

Photovoltaik-Überdachungen als Maßnahme gegen Hitzestress im Fallbeispiel Neuperlach

**Parametrische Analyse zur Ermittlung der optimalen geometrischen Form
einer Photovoltaik-Überdachungen im Straßenraum des Münchner
Stadtteils Neuperlach zur maximalen Reduzierung von Hitzestress und
optimalen energetischen Nutzung**

Masterthesis im Studienfach Ressourceneffizientes und Nachhaltiges Bauen
Technische Universität München
TUM School of Engineering and Design
Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen
Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer

Moritz Mütschele

Betreuer: Sebastian Koth M. Sc.
Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer

München, den 31. Oktober 2023

Kurzfassung / Abstract

Ziel der vorliegenden Thesis ist die geometrisch optimale Form einer Überdachung in verschiedenen Straßensituationen zur maximalen Reduzierung der Überhitzung des Straßenraums sowie zur simultanen optimalen energetischen Nutzung der solaren Energie auf selbiger Überdachung im öffentlichen Straßenraum des Münchner Stadtteils Neuperlach zu ermitteln. Zu diesem Zweck werden zwölf systematisch ausgewählte Straßenschluchten unterschiedlicher Ausrichtung, Breite sowie Höhe der flankierenden Bebauung repräsentativ entsprechend des thermischen Außenraumkomforts computer-simulativ untersucht. Zunächst wird die Veränderung des thermischen Komforts durch Überdachungen verschiedener Höhen analysiert. Diejenigen Überdachungen, welche den signifikantesten Effekt zur Eindämmung der Überhitzung erzielen, werden im Anschluss entsprechend ihres Energieertrags geometrisch optimiert. Die Ergebnisse zeigen, dass sich Überdachungen in einer Höhe von 4,50 Metern zur Reduzierung der gefühlten Temperatur im überdachten Bereich in allen Fällen als am effektivsten herausstellen. Der Energieertrag ist in den Bereichen mit niedriger angrenzender Bebauung deutlich höher als bei hoher, insbesondere bei Straßenschluchten auf der Nord-Süd-Achse. Die Neigung der PV-Modulreihen in die Richtung der größten Strahlungsintensität ergibt in jedem Bereich, jedoch besonders bei den Straßenschluchten mit Nord-Süd bzw. Nordwest-Südost-Ausrichtung, eine höhere Effizienz in Bezug auf die eingesetzte Fläche.

The aim of this thesis is to determine the geometrically optimal form of a canopy in different situations of the urban street to maximize the reduction of the overheating of the street space as well as the simultaneous optimal energetic use of the solar energy on the same canopy in the public street space of the Munich district Neuperlach. For this purpose, twelve systematically selected street canyons of different orientation, width, as well as height of the flanking buildings are representatively analysed according to the thermal outdoor comfort by a computer simulation. First, the change in thermal comfort caused by canopies of different heights is analysed. The roofs that have the most significant effect on reducing overheating are then geometrically optimized according to the energy yield. The results show that canopies with a height of 4.50 meters are the most effective in reducing the perceived temperature in the covered area in all cases. The energy yield is significantly higher in the areas with low adjacent buildings than high ones, especially in street canyons on the north-south axis. The inclination of the PV module rows in the direction of the greatest radiation intensity results in a higher efficiency in relation to the area used in each region, but especially in the case of street canyons with a north-south or north-west-southeast orientation.

Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit „Photovoltaik-Überdachungen als Maßnahme gegen Hitzestress im Fallbeispiel Neuperlach“ im Studiengang Ressourceneffizientes und Nachhaltiges Bauen der Technischen Universität München behandelt die sehr aktuellen Themen der Klimaveränderung und des damit einhergehenden Urban Heat Island Effekts und dessen Bekämpfung, sowie der Energiewende und des Gewinnes von elektrischer Energie im Stadtgebiet. Zusätzlich ist sie Teil eines größeren Forschungsprojektes der New European Bauhaus Initiative. Das Thema war jederzeit spannend und aufschlussreich und die Aktualität sowie die Eingliederung in ein größeres Projekt motivierten mich stets. Das Thema bot mir außerdem die Möglichkeit, mein Interesse an Computersimulationen im Bereich thermischer Komfort und Architektur zu ergründen und mein Wissen in diesem Bereich weiter auszubauen.

Herzlich möchte ich mich bei allen Personen bedanken, welche mich bei der Erstellung dieser Thesis unterstützt haben. Besonderer Dank gilt dabei meinem Betreuer für die Masterarbeit M.Sc. Sebastian Koth, für die stets kompetente und umfassende Beratung und Unterstützung bei der Bearbeitung der Masterarbeit und das entgegengebrachte Vertrauen, sowie für die vielen freundlichen Gespräche und die Unterstützung für meine weitere berufliche Zukunft. Herzlichen Dank auch an Prof. Thomas Auer für die Korrektur und Bewertung der Meisterarbeit.

Ich wünsche Ihnen viel Vergnügen beim Lesen meiner Masterarbeit.

Moritz Mütschele

München, den 31. Oktober 2023

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	I
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	XI
Formelverzeichnis	XII
1. Einleitung.....	1
2. Stand der Wissenschaft und Technik	4
2.1. Projekteinordnung	4
2.2. Klimawandel.....	5
2.3. Städtischer Wärmeinseleffekt.....	8
2.3.1. Stadtatmosphäre.....	9
2.3.2. Städtische Energiebilanz	9
2.3.3. Überhitzungseffekt.....	12
2.4. Thermischer Komfort im Außenraum.....	12
2.4.1. Thermischer Komfort	13
2.4.2. Indizes des thermischen Komforts	16
2.4.3. Thermischer Stress.....	21
2.5. Erneuerbaren Energien in München.....	23
2.6. Verschattungsarchitektur.....	27
3. Methodik	30
3.1. Datengrundlage	30
3.1.1. Wetterdaten	30
3.1.2. Stadtanalyse	35
3.2. Simulation	37
3.2.1. Untersuchungsgebiet.....	39
3.2.2. Überdachungen	50
4. Ergebnis und Diskussion.....	52
4.1. Untersuchungsgebiet	52
4.2. Untersuchungsbereiche	54
4.2.1. Untersuchungsbereich 1b	54
4.2.2. Untersuchungsbereich 1c	64
4.2.3. Untersuchungsbereich 2a	67
4.2.4. Untersuchungsbereich 2b	71

4.2.5. Untersuchungsbereich 2c.....	74
4.2.6. Untersuchungsbereich 2d.....	78
4.2.7. Untersuchungsbereich 3a.....	82
4.2.8. Untersuchungsbereich 3b.....	85
4.2.9. Untersuchungsbereich 3c.....	88
4.2.10. Untersuchungsbereich 4a.....	90
4.2.11. Untersuchungsbereich 4b.....	93
4.2.12. Untersuchungsbereich 4c.....	96
4.3. Beschränkungen und Grenzen.....	98
5. Zusammenfassung und Fazit	101
6. Ausblick	105
Literaturverzeichnis	107
Eidesstattliche Erklärung	111

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Veränderungen der globalen Oberflächentemperatur im Vergleich zu 1850-1900 (IPCC, 2023a).....	6
Abbildung 2 - Temperaturanomalien in Deutschland (Deutscher Wetterdienst, 2023)...	7
Abbildung 3 – Änderung der globalen Oberflächentemperatur entsprechend der IPCC-Szenarien (IPCC, 2023a).....	8
Abbildung 4 - Veränderung der bodennahen Atmosphäre durch den Stadtkörper (W. Kuttler, 2010).....	9
Abbildung 5 - Wärmebilanz an einem urbanen im Vergleich zu einem ruralen Stand (Henninger & Weber, 2020).....	11
Abbildung 6 - Behagliche Raumlufffeuchte (Hegger, 2007).....	15
Abbildung 7 - Behagliche Luftbewegung (Hegger, 2007).....	16
Abbildung 8 - PPD als Funktion des PMV (Deutsches Institut für Normung e.V., 2007).....	17
Abbildung 9 - Konzept und Elemente der Berechnung des UTCI für eine aktuelle Bedingung (Verein Deutscher Ingenieure e. V., 2022).....	20
Abbildung 10 - Prozentuale Veränderung der Mortalität während Hitzewellen im Zeitraum 1971-2000 (Kemen & Kistemann, 2019).....	22
Abbildung 11 - PV-Ausbau in München seit 2000 (Masterplan solares München, 2023).....	24
Abbildung 12 - geplanter Ausbau von PV-Anlagen (Masterplan solares München, 2023).....	25
Abbildung 13 - Verschattungsarchitektur BUGA 1957 Köln (Nerdinger & Barthel, 2005).....	27
Abbildung 14 – Verschattungsarchitektur BUGA 1955 Kassel (Nerdinger & Barthel, 2005).....	27
Abbildung 15 - Buckelzelt INTERBAU 1957 Berlin (Nerdinger & Barthel, 2005).....	27
Abbildung 16 - Deutsche Pavillon Expo 1967 Montreal (Nerdinger & Barthel, 2005)...	28
Abbildung 17 - Dächer des Olympiaareals München (Nerdinger & Barthel, 2005).....	28
Abbildung 18 - Sonnenschirmkonstruktionen Medina 2011 (SL Rasch GmbH, 2023).....	28
Abbildung 19 - Großschirme BUGA 1971 Köln (Nerdinger & Barthel, 2005).....	28
Abbildung 20 - Faltbares Membrandach Buchs 2014 (str.ucture GmbH, 2023).....	28

Abbildung 21 - Wärmebildaufnahme der Unterseite der Überdachung bei voller Sonneneinstrahlung (Chokhachian, 2023)	29
Abbildung 22 - Vergleich Neuhausen-Nymphenburg (links) und Neuperlach (rechts) (Google Maps, 2023)	31
Abbildung 23 - Durchschnittstemperatur pro Monat (eigene Darstellung).....	31
Abbildung 24 - Stündliche Temperaturentwicklung über das Jahr (eigene Darstellung)	32
Abbildung 25 - Wärmste und kälteste Woche (eigene Darstellung).....	32
Abbildung 26 - Mollier-h-x-Diagramm mit Behaglichkeitsfeld nach ASHRAE-55 (eigene Darstellung)	33
Abbildung 27 - Winkel der solare Gesamtstrahlung (eigene Darstellung).....	33
Abbildung 28 - Windrose (eigene Darstellung).....	34
Abbildung 29 - Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höhe (eigene Darstellung)	34
Abbildung 30 - Wohnring Neuperlach (aer-muenchen.de, 2023).....	35
Abbildung 31 - Stadtkarte Neuperlach (Geoportal Bayern, 2023).....	36
Abbildung 32 - Darstellung des Arbeitsablaufs (eigene Darstellung)	38
Abbildung 33 - Untersuchungsbereich (eigene Darstellung).....	40
Abbildung 34 - Vereinfachung der 3D-Modelle (eigene Darstellung)	41
Abbildung 35 - Lokalisierung der Untersuchungsbereiche (Google Maps, 2023)	42
Abbildung 36 - Luftbild und Flurkarte 1b (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)	43
Abbildung 37 - Luftbild und Flurkarte 1c (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)	44
Abbildung 38 - Luftbild und Flurkarte 2a (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)	44
Abbildung 39 - Luftbild und Flurkarte 2b (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)	45
Abbildung 40 - Luftbild und Flurkarte 2c (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)	45
Abbildung 41 - Luftbild und Flurkarte 2d (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)	46

Abbildung 42 - Luftbild und Flurkarte 2d (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)	46
Abbildung 43 - Luftbild und Flurkarte 3b (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)	47
Abbildung 44 - Luftbild und Flurkarte 3a (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)	47
Abbildung 45 - Luftbild und Flurkarte 3c (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)	48
Abbildung 46 - Luftbild und Flurkarte 4a (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)	48
Abbildung 47 - Luftbild und Flurkarte 4b (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)	49
Abbildung 48 - Luftbild und Flurkarte 4c (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)	50
Abbildung 49 - Höhe der Überdachung (eigene Darstellung)	50
Abbildung 50 - Optimierung der PV-Paneel Ausrichtung (eigene Darstellung)	51
Abbildung 51 - UTCI-Analyse; Gesamt; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	52
Abbildung 52 – UTCI-Analyse; Gesamt; Sommermonate; Tag (122 Tage / 12 Stunden) (eigene Darstellung)	53
Abbildung 54a - UTCI-Analyse 1b; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	54
Abbildung 54b - UTCI-Analyse 1b; Ausgangssituation; Kälteste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	54
Abbildung 56a - UTCI-Analyse 1b; ohne Bäume; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	55
Abbildung 56b - UTCI-Analyse 1b; ohne Bäume; Kälteste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	55
Abbildung 58a - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	56
Abbildung 58b - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 4,50 m; Kälteste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	56

Abbildung 60a - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 10,75 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	56
Abbildung 60b - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 10,75 m; Kälteste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	56
Abbildung 62a - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 17,00 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	57
Abbildung 62b - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 17,00 m; Kälteste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	57
Abbildung 64a - UTCI-Analyse 1b; ohne Bäume; Wärmste Woche; Tag (7 Tage / 12 Stunden) (eigene Darstellung)	58
Abbildung 64b - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche; Tag (7 Tage / 12 Stunden) (eigene Darstellung)	58
Abbildung 66a - UTCI-Analyse 1b; ohne Bäume; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung).....	59
Abbildung 66b - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	59
Abbildung 68a - UTCI-Analyse 1b; ohne Bäume; Wärmste Woche; Nacht (7 Tage / 12 Stunden) (eigene Darstellung)	59
Abbildung 68b - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche; Nacht (7 Tage / 12 Stunden) (eigene Darstellung)	59
Abbildung 69 - Strahlungsanalyse 1b kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	60
Abbildung 70 - Strahlungsanalyse 1b kumuliert; Überdachung 17,00 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	61
Abbildung 71 - Strahlungsanalyse 1b kumuliert; Überdachung 10,75 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	61
Abbildung 72 - Strahlungsanalyse 1b kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	62
Abbildung 73 - Individuell ausgerichtete PV-Paneele (eigene Darstellung)	63
Abbildung 74 - Strahlungsanalyse 1b kumuliert; Überdachung 4,50 m einzeln Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	63
Abbildung 75 - UTCI-Analyse 1c; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	64

Abbildung 76 - UTCI-Analyse 1c; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	64
Abbildung 77 - UTCI-Analyse 1c; Überdachung 8,00 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	65
Abbildung 78 - UTCI-Analyse 1c; Überdachung 11,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	65
Abbildung 79 - Strahlungsanalyse 1c kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	66
Abbildung 80 - Strahlungsanalyse 1c kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	67
Abbildung 81 - UTCI-Analyse 2a; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	67
Abbildung 82 - UTCI-Analyse 2a; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	68
Abbildung 83 - UTCI-Analyse 2a; Überdachung 14,00 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	68
Abbildung 84 - UTCI-Analyse 2a; Überdachung 23,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	69
Abbildung 85 - Strahlungsanalyse 2a kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	69
Abbildung 86 - Strahlungsanalyse 2a kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	70
Abbildung 87 - UTCI-Analyse 2b; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	71
Abbildung 88 - UTCI-Analyse 2b; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	71
Abbildung 89 - UTCI-Analyse 2b; Überdachung 12,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	72
Abbildung 90 - UTCI-Analyse 2b; Überdachung 20,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	72
Abbildung 91 - Strahlungsanalyse 2b kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	73
Abbildung 92 - Strahlungsanalyse 2b kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	74

Abbildung 93 - UTCI-Analyse 2c; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	74
Abbildung 94 - UTCI-Analyse 2c; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	75
Abbildung 95 - UTCI-Analyse 2c; Überdachung 12,75 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	75
Abbildung 96 - UTCI-Analyse 2c; Überdachung 21,00 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	76
Abbildung 97 - Strahlungsanalyse 2c kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	77
Abbildung 98 - Strahlungsanalyse 2c kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	78
Abbildung 99 - UTCI-Analyse 2d; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	78
Abbildung 100 - UTCI-Analyse 2d; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	79
Abbildung 101 - UTCI-Analyse 2d; Überdachung 13,00 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	79
Abbildung 102 - UTCI-Analyse 2d; Überdachung 21,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	80
Abbildung 103 - Strahlungsanalyse 2d kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	81
Abbildung 104 - Strahlungsanalyse 2d kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	82
Abbildung 105 - UTCI-Analyse 3a; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	82
Abbildung 106 - UTCI-Analyse 3a; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	83
Abbildung 107 - UTCI-Analyse 3a; Überdachung 9,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	83
Abbildung 108 - Strahlungsanalyse 3a kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	84
Abbildung 109 - Strahlungsanalyse 3a kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	85

Abbildung 110 - UTCI-Analyse 3b; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	85
Abbildung 111 - UTCI-Analyse 3b; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	85
Abbildung 112 - UTCI-Analyse 3b; Überdachung 9,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	86
Abbildung 113 - Strahlungsanalyse 3b kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	87
Abbildung 114 - Strahlungsanalyse 3b kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	87
Abbildung 115 - UTCI-Analyse 3c; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	88
Abbildung 116 - UTCI-Analyse 3c; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	88
Abbildung 117 - UTCI-Analyse 3c; Überdachung 9,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	89
Abbildung 118 - Strahlungsanalyse 3c kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	89
Abbildung 119 - Strahlungsanalyse 3c kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	90
Abbildung 120 - UTCI-Analyse 4a; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	90
Abbildung 121 - UTCI-Analyse 4a; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	91
Abbildung 122 - UTCI-Analyse 4a; Überdachung 10,00 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	91
Abbildung 123 - Strahlungsanalyse 4a kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	92
Abbildung 124 - Strahlungsanalyse 4a kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	93
Abbildung 125 - UTCI-Analyse 4b; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	93
Abbildung 126 - UTCI-Analyse 4b; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	94

Abbildung 127 - UTCI-Analyse 4b; Überdachung 10,00 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	94
Abbildung 128 - Strahlungsanalyse 4b kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	95
Abbildung 129 - Strahlungsanalyse 4b kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	95
Abbildung 130 - UTCI-Analyse 4c; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	96
Abbildung 131 - UTCI-Analyse 4c; Überdachung 9,00 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	96
Abbildung 132 - UTCI-Analyse 4c; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	96
Abbildung 133 - Strahlungsanalyse 4c kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	97
Abbildung 134 - Strahlungsanalyse 4c kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)	98

Abkürzungsverzeichnis

B	
BUGA - Bundesgartenschau.....	27
C	
CAD - Computergestützte 3D-Konstruktion.....	38
CFD - Computergestützte Strömungsdynamik.....	38
clo - clothing	14
COST - Coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique	19
D	
DWD - Deutscher Wetterdienst.....	7
E	
Expo - Weltausstellung	28
I	
IEA - International Energy Agency	11
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change	7
ISB - International Society of Biometeorology	19
K	
KFZ - Kraftfahrzeuge	10
KMM - Klima-Michel-Modell	18
L	
LHM - Landeshauptstadt München	23
M	
met - metabolic rate	13
MRT - Mean Radiant Temperature	15
N	
NCEP - National Centers for Environmental Prediction.....	1
NEB - New European Bauhaus.....	2
P	
PMV - Predicted Mean Vote	17
PPD - Predicted Percentage of Dissatisfied	17
PV - Photovoltaik	2

R

RAL - Richtlinien für die Anlage von Landstraßen 50

S

SVF - Sky View Faktor 10

U

UHI - Urban Heat Island 1

UTCI - Universal Thermal Climate Index 19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Energieumsätze (Deutsches Institut für Normung e.V., 2007)	14
Tabelle 2 - Bekleidungsisolationswerte für typische Bekleidungskombinationen (Deutsches Institut für Normung e.V., 2007)	14
Tabelle 3 - Matrix zur Auswahl der Untersuchungsbereiche	42
Tabelle 4 - Ergebnisse Strahlungsanalysen	103

Formelverzeichnis

Formel 1 - Strahlungsbilanz	10
Formel 2 - Wärmebilanz.....	10
Formel 3 - Operative Temperatur.....	15
Formel 4 - PMV.....	17
Formel 5 - PPD	18

1. Einleitung

„We're the first generation to feel the impact of climate change, and the last generation that can do something about it.“¹

- (Barack Hussein Obama II, 2015)

Wie der 44. Präsident der Vereinigten Staaten von Amerika mit seinen Worten eindringlich anmahnt, ist der Klimawandel ohne Zweifel eines der größten Themen unserer Zeit. Dieses Jahr alleine wurde der Rekord der weltweiten Durchschnittstemperatur von 16,9 °C vom August 2016 laut National Centers for Environmental Prediction [NCEP; deutsch Nationale Zentren zur Umweltvorhersage] der Vereinigten Staaten gleich an zwei aufeinanderfolgenden Tagen gebrochen. So wurde am 3. Juli 2023 eine globale Durchschnittstemperatur von 17,01 °C und bereits am 4. Juli Temperatur von 17,2 °C gemessen (Süddeutsche Zeitung, 2023). Die globale Durchschnittstemperatur der drei Sommermonate Juni bis August dieses Jahres waren insgesamt mit 16,77 °C zusätzlich deutlich heißer als alle Sommer seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Das bisherige Rekordjahr 2019 wies eine Durchschnittstemperatur von 16,48 °C auf. (Weiß, 2023)

Vor allem von den ansteigenden Temperaturen betroffen sind Städte. Durch die unterschiedlichen Wind-, Niederschlags- und Luftfeuchtigkeitsverhältnisse im Vergleich zu Umland sowie der Bodenversiegelung, der Wärmeemissionen, der Wärmespeicherkapazität, der Bebauung und vielen weiteren Faktoren entsteht in den Städten ein lokales Klimaphänomen. Der sogenannte Urban Heat Island [UHI; deutsch städtische Wärmeinsel] Effekt kann dabei zu einer signifikanten Differenz der täglichen Lufttemperaturminima im Vergleich zum städtischen Umland führen, welche durch die globale Klimaerwärmung zukünftig noch extremer wird. (Lozán et al., 2019)

Durch diese zusätzliche Hitzebelastung in den Städten wird der öffentliche Außenraum für die Bewohnenden immer schlechter nutzbar. Straßen, Kreuzungen und Plätze in Städten sind meist durch ihre Lage und Beschaffenheit besonders stark vom UHI-Effekt betroffen. Diese Räume werden der Öffentlichkeit entzogen, was entsprechende Komforteinbußen mit sich bringt. Besonders vulnerable Gruppen wie Schwangeren, Kleinkindern und älteren Menschen leiden unter den erheblichen gesundheitlichen Gefahren durch die Überhitzung der Städte (Kemen & Kistemann, 2019). Während lang anhaltender Hitzewellen steigt sowohl die Anzahl der Krankenhauseinlieferungen als auch die

¹ Wir sind die erste Generation, die die Auswirkungen des Klimawandels zu spüren bekommt, und die letzte Generation, die etwas dagegen tun kann. (Übersetzt vom Autoren)

Mortalitätsrate signifikant an. Dabei konnten in der Vergangenheit die größten Abweichungen in den am dichtesten besiedelten Regionen beobachtet werden. (Graw et al., 2019)

Simultan steigt der Bedarf nach elektrischer Energie vor allem in den Städten rasant an. Durch die anhaltende Erwärmung und die damit einhergehenden Überhitzungseffekte der Städte wird zunehmend auch in Deutschland strombasierte Wohngebäudeklimatisierung eingesetzt. Diese sorgen vor allem im Sommer für einen signifikant steigenden Strombedarf (Kenkmann et al., 2019). Aber auch durch die Energiewende steigt der Bedarf an elektrischer Energie. Besonders in den Sektoren Mobilität und Wärme kann eine Dekarbonisierung nur durch den vermehrten Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energiequellen erfüllt werden. (Gerhardt et al., 2015)

Um den zukünftigen Energiebedarf zu decken, ist unter anderem der Ausbau von Photovoltaik [PV] empfehlenswert (Wirth, 2023). Vor allem in Städten ist das Potenzial dafür durch die große Anzahl von nutzbaren Dachflächen gegeben. Dachflächen bilden dabei allerdings nur einen Teil der möglicherweise nutzbaren Fläche. Diese haben zudem den entscheidenden Nachteil, in den meisten Fällen in privatem Besitz zu sein. Die Nutzung von Dachflächen zur Energiegewinnung durch die öffentliche Hand ist somit nicht ohne weiteres möglich. Die Nutzung öffentlicher Flächen wie Straßen, Kreuzungen und Plätzen bietet sich deshalb zur energetischen Nutzung von städtischer Seite zusätzlich an, da hier ein rascher Ausbau lediglich kommunal entschieden werden müsste.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Creating NEBourhoods Together – München Neuperlach“ der New European Bauhaus [NEB; deutsch Neues europäische Bauhaus] Initiative der Europäischen Kommission sollen als Teil der „Public Power“ Action Konzepte entwickelt werden, welche dem UHI Effekt im öffentliche Raum entgegenwirkt und gleichzeitig die überschüssige Energie nutzbar macht. Diese Abschlussarbeit ist in dieses Projekt eingegliedert.

Daraus ergibt sich für diese Thesis folgende Hypothese:

Die Installation von Überdachungen im öffentlichen Straßenraum hat das Potenzial, deren Überhitzung an heißen Tagen auf ein thermisches Komfortniveau zu begrenzen und gleichzeitig relevante Mengen an Strom durch Photovoltaik auf der Dachfläche zu generieren.

Das Ziel dieser Thesis ist es, die geometrische optimale Form einer Überdachung in verschiedenen Straßensituationen zu ermitteln, um eine maximale Reduktion der Über-

hitzung des Straßenraums bei einem möglichst hohen energetischen Ertrag der PV-Module zu ermöglichen. Eine Reduktion der Überhitzung an heißen Tagen auf ein erträgliches Maß und somit die Zurückgewinnung des öffentlichen Raums für die Anwohnende ist dabei die mindeste Anforderung und höchste Priorität. Die energetische Nutzung soll unter Beibehalten der Aufenthaltsqualität im Rahmen der Möglichkeiten optimiert werden.

Zunächst wird hierzu der aktuelle Stand der Wissenschaft dargelegt. Nach einer Einführung in das die Thesis übergreifende Forschungsprojekts soll auf den Klimawandel, den städtischen Wärmeinseleffekt, Komfort im Außenraum, die Situation der Energiewende im München sowie Verschattungsarchitektur eingegangen werden.

Anschließend wird die Methodik zur Bearbeitung der Problemstellung erläutert. Die Klimadatengrundlage, gefolgt von der Stadtanalyse bilden den Einstieg in die Erläuterung der Methodik. Daraufhin sollen die Untersuchungsbereiche abgegrenzt sowie die Systematik zur geometrischen Optimierung der Überdachung beschrieben werden.

Im Ergebnis- und Diskussionsteil werden dann die Untersuchungsergebnisse jeder einzelnen der Untersuchungsbereiche im Detail analysiert und bewertet. Außerdem soll eine Aussage zu den Grenzen und der Qualität der Ergebnisse getroffen werden.

Schließlich werden die wichtigsten Erkenntnisse im Fazit zusammengefasst und ein Ausblick auf die möglichen Folgen der Untersuchung geworfen.

2. Stand der Wissenschaft und Technik

Im Folgenden wird der Stand der Wissenschaft und Technik und somit die Grundlagen der durchgeführten Untersuchung dargelegt. Zunächst wird die Thesis im überspannenden Forschungsprojekt eingeordnet und abgegrenzt. Anschließend werden der Klimawandel und seine Einflüsse auf das Projekt beschrieben, bevor genauer auf den städtischen Wärmeinseleffekt eingegangen wird. Daraufhin folgt eine Einführung in das Thema thermischer Komfort im Außenbereich. Der aktuelle Stand des Ausbaues erneuerbarer Energien im Stadtgebiet von München wird im darauffolgenden Kapitel dargelegt. Schließlich folgt eine historische Einordnung der Verschattungsarchitektur mit ihren Pionieren und Meilensteinen.

2.1. Projekteinordnung

Die vorliegende Arbeit stellt ein Teil der Action „Public Power“ der Technischen Universität München im Rahmen des Leuchtturmprojekts „Creating NEBourhoods Together – München Neuperlach“ der NEB Initiative der Europäischen Kommission dar.

