum und Spielraum für Neigungsvermittlungen in der Topografie. Dieser Platz ist also das Zwangsergebnis eines Strukturproblems der Wegführung - der Gabelung

oder Verknüpfung einer horizontalen mit einer schräg den Hang hinaufführenden Straße. Dieser Platz ist besonders häufig in mittelalterlichen Rundstädten, in Dörfern, in Hügel- und Bergstädten anzutreffen, wie z.B. in Aachen und in der Alfama in Lissabon. Ähnliche Produkte von Restflächen bei Straßenführungen sind der Abbiegeplatz, der Kurvenplatz oder der Kreuzungsplatz. Es handelt sich um untergeordnete Plätze, die aber als Aufenthaltspunkte und Nischen in der Stadt ihre funktionale und soziale Bedeutung haben. Ein reiches Repertoire zentraler, unregelmäßiger städtischer Plätze entstand als Ergebnis historischer Prozesse durch Überlagerungen, Einbauten, Teilungen und Erweiterungen ehemals regelmäßiger Plätze. Camillo Sitte hat zu diesem Thema eine eindrucksvolle Sammlung publiziert, die vor 100 Jahren erstmals den Blick frei machte für ein komplexeres, von Wahrnehmung und Gebrauch bestimmtes Verständnis der Plätze (Curdes, 1997 S.137-138).

#### 4.1.6.3 Lineare Platzformen

Der lineare Platz entstand nicht aus der Form heraus, sondern aus der Funktion. Wir finden ihn in Europa in den Zähringerstädten und in kleinen Landstädten (Straubing, Bern, Rottweil, Villingen). Er hatte die Funktion, durchziehenden Truppen Raum zu geben, den Markt aufzunehmen, Feste und Umzüge zu ermöglichen. In späteren Perioden wurden Gemeinschaftsbauten wie Kornhäuser, Rathaus, Zeughaus als Gliederungselemente auf diesen Flächen eingefügt. Als lineare Plätze, oft Grünplätze, fungieren häufig auch ehemalige Anger in bäuerlichen Siedlungen. Auch sehr schmale lange Gabelungsplätze können in die Form des linearen Platzes übergehen. Prachtstraßen mit breitem Mittelstreifen erfüllen teilweise Platzfunktionen (Krefeld-Ostwall, Königsallee Düsseldorf). Sie können auch in der modernen Stadt in Verbindung mit Einkaufs- und Flanierfunktionen neue Bedeutung gewinnen (Curdes, 1997 S.138).

#### 4.1.7 Das Raumgefüge des Innenhofs

Bei Innenhöfen spricht man von einer Randbebauung, die sich räumlich deutlich absetzt und nur durch eine untergeordnete Erschließung mit dem äußeren Raum verbunden ist und von außen intim wirkt (Curdes, 1997).

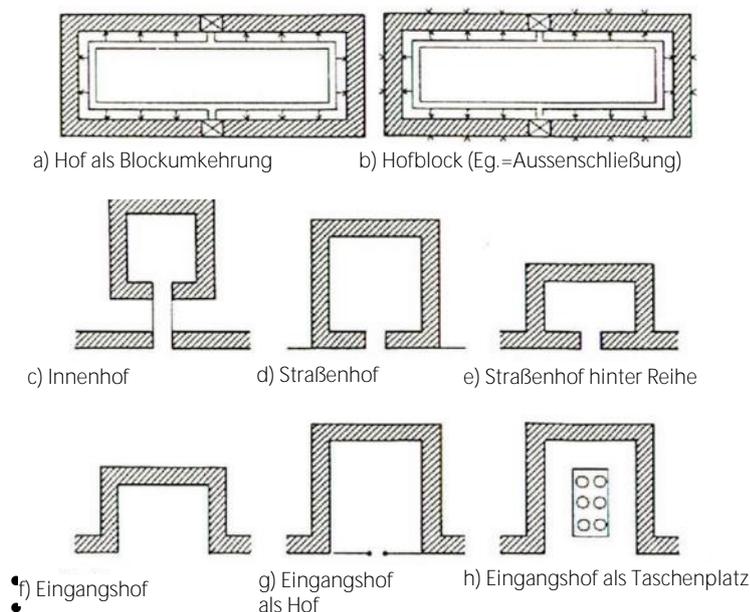
Die sprachliche Herkunft des Wortes ist so vielschichtig wie sein Gebrauch. Das altgermanische Wort bezeichnete Hügel und "eingehegte" Räume mit Hof. Das Wort bezeichnete später - auch heute noch - von Gebäuden und Gebäudeteilen umschlossene Räume. Der drei- oder vierseitig umschlossene Bauernhof ist das bekannteste Beispiel. Der städtebauliche Begriff des Hofes nimmt die traditionellen Merkmale auf. Diese sind Umschlossenheit, Absonderung, geschützte, innen liegende Hauszugänge. Der Hof ist in seiner städtebaulichen Form eine Umkehrung des Blocks, Während im Block die Gebäude von der Straßenseite eher erschlossen werden, werden die Gebäude des Hofes von der Hoffläche, also von innen, erschlossen. Die Gebäude ändern dabei ihre Richtung: Dem Hof wenden sie ihre Vorderseite zu, die Rückseite weist nach außen, Ein Grenzfall des Hofes ist das Hofhaus als Bautypus, das früher in der islamischen Kultur verbreitet war und auch als modernes Wohn- und Geschäftshaus vorkommt. Das "Hofhaus" ist eine Bauform, bei der auf einer einzigen Parzelle Gebäude um einen oder mehrere Höfe errichtet sind (Curdes, 1997 S 221).

Es gibt nach Curdes 8 Typologien von Höfen:

- Hof als Blockumkehrung
- Hofblock
- Innenhof
- Straßenhof
- Straßenhof hinter Reihe
- Eingangshof

- Eingangshof als Hof
- Eingangshof als Taschenplatz

Abbildung 27  
Typologien von Höfen

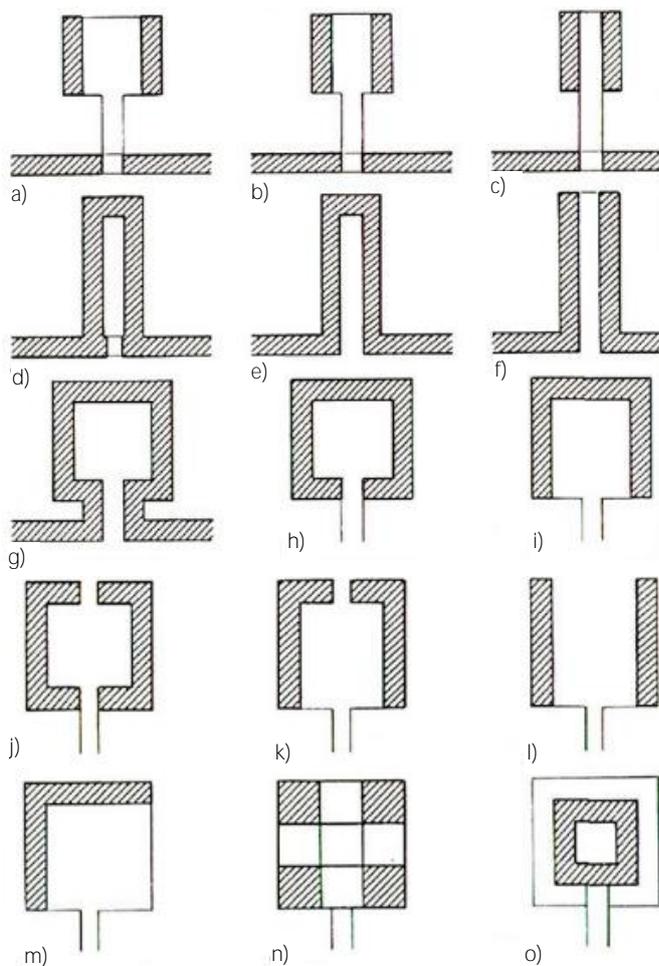


Quelle: Stadtstruktur und Stadtgestaltung, Gerhard Curdes, S. 223

In Abbildung 27 sind acht Typen von Höfen dargestellt, die sich grundlegend unterscheiden. Typ a ist die Umkehrung des Blockes, die reine Hofbebauung. Die Eingänge liegen ausschließlich innen und werden nur über einige Durchgänge an den Straßenraum angebunden. Dadurch entsteht ein halböffentlicher Binnenraum, den nur betritt, wer zu den angeschlossenen Nutzungen will. Einem solchen Hof fehlt also die allgemeine Öffentlichkeit durch den Verkehr, durch Passanten und die Anonymität, die in öffentlichen Räumen durch ein gemischtes Publikum erzeugt wird. Man trifft häufiger die gleichen Leute, man kennt die Gesichter und erkennt von daher auch den Fremden. Zu dieser Form des Hofes gehören z.B. die Wiener Höfe. Die strenge Umkehrung des Hofes ohne äußere Abstandsflächen ist ein städtebaulicher Anachronismus, weil die empfindlichsten Teile der Nutzung, die eher privaten Rückseiten, nun an der öffentlichen Straße liegen, ohne von dort durch Eingänge erschlossen zu werden. Diese Form ist aber möglich, wenn die Hoffläche und damit das Niveau der Erdgeschoßwohnungen 1-2 m über dem Straßenniveau liegen. Dieser Niveausprung lässt sich für Tiefgaragen nutzen. Eine für die Großstadt interessantere Mischform ist Typ b eine Mischung aus Block und Hof, bei der das Erdgeschoß - oder auch das 1.Obergeschoß – von außen erschlossen wird, die übrigen Geschosse aber von innen. Dadurch verliert die Erdgeschoßzone ihren abweisenden Charakter und wird für die Nutzung durch Handel und Dienstleistungen verfügbar. Eine solche Bauform setzt das Kontinuum der belebten Schaufensterfronten fort und leistet einen Beitrag zur Nutzungsmischung. Topologisch handelt es sich im Erdgeschoß um einen Block, in den oberen Geschossen aber um einen Hof. Diesen Typ wollen wir wegen seines Doppelcharakters als "Hofblock" bezeichnen. Typ c: Die reinste Form des Hofes ist der von der Randbebauung räumlich deutlich abgesetzte "Hof im Block" und die "Innenhofbebauung". Diese sind eigenständige Raumelemente und mit der vorderen Bebauung durch eine untergeordnete Erschließung verbunden. Wesentlich ist, dass diese Erschließung von außen intim wirkt und nicht mit einer Straße verwechselt werden kann. Typ d ist ein Hof, der mit einer Front an der Straße liegt und dessen Bauten mit einer Durchfahrt durch die Frontbebauung erschlossen werden. Diesen Typ wollen wir "autonomer Straßenhof" nennen, weil er direkt mit einer Front an die Straße angebunden wird und als autonomes städtebauliches Element verwendet werden kann. Wenn alle Nutzungseinheiten vom Hof aus erschlossen werden, handelt es sich um eine Mischung aus Innenhof- und Hofbebauung. Wird der äußere Teil hingegen von der Straße eher

erschlossen, wandelt sich der Hof zum Straßenhof. Dieser Typ ist mit entsprechenden seitlichen und hinteren Zwischenräumen addierbar und bildet dann eine "offene Bebauung", bei der die unbebauten - begrünten - Abstandsflächen gliedernde Elemente des Straßenraumes sind. Typ e unterscheidet sich von d durch ein wesentliches Detail: Der Hof ist die Hinterbebauung einer Reihe und liegt direkt hinter der Baufront. Er tritt also als eigenständiges Element nur nach innen in Erscheinung. Hiermit kann eine Verdichtung der Bebauung in der Tiefe erreicht werden, ohne dass zusätzliche Straßenfläche erforderlich wird. Diese Form lässt durch die in den Ecken entstehenden Grundrisse Sondernutzungen wie Großwohnungen zu und trägt zu einer Differenzierung des räumlichen und sozialen Charakters von Wohngebieten bei. Bei gemischten Nutzungen ist dieser Hoftyp auch als Gewerbehof oder als Infrastrukturgebäude nutzbar. Wir nennen ihn wegen seiner Erschließungsfunktion für die Bebauung "Eingangshof". Typ f: Hier handelt es sich um eine Zwitterform, die je nach der Tiefe der Einbuchtung und des Charakters der Detailgestaltung als Platz (Taschenplatz) oder als Hof (Eingangshof) funktioniert. In den Skizzen g und h ist der Unterschied verdeutlicht. Beispiel g wirkt durch Elemente der Abgrenzung (Bäume, Tor, Gitter) als halböffentlicher Raum. Im Beispiel h reicht der öffentliche Raum ohne Abgrenzung in die Einbuchtung hinein. Sie ist damit Teil desselben. Diese Form der Einfaltung der Bauflucht verlängert die Frontlänge der Bebauung ohne Verlängerung der Straßen und differenziert allzu lange Baufluchten. Diesen Typ nennen wir wegen seiner größeren Öffentlichkeit und wegen seiner Straßen Orientierung "Straßenhof" (Curdes, 1997 S 222,223).

Abbildung 28  
Variationen und Grenzfälle von Höfen

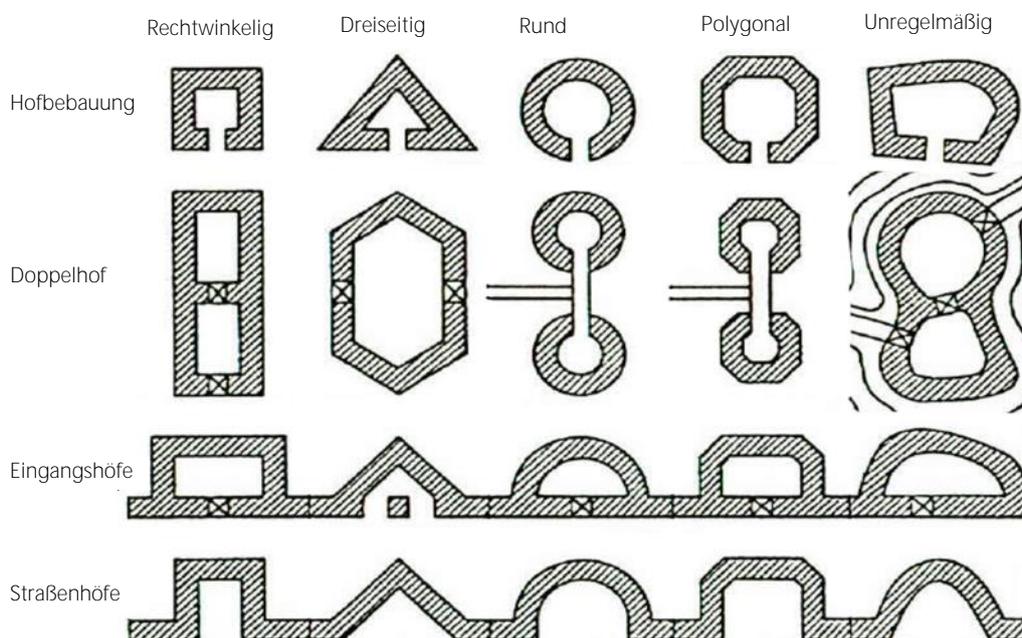


Quelle: Stadtstruktur und Stadtgestaltung, Gerhard Curdes, S. 223

Dementsprechend gibt es im wie in Abbildung 28 zu sehen eine Variation und Grenzfälle von Höfen die sich in einer weiteren Abbildung erschließen:

Wie beim Block gibt es auch beim Hof Grenzfälle und Minimalformen. Ein Grenzfall ist das um einen Innenhof ganz oder teilweise herumgebaute Haus, das erwähnte "Hofhaus" in seinen verschiedenen Typen- und Größenvarianten. Ein anderer Grenzfall sind Einfach- oder Doppelreihen, die von einem Hof aus erschlossen werden. Abbildung 28 zeigt in der ersten Reihe solche Reihen mit unterschiedlich großer Hoffläche. Um den Umschlag vom Hof zur Stichstraße deutlich zu machen, wurde hier eine gespiegelte Reihe gewählt, die obwohl oben nicht immer geschlossen, keine weiterführende Verbindung zu anderen Gebäuden hat. Fall a kann trotz der nur zweiseitigen Bebauung, als Hof bezeichnet werden. Der fehlende bauliche Abschluss wird im Regelfall durch Mauern, Hecken oder Zäune in einer weniger starken, aber dennoch raumschließenden Form vorhanden sein. Im Fall b wird durch die etwas breitere Erschließungsfläche noch die Andeutung eines Hofes erkennbar. Im Fall c fehlt diese Zusatzfläche. Es handelt sich hier eher um eine hinten liegende Gassenbebauung - in England als "Mews" bekannt. Fall d ist durch den oberen Abschluss und die Einengung der Tordurchfahrt ein deutlicher, langer und schmaler Hof. Im Fall e geht der öffentliche Raum unterschiedslos in die Tiefe. Es handelt sich um eine Sackgasse, eine Stichstraße. Sie kann aber bei entsprechenden Eingangsdetails (Poller, Schwellen, Belagwechsel) auch wie ein Hof wirken. Fall f schließlich ist eine eindeutige Stichstraße. Die weiteren Reihen zeigen Variationen und Reduktionen des zurückliegenden Hofes von der festen Anbindung an die vordere Baufront bis zum Winkelhof vier - um einen Kreuzhof gruppierte - Solitäre (n) und ein separiertes großes Hofhaus (0) - als Kindergarten oder Gewerbebetrieb. Allen Formen ist die Lage im "hinteren Bereich", also die Zurückgezogenheit gemeinsam (Curdes, 1997 S 223).

Abbildung 29  
Formvarianten von Höfen



Der Hof ist eine Bebauungsform, die in unterschiedlichen Formen auftreten kann. Wie Bauten um den vorderen oder inneren Erschließungsraum gruppiert sind, ist - wie beim Block auch - topologisch weniger bedeutsam. Abbildung 29 zeigt Formvarianten vier verschiedener Hoftypen, kombiniert mit fünf unterschiedlichen formalen Prinzipien. Hier wird deutlich, welche Fülle von Möglichkeiten allein das formale Repertoire enthält. Sicherlich sind nicht alle Formen allgemein einsetzbar, und manche, wie die Rund- und

Dreiecksform, auch schwierig. Man sieht aber, dass die Prinzipien der Doppelung interessante Großformen ergeben und dass die Formvariation bei den Eingangshöfen Möglichkeiten für die Unterscheidung, für günstigere hintere Belichtungen (Dreieck und Halbrund) eröffnen (Curdes, 1997 S 223).

Die Struktur von linearen Räumen, linear offener/geschlossener Reihenbebauung, gekrümmt offener/geschlossener Reihenbebauung, abgeschirmtem Hof und Platz sind für die vorliegende Forschung relevant. In einer Case Study wurden in der Stadt Kassel Stadtstrukturen (potenzielle Plätze, Innenhöfe und Straßenschluchten) nach oben genannten Kriterien untersucht.

Solitärbebauung wird hier vernachlässigt, da diese Bauten entweder isoliert in der Landschaft stehen oder den Anschluss an andere aufgrund der ihnen zugrundeliegenden Konzeption oder Größe nicht eingehen können oder sollen (Curdes, 1997).

Per Definition lassen sich die Bebauungen des Blockes, der Reihenbebauung, des Innenhofes und der Plätze in verschiedene Bauweisen aufteilen.

#### **4.1.7.1 Parzellierter Block**

Der parzellierte Block bietet auf mehreren Parzellen Platz für unterschiedliche Gebäudegrößen. Die Vorderseiten der Gebäude orientieren sich zum öffentlichen Straßenraum. Trotz Abständen zwischen den Gebäuden besteht keine Beziehung zwischen dem äußeren, öffentlichen Bereich und dem privat genutzten Blockinnenbereich. Dieser Typ des Blocks wird im Mehrfamilienhausbau oder für die Unterbringung von gemischten Nutzungen in räumlicher Nähe verwendet (Streicher 2017).

#### **4.1.7.2 Geschlossener Block/Blockrandbebauung**

Der geschlossene Block folgt zu allen Blockseiten dem Straßenverlauf und präsentiert sich zur öffentlichen Seite als ein Gebäude. Der Innenbereich des geschlossenen Blocks ist privat und steht für die Bewohner zur Verfügung. Die Dichte, die der Block schafft, wird durch mehrere Geschosse betont (Streicher 2017).

#### **4.1.7.3 Offener Block/Offene Blockrandbebauung**

Die offene Blockrandbebauung ist wie der geschlossene Block durch höhere Geschosshöhen gekennzeichnet und orientiert sich ebenfalls zum öffentlichen Straßenraum. Der Blockinnenbereich ist von der Straße aus zugänglich und besitzt daher einen halböffentlichen Charakter. Dieser Blocktypus wurde insbesondere im 20. Jahrhundert angewandt (Streicher, 2017).

#### **4.1.7.4 Flächenblock**

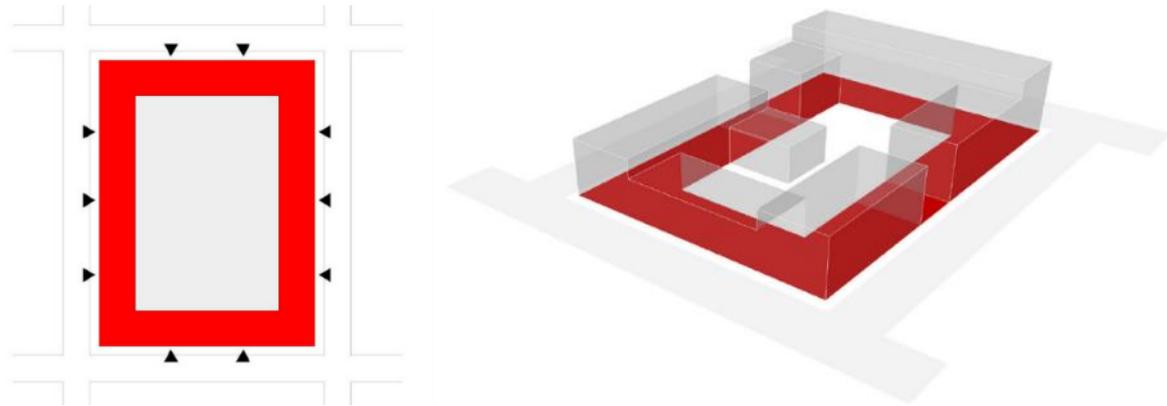
Der Flächenblock nutzt das Grundstück maximal aus und erzeugt damit eine sehr hohe Dichte. Unterstützt wird diese Dichte durch eine hohe Geschossigkeit. Beispielhaft für diese Blocktypologie stehen der Berliner Block oder die Blockbebauung in Barcelona (Streicher, 2017).

#### **4.1.7.5 Flächenstruktur**

Intensiv genutzte Flächenstrukturen finden sich insbesondere in europäischen Stadtzentren. Sie dienen der Unterbringung unterschiedlicher Nutzungen auf einer maximal ausgenutzten Fläche. Lediglich Straßen und der öffentliche Raum stellen freie Flächen innerhalb der intensiven Bebauung dar (Streicher, 2017).

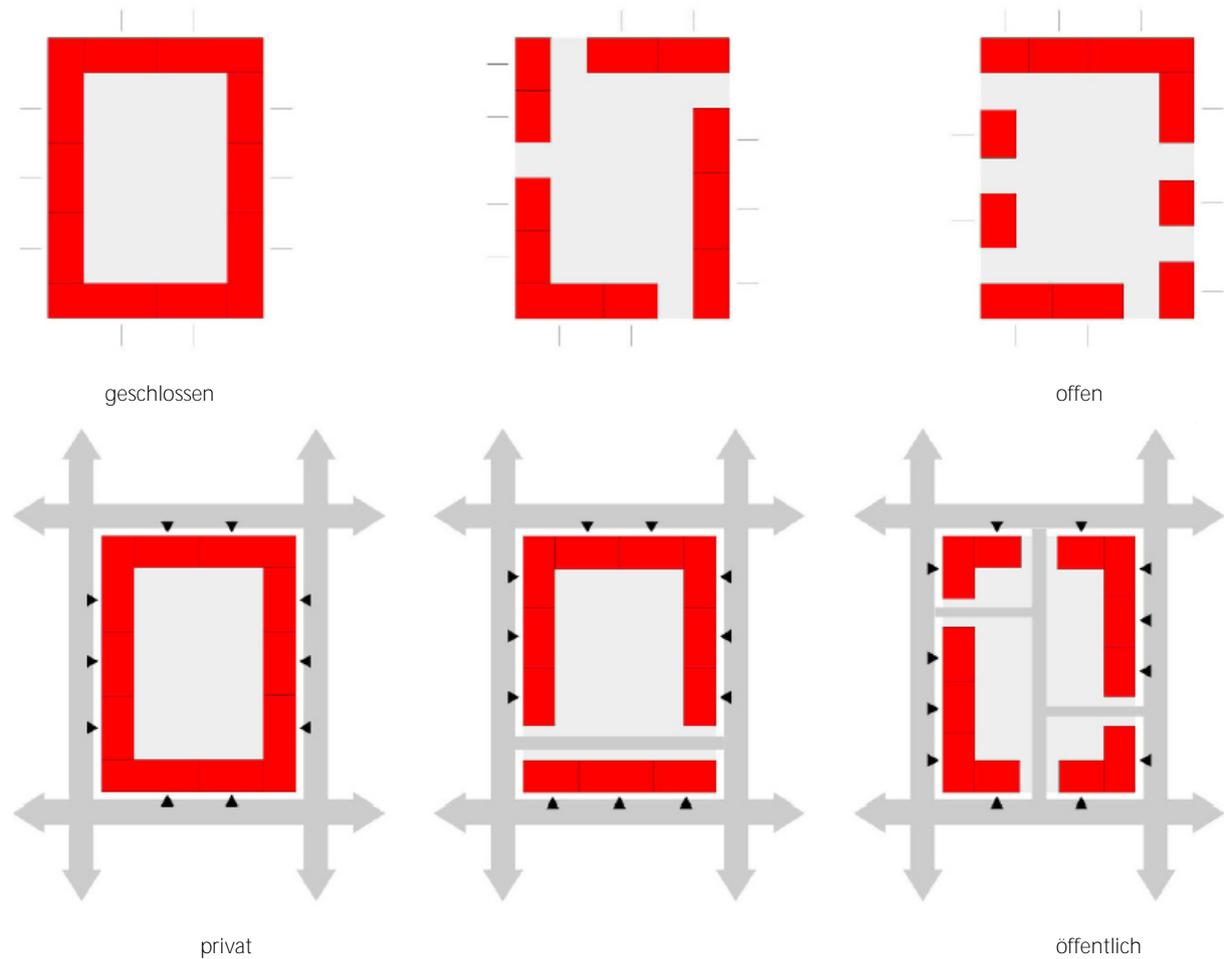
- Linear offene/geschlossenen Reihenbebauung
- versetzt offene/geschlossene Reihenbebauung
- gekrümmt offene/geschlossene Reihenbebauung

Abbildung 30  
Block, Grundprinzip und Prinzip Skizze



Quelle: Städtebauliches Entwerfen, Christ Streicher S. 56

Abbildung 31  
Block, Formen und Erschließung

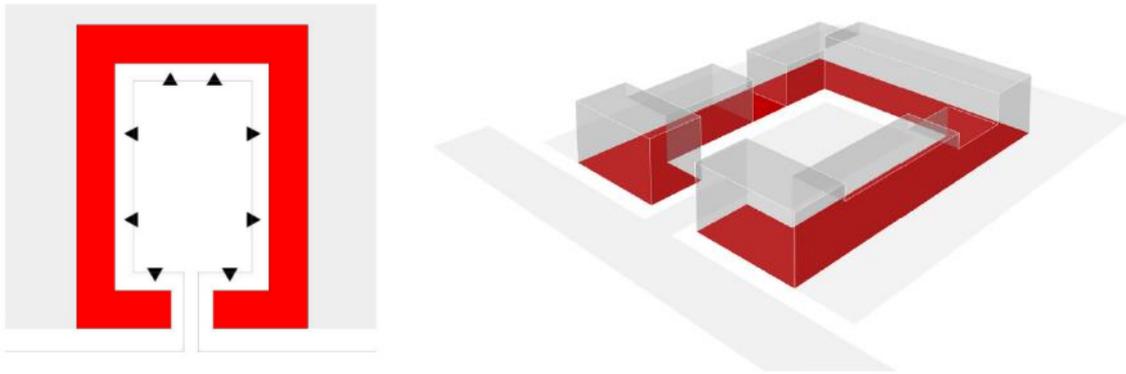


Quelle: Städtebauliches Entwerfen, Christ Streicher S. 56

#### 4.1.7.6 Hof

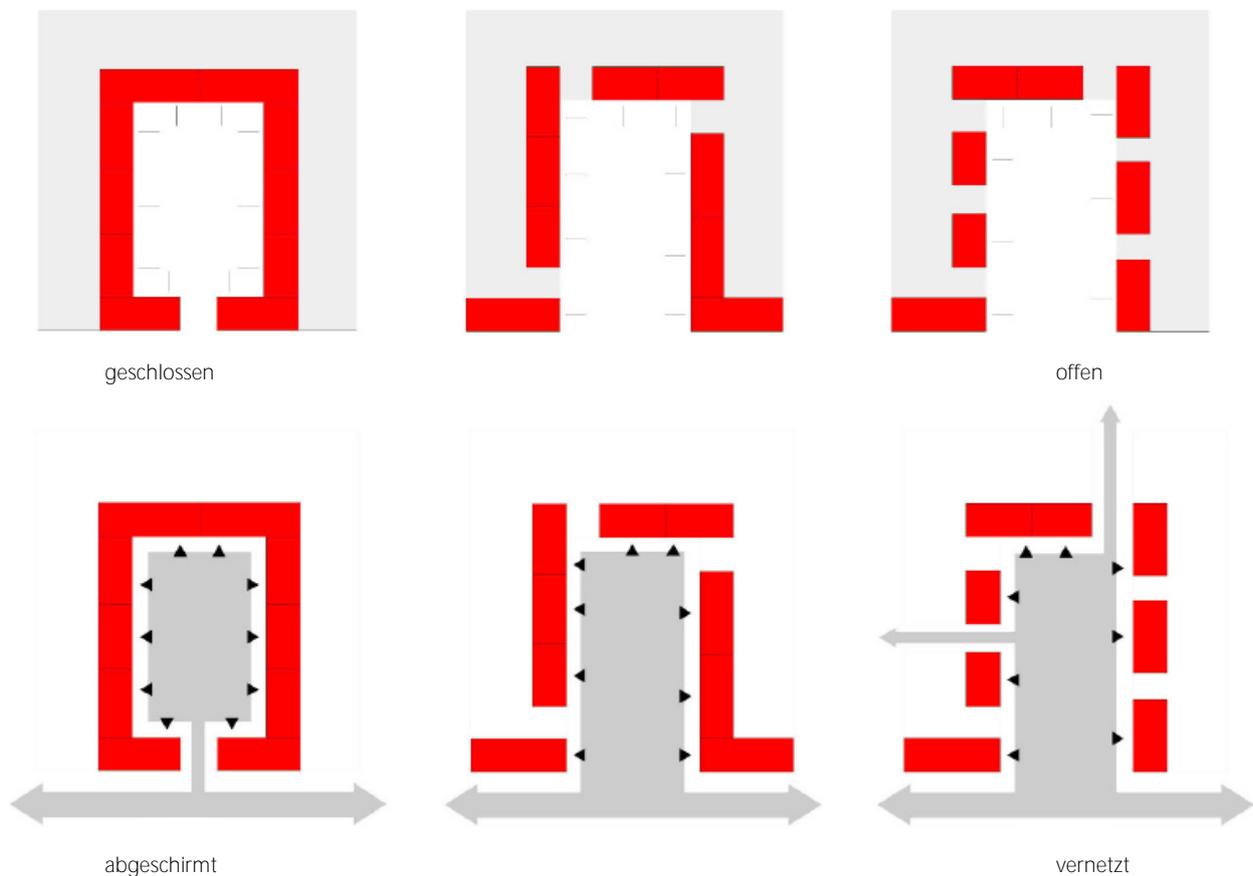
Als Sonderform des Blockes werden auch verschiedenen Hofsituationen betrachtet

Abbildung 32  
Hof, Grundprinzip und Prinzipskizze



Quelle: Städtebauliches Entwerfen, Christ Streicher S. 63

Abbildung 33  
Hof, Formen und Erschließung



Quelle: Städtebauliches Entwerfen, Christ Streicher S. 63

#### 4.1.8 Bewertung von typischen räumlichen Charakteristika

Die Bewertung von typischen räumlichen Charakteristika ist ein wichtiger Aspekt bei der Planung und Gestaltung von Gebäuden und öffentlichen Räumen. Dabei werden bestimmte Merkmale und Eigenschaften eines Raums analysiert und bewertet, um die Funktionalität, Ästhetik, Sicherheit und Nutzbarkeit zu beurteilen. Diese räumlichen Charakteristika beschränken sich auf Planung und Gestaltung im Außenbereich.

- Die Proportionen eines öffentlichen Raums spielen eine entscheidende Rolle für das ästhetische Empfinden und das Wohlbefinden der Menschen. Ein ausgewogenes Verhältnis von Länge, Breite und Höhe kann ein angenehmes Raumgefühl schaffen.
- Die Höhe eines öffentlichen Raums beeinflusst die Raumwahrnehmung und kann eine gewisse Räumlichkeit und Weite vermitteln.
- Die Beurteilung der natürlichen Belichtung und des Tageslichteinfalls ist wichtig, um die Qualität zu bewerten. Tageslicht hat positive Auswirkungen auf das Wohlbefinden der
- Die akustische Qualität eines Raums beeinflusst die Sprachverständlichkeit, den Lärmpegel und die Raumakustik.
- Die Bewertung berücksichtigt die Zugänglichkeit und Barrierefreiheit eines Raums für Menschen mit eingeschränkter Mobilität, um die Gleichberechtigung und Inklusion zu fördern.
- Die Sicherheit eines Raums wird hinsichtlich Fluchtwege, Notausgänge, Brandschutz und anderen relevanten Sicherheitsmaßnahmen beurteilt.
- Die Bewertung beinhaltet die Analyse der Funktionalität und Flexibilität eines Raums, um sicherzustellen, dass er den beabsichtigten Zweck erfüllen kann und sich an zukünftige Anforderungen anpassen lässt.
- Die ästhetische Gestaltung eines öffentlichen Raums spielt eine wichtige Rolle für die visuelle Attraktivität und das Gesamterlebnis des Raums.

Die Bewertung von typischen räumlichen Charakteristika ist eine komplexe Aufgabe, die eine umfassende Analyse und Berücksichtigung verschiedener Aspekte erfordert. Architekten, Innenarchitekten und Fachleute im Bereich der Gebäudeplanung können dabei helfen, die bestmöglichen räumlichen Lösungen zu entwickeln, die den Bedürfnissen der Nutzer gerecht werden.

Die Bewertung der Kriterien und deren Häufigkeit, in Bezug auf die Eingrenzung von potenziellen Gebieten, die einer Intervention nahekommen, findet in nachfolgender Tabelle 3 statt.

Tabelle 3  
Bewertungskriterien

Kriterium	Gesamt	Berlin	Frankfurt	Hannover	München	Stuttgart	Düsseldorf	Kassel
<b>Bautypologie</b>								
Blockrandbebauung	7	1	1	1	1	1	1	1
Reihenbebauung	7	1	1	1	1	1	1	1
Innenhofbebauung	3	1	0	0	1	0	1	0
Solitärbebauung	3	0	1	1	0	1	0	0
<b>Lage in der Stadt</b>								
Innenstadt / Zentrum	7	1	1	1	1	1	1	1
Stadtraum (durchsetzt)	3	0	0	0	1	0	1	1
<b>Art der vorherrschenden Nutzung</b>								
Gemischte Baufläche	6	1	1	1	0	1	1	1
besondere Wohngebiete	3	0	0	0	1	0	1	1
Wohnfläche	3	1	1	0	0	1	0	0
Hauptstadtfunktion / Sonderbaufläche	2	1	0	1	0	0	0	0
Einzelhandels- konzentration / Versorgungszentren	6	1	1	1	0	1	1	1
Kerngebiet	3	0	0	0	1	0	1	1
<b>Infrastruktur</b>								
Bahnfläche	5	1	0	1	1	0	1	1
Nahverkehr (U-, S-Bahn inkl. Haltestellen)	6	1	1	1	1	1	1	1
Tunnelanlagen	2	1	0	1	0	0	0	0
Hauptverkehrsstraßen	6	0	1	1	1	1	1	1
<b>Grün- / Blaustruktur</b>								
Grünfläche Parkanlange / Allgemeine Grünfläche	6	1	1	0	1	1	1	1
Gewässer	4	1	1	0	0	0	1	1

Aus Tabelle 3 ist zu erkennen, dass bei besonderen Hitzebelastungen in Zentren/Innenstadtbereichen bei einer bestimmten Bautypologie bzw. einer hohen baulichen Dichte und geringem Zwischenraum gegeben ist und Bepflanzungen nicht möglich sind. Sonnenstrahlung heizen durch das Absorbieren auf den Flächen die Umgebung auf und tragen zum Hitzeinseleffekt bei (BAFU, 2018: 9).

Außerdem ist die Lage wesentlich wichtig, da sie aufzeigt wie hoch der Versiegelungsgrad ist und in den meisten Fällen eine Entsiegelung nicht mehr möglich ist. Diese würde im besten Fall eine Kühlung bringen und zu einem angenehmeren Stadtklima beitragen (BAFU, 2018: 34).

Dennoch gibt es auch bei der Bewertung aus Tabelle 3 bestimmte Potentiale und Chancen, aber auch Herausforderungen und Probleme.

Bei denkmalgeschützten Bautypologien und Gebäuden sowie deren baulicher Umgebung ist es schwierig bauliche Maßnahmen durchzusetzen, da die ursprüngliche Gestalt und Substanz weitestgehend nicht verändert werden darf. Durch die hohe bauliche Dichte weisen die Gebiete begrenzte Zwischenräume auf von daher sind Pflanzungen nicht möglich

Dennoch haben zentral gelegene Bereiche in einer Stadt ein hohes öffentliches Interesse und die Standorte bieten Potentiale für eine Aufwertung und Umgestaltung zur Verbesserung des Stadtbildes und zur Schaffung von höherer Lebensqualität für die Bewohner und Besucher. Gerade an den Orten, wo eine hohe Anzahl von Menschen sich bewegen, kann es auch zu einer positiven Wahrnehmung der Umgebung beitragen.

Die Herausforderungen / Probleme sind außerdem:

- Ein hohes Menschaufkommen und eine intensive Nutzung können zu einem hohen Versiegelungsgrad führen, d.h. einer großen Flächenversiegelung durch Gebäude, Straßen und Gehwege. Dadurch können die Entwässerung und das Mikroklima beeinträchtigt werden.
- Entsiegelung meist nicht möglich. Aufgrund der dichten Bebauung und der bereits vorhandenen Infrastruktur ist es oft schwierig oder sogar unmöglich, versiegelte Flächen zu entsiegeln und mehr Grünflächen zu schaffen.
- Hohe Flächen- und Nutzungskonkurrenzen in zentralen Lagen konkurrieren verschiedene Interessen und Nutzungen um begrenzte Flächen. Dies kann zu Spannungen zwischen Wohnraum, Gewerbe, Verkehr, Grünflächen und anderen Funktionen führen.

Die Berücksichtigung dieser Potentiale und Herausforderungen ist entscheidend für eine nachhaltige und ausgewogene städtebauliche Entwicklung. Bei der Planung und Gestaltung von zentralen städtischen Lagen ist es wichtig, die Bedürfnisse der Bewohner, Besucher und der Wirtschaft gleichermaßen zu berücksichtigen und nachhaltige Lösungen zu finden, die eine hohe Lebensqualität, eine attraktive Umgebung und eine effiziente Nutzung der begrenzten Flächen gewährleisten. Dies kann beispielsweise durch eine sorgfältige Stadtplanung, Grünraumgestaltung, intelligente Verkehrsplanung und Nachverdichtung erreicht werden.

#### 4.1.9 Bewertungsmatrix zur Analyse versiegelte Flächen und Standortwahl

Im Folgenden ist ein Beispiel einer Bewertungsmatrix dargestellt, die für die Kriterien der Straßenschluchten, Plätze und Innenhöfe umfassend beschreibt, wie die Zusammenhänge sind.

Tabelle 4  
Auszug aus Tabelle Bewertungsmatrix

Strakenschicht	Platz	Insenhof	Ort - Stadteigentümer	Ort - Privateigentümer	Denkmalschutz	Voranalyse gebaute Telespiele	Verschlussgrad	mittlerer Verschlussgrad	Fläche in m²	Vorschlag einer Überdachung	Hitzesollbewertung*	Gebäudekategorienbewertung*
		X	Wien, Österreich	München, Österreich					576			
		X	Stockholm, Schweden	Fort Worth, Texas					130			
		X	Südburg, Österreich	Heilbronn, Deutschland					814			
		X	München, Deutschland						525			
									210			
<b>Analyse Kassel</b>												
X			Kassel - Treppenstraße		Ja, Blicke und Fassaden		70%	32,13%	4250	paralleleraffines Membrandach, unbewegliches Membrandach	5 bb 6	1 und 4
X			Kassel - Kurlandstraße	Kassel - Heilbergplatz				32,13%				
X			Kassel - Wolfshucht //					32,13%				
X			Kassel - Wilhelmstraße				60%	32,13%	3450	selbstführendes Membrandach, Umbrella	5	1, 2 und 4
X			Kassel - Katsplatz oder Parkplatz				90%	32,13%	4050	selbstführendes Membrandach, Umbrella	6	1, 2 und 4
			Kassel - Marktlicher Platz					32,13%				
			Kassel - Behlplatz					32,13%				
X			Kassel - Goethehem				75%	32,13%	1700	Umbrella oder zentraleraffines Membrandach	5 bb 6	1, 2 und 4
X			Kassel - Bröder Gärten Platz					32,13%				
X			Kassel - Bröder Kühner Platz				80%	32,13%	2100	Umbrella	6	7
X			Kassel - Willy Brandt Platz					32,13%				
X			Kassel - Frenzenberger Platz					32,13%				
X			Kassel - Königplatz					32,13%				
X			Kassel - Erlenkauer (Parkplatz)				75%	32,13%	1360	UMBRELLA oder zentraleraffines Membrandach	4 bb 5	1, 2 und 4
X			Kassel - Wehnhelder Platz					32,13%				
X			// Sehr Viel Baumbestand	Kassel - Uhlenkugel			100%	32,13%	170	selbstführendes Membrandach	5	4
X				Kassel - Rendell				32,13%		Umbrella	3 bb 4	-
X				// Sehr viel Baumbestand								
X			Die Schläge (Pflanzende entlang der Fulda)				100%	32,13%	1820	Umbrella	4 bb 5	2 und 4
X			Weg Wierlich (in Rendell)				100%	32,13%	350	Umbrella	4 bb 5	-
X			Nordlicher Parkplatz (Regierungspräsidentium)				95%	32,13%	1300	Umbrella	5	2
X			Kassel - Rudolphplatz				90%	32,13%	500	Umbrella	5	-
X			Parkplatz Regentstraße 1-3				100%	32,13%	1600	Umbrella	5 bb 6	2 und 4
X			Parkplatz Schafgasse 4-10				95%	32,13%	1200	paralleleraffines Membrandach, Umbrella	5	2 und 4
X			Kassel - Zentrale der Universitätsverwaltung				50%	32,13%	180	paralleleraffines Membrandach, Umbrella	4 bb 5	1
X			Kassel - Heinrich Schutz Schule		Ja, der Abbau		80%	32,13%	4000	Umbrella oder zentraleraffines Membrandach	5	1
X			Kassel - Markthalle 2 Parkplätze		Ja		100%	32,13%	2900	Umbrella	5 bb 6	1 und 4
X				Kassel - Benhof			100%	32,13%	560	selbstführendes Membrandach	5	4
X				Kassel - Lohmann						selbstführendes Membrandach	5 bb 6	4
X				// Sehr viel Baumbestand				32,13%				
<b>Analyse Berlin</b>												
X			Bibelplatz/Opemplatz - Berlin				100%	38,99%	6000	Umbrella	5 bb 6	4
X			Glinkastraße - Unter den Linden				100%	38,99%	1000	Umbrella	4 bb 5	4
X			Um die alte Münze				100%	38,99%	800	Umbrella, Selbstführendes Membrandach	4 bb 5	4
X			Lehmannstraße		Berlinhaus,		100%	38,99%	3000	selbstführendes Membrandach, Umbrella	5 bb 6	4
X			Alexanderplatz		Platzgestaltung		90%	38,99%	13000	Umbrella	5 bb 6	2 und 4
X			Gendarmenmarkt				100%	38,99%	5800	Umbrella	4 bb 5	2 und 4
X			Carl Schurz Straße				85%	38,99%	1000	Umbrella (due to listed monuments)	4	2 und 4
X			Rathaus Vorplatz Spandau				80%	38,99%	2500	Umbrella	4	1 und 4
X			Marktplatz Spandau				60%	38,99%	2700	Umbrella	4	2 und 4
X			Taubenstraße				100%	38,99%	2600	Schlengeführtes Membrandach, Umbrella	4 bb 5	2 und 4



Die Bewertungsmatrix ermöglicht eine strukturierte Bewertung der verschiedenen Orte oder Plätze anhand der farblich aufgeführten Kriterien in dem Auszug der Tabelle 5. Verschiedene Elemente und oder Kriterien werden verglichen und dienen dazu Stärken und Schwächen jedes Ortes zu identifizieren und bei der Entscheidungsfindung für konkrete Analysen dahingehend zu unterstützen, dass auf einfache Verfahrensweise Straßenschluchten, Plätze und Innenhöfe lokalisiert werden können. Dementsprechend werden die Ergebnisse leicht vergleichbar und interpretierbar gemacht.

Tabelle 5

Auszug aus Tabelle Bewertungsmatrix mit Legende zur Bewertung der städtischen Hitzeinseln und Gebäudetypologien s. Anhang

Straßenschucht	Platz	Innenhof	Ort - Stadteigentümer	Ort - Privateigentümer	Denkmalschutz	Versiegelungsgrad	mittlerer Versiegelungsgrad	Fläche in m <sup>2</sup>
Hitzeinsel bewertung	Heatmap Kategorien der Überwärmung		*Gebäudetypologie Bewertung	umliegende Gebäudetypologien				
1	Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiet		1	Stahlblechbauweise				
2	Frischlufentstehungsgebiet		2	Betonbauweise				
3	Misch- und Übergangsklimate		3	Fachwerk/Holzbauweise				
4	Überwärmungspotential		4	Massivbauweise				
5	Moderate Überwärmung		5	Hybridbauweise				
6	Starke Überwärmung		6	andere Bauweisen				

Diese Begriffe in der linken Legende in Tabelle 5 beziehen sich auf die Untersuchung und Analyse verschiedener Klimaphänomene, insbesondere im Zusammenhang damit, wie Luftmassen entstehen, Klimaübergänge auftreten und das Potenzial für Überhitzung in verschiedenen Umgebungen aussieht.

In der Orientierung nach VDI Klimateigenschaften werden die Begriffe wie folgt beschrieben:

- Frisch- und Kaltluftentstehungsgebiete ist Freilandklima. Hoch aktive, vor allem kaltluftproduzierende Flächen im Außenbereich; größtenteils mit geringer Rauigkeit und entsprechender Hangneigung
- Frischluftentstehungsgebiete ist Waldklima. Flächen ohne Emissionsquellen; hauptsächlich mit dichtem Baumbestand und hoher Filterwirkung.
- Misch- und Übergangsklimate ist das Klima innerstädtischer Grünflächen. Flächen mit sehr hohem Vegetationsanteil, geringe und diskontinuierliche Emissionen; Pufferbereiche zwischen unterschiedlichen Klimatopen.
- Übergangspotential ist Vorstadtklima. Baulich geprägte Bereiche mit versiegelten Flächen, aber mit viel Vegetation in den Freiräumen; größtenteils ausreichende Belüftung.
- Moderate Überwärmung ist Stadtklima. Dichte Bebauung, hoher Versiegelungsgrad und wenig Vegetation in den Freiräumen; Belüftungsdefizite.
- Starke Überwärmung ist Innenstadtklima. Stark verdichtete Innenstadtbereiche/City, Industrie- und Gewerbeflächen mit wenig Vegetationsanteil und fehlender Belüftung.