Im September 2019 wurde von der Präsidentin der Europäischen Kommission, Ursula von der Leyen die Initiative „New European Bauhaus“ vorgestellt. Als geistiger Nachfolger des 1919 von Walter Gropius und Freunden in Weimar gegründeten Staatlichen Bauhauses, welches damals eine ganz neue Herangehensweise an Architektur als Gesamtkunstwerk etablierte, Kunst und Handwerk mit der Architektur verband und so eine neue Bauphilosophie begründete, soll die Initiative die Umsetzung des „European Green Deal“ unterstützen (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2023). Ziel des 2019 innereuropäisch geschlossenen „European Green Deals“ ist es, Europa zum ersten klimaneutralen Kontinent zu machen. Dafür sollen bereits 2030 mindestens 55 % der Netto-Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 eingespart werden (Europäische Kommission, 2023a). Das NEB soll eine kreative und transdisziplinäre Bewegung darstellen, welche nachhaltigen, ästhetischen und inklusiven Lebensraum durch die Verbindung von Kunst, Kultur, Wissenschaft und Technologie schafft. (Europäische Kommission, 2023b)

Im Mai 2022 gab die Europäische Kommission bekannt, dass sie im Zuge des NEB fünf ausgewählte „Leuchtturmprojekte“ mit insgesamt 25 Millionen Euro fördern will. Die Projekte sollen in der gesamten EU nachhaltige, inclusive und schöne Orte schaffen und die Bürgerinnen und Bürger in den grünen Wandel auf lokaler Ebene einbeziehen. Eines

dieser geförderten Projekte ist „NEBourhoods - Creating NEBourhoods Together“. Innerhalb von zwei Jahren sollen die einzelnen Projekte innovative Lösungen für die vielschichtigen Problemstellungen erarbeiten und als Demonstrationsprojekte in Europa gelten. (Europäische Kommission, 2023b)

Creating NEBourhoods Together hat sich zur Aufgabe gemacht, im Münchner Stadtteil Neuperlach verschiedene Projekte umzusetzen, um die Lebensqualität zu verbessern, den Alltag zu erleichtern und zum Klimaschutz beizutragen. Neuperlach wurde in den 60er Jahren als Entlastungsstadt am Reißbrett entworfen, um die steigende Wohnungsnot zu bekämpfen. Heute hat der Stadtteil mit vielseitigen Problemen wie großen Sanierungsbedarf der Gebäude, vernachlässigten Freiflächen und hoher Arbeitslosigkeit zu kämpfen, bietet aber durch starke soziale Bindung, die multikulturelle Bevölkerung, großen Grünflächen, einem getrennten Fuß- und Radwegnetz und leerstehenden Bürostruktur die ideale Grundlage für die Bearbeitung im Sinne des NEB. (NEBourhoods, 2023)

Die Bearbeitung erfolgt aufgeteilt in 10 „Actions“, welche sich die Lösung verschiedener Problemstellungen wie Stadtbegrünung, Einbeziehung von Tieren oder der Umnutzung von leerstehenden und veralteten Bürokomplexen verschrieben haben. Eine dieser „Actions“ ist das Projekt „Public Power“. Ziel ist es, bis 2025 gemeinschaftlich Prototypen zu entwickeln, um erlebbar zu machen, dass umweltgerechtes und zukunftsfähiges Leben und Wirtschaften im Stadtteil möglich ist. (NEBourhoods, 2023)

Die durch den Klimawandel steigenden Temperaturen sind besonders in den Städten zu spüren. Dadurch wird der öffentliche Raum vor allem für vulnerable Gruppen an heißen Tagen immer schlechter zugänglich und nutzbar. „Public Power“ hat das Ziel, die Temperaturen im Straßenraum von Neuperlach in den Sommermonaten so zu senken, dass soziale Exklusion verhindert und wieder eine Aufenthaltsqualität für alle Bewohnenden erreicht wird. Gleichzeitig soll die entstehende Verschattungsarchitektur mit PV-Elementen versehen werden und somit aktiv zur Energiewende beitragen. (NEBourhoods, 2023)

In folgendem Abschnitt soll genauer auf die Effekte des Klimawandels eingegangen werden.

2.2. Klimawandel

Seit der Mitte des 20. Jahrhunderts lassen sich in signifikanter Weise Erscheinungen identifizieren, die als unmittelbare Konsequenzen der derzeitigen Klimaveränderung anzusehen sind. Hierbei wird deutlich, dass sowohl die Schichten der Atmosphäre in un-

mittelbarer Nähe zur Erdoberfläche als auch die Ozeane der Welt einem durchschnittlichen Erwärmungsprozess unterliegen. Diese Erwärmungstendenzen treten nicht nur lokal begrenzt auf, sondern manifestieren sich global in einer messbaren Weise. Neben den thermischen Auswirkungen sind auch Veränderungen in der Häufigkeit und Intensität von Klimaextremen ablesbar. Insbesondere ist eine bemerkenswerte Zunahme von Hitzewellen festzustellen. Gleichzeitig haben lokale Starkregenereignisse an Frequenz und Intensität zugenommen, was auf eine potenzielle Veränderung der hydrologischen Kreisläufe hinweist. Darüber hinaus hat der globale Meeresspiegel in dieser Zeitspanne eine bemerkenswerte Erhöhung erfahren. (IPCC, 2023a)

Als Klima bezeichnet man im Gegensatz zum Wetter die Veränderung statistischer Werte über einen längeren Zeitraum. In der Klimaforschung nimmt man hier häufig die Veränderung über einen Zeitraum von 30 Jahren an. Die Mittelwerte und Extremwerte dieser längeren Zeitperioden geben ein von der starken wetterbedingten Variabilität der Daten bereinigtes Bild. (Deutscher Wetterdienst, 2023)

Das ungestörte Klimasystem der Erde beruht auf eintreffender Sonnenstrahlung. Diese wird von der Erdatmosphäre sowie der Erdoberfläche teilweise absorbiert und reflektiert. Ein Teil der reflektierten Wärmestrahlung wird jedoch von bestimmten Gasen in den verschiedenen Schichten der Atmosphäre wiederum reflektiert und absorbiert. Durch diesen sogenannten Treibhauseffekt, welcher im natürlichen Zustand vor allem durch den Wasserdampf in der Luft entsteht, wird die mittlere globale Erdtemperatur auf ca. 15 °C gehalten, was das Leben auf der Erde erst ermöglichte. Dass anthropogene Aktivitäten für den rasanten Anstieg dieser Durchschnittstemperatur in den letzten Jahrzehnten verantwortlich sind, lässt sich durch die Emission großer Mengen an treibhauswirksamen Gasen durch den Menschen erklären. Diese vom Menschen verursachte Klimaveränderung bezeichnet man als Klimawandel. (Umweltbundesamt, 2023)

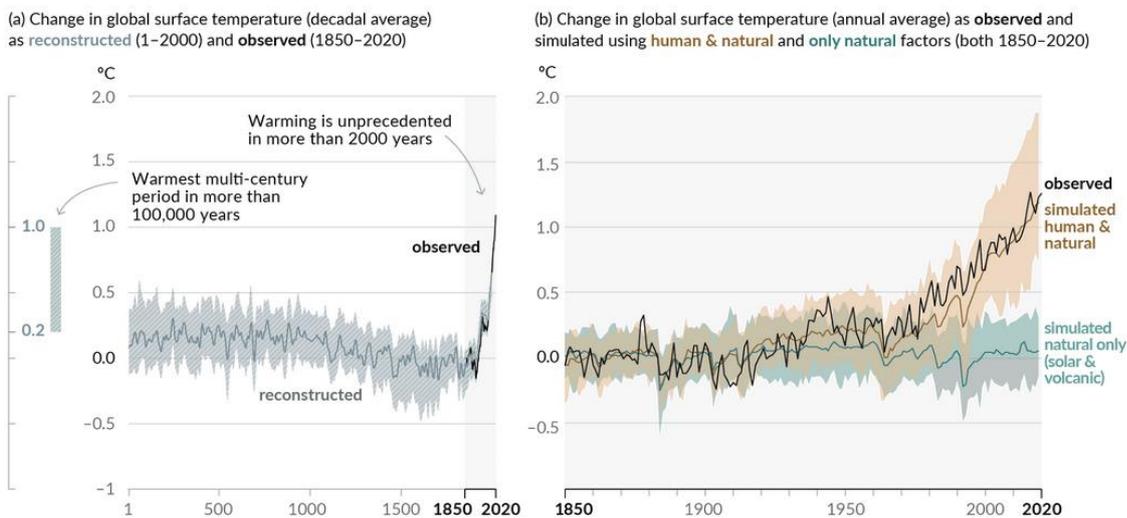


Abbildung 1 - Veränderungen der globalen Oberflächentemperatur im Vergleich zu 1850-1900 (IPCC, 2023a)

Die Abbildung 1 zeigt die Veränderung der globalen Durchschnittstemperatur in den letzten 2000 Jahren sowie die Veränderung seit 1850. In Grün wird hier die simulierte Durchschnittstemperatur ohne menschlichen Einfluss dargestellt. Die industrielle Revolution markiert dabei den Punkt in der Menschheitsgeschichte, an welchem auch die großflächige Emission von anthropogenen Treibhausgasen begann (Bundeszentrale für politische Bildung, 2022). Die ansteigende Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre seit diesem Zeitpunkt korreliert dabei sehr stark mit dem rasanten Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur. Seit Beginn der Industrialisierung stieg der CO₂-Gehalt der Atmosphäre um rund 40 % an. (IPCC, 2023a)

Auch in Deutschland ist die Klimaveränderung deutlich zu spüren. Seit Beginn der 1880er-Jahre stieg die Jahresdurchschnittstemperatur um 1,6 °C, wobei sich die Erwärmungsgeschwindigkeit deutlich erhöht (siehe Abbildung 2). Laut dem Deutschen Wetterdienst [DWD] ist die stärkere Erwärmung im Vergleich zur weltweiten Durchschnittserwärmung von ca. 1 °C dabei dadurch zu erklären, dass sich Land schneller erwärmt als Wasser. Heiße Tage mit einer Temperatur über 30 °C haben sich seit den 50er-Jahren in ihrer Häufigkeit verdreifacht, wobei kalte Tage im gleichen Zeitraum um ein Drittel seltener geworden sind. Die fünf wärmsten Jahre in Deutschland seit Anfang der 80er-Jahre traten alle nach dem Jahr 2000 auf. (Deutscher Wetterdienst, 2023)

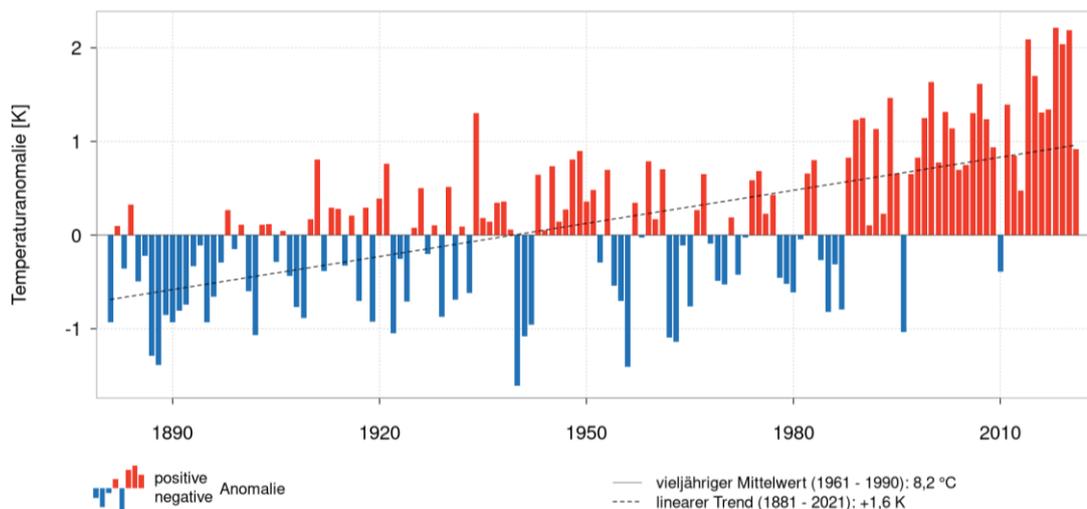


Abbildung 2 - Temperaturanomalien in Deutschland (Deutscher Wetterdienst, 2023)

Für die politische Beratung zur Prognose der zukünftigen globalen Klimaveränderung sowie zur Erarbeitung von Handlungsempfehlungen wurde bereits 1988 das Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC; deutsch Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen] gegründet, in dem 195 Regierungen teilhaben. Das IPCC veröffentlicht in ihren Berichten unter anderem Szenarien, welche den zukünftigen Zustand des globalen Klimasystems anhand von verschiedensten politischen und sozioökonomische Faktoren vorherzusehen versuchen (IPCC, 2023b). Entsprechend der Menge an

emittierten klimawirksamen Gasen durch eine entsprechende globale Klimapolitik der unterschiedlichen Szenarien lässt sich die weitere Klimaveränderung simulieren. Die Szenarien reichen von der aktiven Entfernung von Treibhausgasen aus der Atmosphäre (SSP1-1.9) bis hin zur weiteren Nutzung von fossilen Energieträgern ohne Einsparung (SSP5-8.5) (IPCC, 2023a). Die daraus entsprechende Änderung der globalen Oberflächentemperatur kann man in der Abbildung 3 sehen. Bei Eintreten des Szenarios ohne Einsparung ist in Deutschland bis 2100 ein Anstieg der Durchschnittstemperatur von 3,1 – 4,7 °C zu erwarten (Deutscher Wetterdienst, 2023).

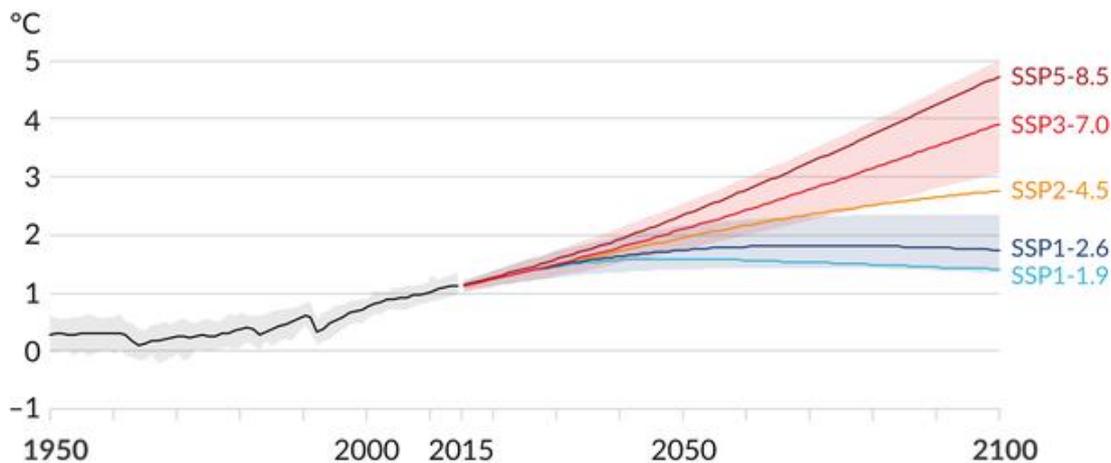


Abbildung 3 – Änderung der globalen Oberflächentemperatur entsprechend der IPCC-Szenarien (IPCC, 2023a)

Besonders in den Städten ist die durch den Klimawandel verursachte stetige Erwärmung deutlich zu spüren. Im folgenden Abschnitt soll ausführlich auf das Stadtklima eingegangen werden.

2.3. Städtischer Wärmeinseleffekt

Differenzierungen im klimatischen System zwischen urbanen Zentren und ihren ländlichen Umgebungen resultieren aus den variierenden Einflüssen der urbanen Bebauung. Das urbane Klima manifestiert sich als Produkt einer komplexen Wechselwirkung zwischen naturgegebenen und anthropogenen Determinanten, was zu einer intrinsischen Heterogenität des städtischen Klimas führt. Naturgegebene Einflüsse umfassen die geografische Lage, topografische Gegebenheiten, die Höhenlage sowie die Präsenz naturnaher Oberflächen. Die anthropogenen Einflussfaktoren involvieren die Charakteristik und Dichte der Baustruktur, die thermischen Speicherkapazitäten der verwendeten Baumaterialien, den Grad der Versiegelung der Bodenflächen sowie die Emissionen aus industriellen Aktivitäten, Haushalten und Verkehr. (Henninger & Weber, 2020)

Im Vergleich zu den ländlichen Umgebungen offenbaren sich modifizierte Gegebenheiten im Hinblick auf die Strahlungsbilanz, den Energiehaushalt sowie die Dynamiken von Temperatur, Feuchtigkeit und Niederschlag. Zudem bedingt der Einfluss des Windes

eine transformierte Luftraumsituation, die ihrerseits von der Menge der freigesetzten Schadstoffe, ihrer Verdünnung oder Abführung beeinflusst wird. Nicht zu vernachlässigen ist die Tatsache, dass die städtische Umgebung nicht nur innerhalb ihrer Grenzen das Klima beeinflusst, sondern auch signifikante Auswirkungen auf das umliegende regionale Klima ausübt. (Henninger & Weber, 2020)

2.3.1. Stadtatmosphäre

Die bodennahe Atmosphäre wird durch die dreidimensionale Form des komplexen Stadtkörpers auf charakteristische Art verändert. Die Abbildung 4 zeigt diese idealisierte charakteristische Stadtatmosphäre. Diese glockenförmige Atmosphäre teilt sich in die Bodenschicht und die Mischschicht. Zusammengefasst werden sie zur städtischen Grenzschicht. Die Bodenschicht wird dabei in eine Stadthindernisschicht, welche bis zur mittleren Bebauungshöhe reicht und eine Stadtreibungsschicht aufgeteilt. In diesen Schichten wird die Luftbewegung primär durch die Advektion sowie thermische und mechanische Turbulenz bestimmt. Je nach Rauigkeit des Reliefs der Stadtbebauung können diese Effekte unterschiedlich stark ausfallen. (W. Kuttler, 2010)

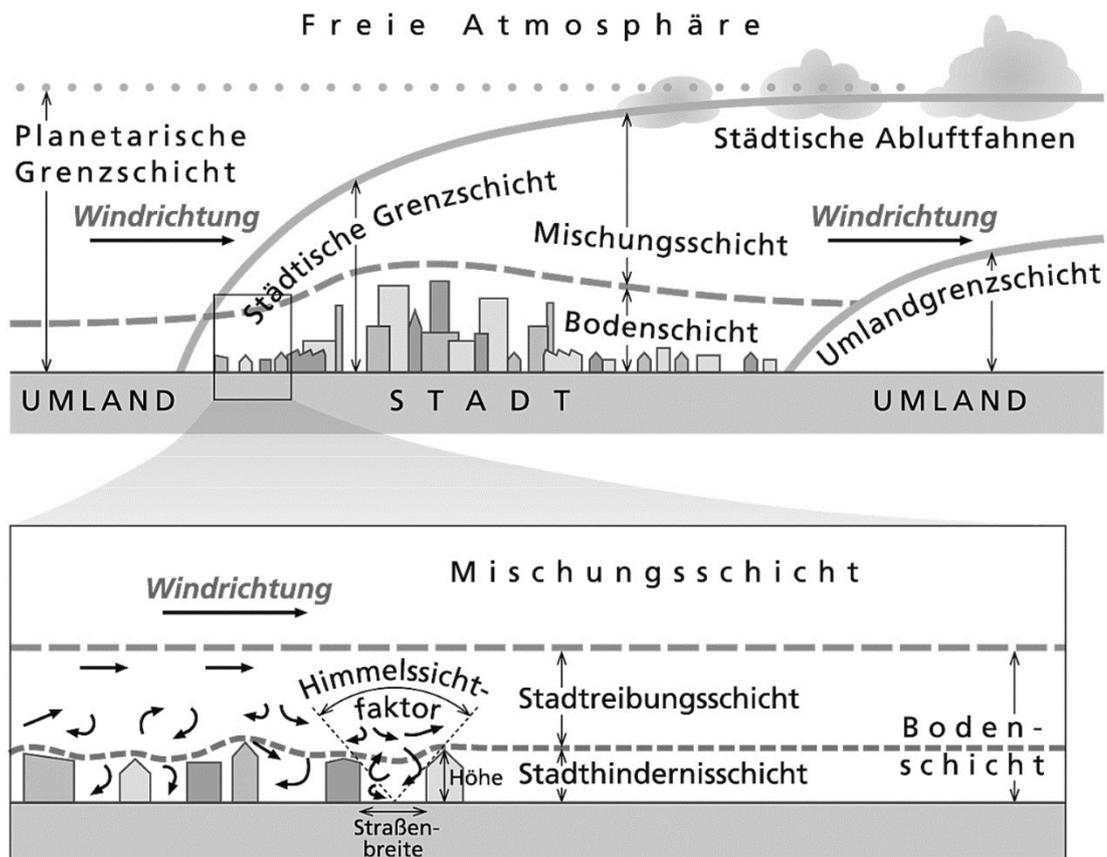


Abbildung 4 - Veränderung der bodennahen Atmosphäre durch den Stadtkörper (W. Kuttler, 2010)

2.3.2. Städtische Energiebilanz

Die städtische Energiebilanz ergibt sich aus dem Strahlungs- und dem Wärmehaushalt. Dieser wird in Städten ganz entscheidend durch die Lage, Größe, Struktur und Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst.

Formel 1 - Strahlungsbilanz

$$Q^* = (K \downarrow + L \downarrow) - (K \uparrow + L \uparrow) [Wm^{-2}]$$

Die Formel 1 stellt die städtische Strahlungsbilanz dar. K beschreibt den kurzwelligen und L den langwelligen Strahlungsanteil, jeweils implizit direkter und diffuser Strahlung. $K \downarrow$ steht dabei für die Globalstrahlungsflussdichte, $L \downarrow$ für die für die atmosphärische langwellige Gegenstrahlung, $K \uparrow$ für die kurzwellige Reflexion und $L \uparrow$ für die langwellige Abstrahlung.

Laut Kuttler ist aufgrund der Luftverschmutzung im urbanen Kontext die kurzwellige Strahlungsflussdichte $K \downarrow$ im Vergleich zum naturbelassenen Umland in der Stadt oft leicht verringert. Auch die kurzwellige Reflexion $K \uparrow$ zeigt sich aufgrund der insbesondere bei Glasfassaden in Straßenschluchten auftretenden Mehrfachreflexionen geringer als im Umland. Die Strahlungsflussdichte im langwelligen Bereich erreicht hingegen im Stadtbereich aufgrund der höheren Temperaturen meist größere Werte. Hier spielt vor allem die Temperatur der Atmosphäre, welche in der städtischen Grenzschicht (siehe Abbildung 4) durch eine „Dunstglocke“ infrarotaktiver Spurenstoffe (z.B. H_2O (Wasser), O_3 (Ozon), CO_2 (Kohlenstoffdioxid), CH_4 (Methan), N_2O (Distickstoffmonoxid)) meist höher ist als im Umland, als auch die Oberflächentemperaturen eine Rolle. Diese ist laut Henninger und Weber aufgrund des allgemein niedrigeren Albedo der in der Stadt verbauten Materialien (z. B. Asphalt [5 – 20 %], Beton [10 – 35 %]; städtischer Mittelwert: 15 %) meist ebenfalls höher als im Umland. Ferner wirkt sich insbesondere der Sky View Faktor [SVF; deutsch Himmelssichtfaktor] (ψ ; siehe Abbildung 4) aus. Bei einer hohen beidseitigen Bebauung einer Straßenschlucht kann insbesondere in der Nacht nur eine geringe langwellige Abstrahlung erfolgen. Der Großteil wird von den umliegenden Gebäuden absorbiert oder reflektiert, weshalb die Oberfläche nur langsam abkühlen kann. (Henninger & Weber, 2020; W. Kuttler, 2010)

Formel 2 - Wärmebilanz

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S [Wm^{-2}]$$

Die Formel 2 stellt die Wärmebilanz in einer Stadt dar. Q_F gibt dabei die anthropogene Wärmeflussdichte an. Diese beschreibt diejenige Wärme, welche durch technische Prozesse wie Industrie, Kraftfahrzeuge [KFZ], Gebäudeklimatisierung, etc. sowie den Metabolismus von Mensch und Tier entsteht. Der Anteil der von der Erdoberfläche absorbierten Teil der Energie wird in die turbulente sensible Wärmeflussdichte Q_H und die turbulente latente Wärmeflussdichte Q_E aufgeteilt. Q_S beschreibt die Speicherwärmeflussdichte.

Wie in der Abbildung 5 zu sehen ist, ergeben sich in der Wärmebilanz sehr starke Unterschiede zwischen dem städtischen Raum und dem Umland. Zunächst lässt sich feststellen, dass die anthropogene Wärmestromdichte Q_F 5 % des gesamten Wärmeflusses in der Stadt ausmacht, während dieser Faktor im ruralen Umland keine Rolle spielt. Am Tag kann der sensible Wärmestrom Q_H in der Stadt einen doppelt so hohen Wert erreichen wie im Umland. Laut Kuttler können die in Städten verbauten Oberflächen bei starker Einstrahlung aufgrund ihres typischerweise höheren Albedo und Emissionsgrades deutlich mehr Wärme abgeben als die Flächen im Umland. Der noch größere Unterschied ergibt sich allerdings im latenten Wärmestrom Q_E . Da sich ein latenter Wärmestrom beim Phasenwechsel von Wasser ergibt, erreicht das mit Vegetation bedeckte und mit Bodenwasser versorgte rurale Gebiet hier einen dreimal höheren Wert als das trockene Stadtgebiet (W. Kuttler, 2010). Das Bowen-Verhältnis (β) beschreibt diesen Unterschied von latentem und sensiblen Wärmestrom. Dieses berechnet sich als $\beta = Q_H / Q_E$. Wälder und Grasländer haben typischerweise ein mittleres Bowen-Verhältnis von $0,4 < \beta < 0,8$, nicht bewässerte Städte hingegen von $\beta > 1$. Auch die Speicherwärmeflussdichte Q_S ist in der Stadt fast doppelt so hoch wie auf dem Land. Dieser ergibt sich aus den deutlich höheren Wärmeleitfähigkeiten und –kapazitätsdichten der in der Stadt verwendeten Baumaterialien (Henninger & Weber, 2020). In der Nacht wird diese gespeicherte Wärme durch die Baumaterialien wieder abgegeben und macht in der Stadt nun 80 % des Gesamtwärmestroms aus. Zusätzlich steigt der Anteil der anthropogenen Wärmestromdichte Q_F auf 20 %. Obwohl sich die Menge an emittierter anthropogener Wärme in mitteleuropäischen Städten im Jahresmittel auf ca. 30 Wm^{-2} schätzen lässt, gibt es laut International Energy Agency [IEA; deutsch Internationale Energieagentur] Grund zu der Annahme, dass sich bei steigender Hitze und dadurch größerer Anzahl an Wohnungsklimatisierungsgeräten diese Zahl in Zukunft signifikant nach oben bewegen könnte (IEA, 2018). (Henninger & Weber, 2020; W. Kuttler, 2010)

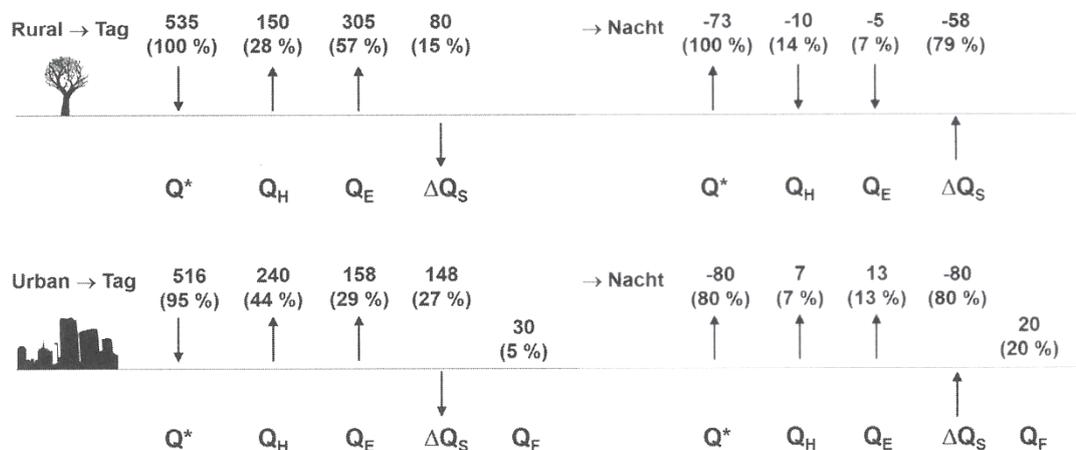


Abbildung 5 - Wärmebilanz an einem urbanen im Vergleich zu einem ruralen Stand (Henninger & Weber, 2020)

2.3.3. Überhitzungseffekt

Die wesentlichen Gründe für die im Durchschnitt höheren Oberflächen- und Lufttemperaturen in Städten sind die Unterschiede in der Bodenoberfläche, wie die Rauigkeit, die starke Versiegelung, die Wahl der Baumaterialien (Albedo, Emissionsgrad, Wärmespeicherfähigkeit), die hohe anthropogene Wärmeabgabe, die höhere langwellige Gegenstrahlung durch Luftverschmutzung sowie die geringe langwellige Abstrahlung durch den eingeschränkten SVF. Überwärmte Stadtgebiete werden allgemein als städtische Wärmeinsel bezeichnet, wobei laut Kuttler zu beachten gilt, dass ein Stadtgebiet niemals homogen überwärmt ist und durch die heterogene Stadtstruktur meist mehrere Wärmezentren aufweist. Zum Verständnis des Effekts sollte laut Henninger und Weber zusätzliche noch beachtet werden, dass ein Wärmeinseleffekt nur selten und nur lokal am Tage auftritt. In den Sommermonaten baut sich die Überhitzung gegen Abend auf und erstreckt sich über die Nacht. In den Wintermonaten ist meist nur eine schwache Wärmeinsel zu beobachten. Außerdem ist der Effekt stark von der Wetterlage abhängig. (Henninger & Weber, 2020; W. Kuttler, 2010)

Der Mensch nimmt diese Überhitzungseffekte auf verschiedene Weisen wahr. Ein Zusammenspiel aller genannten Einflüsse erzeugt bei Hitzewellen thermischen Diskomfort durch die Überhitzung des Körpers. Im nächsten Kapitel soll genauer auf die Wahrnehmung von Temperatur und thermischen Komfort eingegangen werden.

2.4. Thermischer Komfort im Außenraum

Der menschliche Körper muss laut Hegger zur Sicherstellung einwandfreien Funktionstüchtigkeit stets eine interne Temperatur von ca. 37 °C beibehalten. Dazu muss er seinen metabolischen Stoffwechsel konstant mit den Wärmegewinnen und -verlusten aus der Umgebung in Einklang bringen. Der konstante Wärmeaustausch zwischen dem menschlichen Körper und seiner Umgebung zur Aufrechterhaltung dieser Bilanz lässt uns den Körper durch Kälte- und Wärmeempfinden spüren. Die Wärmeabgabe erfolgt über vier Mechanismen:

1. **Wärmestrahlung** an raumumschließende Oberflächen und umgebende Gegenstände,
2. **Konvektion** von der wärmeabgebenden Körperoberfläche an die Umgebungsluft,
3. **Verdunstung** von Wasser über die Haut und die Atmung,
4. **Wärmeleitung** an mit dem Körper unmittelbar verbundene Gegenstände.

Bei einer Lufttemperatur von $t_a \approx 20 \text{ °C}$, keiner Luftbewegung, für diese Temperatur angemessener Kleidung und keiner körperlichen Aktivität erfolgt die Wärmeabgabe hauptsächlich über Wärmestrahlung (ca. 46 %) und über Konvektion (ca. 33 %) (G. Hausladen et al., 2005). Bei wärmerer Lufttemperatur nimmt der Anteil an über Verdunstung abgegebener Wärme stetig zu. Der Organismus versucht über eine stärkere Durchblutung der Extremitäten und vermehrter Transpiration eine Kühlung zu erreichen (Hegger, 2007).

2.4.1. Thermischer Komfort

Grundsätzlich gilt: Thermischer Komfort liegt vor, wenn die Wärmebilanz zwischen Wärmeabgabe und Wärmeerzeugung ausgeglichen ist. Dabei ist der menschliche Organismus in der Lage, sich kurzfristig an thermische Reize anzupassen, was als Adaption bezeichnet wird und sich darüber hinaus auch langfristig auf die thermischen Bedingungen seiner Umgebung einzustellen, was man als Akklimatisation bezeichnet (Dentel & Dietrich, 2005). Die Wärmeerzeugung des Körpers hängt hauptsächlich mit dem Aktivitätsgrad zusammen, während die Wärmeabgabe von externen Maßnahmen abhängig ist (Hegger, 2007).

Der Aktivitätsgrad beschreibt den Energieumsatz eines Menschen bei einer bestimmten Tätigkeit. Sie wird in metabolic rate [met; deutsch Metabolische Einheit] angegeben. 1 met entspricht dabei einer Wärmestromdichte von $Q = 58 \text{ W/m}^2$ Körperoberfläche. Bei einer mittleren wärmeabgebenden Oberfläche eines Menschen von $1,8 \text{ m}^2$ ergibt sich somit eine Leistung von $P = 104,4 \text{ W}$. Der Grundumsatz eines Menschen liegt dabei bei ca. 0,8 met. (Hegger, 2007) Tabelle 1 zeigt die Energieumsätze bei verschiedenen Aktivitäten.

Aktivität	Energieumsatz	
	W/m ²	met
Angelehnt	46	0,8
Sitzend, entspannt	58	1,0
Sitzende Tätigkeit (Büro, Wohnung, Schule, Labor)	70	1,2
Stehende, leichte Tätigkeit (Einkaufen, Labor, leichte Industriearbeit)	93	1,6
Stehend, mittelschwere Tätigkeit (Verkaufstätigkeit, Hausarbeit, Maschinenbedienung)	116	2,0

Aktivität	Energieumsatz	
	W/m ²	met
Gehen auf der Ebene		
2 km/h	110	1,9
3 km/h	140	2,4
4 km/h	165	2,8
5 km/h	200	3,4

Tabelle 1 - Energieumsätze (Deutsches Institut für Normung e.V., 2007)

Die Bekleidung einer Person stellt eine Isolationsschicht zwischen der wärmeabgebenden Körperoberfläche und der Umgebung dar und hat somit einen signifikanten Einfluss auf den thermischen Komfort. Der Wärmedurchlasswiderstand dieser Isolationsschicht wird als Bekleidungsisolationswert (I_{cl}) bzw. als clothing-factor [clo; deutsch Bekleidung] angegeben. Typische Innenraumbekleidung entspricht im Sommer ca. 0,5 clo, im Winter ca. 1 clo. Der Isolationswert von 1 clo entspricht dabei einem Bekleidungsisolationswert von $I_{cl} = 1,155 \text{ m}^2\text{K/W}$ (Hegger, 2007). Die Tabelle 2 zeigt verschiedene weitere Kleidungskombinationen mit ihrem entsprechenden Isolationswert.

Tägliche Kleidung	I_{cl}	
	clo	m ² K/W
Slip, T-Shirt, Shorts, leichte Socken, Sandalen	0,30	0,050
Unterhose, Hemd mit kurzen Ärmeln, leichte Hose, leichte Socken, Schuhe	0,50	0,080
Slip, Petticoat, Strümpfe, Kleid, Schuhe	0,70	0,105
Unterwäsche, Hemd, Hose, Socken, Schuhe	0,70	0,110
Slip, Hemd, Hose, Jacke, Socken, Schuhe	1,00	0,155
Slip, Strümpfe, Bluse, langer Rock, Jacke, Schuhe	1,10	0,170
Unterwäsche mit langen Ärmeln und Beinen, Hemd, Hose, Pullover mit V-Ausschnitt, Jacke, Socken, Schuhe	1,30	0,200
Unterwäsche mit kurzen Ärmeln und Beinen, Hemd, Hose, Weste, Jacke, Mantel, Socken, Schuhe	1,50	0,230

Tabelle 2 - Bekleidungsisolationswerte für typische Bekleidungskombinationen (Deutsches Institut für Normung e.V., 2007)

Die Lufttemperatur wird im Freien, aber auch in Räumen meist zu Informationszwecken angegeben. Ableitungen auf den thermischen Komfort können allerdings nur dann gezogen werden, wenn sich die anderen komfortrelevanten Faktoren in einem gewissen Rahmen bewegen. Zusätzlich sollte der vertikal Lufttemperaturgradient in Räumen zur

Wahrung der Behaglichkeit nicht zu groß sein. Ein Delta von 2 Kelvin pro Meter Raumhöhe sollte nicht überschritten werden. (Dentel & Dietrich, 2005)

Ein bestimmender Faktor für den thermischen Komfort ist die Mean Radiant Temperature [MRT; deutsch mittlere Raumumschließungstemperatur / mittlere Strahlungstemperatur]. Diese setzt sich aus den nach den geometrischen Sichtverhältnissen zwischen Bauteil und Person gewichteten Oberflächentemperaturen aller Umschließungsflächen zusammen (G. Hausladen et al., 2005). Die Lufttemperatur und die MRT können sich laut Hegger innerhalb bestimmter Grenzen ausgleichen, sollten jedoch ein Delta von ca. 3 Kelvin nicht überschreiten. Eine größere Differenz wird als unbehaglich empfunden (Hegger, 2007).

Formel 3 - Operative Temperatur

$$t_o = 0,5 \times (t_a + \bar{t}_r)$$

Den Mittelwert zwischen Lufttemperatur (t_a) und MRT (\bar{t}_r) wird als gefühlte Temperatur oder operative Temperatur (t_o) bezeichnet und kann normgerecht über die Formel 3 berechnet werden, solange die metabolische Rate zwischen 1 und 1,3 met liegt, die Luftgeschwindigkeit nicht größer als $v_{ar} = 0,2$ m/s beträgt und die Person keiner direkten Sonnenstrahlung ausgesetzt ist. (ASHRAE, 2017; Deutsches Institut für Normung e.V., 2007)

Die relative Raumluftfeuchte wird bei einer Lufttemperatur von $t_a = 20 - 22$ °C als behaglich empfunden, wenn sie zwischen $rh = 35 - 70$ % liegt (siehe Abbildung 6). Pro 10 %P Erhöhung der relativen Luftfeuchte in diesem Bereich steigt dabei die gefühlte Raumtemperatur des Menschen um 0,3 K (Hegger, 2007). Ab einem absoluten Feuchtegehalt von 11,5 g Wasserdampf/kg trockener Luft (ca. $\rho_w = 15$ g/m³ [absolute Luftfeuchte]) wird das Raumklima als unbehaglich feucht empfunden. Diese „Schwühlegrenze“ sollte nicht überschritten werden. (Dentel & Dietrich, 2005)

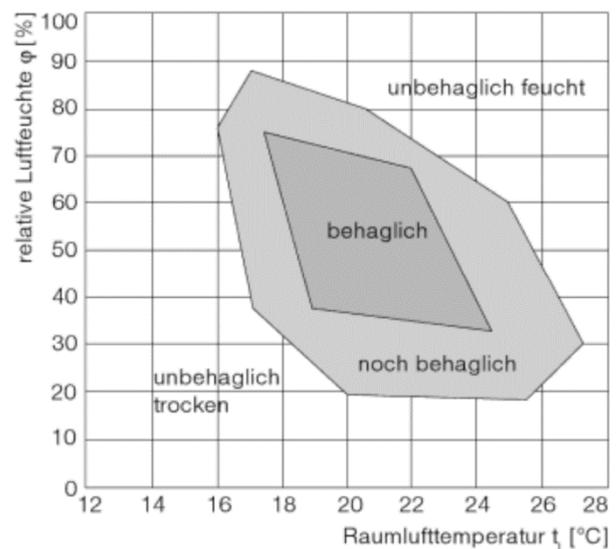


Abbildung 6 - Behagliche Raumluftfeuchte (Hegger, 2007)

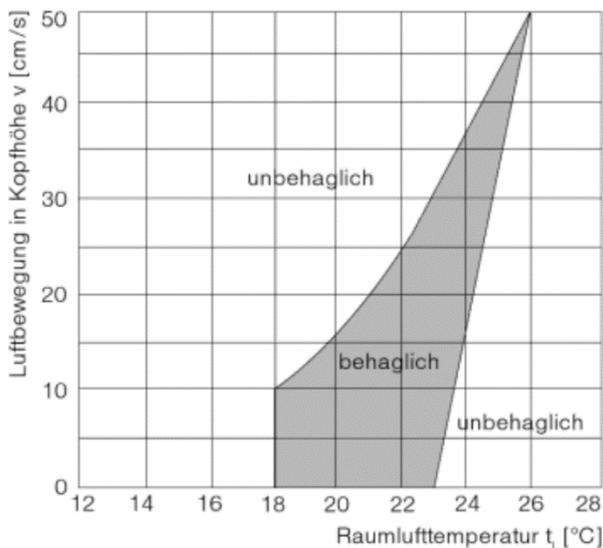


Abbildung 7 - Behagliche Luftbewegung (Hegger, 2007)

Auch die Luftbewegung hat laut Hagger einen direkten Einfluss auf den thermischen Komfort. Eine erhöhte Luftgeschwindigkeit führt zu einer Verringerung der gefühlten Temperatur. Bei einer Raumlufttemperatur von $t_a = 20$ °C wird eine Luftgeschwindigkeit von $v_{ar} = 0,15$ m/s als unangenehm empfunden, wobei sie bei einer Lufttemperatur von $t_a = 23$ °C als angenehm kühlend empfunden werden kann (siehe Abbildung 7). Die Luftgeschwindigkeitsschwankung und die Intensität der Luftströmung wird als Turbulenzgrad (T_u) angegeben.

Bei einem niedrigeren Turbulenzgrad können höhere Luftgeschwindigkeiten als angenehm empfunden werden. (Hegger, 2007)

2.4.2. Indizes des thermischen Komforts

Schon Anfang des 20. Jahrhunderts untersuchten Forscher laut Schmidt den Zusammenhang zwischen Thermophysiologie, Temperaturwahrnehmung und thermischem Komfort des Menschen. Die erste Formel zur Berechnung thermischen Komforts in Innenraum wurde bereits 1890 von Jean Vincent publiziert. Seine Formel stellte einen mathematischen Zusammenhang zwischen der Hautoberflächentemperatur am Daumenballen von ruhenden und unbedeckten Menschen und deren klimatischer Umgebung dar (Bradtke & Liese, 1952). Erst in den 30er-Jahren erkannte Thomas Bedford den großen Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf den thermischen Komfort. Er erweiterte Vincents Behaglichkeitsformel als Ableitung seiner Experimente. (Schmidt, 2016)

Unsere heutigen Komfortmodelle haben laut Schmidt ihre Grundlage in der Forschung von Povl Ole Fanger in den 1970er-Jahren. Fanger berechnete die statische Energiebilanz des gesamten menschlichen Körpers mit allen zugeführten und abgeführten Wärmeströmen. Er inkludierte auch den Einfluss von Bekleidung und körperlicher Aktivität auf den menschlichen Wärmehaushalt in seine Berechnungen. Bis heute gilt normativ eine ausgeglichene Energiebilanz nach Fanger als erstrebenswerte, thermisch „neutrale“ Klimabedingungen (Deutsches Institut für Normung e.V., 2007) und seine Behaglichkeitsformel galt nach der Aufnahme in den amerikanischen ASHRAE Standard 55 aus dem Jahr 1992 als Grundlage für die Auslegung von Klimageräten. Nach der endgültigen Entschlüsselung der Zusammenhänge zwischen Energiebilanz und Temperaturwahrnehmung wurden die Energiebilanz schließlich noch verfeinert und vervollständigt (Dear et al., 1997). (Schmidt, 2016)

Fanger führt in seinem thermischen Komfortmodell zwei Indikatoren ein. Die siebenstufige Skala des Predicted Mean Vote [PMV; deutsch vorausgesagtes mittleres Votum] bestimmt die durchschnittliche Bewertung der klimatischen Bedingungen einer Personengruppe. Dabei kann das Raumklima von -3 (zu kaltes Klima) bis +3 (zu warmes Klima) bewertet werden. Ein angenehmes Raumklima wird mit einer Null bewertet. Der Predicted Percentage of Dissatisfied [PPD; deutsch vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen] Indikator gibt ergänzend den Prozentsatz unzufriedener Personen an. Bei seinen Versuchen entdeckte Fanger schließlich den exponentiellen Zusammenhang zwischen PMV- und PPD, welcher in der Abbildung 8 zu sehen ist. Das Minimum des PPD liegt hier bei 5 %, da es sich als unrealistisch herausstellte klimatische Bedingungen zu schaffen, welche für alle Personen zufriedenstellend sind. (Fanger, 1970)

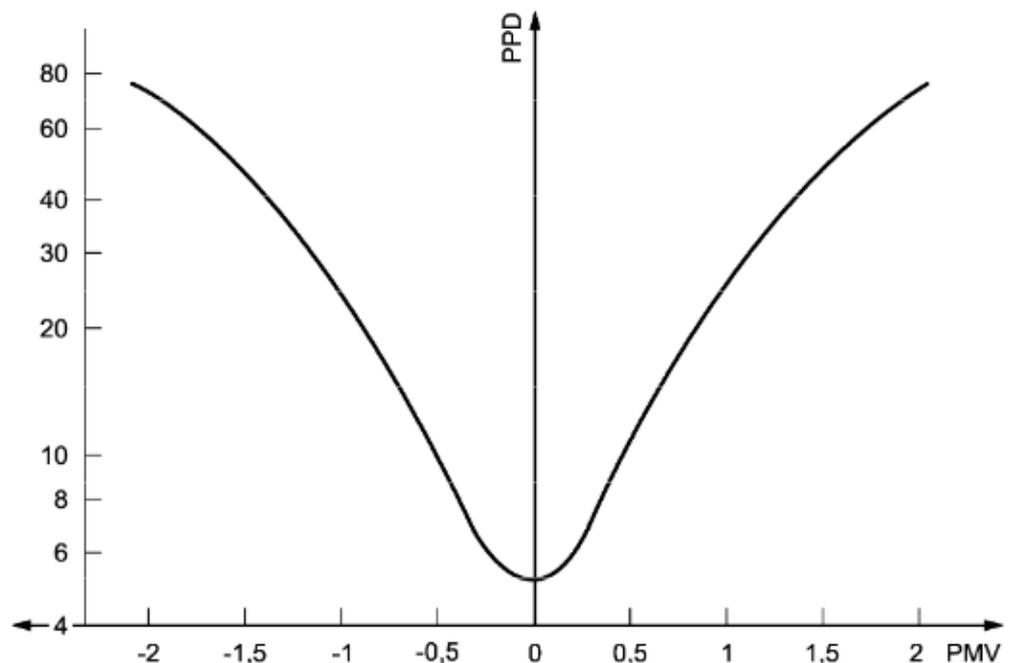


Abbildung 8 - PPD als Funktion des PMV (Deutsches Institut für Normung e.V., 2007)

Der PMV ist abhängig von verschiedenen Klimaparametern und kann vereinfacht über die Formel 4 angegeben werden. Der Wärmeaustausch über Kontaktflächen ist laut Fanger vernachlässigbar. (Fanger, 1970)

Formel 4 - PMV

$$PMV = f(M, W, I_{cl}, f_{cl}, t_a, \bar{t}_r, v_{ar}, p_a, h_c, t_{cl})$$

M	Energieumsatz
W	wirksame mechanische Leistung
I_{cl}	Bekleidungsisoliation
f_{cl}	Bekleidungsflächenfaktor
t_a	Lufttemperatur

\bar{t}_r	mittlere Strahlungstemperatur
v_{ar}	relative Luftgeschwindigkeit
p_a	Wasserdampfpartialdruck im Raum
h_c	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
t_{cl}	Oberflächentemperatur der Bekleidung

Da die Berechnung des PMV iterativ erfolgen muss, schlägt die DIN EN ISO 7730 die Nutzung eines Computeralgorithmus vor. Aus dem Ergebnis der Formel 4 lässt sich unter Zuhilfenahme der Formel 5 der PPD ableiten.

Formel 5 - PPD

$$PPD = 100 - 84,3 \times e^{-(-0,01 \times (PMV-0,4)^4 + 0,5479 \times (PMV-0,4)^2)}$$

Das von Fanger etablierte System weist Normgerecht unter stationären und homogenen Umgebungsbedingungen die höchste Genauigkeit auf. Der PMV-Index sollte deshalb nur für Werte von -2 bis +2 angewendet werden. Zusätzlich ergeben sich folgende Limitierungen der Hauptparameter:

M	0,8 met bis 4 met
I_{cl}	0 clo bis 2 clo
t_a	10 °C bis 30 °C
\bar{t}_r	10 °C bis 40 °C
v_{ar}	0 m/s bis 1 m/s
p_a	0 Pa bis 2 700 Pa

Der Energieumsatz (M) sowie die Bekleidungsisolations (I_{cl}) dürfen abgeschätzt werden, wobei bei einer Veränderung der Mittelwert der letzten Stunde angenommen werden darf. (Deutsches Institut für Normung e.V., 2007)

Aufgrund dieser Limitierungen ist das PMV-Modell von Fanger für die Bestimmung des thermischen Komforts im Außenraum nur bedingt zu gebrauchen. Aus diesem Grund verknüpfte Jendritzky et al. 1979 Fangers PMV-Modell mit einem Strahlungsmodell zu Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur im Außenbereich. Dieses sogenannte Klima-Michel-Modell [KMM] wurde später durch ein von der Luftfeuchte und Luftbewegung abhängigen Korrekturwert von Gagge et al. erweitert. Das KMM blieb über mehr als 20 Jahre das einzige thermische Bewertungsverfahren für Außenbedingungen mit integriertem Strahlungsmodell. (Jendritzky et al., 2009)

In den darauffolgenden Jahren gab es laut Nass eine ganze Reihe von Versuchen, ein besseres System zur Bestimmung der gefühlten Temperatur im Außenbereich zu entwickeln. 1999 schließlich schlug Peter Höppe vor, durch die gemeinsamen Bemühungen von Experten aus den Bereichen Thermophysiologie, Bekleidung, Modellierung, Metrologie und Anwendung ein Verfahren zu entwickeln, welches den bisherigen Systemen überlegen und dadurch universell einsetzbar ist. Der Universal Thermal Climate Index [UTCI; deutsch Universeller thermischer Klimaindex] wurde zu Beginn von einer Kommission der International Society of Biometeorology [ISB; deutsch Internationale Gesellschaft für Biometeorologie] vorangetrieben, bevor die Finanzierung des Projekts 2005 von der EU im Rahmen der Coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique [COST; deutsch Europäische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Wissenschaft und Technologie] übernommen wurde. (Nass, 2023)

Beim ersten internationalen Workshop zur Entwicklung des UTCI wurden die Ziele des Programms formuliert:

1. thermophysiologisch bedeutsam im gesamten Bereich des Wärmeaustauschs
2. gültig für alle Klimazonen, Jahreszeiten und Maßstäbe
3. nützlich für die wichtigsten Anwendungen in der Humanbiometeorologie (z. B. tägliche Vorhersagen, Warnungen, regionale und globale bioklimatische Kartierungen, epidemiologische Studien und Klimafolgenforschung)
4. unabhängig von den Merkmalen der Person (Alter, Geschlecht, spezifische Aktivitäten und Kleidung usw.)

Dazu sollten die verschiedenen etablierten Modelle zur Behaglichkeitsberechnung geprüft und erweitert und zusätzlich die meteorologische Datenverfügbarkeit und die Beobachtungspraktiken in den verschiedenen geografischen Regionen verbessert werden. (Nass, 2023)

Das zugrundeliegende Simulationsmodell zur humanen Thermoregulation für den neuen UTCI-Standard bildet das von Fiala et al. entwickelte Modell, welches im Rahmen der Entwicklung des UTCI umfassend validiert und erweitert wurde. Dazu wurde unter anderem ein neues Bekleidungsmodell entwickelt und in das Fiala Modell integriert. Das so entstandenen UTCI-Fiala-Multi-Segment-Modell berücksichtigt dadurch:

1. eine verhaltensgesteuerte Anpassung der Bekleidungsisolation als Funktion der Lufttemperatur, wie sie bei der Allgemeinbevölkerung beobachtet wurde,
2. eine realistische Verteilung der Bekleidungsisolation über die verschiedenen Segmente des Körpers,

3. eine Reduktion des Wärme- und Feuchtwiderstandes der Bekleidung durch Wind und die Bewegung des mit 4 km/h laufenden Menschen.

(Jendritzky et al., 2009)

Zur exakten Berechnung des menschlichen Wärmehaushalts wird im Fiala-Modell der Körper in zwölf Körperteile aufgeteilt, welche wiederum aus verschiedenen Schichten wie Haut, Fett, Muskeln/Organen und Kern/Knochen/Hirn/Lunge aufgebaut sind. Zusätzlich wird der Wärmetransport durch Blutzirkulation und Wärmeleitung berücksichtigt. So lassen sich in diesem Modell auch lokale Temperaturveränderungen dynamisch simulieren. (Verein Deutscher Ingenieure e. V., 2022)

Der UTCI ermittelt auf Basis der spezifischen Kombination von Lufttemperatur, Wind, Strahlungstemperatur und Wasserdampfdruck die äquivalente Temperatur unter Referenzbedingungen, bei denen die Untersuchungsperson dieselbe physiologische Reizantwort und dieselbe psychologische Belastung zeigt. Die multidimensionale Reizantwort beachtet die Kerntemperatur, mittlere Haut- und Gesichtshauttemperatur, Schweißrate, Hautfeuchte und -durchblutung und das Kältezittern zu unterschiedlichen Expositionszeiten. Die verschiedenen Komponenten der UTCI Berechnung lassen sich in Abbildung 9 nachvollziehen. Die ebenfalls in der Abbildung 9 gezeigte zehnstufige Skale der Temperaturbelastung stellt eine Erweiterung der von Fanger etablierten PMV-skala dar. (Verein Deutscher Ingenieure e. V., 2022)

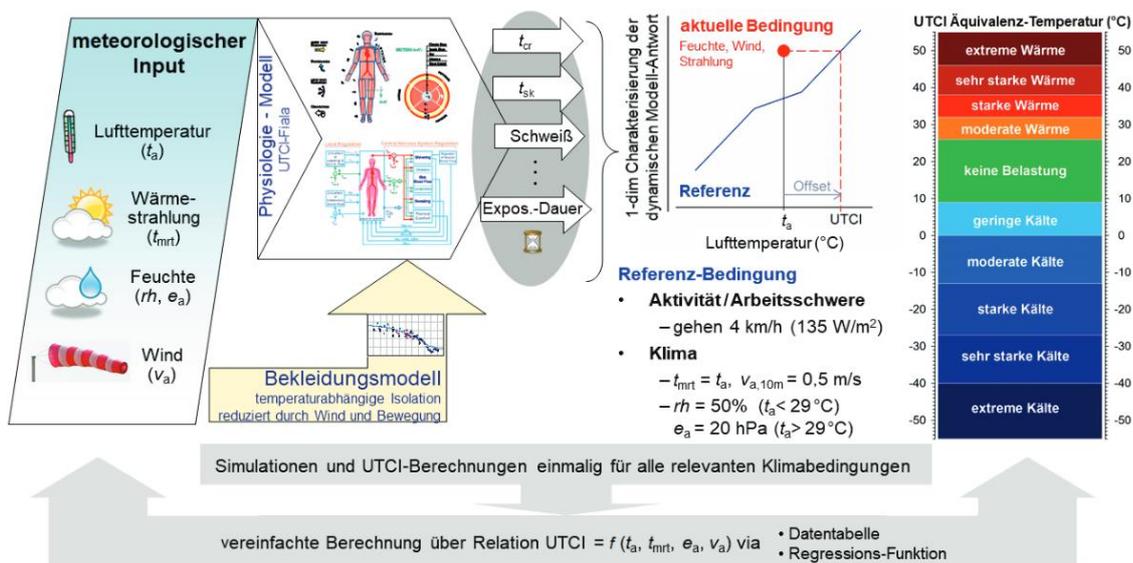


Abbildung 9 - Konzept und Elemente der Berechnung des UTCI für eine aktuelle Bedingung (Verein Deutscher Ingenieure e. V., 2022)

Die Referenzumgebung weist eine MRT auf, welche exakt der Lufttemperatur entspricht, eine relative Feuchte von $rh = 50\%$ (bis zu einem maximalen Wasserdampfdruck von $p_a = 20$ hPa) und eine Windgeschwindigkeit von $v_{ar} = 0,5$ m/s in 10 m über Grund auf. Die

Referenzperson wiegt 73,4 kg, hat eine Hautoberfläche von 1,85 m², einen Körperfettanteil von 14 % und weist eine metabolische Wärmeproduktion von $M = 135 \text{ Wm}^{-2}$ auf. (Verein Deutscher Ingenieure e. V., 2022)

Auch bei diesem Modell ergeben sich Limitierungen der Hauptparameter in Form von einzuhaltenden Definitionsbereichen:

t_a	-50 °C bis 50 °C
\bar{t}_r	-30 °C bis 70 °C
v_{ar}	0,5 m/s bis 30,3 m/s
rh	5 % bis 100 % (bei $p_a < 50 \text{ hPa}$)

(Verein Deutscher Ingenieure e. V., 2022)

2.4.3. Thermischer Stress

Temperaturen außerhalb des Komfortbereichs des Menschen verursachen thermischen Stress. Im UTCI-Bereich von 9 bis 26 °C Äquivalenztemperatur (Abbildung 9) kann der Mensch entsprechend der Regularien des UTCI durch Bekleidung ohne thermische Belastung agieren. Bei allen UTCI-Temperaturen darüber und darunter empfindet der Körper thermischen Stress. (Verein Deutscher Ingenieure e. V., 2022)

Wie in Kapitel 2.2 „Klimawandel“ (ab s. 5) beschrieben, steigen die Temperaturen ausgelöst durch die Klimaveränderung immer weiter an. Vor allem in den Städten ereignen sich, wie in Kapitel 2.3 „Städtischer Wärmeinseleffekt“ (ab s. 8) gezeigt, gehäuft Hitzewellen mit besonders hohen Temperaturen. Bei einer Überschreitung der Grenzen des Komfortbereichs wirkt sich die Wärmebelastung negativ auf die menschliche Gesundheit aus. Sowohl die Mortalität als auch die Morbidität verhalten sich proportional zur Abweichung von der Optimaltemperatur. Besonders ältere Menschen, Schwangere, Kleinkinder und Säuglinge, Erkrankte, mobilitätseingeschränkte, Obdachlose und Menschen, die regelmäßig draußen arbeiten, haben an der thermischen Belastung zu leiden. (Kemen & Kistemann, 2019)

Durch große Hitze ist der menschliche Organismus laut Graw et al. einem erhöhten Stress ausgesetzt, um die Körperkerntemperatur konstant zu halten. Dies stellt eine Belastung für das Herz-Kreislauf-System dar, wodurch es zu einer Verstärkung bestehender Beschwerden kommen kann. Zusätzlich reagiert der menschliche Körper durch erhöhte Schweißproduktion auf erhöhte Temperaturen. Durch diesen Flüssigkeitsverlust verliert der Körper simultan wichtige Mineralstoffe. Diese beiden Effekte sorgen für eine Erhöhung der Viskosität des Blutes und somit zu einem erhöhten Risiko für Thrombosen

und andere Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Ältere Menschen schwitzen später und weniger, weshalb sie weniger Hitze über die Haut abgeben können als jüngere. Durch die Überhitzung in Verbindung mit schwächerem Blutdruck und Dehydratation steigt die Gefahr von Unfällen und Stürzen. Menschen mit einer gesundheitlichen Vorbelastung sind oft ebenso in ihrer Fähigkeit beschränkt, sich an die Hitze anzupassen. Zusätzlich müsste in vielen Fällen die Medikation aufgrund der veränderten Gegebenheiten angepasst werden. Als hohe Risikofaktoren gelten Vorerkrankungen wie chronische Lungenerkrankungen, Diabetes mellitus, chronische Nierenerkrankungen, Neurologische Erkrankungen (z.B. M. Parkinson, Demenz), psychiatrische Erkrankungen (verstärkt bei Medikamenteneinnahme und Betreuungsbedarf), höhergradige Adipositas und vorangehende Krankenhausaufenthalte. Auch die generelle Einnahme von Medikamenten wie u.a. Diuretika, Anticholinergika und Neuroleptika oder der vermehrte Genuss von Alkohol und anderer Suchtmittel erhöhen das Risiko signifikant. Zusätzlich leiden diejenigen vermehrt unter Hitze, die in Dachgeschosswohnungen oder schlecht isolierten Häusern wohnen und keinen Zugang zu kühlen Räumen haben. (Graw et al., 2019)

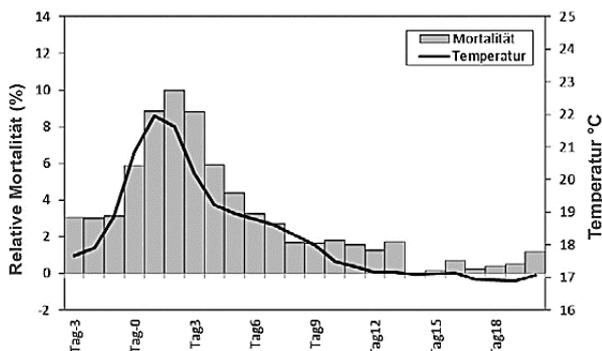


Abbildung 10 - Prozentuale Veränderung der Mortalität während Hitzewellen im Zeitraum 1971-2000 (Kemen & Kistemann, 2019)

In Deutschland treten laut Kemen und Kistemann jährlich durchschnittlich ca. 2.700 Todesfälle in Folge von Hitzewellen auf. Ab einer Temperatur von 17 °C erhöht jeder weitere Grad die Mortalität statistisch um 2,45 %. Der höchste Anstieg der Mortalität lässt sich dabei in den Städten beobachten. Zu beachten gilt allerdings, dass es bis zu 30 Tage

nach einer Hitzewelle zu einer Untersterblichkeit kommen kann. Dies kann über den „short-term mortality displacement“ Effekt erklärt werden. Dieser beschreibt eine Vorverlegung eines Todeszeitpunkts einer schwer kranken oder gebrechlichen Person um wenige Tage aufgrund besonders belastender Umstände. Sie tritt in ca. 20 – 30 % der Fälle auf (der Heiden et al., 2019). Abbildung 10 zeigt den Verlauf einer in Deutschland aufgetretenen Hitzewelle und die Korrelation der Mortalität. Der Tag 0 entspricht hier dem ersten Tag der Hitzewelle. (Kemen & Kistemann, 2019)

Auch die Morbidität erhöht sich bei Auftreten von Hitzewellen signifikant. Hitzebedingte Erkrankungen wie Hitzekrämpfe, Hitzeohnmacht, Hitzschlag oder Sonnenstiche sowie die Verschlimmerung des Zustands erkrankter Personen führen besonders bei einer Reihe von aufeinanderfolgenden sehr heißen Tagen zu einer signifikant erhöhten Anzahl an Krankenhauseinweisungen. (Graw et al., 2019)

Um dem Klimawandel und damit der weiteren Erwärmung der Städte Einhalt zu gebieten, müssen Städte ihre Energie- und Wärmeversorgung grundlegend überdenken. Wie sich München für diese Veränderung aufstellt soll im nächsten Kapitel erörtert werden.