Quelle: INEK GmbH, Klimaanalysekarte 2019

Abbildung 34  
Schwarzplan Berlin mit Orten der potenziellen Überhitzung



(eigene Darstellung)

Abbildung 35  
Schwarzplan München mit Orten der potenziellen Überhitzung (eigene Darstellung)



(eigene Darstellung)

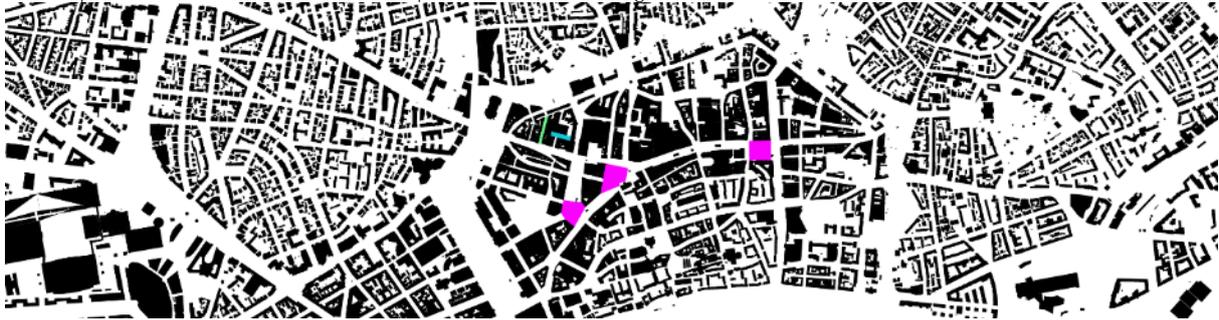
Abbildung 36  
Schwarzplan Kassel mit Orten der potenziellen Überhitzung (eigene Darstellung)



(eigene Darstellung)

Abbildung 37

Schwarzplan Frankfurt am Main mit Orten der potenziellen Überhitzung



(eigene Darstellung)

Abbildung 38

Schwarzplan Hannover mit Orten der potenziellen Überhitzung (eigene Darstellung)



(eigene Darstellung)

Abbildung 39

Schwarzplan Stuttgart mit Orten der potenziellen Überhitzung



(eigene Darstellung)

Abbildung 40

Schwarzplan Düsseldorf mit Orten der potenziellen Überhitzung



(eigene Darstellung)

Platz   
Innenhof   
Straßenschlucht 

Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass die markierten Orte die in Abbildung 34 bis

Abbildung 40 in Bezug auf die o. g. Kriterien in den Innenstädten besonders betroffen sind vom Hitzeinseleffekt. Dabei wurden erste Untersuchung in den Städten Berlin, München, Kassel, Frankfurt, Hannover, Stuttgart und Düsseldorf gemacht. Dabei konzentrierte sich die Forschung auf bestimmte Orte, die im weiterem detailliert beschrieben werden. Es handelt sich größtenteils um öffentliche Orte und somit auch um Orte, die sich in stark verdichteten Innenstadtbereichen/City, Industrie- und Gewerbeflächen mit wenig Vegetationsanteil und fehlender Belüftung befinden.

Abbildung 41

Schwarzplan Kassel mit punktueller Identifizierung der Plätze (Lila), Straßenschluchten (Grün) und Innenhöfe (Blau)



(eigene Darstellung)

Abbildung 42

Klimaanalysekarte Kassel mit punktueller Identifizierung der Plätze (Lila), Straßenschluchten (Grün) und Innenhöfe (Blau)



(eigene Darstellung)

Die Karten zeigen die Orte, die sich in Verbindung mit den Punkten 4.1.4 -4.1.7 definieren lassen. In der Abbildung 34 bis

Abbildung 40 lassen sich die Orte anhand eines Schwarzplanes erkennen und bestimmen somit schon einmal eine räumliche Orientierung. In Abbildung 41 - Abbildung 44 werden die Orte genauer analysiert und zudem

eine Klimaanalysekarte als verbindlichen Layer übergelegt. So lassen sich die Orte anhand der Stärke der Überwärmung festlegen.

Abbildung 43

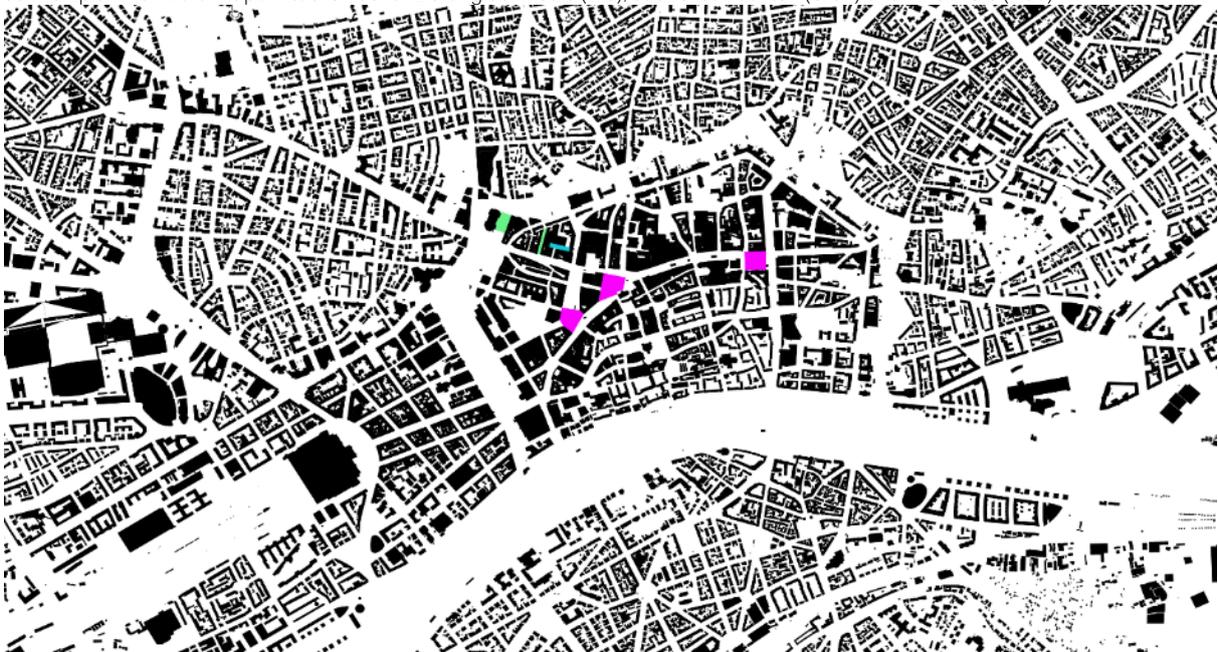
Schwarzplan Frankfurt mit punktueller Identifizierung der Plätze (Lila), Straßenschluchten (Grün) und Innenhöfe (Blau)



(eigene Darstellung)

Abbildung 44

Schwarzplan Frankfurt mit punktueller Identifizierung der Plätze (Lila), Straßenschluchten (Grün) und Innenhöfe (Blau)



(eigene Darstellung)

#### 4.1.10 Versiegelungsanteile in den Städten

Der Versiegelungsanteil bezieht sich auf den Prozentsatz des Stadtgebiets, das mit versiegelten oder befestigten Oberflächen wie Gebäuden, Straßen, Parkplätzen und Betonflächen bedeckt ist. Eine hohe Versiegelung bedeutet, dass ein großer Teil des Bodens nicht durchlässig ist und Wasser nicht versickern kann. Dies kann Auswirkungen auf die hydrologischen Eigenschaften eines Gebiets haben, wie zum Beispiel die Oberflächenabflussmengen, das Auftreten von Überschwemmungen und die Grundwasserneubildung.

Der Versiegelungsanteil kann je nach Stadt und Stadtteil erheblich variieren. Generell haben Städte mit einer höheren Bebauungsdichte und einer größeren Infrastruktur einen höheren Versiegelungsanteil. Auch das Wachstum von Städten, die Ausdehnung von Siedlungsgebieten und die verstärkte Urbanisierung tragen zur Zunahme der Versiegelung bei.

Es ist schwierig, einen allgemeinen Versiegelungsanteil für Städte anzugeben, da dies von zahlreichen Faktoren wie Stadtgröße, Topografie, Stadtentwicklungsstrategien und regionalen Unterschieden abhängt. Allerdings gibt es Studien und Daten, die spezifische Versiegelungsanteile für bestimmte Städte oder Regionen liefern. Diese Daten werden oft im Rahmen von Stadtplänen, Umweltberichten oder durch Fernerkundungstechniken wie Satellitenbildanalyse erfasst.

Um den negativen Auswirkungen der Versiegelung entgegenzuwirken, setzen Städte vermehrt auf Maßnahmen wie Begrünung von Dächern und Fassaden, Schaffung von Grünflächen und Parks, Förderung von durchlässigen Oberflächenmaterialien und dezentrale Regenwassermanagement-Systeme. Diese Maßnahmen zielen darauf ab, den Versiegelungsgrad zu reduzieren, die Stadtkühlung zu verbessern, den Hochwasserschutz zu stärken und die Lebensqualität der Bewohner zu erhöhen. Außerdem werden in den Bereichen wo es wenige bis keine Möglichkeiten mehr gibt die Versiegelung aufzulockern Überdachungen betrachtet, die aus dieser Not heraus Möglichkeiten schaffen, die Hitze in den betreffenden Gebieten zu reduzieren.

Die Aufteilung des Bodens und der Flächennutzung in einer Stadt kann in verschiedene Kategorien unterteilt werden. Hier sind einige typische Kategorien der Flächennutzung in städtischen Gebieten:

- **Städtische Bebauung:** Dies umfasst Wohngebiete, Gewerbegebiete und industrielle Gebiete, in denen sich Gebäude und Infrastrukturen wie Straßen, Wohnhäuser, Bürogebäude, Einkaufszentren und Fabriken befinden.
- **Verkehrswege:** Hierunter fallen Straßen, Autobahnen, Brücken, Tunnel und öffentliche Verkehrsmittel wie Bus- und Bahnlinien, die der Mobilität von Menschen und Gütern dienen.
- **Öffentliche/Industrielle/Gewerbliche Nutzung:** Dies umfasst Flächen, die für öffentliche Einrichtungen wie Schulen, Krankenhäuser, Verwaltungsgebäude, aber auch für industrielle und gewerbliche Zwecke genutzt werden, wie Fabriken, Lagerhallen und Geschäfte.
- **Baustellen, Halden, Mineralölförderung, ungenutztes Land:** Dies sind Flächen, die für Baustellen, Deponien, Abfallhalden, Lagerung oder Förderung von Mineralölen oder als unbebaute, ungenutzte Flächen vorgesehen sind.
- **Städtisches Grün:** Dazu gehören öffentliche Parks, Gärten, Spielplätze, Grünstreifen und andere grüne Flächen innerhalb der Stadt, die der Erholung, dem Umweltschutz und der Verbesserung des Stadtklimas dienen.
- **Landwirtschaftliche Nutzung:** Dies umfasst landwirtschaftlich genutzte Flächen wie Ackerland, Gemüsegärten oder Weiden innerhalb oder am Stadtrand.
- **Wald, Vegetation, offene Flächen ohne Vegetation:** Dies bezieht sich auf Waldgebiete, Naturschutzgebiete, bewaldete Flächen sowie offene Flächen ohne Vegetation wie Brachland oder Kiesgruben.

- Auen sind Flächen entlang von Flüssen oder Wasserläufen, die periodisch oder regelmäßig von Überschwemmungen betroffen sind und eine wichtige Rolle für den Hochwasserschutz und die Biodiversität spielen können.

Quelle: Imperviousness Density 2015, Copernicus

Die Aufteilung der Flächennutzung kann je nach Stadt und Region unterschiedlich sein und wird von verschiedenen Faktoren wie Stadtplanung, Bevölkerungsdichte, Wirtschaftsaktivitäten und Umweltbedingungen beeinflusst. Eine ausgewogene Flächennutzung kann zur Schaffung nachhaltiger und lebenswerter städtischer Umgebungen beitragen.

Tabelle 6

Gesamtranking: Versiegelungsgrad der 50 einwohnerstärksten Städte

Rang	Stadt	Versiegelungsgrad in %
1	München	46,6
2	Oberhausen	44,2
3	Hannover	42,6
4	Ludwigshafen am Rhein	42,3
5	Nürnberg	40,4
6	Mannheim	40,2
7	Gelsenkirchen	39,4
8	Berlin	39
9	Bochum	37,9
10	Duisburg	37
11	Frankfurt am Main	36,9
12	Essen	36,8
13	Oldenburg	36,6
14	Düsseldorf	36,4
15	Hamburg	36,2
16	Halle (Saale)	34,9
17	Leipzig	34,6
18	Bremen	34,5
19	Köln	34,3
20	Kiel	34,3
21	Mainz	32,1
22	Kassel	32,1
23	Dortmund	31,7
24	Stuttgart	31,5
25	Leverkusen	31,4
26	Mülheim an der Ruhr	30,4
27	Bonn	30,3
28	Krefeld	29,1
48	Hamm	17,8
49	Freiburg im Breisgau	17,6
50	Potsdam	12,7

Quelle: VdS Schadenverhütung GmbH / GDV

Versiegelungskarten beschreiben in der Regel die Ausdehnung und Verteilung versiegelter Flächen innerhalb einer bestimmten Region, Stadt oder Gemeinde. Sie zeigt, welche Bereiche durch befestigte Oberflächen wie Gebäude, Straßen, Parkplätze, Gehwege oder andere versiegelte Flächen bedeckt sind.

Anhand der Auswahl der Städte verdeutlichen folgende Karten die Höhe des Versiegelungsgrades und zeigen einmal mehr die Notwendigkeit von Maßnahmen, um die Verschattungen in den Großstädten zu maximieren.

Abbildung 45  
Versiegelungskarte Berlin

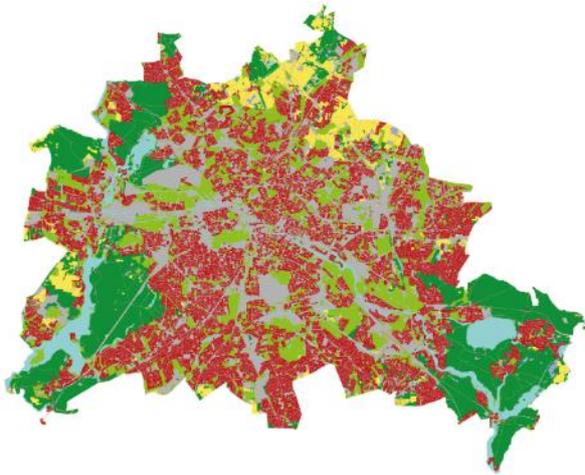


Abbildung 46  
Versiegelungskarte München

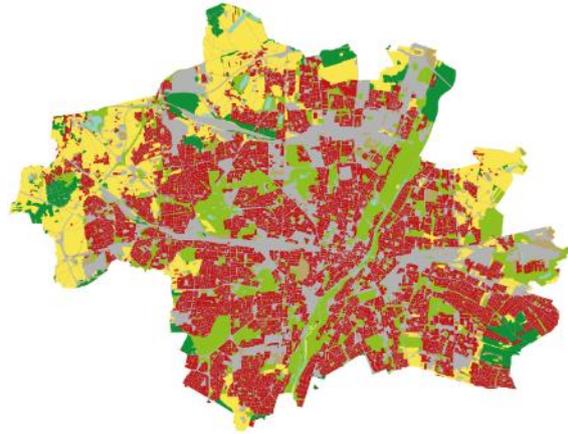


Abbildung 47  
Versiegelungskarte Kassel

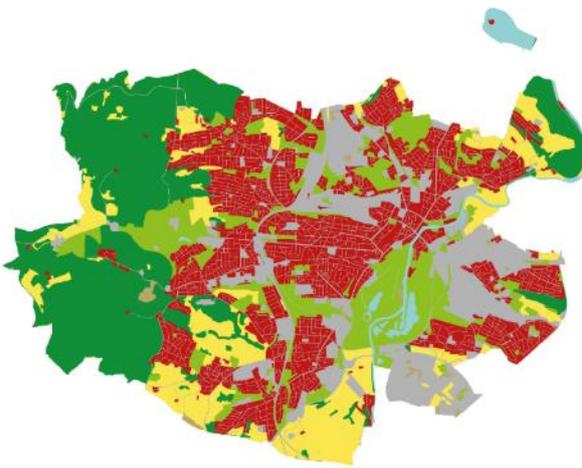


Abbildung 48  
Versiegelungskarte Frankfurt am Main

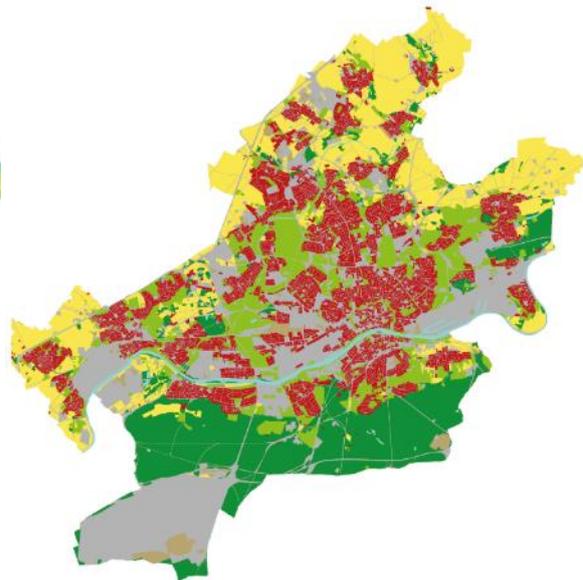


Abbildung 49  
Versiegelungskarte Stuttgart

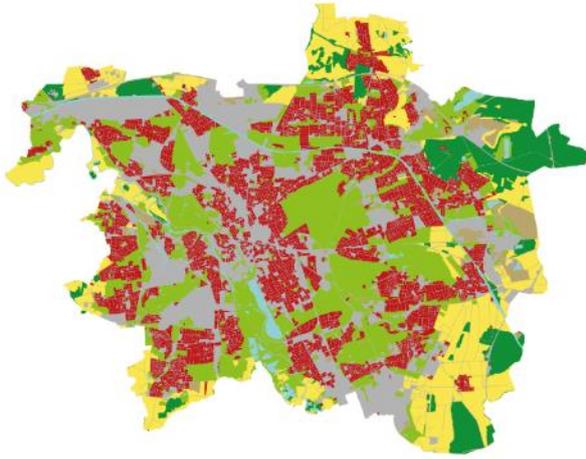


Abbildung 50  
Versiegelungskarte Hannover

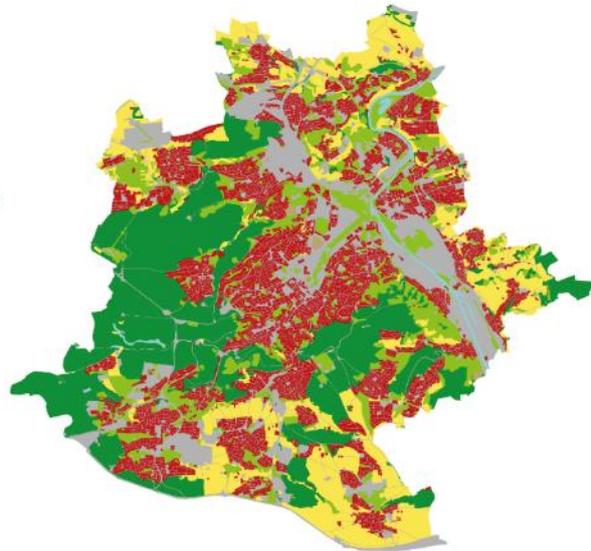
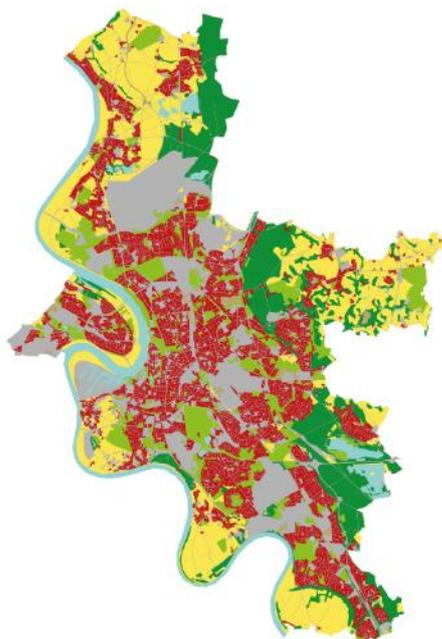


Abbildung 51  
Versiegelungskarte Düsseldorf



- Städtische Bebauung
- Verkehrswege, öff./industr./gewerb. Nutzung
- Baustellen, Halden, Mineralölförderung, ungenutzte:
- Städtischen Grün
- Landwirtschaftliche Nutzung
- Wald, Vegetation, offene Flächen ohne Vegetation
- Auen
- Wasser

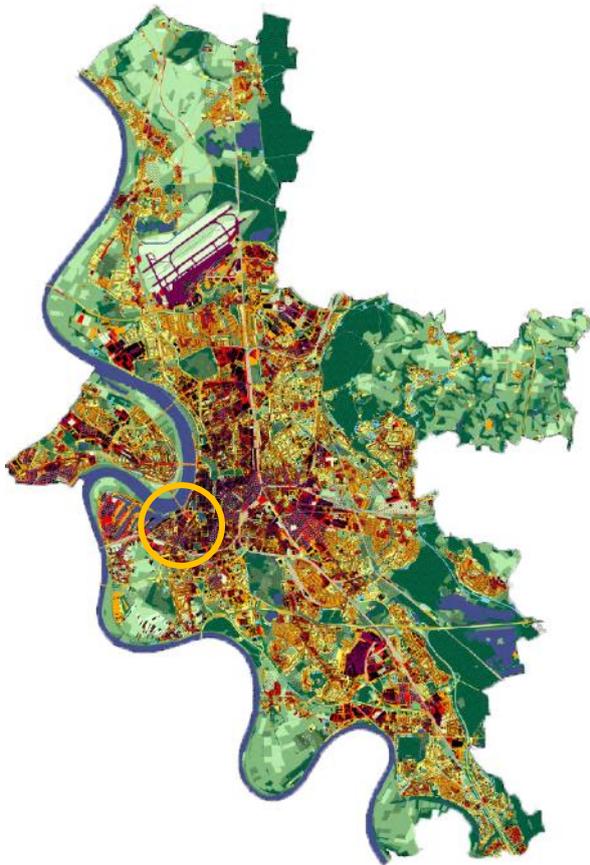
Quelle: Imperviousness Density 2015, Copernicus

Die Versiegelungskarte dient dazu, ein besseres Verständnis für die Flächennutzung und die Auswirkungen der Versiegelung auf die Umwelt, das Stadtklima, den Wasserhaushalt und andere Aspekte zu ermöglichen. Sie kann für stadtplanerische Entscheidungen, Umweltschutzmaßnahmen oder die Bewertung des ökologischen Zustands einer Region nützlich sein.

Am Beispiel der Stadt Düsseldorf, die sich im Mittelfeld des Rankings befindet mit einem Versiegelungsgrad von 36,4 % haben wir ersten Analysen der Hitzeinselkarten im Vergleich mit Versiegelungskarte gemacht.

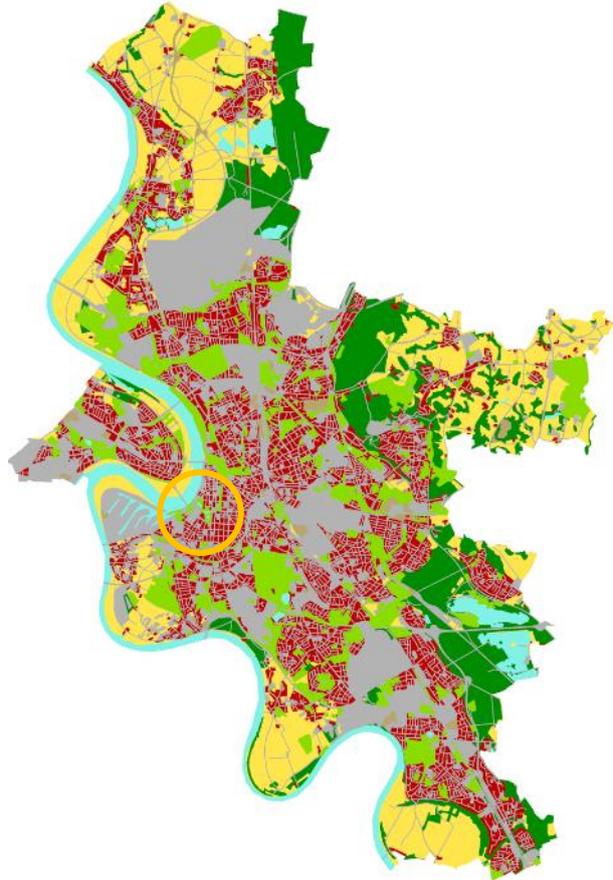
Entsprechend der Auswahl der überhitzten Gebiete werden Vergleiche mit der Versiegelungskarte gezogen und weitere Analysen durchgeführt. Ein Beispiel hierfür ist der Shadowplatz im Stadtteil Stadtmitte von Düsseldorf.

Abbildung 52  
Klimafunktionskarte, 2020

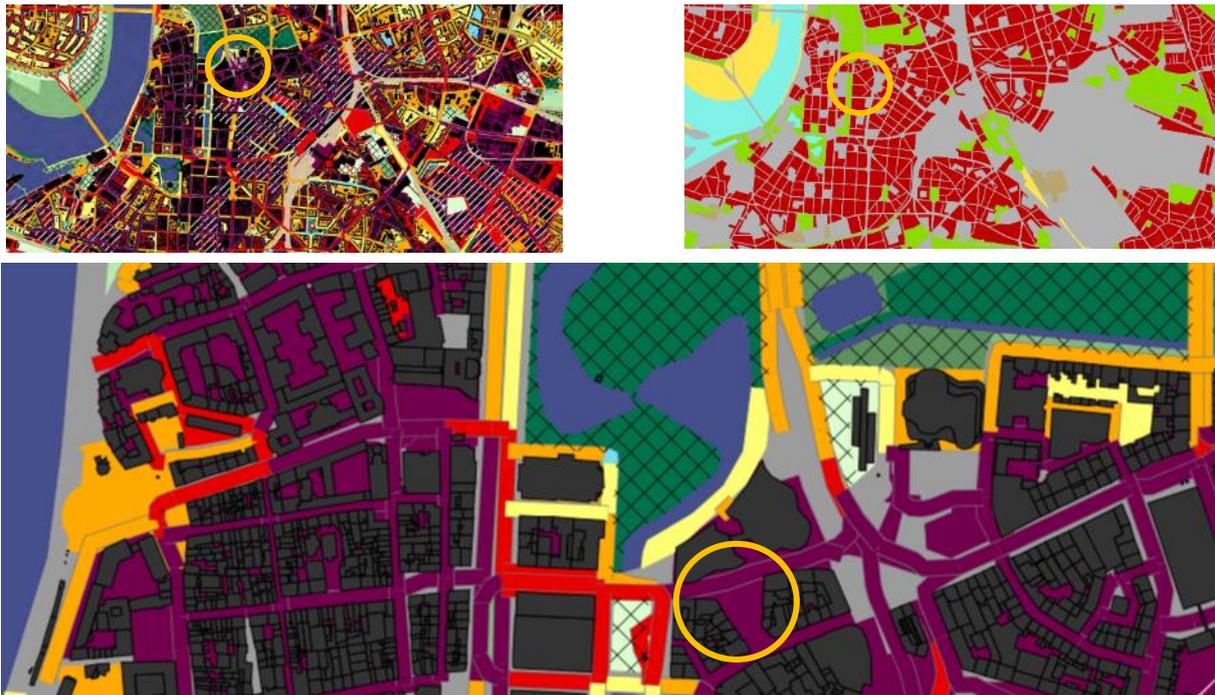


Quelle: GEO-NET Umweltconsulting GmbH, 2015

Abbildung 53  
Versiegelungskarte Düsseldorf mittleren Versiegelungsgrad  
36,40%



Quelle: Imperviousness Density 2015, Copernicus



Quelle: Imperviousness Density 2015, Copernicus

Am Beispiel Schadowplatz in Düsseldorf zeigt sich eine sehr ungünstige bioklimatische Situation in Bezug auf eine Umgebung oder ein Klima, das für das Wohlbefinden von Menschen und anderen Lebewesen äußerst ungünstig oder sogar gesundheitsgefährdend ist. Es entsteht in der Regel durch extreme klimatische Bedingungen, die die thermische Belastung und die physiologische Beanspruchung von Lebewesen erhöhen.

Einige Faktoren, die hier zu einer sehr ungünstigen bioklimatischen Situation führen, sind:

- Extrem hohe Temperaturen können zu Hitzestress, Hitzeerschöpfung und Hitzschlag führen, was die Gesundheit und das Leben von Menschen gefährden kann. In einigen Regionen treten auch dauerhafte Hitzewellen auf, die besonders gefährlich sein können.
- Hohe Luftfeuchtigkeit in Kombination mit hohen Temperaturen kann das Schwitzen behindern und die Wärmeregulierung des Körpers erschweren, was zu einer erhöhten Hitzebelastung führt.
- Eine geringe Luftbewegung und eine unzureichende Belüftung können dazu führen, dass sich Hitze und Schadstoffe in der Luft ansammeln und die Luftqualität verschlechtern.
- Eine hohe Konzentration von Schadstoffen in der Luft, wie beispielsweise Smog oder Schadstoffe aus Industrie und Verkehr, kann die Atemwege belasten und gesundheitliche Probleme verursachen.
- Starke Sonneneinstrahlung kann zu Sonnenbrand, Hitzeschlägen und anderen gesundheitlichen Problemen führen.
- Ein Mangel an Vegetation und Grünflächen kann zu einer unzureichenden Verdunstungskühlung führen und das städtische Mikroklima verschärfen.

Eine sehr ungünstige bioklimatische Situation kann zu schwerwiegenden Gesundheitsproblemen führen, insbesondere für gefährdete Bevölkerungsgruppen wie ältere Menschen, Kinder und Menschen mit Vorerkrankungen. Solche Bedingungen können auch die Landwirtschaft, die Tierwelt und die Ökosysteme negativ beeinflussen.

Um eine verbesserte bioklimatische Situation zu schaffen, sind Anpassungsstrategien und Maßnahmen zur Reduzierung der Hitzebelastung und zur Verbesserung der Luftqualität und des Stadtklimas erforderlich. Dazu gehört das Anpflanzen von Bäumen und Grünflächen, die Förderung von nachhaltiger Stadtplanung und der

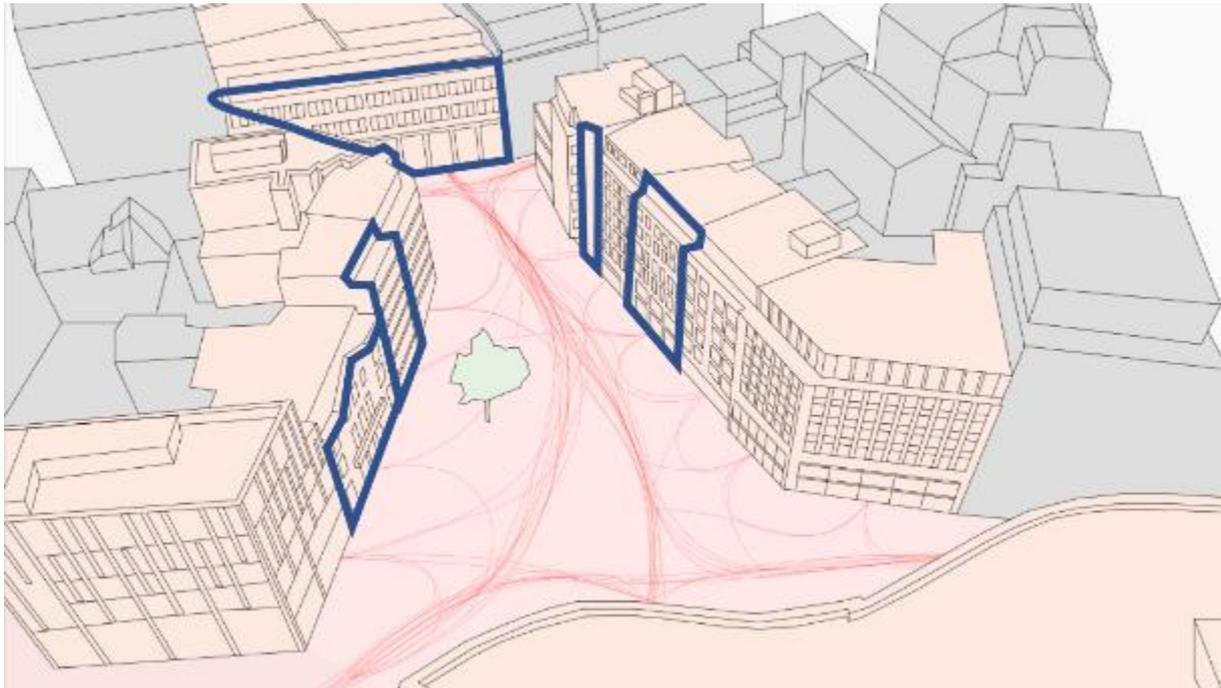
Einsatz von Technologien zur Reduzierung von Luftverschmutzung. Eine nachhaltige und umweltfreundliche Gestaltung der urbanen Umgebung ist entscheidend, um die bioklimatische Situation zu verbessern und das Wohlbefinden der Menschen zu fördern.

#### 4.1.11 Prüfung bestimmter Kriterien am Beispiel des Schadowplatzes in Düsseldorf und der Hauptwache in Frankfurt am Main

Der Schadowplatz in Düsseldorf ist ein Paradebeispiel für die gesamtspezifische Situation. Dieser Platz verschafft der Untersuchung eine ideale räumliche Situation. Die Fassadenvielfalt der umliegenden Gebäude und ihre unterschiedlichen Konstruktionsarten, die innerstädtische Lage mit hoher Frequentierung und die geringe Vegetationsfläche von nur einem Baum auf ca. 5.000 qm resultieren in einer hohen Versiegelung. Der Schadowplatz verläuft im Süden Trichterförmig, dominiert im Norden mit den Kö-Bögen und schafft dementsprechend eine Nord-Südausrichtung und somit eine ständige Bestrahlung der Sonne. Die Erkenntnis der Fassadenvielfalt beschreibt sich folgendermaßen und lässt darauf schließen, dass nur ein begrenzter Bereich für eine Bedachung in Frage kommen wird.

- Die Fassaden am Schadowplatz variieren in ihrer Eignung für die Befestigung von nachträglichen Verschattungen.
- Das Einkaufszentrum KÖ-Bogen 1, Schadowplatz 12 und 18 mit ihren Glasfassaden sind weniger geeignet.
- Das Haus der Universität (Schadowplatz 3) hat eine massivere Fassade aus Sandstein, die technisch besser für die Befestigung geeignet ist, aber möglicherweise unter Denkmalschutz steht.
- Die Fassade von Schadowplatz 16 hat wahrscheinlich ausgemauerte Gefache und Betonverkleidung, was die Befestigung erleichtert.
- Die Stützen im Erdgeschoss der Schadowarkaden sind vermutlich nicht gedämmt und könnten sich zur Befestigung eignen.
- Schadowplatz 13 hat einen ungedämmten verputzten Abschnitt, während Schadowplatz 11 eine vorgehängte Fassade über Dämmung besitzt, die weniger geeignet ist.
- Das Modegeschäft BRAX (Schadowplatz 10) eignet sich aufgrund seines ungedämmten Altbau-Charakters gut zur Befestigung.
- Das Hotel Favor (Schadowplatz 11) wurde bereits gedämmt und ist daher weniger geeignet.
- Das letzte Gebäude (Schadowplatz 12) hat ebenfalls eine ungeeignete vorgehängte Fassade.

Abbildung 54  
Shadowplatz Düsseldorf



Quelle: Projektarbeit von David Richard Messerschmidt

Die Hauptwache in Frankfurt am Main in Abbildung 56 ist ein belebter Platz mit einigen Vorzügen. Hier befinden sich mehrere Cafés mit zahlreichen Sitzgelegenheiten. Unter dem Platz befinden sich U- und S-Bahn-Haltestellen auf verschiedenen Ebenen sowie eine Ebene mit zusätzlichen Geschäften. Diese Unterbauung erschwert den Einbau von Stützen erheblich. Außerdem sind die Gebäudefassaden weit voneinander entfernt. Der Platz hat eine Größe von ca. 100 m x 100 m. Sowohl die Hauptwache (Nr. 1) als auch die Katharinenkirche (Nr. 8) stehen unter Denkmalschutz.

Die Hauptwache 5 (Nr. 2) hat eine vorgehängte Fassade und die Hauptwache 7 (Nr. 3) eine Glasfassade. Dies erschwert die Anbringung von Beschattungen an beiden Gebäuden erheblich. Die Biebergasse 2 (Nr. 4) ist vermutlich mit einem Wärmedämmverbundsystem versehen, da die Fenster tief in der Fassade sitzen und diese verputzt ist. Bei der Hauptwache 11 (Nr. 5) scheint es sich um eine nicht vorgehängte Fassade aus Fertigteilen zu handeln. Hier wäre eine Befestigung denkbar.

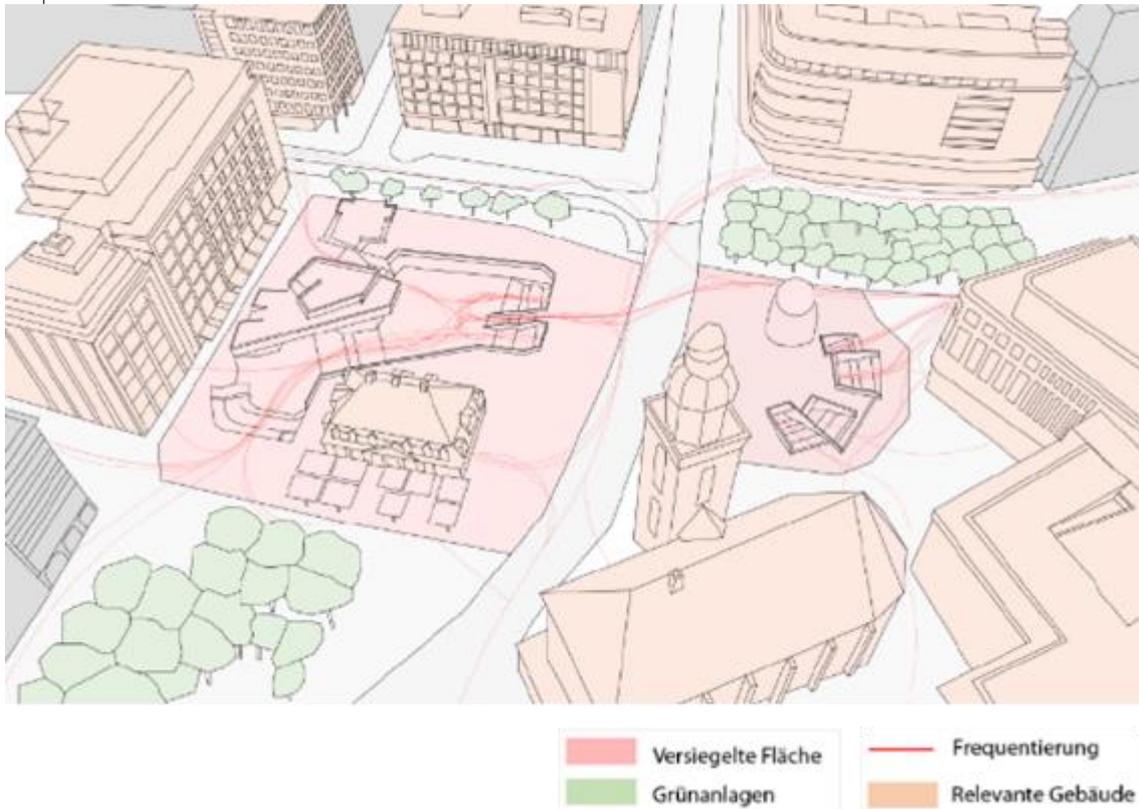
Sowohl Galeria Kaufhof (Nr. 6) als auch Zeil 123 (Nr. 7) haben vermutlich eine vorgehängte Fassade aus Naturstein. Eine Beschattung dieser Fassaden wäre sehr aufwendig und wird durch den komplexen Unterbau des Platzes zusätzlich erschwert. Auf Grund der komplexen Städtebaulichen Struktur eignet sich die Hauptwache weniger gut für bestimmte Konstruktionen die der Verschattung und dienen werden.

Abbildung 55  
Schadowplatz Düsseldorf



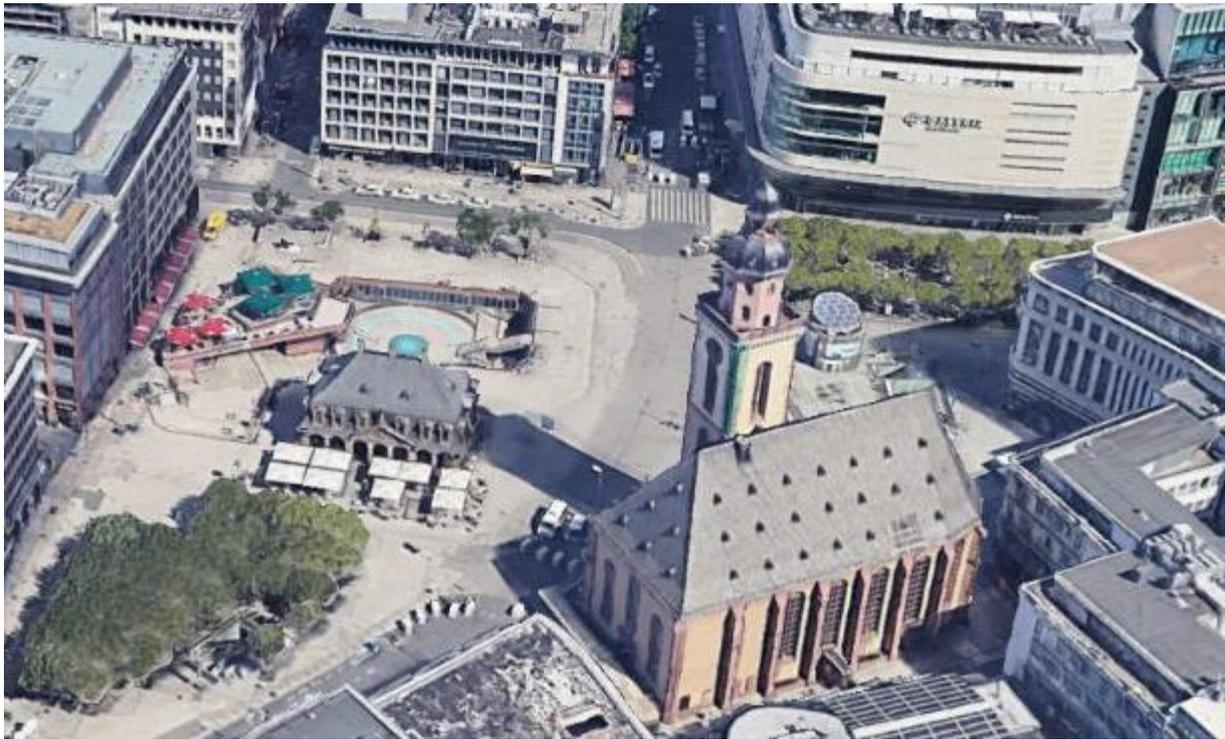
Quelle: Google Earth

Abbildung 56  
Hauptwache Frankfurt am Main



Quelle: Projektarbeit von David Richard Messerschmidt

Abbildung 57  
Hauptwache Frankfurt am Main



Quelle: Google Earth

#### 4.1.12 Methodenbeschreibung Ergebniss

Um den Punkt 5.1 bearbeiten zu können ist es notwendig aus den bisher gewonnenen Erkenntnissen eine Methodenbeschreibung zu formulieren.

Dahingehend wird detailliert beschrieben welche Schritte, Verfahren und Techniken angewandt wurden, um die ausgewählte Örtlichkeit für die digitale Case Study zu gewährleisten.

Die bisherigen Kenntnisse setzen sich wie folgt zusammen:

- Prüfung der Hitzeinselregionen innerhalb Europäischer Grenzen
- Prüfung der Vergleichswerte
- Definition des Typus des Stadtraumes
- Bewertung der räumliche Charakteristika
- Kriterienanalyse auf Grundlage der Bewertungsmatrix inklusive der Versiegelungsanteile
- Prüfung aller städtebaulichen und architektonischen Randbedingungen
- Festlegung des Ortes innerhalb einer Großstadt
- Prüfung der konstruktiven Randbedingungen
- Prüfung der klimatischen Randbedingungen

Eine klare und prägnante Methodenbeschreibung ist von großer Bedeutung, um anderen Forschern auf kleinem Maßstab die stadträumlichen, gesellschaftlich-sozialen und klimatischen Mehrwerte verständlich zu beschreiben. Nur so können diese weiter behandelt und die Ergebnisse bewertet werden. Es ist auch wichtig,

potenzielle Einschränkungen und mögliche Fehlerquellen zu erkennen, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Forschungsprojektes zu verdeutlichen.

## 4.2 Konstruktive Umsetzung

### 4.2.1 Grundtypen der Fassaden

#### Fachwerkhäuser und Mauerwerksfassaden

Um den Radius etwas einzugrenzen und um detaillierter beschreiben zu können um welche Grundtypen der Fassaden es sich handelt, muss auch geprüft werden in welcher Art und Weise Gebäudetypen eine Rolle spielen. Hier geht es um die Häufigkeit der Konstruktionsart im Hochbau, so dass es eine Generalisierung möglich macht bestimmte Dachsysteme zu entwickeln, die der Häufigkeit nach einzusetzen sind. Das Institut Wohnen und Umwelt führt die Datenlage an und bestätigt, dass einschalige Mauerwerke und zweischalige Mauerwerke die häufigsten Wandtypen im Wohngebäudebestand sind

Abbildung 58  
Wandtypen im Wohngebäudebestand nach Regionen, Baualterklassen und Gebäudetyp

	Deutschland	Nord	Süd	Ost
einschaliges Mauerwerk	61,3% +/- 1,4%	32,4% +/- 2,5%	85,1% +/- 1,3%	63,4% +/- 2,5%
zweischaliges Mauerwerk	29,9% +/- 1,4%	61,2% +/- 2,7%	6,5% +/- 1,1%	21,5% +/- 2,1%
Fachwerk	3,1% +/- 0,3%	2,4% +/- 0,5%	2,9% +/- 0,5%	4,9% +/- 1,1%
Holz-Fertigteile, sonstiger Holzbau	3,7% +/- 0,3%	3,3% +/- 0,5%	4,3% +/- 0,5%	3,2% +/- 0,6%
Betonfertigteile, Großtafelbau, Plattenbau	1,9% +/- 0,3%	0,7% +/- 0,2%	1,0% +/- 0,2%	6,7% +/- 1,6%
Sonstiges	0,1% +/- 0,1%	0,1% +/- 0,0%	0,1% +/- 0,1%	0,2% +/- 0,2%

	Altbau bis 1978	BJ 1979 - 2004	Neubau ab 2005
einschaliges Mauerwerk	63,8% +/- 1,5%	56,0% +/- 2,1%	57,5% +/- 4,2%
zweischaliges Mauerwerk	28,7% +/- 1,5%	32,8% +/- 2,0%	27,8% +/- 3,8%
Fachwerk	4,4% +/- 0,5%	0,4% +/- 0,1%	0,6% +/- 0,6%
Holz-Fertigteile, sonstiger Holzbau	1,5% +/- 0,2%	7,5% +/- 0,7%	13,0% +/- 3,1%
Betonfertigteile, Großtafelbau, Plattenbau	1,5% +/- 0,3%	3,1% +/- 0,8%	0,8% +/- 0,4%
Sonstiges	0,1% +/- 0,0%	0,2% +/- 0,1%	0,2% +/- 0,2%

	alle EZFH	alle MFH	EZFH, Altbau	MFH, Altbau
einschaliges Mauerwerk	60,7% +/- 1,5%	64,0% +/- 2,2%	63,0% +/- 1,6%	67,0% +/- 2,6%
zweischaliges Mauerwerk	30,7% +/- 1,6%	25,7% +/- 2,2%	29,8% +/- 1,6%	24,5% +/- 2,6%
Fachwerk	3,3% +/- 0,4%	2,1% +/- 0,6%	4,8% +/- 0,5%	2,6% +/- 0,7%
Holz-Fertigteile, sonstiger Holzbau	4,4% +/- 0,4%	0,5% +/- 0,2%	1,9% +/- 0,3%	0,2% +/- 0,2%
Betonfertigteile, Großtafelbau, Plattenbau	0,7% +/- 0,2%	7,7% +/- 1,6%	0,4% +/- 0,1%	5,7% +/- 1,2%
Sonstiges	0,1% +/- 0,1%	0,0% +/- 0,0%	0,1% +/- 0,1%	0,0% +/- 0,0%

Quelle: Institut Wohnen und Umwelt, Tobias Loga u.a., S 21 [Datenbasis 2010]

### 4.2.2 Bewertung des Brandschutzes bei Membrandächern

Verschiedene Aspekte des Brandschutzes für Membrandächer sind notwendig und zu prüfen:

- Typische Membranmaterialien weisen die Feuerwiderstandsklasse B1 auf. Bei direkter Beflammung verpufft das Material ohne brennend abzutropfen. Dies ist ein großer Vorteil in Bezug auf die Entrauchung den Brandüberschlag. Membrandächer ermöglichen also einen schnellen Rauchabzug im Brandfall, dadurch kann auch die Sichtbarkeit in einem Gebäude verbessert werden und der Fluchtweg für Personen über die Fassade ermöglicht werden.
- Verhinderung von Brandüberschlag, denn Membrandächer verhindern die Ausbreitung von Bränden auf benachbarte Gebäude oder Bauteile, da sie nur unter direkter Feuereinwirkung brennen. Im Brandfall selber verpufft das Material sehr schnell und stellt so keine signifikante Brandlast dar.
- Es stehen auch silikonbeschichtete Membrane mit Feuerwiderstandsklasse A1 zur Verfügung, welche als Brandwände genutzt werden können.