2.5. Erneuerbaren Energien in München

Die Bayrische Landeshauptstadt München [LHM] möchte bis zum Jahr 2035 Klimaneutral werden. Die Stadtverwaltung hat sich sogar selbst das Jahr 2030 für den eigenen Verantwortungsbereich als Ziel gesetzt (Timpe et al., 2021). Dabei folgt die Kommunalpolitik den internationalen Verpflichtungen durch die Unterzeichnung des Pariser Klimaabkommens 2015, die globale Klimaveränderung auf möglichst 1,5 °C, mindestens aber 2 °C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter zu beschränken (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, 2023), sowie dem im August 2021 in Kraft getretenen geänderten Klimaschutzgesetzes, welches zur Klimaneutralität bis spätestens 2045 und zur Einsparung von 65 % der Emissionen gegenüber 1990 bis 2030 verpflichtet. (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 2022)

Um dieses sehr ambitionierte Ziel zu erreichen, müssen die Klimaschutzmaßnahmen in München deutlich intensiviert und ausgeweitet werden, ohne das gesellschaftliche Leben in der Stadt oder das individuelle Leben der Bewohnenden relevant einzuschränken. Vielmehr sollen nachhaltige Angebote und Infrastruktur entstehen, welche mindestens genauso attraktiv und bequem sind wie die bisherigen. Der benötigten Maßnahmen können laut Timpe et al. in 5 Handlungsspielräume unterteilt werden. Im Folgenden soll vor allem auf die erneuerbare Stromerzeugung im Stadtgebiet der Handlungsspielräume „Wärme, Kälte und Strom“ und „Wirtschaft und Dienstleistung“ eingegangen werden. (Timpe et al., 2021)

Laut Timpe et al. können 11 Prozent der Gesamtemissionen der LHM dem Strombedarf privater Haushalte zugeordnet werden. Etwa 50 der Gesamtemissionen stammen aus dem Wirtschafts- und Dienstleistungssektor, wobei auch hier der Großteil auf den Stromverbrauch zurückzuführen ist. In beiden Fällen ist laut Gerhardt et al. in der näheren Zukunft von einer Erhöhung des Strombedarfs auszugehen. Im Gebäudebereich vor allem durch den Umstieg von fossiler Wärme auf strombasierte Systeme und im Wirtschafts- und Dienstleistungsbereich durch strombasierte industrielle Prozesswärme. Zusätzlich sorgt die zunehmende Elektromobilität für einen Anstieg des Strombedarfs. (Gerhardt et al., 2015; Timpe et al., 2021)

Trotz der auch weiterhin großen Abhängigkeit der LHM vom bundesweiten und europäischen Stromimports ist es im Interesse der Stadt, die lokale Stromerzeugung auszubauen. Da laut Timpe et al. die Potenziale für Wasserkraft bereits nahezu ausgeschöpft, Flächen für den Windkraftausbau im Stadtgebiet rar und die Möglichkeiten der Biomasse-Nutzung begrenzt sind, bietet der Photovoltaikausbau die aussichtsreichsten Chancen. Zusätzlich ist München eine der sonnenreichsten Städte Deutschlands und somit ohnehin prädestiniert für den PV-Ausbau. Langfristig soll so eine Deckung von 20 - 30 % des Strombedarfs Münchens über lokale erneuerbare Energieproduktion möglich sein (Maaß et al., 2020). (Timpe et al., 2021)

Wie in der Abbildung 11 zu sehen, steht seit Dezember 2022 die Gesamtleistung aller in München installierter PV-Anlagen bei über 100 MWp. Die Ausbaugeschwindigkeit lag dabei im Jahr 2022 bei über 12 MWp p. a.. Die Haupttreiber dieses Ausbaus sind dabei Privatpersonen, welche Anlagen mit einer Leistung von durchschnittlich lediglich 7,1 kWp installiert haben. Die LHM ist mit Anlagen mit einer kumulierten Gesamtleistung von 7 MWp der größte PV-Betreiber in München und hält damit einen Anteil von rund 7 % an der Gesamtleistung. (Masterplan solares München, 2023)

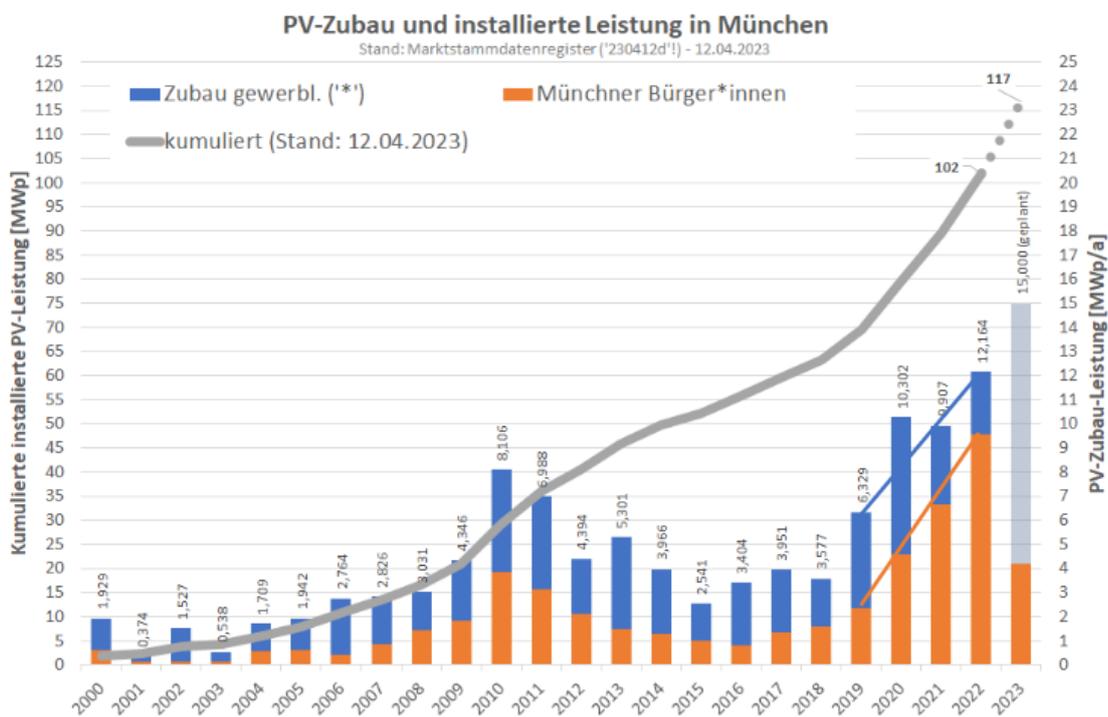


Abbildung 11 - PV-Ausbau in München seit 2000 (Masterplan solares München, 2023)

Zur weiteren Beschleunigung des Ausbaus von PV-Anlagen hat der Ausschuss für Klima- und Umweltschutz des Stadtrats der LHM am 20. Juni 2023 den „Masterplan solares München“ beschlossen. Durch die Verabschiedung sollen Grundsteine für die richtigen Rahmenbedingungen geschaffen werden, um Verwaltung, Wirtschaft, Gebäudeeigentümer und Bürgerinnen und Bürger der Stadt zur Einhaltung der Pläne zu motivieren. Die Ziele des Masterplans (siehe Abbildung 12) sind wie folgt:

1. PV-Zubauleistung von ca. 100 MWp pro Jahr ab 2030,
2. Wachstumsrate der Neuinstallationen von mindestens 40 % pro Jahr in den 2020er-Jahren,
3. Dauerhafte Erhaltung der Installationskapazität von 100 MWp pro Jahr zur Wahrung der Planungssicherheit der Branche,
4. Einstellung eines Repowering-Gleichgewichts auch ca. 4 GWp nach ca. 40 Jahren (= mittlere Lebensdauer der PV-Anlagen),
5. Erzeugung von 0,8 TWh in 2035, bzw. 2 TWh in 2050 an PV-Strom im Stadtgebiet,
6. Nutzung der Überschüsse des Ausbaus nach 2050 zur lokalen Produktion von grünem Wasserstoff zur Verwendung in KWK-Anlagen und Heizwerken,
7. Im Mittel sind 20 % der Grundstücksflächen geeigneter Siedlungsflächen erforderlich.

Zur Erreichung dieser Ziele ist zusätzlich ein Wandel des Energiesystems notwendig. Dazu muss die Lastensteuerung sowie Energiespeicher ausgebaut werden. (Masterplan solares München, 2023)

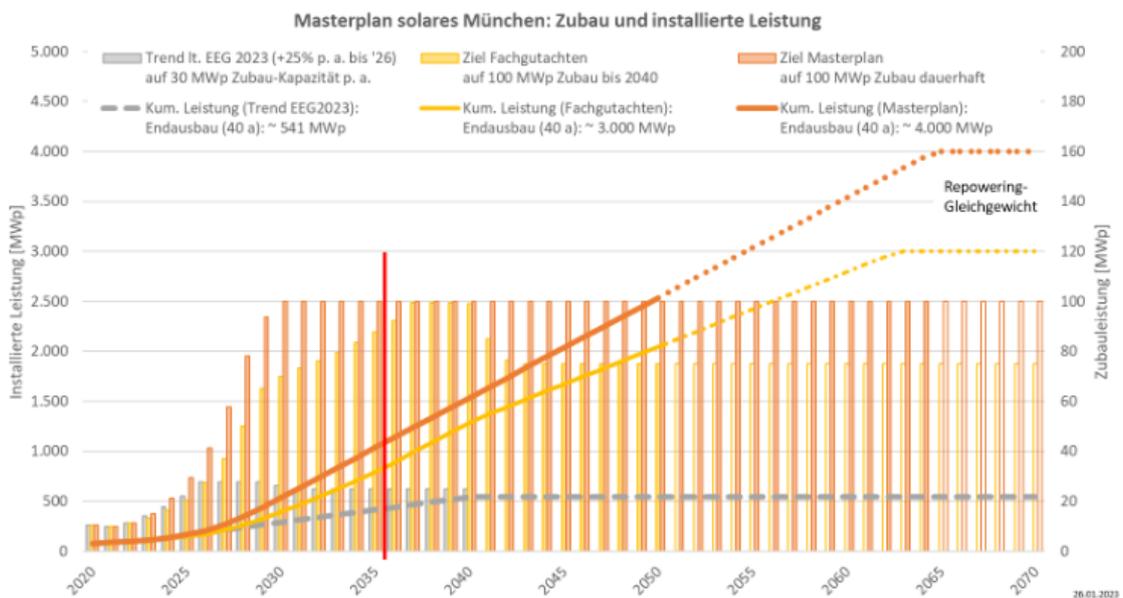


Abbildung 12 - geplanter Ausbau von PV-Anlagen (Masterplan solares München, 2023)

Anreize für den Ausbau der PV-Infrastruktur sollen vor allem über finanzielle Förderprogramme geschaffen werden. Zusätzlich soll eine zielgruppenspezifische Informationskampagne etabliert, Fachkräfte gefördert und Ausbauehemnisse beseitigt werden. Außerdem soll eine gut dotierter Solararchitektur-Preis erschaffen werden, um durch die ästhetische Gestaltung solarer Gebäude die Akzeptanz in der Bevölkerung zu festigen. (Masterplan solares München, 2023)

Laut Timpe et al. ist der PV-Ausbau in dicht besiedelten Städten wie München allerdings durchaus anspruchsvoll. Flachdächer, welche grundsätzlich gut nutzbar wären, werden

oft aufgrund des Mangels an Freiräumen als Aufenthaltsplatz genutzt. Zusätzlich sind einige Flachdächer vor allem bei Neubauten begrünt. Ab einer Dachfläche von 100 m² wird in München bebauungsplangerecht eine Dachbegrünung verlangt, da diese unter anderem Vorteile für den Hitzeschutz, die Luftqualität, das Regenwassermanagement und die Artenvielfalt bieten. Auch der Denkmalschutz steht dem PV-Ausbau häufig im Wege, da denkmalgeschützte Gebäude in München einen Anteil von ca. 14 % am realisierbaren PV-Potenzial halten. Auch die hohen Immobilienpreise hemmen den Ausbau von PV-Anlagen. Investoren vermeiden beim Kauf oft zunächst zusätzliche Investitionen wie die Installation einer PV-Anlage. Weitere Faktoren sind unter anderem hohe Kosten für Baugerüste bei hohen Häusern, der statische Zustand der Dächer, die Priorisierung des Ausbaus der Dachgeschosse mit Dachfenstern und -gauben sowie ein veraltetes und dadurch inkompatibles Stromnetz bei älteren Gebäuden. (Timpe et al., 2022)

Die für die Anbringung von PV-Anlagen nutzbaren Dachflächen sind außerdem in den allermeisten Fällen in Privatbesitz von Firmen, Einzelpersonen oder Eigentümergemeinschaften. Um diese für die Stromerzeugung nutzen zu können, müssen die Besitzer dazu incentiviert werden, diese Aufrüstung privat vorzunehmen. Die Stadt hat daher nur bedingt Kontrolle über den Ausbau. Im Gegensatz dazu sind Straßenflächen in Besitz der Stadt und Bauvorhaben im Straßenbereich ist vonseiten der Gemeinde einfach und schnell umsetzbar, ist skalierbar und nahezu überall realisierbar. Laut Geisser vom statistischen Amt der Landeshauptstadt München beläuft sich die Fläche des Münchner Stadtgebiets auf 31.071 Hektar. Von dieser Fläche können ca. 17 %, also rund 5.239 Hektar der Kategorie Straßen, Wege, Plätze und Schienenfläche zugeordnet werden. Die gesamten summierten oberirdischen Gebäudegrundflächen ergeben nur eine Fläche von rund 4.391 Hektar, was ca. 14 % der Gesamtfläche entspricht. Das Flächenpotenzial für die energetische Nutzung des Straßenraums ist somit höher als das der Dachflächen. (Geisser, 2017)

Die Nutzung der Straßenflächen durch die Überdachung mit PV-Anlagen könnte gleichzeitig einen wertvollen Beitrag zur Reduzierung der Temperaturen im überhitzten Straßenraum liefern. Im nächsten Kapitel soll deshalb näher auf Verschattungsarchitektur und deren Nutzen eingegangen werden.

2.6. Verschattungsarchitektur

Aufgrund des wie in Kapitel 2.4 „Thermischer Komfort im Außenraum“ (s. 12) festgestellten, sehr hohen Einflusses des Strahlungsaustausches des menschlichen Körpers mit seiner Umgebung auf die gefühlte Temperatur ist die Gefahr von Hitzestress bei direkter Sonneneinstrahlung besonders hoch. Verschattung ist deshalb einer der wichtigsten Instrumente zu Regulierung des klimatischen Außenraumkomforts.

Der Versuch, sich durch aufgespannte Tücher vor der Strahlung der Sonne zu schützen, ist dabei keine neue Erfindung. Von Hand getragene Sonnenschirme sind vermutlich sogar älter als die heutzutage deutlich verbreiteteren Regenschirme. Darstellungen von Sonnenschirmen finden sich sowohl im Ägypten, Persien und China der Frühantike. Die im Mittelalter in Vergessenheit geratenen Schirme fanden schließlich im 16. Jahrhundert wieder Eingang in die europäische Mode und blieb für viele Jahrzehnte ein relevantes Modeaccessoire. (Sangster, 1871)

In der heutigen Zeit sind Sonnenschirme und andere Verschattungselemente meist größer und stationär. Frei Otto legte durch seine Schirm-Studie in den 50er-Jahren die Grundlagen für die heutigen Vorstellungen von Verschattungsarchitektur. Auf der Bundesgartenschau [BUGA] 1955 in Kassel präsentierte Otto drei verschiedene temporäre Überdachungen als leichte Tragwerkskonstruktion, welche auf der Abbildung 14 zu sehen sind. (Nerdinger & Barthel, 2005)

Für die Bundesgartenschau 1957 in Köln übernahm Otto den größten Teil der Bebauungen wie



Abbildung 14 – Verschattungsarchitektur BUGA 1955 Kassel (Nerdinger & Barthel, 2005)



Abbildung 13 - Verschattungsarchitektur BUGA 1957 Köln (Nerdinger & Barthel, 2005)



Abbildung 15 - Buckelzelt INTERBAU 1957 Berlin (Nerdinger & Barthel, 2005)



Abbildung 16 - Deutsche Pavillon Expo 1967 Montreal (Nerdinger & Barthel, 2005)



Abbildung 17 - Dächer des Olympiareals München (Nerdinger & Barthel, 2005)



Abbildung 19 - Großschirme BUGA 1971 Köln (Nerdinger & Barthel, 2005)



Abbildung 18 - Sonnenschirmkonstruktionen Medina 2011 (SL Rasch GmbH, 2023)



Abbildung 20 - Faltbares Membrandach Buchs 2014 (str.ucture GmbH, 2023)

den Eingangsbogen sowie das sogenannte Sternwellenzelt des Kölner Tanzbrunnens (siehe Abbildung 13), welches 2001 von einer temporären in eine dauerhafte Konstruktion umgewandelt wurde. Im selben Jahr baute er, ansässig der INTERBAU-Ausstellung in Berlin eine Buckeldachkonstruktion (Abbildung 15), was seinerzeit eine Neuentwicklung war. (Nerdinger & Barthel, 2005)

Sein zur Weltausstellung [Exop; Exposition Mondiale] 1967 in Montreal entworfene Pavillon stellte Ottos ersten Großprojekt dar (siehe Abbildung 16). Eine Zeltkonstruktion dieser Größenordnung war zu diesem Zeitpunkt weltweit einzigartig. Konstruktiv wurde hierzu ein Netz aus Stahlseilen mit einer Maschenweite von 50 cm zwischen acht Masten mit einer Höhe von 14 bis 38 Metern aufgehängt. (Nerdinger & Barthel, 2005)

1967 gewann das Stuttgarter Architekturbüro Behnisch & Partner den Wettbewerb für den Bau des neuen Münchner Olympiastadions für die Olympischen Sommerspiele 1972 mit einem Konzept, welches stark vom deutschen Expo-Pavillon inspiriert war (siehe Abbildung 17). Für die Ausführung des Projektes wurde Otto hinzugezogen. Die statische Grundkonstruktion ähnelt der Konstruktion des deutschen Pavillons der Expo 1967, wobei hier Acrylplatten auf der Außenseite des Stahlseilnetzes angebracht wurden, da es sich um eine dauerhafte Konstruktion handelt. (Nerdinger & Barthel, 2005)

Der langjährige Mitarbeiter Ottos, Mahmoud Bodo Rasch, entwickelte bereits 1971 zusammen mit Otto die ersten faltbaren Schirmkonstruktionen (siehe Abbildung 19) (Nerdinger & Barthel, 2005). Auf Grundlage dieser Entwicklung entwarf er 2011 mit seinem Büro SL Rasch eine leichte Überdachung in Form von 250 faltbaren Sonnenschirmen mit

einer jeweiligen verschatteten Fläche von 600 m² (siehe Abbildung 18). Die Konstruktion bietet Verschattung für bis zu 250.000 Menschen, die zur Heilige Moschee des Propheten in Medina, Saudi-Arabien pilgern. (SL Rasch GmbH, 2023)

2014 entwarf das Architekturbüro Kugel Architekten in Zusammenarbeit mit der Str.ucture GmbH ein faltbares Membrandach zur Beschattung einer ca. 50 Meter langen Gasse im Zentrum der Stadt Buchs in der Schweiz (siehe Abbildung 20). Die Überdachung ist in einer Höhe von 6,50 Metern über der Straße angebracht und lässt sich komplett unter ein Schutzdach zurückfahren. (str.ucture GmbH, 2023)

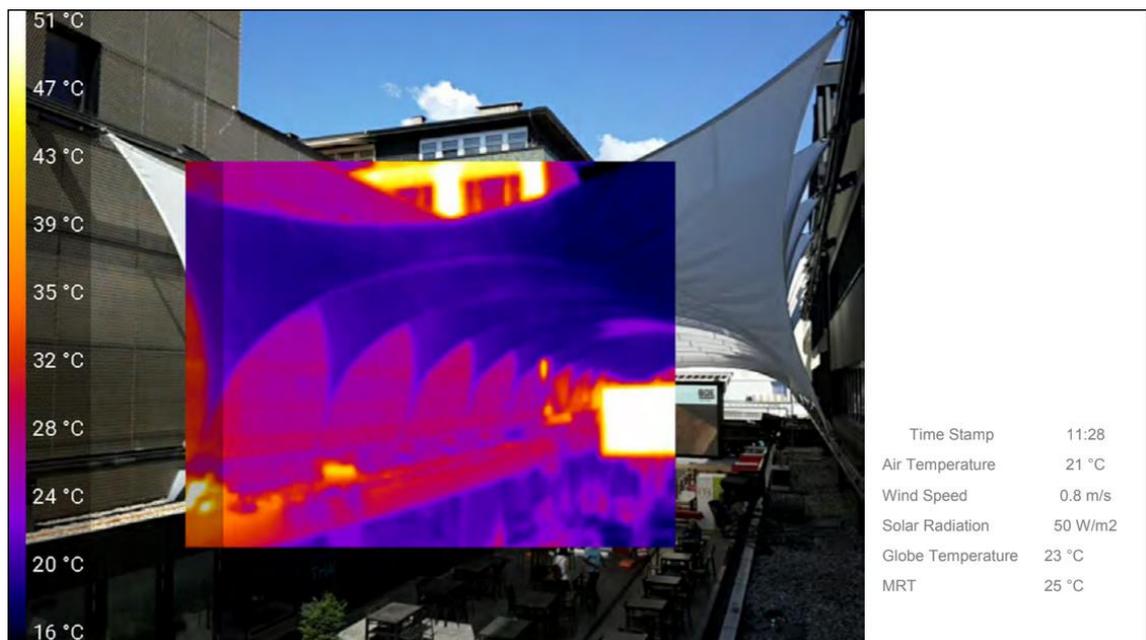


Abbildung 21 - Wärmebildaufnahme der Unterseite der Überdachung bei voller Sonneneinstrahlung (Chokhachian, 2023)

Wie in der Abbildung 21 zu sehen ist reduziert die Überdachung durch die Blockierung der direkten solaren Einstrahlung die MRT der Umgebung drastisch. Die Oberflächentemperatur der Unterseite der Membran beträgt laut Wärmebild lediglich ca. 20 °C. Zusätzlich verhindert die Überdachung die Aufheizung der Wände und des Bodens der Gasse. Dabei ist darauf zu achten, dass die verwendete Membran einen hohen Transmissionswiderstand gegenüber solarer Strahlung hat. (Chokhachian, 2023)

Wie in den letzten Kapiteln gezeigt wurde, scheint die Nutzung von leichten Überdachungen im Straßenraum zur Reduzierung der Temperaturen sowie zu Gewinnung elektrischer Energie durchaus sinnvoll zu sein. Dies soll im Rahmen dieser Arbeit anhand einer computersimulativen Analyse verifiziert werden. Im nächsten Kapitel soll die Methodik zu Durchführung dieser Untersuchung erläutert werden.

3. Methodik

In diesem Kapitel soll erläutert werden, wie die verwendete Computersimulation zur Durchführung dieser Untersuchung genutzt wurde. Zunächst wird hierzu die Datengrundlage der Simulation in Form der Wetterdaten sowie der städtebaulichen Situation des Untersuchungsgebiets dargelegt. Anschließend werden im Kapitel Simulation die verwendeten Programme sowie deren Zusammenspiel sowie Input- und Output-Daten erläutert. Zusätzlich wird das Untersuchungsgebiet eingeschränkt sowie die Systematik zur Bestimmung kleinerer Untersuchungsbereiche begründet, welche anschließend einzeln vorgestellt und verortet werden. Schließlich wird die systematische Analyse der verschiedenen Konfigurationen der Überdachungen beschrieben.

3.1. Datengrundlage

Die Grundlage der Computersimulation bilden die Wetterdaten sowie die die 3D-Daten des Untersuchungsgebiets. Zum besseren Verständnis der verwendeten Daten sollen diese im Folgenden detailliert erläutert und eingeordnet werden.

3.1.1. Wetterdaten

München liegt auf ca. 48 Grad nördlicher Breite in Mitteleuropa und somit in der kontinental geprägten, gemäßigten Klimazone. Dies spiegelt sich vor allem durch die starke Ausprägung der Jahreszeiten wieder, weshalb insbesondere bei kontinentaler Lage starke Temperaturschwankungen über das Jahr auftreten. Diese bewegen sich in dieser Klimazone laut Hausladen et al. durchschnittlich zwischen -15 °C im Winter und 25 °C im Sommer. Die absolute Luftfeuchtigkeit bewegt sich durchschnittlich ganzjährig zwischen 2 und 15 g/kg. Durch den über das Jahr stark veränderten Sonnenstand verändert sich die Tageslänge von im Winter 8 auf im Sommer 16 Stunden, wodurch sich auch der Einstrahlwinkel und die Intensität der Solarstrahlung stark verändert. (Gerhard Hausladen et al., 2012)

Die für die Simulationen verwendeten Wetterdaten stammen aus der Wetterstation des DWD in der Helene-Weber-Allee 21 in München. Es handelt sich um über einen Zeitraum von 1935 bis 2007 gesammelte und zu einem Jahr kumulierte Daten. Dadurch lässt sich ein statistisch aussagekräftiges, von Wetterextremen bereinigtes Durchschnittsjahr zu Simulationszwecken abbilden. Die Daten aus der Wetterstation Helene-Weber-Allee 21 lassen sich ohne weitere Anpassungen auf den Projektstandort Neuperlach übertragen,

da die städtebauliche Situation, wie in der Abbildung 22 zu sehen, durchaus ähnlich ist. In Blau ist die Position der Wetterstation markiert.



Abbildung 22 - Vergleich Neuhausen-Nymphenburg (links) und Neuperlach (rechts) (Google Maps, 2023)

Beide Stadtteile sind von mehrgeschossigen Mehrfamilien- und Bürogebäuden geprägt. Größere Straßen durchschneiden die Wohnviertel und eine Anzahl von Grünflächen und ein großer angrenzender Park bestimmen das Stadtbild. Zusätzlich sind die beiden Stadtviertel keine 10 Kilometer voneinander entfernt.