- Schweißnähte des Membrandaches lösen sich ab 200°C. Bei dieser Temperatur können sich die Schweißnähte der Membran ablösen, dementsprechend würden sich die Dachflächen sofort unter einem Brandherd öffnen.
- Schnelle Entweichung von Brandgasen und Rauch bei Membrandächern ermöglichen eine effiziente Entweichung von Brandgasen und Rauch, was die Sicherheit der Personen im und um die Gebäude erhöht.
- Gewährleistung von schnellem Rauchabzug durch die Konstruktion und Materialien der Membrandächer.
- Konstruktionsabhängigkeiten, da meistens offene Konstruktionen. Die Brandsicherheit von Membrandächern hängt von der spezifischen Konstruktion ab, aber in der Regel handelt es sich um offene Konstruktionen, die einen schnelleren Rauchabzug ermöglichen.
- Membrandächer u.a. aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe (s. Tabelle 7) verhalten sich im Brandfall günstig und weisen ein Brandverhalten nach DIN 4102 (B1) schwer entflammbar auf.

Die Berücksichtigung dieser Brandschutzaspekte ist wichtig, um die Sicherheit von Personen und Gebäuden zu gewährleisten, insbesondere bei Gebäuden mit Membrandächern. Es ist ratsam, Fachleute für Brandschutz und Bauingenieure in die Planung und Gestaltung von Membrandächern einzubeziehen, um den bestmöglichen Brandschutz zu gewährleisten.

Hier sind einige der gängigen Eigenschaften typischer Membranmaterialien, einschließlich ihres Brandverhaltens nach DIN 4102:

- Membranwerkstoffe weisen unterschiedliche Transluzentgrade (von 0%-60% auf) und können so natürliches Licht durchlassen, was eine angenehme und helle Innenraumgestaltung ermöglicht.
- Textile Membranwerkstoffe sind in der Regel witterungsbeständig und können Sonne, Regen, Schnee und anderen Umwelteinflüssen standhalten.
- Einige Membranwerkstoffe haben eine selbstreinigende Oberfläche, die Schmutz und Ablagerungen bei Regen abwäscht.
- Das Brandverhalten von Membranwerkstoffen kann gemäß der DIN 4102-Norm klassifiziert werden. Die Norm DIN 4102 definiert verschiedene Klassen für das Brandverhalten von Baustoffen, von schwerentflammbar (B1) über normalentflammbar (B2) bis hin zu leichtentflammbar (B3). Membranwerkstoffe, die als B1 eingestuft sind, gelten als schwerentflammbar, was bedeutet, dass sie nur unter direkter Feuereinwirkung brennen und sich danach selbstlöschen.

Qualitativ hochwertige Membranwerkstoffe, die den gängigen Standards entsprechen, sind in der Lage, sowohl ästhetische als auch funktionale Ansprüche zu erfüllen und eine langfristige und sichere Nutzung zu gewährleisten. In Tabelle 7 sind die Eigenschaften bestimmter textiler Membranwerkstoffe aufgelistet.

Tabelle 7  
Eigenschaften gängiger textiler Membranwerkstoffe u.a. Brandverhalten nach DIN 4102

	<b>Polyestergewebe, PVC-beschichtet</b>	<b>Polyestergewebe, THV-beschichtet</b>	<b>Glasfasergewebe, PTFE-beschichtet</b>	<b>Glasfasergewebe, silikonbeschichtet</b>	<b>Glasgittergewebe, PTFE-laminiert</b>	<b>PTFE-Gewebe, beschichtet</b>	<b>PTFE-Gewebe, unbeschichtet</b>
<b>Einsatzgebiet Besonderheiten</b>	vielseitig einsetzbar, sehr preisgünstiges Standardmaterial	hochwertige Oberfläche, sehr hohe Lichttransmission	für permanente Konstruktionen, hochwertiges Standardmaterial	für permanente Konstruktionen, hohe Lichttransmission	für permanente Konstruktionen, hohe Lichttransmission bei hoher Festigkeit	für permanente und mobile Konstruktionen, hohe Lichttransmission	für permanente und mobile Konstruktionen, hohe Lichttransmission, geringe Regendichtigkeit
<b>Fügbarkeit</b>	Hochfrequenz- und Thermoimpulsschweißen	Hochfrequenz- und Thermoimpulsschweißen	Thermoimpulsschweißen mit Zwischenfolie	Vulkanisieren (Kleben) oder Nähen und Kleben (Kombi)	Thermoimpulsschweißen mit Zwischenfolie	Hochfrequenzschweißen	Nähen
<b>Langzeitstabilität</b>	gute UV-Stabilität bei ausreichender Beschichtungsdicke, gute chemische Beständigkeit	k. A.	sehr gute UV-Stabilität, sehr gute chemische Beständigkeit	gute UV Stabilität, gute chemische Beständigkeit	gute UV Stabilität, sehr gute chemische Beständigkeit	sehr gute UV Stabilität, sehr gute chemische Beständigkeit	sehr gute UV Stabilität, sehr gute chemische Beständigkeit
<b>Knickempfindlichkeit</b>	sehr knickbeständig, für wandelbare Systeme geeignet	knickbeständig, für wandelbare Systeme geeignet	hohe Knickempfindlichkeit, für wandelbare Systeme nicht geeignet	geringe Knickempfindlichkeit	hohe Knickempfindlichkeit, für wandelbare Systeme nicht geeignet	sehr knickbeständig, für wandelbare Systeme gut geeignet	sehr knickbeständig, für wandelbare Systeme sehr gut geeignet
<b>Schmutzempfindlichkeit</b>	schmutzanfällig, besser mit Deckschicht, z. B. Fluorlack	gutes Anschmutzverhalten	sehr gutes Anschmutzverhalten, selbstreinigend	schmutzanfällig	selbstreinigend, jedoch Schmutzansammlung wegen rauer Oberfläche möglich	gutes Anschmutzverhalten	gutes Anschmutzverhalten
<b>Lichttransmission</b>	5–15% Anstieg der solaren Absorption durch Vergrauen	15–23%	8–20%	25–30%	43–46%	20–40%	35%
<b>Umweltbelastung</b> (getrennte Betrachtung von Beschichtung und Gewebe, Trennung im Allgemeinen noch schwierig, erste Recyclingkreisläufe sind im Aufbau)	PVC zerfällt unter Bildung von Chlor und Salzsäure, es besteht ein Rücknahme-Netzwerk; Polyester lässt sich einschmelzen oder als Kurzfasern weiterverwenden	THV zersetzt sich bei hohen Temperaturen	Glasfasern lassen sich umweltfreundlich entsorgen, PTFE zerfällt nicht, Zersetzung bei hohen Temperaturen unter Entstehung von Fluor	Glasfasern lassen sich umweltfreundlich entsorgen, Silikon ist recycelbar	Glasfaser lässt sich umweltfreundlich entsorgen, PTFE zerfällt nicht, Zersetzung bei hohen Temperaturen unter Entstehung von Fluor	sortenrein, PTFE zerfällt nicht, Zersetzung bei hohen Temperaturen unter Entstehung von Fluor	sortenrein, PTFE zerfällt nicht, Zersetzung bei hohen Temperaturen unter Entstehung von Fluor
<b>Brandverhalten (Brandklassen nach DIN 4102)</b>	B1	B1	A2 (bis Typ II) B1 (ab Typ III)	B1	B1	B1 S1–d0 (EN 13501)	B1 S1–d0 (EN 13501)
<b>Standardfarben</b>	Standard weiß, weitere Farben	Standard weiß	Standard weiß, begrenzte Farbauswahl	Standard weiß, silber, weitere Farben	farblos	Standard weiß	teilweise gefärbte Garne
<b>Flächengewicht<sup>1</sup> nach DIN 55352 [g/m<sup>2</sup>]</b>	Typ I: 750 Typ II: 900 Typ III: 1100 Typ IV: 1300 Typ V: 1450	Typ I: 1150 Typ II: 1200	Typ I: 800 Typ II: 900 Typ III: 1200 Typ IV: 1500	Typ 0: 200 Typ I: 340 Typ III: 685 Typ IV: 1100	1050	1080	320 530
<b>Zugfestigkeit<sup>1</sup> Kett/Schuss nach DIN 53354 [N/50 mm]</b>	Typ I: 3000/3000 Typ II: 4200/4000 Typ III: 5800/5400 Typ IV: 7500/6500 Typ V: 10000/9000	Typ I: 3500/3000 Typ II: 5000/4500	Typ I: 3500/3500 Typ II: 5000/4500 Typ III: 7000/6000 Typ IV: 8000/7000	Typ 0: 2500/1750 Typ I: 3000/3000 Typ III: 5000/5000 Typ IV: 8000/8000	4500/4000	4000/4000	2000/2050 4000/3700
<b>Weiterreißfestigkeit<sup>1</sup> Kett/Schuss nach DIN 53363 [N]</b>	Typ I: 300/300 Typ II: 500/500 Typ III: 850/800 Typ IV: 1200/1200 Typ V: 1800/1800	Typ I: 700/700 Typ II: 600/600	Typ I: 300/300 Typ II: 350/350 Typ III: 500/500 Typ IV: 500/500	Typ 0: 350/400 Typ II: 300/300 Typ III: 400/400 Typ IV: 500/500	250/250	798/752	365/330 669/550
<b>Lebensdauer</b>	15–20	k. A.	> 25	> 20	> 25	> 25	> 30
<b>Rohmaterialkosten<sup>2</sup></b>	15–45%	60–140%	50–150%	110–180%	100–180%	100–140%	120–170%
<b>beispielhafte Abbildungen</b>	Abb. D 1.1, S. 134, Abb. D 1.14– D 1.17, S. 141, Abb. E 4.50, S. 210		Beispiele 17–22, S. 262–281	Abb. D 1.21, S. 142		Abb. D 1.32 und D1.33, S. 147, Beispiel 23, S. 282ff.	Abb. D 1.37, S. 149, Abb. E 4.1, S. 196, Abb. E 4.51, S. 210

<sup>1</sup> Durchschnittswerte <sup>2</sup> im Vergleich zum Durchschnittspreis von Glas-PTFE (100%)

C 5.6

Quelle: Atlas Kunststoffe und Membranen (Knippers et al., 2010)

#### 4.2.3 Anforderung an die Entwässerung bei Membrandächern

Die Entwässerung bei Membrandächern ist ein wichtiger Aspekt, der bei der Planung und Gestaltung dieser Dachkonstruktionen berücksichtigt werden muss. Da Membrandächer in der Regel eine geringe Neigung oder

sogar eine flache Form haben, ist eine effiziente Entwässerung notwendig, um das Ansammeln von Wasser auf der Oberfläche zu verhindern und eine optimale Funktionalität und Langlebigkeit des Dachs zu gewährleisten.

Hier sind einige gängige Entwässerungsmethoden, die bei Membrandächern angewendet werden:

- Dachrinnen werden entlang der Kanten des Membrandachs angebracht, um Regenwasser aufzufangen und in Fallrohre zu leiten. Diese Methode eignet sich besonders für Membrandächer, die an den Rändern von Gebäuden installiert sind.
- Bei flachen Membrandächern können Ablaufpunkte strategisch platziert werden, um das Wasser abzuleiten. Ablaufpunkte sind Ablauföffnungen im Dach, die mit Rohren oder Schläuchen verbunden sind, um das Wasser zu entwässern.
- In manchen Fällen kann ein leichtes Gefälle in der Membran verarbeitet werden, um das Wasser in eine bestimmte Richtung abzuleiten. Dadurch kann eine natürliche Entwässerung ermöglicht werden.
- Bei einigen Membrandach-Konstruktionen wird zwischen der äußeren und inneren Membranschicht ein Zwischenraum gelassen, der als Entwässerungskanal fungiert und das Wasser zu den Ablaufpunkten leitet.

Es ist wichtig, dass die Entwässerung bei Membrandächern ordnungsgemäß geplant und ausgeführt wird, um mögliche Wasserschäden oder Wassersackbildung zu vermeiden. Regelmäßige Inspektionen und Wartung sind ebenfalls erforderlich, um sicherzustellen, dass die Entwässerungssysteme ordnungsgemäß funktionieren und das Wasser effizient abgeleitet wird. Die Wahl der geeigneten Entwässerungsmethode hängt von den baulichen Gegebenheiten, der Dachneigung und den örtlichen Gegebenheiten ab. Ein professioneller Architekt oder Bauingenieur kann bei der Planung und Umsetzung einer optimalen Entwässerungslösung für ein Membrandach behilflich sein.

#### 4.2.4 Anforderungen an das Bauen im Bestand in Bezug auf den Brandschutz

In Bezug auf die veränderten Brandschutzkonzepte bei Anschluss eines Membrandaches an einen Bestandsbau sind zwei Aspekte von besonderer Bedeutung:

1. Brandüberschlag: wie unter 5.2.2 beschrieben stellen Membrandächer keine signifikante Brandlast dar. Bei direkter Beflammung verpufft das Material sehr schnell. Soll der Brandüberschlag durch nicht brennbare Materialien verhindert werden, können spezielle Membranmaterialien mit Silikonbeschichtungen und einer Feuerwiderstandsklasse A1 genutzt werden. Diese sind jedoch in der Regel nicht für wandelbare Dächer geeignet.
2. Anleitern und Entfluchtung über die Fassade: direkt an Gebäude anschließende Membrandächer können das Anleitern und/oder die Entfluchtung über die Fassade verhindern. Dies ist im Vorfeld mit der Feuerwehr zu klären, um ggf. notwendige Kompensationsmaßnahmen zu planen. In einigen Fällen war es auch schon möglich Konzepte mit der Feuerwehr zu entwickeln bei der die Membran im Notfall weggeschnitten wird. Solche Sondervereinbarungen sind aber nur in direkten Absprachen mit den lokalen Behörden und der Feuerwehr möglich.

#### 4.2.5 Entwicklung von Grundtypen für selbststabilisierende und wandelbare Tragwerkskonstruktionen

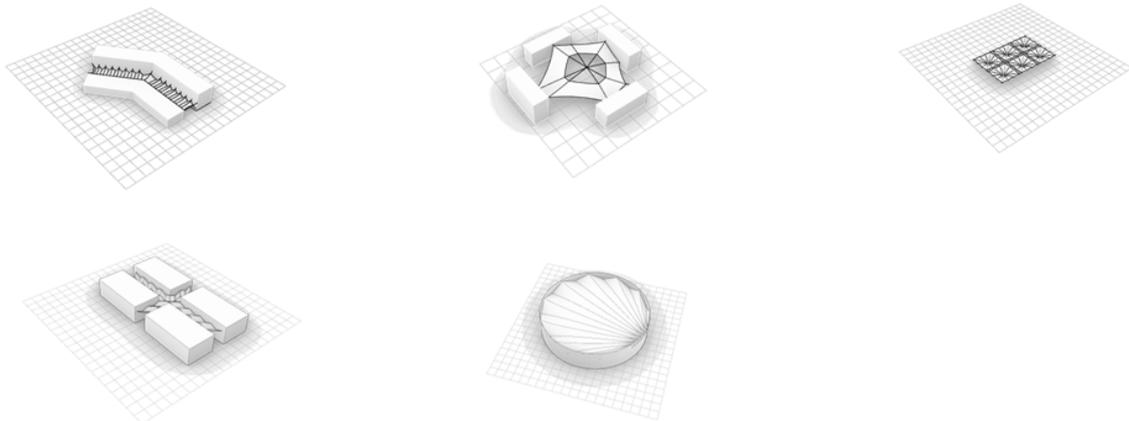
Die Entwicklung von selbststabilisierenden und wandelbaren Tragwerkskonstruktionen bezieht sich auf innovative Ansätze im Bauwesen, bei denen die Strukturen in der Lage sind, sich selbst zu stabilisieren und ihre Form oder Eigenschaften je nach Bedarf zu verändern.

Die Entwicklung von solchen innovativen Tragwerkskonstruktionen eröffnet Potenziale für energieeffizientes Bauen, ressourcenschonende Architektur und flexibles Design. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass diese

Konzepte oft anspruchsvoll in der Umsetzung sind und intensive Forschung und Entwicklung erfordern, um sowohl die technischen als auch wirtschaftlichen Herausforderungen zu bewältigen.

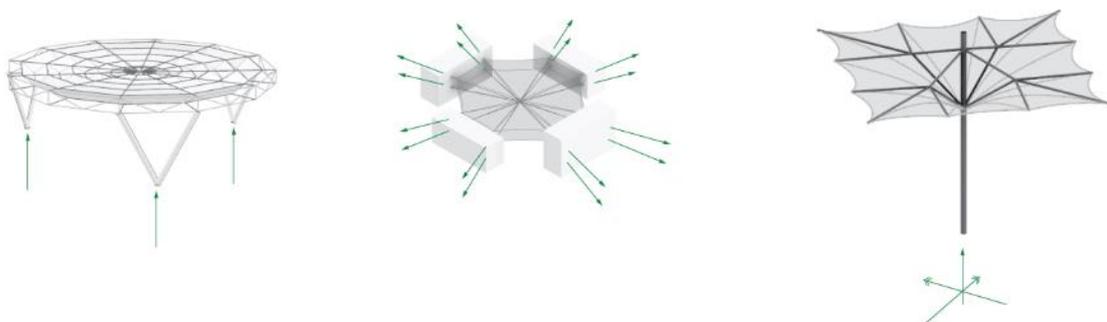
Für wandelbare Membranstrukturen werden drei Typologien hinsichtlich ihres relativen Erfolgs gegenüber den anderen betrachtet. Dies sind parallel bündelnde Segel, zentral bündelnde Segel und Schirme. In Abbildung 59 sind einige dieser Membrankonstruktionen beispielhaft dargestellt.

Abbildung 59  
Typologien verschiedener Membrandachkonstruktion in Abhängigkeit zu Bautypologie



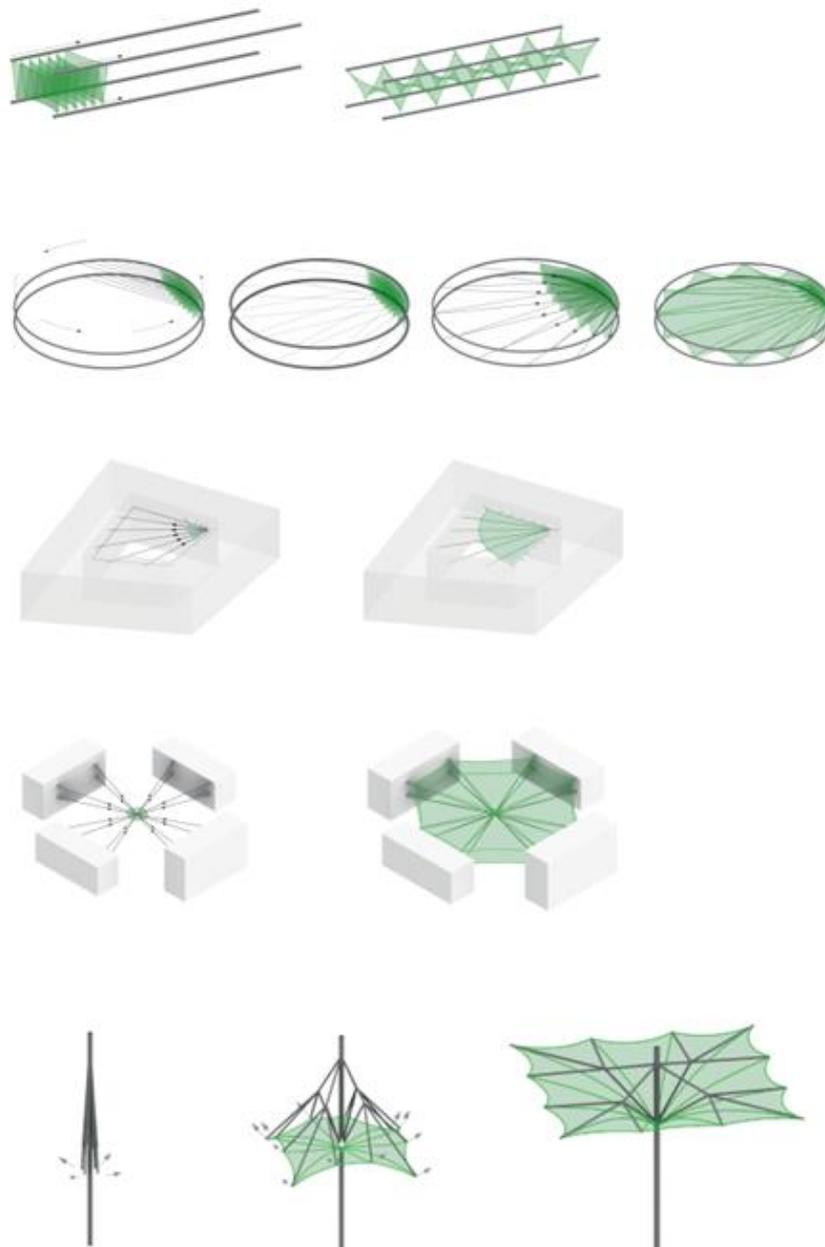
(eigene Darstellung)

Abbildung 60  
Verankerung Kategorisierung



(eigene Darstellung)

Abbildung 61  
Mechanismen der Flächenwandlung



(eigene Darstellung)

#### 4.2.6 Verankerung in Fassaden/Befestigungstechnik

Als der Ausbau der Straßenbahnen in Angriff genommen wurde, musste eine weitreichende Auseinandersetzung mit dem Problem der Verankerung von Zugelementen an privaten Fassaden geregelt werden. Hierfür wurde im Personenbeförderungsgesetz eine spezielle Regelung verabschiedet. Die sogenannten Oberleitungsrosetten konnten damit an allen notwendigen Verankerungspunkten im Straßenraum angebracht werden, ohne für jeden Punkt individuelle Genehmigungen der Hauseigentümer einholen zu müssen. Diese Rosetten wurden auch als Hausrosetten, Wandrosetten oder Wandanker

bezeichnet. Es empfiehlt sich also, das Personenbeförderungsgesetz bei der Frage von Verankerungen in Fassaden entweder direkt anzuwenden oder zumindest darauf zu verweisen.

Im Bauprozess erweisen sich Rosetten zwar als eine wirtschaftlichere Option im Vergleich zu Masten, die Übertragbaren lasten sind aber im Vergleich zu den Auflagerkräften typischer Membrandächer zu gering, sodass zusätzliche Ankerpunkte notwendig werden. Funktional betrachtet setzt sich eine solche Rosette aus einer Grundplatte zusammen, die üblicherweise mithilfe von randnahen Rundlöchern an der Gebäudewand befestigt wird. Darüber hinaus gibt es zwei eingegossene Lagerböcke, die einen senkrechten Bolzen aufnehmen. Dieser Bolzen trägt normalerweise eine drehbare Trommel mit mehreren radialen Bohrungen, in die die Gabeln zur Aufnahme der Abspannseile eingeschraubt werden. Der Bolzen wird oben durch einen Kopf gesichert und unten durch einen Splint fixiert. In einigen Fällen, besonders in Hamburg, wurden anstelle der Trommeln auch drehbare Metallzungen verwendet.

Durch die Verwendung von vier Schrauben ergibt sich gegenüber den geometrisch notwendigen mindestens drei Schrauben eine gewisse Redundanz. Diese schützt vor Brüchen von Schrauben oder der Platte und sorgt für eine größere Mindesthebelwirkung auf die Anpressfläche. Modernerweise werden Abspannungsverankerungen jedoch in der Regel servicefreundlicher gestaltet. Dabei kommen zwei eng beieinanderliegende Ringschrauben aus rostfreiem Stahl zum Einsatz, die über eine kurze Aufgabelung der Abspannung verbunden werden. Dies erfolgt mittels dreier Verbindungen durch Schäkel.

Für die Verankerungstechnik besteht derzeit lediglich die Norm DIN EN 1992-4, die ausschließlich für Befestigungen in Beton gilt. Da sie erst im ersten Halbjahr 2020 eingeführt wurde, muss ihre Wirksamkeit noch nachgewiesen werden. Aktuell wird gemäß den relevanten Vorschriften, nämlich ETAG 020 und ETAG 029, sowie den europäisch-technischen Bewertungen und den dazugehörigen EAD-Grundlagen, geplant, dimensioniert und eingebaut.

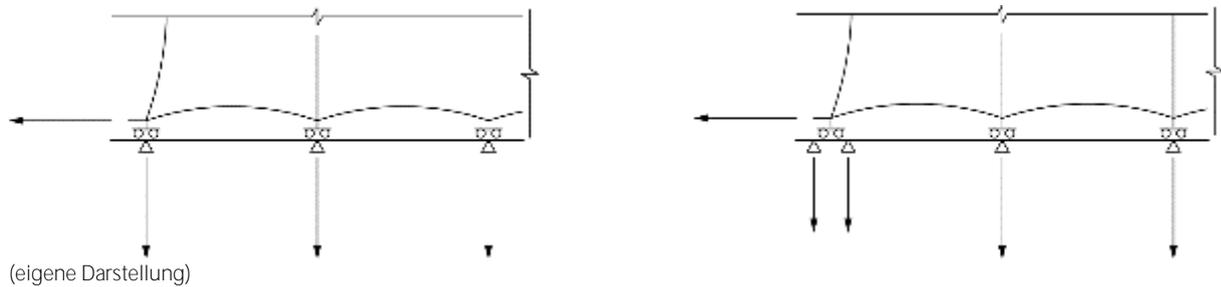
Die neue Norm EN 1992-4 wird nach ihrer bauaufsichtlichen Einführung den Anhang C der ETAG 001 ablösen. Vieles in der Praxis des Bauwesens ist in den Bewertungen oder Zulassungen nicht abgedeckt. Dennoch gibt es Möglichkeiten, außerhalb der Zulassung Befestigungen durchzuführen. Dies betrifft sowohl Verankerungen in unterschiedlich festem Untergrund als auch diverse Arten von Mauerwerk. Brandschutzanforderungen für die Verankerungselemente lassen sich in der Regel problemlos erfüllen, insbesondere, wenn sie in Beton eingebaut werden sollen. Auch Verankerungen im Mauerwerk können brandschutztechnisch konform ausgeführt werden.

In der Verankerungstechnik lassen sich Lösungen finden, die über die Zulassungen und Richtlinien hinausgehen, jedoch stets in Absprache mit den zuständigen Behörden erfolgen sollten. Dennoch ist es ratsam, von vornherein alle Aspekte zu berücksichtigen. Oft genügt schon eine kleine Änderung im Planungsprozess, um eine den Zulassungen entsprechende Befestigung zu realisieren (Johnson, 2020).

Die großen Verankerungskräfte wanderbarer Dächer entstehen im vorgespannten Zustand unter Windlasten. Dabei dominieren in der Regel die horizontalen Kräfte, welche besonders schwer im Bestand zu verankern sind. Hier wird es also vielfach notwendig die Auflager auf die Höhe der Geschossdecken zu legen, um so die Horizontallasten in die Tiefe der Decken verankern zu können.

Parallelgeraffte Dächer an Schienen nehmen dabei eine besondere Rolle ein. Der Schienenträger selber ist in der Lage die Kräfte zu verteilen. Besonders günstig ist es wenn die Auflager des Schienenträgers dort liegen, wo auch membraneckpunkte im aufgespannten Zustand zu liegen kommen (siehe Abbildung 62).

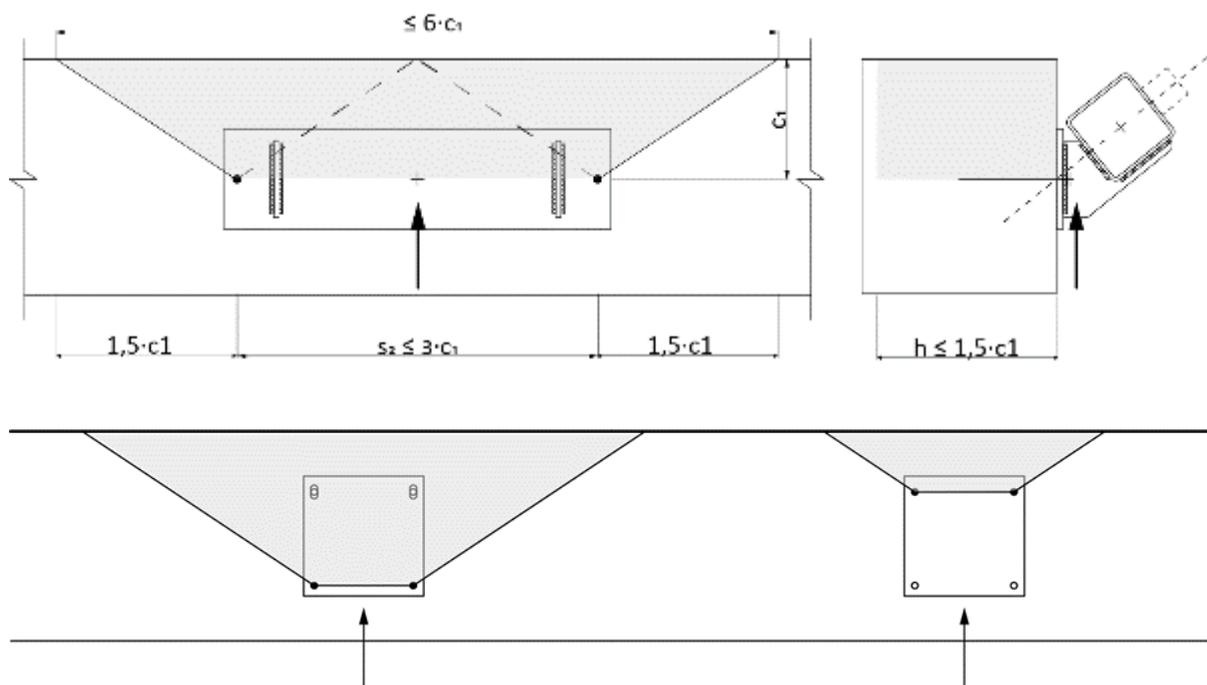
Abbildung 62  
Verankerung Konzept Skizzen



Die kritischsten Versagensarten bei Quer- und Zugbeanspruchung sind das Versagen der Betonkanten (Betonkantenbruch) bzw. der kegelförmige Betonausbruch.

Für die Versagensart Kantenversagen unter Querkraft werden senkrecht zur Kante ausgerichtete Langlöcher in der Ankerreihe empfohlen, die der Kante am nächsten liegt, sodass ein größerer Betonkörper aktiviert wird. Wenn eine einzelne Ankerreihe verwendet wird, kann der Abstand so gewählt werden, dass ein größerer Teil des Betons aktiviert wird.

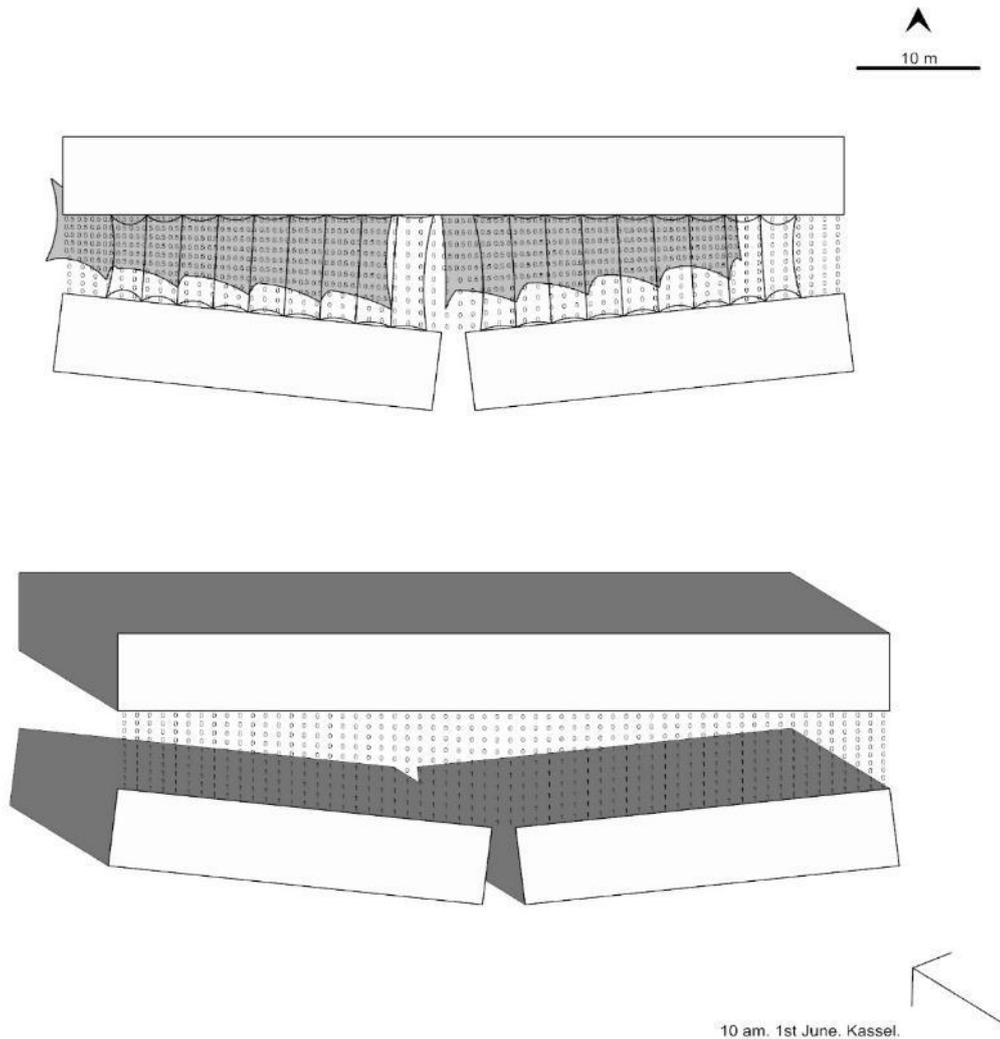
Abbildung 63  
Prinzipien der Kantenversagen unter Querkraft



Für die Versagensart kegelförmiger Betonausbruch unter Zuglast sind ebenfalls ein angemessener Abstand und eine ausreichende Verankerungstiefe von entscheidender Bedeutung.

Geometrisch sollte der Ankerpunkt so bemessen sein, dass die Gesamtreaktionskraft (eines maßgebenden Lastfalls) an den Ankern durch den geometrischen Mittelpunkt der Ankergruppe geleitet wird, um zusätzliche Kräfte aus Biegung zu minimieren.

## 4.2.7 Mehrkriterien-Optimierung von Tragwerk und Klimaparametern

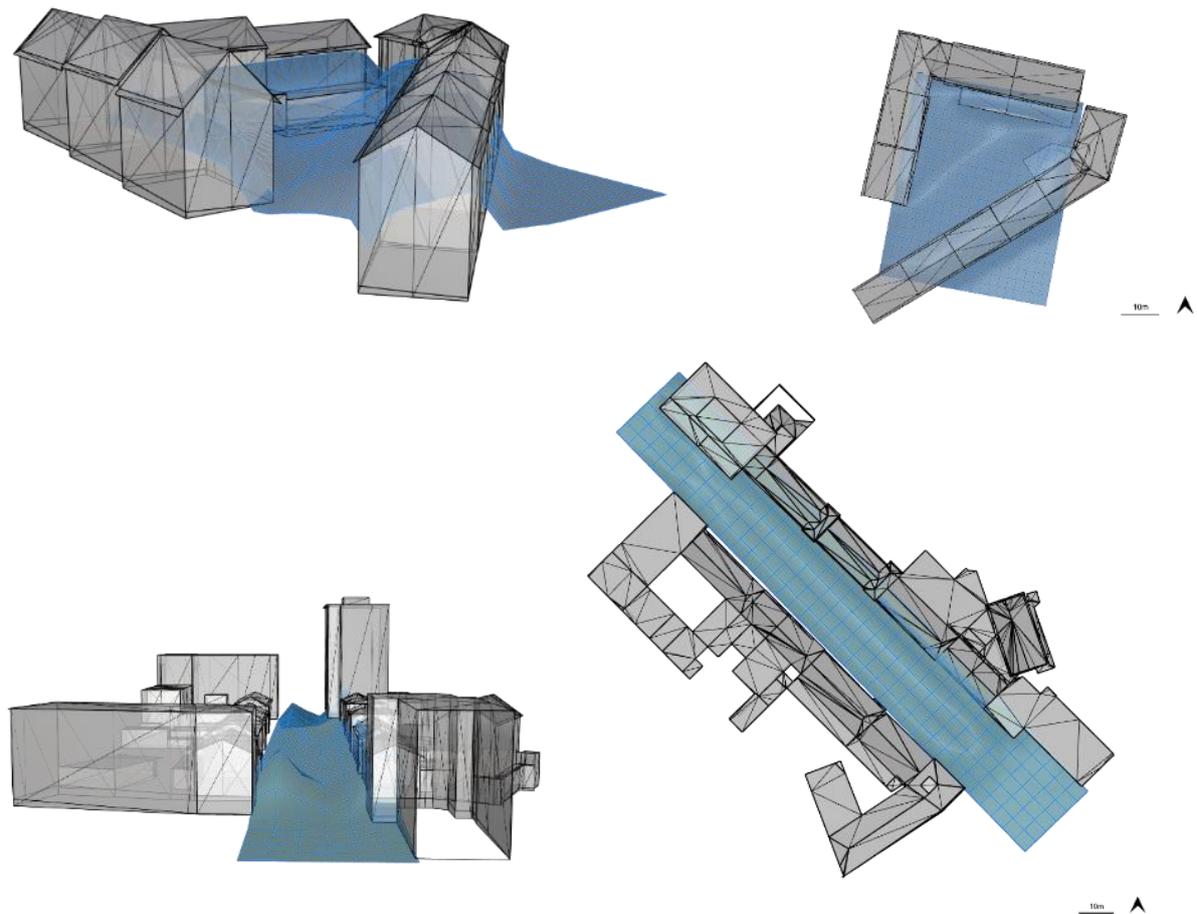
Abbildung 64  
Abzählkriterien der Schattierung

(eigene Darstellung)

In Abbildung 64 wird die Verschattungsoptimierung an einer fiktiven Gassensituation optimiert. Hier wird zwischen dem Schattenwurf der umliegenden Gebäude und dem des Membrandachs unterschieden. Bei einem bestimmten Sonneneinstrahlungsvektor wird die Straßenschlucht, wenn sie vom Gebäude beschattet wird, als Schatten von 1,0 betrachtet; wenn sie von der Membran beschattet wird, wird sie als Schatten mit einem Wert von weniger als 1,0 betrachtet, abhängig von der Durchlässigkeit des Membranmaterials. Im Fall von unbeschichtetem PTFE-Gewebe liegt dieser Wert bei etwa 0,5.

Die Zählung der schattierten Ereignisse (jede ausgewählte Stunde zählt ein Ereignis) kann für das gesamte Jahr durchgeführt und mit den folgenden Diagrammen visualisiert werden. Je höher die Masche, desto mehr beschattete Ereignisse wurden gemessen. Daraus ergibt sich die Vorgabe, ein Verschattungsdach zu entwerfen, dass der Umkehrform des Netzes folgt.

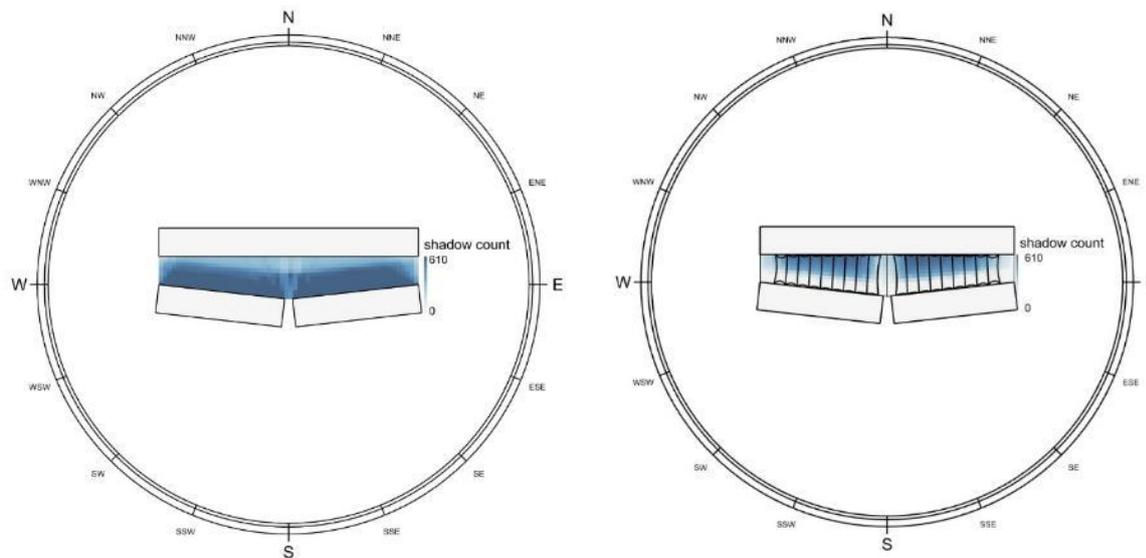
Abbildung 65  
Akkumulationen der Schattierung von ausgewählte HOYs (hour-of-year)



(eigene Darstellung)

Unter Berücksichtigung einer nicht verschatteten Schlucht wird die oben beschriebene Schattenanalyse durchgeführt. Die Beschattung durch ein wandelbares Dach kann entsprechend bewertet werden. Der Bereich, der in heißen Sommerstunden nicht von den umliegenden Gebäuden verschattet wird, ist bei der Konstruktion eines Membrandachs am kritischsten.

Abbildung 66  
Schattenwurf durch Gebäude (links) und Membrandach (rechts)



(eigene Darstellung)

#### 4.2.8 Tragwerkstypologien und Form-findung

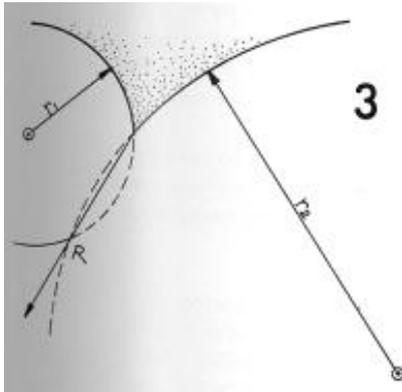
##### ■ Formfindungsmethoden für einfache Optimierungen

Ein Membrantragwerk als komplexes 3-dimensionales System mit nichtlinearem Tragverhalten lässt sich durch aufwändige Computersimulation nur schlecht in eine Mehrkriterienoptimierung integrieren, welches Tragwerk, räumliche Wirkung und Klima gleichermaßen betrachtet. Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollen Fragen der Auflagerkraftminimierung und Verschattungsmaximierung gemeinsam betrachtet werden. Daher war es notwendig, ein vereinfachtes analytisches Verfahren zur Bestimmung der Auflagerkräfte in einem Membrantragwerk zu entwickeln, welches sich auch auf komplexe 3-dimensionale Formen anwenden lässt. Die Analyse der Membranstruktur mittels grafischer Statik ist ein nützlicher Ansatz zur Bestimmung der Form-Kraftzusammenhänge. Auf der Grundlage reziproker Diagramme in 2D wird im Folgenden eine Methode entwickelt, welche sich direkt in eine Mehrkriterienoptimierung implementieren lässt.

##### ■ Randseil und das Verankerungskraft Polygon

Die 2D-Projektion einer Membranfläche lässt sich vereinfacht als eine Fläche darstellen, deren Ränder eine Reihe von Bögen mit verschiedenen Radien sind. Bei einer Membranvorspannung von  $p$  trägt das Randseil mit dem Radius  $r$  eine Kraft  $S = p \cdot r$ . Nach der Darstellung (siehe Abbildung 67) von Frei Otto kann die Verankerungskraft am Anker als Vektorsumme der Seilkräfte  $p \cdot r_1$  und  $p \cdot r_2$  durch zwei Schnittpunkte der gedachten Kreise des Randseilpaares bestimmt werden (Otto et al., 1971).

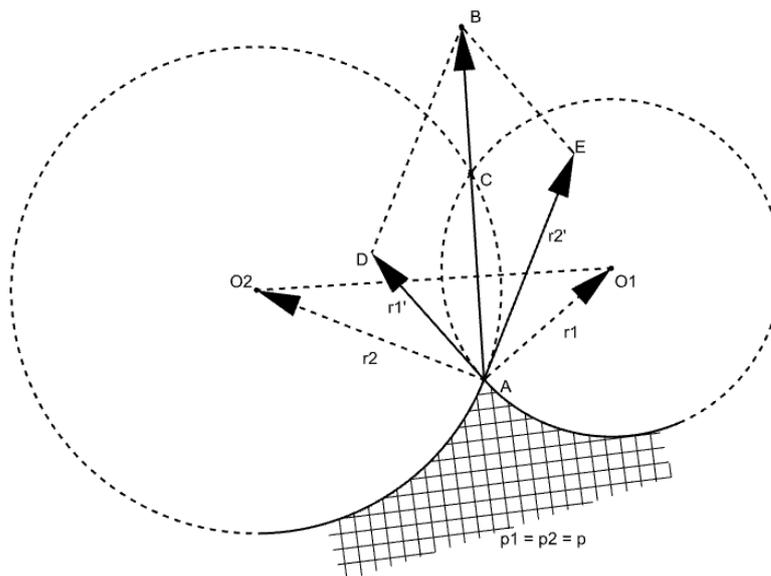
Abbildung 67  
Skizze zur Krafrichtung des Randseils (Otto et al., 1971)



Im Folgenden wird ein Beweis für diesen Zusammenhang gegeben und weiterentwickelt, um die Amplitude dieser Verankerungskraft grafisch zu bestimmen, was in der Illustration in der oberen Abbildung noch nicht gegeben ist.