Die durchschnittliche Lufttemperatur pro Monat kann in der Abbildung 23 betrachtet werden. Der heißeste Monat ist mit durchschnittlich ca. 19 °C der Juli dicht gefolgt vom August. Der kälteste Monat ist mit nur durchschnittlich ca. -1 °C der Dezember. Auch Januar und Februar zeichnen sich durch eine sehr geringe Durchschnittstemperatur von zwischen 0 und 1 °C aus. Zwischen Februar und März ist ein regelrechter Sprung von etwa 5 °C in der Durchschnittstemperatur zu beobachten, wobei sich die Temperaturentwicklung zwischen März und Juli sowie zwischen August und Dezember nahezu linear verhält. Die Erwärmung in der ersten Hälfte des Jahres erfolgt dabei langsamer als die Abkühlung in der zweiten.

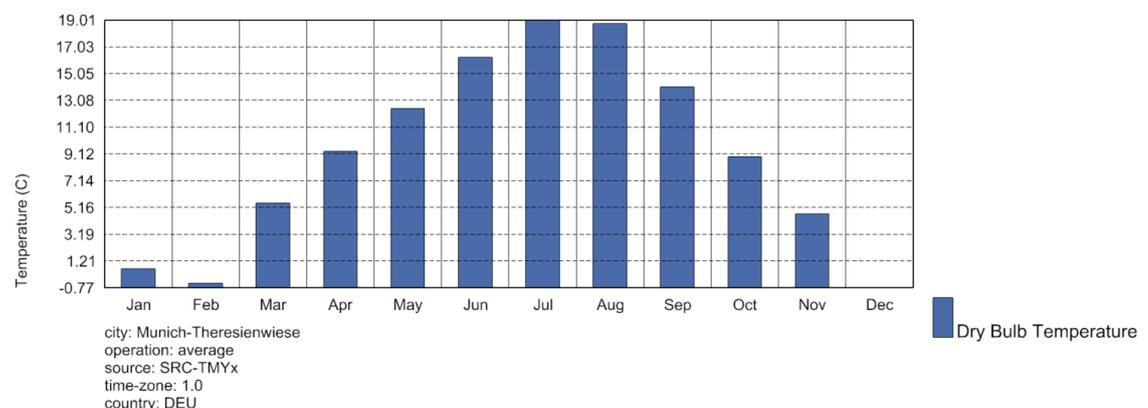


Abbildung 23 - Durchschnittstemperatur pro Monat (eigene Darstellung)

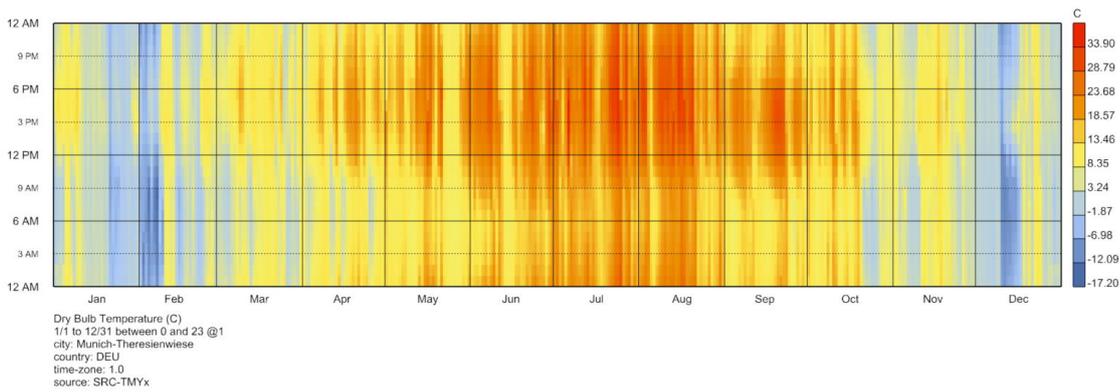


Abbildung 24 - Stündliche Temperaturentwicklung über das Jahr (eigene Darstellung)

In der Abbildung 24 kann die absolute Temperatur zu jeder Stunde des Jahres betrachtet werden. Besonders gut sind hier die Hitze- und Kälteperioden zu sehen. Im Sommer sind die Zeitspannen großer Hitze immer wieder von kälteren Tagen unterbrochen, wobei die Zeitspannen aufeinanderfolgender kälterer Tage gegen Frühling und Herbst immer weiter zunehmen. Zusätzlich lässt sich deutlich beobachten, wie Hitzewellen im Verlauf einiger Tage zu einem deutlichen Anstieg der Temperatur in der Nacht führen. Auch im Winter ist zu beobachten, dass sich die Temperatur in der Nacht erst nach ein paar Tagen den gestiegenen Temperaturen anpasst.

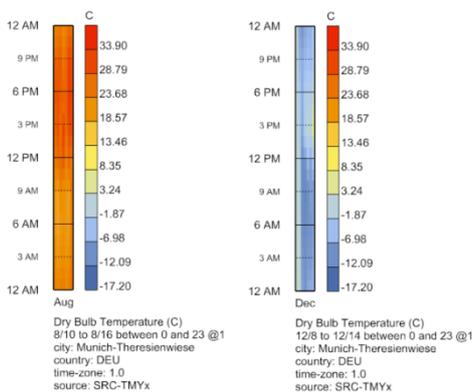


Abbildung 25 - Wärmste und kälteste Woche (eigene Darstellung)

In der Abbildung 25 ist die statistisch wärmste und kälteste Woche dargestellt. Die wärmste Woche erstreckt sich von 10. bis zum 16. August, die kälteste vom 8. bis zum 14. Dezember. Charakteristisch für beide Extremwochen ist, dass die extremsten Temperaturmaxima in beiden Fällen nicht in der Periode der durchschnittlich wärmsten bzw. kältesten Woche liegen. Die heißeste Temperatur des Jahres beträgt ca. 34 °C. Die heißeste Temperatur in der wärmsten

Woche beträgt nur in etwa ca. 31 °C. Die kälteste gemessene Temperatur des Jahres liegt bei ca. -17 °C. Die kälteste Temperatur in der kältesten Woche beträgt lediglich ca. -13 °C. Ausschlaggebend sind vielmehr die langanhaltend hohen respektive niedrigen Temperaturen. Im Verlauf der Hitzewelle sinken die Temperaturen selbst bei Nacht kaum unter ca. 20 °C. Während der Kälteperiode steigen die Temperaturen am Tag nicht über ca. 3 °C.

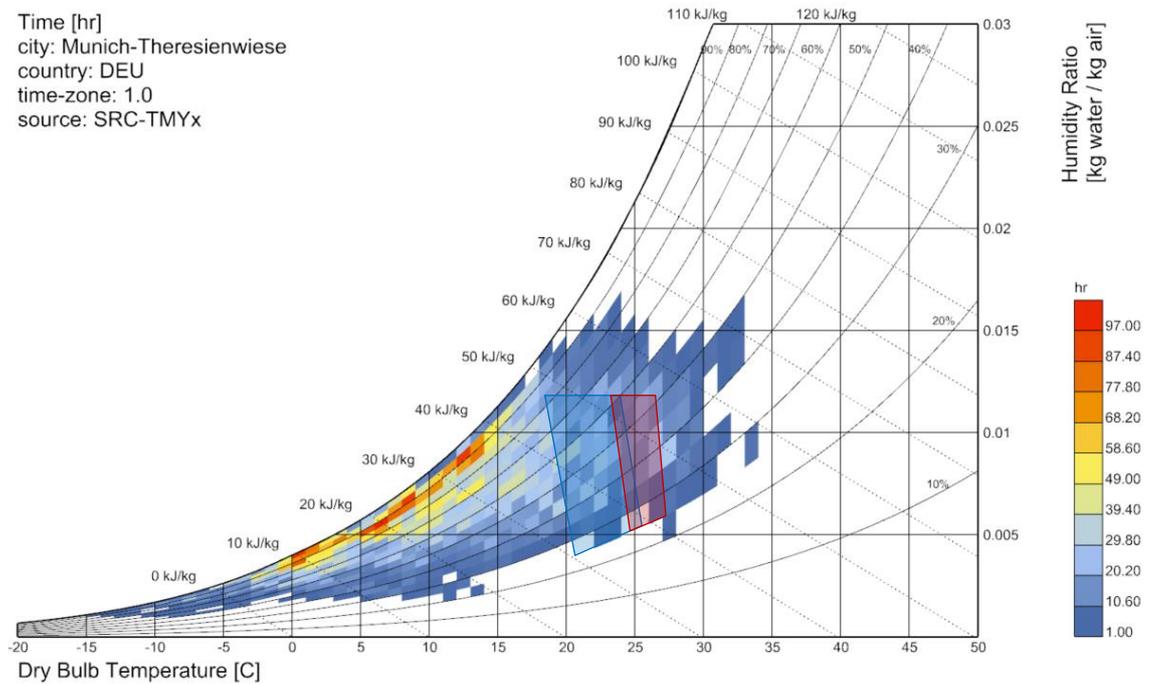


Abbildung 26 - Mollier-h-x-Diagramm mit Behaglichkeitsfeld nach ASHRAE-55 (eigene Darstellung)

Die Abbildung 26 zeigt die Umsetzung der ganzjährigen Wetterdaten in einem Mollier-h-x-Diagramm. Wie dort zu sehen ist, bleibt die Luftfeuchtigkeit in der LHM in der meisten Zeit sehr angenehm. Selten überschreitet sie die 15 g/kg trockene Luft. Extreme Schwüle ist somit selten. Lediglich in der Winterzeit sinkt der Feuchtegehalt der Luft, was allerdings an den kühlen Lufttemperaturen liegt. In der Mitte des Diagramms ist der jeweils in Rot für den Sommer und in Blau für den Winter hinterlegte Behaglichkeitsbereich nach ASHRAE-55 markiert (ASHRAE, 2017). Zu erkennen ist, dass das Münchner Klima vor allem im Winter, aber auch in der Übergangszeit meist zu kalt ist, als dass es als komfortabel gelten könnte. In den wärmeren Jahreszeiten kann es durchaus Tage geben, die sich im Komfortbereich befinden. Eher selten ist es in München zu heiß.

Wie für eine Stadt auf der Nordhalbkugel nicht anders zu erwarten kommt ein großer Teil der solaren Einstrahlung aus dem Süden. In der Abbildung 27 ist die Gesamtstrahlung, welche sich aus direkter und diffuser Strahlung zusammensetzt, auf einer dreidimensionalen Sphäre in Draufsicht dargestellt.

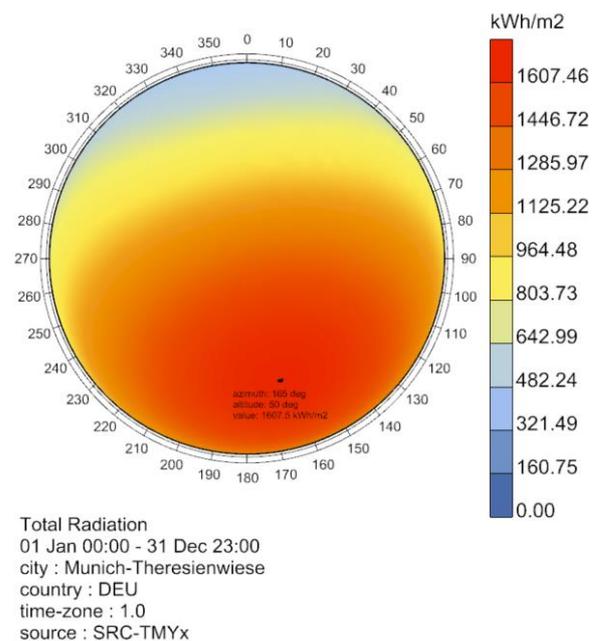


Abbildung 27 - Winkel der solare Gesamtstrahlung (eigene Darstellung)

Markiert ist der Punkt, an dem die solare Strahlung am stärksten ist. In diesem Fall ist dieser Punkt in Südsüdost bei 165° bei einer Neigung von 50°. An dieser Position kann eine Energie von über 1600 kWh/m² erreicht werden. Im Gegensatz dazu erreicht die Strahlung auf einer waagerechten Ebene lediglich eine Energie von ca. 1300 kWh/m². Doch selbst auf der entgegengesetzten Seite der Sphäre kann über das Jahr gesehen noch eine Energiemenge von ca. 300 kWh/m² gemessen werden. Das ist vor allem der diffusen Strahlung zuzurechnen.

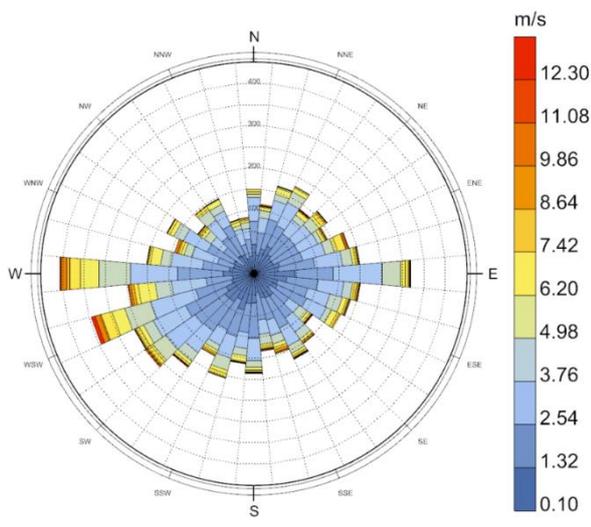


Abbildung 28 - Windrose (eigene Darstellung)

Die Windgeschwindigkeiten in München sind meist mäßig. Entsprechend der in Abbildung 28 dargestellten Windrose übersteigen die Windgeschwindigkeiten kaum jemals 6 m/s, was einer mäßigen Brise entspricht. Windgeschwindigkeiten von über 12 m/s kommen sehr selten vor und befinden sich immer noch unter Sturmstärke. Die Hauptwindrichtung ist West bis Südwest, doch es kann auch regelmäßig zu Ostwind kommen. Stärkere Windgeschwindigkeiten kommen am häufigsten aus Westsüdwest und Westen.

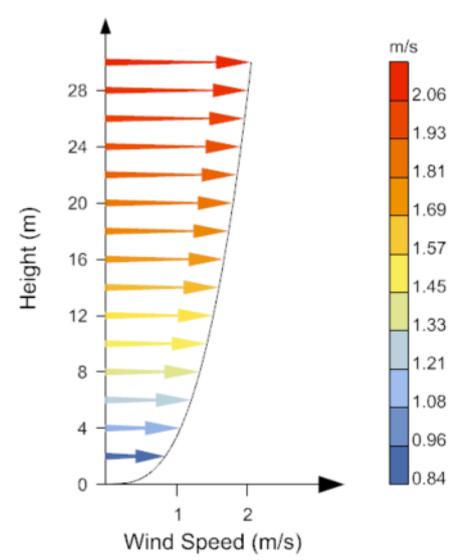


Abbildung 29 - Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höhe (eigene Darstellung)

Windgeschwindigkeiten nehmen mit zunehmender Höhe zu. In der Abbildung 29 ist die jährliche Durchschnittsgeschwindigkeit aus der Hauptwindrichtung auf verschiedenen Höhen dargestellt. Zu sehen ist hier, dass die Windgeschwindigkeit auf Personenhöhe bei unter 1 m/s liegt, während sie in einer Höhe von 30 Metern bei über 2 m/s erreicht. Die Abnahme der Windgeschwindigkeit in niedrigeren Höhen erfolgt logarithmisch.

In folgendem Abschnitt erfolgen zum besseren Verständnis der dieser Untersuchung zugrunde liegenden 3D-Daten eine städtebauliche Analyse und eine historische Einordnung des Münchner Stadtteils Neuperlach.

3.1.2. Stadtanalyse

Zwischen 1950 und 1966 erfuhr die Stadt München laut Lepik und Strobl einen enormen Bevölkerungszuwachs. Pro Jahr siedelten sich bis zu 30.000 Personen neu in der Landeshauptstadt Bayerns an. Die Bevölkerung wuchs von 840.000 auf 1,24 Millionen. Die Folge dessen war eine massive Wohnungsnot, welche der Stadtrat durch den sogenannten „Münchener Plan“ beheben wollte. Dieser beinhaltete die Durchführung des zu diesem Zeitpunkt größten Siedlungsprojekts Europas – der Errichtung von 25.000 Wohnungen für 80.000 Bewohner auf einer Fläche von 1.000 Hektar in der Peripherie Münchens. Das Ziel sollte allerdings nicht die Errichtung reiner Wohnanlagen sein. Es sollte eine in sich funktionelle und intakte Kleinstadt entstehen, welche über eigene öffentliche, kulturelle und gewerbliche Einrichtungen sowie Arbeitsplätze verfügte. 1967 wurde der Grundstein für den ersten Bauabschnitt gelegt. (Lepik & Strobl, 2020)

Der 1963 vom Stadtplanungsamt entwickelte Struktur- und Flächennutzungsplan sah im Zentrum des Entwicklungsgebietes eine „beherrschende Stadtkrone“ vor. Der Gewinner des international ausgelobten städtebaulichen Ideenwettbewerbs, Bernt Lauter verwirklichte diese Anforderung in Form eines Wohnrings aus geschlossenen aneinandergereihten Hochhäusern zwischen 9 und 18 Geschossen mit ei-



Abbildung 30 - Wohnring Neuperlach (aer-muenchen.de, 2023)

nem Durchmesser von ca. 450 Metern (siehe Abbildung 30). Im Inneren wurden neben dem zentralen Fußgängernetz auch Platz für öffentliche und kulturelle Einrichtungen geschaffen. (Lepik & Strobl, 2020)

Mit Ausnahme des Wohnrings wurde das ursprüngliche Konzept von Lauter, welches im Osten ein weiträumiges Areal mit Markthalle, Einkaufszentrum mit Fußgängerpassage und Stadtteilzentrum vorsah, zugunsten eines „additiven“ Verfahrens verworfen. Dies sah die Bebauung durch Einzelbauten verschiedener Bauleute vor. Vom ursprünglichen Plan wurde nur das Einkaufszentrum in stark abgewandelter Form verwirklicht. Für den größten Teil des restlichen Stadtentwicklungsgebiets wurden hohe Zeilenbauten mit umschließenden ausgeprägten öffentlichen Grünflächen vorgesehen. Dies ist auf der Abbildung 31 vor allem nördlich und östlich vom Wohnring zu erkennen. Die Planung folgte dem Prinzip autogerechte Stadt entsprechend einer strikten Trennung von Fahrzeugen

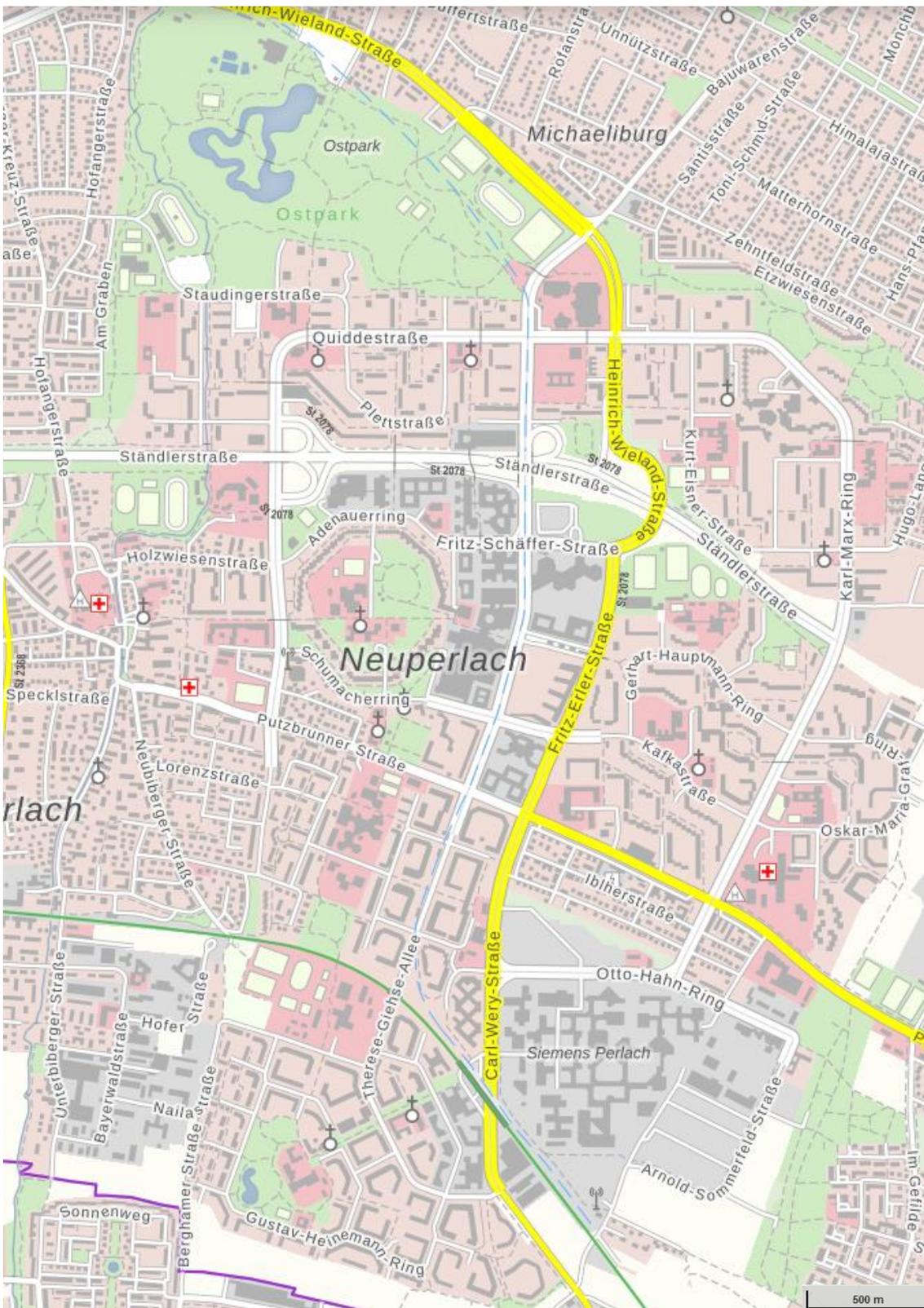


Abbildung 31 - Stadtkarte Neuperlach (Geoportal Bayern, 2023)

und Fußgängerwegen, welche die Straßen mit Brücken überqueren und entlang der Grünflächen zwischen den Wohnhäusern hindurch verlaufen. In regelmäßigen Abständen sind punktuell kleine Nahversorgungszentren mit Aufenthaltsmöglichkeiten errichtet worden. Es wurden außerdem sowohl Schulen als auch Kindergärten und Arztpraxen in

die Planung mit einbezogen. Im Norden Neuperlachs wurde der Ostpark als Naherholungsziel eröffnet. Dort gibt es große Sport- und Freizeitanlagen wie beispielsweise das Michaelibad. Für das letzte Bauquartier im Süden wurde ein komplett neues Konzept der „Planungsgruppe Darmstadt“ verwirklicht. Hier wurde, wie auf der Abbildung 31 zu sehen, eine Blockbebauung mit halbprivaten Innenhöfen in einem Raster von Straßen geplant. Anstelle der Nahversorgungszentren wurden hier Geschäftsstraßen entlang der von den Verkehrsknoten ins Viertel führenden Straßen gebaut. (Lepik & Strobl, 2020)

In der Erstbezugsphase waren in Neuperlach überdurchschnittlich viele Familien mit Kindern und Jugendlichen zu verzeichnen. Heute sind es überdurchschnittlich viele Personen im Rentenalter. Das liegt nicht zuletzt daran, dass viele Anwohner sehr lange in Neuperlach leben (Lepik & Strobl, 2020). Dennoch zählt der Stadtteil zu den sozialen Brennpunkten der LHM (Michael, 2015). Laut Kriele und Krug zählt Neuperlach im Vergleich zu den anderen Vierteln zu den ärmeren Bezirken. Der Anteil an Bewohnenden, die Arbeitslosengeld II beziehen müssen, ist doppelt so hoch wie im städtischen Durchschnitt. Etwas mehr als ein Drittel der Schulkinder in Neuperlach wechseln nach Ende der Grundschule auf das Gymnasium. Stadtweit ist dieser Anteil bei über 50 %. Dies kann unter anderem an dem überdurchschnittlich großen Anteil an Kindern ausländischer Nationalität oder Migrationshintergrund liegen, bei welchen Deutsch nicht die Muttersprache ist, was die Schulbildung erschwert. (Kriele & Krug, 2014)

Für die Untersuchung wurde digitales, dreidimensionales Kartenmaterial des Stadtviertels zur Verfügung gestellt. In diesem waren die hoch aufgelösten 3D-Modelle aller Gebäude sowie die Positionen der Bäume enthalten. Wie diese 3D-Daten sowie die Wetterdaten in die Simulation mit einbezogen werden, wird im nächsten Kapitel detailliert beleuchtet.

3.2. Simulation

Um die Qualität einer Verschattungsmaßnahme bewerten sowie den möglichen Ertrag einer PV-Anlage ermitteln zu können, muss eine Untersuchung für eine große Anzahl von verschiedenen Positionen im Untersuchungsbereich durchgeführt werden. Eine Aussage über die Verschattung soll unter Zuhilfenahme des UTCI erfolgen. Wie in Kapitel 2.4.2 „Indizes des thermischen Komforts“ (s. 16) dargelegt, ist die Berechnung des UTCI komplex und von vielen unterschiedlichen standortbezogenen Faktoren abhängig. Der Energieeintrag auf einer bestimmten Fläche ist ebenso stark vom Standort abhängig und variiert je nach Ausrichtung und angrenzender Verschattung. Aus Gründen dieser Komplexität und der Menge an notwendigen Berechnungen wurde die Untersuchung unter Zuhilfenahme einer Computersimulation durchgeführt.

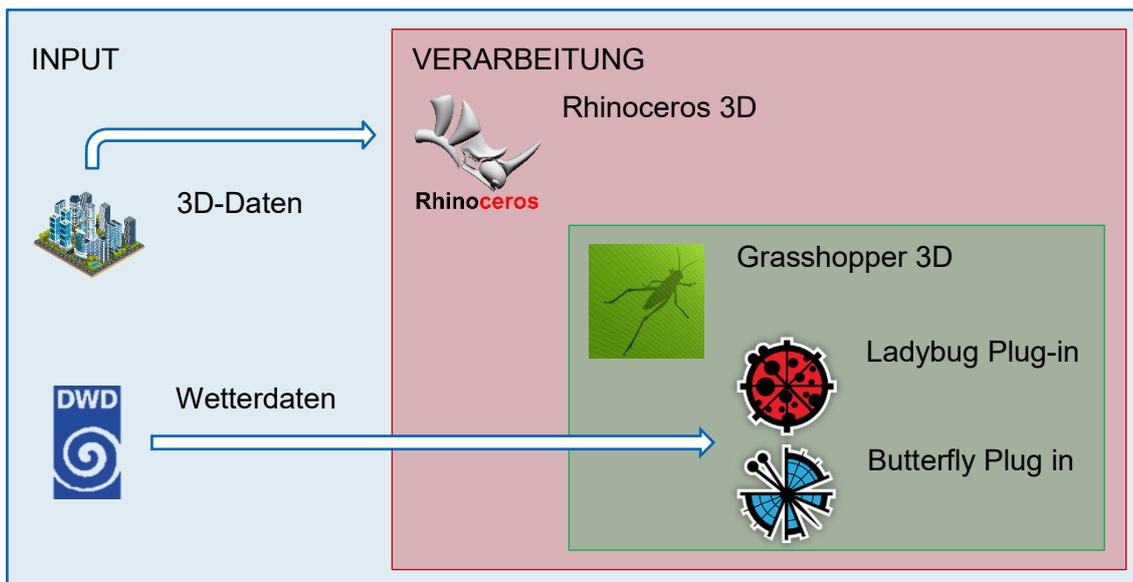


Abbildung 32 - Darstellung des Arbeitsablaufs (eigene Darstellung)

Die Einsatzbereiche der verschiedenen Programme und Plug-ins und deren Zusammenspiel sind in der Abbildung 32 dargestellt. Die 3D-Daten der Gebäude des Stadtteils wurden im computergestützten 3D-Konstruktionsprogramm [CAD; computer-aided design] „Rhino 3D“ des US-amerikanischen Entwicklers Robert McNeel & Associates verarbeitet und angepasst. Mithilfe dieses Programms wurden auch die Bäume modelliert und an die in den 3D-Daten vorgegebenen Stellen platziert. Zusätzlich erfolgte hier die Modellierung der zu testenden Überdachungen. (Robert McNeel & Associates, 2023)

Das Programm „Grasshopper 3D“, ebenfalls entwickelt von McNeel, ist eine visuelle Programmiersprache, welche in das CAD-Programm „Rhino 3D“ integriert ist. Die primäre Funktion von Grasshopper ist das Erstellen von Algorithmen zur Kreierung generativer Geometrien. In der Architektur wird das Programm häufig zur parametrischen Modellierung genutzt. Das Programm kann durch eine Reihe von Plug-ins erweitert werden, um auch andere Anwendungsgebiete wie die Physiksimulation oder maschinelles Lernen abzudecken. (Scott Davidson, 2023)

Für die Simulation des Komforts im Außenbereich sowie die Strahlungsanalyse wurden Plug-ins von „Ladybug Tools LCC“ verwendet, welche sich über Grasshopper einbinden und über die visuelle Oberfläche programmieren lassen. Ladybug Tools bietet vier Plug-ins für verschiedene Anwendungen an. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden hauptsächlich die Plug-ins Ladybug und Butterfly verwendet. Ladybug bietet dabei die Möglichkeit der Analyse von Wetter- und Klimadaten zur Ausgabe von detaillierten 3D-Graphiken und zur Durchführung von verschiedenen klimaabhängigen Studien. Butterfly hingegen hilft bei der Durchführung von computergestützten Strömungsdynamik-Simulationen [CFD, computational fluid dynamics] zur Analyse von Luftbewegungen und Turbulenzen. (Ladybug Tools LLC, 2023)

Zur Untersuchung des thermischen Komforts wurde der jeweilige Untersuchungsbereich zunächst in ein Raster aufgeteilt. Für jede Rasterfläche wurde mithilfe des Ladybug Plug-ins der UTCI individuell und für jede Stunde entsprechend der untersuchten Zeitperiode errechnet. Das Ergebnis wurde anschließend als Durchschnitt über die gesamte Zeitspanne ausgegeben. Die Lufttemperatur sowie die relative Luftfeuchte wurden für jede Stunde direkt aus den Wetterdaten bezogen.

Die MRT wurde für jedes Feld des Rasters zu jeder Stunde gesondert ermittelt. Hierzu wurden als Vereinfachung die Temperatur aller den Untersuchungsort umschließender Oberflächen als gleich der Lufttemperatur angenommen. Zusätzlich wurde die lokale direkte sowie die diffuse solare Einstrahlung in die Berechnung mit einbezogen. Der Bodenreflexionsgrad wurde zur Vereinfachung für den gesamten Untersuchungsbereich auf einen stadttypischen Durchschnittswert eingestellt. Der SVF wurde für jedes Rasterfeld separat bestimmt. Zusätzlich wurde der Anteil des Körpers, der direkt der solaren Strahlung ausgesetzt ist, für jedes Rasterfeld und jede Stunde simulativ berechnet.

Die lokale Windgeschwindigkeit wurde mithilfe des Butterfly Plug-ins durch eine CFD-Simulation für jedes Rasterfeld als Durchschnitt der untersuchten Zeitspanne bestimmt. Dabei wurde die in der untersuchten Zeitperiode vorherrschende Windrichtung und die durchschnittliche Windgeschwindigkeit angenommen und die Luftbewegung sowie die Verwirbelungen durch die 3D-modellierten Gebäude simuliert. So konnte die Luftbewegung an jedem Ort im Untersuchungsbereich eingeschätzt und in die Berechnung des UTCI einkalkuliert werden.

Auch für die Analyse des PV-Potenzials wird die zu untersuchende Fläche durch ein Raster unterteilt. Für jede der Rasterflächen wird die gesamte direkte und diffuse solare Einstrahlung entsprechend des Untersuchungsorts über den Untersuchungszeitraum und unter Berücksichtigung der Verschattung kumuliert. Das Ergebnis wird als gesamte Energiemenge pro Flächeneinheit ausgegeben.

Das Gebiet, welches in dieser Arbeit untersucht werden soll, wird im nächsten Abschnitt definiert und eingegrenzt. Zusätzlich wird die Systematik zur Bestimmung der kleineren Untersuchungsbereiche erläutert sowie jedes einzeln vorgestellt.

3.2.1. Untersuchungsgebiet

Das NEBourhood-Projekts umfasste gesamt Neuperlach und damit eine Fläche von ca. 7 km². Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Thesis wurde das Untersuchungsgebiet deutlich verkleinert, da die benötigte Rechenleistung zur simulativen Analyse einer so großen Fläche zu groß ist. Zusätzlich würden die Berechnungen zur Analyse einer

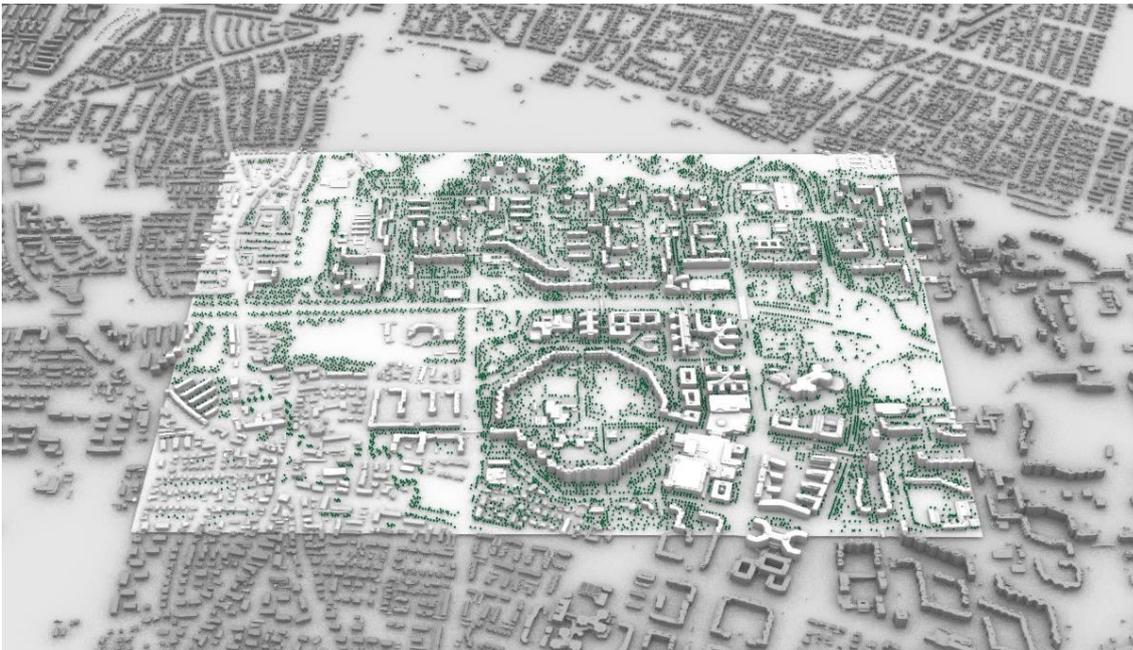


Abbildung 33 - Untersuchungsbereich (eigene Darstellung)

solchen Fläche zu viel Zeit in Anspruch nehmen. Das für diese Untersuchung ausgewählte Gebiet ist in der Abbildung 33 zu sehen. Die Auswahl umfasst eine Fläche von 3 km². Sie sollte möglichst viele der in Neuperlach anzutreffenden Situationen widerspiegeln können. Im Norden der Auswahl befinden sich die für Neuperlach typischen Zeilenbauten. Südlich der Mitte liegt der ikonische Wohnring. Nördlich und östlich des Wohnrings sind große, gewerblich genutzte Gebäudekomplexe und im Westen finden sich hauptsächlich kleinere Mehrfamilien-, Reihen- und Einfamilienhäuser in einer klassischeren Vorort-Siedlungsstruktur.

Zunächst wurde eine UTCI-Analyse des gesamten Untersuchungsgebiets vorgenommen. Zu diesem Zweck mussten im zu Verfügung gestellten 3D-Modell einige Anpassungen vorgenommen werden. Zunächst musste eine Grundfläche erstellt werden, da die 3D-Daten nur Informationen zu den Gebäuden, allerdings nicht zum Relief des Bodens enthielten. Dabei wurde zu Vereinfachungszwecken eine perfekte Ebene angenommen. Die Höhendifferenz von ca. 4,5 Metern über die gesamte Fläche wurde dabei ausgeglichen. Zusätzlich wurden die in den Originaldaten sehr hoch aufgelösten Gebäude für die Simulation des gesamten Untersuchungsgebiets zu einfacheren Volumen simplifiziert. Die Bäume wurden als einfache Würfel dargestellt (siehe Abbildung 34). Die vereinfachten Gebäudevolumina wurden von den Studierenden Clemens Lindner und Tao Sun für ein eigenes Projekt angefertigt und konnten übernommen werden.



Abbildung 34 - Vereinfachung der 3D-Modelle (eigene Darstellung)

Des Weiteren lagen für den Gebäudekomplex „Perlach Plaza“ in der Thomas-Dehler-Straße 15, welcher sich zum Zeitpunkt der Durchführung der Untersuchung in der Finalisierungsphase befand, keine Daten im zu Verfügung gestellten 3D-Material vor. Dieses Gebäude wurde entsprechend eigenständig erstellter Fotos und Messungen modelliert.

Die UTCI-Analyse des gesamten Untersuchungsgebiets erfolgte in einem 10 x 10 Meter Raster. Als Untersuchungsperiode wurde zum einen das gesamte Jahr und 24 Stunden am Tag sowie zum anderen die heißen Sommermonate Juni bis September jeweils von 9 Uhr bis 21 Uhr gewählt.

Im nächsten Schritt sollten genauere Untersuchungen in kleineren Teilen des Untersuchungsgebiets erfolgen. Dabei wurden mehrere Untersuchungsbereiche mit einer Größe von ca. 250 x 250 Meter isoliert betrachtet. Ausgewählt wurden Situationen mit Straßen oder Wegen mit beidseitiger Bebauung nach den Kriterien Straßenbreite, Höhe der angrenzenden Bebauung und Ausrichtung der Straße.

Um möglichst viele der verschiedenen Straßensituationen in Neuperlach systematisch untersuchen zu können und eine hohe Aussagekraft und Übertragbarkeit der Ergebnisse auf möglichst viele der nicht untersuchten Situationen erreichen zu können, wurde die Auswahl der Untersuchungsbereiche entsprechend der Matrix in Tabelle 3 vorgenommen. Für die rot markierten Situationen konnte keine Entsprechung im Untersuchungsgebiet von Neuperlach gefunden werden.

		Straßenbreite			
		≤ 30 m		> 30 m	
Höhe der Bebauung	> 3 Geschosse	NW ↔ SO 1a)	N ↔ S 1b)	NW ↔ SO 2a)	N ↔ S 2b)
		W ↔ O 1c)	NO ↔ SW 1d)	W ↔ O 2c)	NO ↔ SW 2d)
	≤ 3 Geschosse	NW ↔ SO 3a)	N ↔ S 3b)	NW ↔ SO 4a)	N ↔ S 4b)
		W ↔ O 3c)	NO ↔ SW 3d)	W ↔ O 4c)	NO ↔ SW 4d)

Tabelle 3 - Matrix zur Auswahl der Untersuchungsbereiche



Abbildung 35 - Lokalisierung der Untersuchungsbereiche (Google Maps, 2023)

Die Analyse der ausgewählten Untersuchungsbereiche erfolgte wiederum anhand der unbearbeiteten und hoch aufgelösten 3D-Modellen der Gebäude sowie mit detaillierten ovalen Baummodellen, welche in Form und Größe der in Städten am häufigsten vorkommenden Linde nachempfunden wurde. Der UTCI wurde in diesem Fall über eine quadratische Fläche mit einer Kantenlänge von 150 Metern in einem 5 x 5 Meter Raster untersucht. Die Untersuchungsperiode umfing grundsätzlich die heißeste Woche des Jahres, wobei im ersten Fall noch weitere Untersuchungsperioden analysiert wurden.

In der Abbildung 35 sind die verschiedenen Untersuchungsbereiche in der Luftaufnahme des Untersuchungsgebiets von Neuperlach verortet. Im Folgenden soll jeder der Untersuchungsbereiche vorgestellt werden.

1b)

Der Untersuchungsbereich 1b (siehe Abbildung 36) befindet sich in der Mitte des Untersuchungsgebiets im Osten des Wohnrings. Er erstreckt sich entlang eines auf der Nord-Süd-Achse verlaufenden Fußgängerweges vom West-Eingang des PEP Einkaufszentrums zur Fritz-Schäffer-Straße. Der Abstand der den Fußweg einsäumenden, durchschnittlich fünfgeschossigen Bebauung beträgt ca. 25 Meter. Die Bebauung wird an beiden Seiten durch Tiefgarageneinfahrten und Wege unterbrochen. Im Norden geht der Weg in eine die Fritz-Schäffer-Straße überspannende Brücke über.

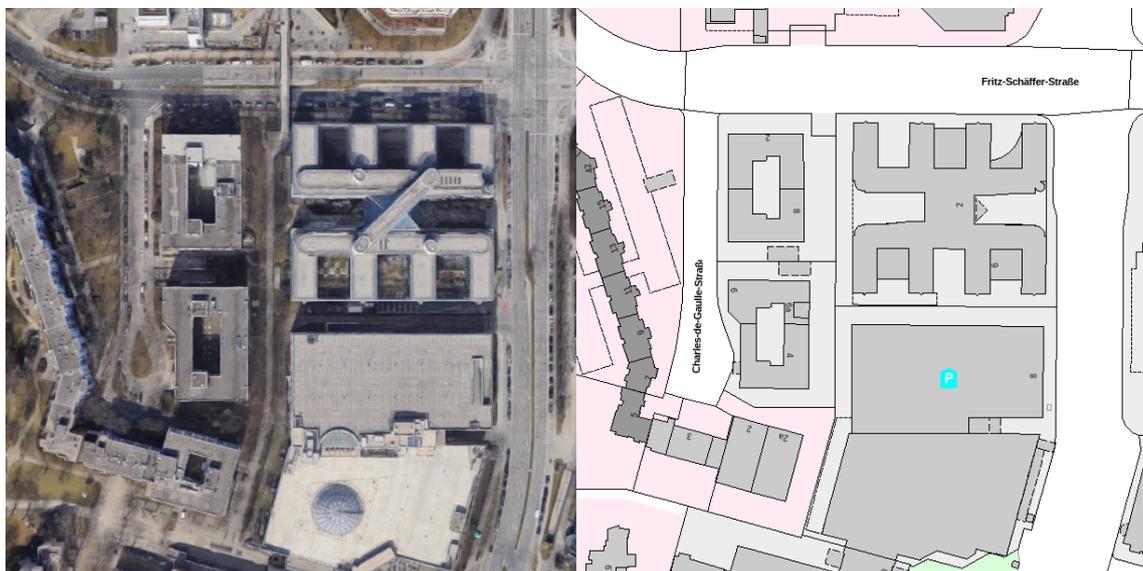


Abbildung 36 - Luftbild und Flurkarte 1b (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)

1c)

Der Untersuchungsbereich 1c (siehe Abbildung 37) ist am westlichen Rand des Wohnrings vorzufinden. Der auf der West-Ost-Achse verlaufende Lorenz-Hagen-Weg führt von der Heinrich-Lübke-Straße, welche von einer Fußgängerbrücke überspannt wird, direkt zur St. Michael Kirche. Links und rechts des Weges befindet sich vierstöckige

Wohnbebauung mit einem Abstand von ca. 27 Metern. Die Bebauung wird lediglich von einem nach Norden abgehenden Fußweg durchbrochen.



Abbildung 37 - Luftbild und Flurkarte 1c (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)

2a)

Der Untersuchungsbereich 2a (siehe Abbildung 38) beinhaltet den nord-östlichen Teil des Wohnrings. Der Adenauerring, der den Wohnring im Norden umschließt, verläuft an dieser Stelle in Nordwest bzw. Südost Richtung. Die südlich angeordneten Häuser des Wohnrings haben 10 Geschosse und bilden einen geschlossenen Blockrand. Gegenüber der Straße befindet sich das viergeschossige Polizeipräsidium, welches als Solitär von höheren Bürogebäuden umringt ist. Der Abstand zwischen Polizeipräsidium und Wohnring beträgt knapp 60 Meter.

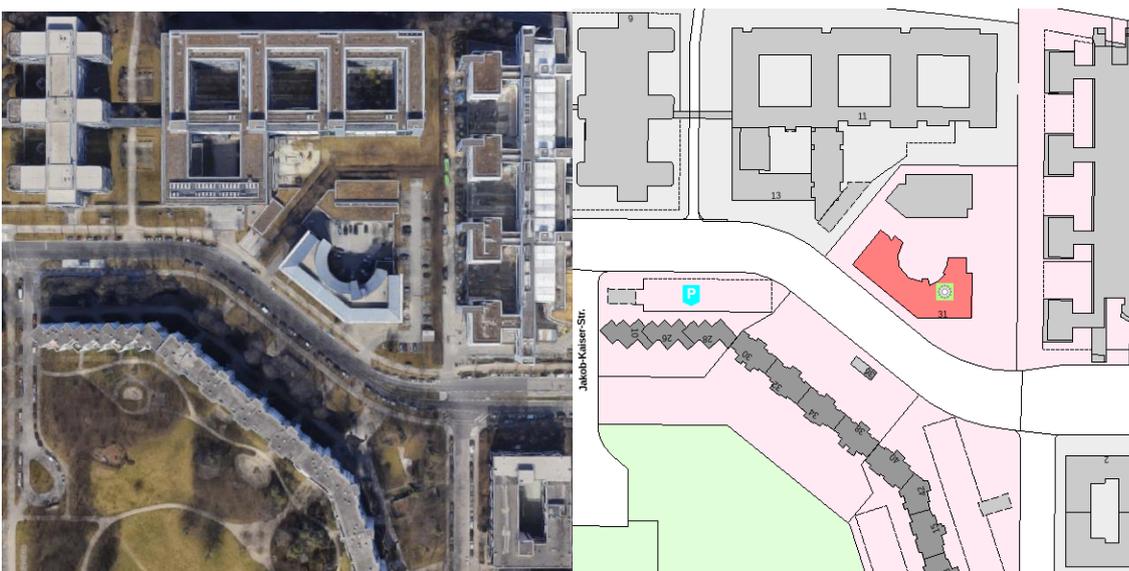


Abbildung 38 - Luftbild und Flurkarte 2a (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)

2b)

Die Thomas-Dehler-Straße, welche den Untersuchungsbereich 2b (siehe Abbildung 39) durchschneidet, ist zwischen dem südlichen Teil des PEP Einkaufszentrum und Perlach-Plaza gelegen. Sie führt vom Hanns-Seidel-Platz nach Süden. Das Perlach-Plaza bildet am Ostrand der Straße einen siebengeschossigen, geschlossenen Blockrand, während im Westen das vier- bis fünfgeschossige PEP sowie das fünfgeschossige Sozialbürgerhaus Ramersdorf/Perlach als Solitär angesiedelt sind. Die Breite der Straßenschlucht beträgt zwischen 50 und 60 Metern.

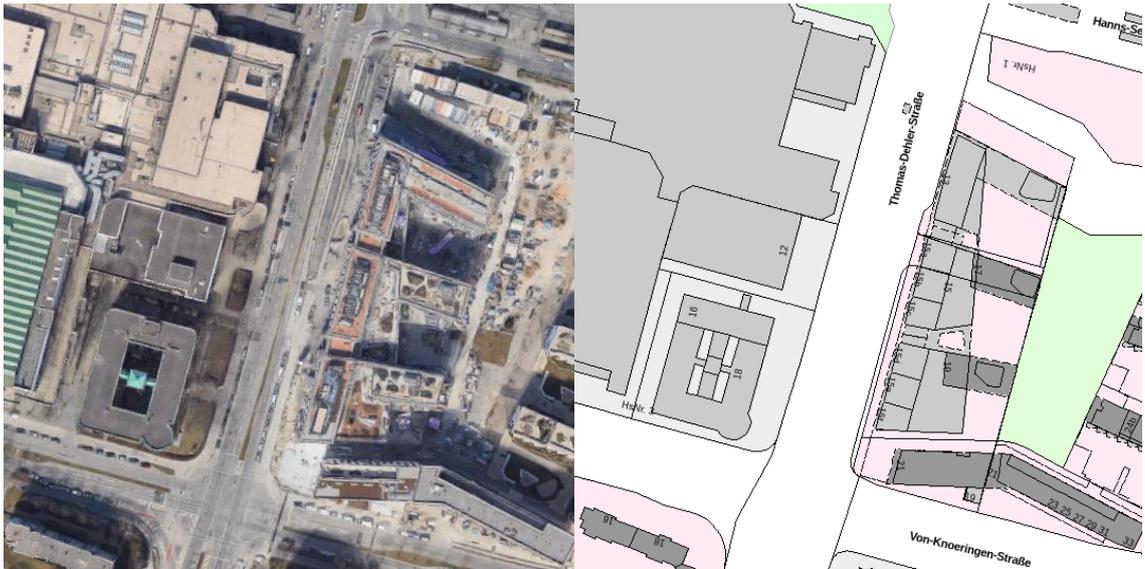


Abbildung 39 - Luftbild und Flurkarte 2b (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)

2c)

Die Ständlerstraße ist einer der Hauptzubringerstraßen von Neuperlach. Sie verläuft von der westlich gelegenen Autobahn A8 nördlich des Wohnrings nach Osten durch Neuperlach und durchquert an dieser Stelle den Untersuchungsbereich 2c (siehe Abbildung 40).

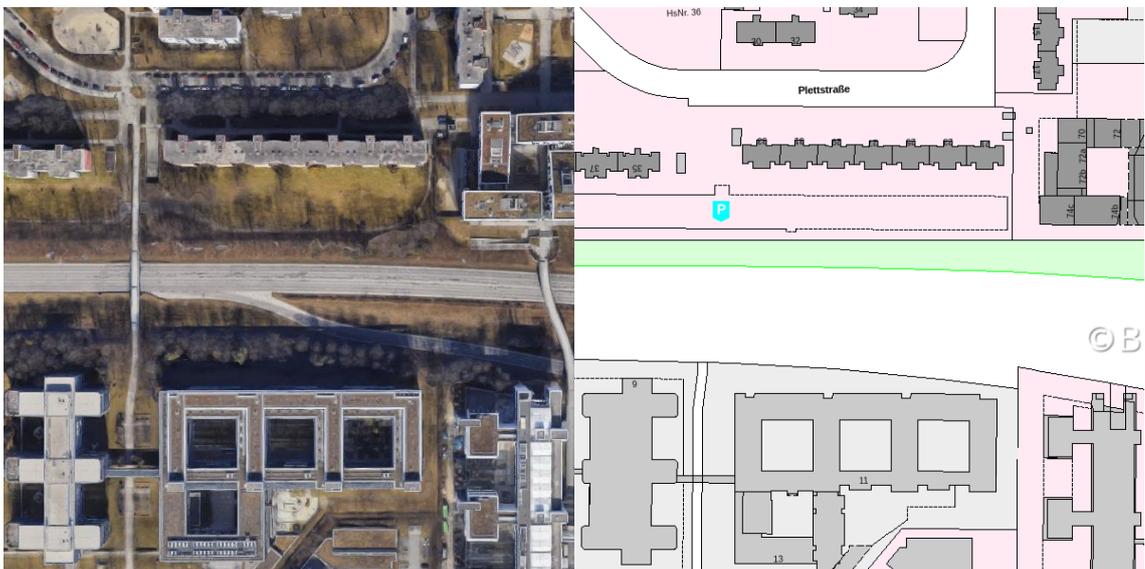


Abbildung 40 - Luftbild und Flurkarte 2c (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)

Südlich der Ständlerstraße befindet sich das siebengeschossige Bürogebäude der Generali-Versicherungen, nördliche ein neugeschossiger Wohnzeilenbau. Durch die breite Schnellstraße ergibt sich eine Breite der Straßenschlucht von über 115 Metern.

2d)

Der Untersuchungsbereich 2d (siehe Abbildung 41) bildet den nordwestlichen Teil des Adenauerrings, welcher hier in südwestliche bzw. in nordöstliche Richtung verläuft, und des neugeschossigen Wohnrings ab. Nördlich des Adenauerrings befindet sich eine Freifläche mit einem einzelnen, eingeschossigen Pavillonbau, welcher eine Sportschule beherbergt. Die Entfernung zwischen Wohnring und Sportschule beträgt ca. 60 Meter. Auch wenn es sich in diesem Fall um keine klassische Straßenschlucht handelt, da nur auf einer Seite eine nennenswerte Bebauung vorhanden ist, wird diese Situation untersucht. Eine nördlich gelegene, mehrgeschossige Bebauung würde in dieser Situation vermutlich keine ausschlaggebende Verschattung erzeugen. Diese Hypothese wird in nachfolgendem Kapitel 4 „Ergebnis und Diskussion“ (s. 52) diskutiert.

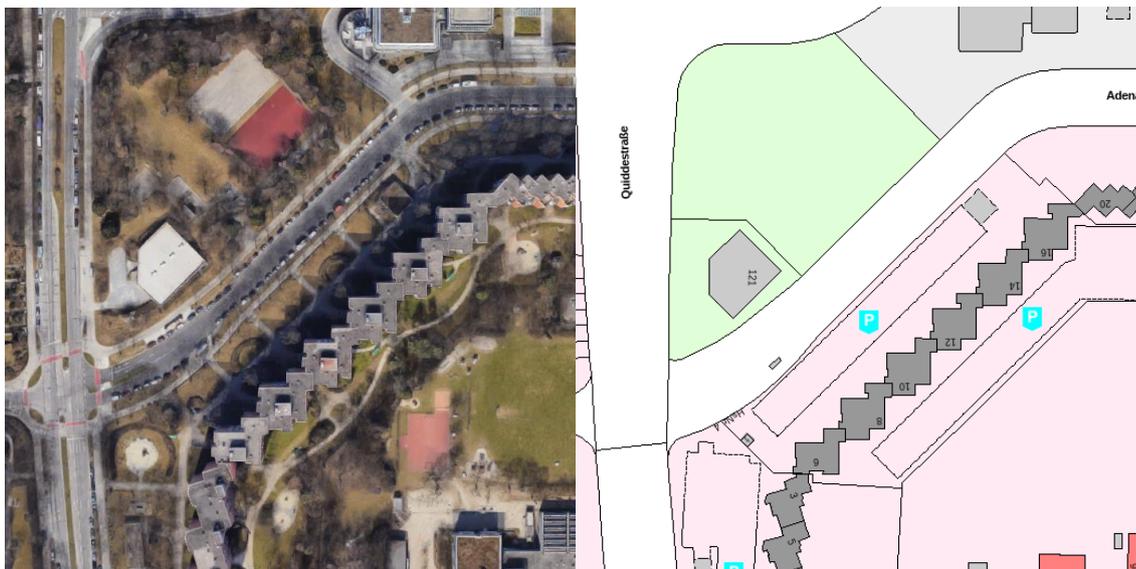


Abbildung 41 - Luftbild und Flurkarte 2d (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)

3a)

Ganz am westlichen Rand des Untersuchungsgebiets befindet sich der Untersuchungsbereich 3a (siehe Abbildung 44). Die nach Nordwesten bzw. Südosten verlaufende Otobrunner Straße wird hier an der nördlichen Seite von einem viergeschossigen Zeilenbau flankiert. Auf der Südseite, mit einer Entfernung von knapp 30 Metern finden sich mehrere zwei- bis dreigeschossige Mehrfamilienhäuser. Auch in diesem Fall entspricht die nördliche Bebauung nicht exakt den Kriterien der Untersuchungsberichte. Der Bereich wird dennoch in die Auswahl aufgenommen, da die Nordbebauung möglicherweise keinen signifikanten Einfluss auf die Beschattung hat. Diese Vermutung wird ebenfalls in Kapitel 4 „Ergebnis und Diskussion“ (s. 52) überprüft.



Abbildung 44 - Luftbild und Flurkarte 3a (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)

3b)

Der Untersuchungsbereich 3b (siehe Abbildung 43) erstreckt sich rund um die Zeitblomstraße. Diese führt von der nördlich gelegenen Leinbergerstraße zur südlichen Stethaimerstraße. Östlich der Straße sind zweigeschossige Reihenhäuser vorzufinden, westlich befindet sich mittig ein Garagenbau, nördlich ein zweistöckiges Mehrfamilienhaus und südlich das Eckhaus einer Reihenhausezeile entlang der Van-Eyck-Straße. Die Straßenschlucht ist lediglich 10 Meter breit.



Abbildung 43 - Luftbild und Flurkarte 3b (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)

3c)

Direkt südlich des Untersuchungsbereichs 3b befindet sich der Untersuchungsbereich 3c (siehe Abbildung 45). Im Mittelpunkt steht die auf der West-Ost-Achse gelegene Stethaimerstraße. Diese ist wie in diesem Wohngebiet üblich, auf beiden Seiten mit zweigeschossigen Reihenhäusern bebaut, welche in Zeilen von fünf bis sieben Häusern an-

geordnet sind. Im Norden der Straße führt eine von Garagen gesäumte Gasse zur Zeitblomstraße. Die nördlichen Reihenhäuser haben einen breiten Garten, bevor die Bebauung beginnt. Die Straßenbreite beträgt ebenfalls 10 Meter.



Abbildung 45 - Luftbild und Flurkarte 3c (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)

4a)

Den südwestlichen Teil des Wohnrings deckt der Untersuchungsbereich 4a (siehe Abbildung 46) ab. Der Schumacherring bildet das südliche Pendant zum Adenauerring. Der sich hier befindliche Teil des Schumacherrings verläuft in nordwestliche bzw. südöstliche Richtung. Nördlich grenzt der Wohnring mit seinen neugeschossigen geschlossen aneinander stehenden Mehrfamilienhäusern an. Südlich der 40 Meter breiten Straßenschlucht finden sich mehrere zweigeschossige Mehrfamilienhäuser. Wie auch schon in Untersuchungsbereich 3a überschreitet die im Norden befindliche Bebauung die in den



Abbildung 46 - Luftbild und Flurkarte 4a (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)

Auswahlkriterien festgelegte Maximalhöhe für diese Kategorie. Auch hier soll eine Untersuchung der Relevanz der höheren Gebäude für die Verschattung Kapitel 4 „Ergebnis und Diskussion“ (s. 52) durchgeführt werden.

4b)

Der Untersuchungsbereich 4b (siehe Abbildung 47) befindet sich im Westen des Untersuchungsgebiets südlich der Ständlerstraße. Die Hofangerstraße unterquert die Ständlerstraße im Norden und führt von dort nach Süden. Westlich der Straße sind dreigeschossige Mehrfamilienhäuser sowie eine eingeschossige Kindertagesstätte vorzufinden. Östlich der Straße befinden sich stirnseitig anschließende zwei- bis dreigeschossige Mehrfamilienhäuser. Die Straßenschlucht hat durch den Rücksprung der westlich angrenzenden Gebäude eine Breite von ca. 35 Metern.