Gegeben ist die 2D-Projektion einer Membranfläche mit ihrer Vorspannung  $p$  in beiden Richtungen. Die Randseile sind durch Kreise  $O_1$  und  $O_2$  mit den Radien  $r_1$  bzw.  $r_2$  definiert, wobei die Vorspannung gleich eins ist. Die nicht einheitliche Vorspannung wird im folgenden Abschnitt behandelt.

Abbildung 68  
Nachweis der Größe der Verankerungskraft



(eigene Darstellung)

Es gilt zu beweisen, dass die Summe von  $r_1'$  und  $r_2'$  in Richtung  $\overrightarrow{AB}$  liegt, wie in Abb. 18 angedeutet, und außerdem ist ihre Amplitude der Abstand der Mittelpunkte der Kreise  $|\overrightarrow{O_1O_2}|$ .

Dies kann durch den Nachweis der Kongruenz von  $\triangle AO_1O_2$  und  $\triangle DBA$  wie folgt geschehen:

Gegeben:

$$\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{r_1'} + \overrightarrow{r_2'}$$

$$\vec{r}_1 \cdot \vec{r}'_1 = 0$$

$$\vec{r}_2 \cdot \vec{r}'_2 = 0$$

Es ergibt sich die folgende Gleichwertigkeitsbeziehung:

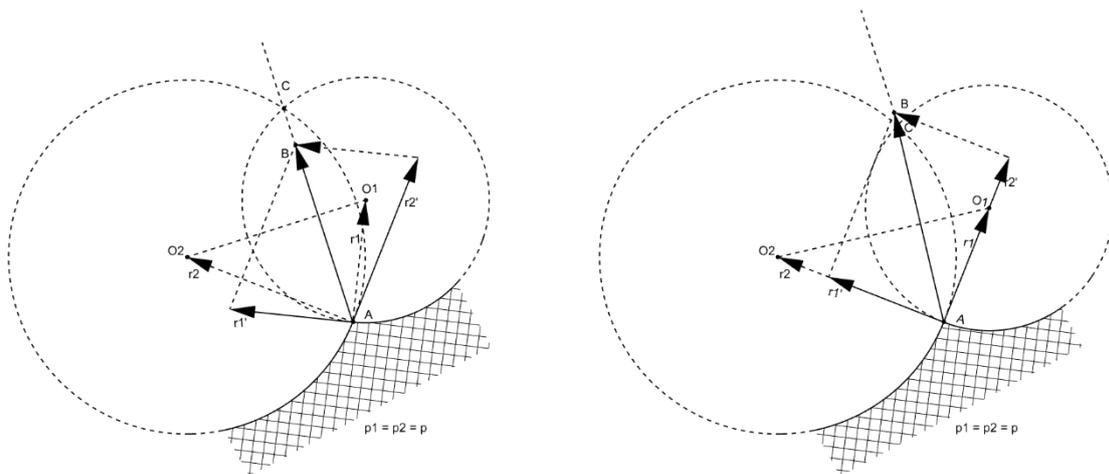
$$\angle DAB = \frac{\pi}{2} - \angle BAO_1 = \angle O_2O_1A$$

$$\angle DBA = \angle BAE = \frac{\pi}{2} - \angle O_2AB = \angle O_1O_2A$$

Somit sind  $\triangle AO_1O_2$  und  $\triangle DBA$  kongruent, so dass wir die Gleichwertigkeit von  $\overline{O_1O_2}$  und  $\overline{AB}$  haben.

Die obige Beziehung ist unabhängig vom Winkel der Ankerkräfte, wie unten dargestellt, wobei der stumpfe Winkel links und der orthogonale Winkel rechts ist.

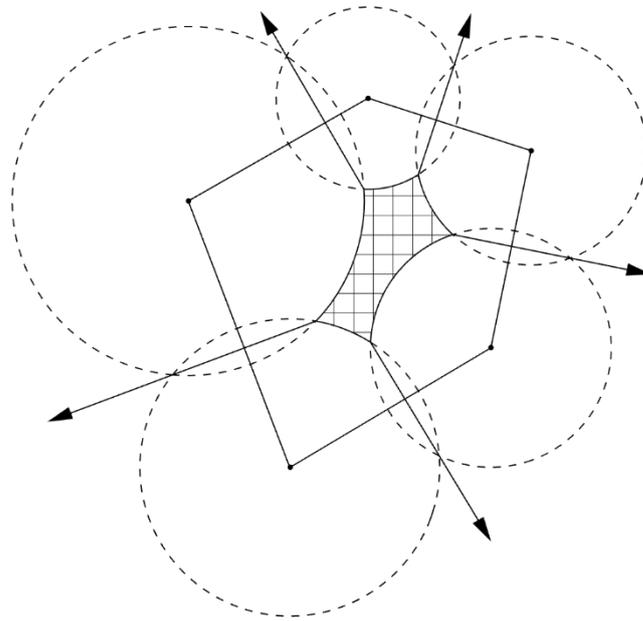
Abbildung 69  
Andere Kraftwinkel der Randseile



(eigene Darstellung)

Das bedeutet, dass der Verankerungskraftvektor  $\overline{AB}$  richtungsmäßig durch die beiden Schnittpunkte A und C und in seiner Größe durch den Abstand der beiden Mittelpunkte  $O_1$  und  $O_2$ , bestimmt werden kann. Auf diese Weise kann ein Verankerungskraftpolygon durch einfaches Verbinden der Mittelpunkte einer beliebigen Reihe von Kreisen eingeführt werden, was die 2D-Form eines Zugmembranfeldes ergibt. Hier hat jedes benachbarte Paar von zwei Kreisen zwei gemeinsame Schnittpunkte.

Abbildung 70  
Membranfleck, gebildet aus einer Reihe von Bögen

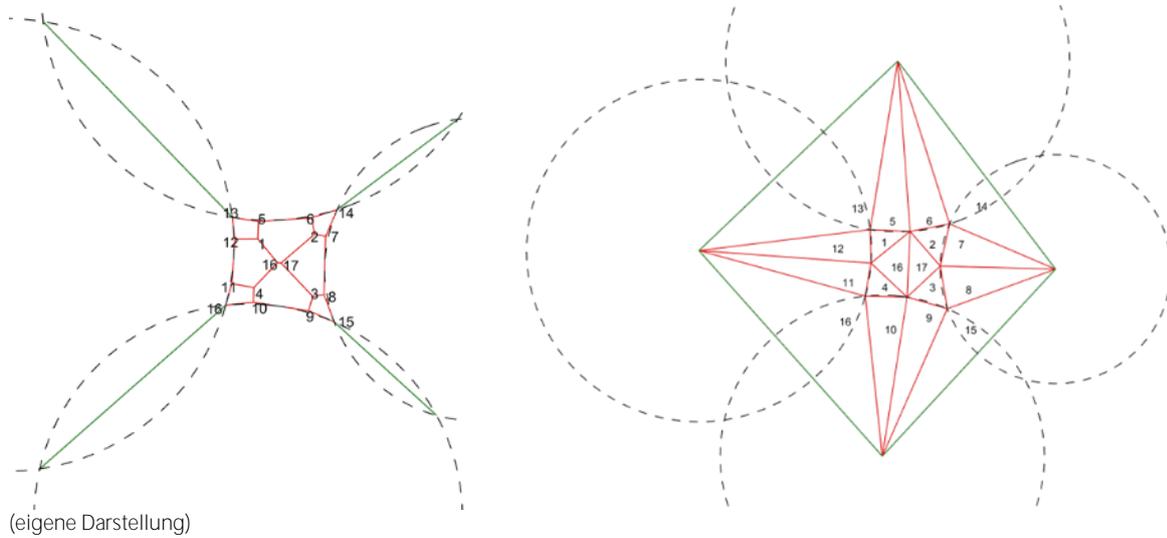


(eigene Darstellung)

#### ■ 2d-Reziprokes Diagramm

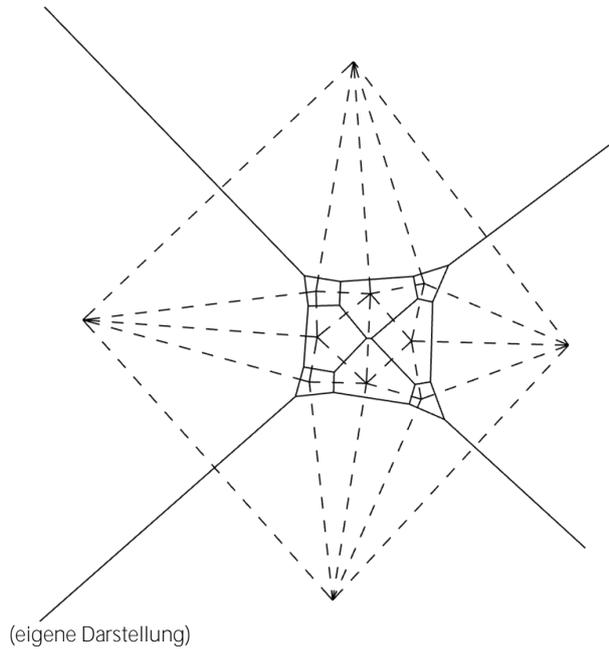
Zwei Figuren sind reziprok, wenn die Eigenschaften der ersten Figur in Bezug auf die zweite dieselben sind wie die der zweiten Figur in Bezug auf die erste (Maxwell, 1864). Die jahrhundertealte Idee des reziproken Diagramms ist immer noch relevant für das Verständnis des Gleichgewichts von Raumstrukturen, wie z. B. von funikulären Schalenstrukturen. In der vorliegenden Untersuchung wird die Umsetzung dieser Idee in Membranstrukturen untersucht. Das reziproke Diagramm mit seinen typischen Merkmalen wie Randseil, Hochpunkt/Schleife, Grat/Kehl-Seil in Membranstrukturen wurde untersucht.

Abbildung 71  
2D-Reziprokaldiagramm eines 4-Punkt Segels



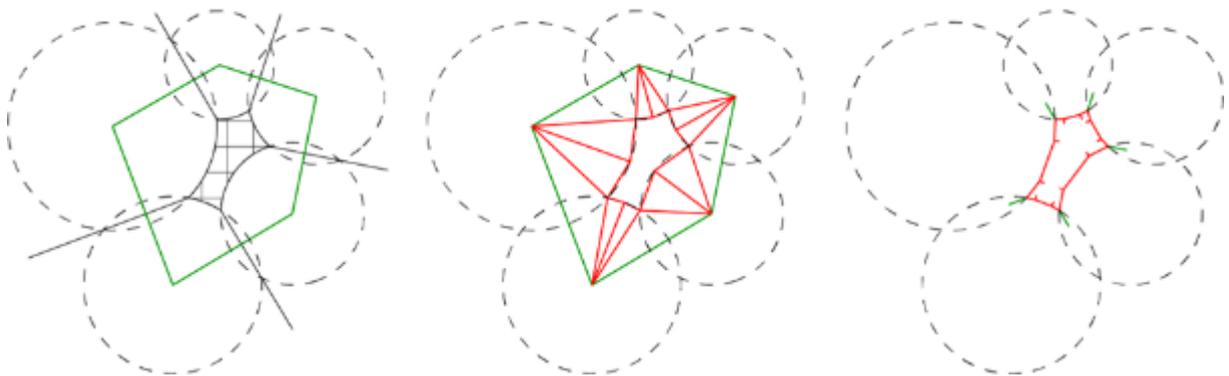
Die reziproke Beziehung ist deutlich zu erkennen: In ebenen Figuren können entsprechende Linien entweder parallel, senkrecht oder unter einem konstanten Winkel verlaufen. Linien, die sich in einem Punkt der einen Figur treffen, bilden in der anderen Figur ein geschlossenes Polygon (Maxwell, 1864).

Abbildung 72  
Senkrechtkonstruktion der Form- und Kraftdiagramm



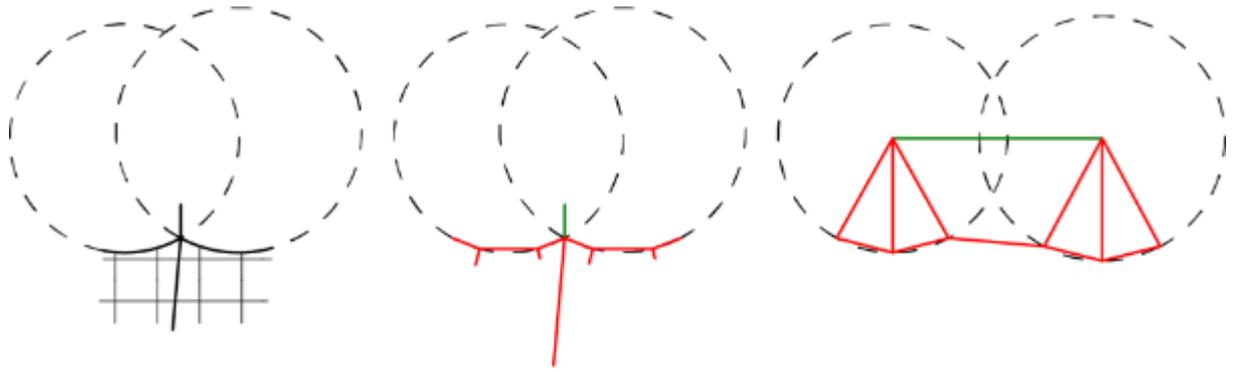
Für typische Membranen Bauteile sowie Randseile, Grat-/Kehlseile und die Membrane selbst kann ein solches Form- und Kraftdiagramm in 2D erstellt werden, aus dem die Kraftdichte bestimmt werden kann. Die Kraftdichte-Methode kann dann für die Formfindung in 3D verwendet werden. Die einzige Eingabe, die benötigt wird, sind die Positionen der Ankerpunkte, genauer gesagt ihre Höhen.

- Randseil



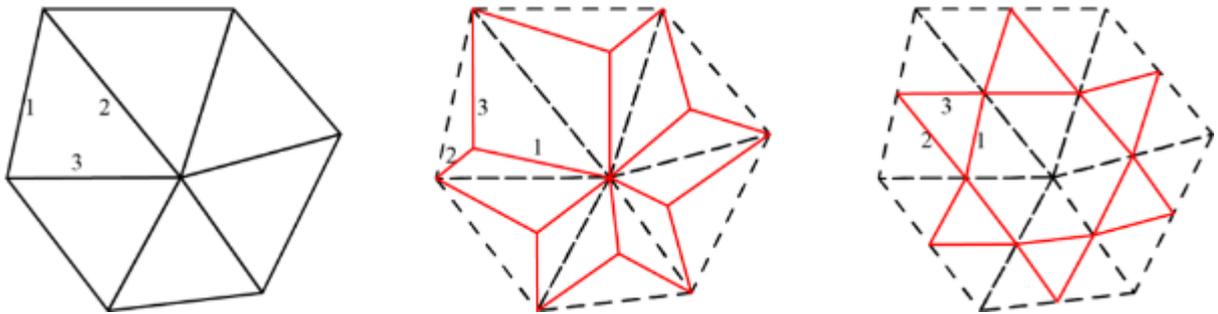
(eigene Darstellung)

- Gratseile / Kehlseil



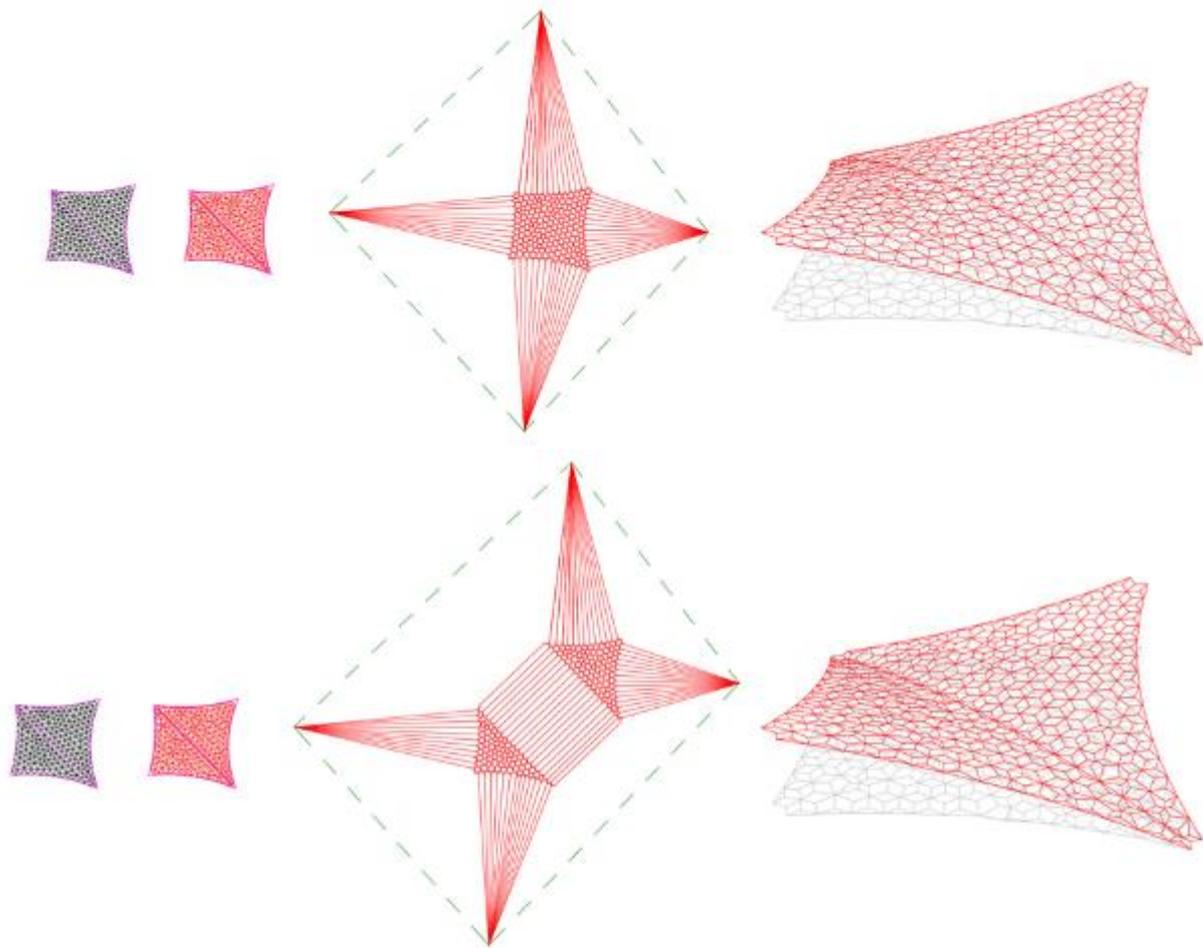
(eigene Darstellung)

#### ■ Membrane



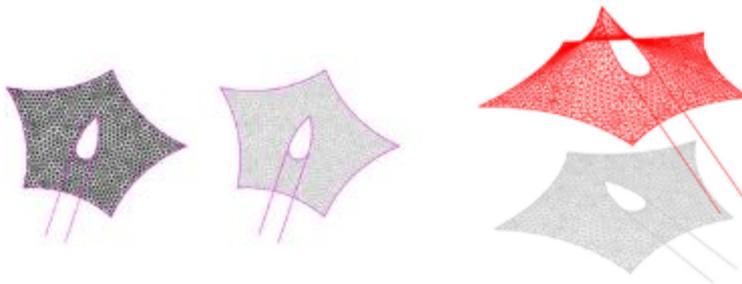
(eigene Darstellung)

#### ■ Vierecke Membrane mit Gratseil



(eigene Darstellung)

#### ■ Hochpunkte

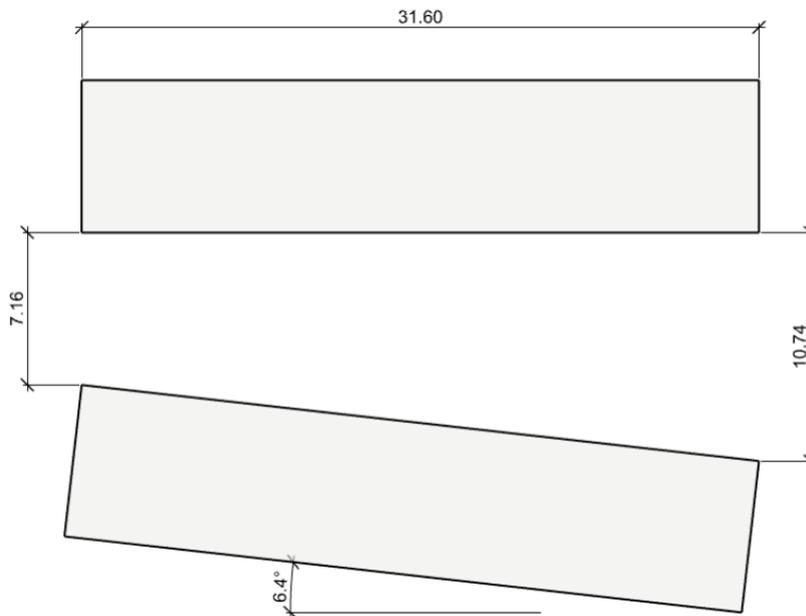


(eigene Darstellung)

#### ■ Anwendungen Beispiel: nicht parallele Straßen

Mit den gezeigten Beispielen wird deutlich, dass die im vorliegenden Forschungsvorhaben entwickelte Methode auf komplexe Membranformen übertragbar ist. In der folgenden Fallstudie für ein wandelbares Membrandach im Kontext einer nicht parallelen Straßenschlucht soll die Methode in einem realen Entwurfskontext angewendet werden.

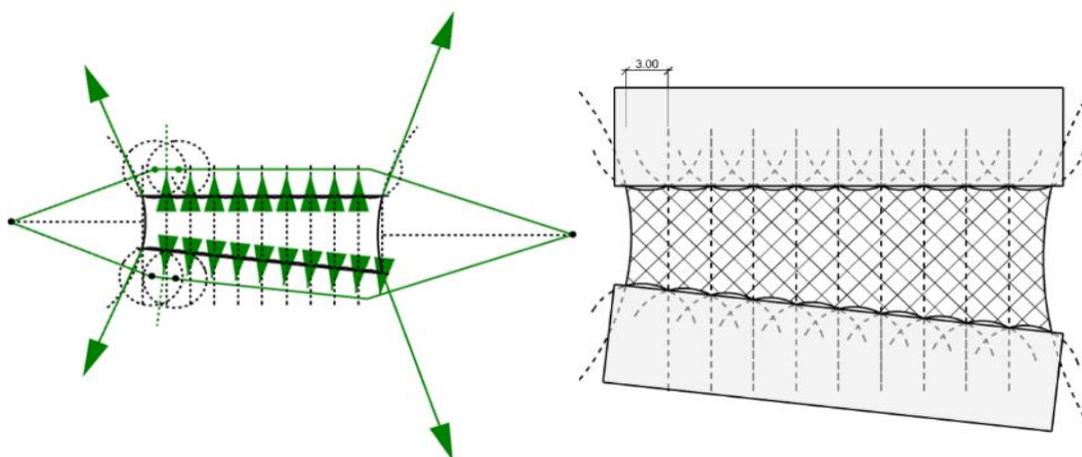
Abbildung 73  
Betrachtete nicht parallele Straße Bedingungen



(eigene Darstellung)

In dem Fall, dass die Grat- und Kehllinien fehlen, ist das Verankerungskraftpolygon einfach wie das folgende. Grafisch wird ein 2D-Gleichgewicht bestimmt. Durch die direkte Kontrolle der Verankerungskraftrichtungen der Gleitanker ist es mit dieser Methode einfach, sicherzustellen, dass sie rechtwinklig zu ihrer Laufschiene sind. Aufgrund der Tatsache, dass die gegenüberliegenden Ankerpunkte in Längsrichtung die gleiche Spannweite haben, ist das Verhältnis der Kräfte und damit die Verankerung bei gleichem Steigungswinkel des Randseilpaares ihrer Kräfte und damit der Verankerungskräfte der Kosinus des Winkelversatzes der nicht parallelen Grenzen. Mit anderen Worten: Sie sind identisch.

Abbildung 74  
Verankerungskraftpolygon für Bemessung ohne Gratseile / Kehlseile

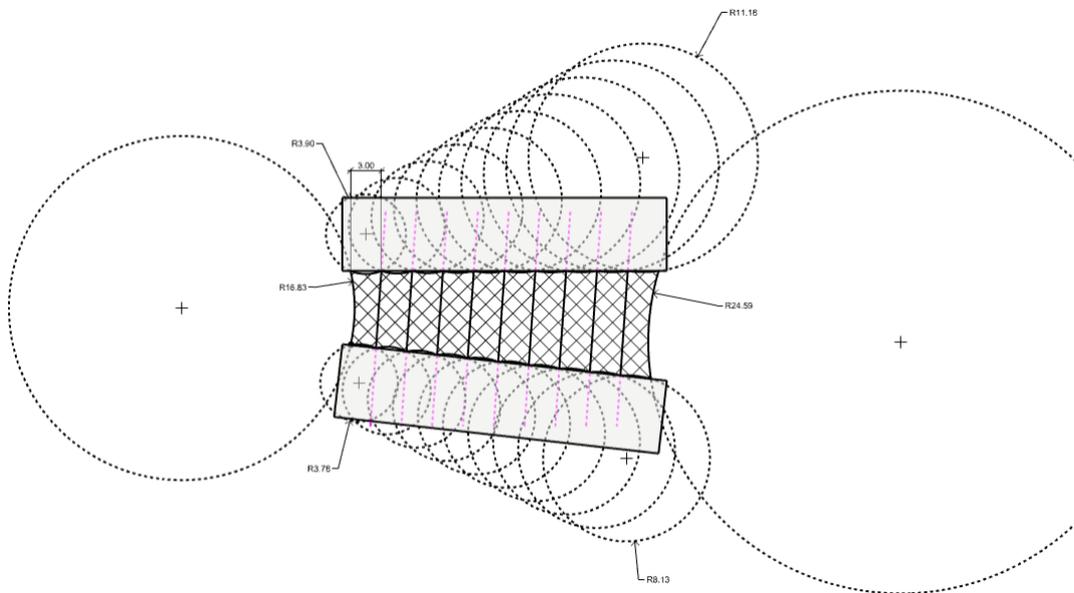


(eigene Darstellung)

In den meisten Fällen ist jedoch das Vorhandensein von Grat- und Kehlseilen von wesentlicher Bedeutung. Es ist entscheidend, sie zu berücksichtigen und gleichzeitig die Kontrolle über die Verankerungskräfte zu behalten, in diesem Fall insbesondere über deren Richtungen. Dies kann erreicht werden, indem die

Gesamtverankerungskräfte in zwei Teile zerlegt werden, einen für die gesamte Anzahl der Randseilpaare, die anderen für die restlichen Grat- / Kehlseile. Die folgende Darstellung ist eine mögliche Zerlegung an einem Anker, gefolgt von der resultierenden Geometrie.

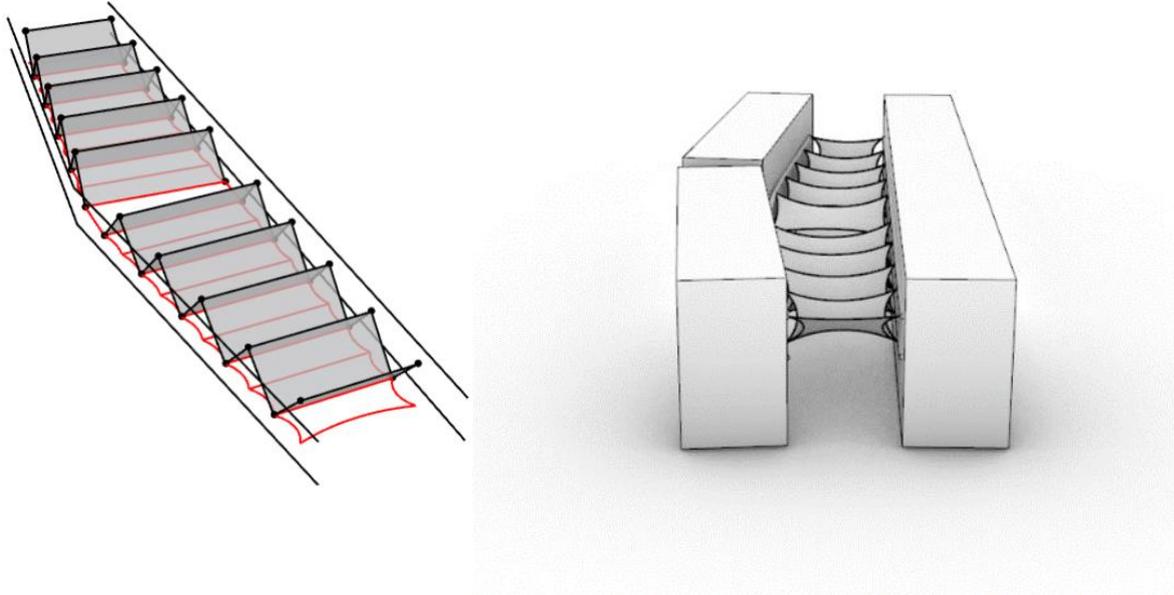
Abbildung 75  
Resultierende Geometrie der Zerlegung.



(eigene Darstellung)

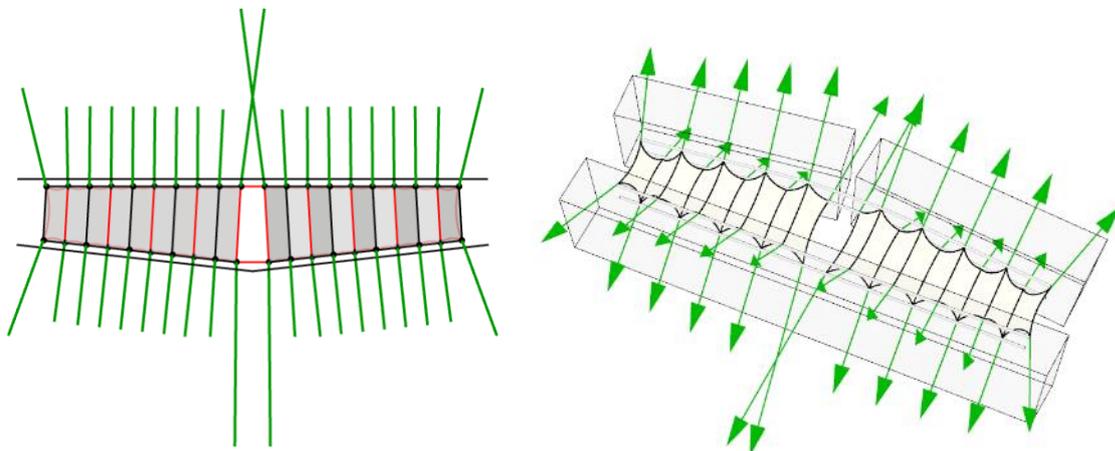
Basierend auf diesen analytisch parametrisierbaren Vorentwicklungen kann ein aufwändigeres 3D Formfindungsmodell mit den notwendigen Randseilkräften für eine optimale Kraftausrichtung informiert werden. Im vorliegenden Fall wird das FE-basierte Programm Kiwi!3D für die nichtlineare Formfindung und Analyse verwendet. In Abbildung 76 sind die Ergebnisse der FE basierten Formfindung zu sehen. In diesem Fall kann die Membran an beiden Enden des sich in der Mitte erweiternden Canyons gerafft werden. Durch Verschieben der beiden Enden zur Mitte, wird ein vorgespannter Gleichgewichtszustand erreicht.

Abbildung 76  
Topologie (links) und Ergebnis der Formfindung mit Kiwi!3D



(eigene Darstellung)

Abbildung 77  
Draufsicht (links) und perspektivische Ansicht (rechts) der Verankerungskräfte

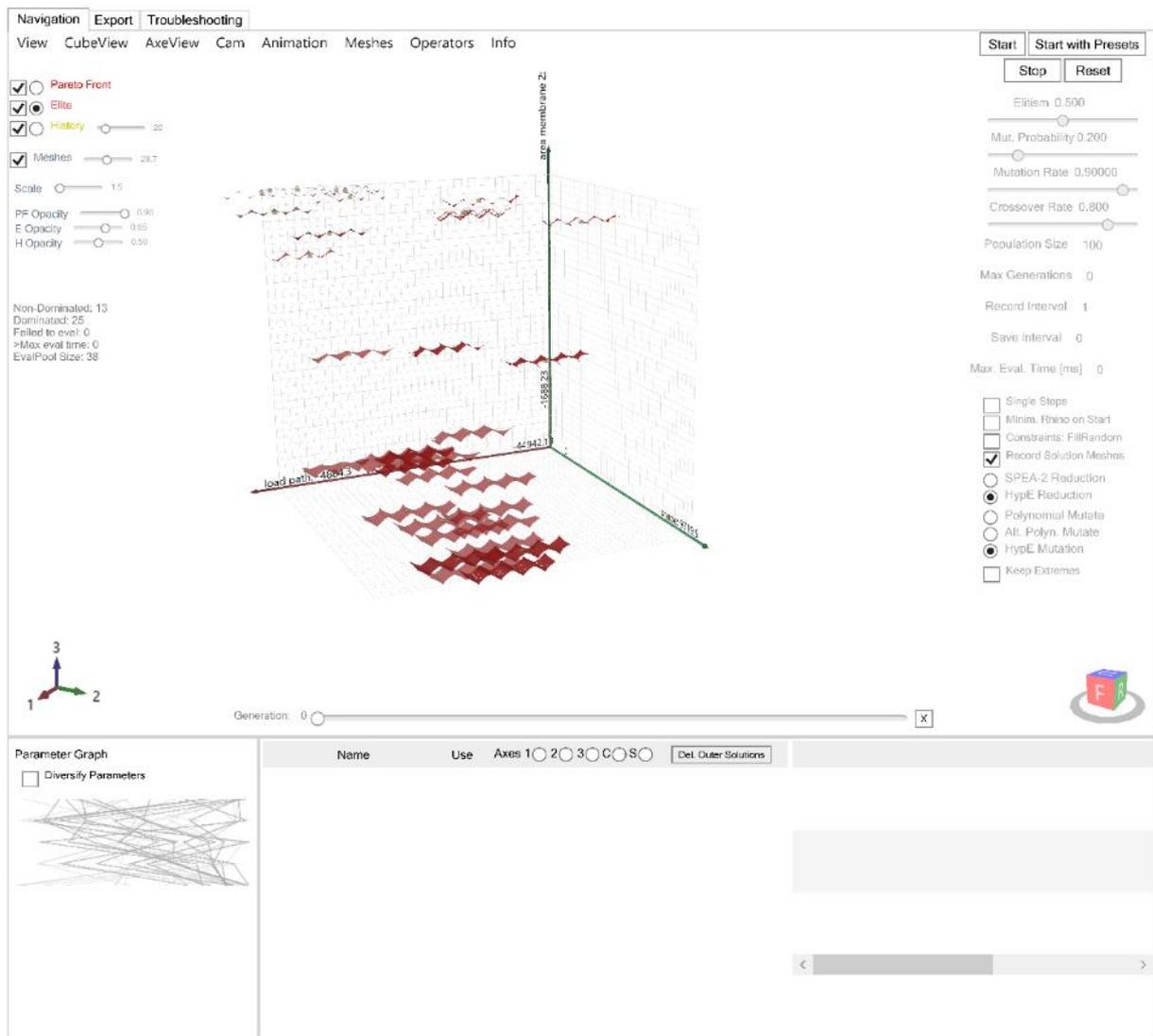


(eigene Darstellung)

#### 4.2.9 Integrierte Entwurfsworkflow

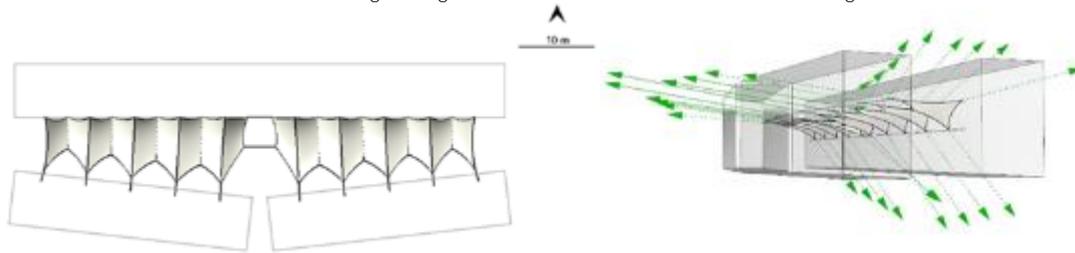
Auf Grundlage der zuvor beschriebenen Methoden und Studien, insbesondere der Formfindungsmethode für das gespannte, wandelbare Membrandach, der Analyse der Verankerungsbedingungen und der Beschattungsanalyse, wurde ein parametrisiertes Modell entwickelt. Mithilfe einer Mehrkriterien-Optimierung wird der Entwurfsraum des Daches untersucht. Die in dieser laufenden Studie berücksichtigten Kriterien umfassen die Minimierung der Verankerungskräfte sowie die Maximierung der benötigten Beschattung durch das Dach, selbst wenn bereits eine gewisse Verschattung an einem bestimmten Standort vorhanden ist.

Abbildung 78  
Mehrkriterien-Optimierung mit Hilfe Octopus (Programm auf Rhino/Grasshopper)



(eigene Darstellung)

Abbildung 79  
Variante zu verstärkten südlichen Öffnungen aufgrund der vorhandenen Gebäudeverschattung



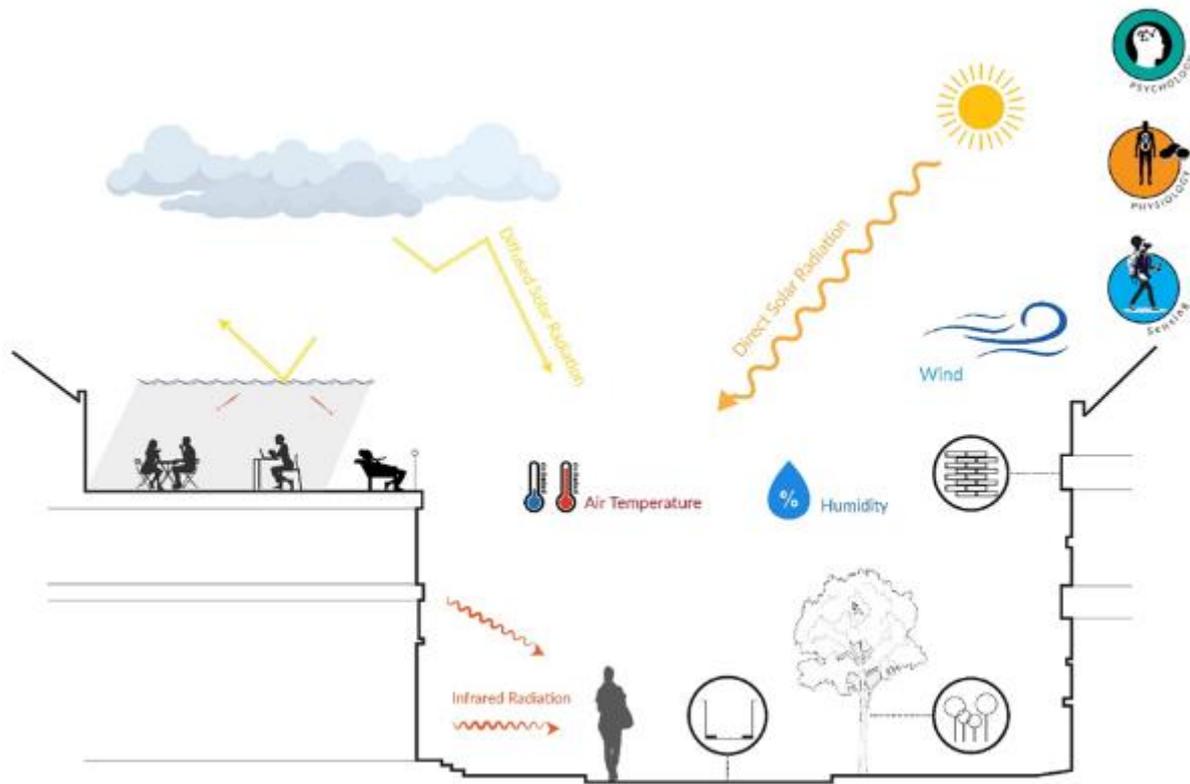
(eigene Darstellung)

## 4.3 Klimasimulation

### 4.3.1 Einflussparameter in Bezug auf Klimasimulation und Langzeitmessungen

Die Parameter, die zur Bewertung der von einer Person auf dem Gehweg wahrgenommenen Temperaturen beitragen, sind ziemlich komplex und erfordern Informationen über Windströmungen, Sonneneinstrahlung, Temperatur- und Feuchtigkeitsprofile zwischen den Gebäuden, einschließlich Vegetationsflächen und Gewässern (Abbildung 80). In dieser Hinsicht können Messungen zwar sehr genaue Daten liefern, sind aber ziemlich teuer und zeitaufwändig und können uns nur über bestimmte thermische Bedingungen informieren, die in einem bestimmten Abschnitt und zu einer bestimmten Zeit herrschen. Im Gegensatz dazu ermöglicht die numerische Modellierung die Bewertung alternativer Stadtgestaltungsszenarien sowie die Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Variabilität der thermischen Komfortbedingungen für Fußgänger im Freien.

Abbildung 80  
Definition und Charakterisierung der Einflussparameter



(eigene Darstellung)

In den letzten Jahrzehnten haben sich mehrere Studien auf den Zusammenhang zwischen Mikroklima und städtischen Siedlungen konzentriert und gezeigt, dass verbesserte thermische Bedingungen im Freien in direktem Zusammenhang damit stehen, wie die Menschen den Außenraum wahrnehmen und nutzen. Die Gestaltung eines Ortes mit optimalem Komfortniveau kann zu einer positiven Stadtentwicklung führen, z. B. zur Förderung des Rad- und Fußgängerverkehrs, um mehr Menschen in die Komfortzonen der Stadt zu locken und diese Gelegenheit in geschäftliche und touristische Attraktionen umzuwandeln, um das Gebiet wirtschaftlich rentabel zu machen (Nikolopoulou, 2001). Komfortable Außenbereiche können mit einer Reihe von Strategien je nach Kontext gestaltet werden, z. B. durch die Anpflanzung von Bäumen, die den Vorteil der Verdunstungskühlung und des Schattierungseffekts bieten, oder durch das Anbringen von künstlichen Vordächern unter Verwendung lokaler Materialien, um nur einige der möglichen Lösungen zu nennen.

Das subjektive menschliche Empfinden, sich thermisch wohl zu fühlen, hängt nach allgemeiner Auffassung von mehreren Faktoren und Parametern ab. Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Strahlung sind die vier grundlegenden physikalischen Umweltparameter, die den Wärmehaushalt des Körpers beeinflussen (Fanger, 1970). Allerdings sind die wahrgenommenen Temperaturgradienten, der schwankende Wind und die räumlich-zeitlichen Veränderungen der Sonnenstrahlung die Hauptunterschiede zwischen thermischen Umgebungen im Freien und in Innenräumen. Gleichzeitig ist das Behaglichkeitsempfinden von Mensch zu Mensch unterschiedlich, aber wenn der Körper physiologisch gesehen ein thermisches Gleichgewicht mit der Umgebung erreicht, dann sollte das Gefühl der Behaglichkeit nahe liegen. Thermische Behaglichkeit ist eine psychologische Interpretation des physiologischen Zustands des Körpers und sollte nicht mit dem Temperaturempfinden verwechselt werden. Insbesondere verhalten sich Temperatur- und

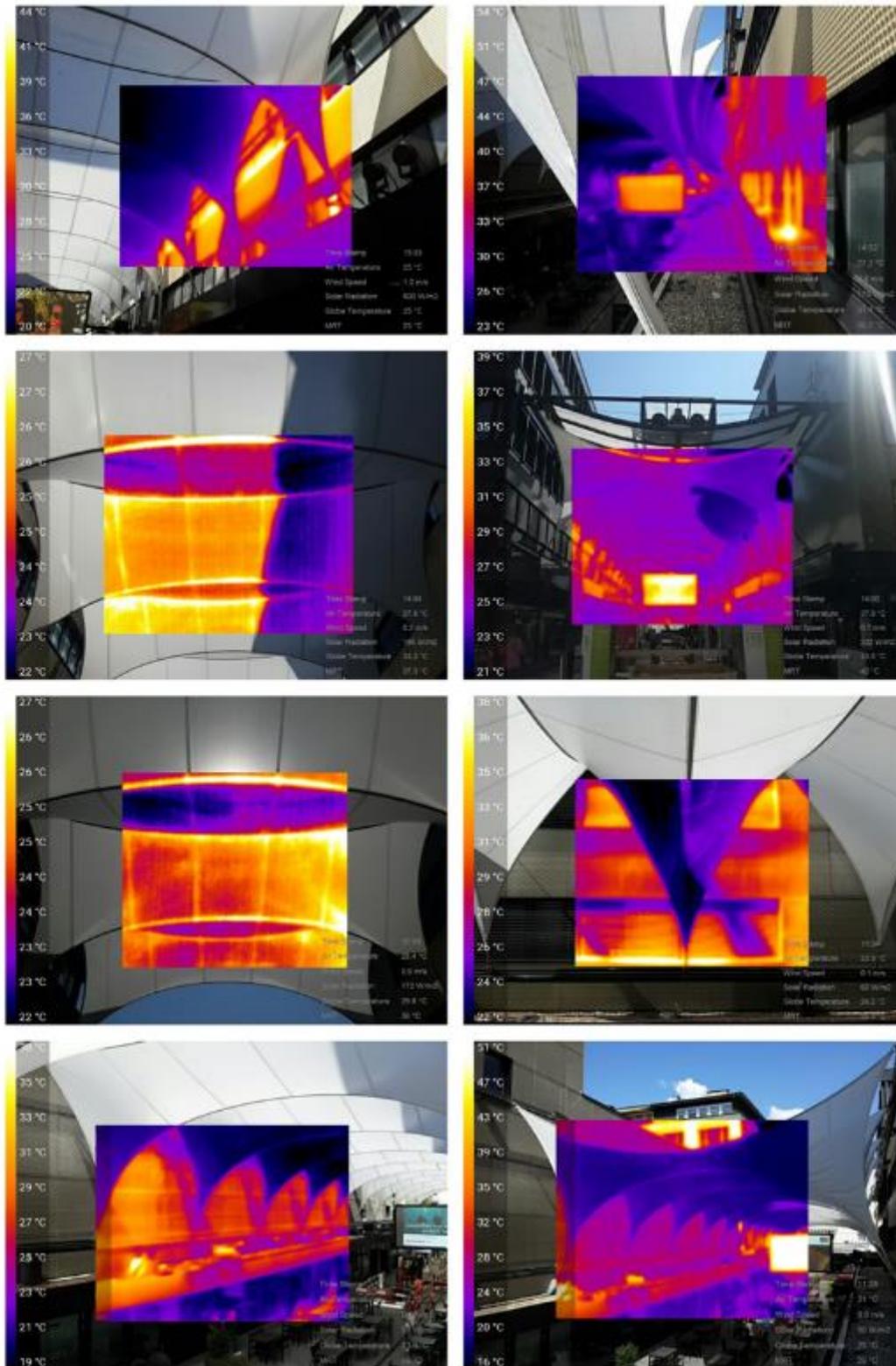
Behaglichkeitsempfindungen bei wechselnden Umgebungen nicht gleich. Das Temperaturempfinden ändert sich schneller als das Behaglichkeitsempfinden, und das Kälteempfinden ändert sich schneller als das Wärmeempfinden.

Die Forschung und die praktischen Bemühungen, die Auswirkungen von Hitze und thermischem Unbehagen numerisch zu quantifizieren, sind ein viel diskutiertes Thema im Innen- und Außenbereich. Ursprünglich wurde das Thema bereits in den 1960er Jahren zur Untersuchung der Auswirkungen von Hitze auf Industriearbeiter verwendet. Es ist auch bekannt, dass hohe Umgebungstemperaturen die Gesundheit beeinträchtigen, und eine längere Exposition gegenüber hohen Temperaturen im Zusammenhang mit sommerlichen Hitzewellen kann zum Tod führen, entweder als Hauptursache oder als mitwirkender Faktor bei Herzkrankheiten, Schlaganfällen und Lungenerkrankungen (Brown, 1935).

#### 4.3.2 Messungen

Um die Rolle der Spielparameter von einziehbaren Dächern bei der Veränderung und Gestaltung des Mikroklimas zu bewerten, haben wir einen bereits bestehenden Fall in Buchs, Schweiz, verwendet. Die Struktur ist seit 2014 in Betrieb und deckt die gesamte Fußgängerzone ab. Am 9. September 2021 führten wir eine eintägige Messkampagne durch, um mit zwei tragbaren Wetterstationen Mikroklimadaten zu sammeln und eine vergleichende Studie für ein schattiges und ein exponiertes Szenario durchzuführen. Wir verwendeten auch eine Infrarot-Wärmebildkamera, um die Oberflächentemperaturen des Daches unter verschiedenen Wetterbedingungen stündlich zu beobachten (Abbildung 81). Eine der wichtigsten Erkenntnisse dieser Studie war die Bedeutung des Materialtyps und der Eigenschaften in Bezug auf Lichtdurchlässigkeit und Reflexion. Dies ist wichtig, da die Oberflächentemperatur der Überdachung direkt in die Strahlungstemperatur des Daches umgerechnet wird, die die gesamte Energiebilanz der unter der Überdachung stehenden oder gehenden Personen bestimmt. Wenn sich beispielsweise das Dach aufheizt, wirkt es wie ein Heizkörper, der die Wärme an die Straßenschlucht abgibt. Im Beispiel von Buchs jedoch bleibt die Membranoberfläche, wie aus den Wärmebildern hervorgeht, fast auf der Temperatur der Luft und reflektiert den größten Teil der Sonne, ohne die Wärme zu absorbieren. Die Materialeigenschaft der Überdachung macht es sehr effektiv, die darunter liegende Luftschicht vom zusätzlichen langwelligen Strahlungsaustausch und der Aufheizung fernzuhalten.

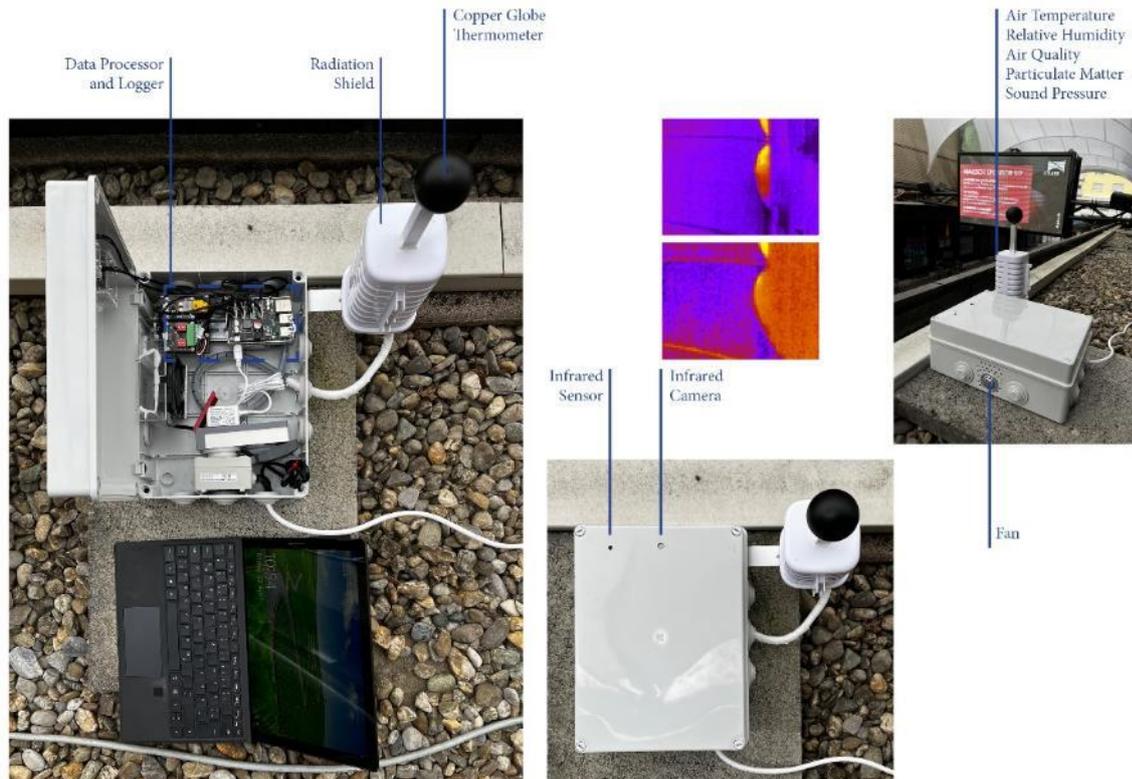
Abbildung 81  
Wärmebilder des Faltdaches in Buchs, Schweiz, für verschiedene Tageszeiten.



(eigene Darstellung)

Auf der Grundlage einer Studie über die bestehenden Methoden zur Erfassung von Mikroklimadaten haben wir für dieses Forschungsprojekt ein maßgeschneidertes Überwachungsgerät für Langzeitmessungen und Datenerfassung entwickelt. Das Gerät ist mit allen notwendigen Sensoren zur Erfassung des Mikroklimas ausgestattet. Die Liste der Sensoren und des entwickelten Geräts ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 82  
Das entwickelte Messgerät zur Erfassung von Langzeit-Mikroklimadaten

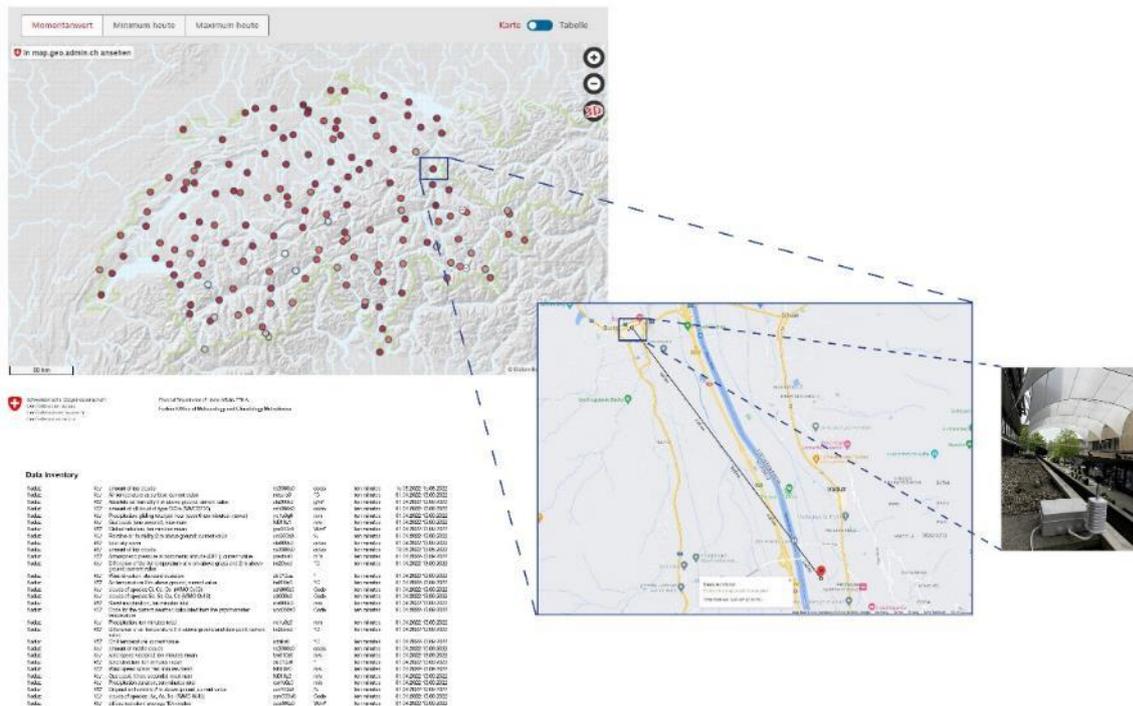


(eigene Darstellung)

Um die entwickelte Mikroklimastation mit der meteorologischen Station des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz zu vergleichen und zu referenzieren, werden die Daten für denselben Zeitraum und dieselbe Auflösung erfasst. Der Standort der Referenzstation und die Nähe zur Messstelle ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 83

Die meteorologische Referenzstation in Valduz zum Vergleich und zur Gegenüberstellung mit der Mikroklimastation

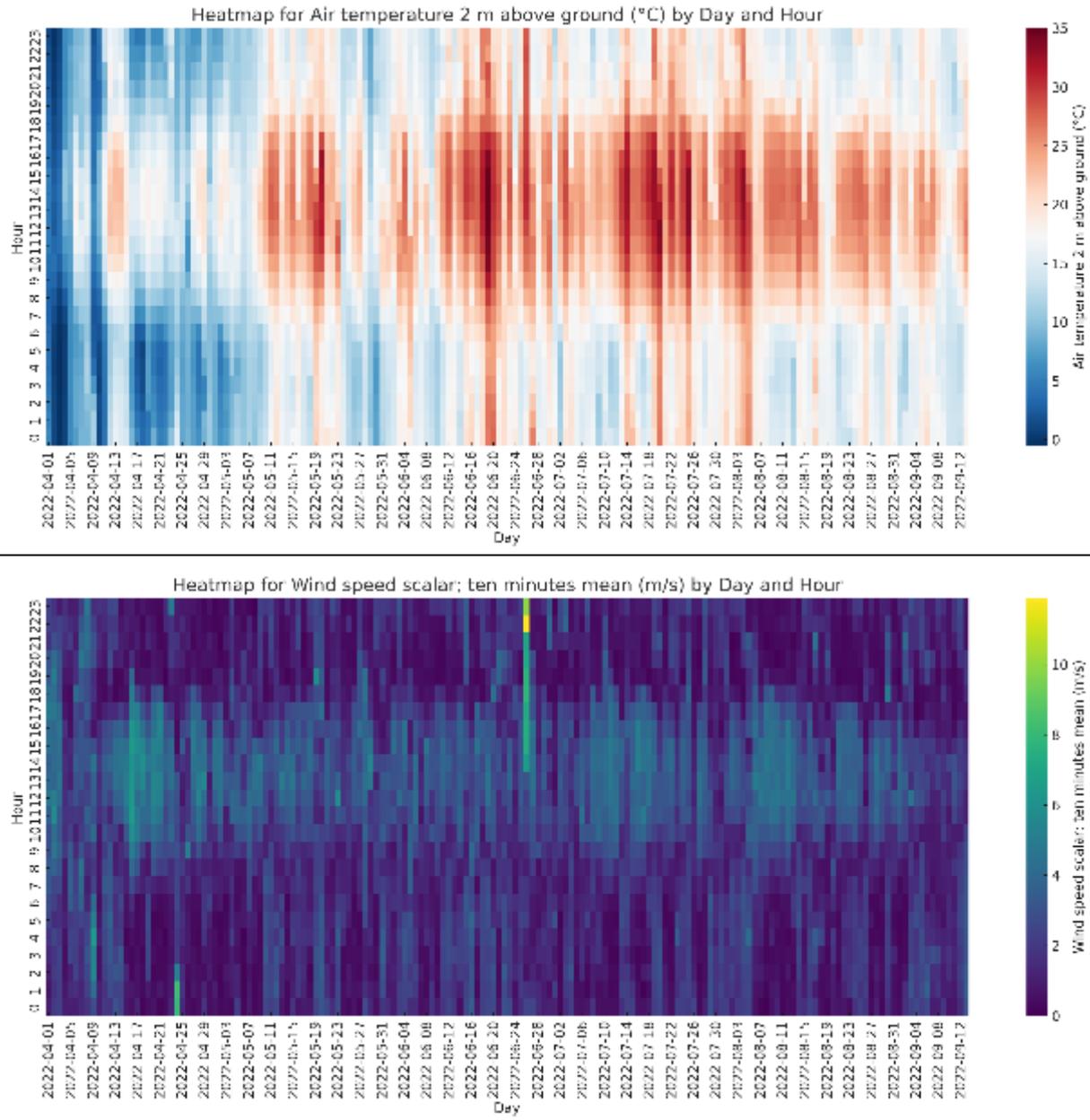


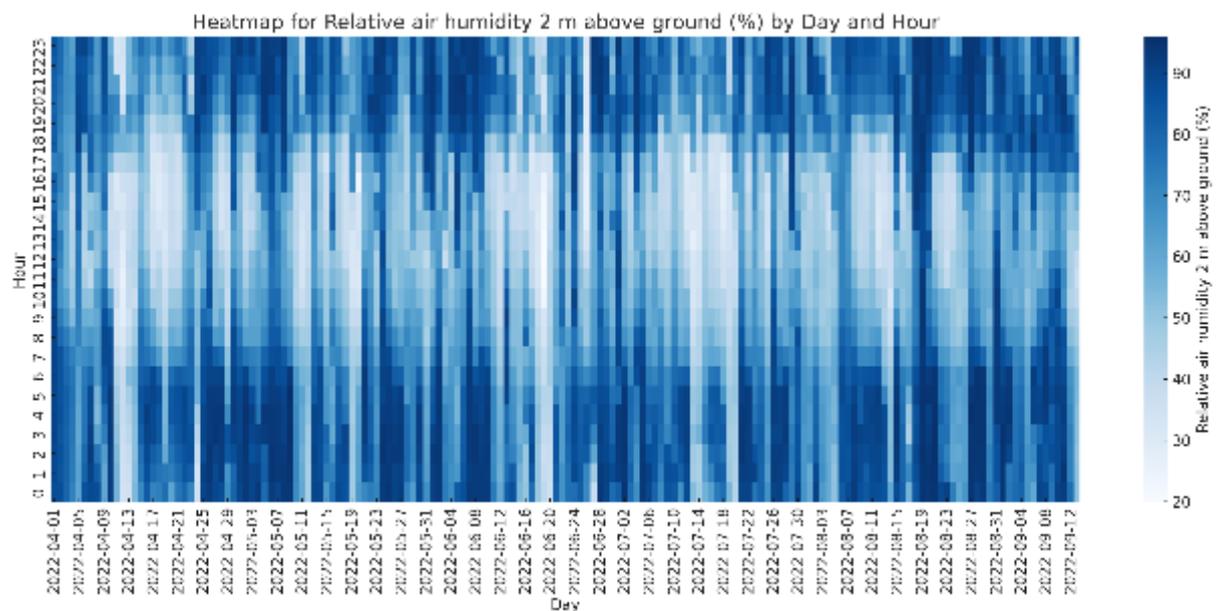
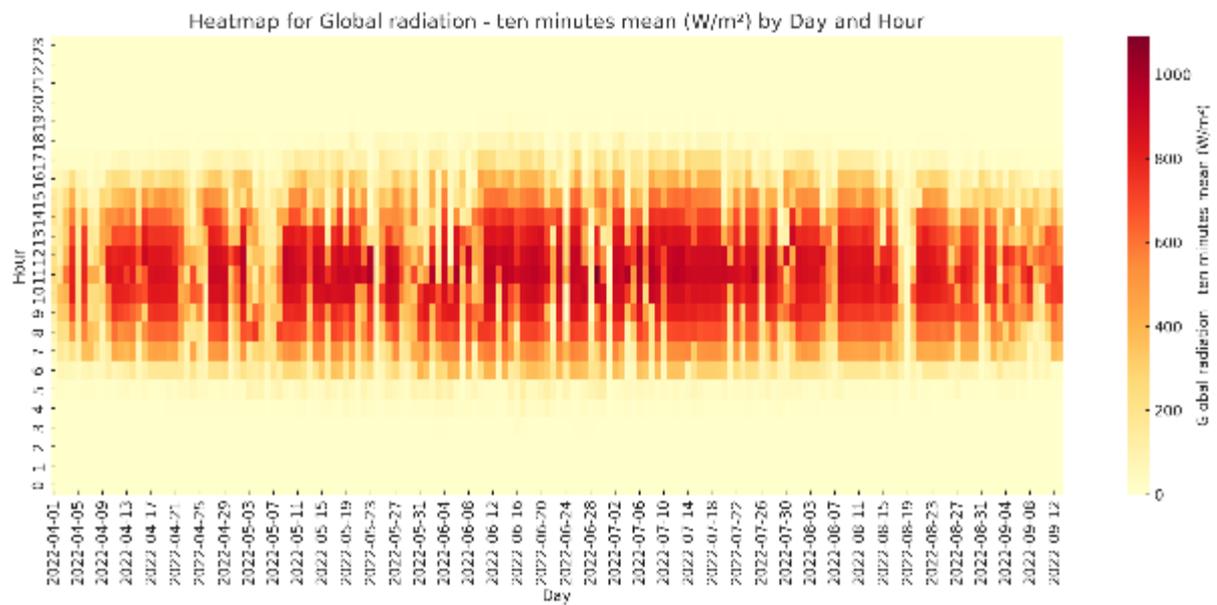
(eigene Darstellung)

Die weitere Analyse der gesammelten Daten in Bezug auf die Referenzwetterstation wurde mit folgenden Zielen durchgeführt:

- Verständnis des Musters und der Ursache für den Betrieb des Daches (Öffnen/Schließen)
- Quantifizierung der Wirksamkeit der Überdachung in ihrem Kontext und Klima und des Einflusses auf den städtischen Wärmeinseleffekt
- Quantifizierung der Wirksamkeit der Überdachung auf die Tages- und Nachtstundenmuster in Bezug auf die Betriebsmuster der Überdachung.

Tabelle 8  
Zusammenfassung der Datensätze der Referenzwetterstation

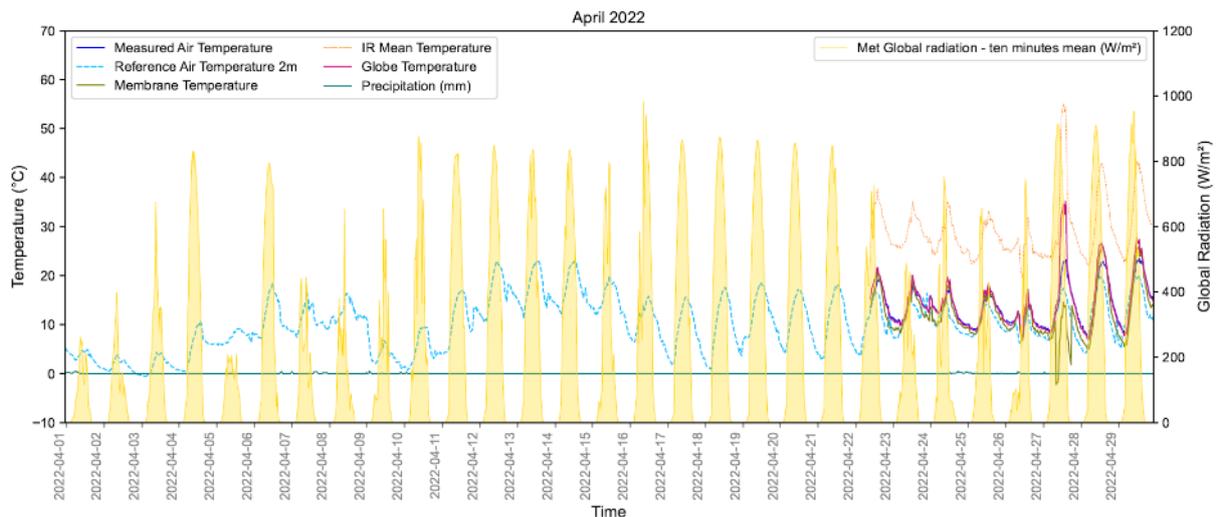




(eigene Darstellung)

Für den Monat April umfassen unsere Messungen eine Woche, in der die Referenzlufttemperatur zwischen 4,2 °C und 20,1 °C schwankt, während die Temperatur unter dem Vordach zwischen 7,2 °C und 23,5 °C liegt. Der Infrarotsensor, der den Zustand des Daches anzeigt, zeigt, dass das Dach nur am 27. April geöffnet war, was auch die Strahlungswärme mit einem Temperaturanstieg auf 35 °C bestätigt.

Abbildung 84  
Messdiagramm für den Monat April 2022



(eigene Darstellung)

Abbildung 84 vergrößert die Auswirkungen des Öffnens der Überdachung am 27. April im Vergleich zum Tag davor und danach. Der Vergleich der gemessenen Lufttemperaturen für die Referenz und das Vordach für den 26. April zeigt die Auswirkungen des Regens in diesem Fall, wo es gegen 10 Uhr morgens leicht regnete und die Referenzlufttemperatur sofort um  $\sim 3$  °C fiel. Dieser Trend ist mit einer Stunde Verspätung in der Stadt aus verschiedenen Gründen sichtbar, wie z. B. den Wolkenbewegungsmustern, aber hauptsächlich aufgrund der Tatsache, dass das Dach geschlossen war. Wir sehen die kühlende Wirkung des Regens auf die Membran, wo die Oberflächentemperatur um  $\sim 8$  °C fällt, was zur Strahlungswärmebilanz der Umgebung beiträgt. Dieses Phänomen ist während des gesamten Messzeitraums zu beobachten, da in dieser Region zu dieser Jahreszeit mit einer beträchtlichen Menge an Niederschlägen zu rechnen ist, wodurch die Funktion des Daches vom Wärmeschutz zum Regenschutz erweitert wird. Dies ist der Hauptgrund dafür, dass das Dach während des gesamten Messzeitraums nur 6 -mal geöffnet war. Dafür gibt es mehrere Gründe:

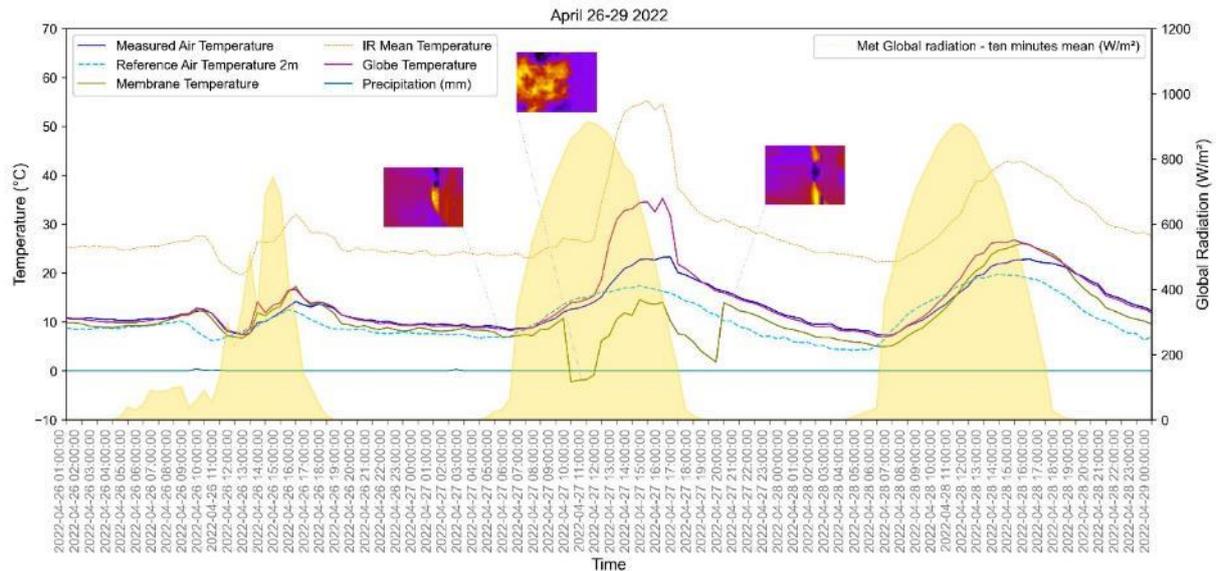
Erstens ist die Bedienung des Daches manuell, und es ist mühsam, es jeden Tag zu öffnen und zu schließen, damit das Tag-Nacht-Phänomen die Straßenschlucht abkühlt. Die Einbeziehung einer automatischen oder weniger manuellen Steuerung des Daches kann dieses Problem fördern. Der zweite Grund ist das Klima der Region, das gemäßigte Niederschlagsmuster aufweist, die die Funktion des Daches als Regenschutz ebenfalls erzwingen.

Ein Blick auf den 27. April, an dem das Dach zwischen 10 und 20 Uhr geöffnet war, mit einer maximalen Lufttemperatur von 23 °C und vollem Sonnenschein, schafft eine angenehme Sitzumgebung auf der Straße für die Menschen, die die Mittagspause genießen. Der Effekt des geöffneten Daches an einem sonnigen Tag wird in den nächsten Stunden gegen Abend sichtbar, wenn die Lufttemperaturen in der Straßenschlucht  $\sim 5$  °C über der Referenzwetterstation außerhalb der Stadt bleiben. Dieses Phänomen setzt sich bis zum Sonnenaufgang fort, und gegen 9 Uhr am nächsten Tag ist der umgekehrte Effekt zu beobachten, bei dem es in der Straßenschlucht kühler ist als in den Vororten. Dafür gibt es 2 Hauptgründe:

- Kaltluftschneisen: Windkorridore können zu Temperaturschwankungen zwischen Städten und Vorstädten beitragen. Während der Nacht, wenn sich die Luft abkühlt, strömt kühle Luft aus dem Umland in die Stadt, was zu einem Kühleffekt in der städtischen Umgebung führt. Dieser Zustrom kühlerer Luft kann weiter dazu beitragen, dass die Temperaturen in den Städten in den Morgenstunden relativ niedrig sind.
- Städtische Wärmespeicherung: Im Laufe des Tages neigen Städte dazu, mehr Wärme zu absorbieren und zu speichern, was auf die hohe Konzentration von Gebäuden, Beton und Asphalt (mehr

thermische Masse) zurückzuführen ist. Infolgedessen herrschen in städtischen Gebieten tagsüber oft höhere Temperaturen. In der Nacht geben diese Oberflächen die gespeicherte Wärme jedoch langsam wieder ab, so dass sich die städtische Umgebung am Morgen langsamer abkühlt und auch langsamer aufheizt.

Abbildung 85  
Diagramm für die Zeit, in der das Dach in Betrieb war, vom 26. bis 29. April, vergrößern

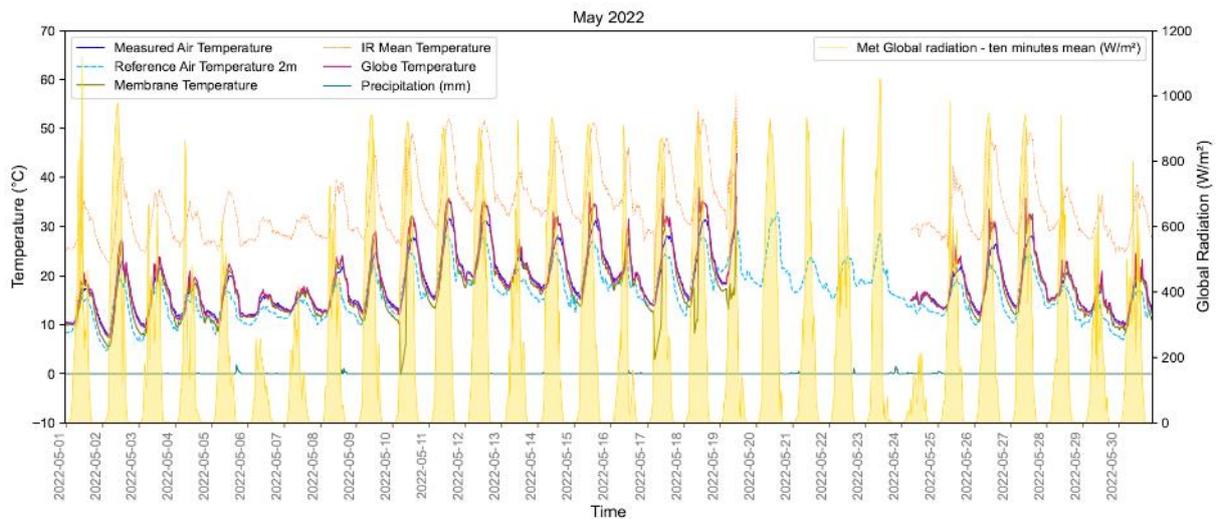


(eigene Darstellung)

Wie wir sehen, verlängert sich der Prozess der Abkühlung der Canyon, wenn das Dach während der Nacht geschlossen bleibt, im Vergleich zu dem Fall, dass das Dach während der Nacht offenbleibt. Diese Information kann den Betreibern der Überdachung mitgeteilt werden, um sie an wärmeren Tagen effektiver zu machen. Der Hauptgrund, warum das Dach tagsüber geöffnet war, könnte in den niedrigeren Lufttemperaturen und dem leichten Wind liegen, der es angenehmer macht, wenn man in der Sonne und nicht unter einem Membrandach sitzt.

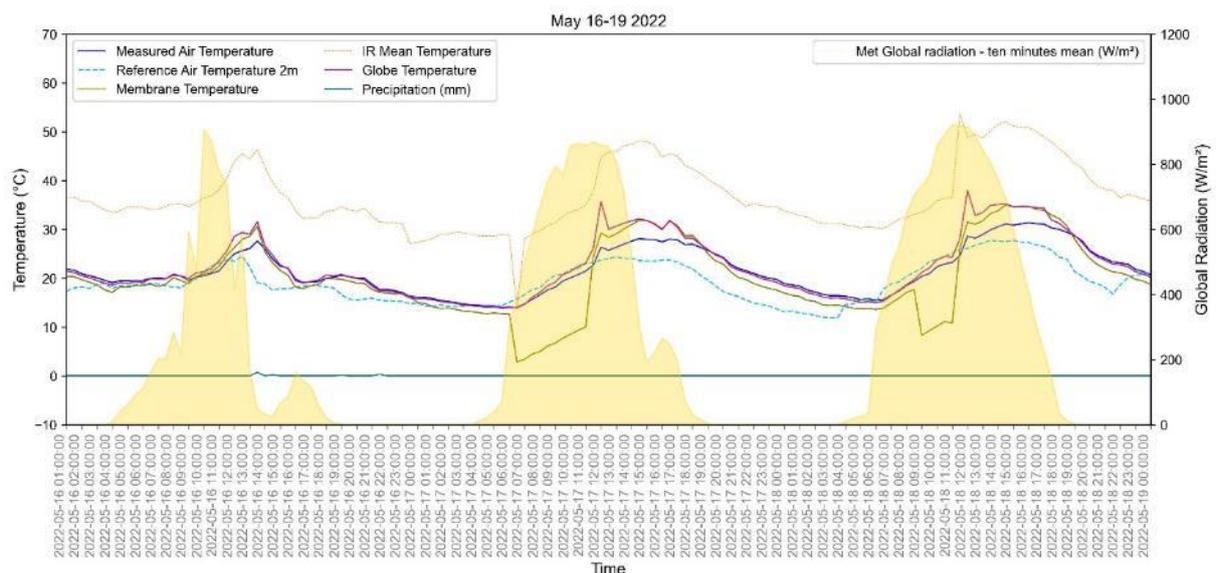
Für den Monat Mai (Abbildung 86) schwanken die Referenzwerte der Lufttemperatur zwischen 4,7 °C und 32,9 °C im Vergleich zu den gemessenen Werten unter dem Vordach mit einem Minimum von 7,6 °C und einem Maximum von 36 °C. Während des Monats Mai war das Dach 4-mal geöffnet, wie der Infrarotsensor zeigt.

Abbildung 86  
Messdiagramm für den Monat Mai 2022



(eigene Darstellung)

Abbildung 87  
Diagramm für die Zeit, in der das Dach in Betrieb war, vom 16. bis 19. Mai, vergrößern

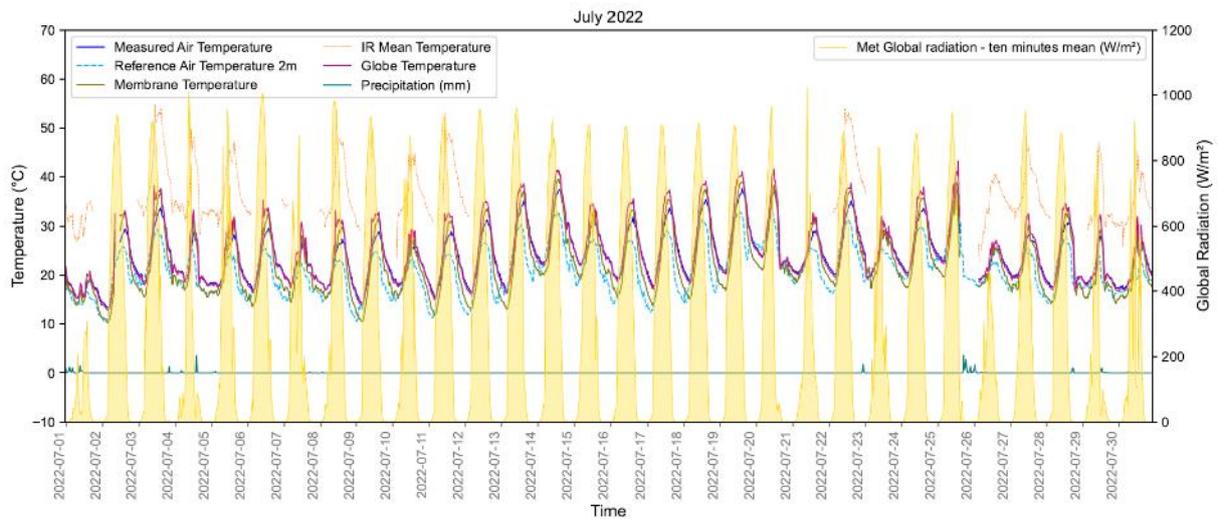


(eigene Darstellung)

Im Monat Juli (Abbildung 88) lag die durchschnittliche Temperatur unter dem Dach tagsüber zwischen 6:00 und 18:59 Uhr bei 25,34 °C und erreichte einen Höchstwert von 37,67 °C. Im Vergleich dazu lag die Referenztemperatur im Durchschnitt bei (23,61 °C) und erreichte einen Höchstwert von (33,8 °C).

In der Nacht war der Unterschied noch ausgeprägter. Unter dem Dach lag die Durchschnittstemperatur bei (21,92 °C), mit einem überraschenden Höchstwert von (34,92 °C). Dies deutet darauf hin, dass das Dach einen Teil der Wärme zurückhält, und da es dichtgehalten wurde, gab es kein nächtliches Abkühlungspotenzial. Währenddessen sank die Referenztemperatur auf einen Durchschnitt von (17,99 °C), mit dem höchsten Wert von (27,2 °C).

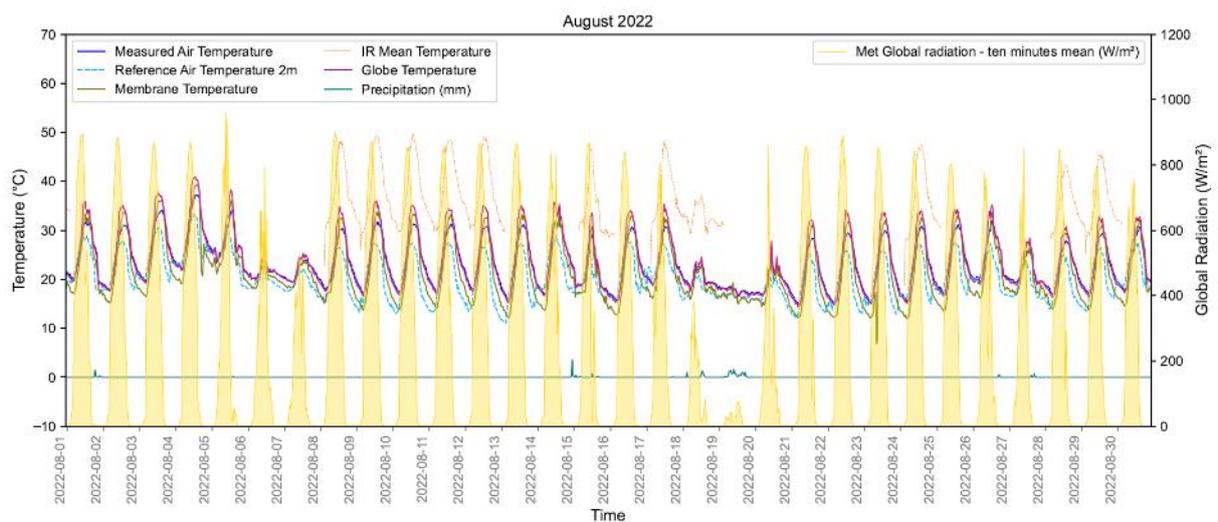
Abbildung 88  
Messdiagramm für den Monat Juli 2022.



(eigene Darstellung)

Im August zeigen die Beobachtungen, dass die durchschnittliche Temperatur unter dem Dach tagsüber zwischen 6.00 Uhr und 18.59 Uhr bei etwa (24,48 °C) lag, wobei an manchen Tagen die Temperaturen auf bis zu (37,22 °C) anstiegen. Die Referenzwetterstation hingegen zeigt für diese Stunden einen Durchschnittswert von (22,85 °C), wobei die höchste Temperatur bei (33,3 °C) lag. Mit dem Übergang in die Nacht sanken sowohl die Temperaturen unter dem Dach als auch in den Außenbezirken. So lag die durchschnittliche nächtliche Temperatur unter dem Dach bei (21,06 °C) und erreichte in wärmeren Nächten einen Höchstwert von (32,95 °C). Im Gegensatz dazu blieb die allgemeine Referenzlufttemperatur mit einer durchschnittlichen Temperatur von (17,32 °C) und einem Höchstwert von (27,2 °C) kühler (Abbildung 89).

Abbildung 89  
Messdiagramm für den Monat August 2022

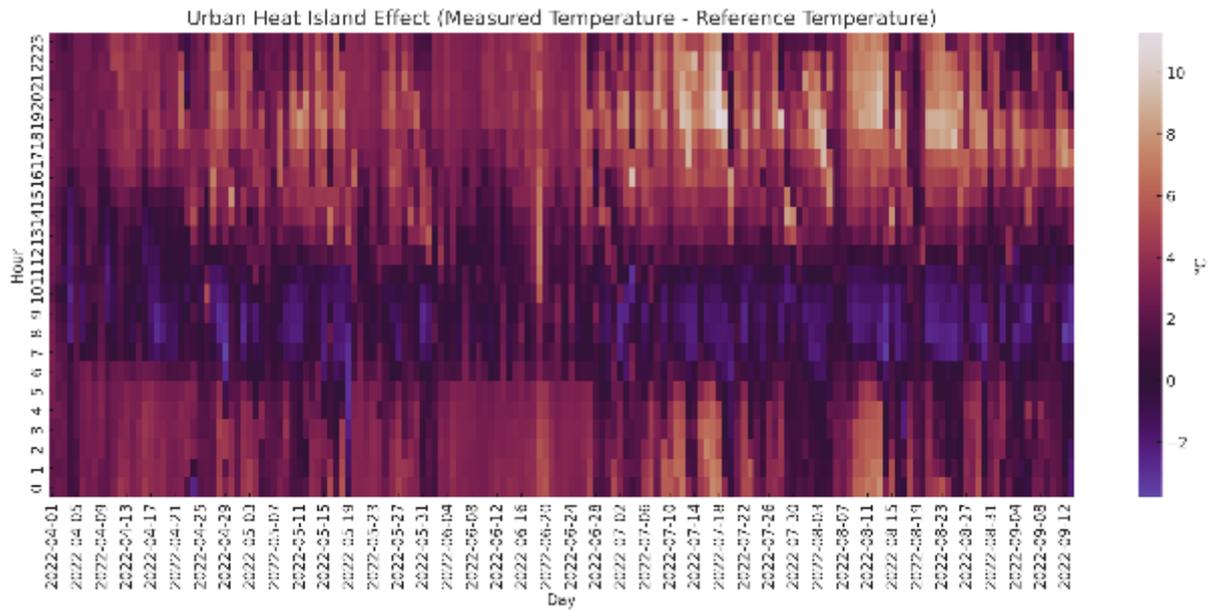


(eigene Darstellung)

Das folgende Diagramm zeigt die Intensität der städtischen Wärmeinsel während der Dauer der Messung. Wie wir sehen, ist das Potenzial des Daches, die darunter liegende Fläche im Vergleich zur Umgebung tagsüber mit

2-4 °C niedrigeren Lufttemperaturwerten zu halten, sehr offensichtlich. In der Nacht jedoch sehen wir aufgrund der betrieblichen Gründe des Daches einen verstärkten Effekt von Wärmeinseln von bis zu 10 K im Vergleich zu den Vorstädten (Abbildung 90).

Abbildung 90  
Vergleich der Intensität der städtischen Wärmeinsel mit der Referenzlufttemperatur und dem Messpunkt.



(eigene Darstellung)

## 5 Digital Case Study

### 5.1 Untersuchung und Analyse städtebaulicher Strukturtypen am Beispiel Kassel

Die Referenz Alte Post in Kassel wurde als typisches Beispiel einer Innenhofsituation im Bestand gewählt, welche durch ihre Umnutzung des Bestandsgebäudes die Notwendigkeit einer Verschattung aufweist. Die umgebende Bausubstanz des im Stadtzentrum befindlichen Gebäudes, sowie alle gebäudenahen Oberflächen sind vollständig versiegelt, sodass sich auf der Hitzekarte bereits deutliche Anzeichen von Hitzeinseleffekten erkennen lassen. Die Geometrischen und Baulichen Randbedingungen sind unsymmetrisch und heterogen, sodass diese Case Study die typischerweise zu erwartenden Komplexitäten einer innerstädtischen Verschattungsmaßnahme aufweist.

#### 5.1.1 Case Study in Bezug auf städtebauliche-architektonische Kriterien

In der digitalen Case Study sind die Ergebnisse eine städtebauliche Analyse zwingend erforderlich, um den Standort klar zu definieren. Verschiedenen Strukturebenen werden untersucht.

##### 5.1.1.1 Region

Der Klimawandel ist ein ernstes globales Problem, das durch den zunehmenden Ausstoß von Treibhausgasen wie Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) verursacht wird. Diese Emissionen führen zur Erwärmung der Erdatmosphäre und haben weitreichende Auswirkungen auf das Klima, die Umwelt und die Gesellschaft.

Wenn der Klimaschutz nicht beachtet wird und die Treibhausgasemissionen weiterhin unkontrolliert steigen, werden die Auswirkungen des Klimawandels immer schwerwiegender. Dies kann zu häufigeren und intensiveren extremen Wetterereignissen wie Hitzewellen, Dürren, Stürmen und Überschwemmungen führen. Außerdem kann der Meeresspiegel ansteigen, was Küstengebiete und Inseln bedroht.

Regionen wie Nordhessen könnten ebenfalls von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein. Die Landwirtschaft könnte unter veränderten klimatischen Bedingungen leiden, beispielsweise durch Ernteauffälle aufgrund von Wassermangel oder neuen Schädlingen. Die Gesundheit der Menschen könnte beeinträchtigt werden, da Hitzewellen und Luftverschmutzung das Risiko von Gesundheitsproblemen erhöhen.

Um die schlimmsten Folgen des Klimawandels zu vermeiden, ist es entscheidend, den Klimaschutz voranzutreiben. Das bedeutet, die Treibhausgasemissionen drastisch zu reduzieren, erneuerbare Energien zu fördern, die Energieeffizienz zu steigern, Wälder zu schützen und nachhaltige Landwirtschaft zu unterstützen. Individuelles Handeln, staatliche Maßnahmen und internationale Zusammenarbeit sind gleichermaßen wichtig, um den Klimawandel zu bekämpfen und eine lebenswerte Zukunft für kommende Generationen zu sichern.

Erste Schritte durch ein überregionales Szenario bewiesen, dass das Klima in Zukunft in starker Abhängigkeit vom Klimaschutz ist. In Abbildung 91 und Abbildung 92 ist das Szenario für Nordhessen zu sehen, was passiert, wenn der Klimaschutz nicht beachtet wird.

Abbildung 91  
Karten Temperatur Monatsmittel Juni für Hessen 2001 – 2030 „Klimaschutz“ Szenario

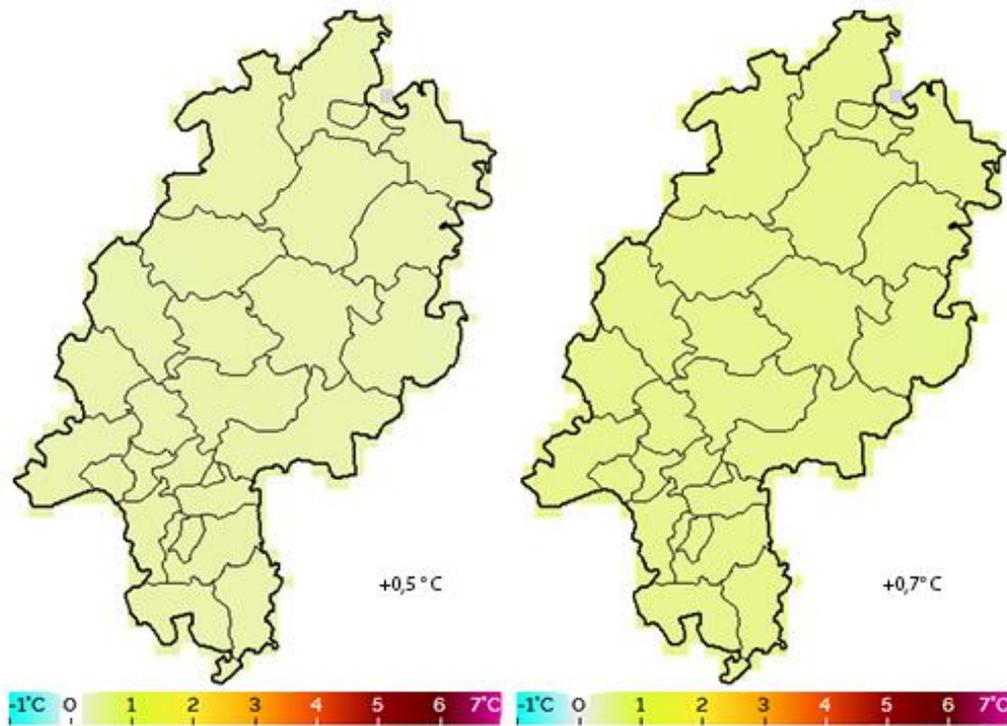
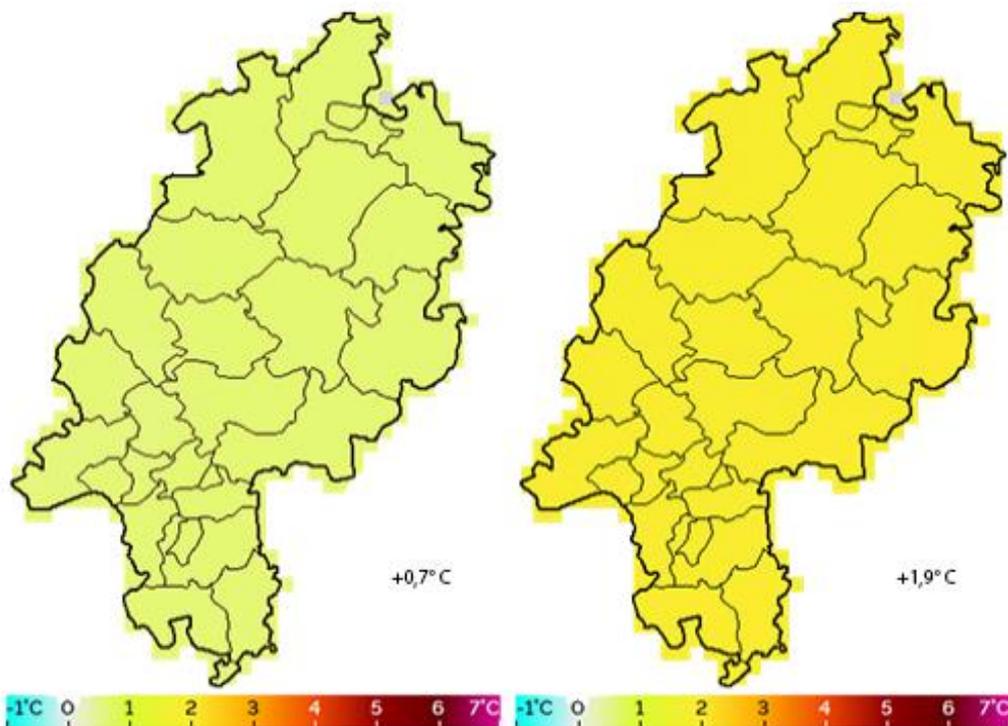


Abbildung 92  
Karten Temperatur Monatsmittel Juni für Hessen 2031-2060 „kein Klimaschutz“ Szenario



Quelle : <https://klimaportal.hlnug.de/klima-der-zukunft#> und Datenquelle: Deutscher Wetterdienst, Realisierung: Meteotest, © HLNUG

Die Karten zeigen simulierte Änderungen der 30-jährigen Mittelwerte der Temperatur der gewählten Periode 2001-2030/2031-2061 zur (durch die Klimamodelle) simulierten Referenzperiode 1971-2000. In Abbildung 91 wird das „Klimaschutz“-Szenario (RCP2.6) dargestellt, in Abbildung 92 das „kein Klimaschutz“-Szenario (RCP8.5). Die auf den jeweiligen Karten rechts unten angegebene Zahl zeigt den landesweit gemittelten Wert. Die Bandbreite des gesamten Ensembles bewegt sich zwischen -0.2 °C und 1.1 °C (RCP26) und 0.0 °C und 1.2 °C (RCP85) im Flächenmittelwert. Für RCP2.6 ist die Karte des Ensemble-Mittelwerts und für RCP8.5 ist die Karte des Ensemble-Mittelwerts dargestellt. (Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie: in <https://klimaportal.hlnug.de/klima-der-zukunft#>, (abgerufen am 02-08.2023)).