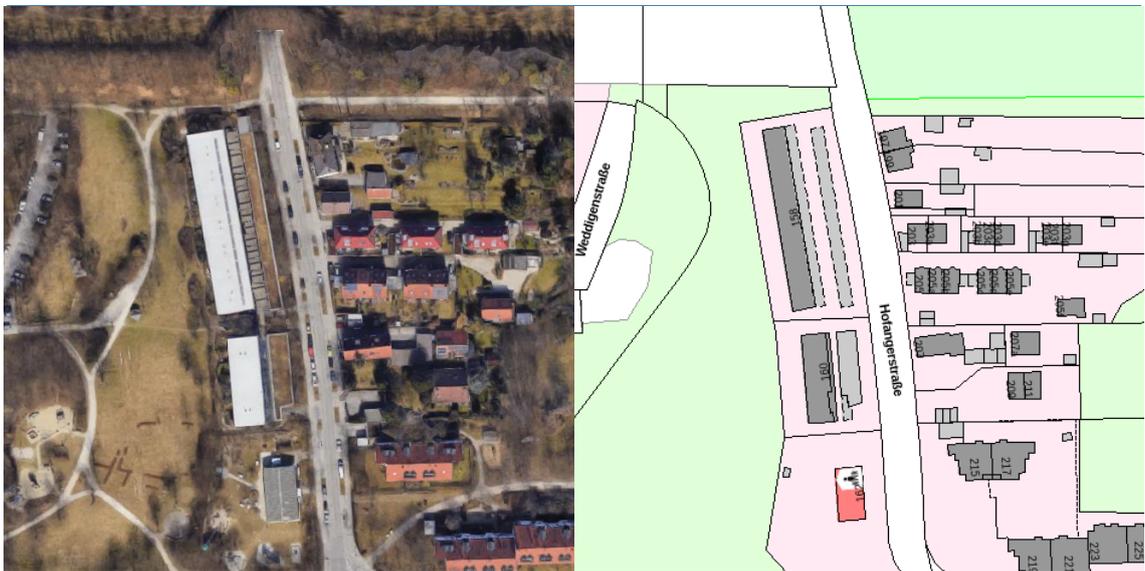


Abbildung 47 - Luftbild und Flurkarte 4b (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)

4c)

Die Specklstraße befindet sich im Zentrum des Untersuchungsbereichs 4c (siehe Abbildung 48), welcher sich im Südwesten des Untersuchungsgebiets befindet. Die Straße, welche auf der West-Ost-Achse ausgerichtet ist, ist auf beiden Seite von zweigeschossigen Ein- und Zweifamilienhäusern umringt. Durch die breit angelegten Vorgärten der nördlich gelegenen Häuser ergibt sich im mittleren Bereich der Straße eine Straßenschluchtbreite von über 30 Metern.

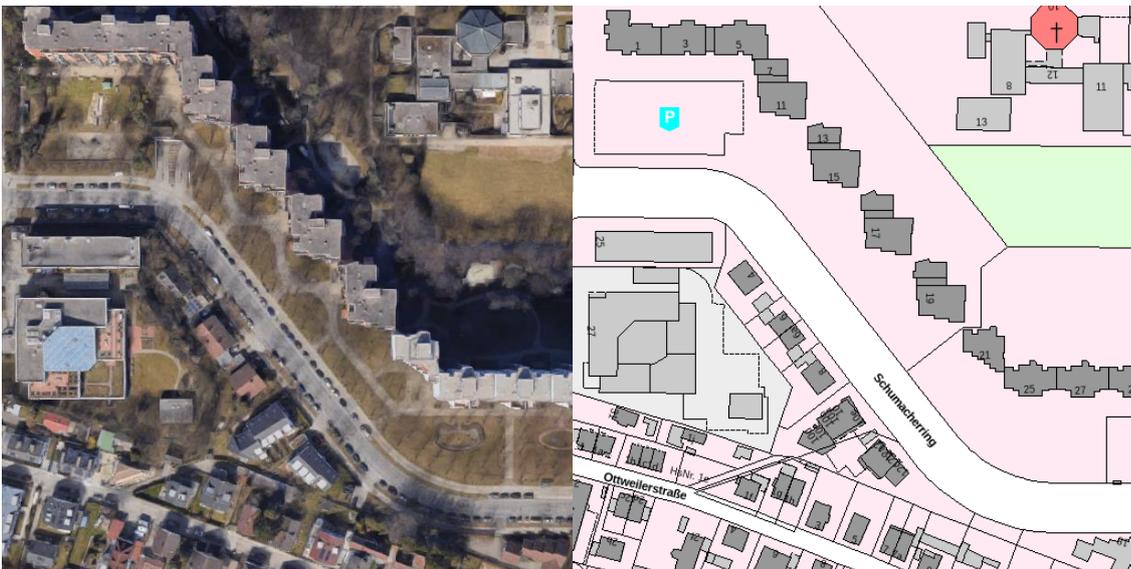


Abbildung 48 - Luftbild und Flurkarte 4c (Geoportal Bayern, 2023; Google Maps, 2023)

3.2.2. Überdachungen

Für jede der ausgewählten Untersuchungsbereiche soll die Überdachung geometrisch optimal ausgeführt werden. Dafür sollen verschiedene Anordnungen der Überdachungen getestet werden. Die Anpassung der Ausrichtung erfolgte nach zwei Kriterien. Im ersten Schritt sollte die Höhe der Überdachung (siehe Abbildung 49) und im zweiten Schritt die Ausrichtung der einzelnen PV-Panel optimiert werden (siehe Abbildung 50).

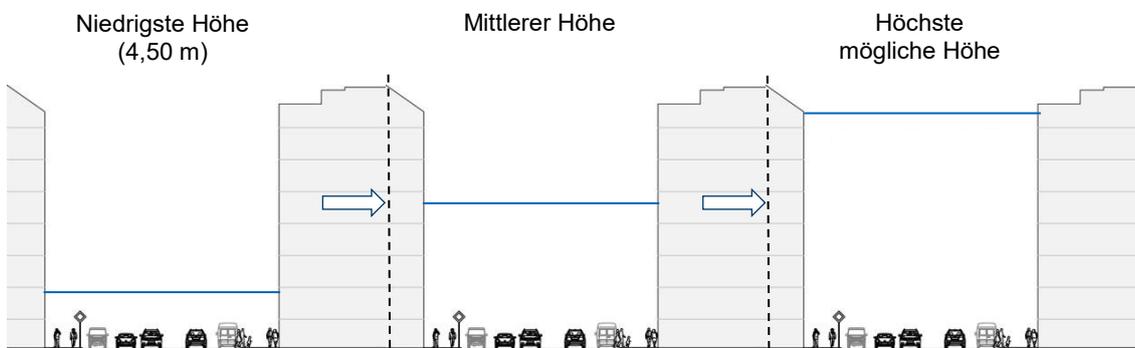


Abbildung 49 - Höhe der Überdachung (eigene Darstellung)

Zunächst sollen die Auswirkungen der tiefsten möglich angebrachten Überdachung getestet werden. Hier wird eine Höhe von 4,50 Metern verwendet, da dies entsprechend der technischen Regel „Richtlinien für die Anlage von Landstraßen [RAL]“ der empfohlenen Mindestdurchfahrtshöhe für Straßen (ausgenommen Autobahnen) entspricht (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2013). Die höchste mögliche Höhe entspricht der Bebauungshöhe des jeweils niedrigsten Gebäudes der Straßenschlucht (ausgenommen weder als Wohn- noch als Bürogebäude genutzt). Bei Gebäuden mit Satteldach wird die Traufhöhe als Bebauungshöhe angenommen. Als dritte Überdachungshöhe wird die mittlere Höhe zwischen der niedrigsten und der höchsten möglichen Überdachung gewählt. Ist die höchste mögliche Überdachung bei lediglich 10

Metern oder niedriger, wird auf die zusätzliche Untersuchung der mittleren Höhe verzichtet.

Für jede der Höhen wird eine geschlossene, flache und quadratische Überdachung in der Flucht der Straße modelliert und eine UTCI-Analyse für die wärmste Woche des Modelljahres durchgeführt. Für die Überdachungshöhe, welche zur größten Reduzierung des UTCI unterhalb der Überdachung führt, wird die Ausrichtung der PV-Paneele angepasst.

Die Optimierung der PV-Paneele erfolgt entsprechend der in Kapitel 3.1.1 „Wetterdaten“ (s. 30) durchgeführten Strahlungsanalyse. Dort wurde der Winkel ermittelt, in welchem eine Fläche der höchsten Energiemenge

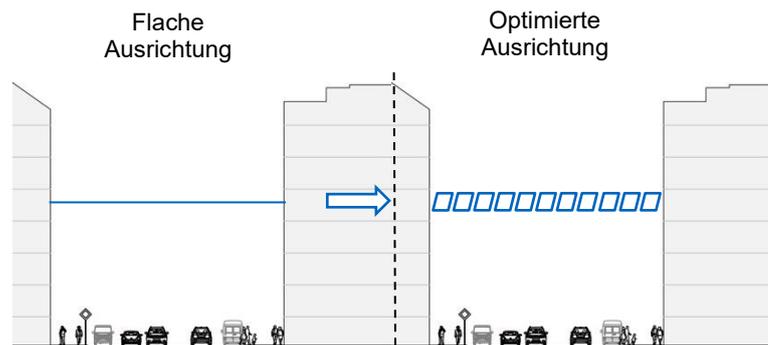


Abbildung 50 - Optimierung der PV-Panel Ausrichtung (eigene Darstellung)

durch die ganzjährige solare Gesamtstrahlung ausgesetzt ist. In diesem Winkel sollen die Paneele ausgerichtet werden (siehe Abbildung 50). Es wurde von einer gängigen Größe der Paneele von 1,00 x 1,50 Metern ausgegangen. Um die gegenseitige Verschattung der Paneele durch den angestellten Winkel zu begrenzen, wurde der Abstand der Paneele hintereinander auf 3,00 Meter erweitert.

4. Ergebnis und Diskussion

Im folgenden Kapitel sollen die Ergebnisse der Untersuchung vorgestellt und diskutiert werden. Zunächst erfolgt eine Betrachtung des gesamten Untersuchungsgebiets, bevor auf die einzelnen Untersuchungsbereiche eingegangen wird.

4.1. Untersuchungsgebiet

Die UTCI-Analyse des gesamten Untersuchungsgebiets erfolgte anhand der vereinfachten Gebäudevolumen in einem 10 x 10 Meter Raster. Zunächst erfolgte die Analyse über das gesamte Jahr über 24 Stunden am Tag. Für jedes Feld des Rasters wurde durch die Simulation die durchschnittliche UTCI-Temperatur entsprechend der in Kapitel 3.2 „Simulation“ (s. 37) etablierten Metriken ermittelt. Die Abbildung 51 zeigt das Ergebnis dieser Analyse.

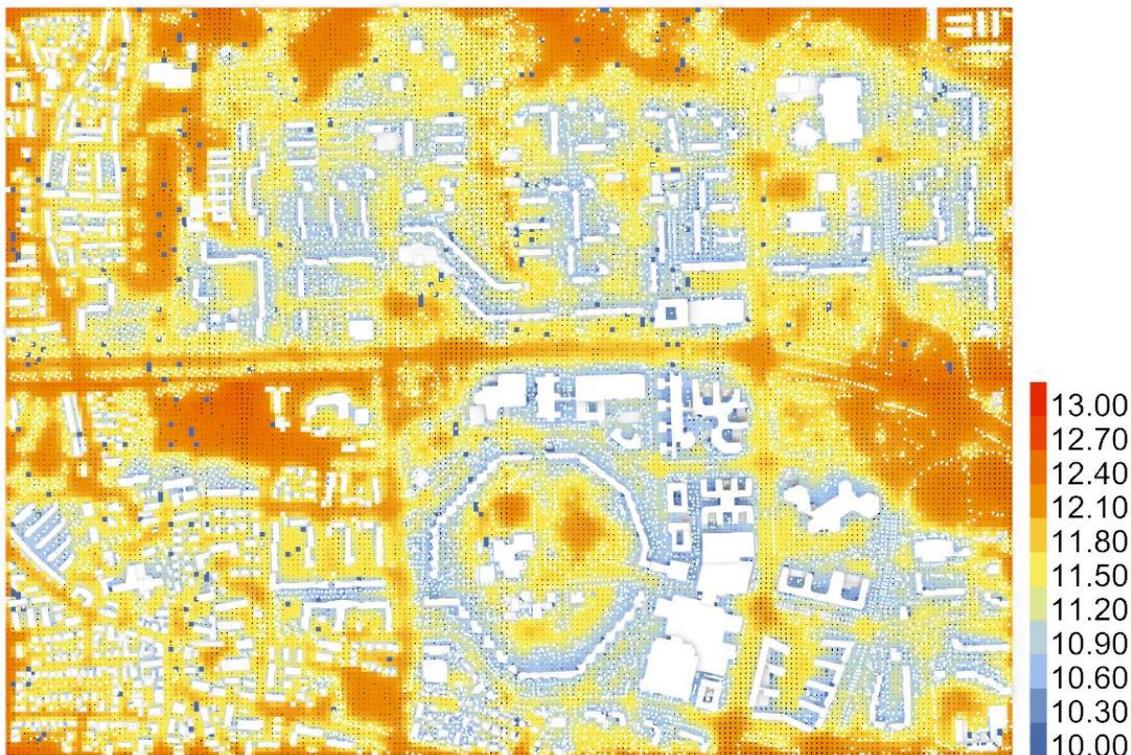


Abbildung 51 - UTCI-Analyse; Gesamt; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die UTCI-Temperatur im Jahresdurchschnitt in Neuperlach schwankt laut der Ergebnisse dieser Untersuchung zwischen ca. 10 °C und 13 °C. Die dunkelblauen Felder geben fehlerhafte Ergebnisse an. Deutlich zu sehen ist dabei, dass freie Flächen ohne Bebauung und ohne Bäume über das gesamte Jahr gesehen eine deutlich höhere UTCI-Temperatur aufweisen als Flächen in Bebauungsnähe oder strukturierte Flächen mit Bäumen bepflanzte Flächen. Zusätzlich zeigt sich, dass die kühleren Flächen um Gebäude im Norden stärker ausgeprägt sind als im Süden. Auch zwischen nah aneinander stehenden

Gebäuden oder in geschlossenen Innenhöfen sind die UTCI-Temperaturen meist flächendeckend geringer. Dies lässt den Schluss zu, dass die Verschattung durch Gebäude oder durch Bepflanzung eine massive Auswirkung auf die UTCI-Temperaturen hat, was auch den Erwartungen entspricht. Kühlende Effekte durch den von Bäumen verursachten latenten Wärmestrom werden in der Simulation nicht berücksichtigt und können somit als Auslöser des Effekts ausgeschlossen werden.

Die nächste Analyse des gesamten Untersuchungsgebiets erfolgte für die heißen Sommermonate Juni bis September jeweils täglich von 9 Uhr bis 21 Uhr. Alle anderen Variablen blieben unverändert. Die Abbildung 52 zeigt das Ergebnis dieser zweiten Untersuchung.

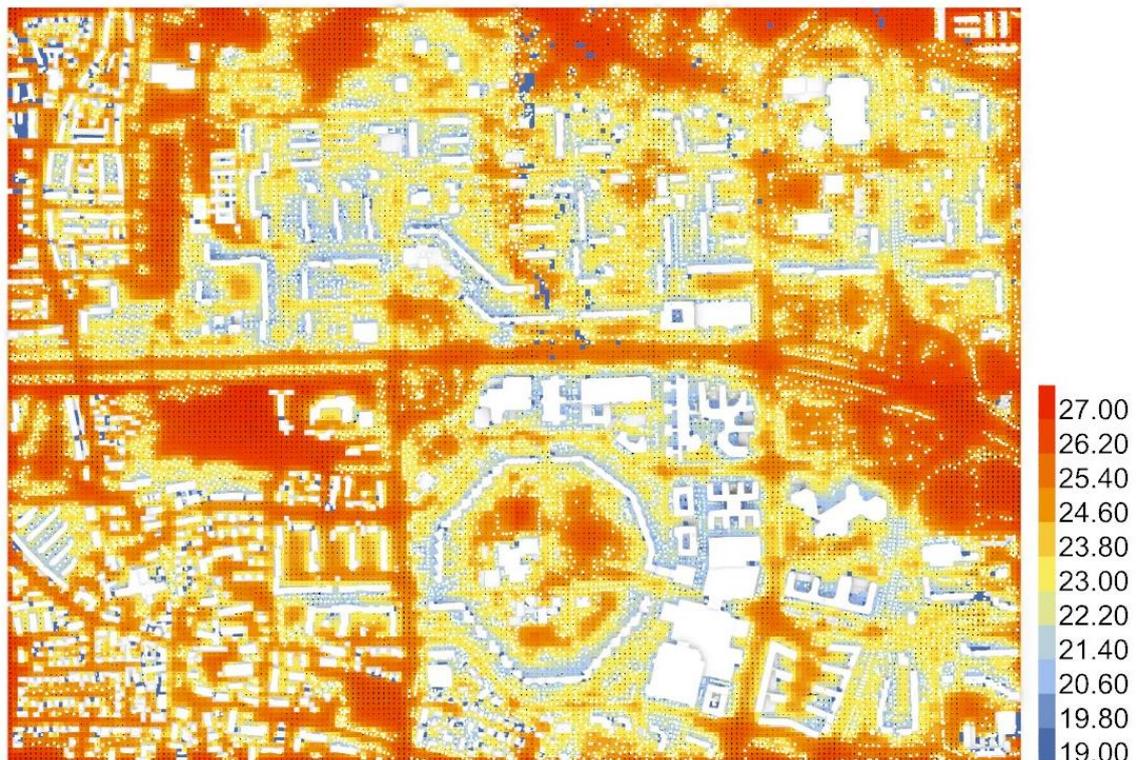


Abbildung 52 – UTCI-Analyse; Gesamt; Sommermonate; Tag (122 Tage / 12 Stunden) (eigene Darstellung)

Die durchschnittlichen UTCI-Temperaturen für die heißen Sommermonate am Tag schwanken zwischen ca. 19 °C und 27 °C. Grundsätzlich lassen sich bei dieser Analyse dieselben Effekte beobachten wie bei der ganzjährigen Untersuchung. Die Schwankungen der Durchschnittstemperatur sind allerdings mit 8 K deutlich höher als die 3 K im ganzjährigen Durchschnitt. Dadurch sind die deutlich kühleren Bereiche um die Gebäude weniger ausgeprägt sichtbar. Trotzdem sind sie im Norden von Gebäuden, zwischen nah aneinander stehenden Gebäuden und in geschlossenen Innenhöfen immer noch deutlich sichtbar. Die größte Hitzeentwicklung ist weiterhin deutlich den Freiflächen, breiten Straßen und Kreuzungen zuzuordnen, welche keinerlei Verschattung ausgesetzt sind.

4.2. Untersuchungsbereiche

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Analyse aller in Kapitel 3.2.1 „Untersuchungsgebiet“ (s. 39) herausgearbeiteten Untersuchungsbereiche vorgestellt werden. Die Analyse entspricht grundsätzlich in Durchführung und Parametern der des gesamten Untersuchungsgebiets, jedoch werden hier die hoch aufgelösten Gebäudemodelle sowie die detaillierteren, oval modellierten Baummodelle verwendet. Auch das Raster wurde auf 5 x 5 Meter verkleinert. Grundsätzlich wurde immer die wärmste Woche über 24 Stunden am Tag untersucht. Zum besseren Verständnis der Ergebnisse wurden allerdings für den Untersuchungsbereich 1b zusätzliche Analysen vorgenommen.

4.2.1. Untersuchungsbereich 1b

Zunächst erfolgt die Analyse des Istzustands des Untersuchungsbereichs 1b. Die Ergebnisse dieser Untersuchung lässt sich in der Abbildung 54a betrachten.

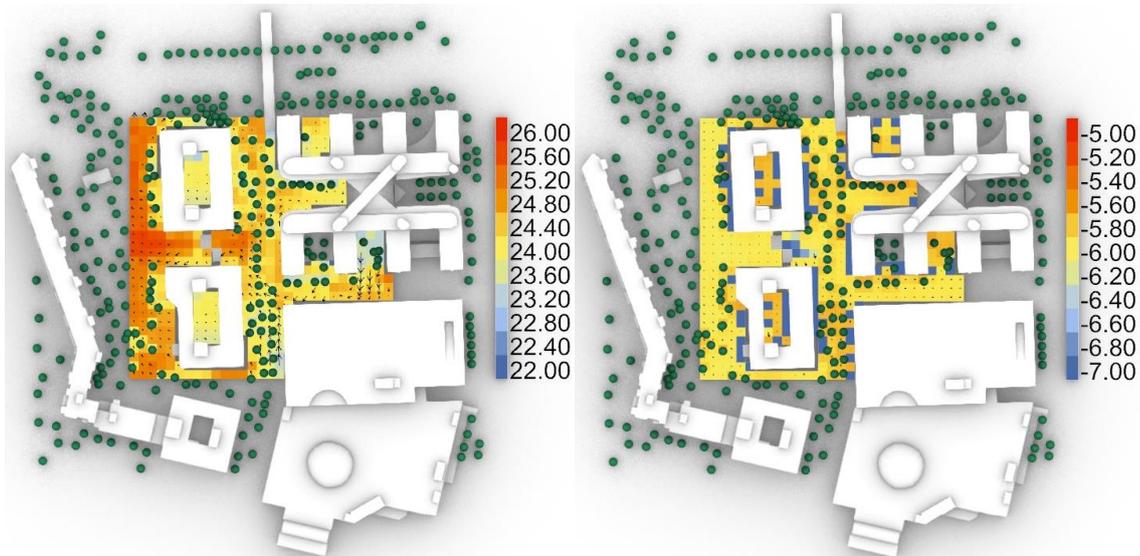


Abbildung 54a - UTCl-Analyse 1b; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Abbildung 54b - UTCl-Analyse 1b; Ausgangssituation; Kälteste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die UTCl-Durchschnittstemperaturen im Untersuchungsbereich 1b schwanken in der wärmsten Woche zwischen ca. 23 °C und 26 °C. Auch in diesem näheren Ausschnitt lassen sich einige der Beobachtungen analog zu der Analyse des gesamten Untersuchungsgebiets machen. In geschlossenen Innenhöfen, nahe an Gebäuden und in den Bereichen von Bäumen ist die UTCl-Temperatur deutlich geringer als auf Freiflächen. Die kühleren Flächen um Norden von Gebäuden lässt sich in diesem Ausschnitt nicht beobachten, was sich durch den höheren Sonnenstand im August erklären lassen könnte.

Die Abbildung 54b zeigt zum Vergleich die UTCI-Analyse in der kältesten Woche. Die Durchschnittstemperaturen schwanken hier zwischen $-6,5\text{ °C}$ und $-5,7\text{ °C}$. Hier zeigt sich der gegenteilige Effekt. In den Innenhöfen, unter den Bäumen sowie nahe an Gebäuden ist die Temperatur etwas höher als auf der freien Fläche. Da der anthropogene Wärmestrom der Gebäude durch die Beheizung sowie die Speicherwärmeflussdichte der Baumaterialien der Gebäude in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt wird, lässt sich dieser Effekt vermutlich durch den geringeren SFV und der damit geringeren langwelligen Abstrahlung in die Atmosphäre erklären.

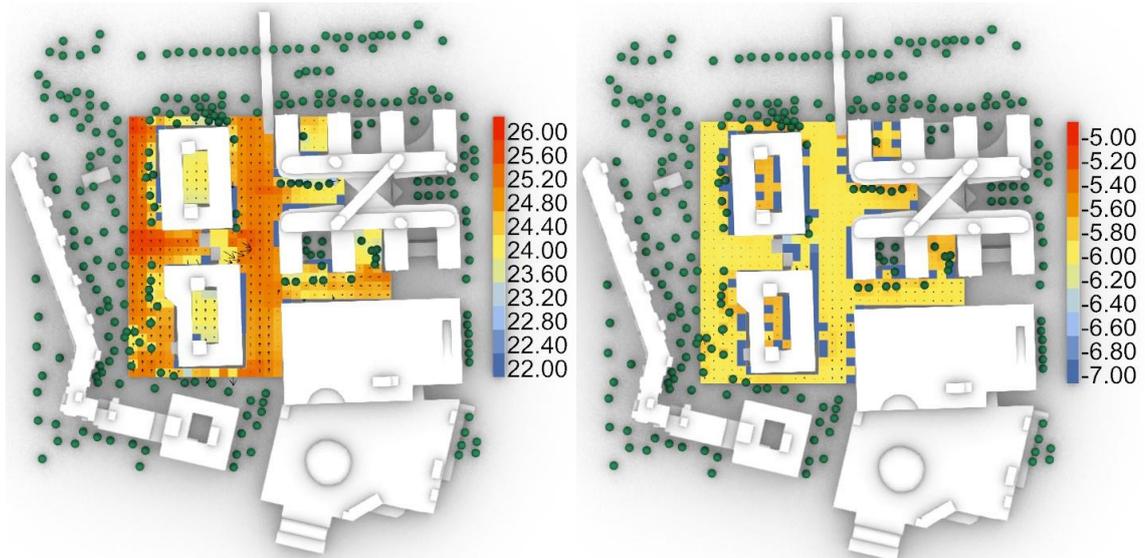


Abbildung 56a - UTCI-Analyse 1b; ohne Bäume; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Abbildung 56b - UTCI-Analyse 1b; ohne Bäume; Kälteste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Da es sich in diesem Fall um ein stark mit Bäumen bepflanzten Bereich handelt, wurde zusätzlich eine Untersuchung ohne Bäume im zu überdachenden Bereich angefertigt. Die Ergebnisse dieser Analyse zeigt die Abbildung 56a. Hier ist deutlich zu sehen, dass das Entfernen der schattenspendenden Bäume die durchschnittliche UTCI-Temperatur um über 1 K steigen lässt. Zusätzlich ändert sich die Luftbewegung im Untersuchungsbereich deutlich, was einen bemerkbaren Einfluss auf die UTCI-Temperaturen hat. Analog dazu zeigt die Abbildung 56b, welche die Ergebnisse der UTCI-Analyse der kältesten Woche darstellt, den ausbleibenden wärmenden Effekt der Bäume im zu überdachenden Bereich mit einem Abfall der durchschnittlichen Temperatur um ca. 0,2 K. Die in dieser Woche ohnehin geringe Luftbewegung bleibt von der Veränderung nahezu unverändert.

Die Abbildung 58a zeigt den Effekt einer geschlossenen Überdachung in einer Höhe von 4,50 Metern auf die durchschnittliche UTCI-Temperatur in der wärmsten Woche. Der Kühlungseffekt ist hier deutlich zu erkennen. Unter der Überdachung sinken die Durchschnittstemperaturen der gesamten Woche im Vergleich zur Situation ohne Bäume um ca. 2,5 K. Auch im Vergleich zu Ausgangssituation ist eine Verringerung der Durchschnittstemperatur um ca. 1,5 K zu bemerken. Lediglich im seitlichen Randbereich der

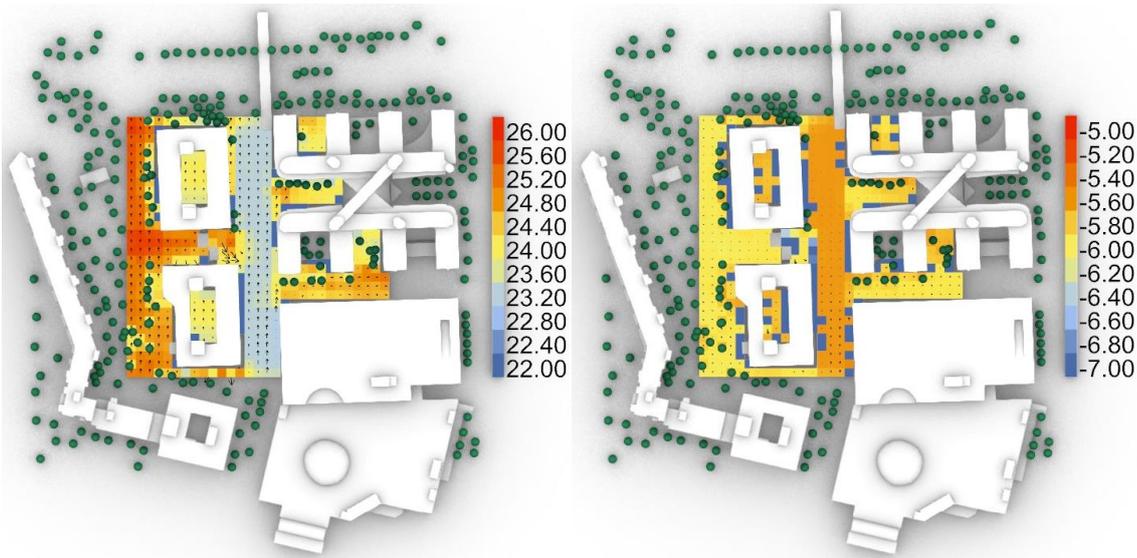


Abbildung 58a - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Abbildung 58b - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 4,50 m; Kälteste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Überdachung sowie in den Kreuzungssituationen der überdachten Straßenschlucht ist die Temperatursenkung weniger groß. Dies ist durch die morgens im Osten und abends im Westen tiefer stehende Sonne zu begründen, welche durch die seitlich einmündenden Straßen scheint.