### 5.1.1.2 Stadt

Im weiteren Verlauf werden innerhalb der Städte nach oben genannten Kriterien (Tabelle 3) räumliche Strukturen analysiert und im Detail eine Auswahl getroffen, um die verschiedenen Typologien zusammenzufassen und um eine strukturierte Kapazität der betroffenen Bereiche einzugrenzen.

Die Nutzung der Stadt Kassel umfasst typische Merkmale einer Großstadt mit Oberzentrumcharakter, einschließlich intensiver Nutzungen wie Gewerbe- und Innenstadtbereichen sowie Wohnbebauung. Es gibt aber auch Naherholungsbereiche in Parks und Auen.

Die Freiraumstruktur der Stadt wird durch klimaökologisch wertvolle Bereiche wie den Bergpark Wilhelmshöhe, die Karls- und Fuldaaue sowie das Buga-Gelände geprägt.

Die bioklimatischen Einflüsse in Kassel hängen stark vom jeweiligen Bereich ab. Innerstädtische Gebiete mit geringem Vegetationsanteil, Industrie- und Gewerbegebiete mit hoher Versiegelung weisen eine hohe sommerliche Hitzebelastung auf. Diese Bereiche könnten von einer stadtklimatischen Sanierung profitieren, um die Auswirkungen des Klimawandels abzumildern. Auch dichtere Wohnbebauungen könnten durch mehr Vegetation bioklimatisch wirksamer gestaltet werden.

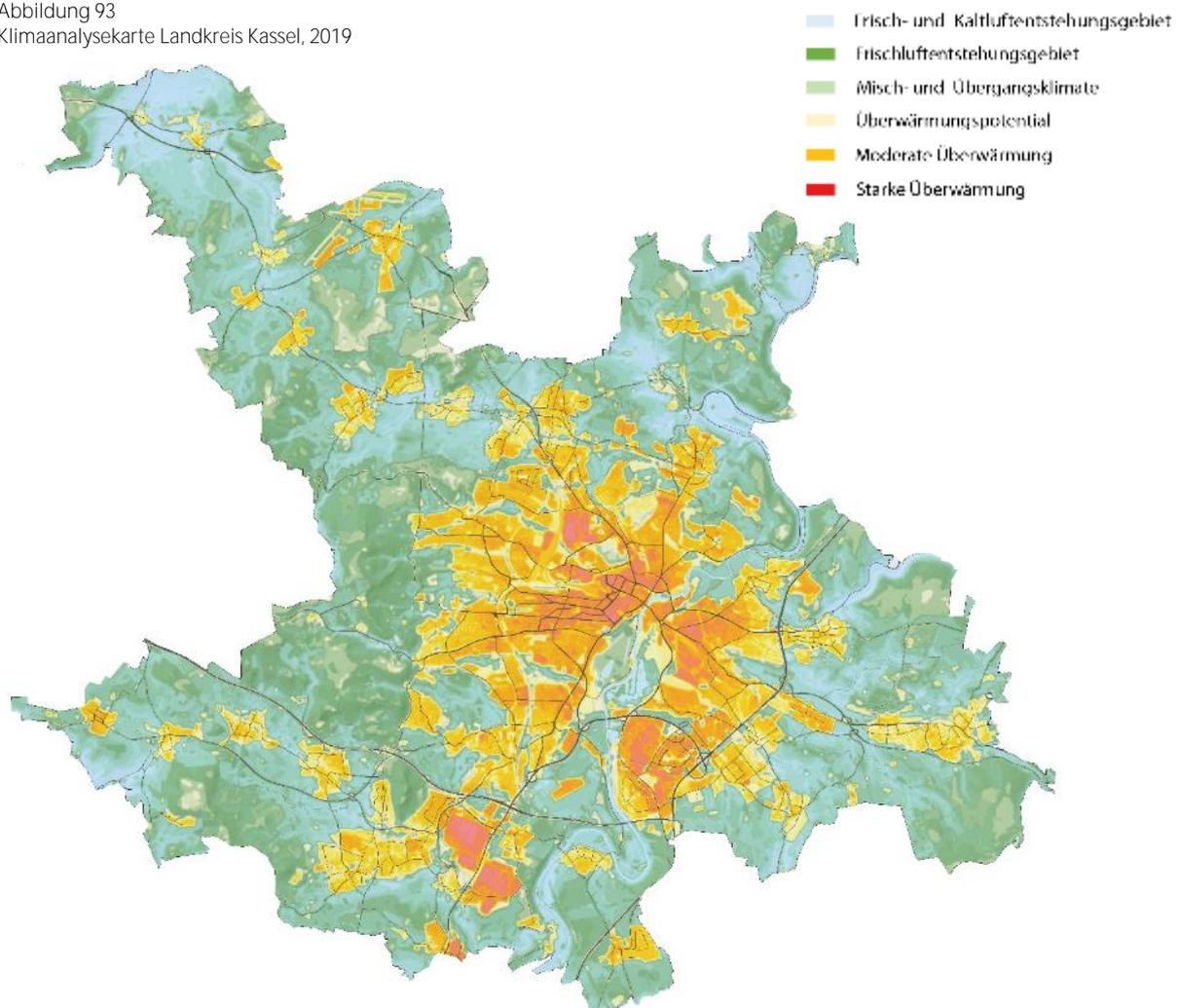
Des Weiteren wird Kaltlufteintrag aus Osten, Süden und Westen als bioklimatisch wirksam beschrieben, was darauf hindeutet, dass kühle Luftströme von diesen Richtungen her in die Stadt eindringen und zur Linderung von Hitzebelastungen beitragen könnten.

Es ist wichtig, dass Städte wie Kassel geeignete städtebauliche Maßnahmen ergreifen, um sich auf die Auswirkungen des Klimawandels vorzubereiten und die Lebensqualität für die Bewohner zu erhalten. Dazu könnten Maßnahmen wie die Förderung von Grünflächen, eine intelligente Stadtplanung, umweltfreundliche Infrastruktur und Klimaschutzinitiativen gehören. Die Notwendigkeit der Klimaanpassung in den am stärksten belasteten Stadtteilen Mitte und Vorderer Westen wären erste Schritte um verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung des Stadtklimas anzugehen.

Um ein besseres Klima zu schaffen, empfiehlt es sich, in stark belasteten Bereichen, in denen wenig natürliche Belüftung vorhanden ist, Sonnenschutzmaßnahmen ohne Einfluss auf die Belüftung zu nutzen. Grundsätzlich werden als bioklimatische Maßnahme die Verwendung von Vegetationsschatten empfohlen, da sich der Versiegelungsgrad in manchen Teilen der Innenstadt nicht mehr minimieren lässt.

Diese vorgeschlagene Maßnahme soll dazu beitragen, dass Stadtklima in den belasteten Stadtteilen zu verbessern, die Auswirkungen des Klimawandels abzumildern und die Lebensqualität für die Bewohner zu erhöhen.

Abbildung 93  
Klimaanalysekarte Landkreis Kassel, 2019



Quelle: INEK GmbH, 2019

In Abbildung 93 ist sichtbar, bezogen auf das Ausmaß der Erhöhung von Temperaturen in einem bestimmten Bereich, insbesondere in städtischen Gebieten, wie sich „starke Überwärmung“ und „moderate Überwärmung“ ausgebreitet haben.

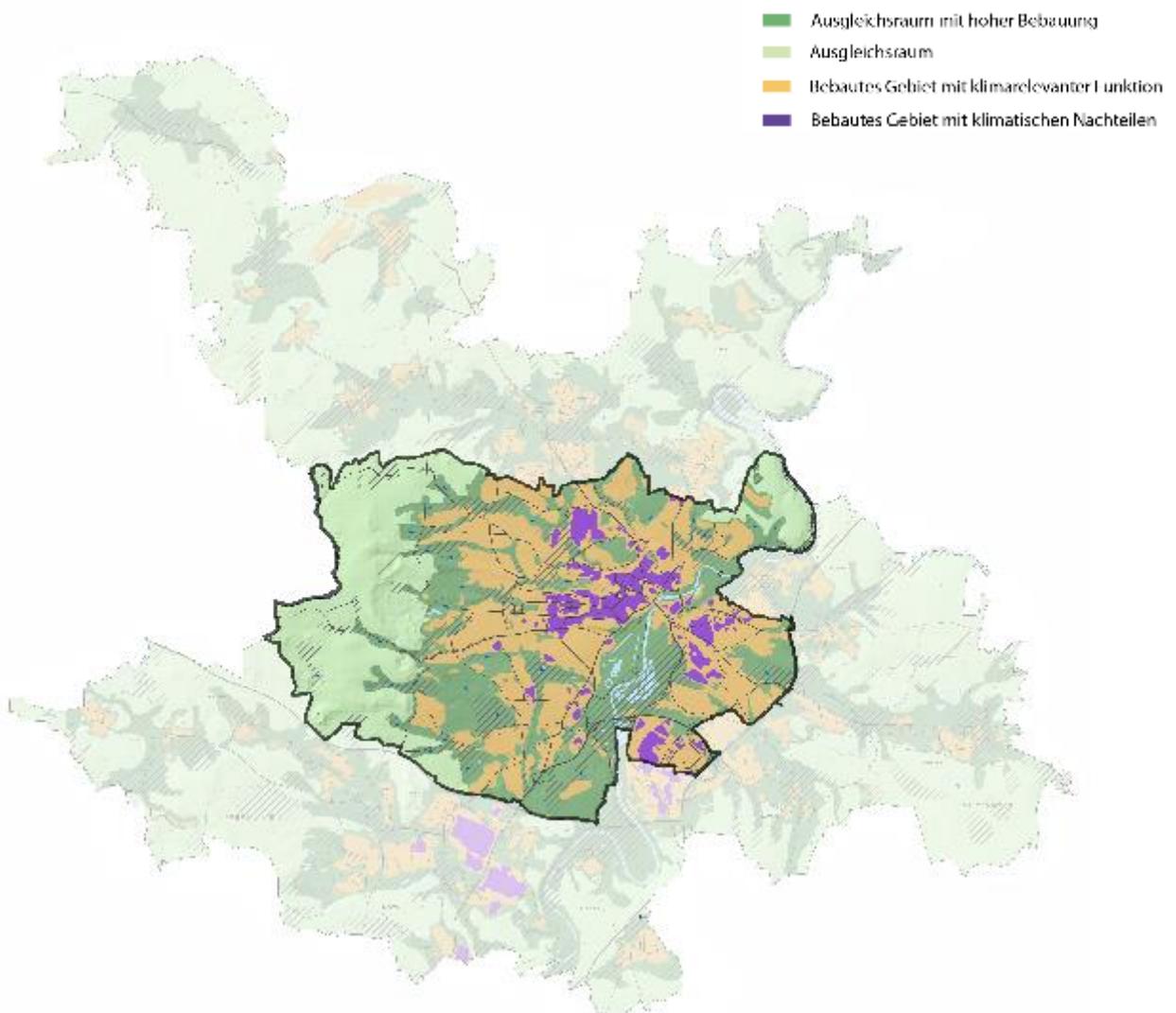
Eine starke Überhitzung tritt in Gebieten auf, in denen die Erhöhung der Temperaturen deutlich höher ist als in den umliegenden ländlichen oder natürlichen Gebieten. Dieses Phänomen wird als "starke Hitzeinsel" bezeichnet. Es wird typischerweise in dicht bebauten und versiegelten Städten beobachtet, wo der Mangel an Grünflächen und die große Anzahl von Gebäuden und Straßen dazu führen, dass die Wärme im urbanen Raum gespeichert wird. Die Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland können mehrere Grad Celsius betragen. Eine moderate Überwärmung ist weniger ausgeprägt als eine starke Überwärmung, aber dennoch spürbar. In Gebieten mit moderater Überwärmung sind die Temperaturerhöhungen im Vergleich zu ländlichen Gebieten signifikant, aber möglicherweise nicht so stark wie in dichteren städtischen Gebieten. Dies kann in Vororten oder städtischen Gebieten mit einer gemischten Bebauung auftreten, die Grünflächen, Wohngebiete und begrenzte Gewerbe- oder Industriegebiete umfassen. Deswegen wird die Stadt mit ihren Stadtteilen analysiert und es werden bestimmte Gebiete mit klimatischen Nachteilen untersucht. In Bezug auf Kassel ist es der Stadtteil Kassel Mitte. Dieser bebaute Stadtteil kann auf Grundlage der Abbildung 94 als ein Gebiet mit klimatischen Nachteilen durch ungünstige klimatische Bedingungen, die durch die Art der Bebauung und die Veränderung der natürlichen Umgebung entstehen, gekennzeichnet werden.

Folgende klimatischen Nachteile wurde für das bebaute Gebiet definiert:

- Hohe städtische Bebauung und viele Verkehrswege

- Hohe Versiegelung durch Straßen, Parkplätze, Gebäude
- Geringer Anteil an Grünflächen und Vegetation.
- Luftzirkulationseinschränkung durch dichte Bebauung

Abbildung 94  
Planungshinweiskarte Landkreis Kassel, 2019

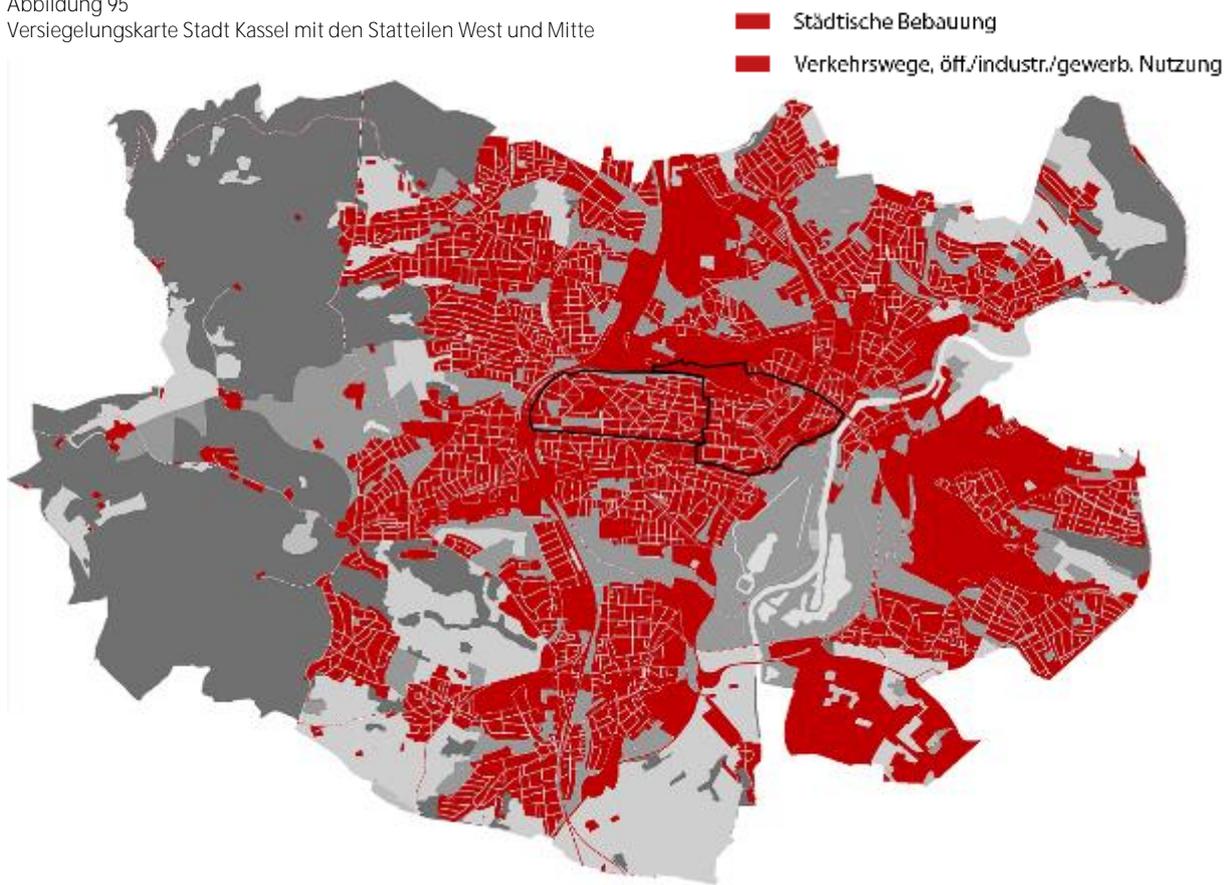


Quelle: INEK GmbH, 2019

Den größten innerstädtischen Anteil an erkennbaren und schwierigen Gegebenheiten der Versiegelungsgrade der Stadt Kassel. Der innerstädtische Bereich und deren bebaute Gebiete mit klimatischen Nachteilen ist sehr hoch. In der Abbildung 94 sind zentral in Lila die Gebiete zu erkennen, die aufgrund ihrer baulichen Beschaffenheit einem erhöhten klimatischen Nachteil ausgesetzt sind und daher Eingriffe erfordern, um den Hitzeinseleffekt zu verringern.

In Abbildung 94 ist die Stadt aufgeteilt in verschiedene Nutzungen. Um es nochmal zu verdeutlichen kann man in Abbildung 95 nochmal genauer sehen, wieviel Anteil die Versiegelung an einer Stadt hat.

Abbildung 95  
Versiegelungskarte Stadt Kassel mit den Statteilen West und Mitte



Quelle: Imperviousness Density 2015, Copernicus

### 5.1.1.3 Stadtteil

In Kassel-Mitte sind aufgrund der städtischen Bebauung größtenteils Flächen versiegelt, die kaum rückgängig gemacht werden können. Dies führt insbesondere in diesen Bereichen zur Bildung von Wärmeinseln. Die vorherrschende Versiegelung besteht hauptsächlich aus Materialien wie Asphalt, Beton und anderen undurchlässigen Substanzen, die das Abfließen von Regenwasser in den Boden behindern und zu verschiedenen Effekten führen, welche höheren Temperaturen verursachen.

Das Klima in Kassel-Mitte wird von der hohen Versiegelung, geringem Grünflächenanteil und starken Oberflächenstrukturen geprägt. Diese Faktoren führen zu signifikanten mikroklimatischen Veränderungen. Insbesondere der Wärmeineffekt und die veränderten Windmuster durch Straßen und Gebäude haben negative Auswirkungen auf das städtische Klima, was sich nachteilig auf das Wohlbefinden der Bewohner auswirkt.

Die bebaute Umgebung mit klimatischen Nachteilen umfasst vor allem dicht besiedelte Regionen, die unter Luftqualitätsproblemen leiden. Mögliche Maßnahmen zur Verbesserung und Sanierung könnten eine Erhöhung des Grünflächenanteils, die Reduzierung der Versiegelung, die Verringerung von Emissionen (besonders im Verkehrsbereich und von Feuerungsanlagen) sowie die Schaffung von belüfteten Grünflächen einschließen. Eventuell erfordert dies auch die Umgestaltung oder Entfernung störender Gebäudestrukturen.

Abbildung 96  
Schwarzplan Kassel



Abbildung 97  
Ausschnitt Klimaanalysekarte Kassel Mitte



Abbildung 98  
Ausschnitt Klimaanalysekarte Kassel Mitte, vergrößert



(eigene Darstellung)

#### 5.1.1.4 Gebäude

Das Gebäude der Alten Post Kassel hat eine interessante Geschichte, einschließlich des Baus im Stil der italienischen Renaissance, der während einer dreijährigen Bauzeit entstanden ist. Es wurde im Zweiten Weltkrieg zerstört und anschließend mit einer vereinfachten Fassade wiederaufgebaut. Die Erhaltung der historischen Bausubstanz und die Integration des Denkmalschutzes sind wichtige Ziele bei der Renovierung und Umgestaltung dieses repräsentativen Gebäudekomplexes.

Der Gebäudekomplex hat eine Gesamtfläche von 8.600 qm und wurde 1904 erbaut und diente ursprünglich als Oberpostdirektion. Der Gebäudekomplex steht teilweise unter Denkmalschutz und verfügt über charakteristische architektonische Elemente.

Die Immobilie enthält bis zu vier Meter hohe Räume und beeindruckende historische Details. Die Eigentümergesellschaft hat das Ziel, die Immobilie unter Berücksichtigung des Denkmalschutzes zu renovieren und umzugestalten, um sie wiederzubeleben und zu revitalisieren. Die Größe und Schönheit des Gebäudekomplexes offenbart sich insbesondere beim Betreten durch die Tordurchfahrt, die einst von Postkutschen genutzt wurde, und von einem imposanten Balkon über dem Portal aus, von dem aus man einen weiten Blick über die Stadt hat.

Die Alte Post präsentiert sich mit einer Backsteinfassade und massiven Wänden. Die robuste Konstruktion sowie die imposanten, rund 18 Meter hohen Mauern um den etwa 1.000 m<sup>2</sup> großen Innenhof schaffen eine optimale Grundlage für die Umgestaltung der derzeit komplett asphaltierten Fläche. Gegenwärtig dient dieser Bereich als Parkplatz. Zudem gewinnt die Nord-Süd-Ausrichtung des Gebäudes an Bedeutung, da die intensive Sonneneinstrahlung eine unnötige Erhitzung des Bereichs bewirkt. Die Minimierung des Wärmeinseleffekts aufgrund der sonnigen Position stellt einen essenziellen Vorteil für die laufende Untersuchung dar.

Die Nutzung von Teer zur Versiegelung des Innenhofs und die Verwendung als Parkfläche legen nahe, dass die ursprüngliche Funktion des Innenbereichs über die Zeit hinweg angepasst wurde. Die Wahl dieses Raums für eine vertiefende Fallstudie im Kontext von anpassbaren Membrandächern reflektiert das Bestreben, den Raum effizient zu nutzen und den örtlichen Anforderungen gerecht zu werden.

Die Alte Post verkörpert eine faszinierende Symbiose aus historischer Architektur, stabiler Bauweise und vielseitigen Anpassungsmöglichkeiten. Diese Eigenschaften tragen maßgeblich zur Einzigartigkeit und Diversität des Gebäudekomplexes bei.

#### 5.1.1.5 Innenhof

Die Hoftypen in Abbildung 27 im Abschnitt 4.1.7 beschreiben den Hof als Innenhof (c). Typ C ist die reinste Form des Hofes, da er deutlich von der Randbebauung abgesetzt ist. Abbildung 28 beschreibt den Hof (g) als Hinterhof mit einer festen Verbindung zur vorderen Gebäudefront. Im weiteren Verlauf kann der Hof als polygonaler Doppelhof beschrieben werden. In der Verdoppelung ist ein kleiner, nach hinten offenem Innenhof zu sehen und der zweite Polygonale Innenhof von 1.000 Quadratmetern, der über eine Durchfahrt zu erreichen ist.

Abbildung 99  
Innenhof der Alten Post Kassel



Quelle: Google Earth

Abbildung 100  
Klimaanalysekarte, Standort Alte Post Kassel

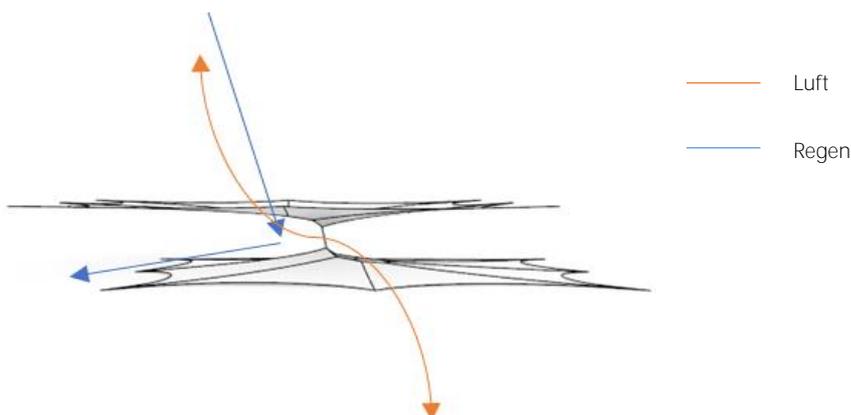


(eigene Darstellung)

### 5.1.2 Mehrlagige Verschattungsanlage und Porosität

Aus den Erkenntnissen der Struktur-, Raum- und Klimaanalyse hat sich ergeben, dass mehrlagige Konstruktionen, welche eine Luftdurchströmung der Fläche erlauben, am effizientesten sind. Die hier dargestellte Konstruktion zeigt das vorläufige Optimierungsergebnis der Suche nach einer Verschattungskonstruktion, die auf alle Randbedingungen bezüglich Struktur, Klima und Raum abgestimmt ist.

Abbildung 101  
Regenwasser und Luft strömen durch eine poröse und doppelagige Membrankonstruktion



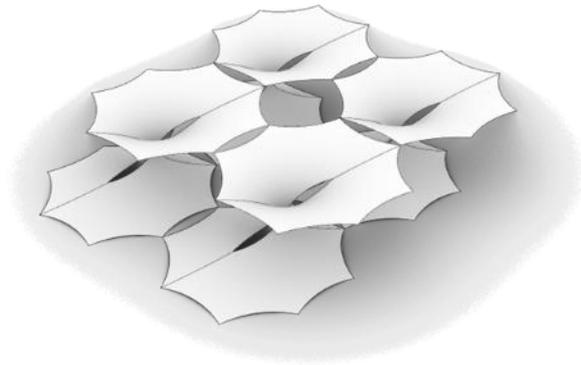
(eigene Darstellung)

Die Porosität des zweilagigen Aufbaus kann so geplant werden, dass der darunterliegende Raum vor Sonneneinstrahlung und Regenwasser geschützt ist und gleichzeitig der Luftstrom nicht behindert wird. Dies ist vorteilhaft im Vergleich zu herkömmlichen einlagigen Dächern. Der Gestaltungsspielraum für solche

Topologien muss noch erforscht werden. Außerdem könnte eine poröse Konstruktion die Gesamtwindlast verringern indem im Vergleich zu geschlossenen Membranen ein geringerer Druckunterschied zwischen Ober- und Unterseite aufbaut. Die doppelagige Konstruktion ist auch bei der Aufnahme von Auf- und Abwind vorteilhaft, da die Krümmungen sowohl nach oben (für den Abwind) als auch nach unten (für den Aufwind) gerichtet sind.

Abbildung 102

Schematische Darstellung der Struktur einer porösen doppelagigen Membrankonstruktion mit horizontaler Addition



(eigene Darstellung)

### 5.1.3 Bewertungen nach mikroklimatischen Kriterien

Neben der statischen Standsicherheit sind die beiden wichtigsten Bewertungskriterien die direkte Sonneneinstrahlung und die Analyse des Regenflusses. Bei der Sonneneinstrahlung sollte die Dachkonstruktion in der Lage sein, unter Berücksichtigung der umliegenden Gebäude effektiv Schatten zu erzeugen. Das Dach sollte in der Lage sein, den Standort vor Regen zu schützen, gleichzeitig aber auch einen Luftstrom zuzulassen, um eine möglichen Luft- und Wärmestau im Falle eines vollständig überdachten Raums zu verringern.

So wird ein iterativer Entwurfsprozess eingeführt, bei dem die Formfindung, die Sonneneinstrahlung und die Regenflussanalyse als Grundlage für den Entwurf dienen.

## 5.2 Formfindung und Konstruktive Umsetzung

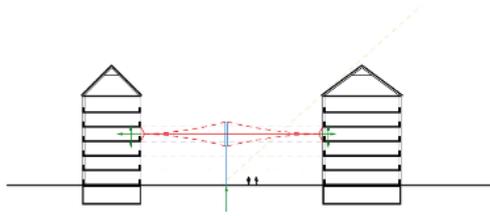
Ziel der digitalen Case Study ist es, die Entwurfsmethoden und Leistungskennzahlen am ausgewählten Standort von der Alten Post zu überprüfen. Der Innenhof hat eine fünfeckige Form mit einer Hauptspannweite von 37 Metern. Die umliegenden Gebäude haben eine Höhe von 18 Metern.

### 5.2.1 Formfindung

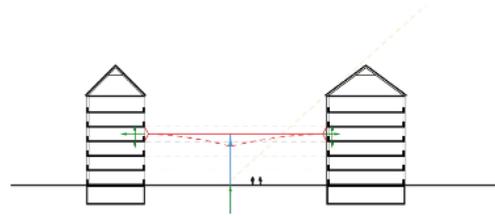
#### 5.2.1.1 Vertikales Gleichgewicht

Mehrere Varianten des Daches wurden entwickelt, um den Innenhof zu überspannen. Die horizontalen Kräfte aus der Vorspannung des Daches und die externen Lasten müssen ordnungsgemäß im Gebäude verankert werden, wobei die Verankerungshöhe mit der Decke übereinstimmen sollte, wo die horizontale Tragfähigkeit mit einer entsprechend tief liegenden Verankerung realisiert werden kann. Bei begrenzter horizontaler Verankerungskapazität kann ein Druckring zum Kurzschluss der horizontalen Kräfte verwendet werden, sodass nur vertikale Lasten von den umliegenden Gebäuden getragen werden.

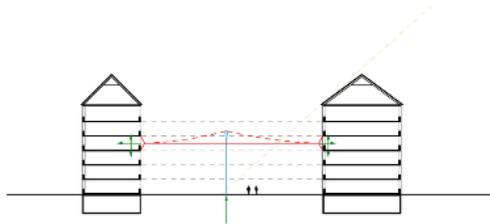
Abbildung 103  
Schematische Schnitte von Entwurfsvarianten des Daches



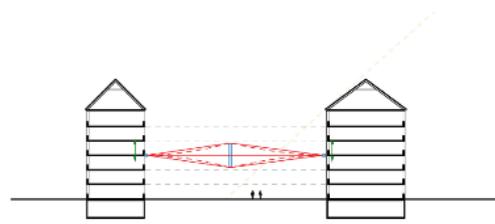
Doppellagiges Dach, Hoch- und Tiefpunkt, Mittelmast, Randentwässerung



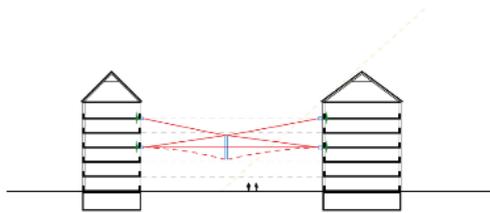
Einlagiges Dach, Tiefpunkt, Mittelmast, Mittlentwässerung



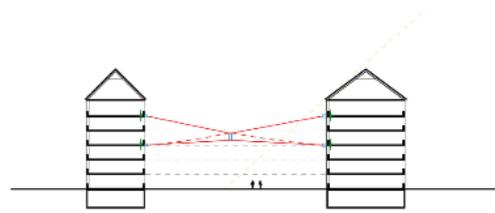
Einlagiges Dach, Hochpunkt, Mittelmast, Randentwässerung



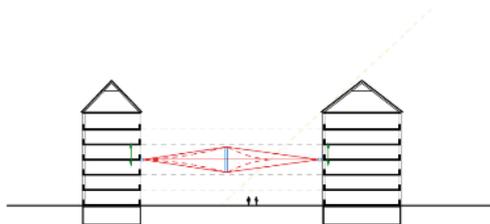
Doppellagiges Dach, Hoch- und Tiefpunkt, Druckring, Randentwässerung



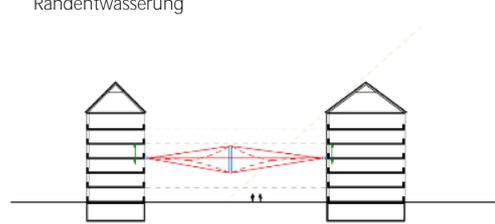
Doppellagiges Dach, Hoch- und Tiefpunkt, Abspannung, Randentwässerung



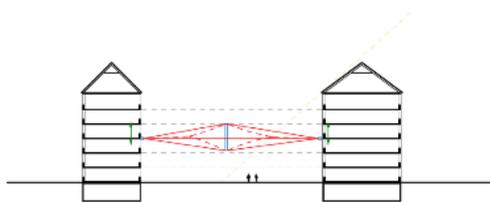
Einlagiges Dach, Hochpunkt, Abspannung, Randentwässerung



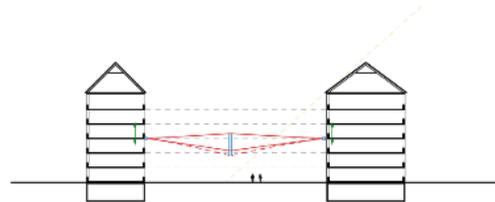
Doppellagiges Dach, Hoch- und Tiefpunkt, Druckring, Randentwässerung



Doppellagiges Dach, Hoch- und Tiefpunkt, Druckring, Mittlentwässerung



Doppellagiges Dach, Hoch- und Tiefpunkt, Druckring, verstärkter Krümmung oben, Randentwässerung



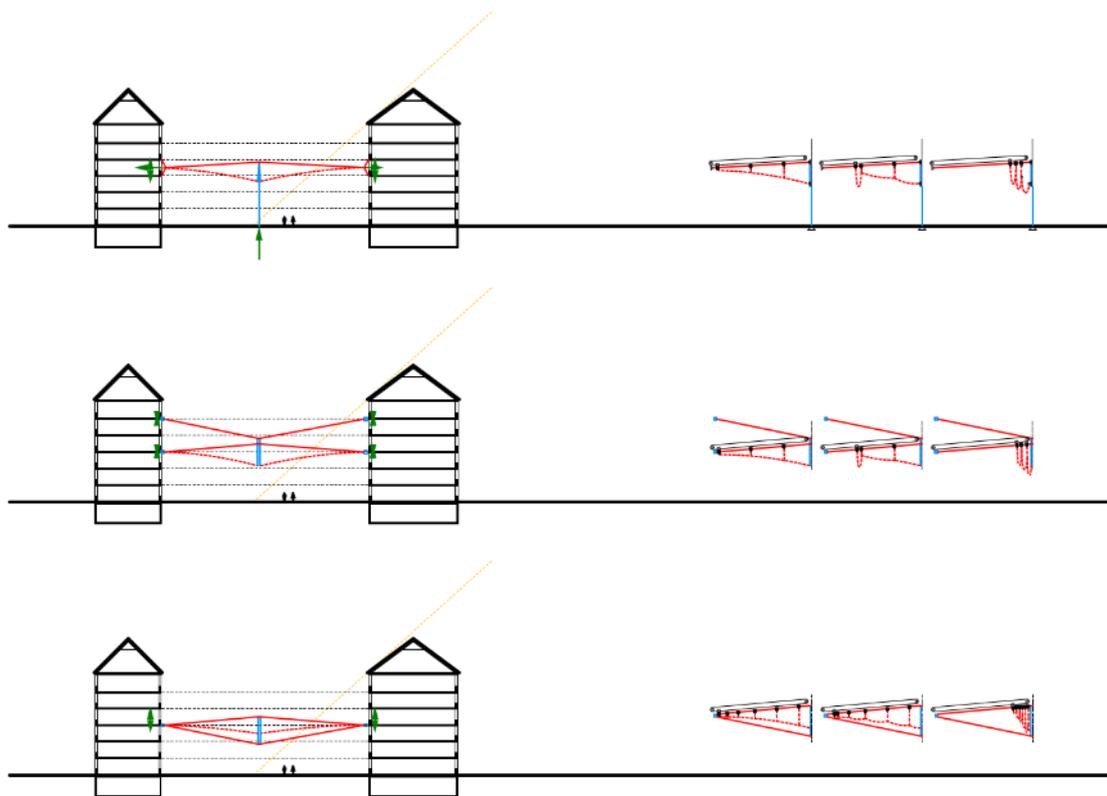
Einlagiges Dach, Tiefpunkt, Druckring, Windsogstabilisierung durch Tragseil offset, Mittlentwässerung,

(eigene Darstellung)

Bei einem polygonalen Innenhof wie bei der Alten Post können mehrere Arten von Teilungen verwendet werden. Das Tragseil ist waagrecht angeordnet, so wie der Schlitten, der von einer Seilschlaufe angetrieben wird.

Für das Antriebs- und Bewegungssystem des Daches, werden die folgenden drei Varianten vorgeschlagen. In diesen Fällen ist das Antriebseil parallel zum Tragseil, vertikale Hänger werden zur Raffung der ungespannten Membran verwendet. Die Hänger können in unterschiedlichen Abständen angeordnet werden, um sicherzustellen, dass es minimale Kontakt zwischen der durchgehängten Membran und anderen Strukturen gibt.

Abbildung 104  
Wanderung des Daches



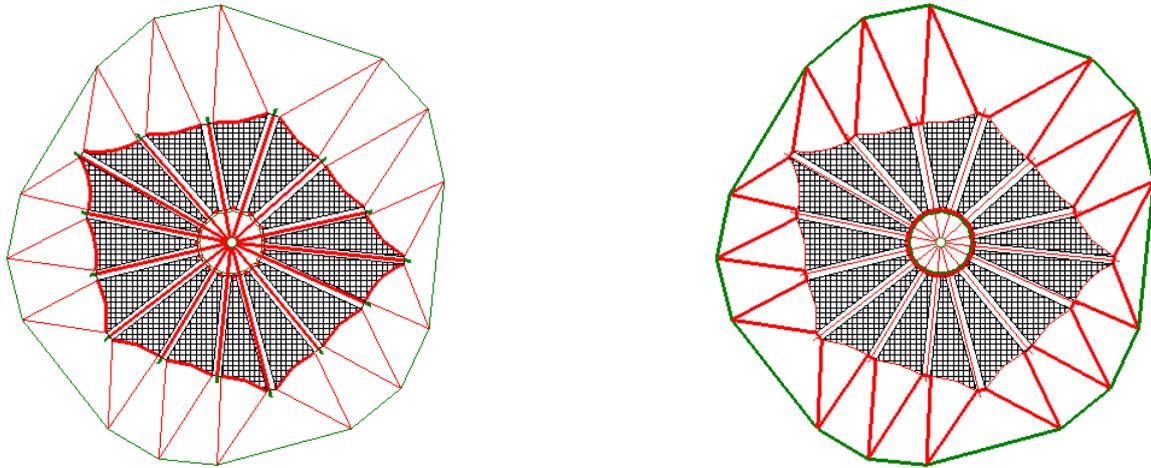
(eigene Darstellung)

### 5.2.1.2 Horizontales Gleichgewicht

Das Ziel der Formfindung für das zentral geräffte Dach, welches sich entlang des Tragseils bewegt, besteht darin, dass alle Vorspannkraften in Richtung des Tragseils orientiert und verankert werden können. Für den unerwünschten Fall, dass die erforderliche Vorspannung der Randseile an einer Ecke nicht in Richtung der Tragseile zeigt, würde diese Kraft (der Querkraftanteil davon) ein Knicken im Tragseil hervorrufen und ein Verklemmen verursachen. Hierfür war die entwickelte grafische Methode aus Kapitel 4.2.7 nützlich.

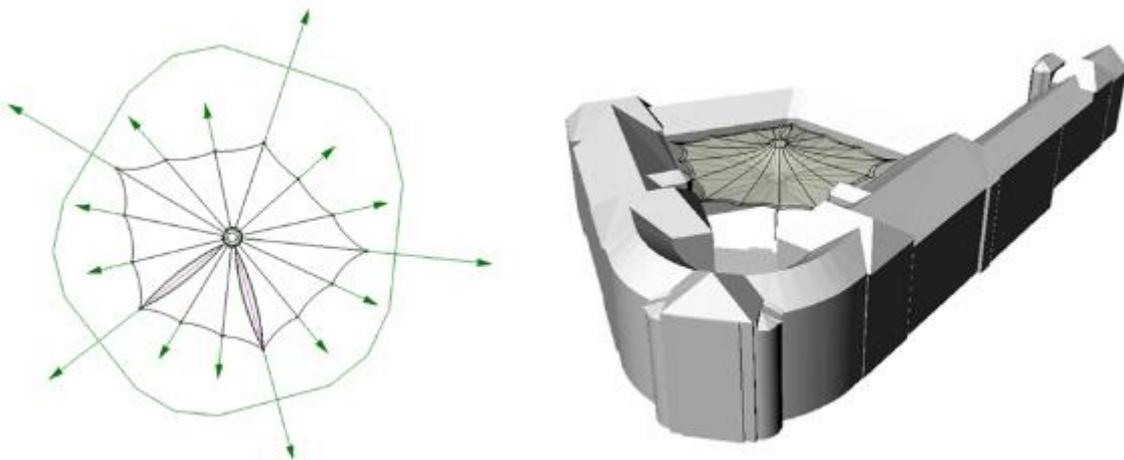
Bei dem planaren Gleichgewicht, welches mit grafischen Methoden gefunden wird, kann die Formfindung der 3D-Geometrie durch Skalierung der 2D-Kräfte mit Steigungen erfolgen, die durch die vorgesehene Höhendifferenz zwischen entsprechenden Endpunkten eines Randseils oder Grat-Kehlseils bestimmt werden.

Abbildung 105  
Form- und Kraftdiagramme (fette Linien)



(eigene Darstellung)

Abbildung 106  
Equilibrium/Formfindung mit Kiwi!3D

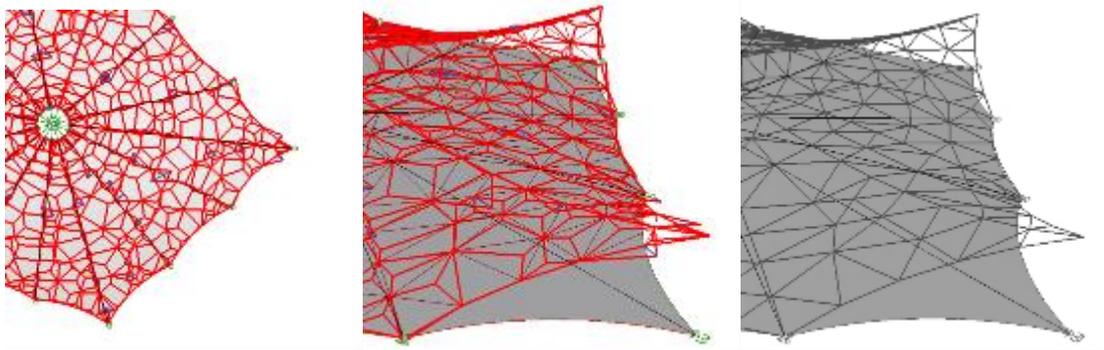


(eigene Darstellung)

Nachdem das Gleichgewicht in 2D entwickelt wurde, wird die 3D-Formfindung mit den vorgesehenen Randseilkräften informiert. Dies kann in zwei Schnitten erfolgen. Der erste ist die Kraftdichtemethode. Aufgrund des linearen Lösungsschemas kann dies zu schnellen Iterationen führen. Da alle Form- und Kraftinformationen in 2D vorgegeben sind, sind die Kraftdichten bekannt und werden beim Heben der 2D-Geometrie in 3D als konstant angesehen. Die Eingaben in diesem Prozess sind die Höhen der Verankerung und

die unbestimmten Kräfte der radialen Grat- und Kehlseile. Der zweite Schnitt erfolgt über FEM. In ähnlicher Weise wird die Vorspannung der Seilelemente durch Skalierung der 2D-Kräfte mit einem durch die Steigung bestimmten Faktor ermittelt, nämlich je steiler das Gefälle eines Seils in 3D ist, desto größer müssen die in 2D ermittelten Kräfte skaliert werden.

Abbildung 107  
Formfindung in 3D durch Kraftdichtemethode



(eigene Darstellung)

### 5.2.2 Statische Analyse und Verankerung

Die Methode der ebenen Gleichgewichtsfindung ermöglicht nicht nur einen intuitiven Formfindungsprozess, sondern auch das direkte Ablesen der Verankerungskräfte. Im Falle eines Ankerpunktes, an dem zwei Randseile angeschlossen sind, ist die planare Verankerungskraft der Abstand zwischen den Mittelpunkten des Randseilpaares multipliziert mit der Vorspannung der Membran, bei Besonderheiten wie Grat- oder Kehlseilen addieren sich deren Kräfte. Die tatsächliche Verankerungskraft in 3D ist dann, wie beschrieben, die Summe der verbundenen Seilkräfte, skaliert mit dem Neigungsfaktor. Beispielsweise ist der Abstand der Bogenzentren 10 m, die Vorspannung der Membrane beträgt 0,5 kN/m, ein Gratseil nimmt eine Flächenkraft von 10 kN auf und hat eine Neigung von 30°, dies ergibt die Verankerungskraft als:

$$F_H = 10 \times 0,5 + 3 = 8 \text{ [kN]}$$

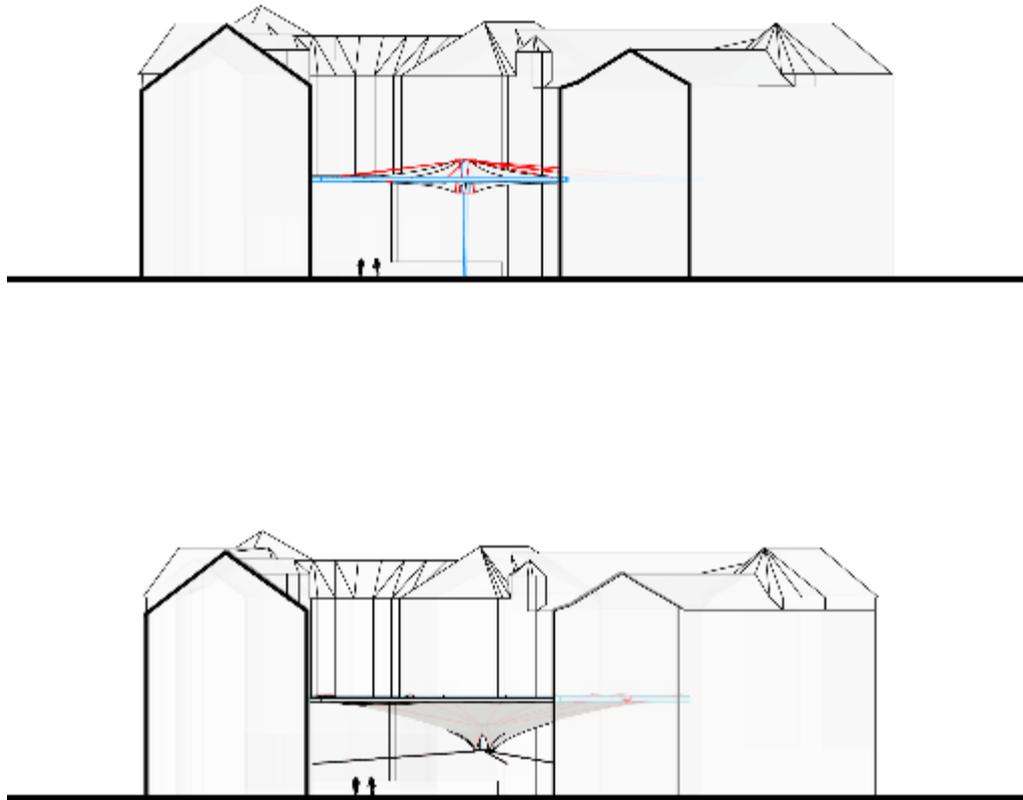
$$F_V = 10 \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 5,8 \text{ [kN]}$$

Man beachte, dass hier der Randseilbogen als eher flach angesehen wird, d.h. die vertikale Komponente der Seilkraft wird vernachlässigt. Dies ist bei einem stark geneigten Randseil nicht der Fall.

Falls die Verankerungskapazität an dem aktuellen Gebäude begrenzt ist, kann ein Druckring zum Kurzschließen der horizontalen Kräfte verwendet werden. Die Planung des Druckrings kann auch mit der oben beschriebenen grafischen Methode erfolgen.

Windkräfte führen in den Auflagerkräften erfahrungsgemäß zum 4-5-fachen der Vorspannkräfte. In einem ersten Überschlag können also die grafisch ermittelten Kräfte mit einem Faktor 4-5 herangezogen werden. In jedem Fall wird im weiteren Entwurfsprozess das System aber in eine 3D FEM Analyse überführt welche dann auch die exakte Ermittlung der Windlasten ermöglicht.

Abbildung 108  
Zwei Varianten



(eigene Darstellung)

Für die Vorbemessung des Tragwerks können die nachfolgend aufgeführten Randbedingungen verwendet werden. Diese Vorgehensweise ist als allgemein zu betrachten, da projektspezifische Randbedingungen, Material- und Konstruktionsvorgaben zu berücksichtigen sind. Für die Bemessung der Membrane wird die Methode der zulässigen Spannung verwendet, hier mit Abminderungsfaktoren nach Minte, die auch in die Vornorm des Eurocode übernommen wurden (Prospect for European guidance for the structural design of tensile membrane structures). Im Allgemeinen sind Membranwerkstoffe mit einem Teilsicherheitsbeiwert von 4,35 für ständige Lasten und von 2,35 zu bemessen.

Für die nichtlineare Berechnung der Spannungen können faktorisierte Lasten mit den Lastsicherheitsbeiwerten nach Eurocode angesetzt werden. Superposition der Ergebnisse ist aufgrund des nichtlinearen Tragverhaltens nicht möglich. Alle Lastkombinationen müssen daher einzeln gerechnet werden. Da es sich um eine wanderbare Struktur handelt, werde kleine Schneelasten oder zumindest nur geringe angesetzt.

Für die Bemessung von Stahlkonstruktionen wird der Grenzzustand der Tragfähigkeit (Spannungen) bewertet. Die Gebrauchstauglichkeit (Verformungen) wird bei Membrandtragwerken in der Regel lediglich die Gefahr von Wassersackbildung bewertet. Hier wird die Membranverformung unter Schnee, oder Regenlast überprüft,

um sicherzustellen, dass sich keine lokalen Tiefpunkte einstellen in denen sich Tau- oder Regenwasser sammelt.

- Die folgenden Lastfallkombinationen sollten mindestens gerechnet verwendet.

1,0P + 1,35G

2,0P + 1,35G (Erstaufbau mit höherer Vorspannung)

1,0P + 1,0G + 1,0 Regen (Wassersackbildung)

1.0P+1.0G+1.5W<sub>sog</sub>

1.0P+1.35G+1.5W<sub>druck</sub>

1.0P+1.35G+0.6\*1.5W<sub>druck</sub>+1.5 Regen

### 5.2.2.1 FE-Berechnungsmodell

Die Membrankonstruktion hat eine räumlich doppelgekrümmte Form, welche durch Hoch- und Tiefpunkte, sowie gratbildende Seile definiert ist. Die Membransegmente werden durch Eigengewicht, Vorspannung, Wind und Regen belastet.

Die Ermittlung der Membranform erfolgt durch einen numerischen Formfindungsansatz, bei dem eine im Lastfall Vorspannung spannungsgleiche Minimalfläche innerhalb der gegebenen Randgeometrie generiert wird. Die Ergebnisse der Kräfte, Verformungen und der Dimensionierung der Tragglieder aus diesen statischen Berechnungen sind nur für diese ermittelte Membrangeometrie, aufgrund des engen Zusammenhangs zwischen Form und Steifigkeit, gültig.

Die statische Berechnung im vorliegenden Forschungsprojekt erfolgt mit dem Programmmodul ASE 2023 der SOFISTIK AG. ASE berechnet die statischen Systemreaktionen eines dreidimensionalen Finiten Element Systems und hat sich in den vergangenen Jahren bereits bei verschiedenen Berechnungen im Bereich der Stahl-Membran-Tragwerke bewährt.

Das statische System ist aus dreidimensionalen Membran-, Balken- und Seilelementen aufgebaut. Die Stahlelemente werden mit isotrop, linear elastischen Materialeigenschaften, die Membrane mit nichtlinearen Materialeigenschaften modelliert. Die Schnittgrößen werden nach Theorie 3. Ordnung ermittelt.

### 5.2.2.2 Variante I

Im Folgenden wird das FE-Modell der Entwurfsvariante 1 mit den wesentlichen Berechnungsergebnissen gezeigt:

Abbildung 109

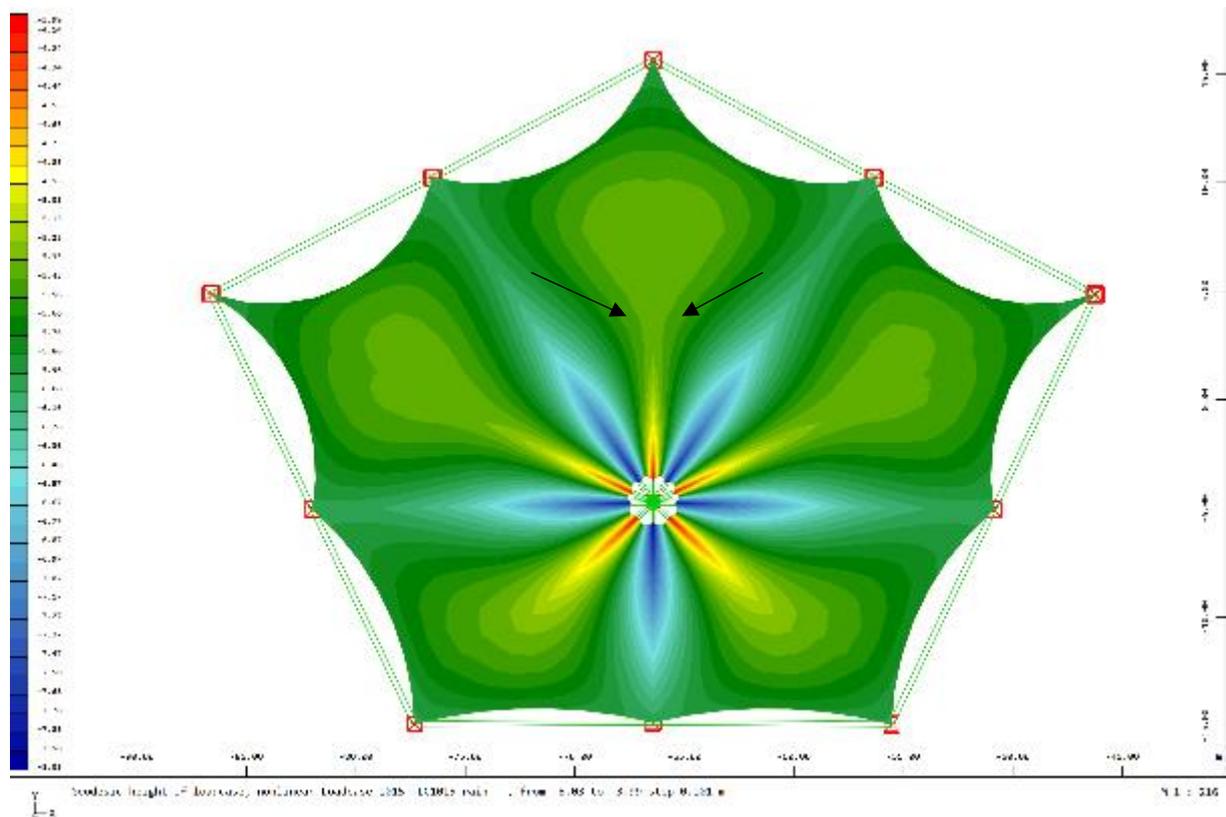
FE-Modell Varianten I: Ergebnis der Formfindung mit isotroper Membranspannung



(eigene Darstellung)

Abbildung 110

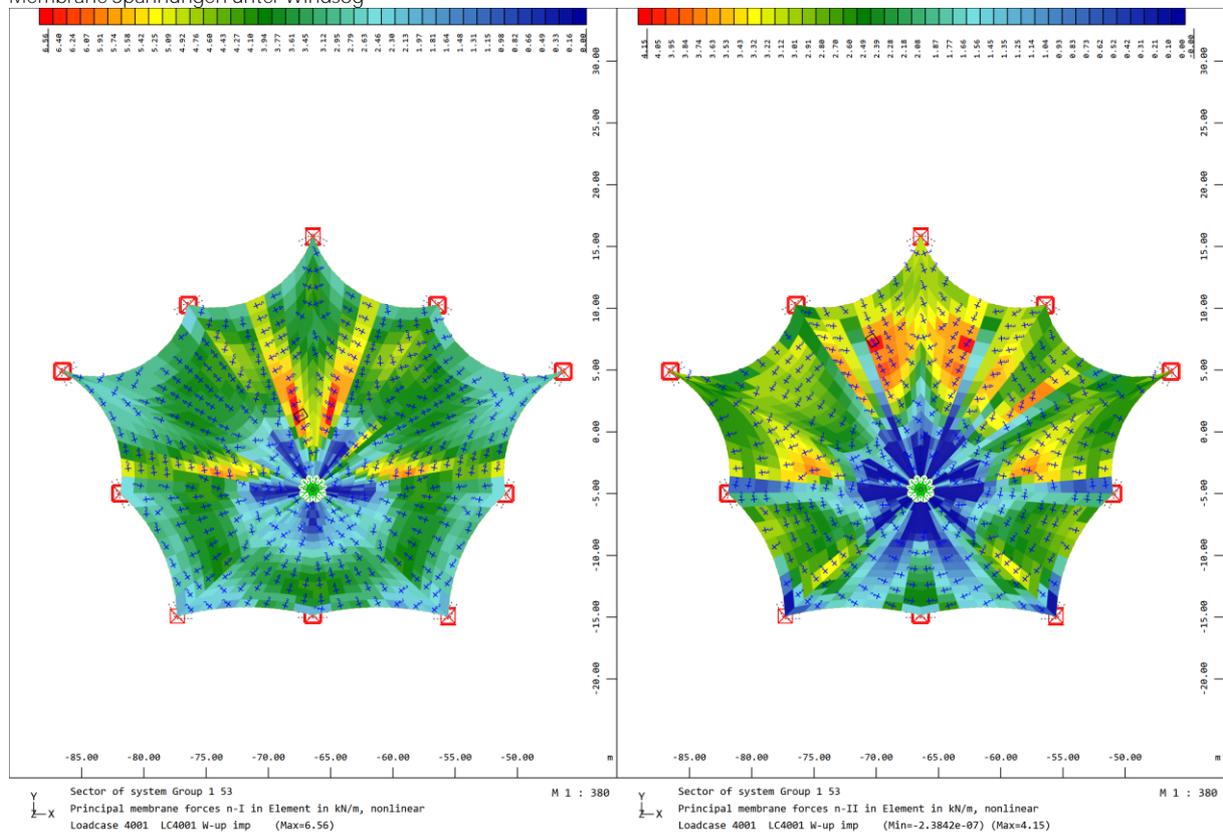
Entwässerung des Dachs



(eigene Darstellung)

Die Vorspannung der Grat- und Kehlseile ist so ausgelegt, dass Wassersackbildung verhindert wird. Beanspruchung der Membrane unter Windlast (Böengeschwindigkeitsdruck 0,5 kPa, normierter Windlastkoeffizient von -0,7 und +0,3) ist wie unter gezeigt.

Abbildung 111  
Membrane Spannungen unter Windsog

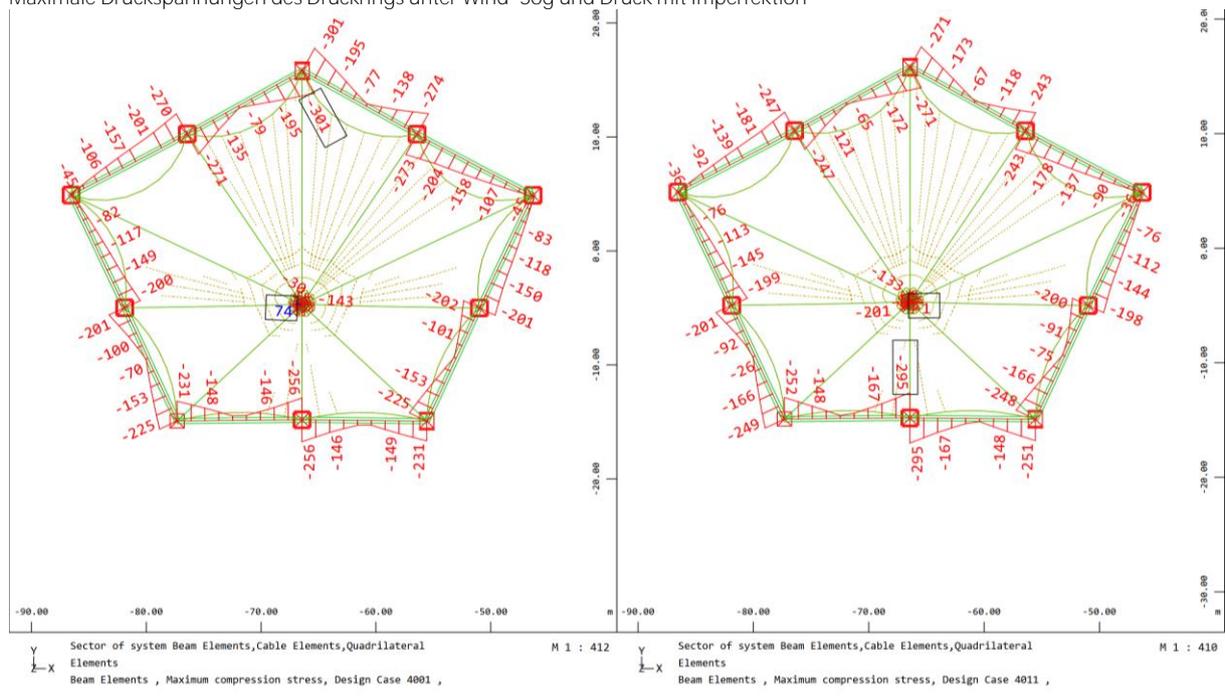


(eigene Darstellung)

Die Spannung des Druckrings mit Imperfektion aus der Knickform nach EC3 wurde berechnet. Der Ring wird allerdings überwiegend durch Biegung beansprucht.

Abbildung 112

Maximale Druckspannungen des Druckrings unter Wind- Sog und Druck mit Imperfektion



(eigene Darstellung)

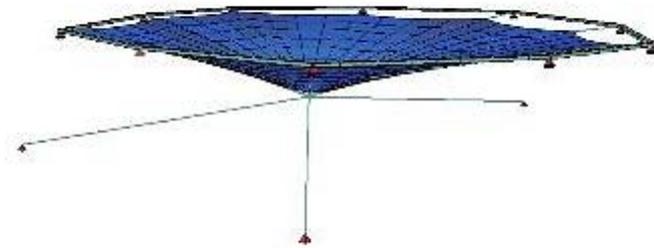
### 5.2.2.3 Variante II

Bei dieser Version ist die Form des Druckrings so angepasst das Biegung minimiert wird. Dadurch kann eine leichtere Konstruktion realisiert werden.

Die Öffnung zur Nordseite des Geländes wird wegen des Sonnenwinkels teilweise offengelassen. Eine Verringerung unnötiger Abdeckungen könnte den Luftaustausch fördern. Obwohl auch dieser Entwurf symmetrisch ist, ist es nicht aufwändig, in geeigneten Situationen ein asymmetrisches Dach zu erzeugen, wenn man die vorhandene Beschattung vor Ort berücksichtigt. Wenn das Regenwasser nicht in der Mitte (wie in diesem Fall), sondern am Rande des Hofes abgeleitet werden soll, können die Abspannseile durch einen Mast ersetzt werden, so dass das Dach umgedreht wird.

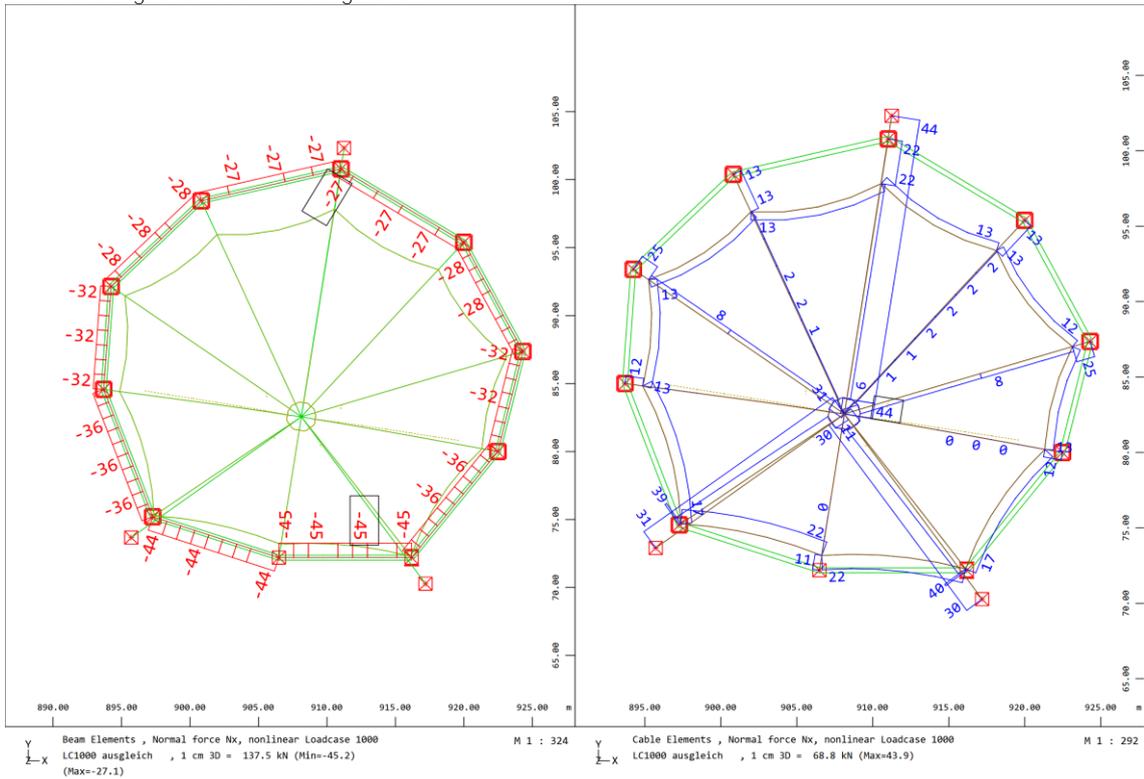
Abbildung 113

FE-Modell Varianten II: Ergebnis der Formfindung mit isotroper Membranspannung



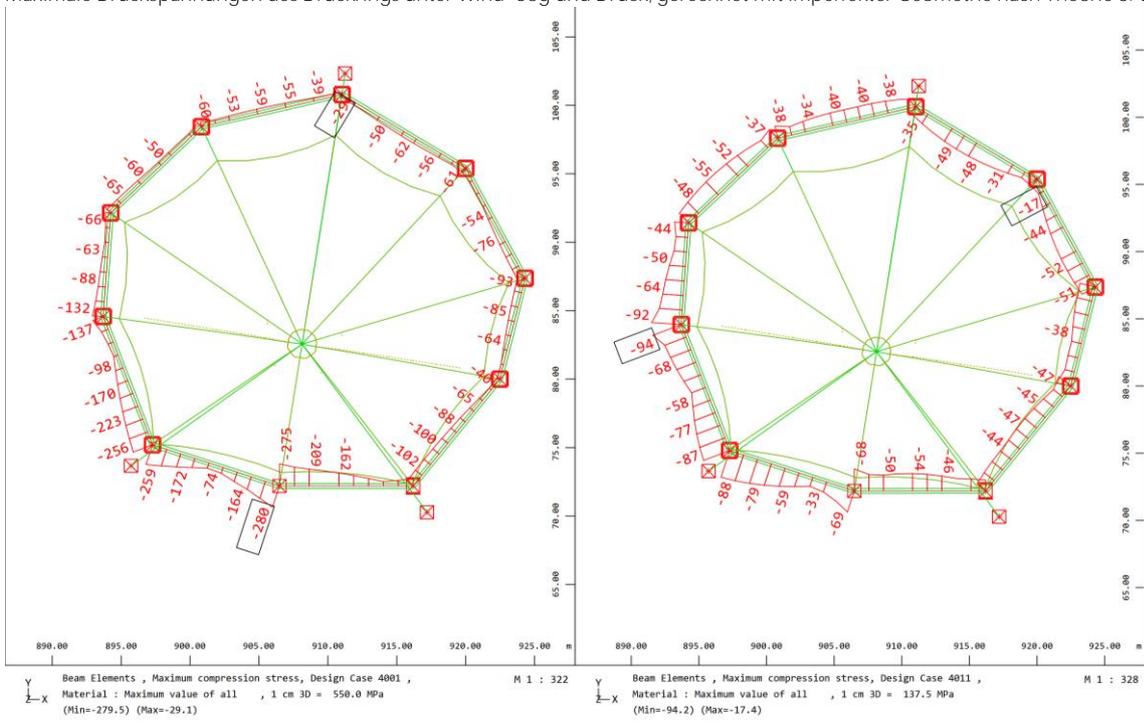
(eigene Darstellung)

Abbildung 114  
Druck- und Zugkräfte im Form-finding Lastfall



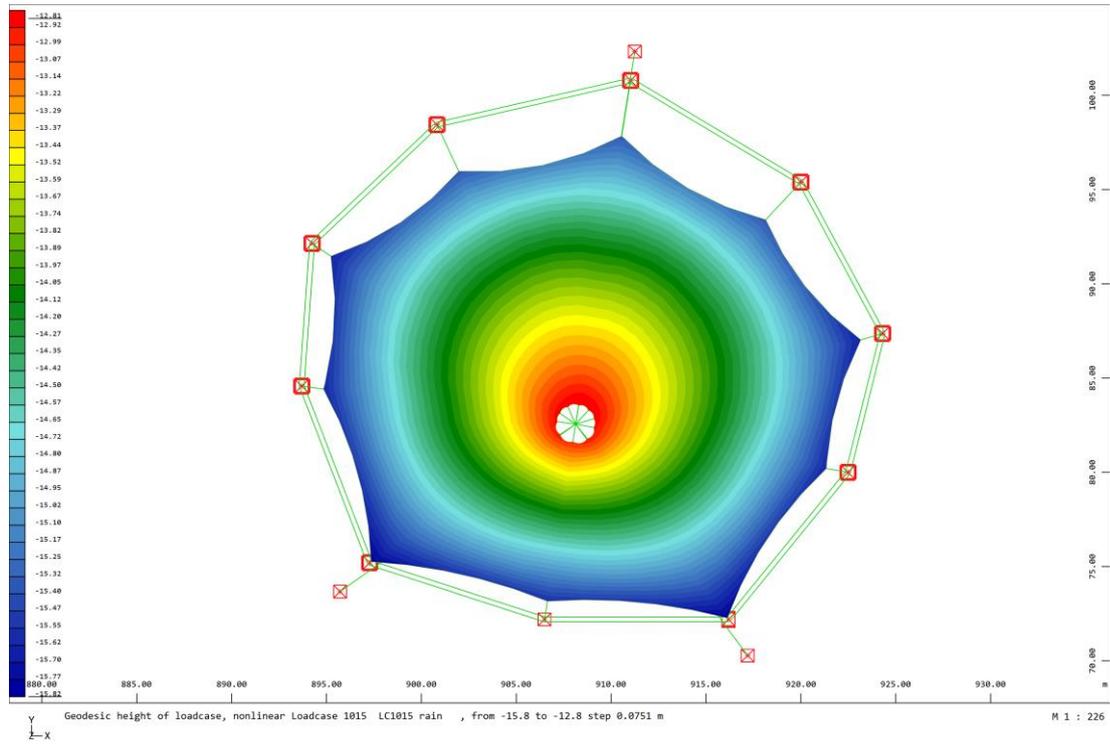
(eigene Darstellung)

Abbildung 115  
Maximale Druckspannungen des Druckrings unter Wind- Sog und Druck, gerechnet mit Imperfekter Geometrie nach Theorie 3. Ordnung



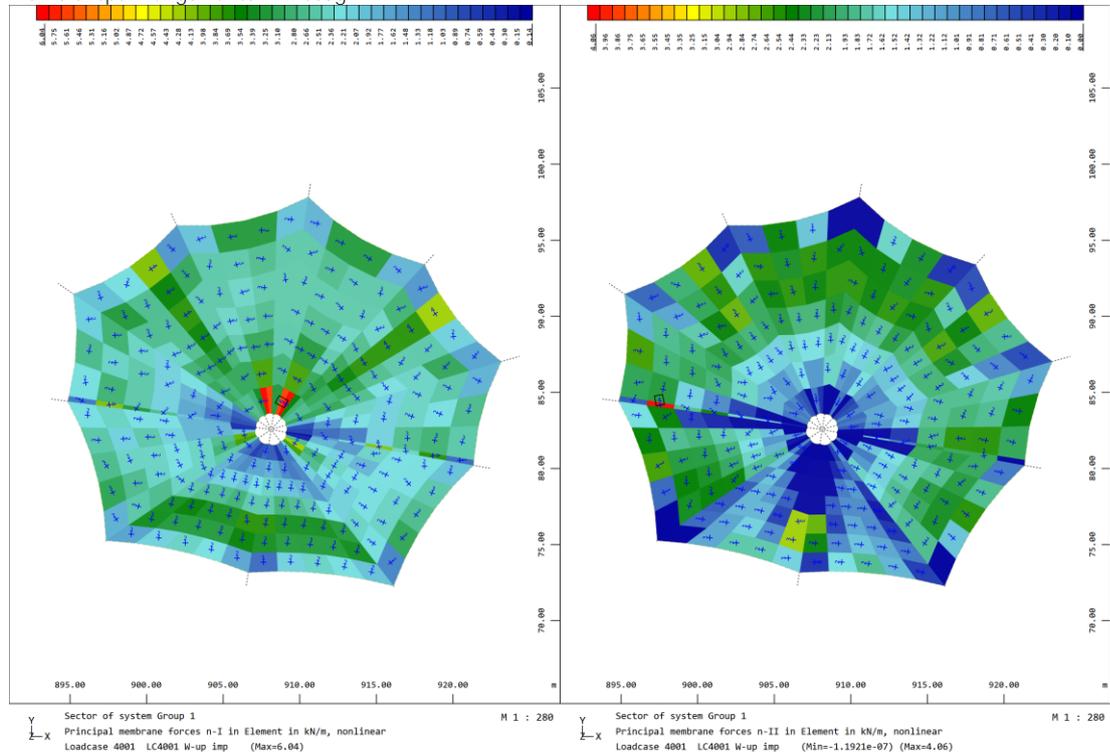
(eigene Darstellung)

Abbildung 116  
Entwässerung des Dachs



(eigene Darstellung)

Abbildung 117  
Membranspannungen unter Windsog



(eigene Darstellung)

## 5.3 Auswertung der klimatischen Randbedingungen

### 5.3.1 UTCI und Solarradiationsanalyse

Um die Beschattung eines bestimmten Standorts zu optimieren, ist die Untersuchung des vorhandenen Schattenwurfs der umliegenden Gebäude erforderlich. Die Schattenform einer bestimmten Stunde des Jahres kann mit Hilfe des Sonnenwinkels berechnet und durch Unterteilung des betrachteten Bereichs ausgewertet werden. Der Zeitraum, d.h. welche Stunden des Jahres von Interesse sind, kann auch mithilfe des *Ladybug Tools* in Rhino Grasshopper ermittelt werden (<https://www.ladybug.tools/>).

Die Stadt Kassel befindet sich auf dem Breitengrad 51°N. Dies ergibt eine maximale Sonnenhöhe von etwa 90°- (51°-23°), oder 62°. Um die Untersuchung der Sonneneinstrahlung auf die kritischen potenziell heißen Tage im Jahr und die Stunden mit hohem Sonnenstand am Tag zu konzentrieren, wird eine Auswahl der Jahresstunden wie folgt getroffen.

Die gewählte Jahreszeit ist Juni bis September, 10:00 bis 14:00 Uhr. Dies sind insgesamt 610 Stunden. Wenn die Sonne tief steht, gleicht der lange Schattenwurf den Unterschied tendenziell aus.

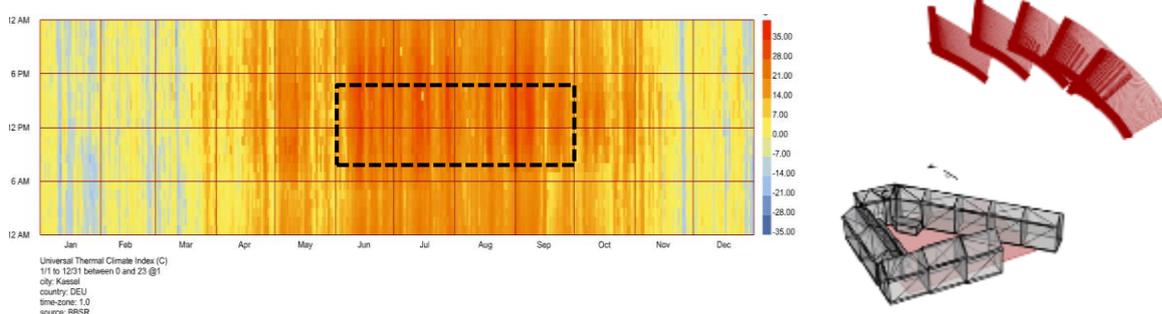
Der universelle thermische Klimaindex (Universal thermal climate index: UTCI) beschreibt die Temperatur, die der Mensch empfindet, wenn er sich in der sogenannten Referenzumgebung befindet. Er hängt von der mittleren Strahlungstemperatur ( $T_{mrt}$ ), der Lufttemperatur ( $T_{air}$ ), der Windgeschwindigkeit und der relativen Luftfeuchtigkeit ab. In der Referenzumgebung wird angenommen, dass:

- $T_{mrt} - T_{air} = 0$
- Relative Luftfeuchtigkeit 50%
- kein Wind / ruhige Luft

So würde beispielsweise eine Lufttemperatur von 30° auf einer Wiese das gleiche Gefühl von Hitzestress hervorrufen wie ein 25°-Tag auf einem Betonboden; oder das gleiche, wenn ein 30°-Tag mit Brise mit einem 25°-Tag ohne Wind verglichen wird.

Da der Effekt der Himmelserwärmung, einschließlich der direkten Sonnenstrahlung und der diffusen Strahlung sowie der nächtlichen Himmelsabkühlung, im UTCI-Modell als entscheidender Faktor angesehen wird, gefolgt von Wind und anderen Faktoren (Mackey, C. et al., 2017), wird bei der Bewertung der Auslegung eines Beschattungsdachs nur die direkte Sonnenstrahlung berücksichtigt.

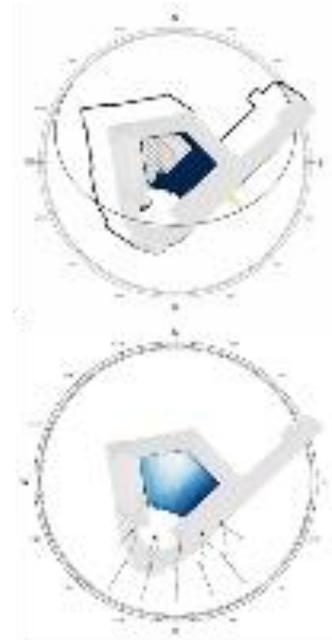
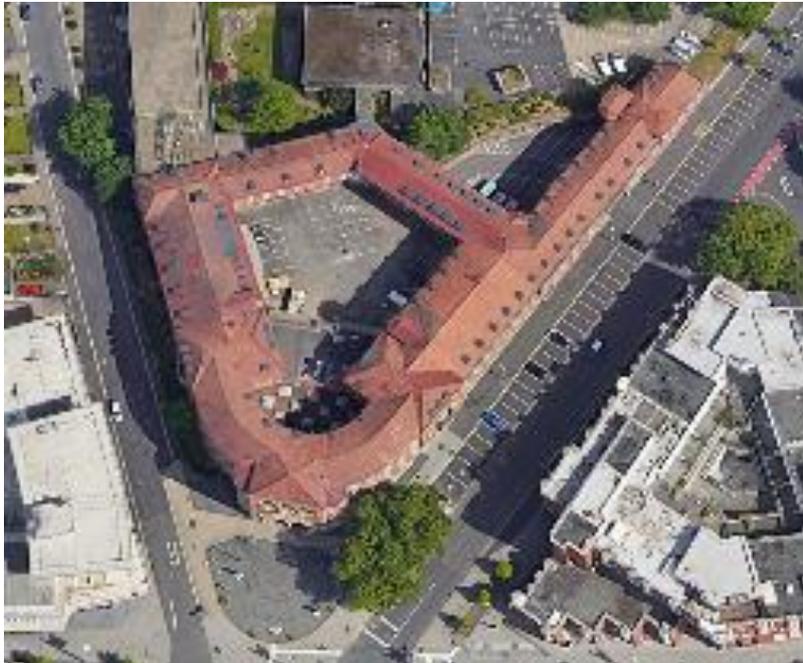
Abbildung 118  
Zeitraumen der Analyse: 8 Uhr bis 16 Uhr von Juni bis September (inklusive)



(eigene Darstellung)

Die Untersuchung der Sonneneinstrahlung auf dem Gelände wurde im Rahmen der ausgewählten Jahreszeiten durchgeführt. Das akkumulierte Schattenmuster zeigt, dass der südliche Teil des Hofes durch das Gebäude beschattet wird, auf dessen Grundlage ein Dach entwickelt werden kann.

Abbildung 119  
Schattenwurf im Innenhof der Altenpost



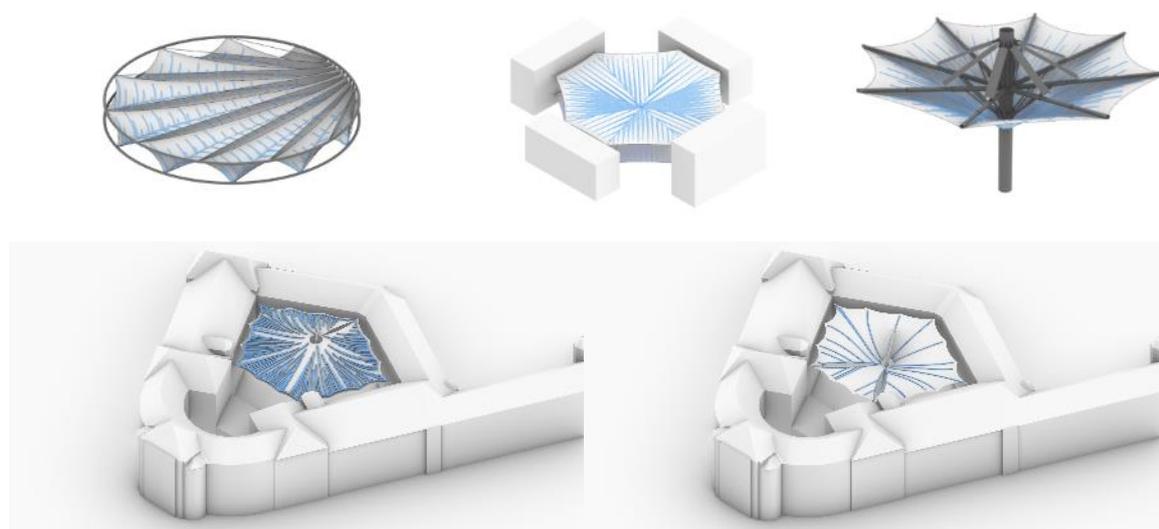
(links: Google Map; recht: eigene Darstellung)

### 5.3.2 Regenfluss Analyse

Eine Regenfluss-Analyse ist wichtig, um das Abflussverhalten von Regenwasser zu verstehen, insbesondere in städtischen Gebieten mit versiegelten Flächen, wo die Entwässerung von Regenwasser oft problematisch ist.

Eine gründliche Regenfluss-Analyse ist besonders in Zeiten zunehmender Wetterextreme, wie heftigen Regenfällen und Starkregen, von großer Bedeutung, um die Städte besser auf solche Ereignisse vorzubereiten und das Risiko von Überschwemmungen und anderen Wasserbezogenen Problemen zu minimieren. Auf den Membranflächen lässt sich der Regefluss durch Vektoren simulieren welche senkrecht auf den Höhenlinien der Fläche stehen (Abbildung 120).

Abbildung 120  
Regenfluss Analyse von unterschiedliche Membrane Überdachungen



(eigene Darstellung)

Die Regenwassernutzung ist eine nachhaltige Methode, um wertvolles Trinkwasser zu sparen und verschiedene Zwecke zu erfüllen. In Kassel fängt das RMR (Regenwassermanagement-System) auf einer Fläche von 360 m<sup>2</sup> etwa 245.520 Liter Regenwasser pro Jahr ein. Mit dieser Menge könnte man 27.280 Toilettenspülungen durchführen, da für eine einzelne Toilettenspülung bis zu 9 Liter Wasser benötigt werden.

Regenwasser eignet sich aufgrund seines geringen Mineralgehalts besonders gut zum Spülen von Gläsern, da es nach dem Trocknen keine Schlieren hinterlässt. Ebenso kann es anstelle von Leitungswasser für die Reinigung von Innenräumen verwendet werden.

Das Citypoint-Einkaufszentrum in Kassel hat eine Glasfassade mit einer Fläche von etwa 5000 m<sup>2</sup>. Für die Reinigung einer Glasfassade werden in der Regel zwischen 0,7 und 1,2 Liter Wasser pro Quadratmeter benötigt. Mit der gesammelten Regenwassermenge könnte die Fassade des Einkaufszentrums 49 Mal gereinigt werden.

Ein weiterer Vorteil der Regenwassernutzung besteht darin, dass Bäume in der Stadt oft Schwierigkeiten haben, ausreichend Wasser zu bekommen, da sie von versiegelten Flächen umgeben sind und der Boden das Regenwasser nicht aufnehmen kann. Während Trockenperioden oder heißen Sommertagen könnten Bäume von einer zusätzlichen Bewässerung profitieren, die mit dem gesammelten Regenwasser durchgeführt werden könnte.

Insbesondere junge Bäume mit einem Stammumfang von bis zu 25 cm benötigen eine zusätzliche Bewässerung, da ihr Wurzelsystem noch nicht tief genug entwickelt ist, um in einer städtischen Umgebung

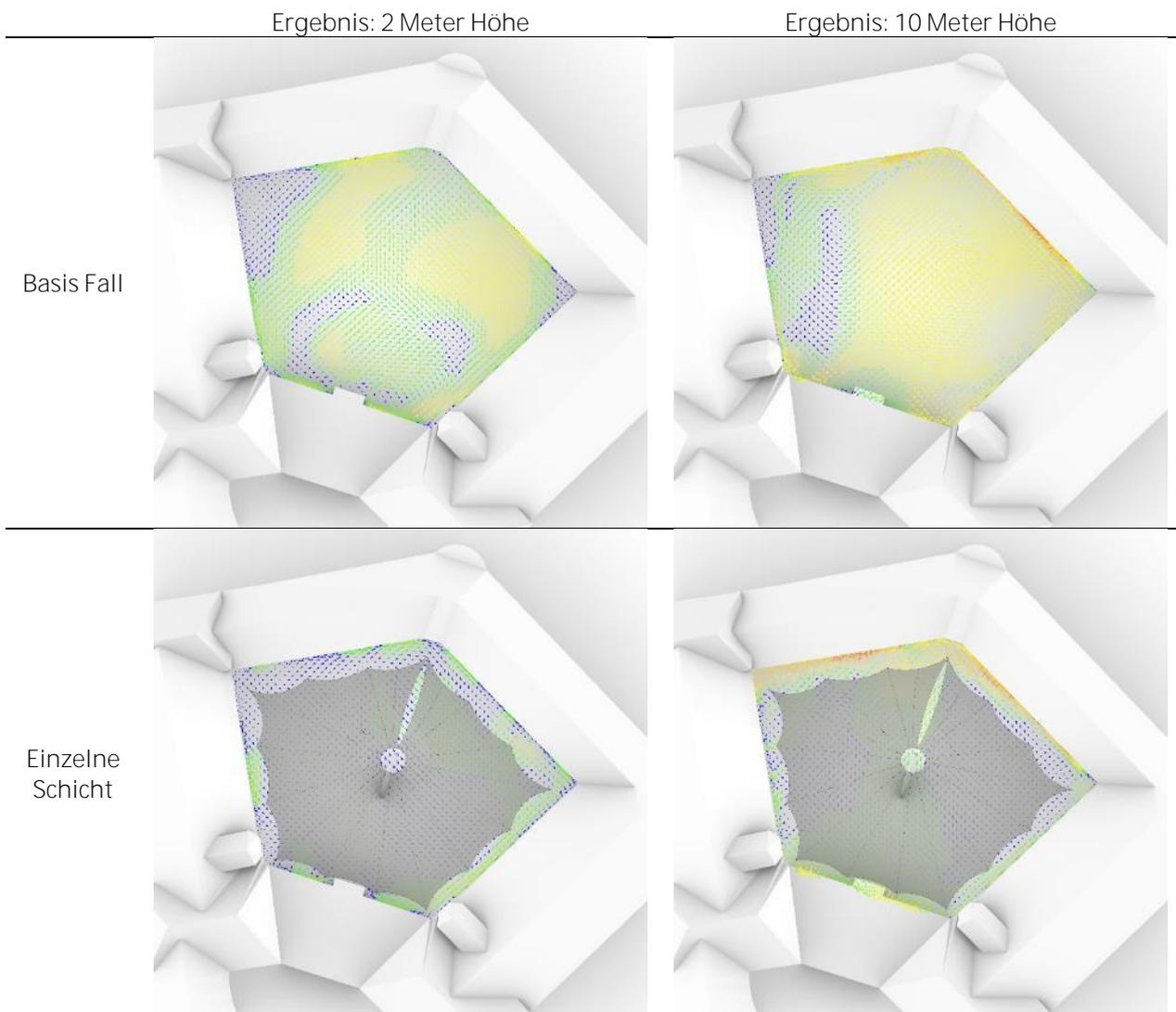
überleben zu können. Diese jungen Bäume müssten etwa zweimal im Monat mit etwa 100 Litern Wasser bewässert werden. Mit der gesammelten Regenwassermenge könnten 102 junge Bäume ein Jahr lang bewässert werden, was einen positiven Beitrag zur Stadtbegrünung und zum Umweltschutz leisten würde.

Das in der digitalen Case Study entwickelte Membrandach legt daher besonderen Augenmerk auf die Regenwassersammlung, welche besonders bei Trichterlösungen (Abbildung 120, unten rechts) einfach umzusetzen ist.

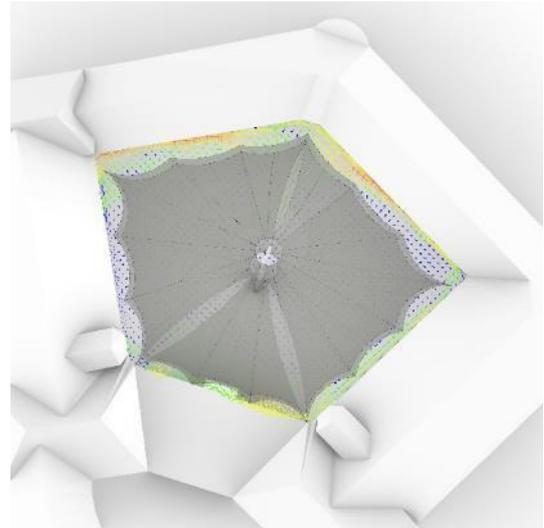
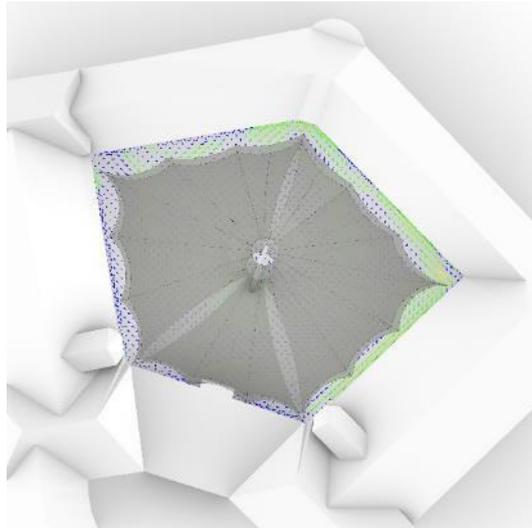
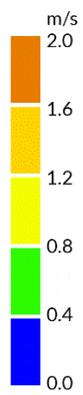
### 5.3.3 CFD-Analyse

Um das Raumklima unter dem Dach zu beurteilen reicht die reine Schattenanalyse nicht aus, da sie beispielsweise die durch Flächenöffnungen begünstigte Luftzirkulation nicht berücksichtigen kann. Um solche Phänomene simulieren zu können, kommen komplexe CFD (computational fluid dynamics) Methoden zum Einsatz. Die folgenden Abbildungen zeigen, wie mit der CFD Methode der Einfluss der Doppelschichtigkeit und Oberflächenöffnungen analysiert werden kann. Hier sei gesagt, dass dies eine erste vereinfachte Simulation ist bei der aufgrund der relativ groben Netzauflösung die positiven Eigenschaften der Öffnungen nur andeutungsweise an den Schnittdarstellungen ablesbar sind.

Abbildung 121  
Vergleichende CFD Analyse in der Aufsicht



Doppelte Schicht



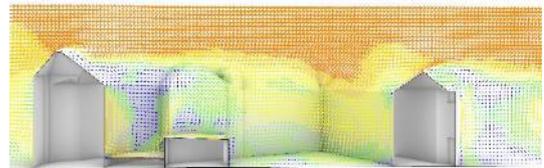
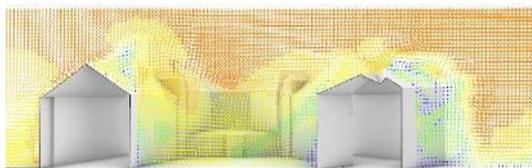
(eigene Darstellung)

Abbildung 122  
Vergleichende CFD Analyse im Schnitt

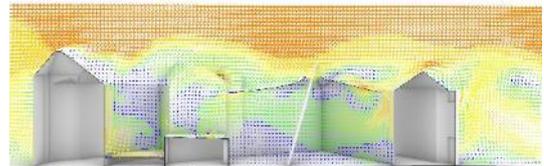
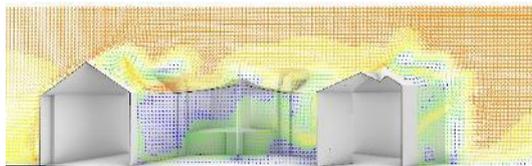
Abschnitt 1

Abschnitt 2

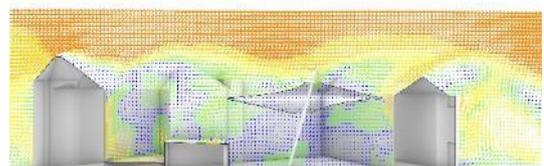
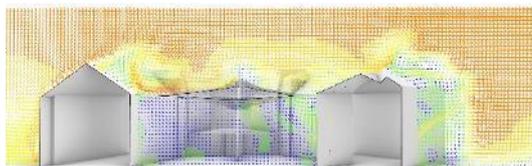
Basisfall



einzelne Schicht



doppelte Schicht



(eigene Darstellung)

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1 Im Rahmen des Forschungsprojektes neu Entwickelte Methoden und Ergebnisse

Eine städtebauliche Analyse zur Identifizierung von Hitzeinseln und der möglichen Anwendung wandelbarer Membrandächer zur Hitzebekämpfung erfordert eine gründliche Untersuchung verschiedener Faktoren. Die Methodik führt in erster Linie zu einer strukturierten Datensammlung, die sich folgendermaßen aufbaut:

Bei der Identifikation von Hitzeinseln ist es wichtig, Klimadaten der vergangenen Jahre zu analysieren und diese mit der bestehenden Bebauung, dem Versiegelungsgrad und den Materialoberflächen gleichzusetzen. Durch diese Untersuchung können bestehende Bereiche mit überdurchschnittlich hohen Temperaturen und Hitzebelastung erkannt und zukünftige Problemstellen identifiziert werden. Die Analyse der Geländebeschaffenheit ist entscheidend, um Gebiete mit eingeschränkter Luftzirkulation zu erkennen. Täler, enge Straßen und hohe Gebäude können die Luftzirkulation behindern und so zur Bildung von Hitzeinseln beitragen. Es ist wichtig, die Landnutzung zu bewerten, einschließlich Grünflächen, versiegelter Oberflächen, Gebäudehöhen und Dichte der Bebauung. Diese Faktoren beeinflussen den Grad der Hitzeabsorption und -abstrahlung in einem bestimmten Gebiet. Die Identifizierung von stark besiedelten Gebieten ist von Bedeutung, da dicht bevölkerte Bereiche oft mehr Wärme erzeugen und speichern können. Dies kann durch hohe Gebäude, viele Fahrzeuge und eine intensive menschliche Aktivität bedingt sein.

In der weiteren Ursachenanalyse für Hitzeinseln führen Identifizierungen von stark versiegelten Flächen, wie Straßen, Parkplätze und Gebäudedächer zu einer Feststellung ob und in welchem Umfang Maßnahmen erforderlich sind. Außerdem wird durch eine Bestätigung von Grünflächenmangel und einer Analyse der schattenwerfenden Gebäude festgestellt, welche Potentiale vorhanden sind.

In der Sozioökonomische Analyse werden verschiedene Bevölkerungsgruppen, die von Hitzeinseln betroffen sind untersucht. Zudem betrachtet man die wirtschaftlichen Folgen von Hitzeinseln, einschließlich Gesundheitskosten und Produktivitätsverlusten.

In einem Umsetzungsplan wird ein Entwicklungskonzept zur Integration von wandelbaren Membrandächern in die städtische Landschaft erstellt. Potenzielle Partner aus der Industrie, Forschung und Verwaltung zur Umsetzung des Plans werden mit ins Boot geholt, auch um die Finanzierungsmöglichkeiten, einschließlich staatlicher Mittel, privater Investitionen und internationaler Fördermittel festzulegen. Durch ein Monitoring und eine Evaluation wie z. B. die Einrichtung von Messstationen zur Überwachung von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und anderen relevanten Parametern vor und nach der Installation von Membrandächern kann in der späteren Bewertung maßgeblich dazu beitragen, dass die potentielle Effektivität der Membrandächer anhand der gesammelten Daten optimal ausgenutzt wird. Flexibilität für Anpassungen im Plan, basierend auf den gesammelten Erfahrungen und Ergebnissen der Überwachung führen zur Optimierung und dazu, dass die städtebauliche Analyse im Detail verschärft werden kann.

Grafische Verfahren zur Formfindung und statischen Analyse in frühen Entwurfsprozessen für eine integrale Bewertung von Form-Struktur und Klima wurden entwickelt. Der Workflow liefert eine präzise Darstellung der vorgespannten Membran in Echtzeit, die sowohl die formgefundene Geometrie als auch die wichtigen Informationen über die Verankerungskräfte präsentiert. In ähnlicher Weise liefert die Beschattungsanalyse, die durch Zählen der beschatteten Stunden durchgeführt wird, ein Einfaches, schnelles, aber repräsentatives Modell für die Abschwächung der Wärmeinsel. Die gekoppelte Analyse bietet den Planern Optionen, die effizient sind und sich für definierte Grenzen in einer frühen Entwurfsphase eignen.

Entwurfsvarianten wurden dokumentiert, wobei mehr Bewertungskriterien sowie Regenfluss und CFD benutzt wurden. Die sind besonders relevant bei porösen Dächern, wobei Lüftung am Tag und Abkühlung vom Nachthimmel gegen den Hitzeinseleffekt solchen Dächern attraktiven Optionen machen.

Umfangreiche Messergebnisse an einem wandelbaren Membrandach im städtischen Kontext wurden dokumentiert.

## 6.2 Ergebnisse der digitalen Case Study

Bei der Bearbeitung eines realen Entwurfsprojekts wurde die herausragende Bedeutung des Zusammenhangs zwischen Form, Struktur und Klima besonders deutlich. Ein integrativer Entwurfsansatz erwies sich als ebenso entscheidend wie die Fähigkeit, schnell verschiedene Entwurfsvarianten zu generieren.

In diesem Projekt zeigte sich, wie die Formgebung der Membrandächer einen direkten Einfluss auf ihre Fähigkeit hat, Schatten zu spenden und die Sonneneinstrahlung zu regulieren. Die Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten und klimatischen Bedingungen war von grundlegender Bedeutung, um die gewünschten in einen informierten Entwurfsprozess einsteigen zu können. Die Form- und Struktur der Membrandächer spielte nicht nur eine wesentliche Rolle für die Wandelbarkeit und statische Standsicherheit der Konstruktion, sondern ermöglichte auch die Sammlung von Regenwasser.

Zusätzlich erwies sich die Verwendung, digitaler Tools und graphischer Formfindungsmethoden zur schnellen Erstellung von Entwurfsvarianten als äußerst vorteilhaft. Dies ermöglichte es, verschiedene Szenarien zu analysieren und die Auswirkungen auf das Stadtklima sowie die ästhetische Integration in den urbanen Raum zu bewerten. Ein solcher agiler Ansatz erleichterte es, optimale Lösungen zu entwickeln und den Anforderungen der örtlichen Gegebenheiten gerecht zu werden.

Die Erkenntnisse aus dieser digitalen Fallstudie unterstreichen die Bedeutung einer ganzheitlichen Herangehensweise bei der Gestaltung von wandelbaren Membrandächern im urbanen Raum. Der Zusammenhang zwischen Form, Struktur und Klima sollte von Anfang an in den Planungsprozess integriert werden, um effektive Lösungen zu schaffen, die zur Verbesserung des Stadtklimas beitragen und gleichzeitig ästhetisch ansprechend sind. Dieser integrative Ansatz, unterstützt durch digitale Werkzeuge, ermöglicht es, die Herausforderungen des Klimadesigns im Kontext des Klimawandels erfolgreich anzugehen.

## 6.3 Entwurfsempfehlungen

Aus den Analysen ergibt sich, dass wandelbare Membrandächer zur Verbesserung des Stadtklimas überall dort sinnvoll sind, wo das Anpflanzen von Bäumen keine praktikable Option darstellt. Dies trifft insbesondere auf enge Straßenschluchten und Plätze mit Unterkellerung (z.B. Tiefgarage), wie sie häufig in Mittel- und Nordeuropa vorkommen, zu. Wenn großflächige Verschattungsmaßnahmen in Erwägung gezogen werden, müssen zahlreiche Randbedingungen und teilweise widersprüchliche Anforderungen aus dem Stadtraum, der angrenzenden Bebauung, den klimatischen Zielen und den konstruktiven Möglichkeiten sorgfältig abgewogen werden.

Basierend auf den Analysen und Entwicklungen in diesem Projekt können folgende generell gültige Maßnahmen im Entwurfsprozess hervorgehoben werden:

- Integrierte Planung: Die Planung von wandelbaren Membrandächern sollte in enger Abstimmung mit dem Städtebau, der architektonischen Gestaltung, der Tragwerkplanung und den klimatischen Zielen erfolgen. Eine ganzheitliche Betrachtung ist entscheidend.

- **Anpassungsfähigkeit:** Die Membrankonstruktionen sollten anpassungsfähig sein, um verschiedene klimatische Bedingungen und Nutzungsanforderungen zu erfüllen. Dies kann durch wandelbare Dächer mit Steuerungssystemen oder manuellen Einstellungen ermöglicht werden. Stabile Zwischenzustände (halboffen, halbgeschlossen) begünstigen die Anpassung an verschiedene Sonnenstände.
- **Berücksichtigung der Bebauung:** Die umliegende Bebauung und bestehende Gebäudestrukturen müssen bei der Platzierung von Membrandächern berücksichtigt werden, um Schattenwurf und Luftzirkulation optimal zu gestalten, sowie Risiken und potential für die Verankerung von Auflagerkräften frühzeitig im Entwurf zu berücksichtigen.
- **Materialauswahl:** Die Auswahl von umweltfreundlichen und recycelbaren Materialien ist von großer Bedeutung, um den ökologischen Fußabdruck der Membrandächer zu minimieren. PTFE als typisches Material für wandelbare Dächer ist diesbezüglich als besonders kritisch zu betrachten. Für alternativen aus Polyester-PVC bestehen Anstrengungen Rücknahmesysteme und Materialkreisläufe zu etablieren.
- **Begrünung und Wasserspeicherung:** Die Möglichkeit zur Begrünung von Membranüberdachungen kann bei permanenten Installationen geringer Spannweite in Betracht gezogen werden, um zur Abkühlung des Stadtklimas, zur Wasserspeicherung und zur Bewässerung der städtischen Vegetation beizutragen. Regenwasser/Grauwasser sollte in jedem Fall gezielt gesammelt und genutzt werden, um die Wasserversorgung zu unterstützen.
- **Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft:** Membrankonstruktionen aus Stahl und Textil sind typischer Weise sortenrein und trennbar, sodass eine sehr gute wiederverwendbarkeit oder recyklierbarkeit der Materialien gegeben ist. Bei den Textilien selber bedarf es aber weiterer Anstrengungen um funktionale Rücknahmesysteme zu etablieren. Eine Wiederverwendung der Textilien ist aufgrund der spezifischen Zuschnitte und im Vergleich zum Stahl geringeren Lebensdauer in der Regel nicht möglich.
- **Partizipation und Akzeptanz:** Die Einbeziehung der örtlichen Gemeinschaft und deren Akzeptanz für Membrandächer als Stadtklimamaßnahme sind entscheidend. Die Bürger sollten in den Planungsprozess einbezogen werden.
- **Überwachung und Wartung:** Eine regelmäßige Überwachung und Wartung insbesondere bei wandelbaren Dächern ist zwingend erforderlich. Es handelt sich hier um Maschinenbauteile welche in Regelmäßigen Zyklen gewartet werden müssen. Darauf ist explizit hinzuweisen, da dies bei Bauherren wenig etabliert ist.

Schrittweise Maßnahmenempfehlungen für den Entwurf:

- Grundsätzliche Analyse der Örtlichkeiten durch Klimanalysekarten und Versiegelungskarten als Basis von Bereichseingrenzungen
- Kompakte Eingrenzung in der Vorplanung durch eine gezielte Größenordnung der Fläche, die zu verschatten ist.
- Anwendung der Bewertungsmatrix zur Einstufung der Art der Überdachung und der Kategorie der Überwärmung.
- Bereichsidentifizierung über die Auswahl der Bewertungskriterien im Kontext der stadträumlichen Vergleichswerte.
- Bereichseingrenzung mit der Methode der Analyse zur Identifikation von Stadtskulturellen Räume.
- Standortgeometrie: Verschattung welche durch die vorhandenen Gebäude auftreten werden bei der Planung der Beschattungsvorrichtung berücksichtigt.

- 
- Auswahl einer bestimmten Dachtypologie abhängig von umgebender Architektur, Potentiale für die Regenwassersammlung, Verschattungsanalyse und möglichen Umgang mit den Verankerungskräften.
  - Optimierung der Dachform unter Berücksichtigung der Verankerungskräfte, der Verschattung, der größtmöglichen Luftzirkulation und der Regenwassersammlung.
  - Anwendungen grafischer Methoden beschleunigen die Formentwicklung in frühen Entwurfsstadien.
  - Computerbasierte Formfindung und statische Analyse des Daches. Die sich daraus ergebende Geometrie wird in die Exakte Klimaanalyse eingebettet, Verankerungskräfte werden in einer ersten Machbarkeitsanalyse überprüft.
  - Iteration: typischerweise müssen die Eingangsparameter, typologischen und geometrischen Entwurfsentscheidungen aufgrund der Ergebnisse der statischen und klimatischen Analyse angepasst werden.

## 6.4 Übertrag der Forschung in die Lehre

In der Analyse u.a. am Standort der Universität Kassel wurde anhand der Klimaanalysekarte Kassel festgestellt, dass auch der Campus von städtischen Hitzeinseln betroffen ist und in den Sommermonaten in einigen Bereichen des Campus eine deutlich erhöhte Temperatur wahrgenommen wird, zudem die Kapazitäten der Verschattungsdächer nicht voll ausgeschöpft werden.

Im Zuge dessen wurden mehrere Projekte und Seminare mit Studierenden durchgeführt, um Lösungen zu finden, die sich mit der Reduzierung von städtischen Hitzeinseln beschäftigen.

Es wurde ein Reallabor eingerichtet, in dem Studierende an der Entwicklung eines innerstädtischen textilen Verschattungsdaches mitwirken konnten. Von der Analyse des Standortes auf dem Campus der Universität Kassel bis hin zur Realisierung des Verschattungssegels. Durch die mikroklimatische Intervention konnte eine deutlich verbesserte Aufenthaltsqualität im öffentlichen Stadtraum geschaffen werden. Die kompakte Methodik und die konkrete Planung führten zur Umsetzung des Projektes und damit zu einer deutlichen Verbesserung des Standortes, wie in Abbildung 123 zu sehen ist.

Abbildung 123

Innerstädtische Verschattung zur Verbesserung des lokalen Mikroklimas mit wiederverwendetem Textil auf dem UniCampus Kassel



Quelle: Johann Taillebois, magda-map.de

Das Besondere an diesem Projekt war, dass die Membrandächer aus einem 25 Jahre alten Projekt zur Verfügung standen, hier konnte also das erste re-use im textilen Bauen umgesetzt werden. Die Form war also bereits vorgegeben und so konnten die in vorliegenden Forschungsprojekt entwickelten graphischen Methoden optimal eingesetzt werden, um die resultierenden Spannrichtungen optimal in die gegebenen Randbedingungen einzupassen. Zur Vertiefung konnten die Studierenden in einem Projektstudio eigene Ideen für weitere mögliche wandelbare Sonnensegel entwickeln.

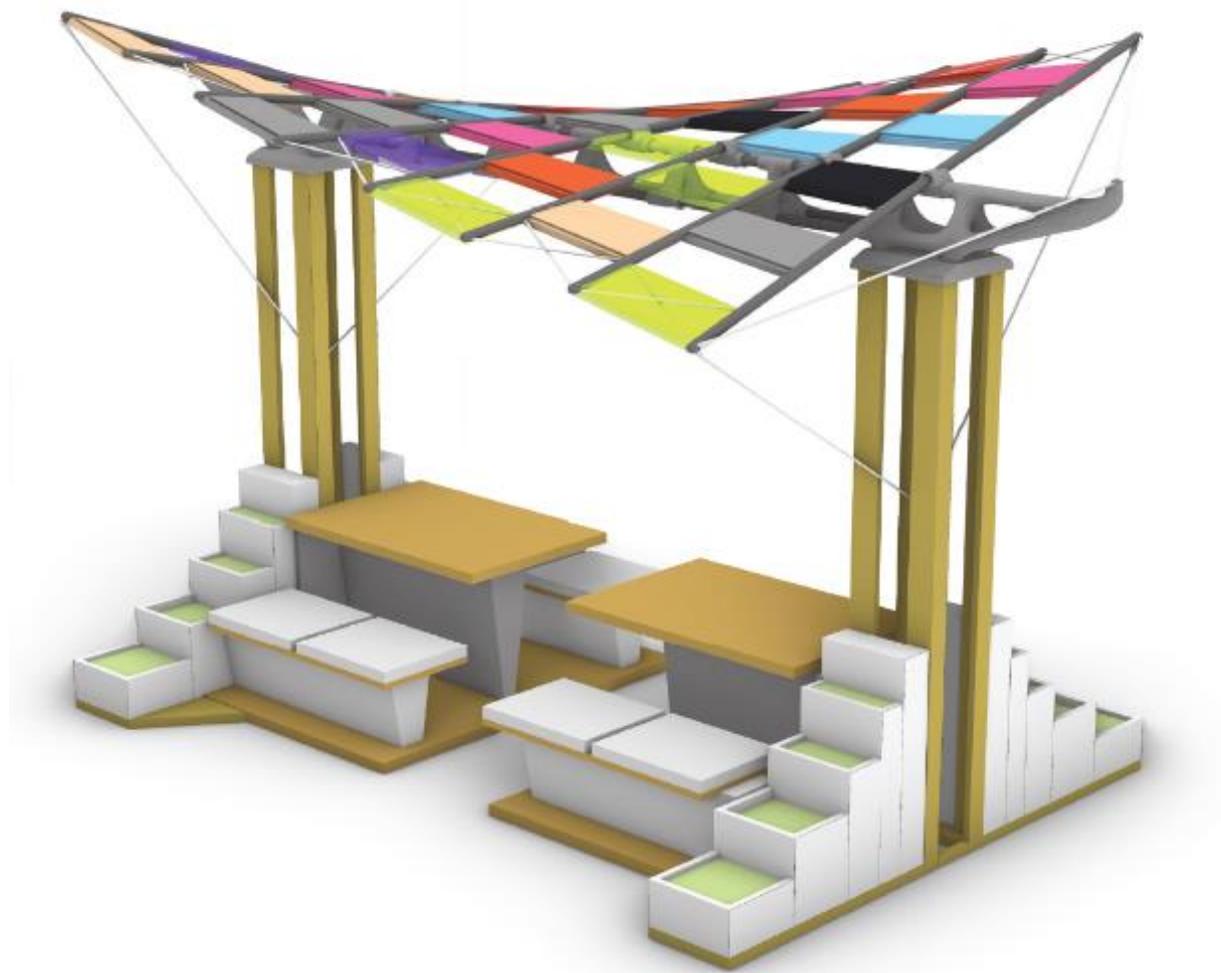
**In der Projektwerkstatt „Less:Heat“ wurde untersucht, inwieweit Textilien wiederverwendet werden können.** Da die Textilindustrie und der Umgang mit Kleidung eine große Belastung für die Umwelt darstellen und die große Menge an gespendeter Kleidung in Kombination mit abnehmender Qualität und minderwertigen Materialien zu einer geringen tatsächlichen Wiederverwendbarkeit der Kleidung führt, sollte untersucht werden, inwieweit eine Wiederverwendung in Dachkonstruktionen möglich ist.

Darüber hinaus musste festgestellt werden, dass ein erheblicher Teil der Spenden in der Produktion von Dämmstoffen und Putzlappen endet oder sogar verbrannt wird. Ähnlich wie in den USA werden vor allem im Onlinehandel große Mengen neuer Textilien weggeworfen, was zu einer enormen Ressourcenverschwendung und Umweltverschmutzung führt. Darüber hinaus ist die Fast Fashion-Industrie für einen erheblichen Teil der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen und Wasserverschmutzung verantwortlich. Schnell wechselnde Modetrends und der Wunsch nach immer neuen Kleidungsstücken haben zu einer massiven Überproduktion geführt, die nicht nur Ressourcen verschwendet, sondern auch die Umwelt belastet.

Eine mögliche Lösung besteht darin, beschädigte Kleidungsstücke zu sammeln und zu textilen Flächengebilden zusammenzufügen. Dadurch könnte die Menge an Textilabfällen reduziert und die nachhaltige Nutzung von Rohstoffen gefördert werden.

Abbildung 124

Textiles kinematisches wandelbares Verschattungstragwerk „IKWS“ auf dem Campus der Universität Kassel



Quelle: Projektarbeit von Majd Al Khaiyat

Die Studioarbeit **“I KNOW Where to sit”** in Abbildung 124 legte den Fokus auf die Wiederverwendung von Materialien und beschreibt die Bekämpfung von urbanen Hitzeinseln auf kreative und innovative Weise. Die Beschattung durch eine Anordnung bestimmter Textilien schafft eine Konstruktion, die es ermöglicht, im Sommer mehr Sitzmöglichkeiten im Freien zu schaffen, wo sich die Studierenden aufhalten können. Die Beschattung der Sitzplätze ist nicht nur umweltfreundlich, sondern auch ästhetisch ansprechend, und die wiederverwendeten Textilien werden verwendet, um eine nachhaltige Lösung zur Reduzierung des Wärmeinseleffekts zu erreichen.

Abbildung 125

Textile wandelbare Schirmkonstruktion „KENI\_TEX“ auf dem Campus der Universität Kassel



Quelle: Projektarbeit von Mahmoud Kanaan

**Auch in der Projektarbeit „KENI-TEX“** (Abbildung 125) wurde Materialschonend mit Kleidungsstücken experimentiert, um dem Thema der wandelbaren Überdachung näher zu kommen. Verschiedene Grundgeometrien wurden aus gefalteten Kleidungsstücken zusammengesetzt, um daraus doppelt gekrümmte Membranflächen zu generieren. Hierbei handelt es sich um eine freistehende Schirmkonstruktion die flexibel an verschiedenen Orten auf und abgebaut werden kann und außerdem mit der integrierten Ballastierung eine Sitzmöglichkeit schafft.

## 6.5 Ausblick

Das wandelbare Membrandach zur Bekämpfung urbaner Hitzeinseln stellt sich aus klimatischer Sicht für Mittel- und Nordeuropa als sinnvolle Lösung dar. Es zeigt sich aber auch, dass die geometrisch komplexen Stadträume und die problematischen Randbedingungen der Bestandsbebauung die Umsetzung großflächiger Strukturen erschweren. Kleine, freistehende Strukturen in der Größenordnung von Stadtmöbeln, wie sie im vorliegenden Bericht mit Studierenden entwickelt wurden, erscheinen daher in diesem Zusammenhang vielversprechend, da sie sich auch sehr gut für die Integration weiterer Funktionen und den Einsatz wiederverwendeter Materialien eignen.

In dieser Größenordnung ist beispielsweise auch die Begrünung von Membrandächern denkbar, die einen weiteren positiven Beitrag zur Kühlung des Stadtklimas leisten kann. Durch lösbare Verbindungen und die Wahl kreislauffähiger Materialien sollten urbane Schattendächer im Kreislaufsystem von der Bauteilherstellung bis zum Rückbau und Recycling entwickelt werden. Damit bekämpfen sie nicht nur die Folgen des Klimawandels, sondern berücksichtigen auch dessen Ursachen.

Der Klimawandel bringt nicht nur Hitzestress mit sich, wie wir ihn in letzter Zeit immer häufiger erleben, sondern auch vermehrt Starkregenereignisse. Um zu verhindern, dass das Wasser direkt in die Kanalisation abfließt, wird an Konzepten für Schwammstädte gearbeitet. Membrandächer eignen sich hier sehr gut, um Regenwasser gezielt zu sammeln. Damit wird die Funktion des Daches vom Wärmeschutz zum Regenschutz und integraler Bestandteil von Schwammstadtkonzepten sowie zur Bewässerung von Stadtgrün genutzt werden können.

Die Aufgabe, hitzebelastete Gebiete in einer städtischen Umgebung zu identifizieren, kann durch die Einführung künstlicher Intelligenz erleichtert werden. Ein neuronales Netz könnte darauf trainiert werden, Satellitenbilder auf der Grundlage vorhandener Informationen, wie sie in diesem Bericht gezeigt werden, in Hitzekarten für Städte umzuwandeln. Da die Informationen über grüne und blaue Flächen, Stadttypologie und sogar das Material der Gebäudefassaden bis zu einem gewissen Grad in den Satellitenbildern enthalten sind, können solche KI-gestützten Verfahren kritische Stellen sehr genau identifizieren, ohne dass teure Messungen oder Simulationen erforderlich sind.

---

## 7 Mitwirkende

### Autoren

M.Sc. Gregor Grünkorn (Universität Kassel, FG TWE -Institute für Architektur FB 06 Architektur, Stadt- und Landschaftsplanung)

M.Sc. Dongyuan Liu (Universität Kassel, FG TWE -Institute für Architektur FB 06 Architektur, Stadt- und Landschaftsplanung)

Prof. Dr.- Ing. Julian Lienhard (Universität Kassel, FG TWE -Institute für Architektur FB 06 Architektur, Stadt- und Landschaftsplanung)

Dr. -Ing. M.Sc. Ata Chokhachian (TU München, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TU München)

Prof. Thomas Auer (TU München, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, TU München)

## 8 Kurzbiographien

Wissenschaftliche Mitarbeiter:



M.Sc. Gregor Grünkorn

Gregor Grünkorn ist seit 2021 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktives Entwerfen (TWE) der Universität Kassel. Gregor Grünkorn studierte Architektur an der Universität Kassel. In seinem Masterstudium war er an verschiedenen Projekten insbesondere in den Bereichen Architektur, Bildende Kunst und Landschaftsplanung beteiligt. Nach seinem Masterstudium Architektur mit Schwerpunkt Projektentwicklung begann er als Freiberufler zu arbeiten. Unter anderem arbeitete er für namhafte Architekturbüros in Kassel und Auftraggeber in Nordhessen, Niedersachsen und Hamburg. Am Department of Structural Design (TWE) genießt er es, Teil eines breit gefächerten Teams von Architekten und Tragwerksplanern zu sein. Sein Fokus liegt auf dem Projekt City Climate Canopies: C<sup>3</sup>.



M.Sc. Dongyuan Liu

Dongyuan Liu ist Strukturingenieur, der daran interessiert ist, mit Computermethoden zu entwerfen und mit verschiedenen Materialien zu arbeiten. Er genießt es, mit Architekten und Bauherren zusammenzuarbeiten, um ganzheitliches Design zu liefern. Dongyuan studierte Bauingenieurwesen in Richtung Hafeningenieurwesen an der Tongji University, Shanghai und M.Sc. ITECH an der Universität Stuttgart. Nach dem Studium kam er zu sbp sonne in Stuttgart und praktizierte die Prüfung und Gestaltung von Strukturen für Solarenergie, einschließlich Photovoltaik und konzentrierter Solarenergie.



Dr. -Ing. M.Sc. Ata Chokhachian

Ata Chokhachian ist Wissenschaftler, Dozent und Berater in den Bereichen Gebäudetechnik und Stadtklima und entwickelt und nutzt computergestützte Methoden zur Planung und Entscheidungsfindung für Architekten und Stadtplaner. Seit 2015 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen sowie am Lehrstuhl für Architekturinformatik an der Technischen Universität München. Im Jahr 2022 verteidigte er erfolgreich seine Doktorarbeit über die Entwicklung von experimentellen und simulationsbasierten Tools zur Quantifizierung des thermischen Außenkomforts in urbanen Räumen. Im Sommer 2019 wurde er als Gastwissenschaftler an das Sustainable Design Lab des Massachusetts Institute of Technology berufen. Im Januar 2020 war er Mitbegründer von Climateflux, einem Unternehmen, das Plattformen für datengesteuerte und computerbasierte Arbeitsabläufe zur Erfassung von Klimawissen anbietet.

## 9 Literaturverzeichnis

- Anjomshoaa, A., Duarte, F., Rennings, D., Matarazzo, T. J., deSouza, P., & Ratti, C. (2018). City scanner: Building and scheduling a mobile sensing platform for smart city services. *IEEE Internet of things Journal*, 5(6), 4567-4579.
- Arens, E., Zhang, H., & Huizenga, C. (2006). Partial-and whole-body thermal sensation and comfort—Part I: Uniform environmental conditions. *Journal of thermal Biology*, 31(1-2), 53-59.
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology: a Journal of the Royal Meteorological Society*, 23(1), 1-26.
- Blümel, D., Graefe R., Hennicke J., Kugel F., Pankoke U., Otto F., Schock H.J., Wagner J., IL5 Wandelbare Dächer - Convertible Roofs, 1971. Institut für leichte Flächentragwerke (IL). Stuttgart. 1972.
- Borgmann, Albert, et al. Engineering the climate: the ethics of solar radiation management. Rowman & Littlefield, 2012.
- Brown, E. G. (1935). Deaths from excessive heat in Kansas, 1934. *Public Health Reports (1896-1970)*, 546-548.
- Curdes, Gerhard, 1997: Stadtstruktur und Stadtgestaltung, Kohlhammer, 2. Auflage. Stuttgart; Berlin; Köln.
- Curdes, Gerhard, 1995: Stadtstrukturelles Entwerfen, Kohlhammer. Stuttgart; Berlin; Köln.
- De Dear, R. (2011). Revisiting an old hypothesis of human thermal perception: alliesthesia. *Building Research & Information*, 39(2), 108-117.
- Fanger, P. O. (1970). Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*.
- Ferwati, S., Skelhorn, C., Shandas, V., Voelkel, J., Shawish, A., & Ghanim, M. (2018). Analysis of urban heat in a corridor environment—The case of Doha, Qatar. *Urban climate*, 24, 692-702.
- Fiala, D., Lomas, K. J., & Stohrer, M. (2003). First principles modeling of thermal sensation responses in steady-state and transient conditions. *ASHRAE transactions*, 109, 179.
- Gallinelli, P., Camponovo, R., & Guillot, V. (2017). CityFeel-micro climate monitoring for climate mitigation and urban design. *Energy Procedia*, 122, 391-396.
- Garcia-Nevado, E., Beckers, B., & Coch, H. (2020). Assessing the cooling effect of urban textile shading devices through time-lapse thermography. *Sustainable Cities and Society*, 63, 102458.
- Garcia-Nevado, E., Duport, N., Bugeat, A., & Beckers, B. (2021). Benefits of street sun sails to limit building cooling needs in a Mediterranean city. *Building and Environment*, 187, 107403.
- Hensen, J. L. (1990). Literature review on thermal comfort in transient conditions. *Building and environment*, 25(4), 309-316.
- Herrington, L. P., & Vittum, J. S. (1977). Human thermal comfort in urban outdoor spaces. *Gen. Tech. Rep. NE-25. Upper Darby, PA: US Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station*, 130-138.
- Horrison, E., & Amirtham, L. R. (2016). Role of built environment on factors affecting outdoor thermal comfort- A case of T. Nagar, Chennai, India. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(5), 1-4.

- Jones, P. D., Groisman, P. Y., Coughlan, M., Plummer, N., Wang, W.-C., & Karl, T. R. (1990). Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land. *Nature*, 347(6289), 169–172. Nature Publishing Group.
- Kastendeuch, P., Phillips, N., Nerry, F., Roupioz, L., Colin, J., Luhahe, R., & Najjar, G. (2016, July). Mesures pour l'étude des ambiances climatiques à Strasbourg lors de la canicule de juillet 2015. In *Actes du colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Besançon*.
- Kaynakli, O., & Kilic, M. (2005). Investigation of indoor thermal comfort under transient conditions. *Building and Environment*, 40(2), 165-174.
- Klok, L., Rood, N., Kluck, J., & Kleerekoper, L. (2019). Assessment of thermally comfortable urban spaces in Amsterdam during hot summer days. *International journal of biometeorology*, 63(2), 129-141.
- Knippers, J., Cremers, J., Gabler, M., Lienhard, J., Cremers, J., & Institut für Internationale Architektur-Dokumentation (Eds.). (2010). Atlas Kunststoffe + Membranen: Werkstoffe und Halbzeuge, Formfindung und Konstruktion. Edition Detail (1. Aufl.). München: Inst. f. Internat. Architektur-Dokumentation.
- Manoli, G., Fatichi, S., Schläpfer, M. et al., "Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population," *Nature*, vol. 573, 2019, pp. 55–60.
- Maxwell, J. Clerk. 'XLV. On Reciprocal Figures and Diagrams of Forces'. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 27, no. 182 (1 April 1864): 250–61.
- Middel, A., & Krayenhoff, E. S. (2019). Micrometeorological determinants of pedestrian thermal exposure during record-breaking heat in Tempe, Arizona: Introducing the MaRTy observational platform. *Science of the total environment*, 687, 137-151.
- Monteith, J., & Unsworth, M. (2013). *Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere*. Academic Press.
- Nakayoshi, M., Kanda, M., Shi, R., & de Dear, R. (2015). Outdoor thermal physiology along human pathways: a study using a wearable measurement system. *International journal of biometeorology*, 59(5), 503-515.
- Nikolopoulou, M., Baker, N., & Steemers, K. (2001). Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter. *Solar energy*, 70(3), 227-235.
- Oke, T. R. (1988). The urban energy balance. *Progress in Physical geography*, 12(4), 471-508.
- Prospect for European guidance for the structural design of tensile membrane structures: European Commission, Joint Research Centre, Stranghöner, N., Uhlemann, J., Bilginoglu, F. et al., Prospect for European guidance for the structural design of tensile membrane structures – Support to the implementation, harmonisation and further development of the Eurocodes, Mollaert, M.(editor), Denton, S.(editor), Pinto, A.(editor), Dimova, S.(editor), Publications Office of the European Union, 2023, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/24763>
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y. C., & Liu, C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 120–128.
- Seidel, J., Ketzler, G., Bechtel, B., Thies, B., Philipp, A., Böhner, J., ... & Schneider, C. (2016). Mobile measurement techniques for local and micro-scale studies in urban and topo-climatology.
- Streicher, C. (2017). *Städtebauliches Entwerfen* (5. Auflage) Dortmund: Springer Vieweg, 55- 70.

---

Tsin, P. K., Knudby, A., Krayenhoff, E. S., Ho, H. C., Brauer, M., & Henderson, S. B. (2016). Microscale mobile monitoring of urban air temperature. *Urban Climate*, 18, 58-72.

Yokoyama, H., Ooka, R., & Kikumoto, H. (2018). Study of mobile measurements for detailed temperature distribution in a high-density urban area in Tokyo. *Urban climate*, 24, 517-528.

INKEK – Institut für Klima- und Energiekonzepte, 2019: Klimaanalyse zur Ermittlung des Gefährdungspotentials sowie maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel für den Zweckverband Raum Kassel: [https://www.zrk-kassel.de/media/files/download/2019-klimaanalyse/endbericht\\_klimaanalyse\\_zrk\\_2019.pdf](https://www.zrk-kassel.de/media/files/download/2019-klimaanalyse/endbericht_klimaanalyse_zrk_2019.pdf)

Johnson, U. (2020). Normgerechte Verankerung von Fassaden. Verfügbar unter: <https://bauportal.bgbau.de/bauportal/12020/thema/hochbau/normgerechte-verankerung-von-fassaden>

Mackey, C. et al. (2017) 'Wind, Sun, Surface Temperature, and Heat Island: Critical Variables for High-Resolution Outdoor Thermal Comfort', in. 2017 Building Simulation Conference. Available at: <https://doi.org/10.26868/25222708.2017.260>.

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Verschattungskonzepte unterschiedlicher Größenordnungen.....	8
Abbildung 2 Themenfelder des C <sup>3</sup> Projektes .....	9
Abbildung 3 max. Landoberflächentemperatur (LST) am Sommertag, 2013: Global .....	24
Abbildung 4 max. Landoberflächentemperatur (LST) am Sommertag, 2013: Europa .....	25
Abbildung 5 Klimawandel: In der Hitze der Stadt - Hitzeinseln deutschlandweit erkunden.....	26
Abbildung 6 max. Landoberflächentemperatur (LST) am Sommertag, 2013: Deutschland .....	27
Abbildung 7 Klimaanalysekarte Berlin .....	28
Abbildung 8 Berlin in google earth .....	28
Abbildung 9 Klimaanalysekarte Düsseldorf .....	28
Abbildung 10 Düsseldorf in google earth.....	28
Abbildung 11 Klimaanalysekarte Frankfurt .....	28
Abbildung 12 Frankfurt in google earth.....	28
Abbildung 13 Klimaanalysekarte Hannover.....	29
Abbildung 14 Hannover in google earth.....	29
Abbildung 15 Klimaanalysekarte München .....	29
Abbildung 16 München in google earth .....	29
Abbildung 17 Klimaanalysekarte Stuttgart .....	29
Abbildung 18 Stuttgart in google earth .....	29
Abbildung 19 Klimaanalysekarte Kassel .....	30
Abbildung 20 Kassel in google earth .....	30
Abbildung 21 Typen gerader Straßen .....	34
Abbildung 22 Typologie der Längendifferenzierung.....	34
Abbildung 23 Typologie gekrümmter linearer Räume.....	35
Abbildung 24 Reihe, Grundprinzip und Prinzipskizze.....	36
Abbildung 25 Reihe, Formen und Erschließung.....	36
Abbildung 26 Funktion und Gestalt von Plätzen .....	38
Abbildung 27 Typologien von Höfen .....	40
Abbildung 28 Variationen und Grenzfälle von Höfen .....	41
Abbildung 29 Formvarianten von Höfen .....	42
Abbildung 30 Block, Grundprinzip und Prinzip Skizze.....	44
Abbildung 31 Block, Formen und Erschließung .....	44
Abbildung 32 Hof, Grundprinzip und Prinzipskizze.....	45
Abbildung 33 Hof, Formen und Erschließung.....	45

---

Abbildung 34 Schwarzplan Berlin mit Orten der potenziellen Überhitzung .....	52
Abbildung 35 Schwarzplan München mit Orten der potenziellen Überhitzung (eigene Darstellung) .....	52
Abbildung 36 Schwarzplan Kassel mit Orten der potenziellen Überhitzung (eigene Darstellung) .....	52
Abbildung 37 Schwarzplan Frankfurt am Main mit Orten der potenziellen Überhitzung .....	53
Abbildung 38 Schwarzplan Hannover mit Orten der potenziellen Überhitzung (eigene Darstellung) .....	53
Abbildung 39 Schwarzplan Stuttgart mit Orten der potenziellen Überhitzung .....	53
Abbildung 40 Schwarzplan Düsseldorf mit Orten der potenziellen Überhitzung .....	53
Abbildung 41 Schwarzplan Kassel mit punktueller Identifizierung der Plätze (Lila), Straßenschluchten (Grün) und Innenhöfe (Blau).....	55
Abbildung 42 Klimaanalysekarte Kassel mit punktueller Identifizierung der Plätze (Lila), Straßenschluchten (Grün) und Innenhöfe (Blau).....	55
Abbildung 43 Schwarzplan Frankfurt mit punktueller Identifizierung der Plätze (Lila), Straßenschluchten (Grün) und Innenhöfe (Blau).....	56
Abbildung 44 Schwarzplan Frankfurt mit punktueller Identifizierung der Plätze (Lila), Straßenschluchten (Grün) und Innenhöfe (Blau).....	56
Abbildung 45 Versiegelungskarte Berlin .....	59
Abbildung 46 Versiegelungskarte München .....	59
Abbildung 47 Versiegelungskarte Kassel .....	59
Abbildung 48 Versiegelungskarte Frankfurt am Main .....	59
Abbildung 49 Versiegelungskarte Stuttgart .....	60
Abbildung 50 Versiegelungskarte Hannover .....	60
Abbildung 51 Versiegelungskarte Düsseldorf .....	60
Abbildung 52 Klimafunktionskarte, 2020.....	61
Abbildung 53 Versiegelungskarte Düsseldorf mittleren Versiegelungsgrad 36,40%.....	61
Abbildung 54 Shadowplatz Düsseldorf .....	64
Abbildung 55 Shadowplatz Düsseldorf .....	65
Abbildung 56 Hauptwache Frankfurt am Main .....	65
Abbildung 57 Hauptwache Frankfurt am Main .....	66
Abbildung 58 Wandtypen im Wohngebäudebestand nach Regionen, Baualtersklassen und Gebäudetyp .....	67
Abbildung 59 Typologien verschiedener Membrandachkonstruktion in Abhängigkeit zu Bautypologie.....	71
Abbildung 60 Verankerung Kategorisierung.....	71
Abbildung 61 Mechanismen der Flächenwandlung .....	72
Abbildung 62 Verankerung Konzept Skizzen .....	74
Abbildung 63 Prinzipien der Kantenversagen unter Querkraft .....	74
Abbildung 64 Abzählkriterien der Schattierung .....	75
Abbildung 65 Akkumulationen der Schattierung von ausgewählte HOYs (hour-of-year) .....	76

Abbildung 66 Schattenwurf durch Gebäude (links) und Membrandach (rechts) .....	77
Abbildung 67 Skizze zur Krafrichtung des Randseils (Otto et al., 1971) .....	78
Abbildung 68 Nachweis der Größe der Verankerungskraft .....	78
Abbildung 69 Andere Kraftwinkel der Randseile .....	79
Abbildung 70 Membranfleck, gebildet aus einer Reihe von Bögen .....	80
Abbildung 71 2D-Reziprokaldiagramm eines 4-Punkt Segels .....	81
Abbildung 72 Senkrechtkonstruktion der Form- und Kraftdiagramm .....	82
Abbildung 73 Betrachtete nicht parallele Straße Bedingungen .....	85
Abbildung 74 Verankerungskraftpolygon für Bemessung ohne Gratseile / Kehlseile .....	85
Abbildung 75 Resultierende Geometrie der Zerlegung .....	86
Abbildung 76 Topologie (links) und Ergebnis der Formfindung mit Kiwi!3D .....	87
Abbildung 77 Draufsicht (links) und perspektivische Ansicht (rechts) der Verankerungskräfte .....	87
Abbildung 78 Mehrkriterien-Optimierung mit Hilfe Octopus (Programm auf Rhino/Grasshopper) .....	88
Abbildung 79 Variante zu verstärkten südlichen Öffnungen aufgrund der vorhandenen Gebäudeverschattung .....	89
Abbildung 80 Definition und Charakterisierung der Einflussparameter .....	90
Abbildung 81 Wärmebilder des Faltdaches in Buchs, Schweiz, für verschiedene Tageszeiten .....	93
Abbildung 82 Das entwickelte Messgerät zur Erfassung von Langzeit-Mikroklimadaten .....	94
Abbildung 83 Die meteorologische Referenzstation in Valduz zum Vergleich und zur Gegenüberstellung mit der Mikroklimastation .....	95
Abbildung 84 Messdiagramm für den Monat April 2022 .....	98
Abbildung 85 Diagramm für die Zeit, in der das Dach in Betrieb war, vom 26. bis 29. April, vergrößern .....	99
Abbildung 86 Messdiagramm für den Monat Mai 2022 .....	100
Abbildung 87 Diagramm für die Zeit, in der das Dach in Betrieb war, vom 16. bis 19. Mai, vergrößern .....	100
Abbildung 88 Messdiagramm für den Monat Juli 2022 .....	101
Abbildung 89 Messdiagramm für den Monat August 2022 .....	101
Abbildung 90 Vergleich der Intensität der städtischen Wärmeinsel mit der Referenzlufttemperatur und dem Messpunkt .....	102
Abbildung 91 Karten Temperatur Monatsmittel Juni für Hessen 2001 – 2030 „Klimaschutz“ Szenario .....	104
Abbildung 92 Karten Temperatur Monatsmittel Juni für Hessen 2031 -2060 „kein Klimaschutz“ Szenario .....	104
Abbildung 93 Klimaanalysekarte Landkreis Kassel, 2019 .....	106
Abbildung 94 Planungshinweiskarte Landkreis Kassel, 2019 .....	107
Abbildung 95 Versiegelungskarte Stadt Kassel mit den Statteilen West und Mitte .....	108
Abbildung 96 Schwarzplan Kassel .....	109
Abbildung 97 Ausschnitt Klimaanalysekarte Kassel Mitte .....	109
Abbildung 98 Ausschnitt Klimaanalysekarte Kassel Mitte, vergrößert(eigene Darstellung) .....	110

Abbildung 99 Innenhof der Alten Post Kassel .....	111
Abbildung 100 Klimaanalysekarte, Standort Alte Post Kassel.....	112
Abbildung 101 Regenwasser und Luft strömen durch eine poröse und doppelagige Membrankonstruktion .....	112
Abbildung 102 Schematische Darstellung der Struktur einer porösen doppelagigen Membrankonstruktion mit horizontaler Addition .....	113
Abbildung 103 Schematische Schnitte von Entwurfsvarianten des Daches.....	114
Abbildung 104 Wanderung des Daches .....	115
Abbildung 105 Form- und Kraftdiagramme (fette Linien).....	116
Abbildung 106 Equilibrium/Formfindung mit Kiwi3D.....	116
Abbildung 107 Formfindung in 3D durch Kraftdichtemethode .....	117
Abbildung 108 Zwei Varianten.....	118
Abbildung 109 FE-Modell Varianten I: Ergebnis der Formfindung mit isotroper Membranvorspannung .....	120
Abbildung 110 Entwässerung des Dachs.....	120
Abbildung 111 Membrane Spannungen unter Windsog .....	121
Abbildung 112 Maximale Druckspannungen des Druckrings unter Wind- Sog und Druck mit Imperfektion .....	122
Abbildung 113 FE-Modell Varianten II: Ergebnis der Formfindung mit isotroper Membranvorspannung .....	122
Abbildung 114 Druck- und Zugkräfte im Form-findung Lastfall .....	123
Abbildung 115 Maximale Druckspannungen des Druckrings unter Wind- Sog und Druck, gerechnet mit Imperfekter Geometrie nach Theorie 3. Ordnung .....	123
Abbildung 116 Entwässerung des Dachs.....	124
Abbildung 117 Membranspannungen unter Windsog .....	124
Abbildung 118 Zeitrahmen der Analyse: 8 Uhr bis 16 Uhr von Juni bis September (inklusive).....	125
Abbildung 119 Schattenwurf im Innenhof der Altenpost .....	126
Abbildung 120 Regenfluss Analyse von unterschiedliche Membrane Überdachungen .....	127
Abbildung 121 Vergleichende CFD Analyse in der Aufsicht.....	129
Abbildung 122 Vergleichende CFD Analyse im Schnitt .....	130
Abbildung 123 Innerstädtische Verschattung zur Verbesserung des lokalen Mikroklimas mit wiederverwendetem Textil auf dem UniCampus Kassel.....	135
<b>Abbildung 124 Textiles kinematisches wandelbares Verschattungstragwerk „IKWS“ auf dem Campus der Universität Kassel .....</b>	<b>136</b>
<b>Abbildung 125 Textile wandelbare Schirmkonstruktion „KENI_TEX“ auf dem Campus der Universität Kassel .....</b>	<b>137</b>

Alle verwendeten Abbildungen ohne Quellenangaben sind eigene Darstellungen:

Fachgebiet Tragwerksentwurf | FB06 | Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung Universität Kassel

TUARL Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen | Technische Universität München

---

## 11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Vergleich der Methoden und Instrumente zur Messung des Mikroklimas	15
Tabelle 2 Straßenschlucht	37
Tabelle 3 Bewertungskriterien	47
Tabelle 4 Auszug aus Tabelle Bewertungsmatrix	49
Tabelle 5 Auszug aus Tabelle Bewertungsmatrix mit Legende zur Bewertung der städtischen Hitzeinseln und Gebäudetypologien s. Anhang	51
Tabelle 6 Gesamtranking: Versiegelungsgrad der 50 einwohnerstärksten Städte	58
Tabelle 7 Eigenschaften gängiger textiler Membranwerkstoffe u.a. Brandverhalten nach DIN 4102	69
Tabelle 8 Zusammenfassung der Datensätze der Referenzwetterstation	96

## 12 Anlagen

- Brandschutz Textile Membrane
- Planungshinweiskarte 2019
- Klimaanalysekarte 2019
- Gesamtranking: Versiegelungsgrad der 50 einwohnerstärksten Städte

---

## 13 Bisherige Veröffentlichungen

Dongyuan Liu, Gregor Grünkorn, Julian Lienhard, Ata Chokhachian, Thomas Auer. (2023): Retractable membrane roofs as urban shading device. Proceedings of the TensiNet Symposium 2023 TENSINANTES2023 (pp. 114–126). Presented at the TENSINANTES2023, Nantes, France: TensiNet Association.

Dongyuan Liu, Julian Lienhard (eingereicht 2023): Reciprocal construction for membrane structures. International Journal of Space Structures.