Auch in der kältesten Woche ist ein deutlicher Effekt der Überdachung zu bemerken, wie die Abbildung 58b zeigt. Hier kommt es wie bereits durch die Bäume zu einer Erhöhung der Durchschnittstemperatur. Die Temperaturveränderung im Vergleich zu Situation ohne Bäume beträgt ca. 0,5 K, die Veränderung im Vergleich zur Ausgangssituation beträgt immer noch ca. 0,3 K.

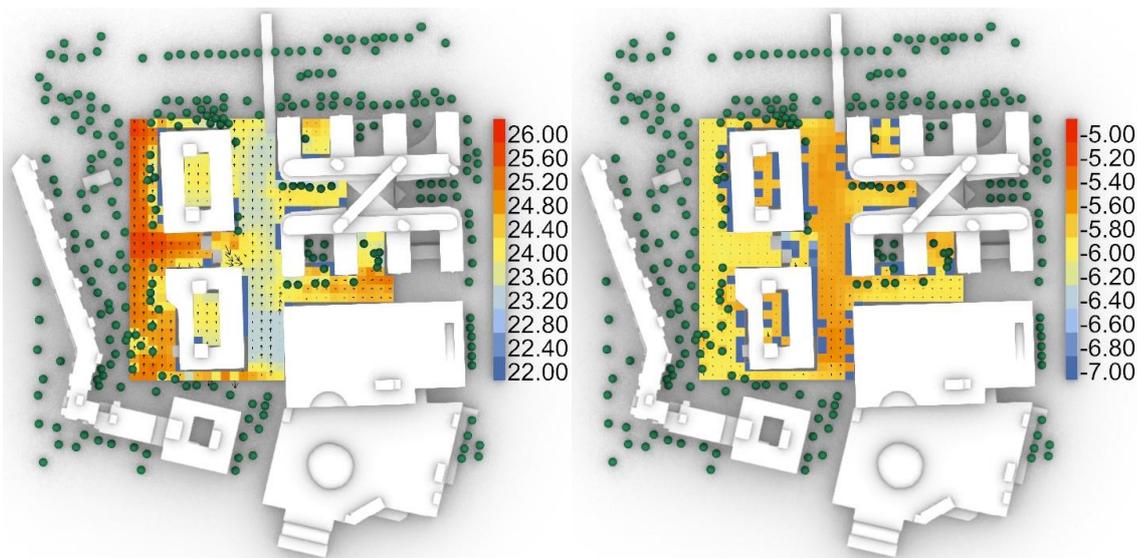


Abbildung 60a - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 10,75 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Abbildung 60b - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 10,75 m; Kälteste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Den Einfluss einer Überdachung in einer Höhe von 10,75 Metern auf die durchschnittliche UTCI-Temperatur in der wärmsten Woche zeigt die Abbildung 60a. In den Bereichen, die von beiden Seiten mit Bebauung versehen sind, bleibt der Kühleffekt der Überdachung nahezu identisch. Jedoch tritt der bereits bei niedriger Überdachung beobachtete Effekt in den Kreuzungsbereichen deutlich verstärkt auf. Vor allem auf der Westseite ist hier eine deutliche Verringerung des Kühleffekts zu beobachten. Dies untermauert die bereits aufgestellte These, dass die morgens und abends seitlich durch die einmündenden Straßen einfallende Sonne zu einer Erwärmung führt. Eine höher angebrachte Überdachung bietet der direkten Sonneneinstrahlung hier die Möglichkeit, weiter unter die Überdachung vorzudringen.

Im Winter ist der Effekt erneut gegenteilig, wie die Abbildung 60b deutlich macht. Im Bereich der Kreuzungen kommt es hier zu einer leichten Abkühlung im Vergleich zur Temperatur zwischen den Gebäuden. Auch dies scheint die Theorie zu bestätigen, dass der geringere SVF unter der Überdachung für die Erwärmung verantwortlich ist, da dieser durch eine höhere angebrachte Überdachung im Randbereich der überdachten Fläche größer wird.

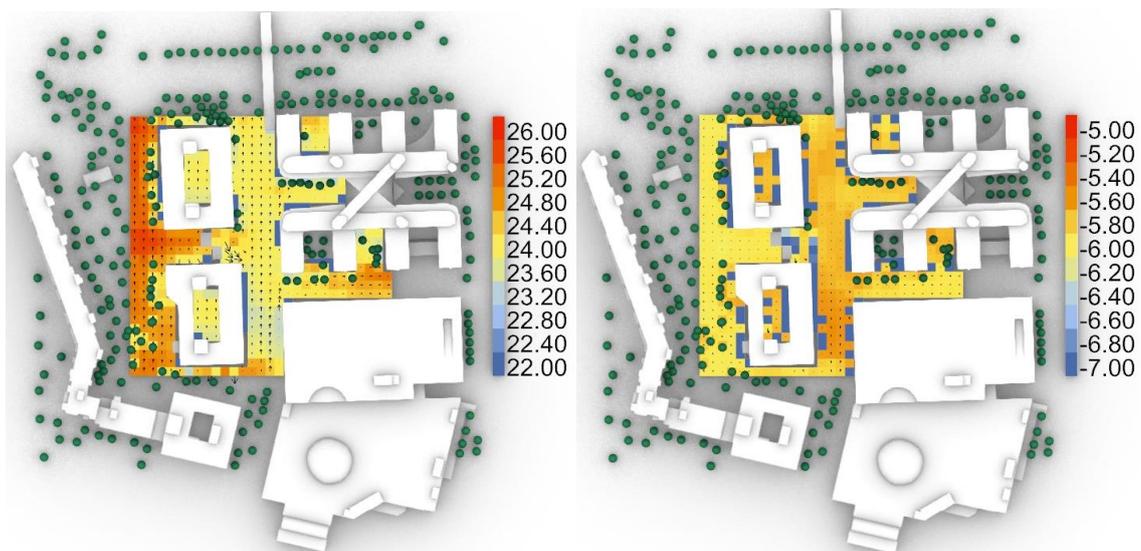


Abbildung 62a - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 17,00 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Abbildung 62b - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 17,00 m; Kälteste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Für die Überdachung in einer Höhe von 17,00 Metern, was der Höhe der angrenzenden Gebäude entspricht, ergibt sich, wie in der Abbildung 62a zu sehen, der geringste kühlende Effekt. Dieser beträgt nur noch ca. 1,5 K im Vergleich zur Situation ohne Bäume bzw. ca. 0,5 K im Vergleich zu Ausgangssituation. Lediglich zwischen den beiden südlichsten Gebäuden der Straße ist im Randbereich noch ein etwas größerer kühlender Effekt zu verzeichnen.

Für die kälteste Woche ist auch hier der geringste Effekt der Überdachung zu vermerken, wie die Abbildung 62b zeigt. Auch hier ist der größte Effekt noch im Bereich der südlichen

Gebäude zu beobachten. Dennoch scheint der wärmende Effekt im Winter weniger drastisch von der Veränderung der Höhe der Überdachung abhängig zu sein wie der kühlende Effekt im Sommer. Dies könnte daran liegen, dass sich der SVF weniger drastisch vergrößert wird, als sich der Winkel der seitlichen Sonneneinstrahlung verändert.

In der Analyse des Untersuchungsbereichs 1b stellte sich die niedrigste mögliche Überdachung von 4,50 Metern als für die Kühlung des Straßenraums am effektivsten heraus. Um den kühlenden Effekt der Beschattung in der heißesten Woche weiter zu untersuchen, wurde zusätzlich eine Analyse für jeweils nur die Tagesstunden und die Nachtstunden angefertigt.

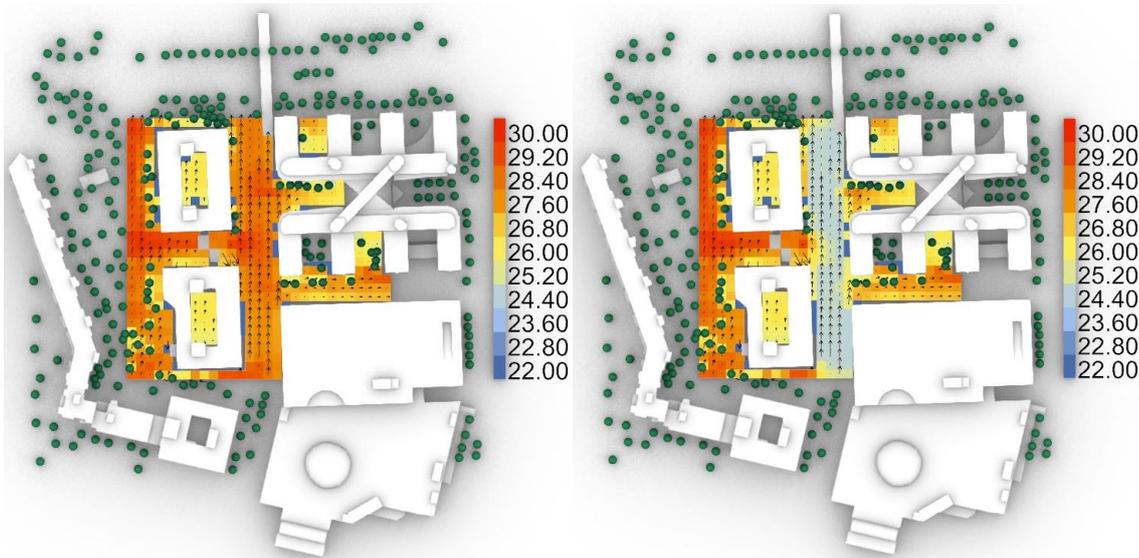


Abbildung 64a - UTCI-Analyse 1b; ohne Bäume; Wärmste Woche; Tag (7 Tage / 12 Stunden) (eigene Darstellung)

Abbildung 64b - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche; Tag (7 Tage / 12 Stunden) (eigene Darstellung)

In der Abbildung 64a und der Abbildung 64b zeigt sich deutlich, dass der kühlende Effekt am Tag sehr viel stärker ist als im 24-stündigen Durchschnitt. Von 9 Uhr bis 21 Uhr beträgt die UTCI-Durchschnittstemperatur in der heißesten Woche ohne Überdachung zwischen 28 °C und 30 °C. Durch die Überdachung in einer Höhe von 4,5 Metern reduziert sich diese Temperatur zur selben Zeit um 4 K bis 5 K auf 24,5 °C bis 25,5 °C.

In der Nacht zwischen 21 Uhr und 9 Uhr in der wärmsten Woche ist immer noch ein geringer kühlender Effekt durch die Überdachung bemerkbar, wie die Abbildung 68a und die Abbildung 68b zeigen. Während die maximale Durchschnittstemperatur der Straßenschlucht ohne Überdachung großflächig 22 °C erreicht, wird mit Überdachung eine UTCI-Temperatur von maximal 21,5 °C erreicht. Der mittlere Teil des überdachten Bereichs bleibt sogar unter 21 °C. Zu beachten ist allerdings, dass die Wärmespeicherfähigkeit der in der Straßenschlucht verwendeten Baumaterialien in der Simulation nicht berücksichtigt werden konnte. Diese Ergebnisse beziehen lediglich die in Kapitel 3.2 „Simulation“ (s. 37) beschriebenen Faktoren mit ein.

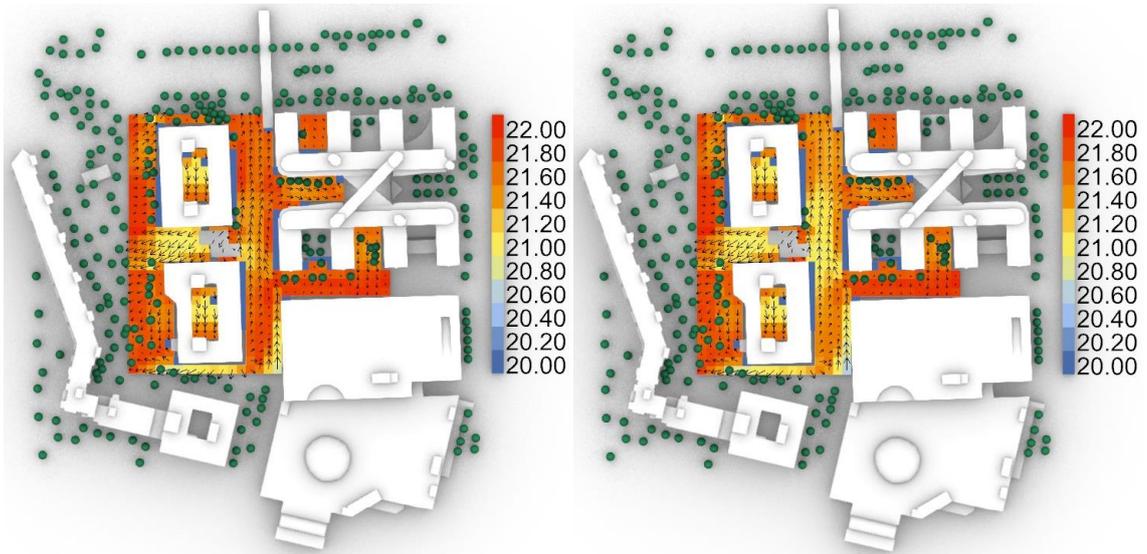


Abbildung 68a - UTCI-Analyse 1b; ohne Bäume; Wärmste Woche; Nacht (7 Tage / 12 Stunden) (eigene Darstellung)

Abbildung 68b - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche; Nacht (7 Tage / 12 Stunden) (eigene Darstellung)

Da sich die Überdachung im Sommer durchweg als kühlend und im Winter als wärmend herauszustellen scheint, wurde zusätzlich eine UTCI-Analyse über das gesamte Jahr und 24 Stunden am Tag mit und ohne Überdachung durchgeführt. Die Abbildung 66a und Abbildung 66b zeigen die Ergebnisse dieser ganzjährigen Untersuchung.

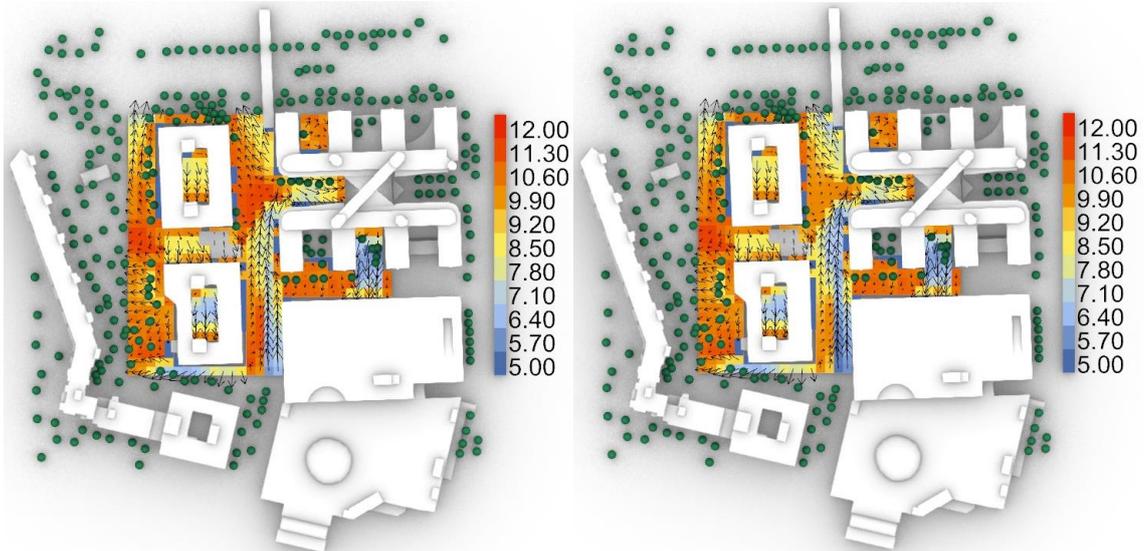


Abbildung 66a - UTCI-Analyse 1b; ohne Bäume; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Abbildung 66b - UTCI-Analyse 1b; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Zu sehen ist ein leichter ganzjähriger Abkühlungseffekt durch die Überdachung in 4,50 Metern Höhe. In den besonders warmen Bereichen mit zuvor 12 °C UTCI-Temperatur kann durch die Überdachung eine Abkühlung auf 10,5 °C erfolgen. Im mittleren Teil der Straßenschlucht, in welchem die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten deutlich höher sind, kann eine Abkühlung um ca. 1 K beobachtet werden und auch in den kühleren Bereichen im Süden der Straßenschlucht mit sehr hohen durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten beträgt die Abkühlung durch die Überdachung immer noch ca. 0,5 K.

Im Folgenden soll das Potenzial für die Bestückung der Überdachungen mit PV-Paneelen zur Stromerzeugung überprüft werden. Zu diesem Zweck wird die Fläche der Überdachung auf die Energiemenge der über das gesamte Jahr einfallenden direkten und diffusen solaren Strahlung überprüft.

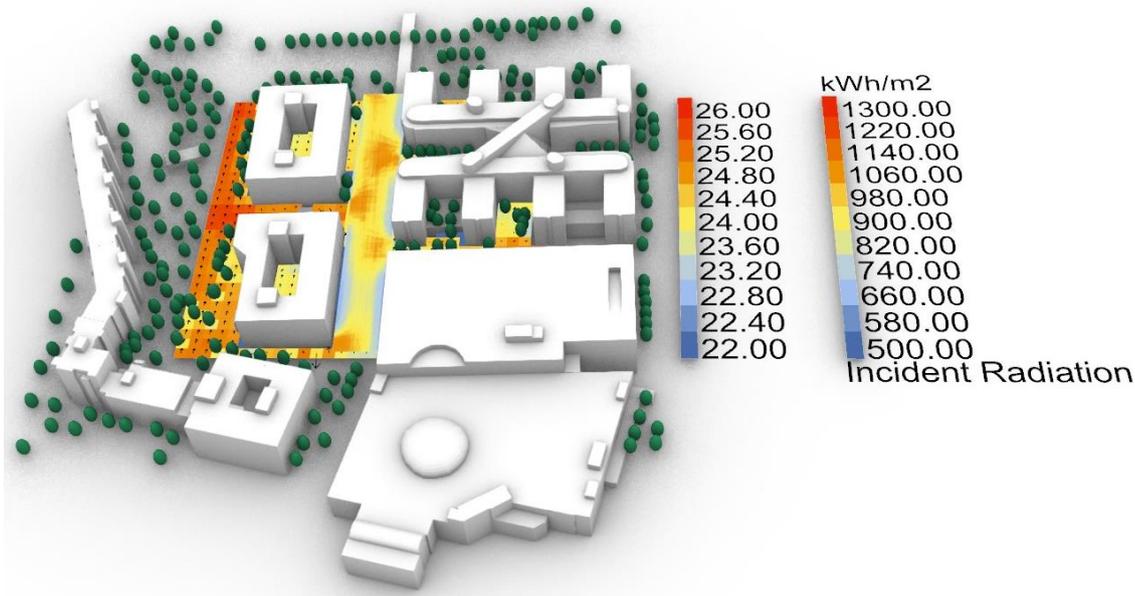


Abbildung 69 - Strahlungsanalyse 1b kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die Abbildung 69 zeigt die kumulierte Energiemenge für das gesamte Jahr, welche auf der Überdachung in einer Höhe von 4,50 Metern auftritt. Diese schwankt zwischen ca. 700 kWh/m² und 1300 kWh/m². Zweiteres entspricht wie in Kapitel 3.1.1 „Wetterdaten“ (s. 30) beschrieben der höchsten Energiemenge, die in München im Untersuchungs Jahr auf eine waagerechte Fläche treffen kann. In den Bereichen der Kreuzungen ist die Energiemenge auf der Fläche deutlich höher als im Bereich zwischen den Gebäuden. Dies liegt an der Verschattung der Überdachung durch die Gebäude. Direkt neben den Gebäudefassaden ist die Energiemenge am geringsten, da dort die Verschattung am größten ist. Die gesamte Energiemenge über das ganze Jahr für die Fläche der Überdachung beträgt 2.635.400 kWh.

Bei einer höher angebrachten Überdachung ist der Effekt der Verschattung durch die angrenzende Bebauung merklich geringer, wie die Abbildung 71 am Beispiel einer 10,75 Meter hohe Überdachung zeigt. Die geringste Energiemenge direkt am Rande der Bebauung beträgt immer noch ca. 900 kWh/m². Zusätzlich ist die Fläche, welche der maximalen Energiemenge von 1.300 kWh/m² ausgesetzt ist, deutlich größer geworden. Die gesamte Energiemenge bei der Überdachung dieser Höhe beträgt 3.270.100 kWh, was einer Steigerung von ca. 24 % entspricht.

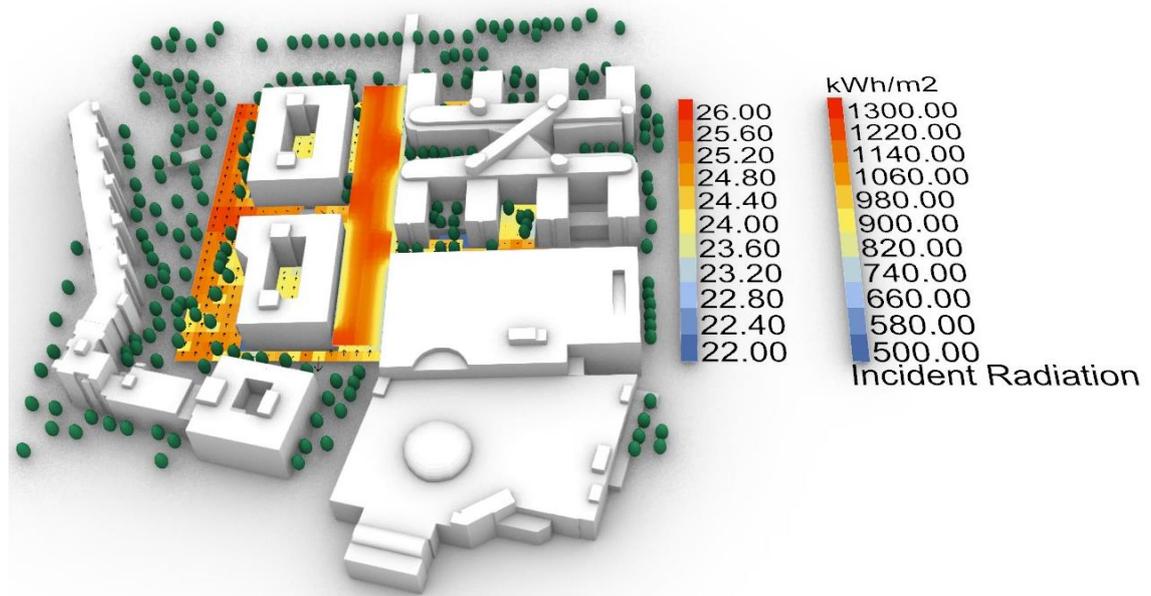


Abbildung 71 - Strahlungsanalyse 1b kumuliert; Überdachung 10,75 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Für die höchst mögliche Überdachung von 17,00 Metern ist auch der höchste Energieeintrag zu erwarten. Die Abbildung 70 bestätigt dies. Ohne Verschattung durch angrenzende Bebauung kann die gesamte Fläche die maximalen 1.300 kWh/m an Energie umsetzen. Somit ergibt sich eine Gesamtenergiemenge von 3.892.200 kWh für das gesamte Jahr. Dies entspricht wiederum eine Steigerung um ca. 19 % gegenüber der Überdachung in mittlerer Höhe.

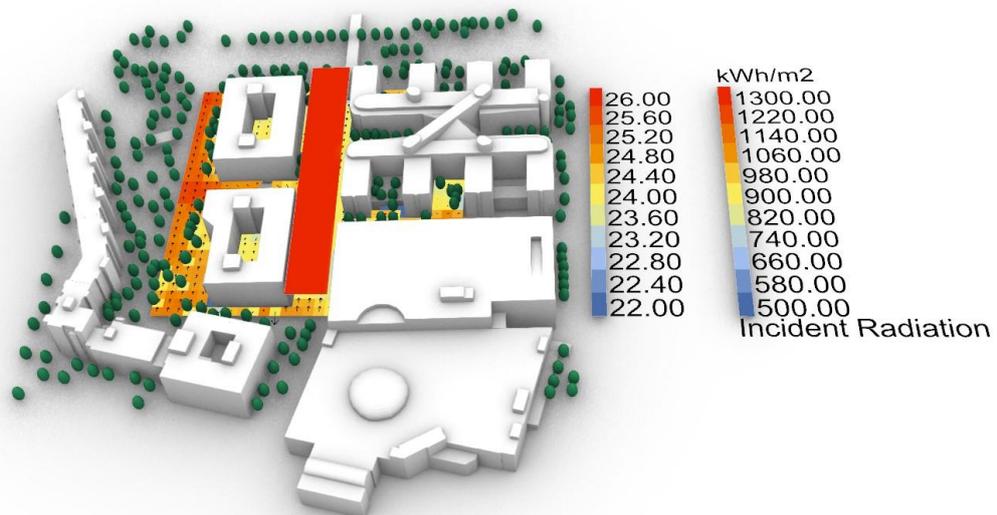


Abbildung 70 - Strahlungsanalyse 1b kumuliert; Überdachung 17,00 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Wie in Kapitel 1 „Einleitung“ (s. 1) beschrieben, ist das erklärte primäre Ziel der Untersuchung die Reduzierung der Überhitzungseffekte im Stadtgebiet. Die energetische Nutzung durch PV ist lediglich die zweite Priorität. Da sich in diesem Untersuchungsbereich die Überdachung in einer Höhe von 4,50 Metern als am wirksamsten in der Kühlung des

Straßenraums herausgestellt hat, soll mit dieser Konfiguration fortgefahren werden. Daraus resultiert eine jährliche kumulierte Energiemenge von 2.635.400 kWh auf der Überdachung. Bei einer Bestückung der Fläche mit monokristallinen PV-Paneelen mit einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von ca. 22 % (Kümpel, 2022) könnte man somit durch die Überdachung in einem Jahr ca. 579.788 kWh an elektrischer Energie generieren.

Wie bereits in Kapitel 3.1.1 „Wetterdaten“ (s. 30) beschrieben, ist die maximal mögliche Energiemenge einer optimal geneigten Fläche mit bis zu 1.600 kWh/m² deutlich höher als die einer waagerechten Fläche. Aus diesem Grund wurde eine weitere Untersuchung mit optimal ausgerichteten PV-Panelreihen durchgeführt. Wie die Abbildung 72 zeigt, erreicht die Überdachung trotz optimaler Ausrichtung an keiner Stelle das Optimum von 1.600 kWh/m². Dennoch übersteigt die Energiemenge an einigen Stellen das vorherige Optimum von 1.300 kWh/m² deutlich. Die Gesamtenergiemenge pro Jahr beträgt bei dieser Anordnung der Paneele 1.638.200 kWh. Dies entspricht zwar nur etwa 62 % der Gesamtenergiemenge der waagerechten Überdachung, benötigt durch den erweiterten Abstand zwischen den Panelreihen allerdings auch nur ca. 50 % der Module. Die Effizienz ist dementsprechend höher.

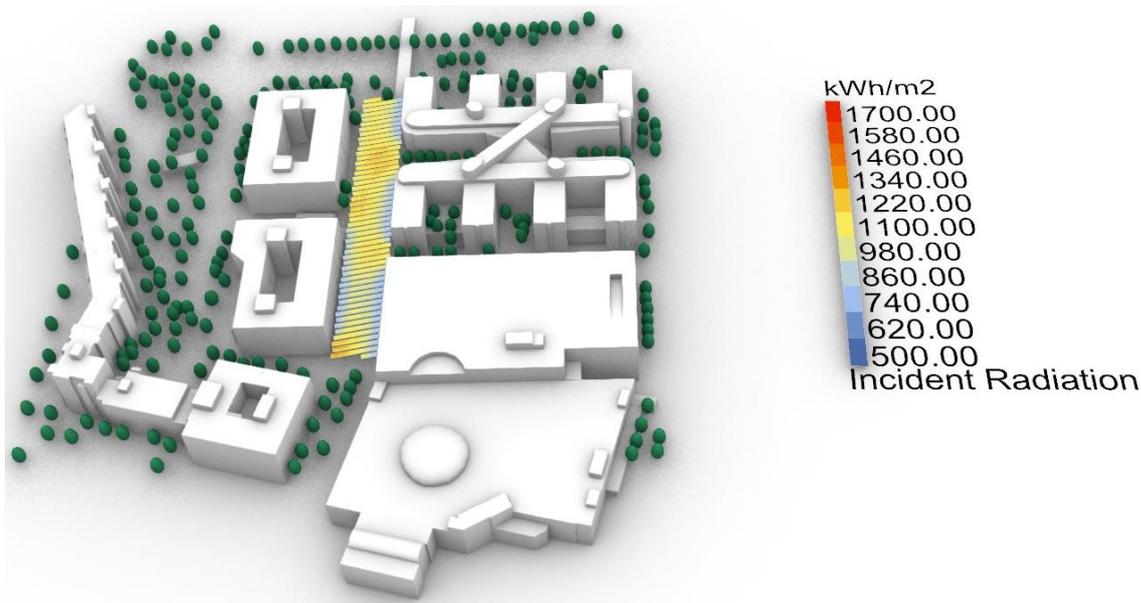


Abbildung 72 - Strahlungsanalyse 1b kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Da die verwendete Neigung der Paneele nur für den unverschatteten Bereich als optimal gilt, wurde eine weitere Untersuchung zur Optimierung des solaren Ertrags unternommen. Hierbei wurde jedes einzelne PV-Panel an seinem Installationsort für den meisten Energieertrag ausgerichtet. Die Abbildung 74 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung.

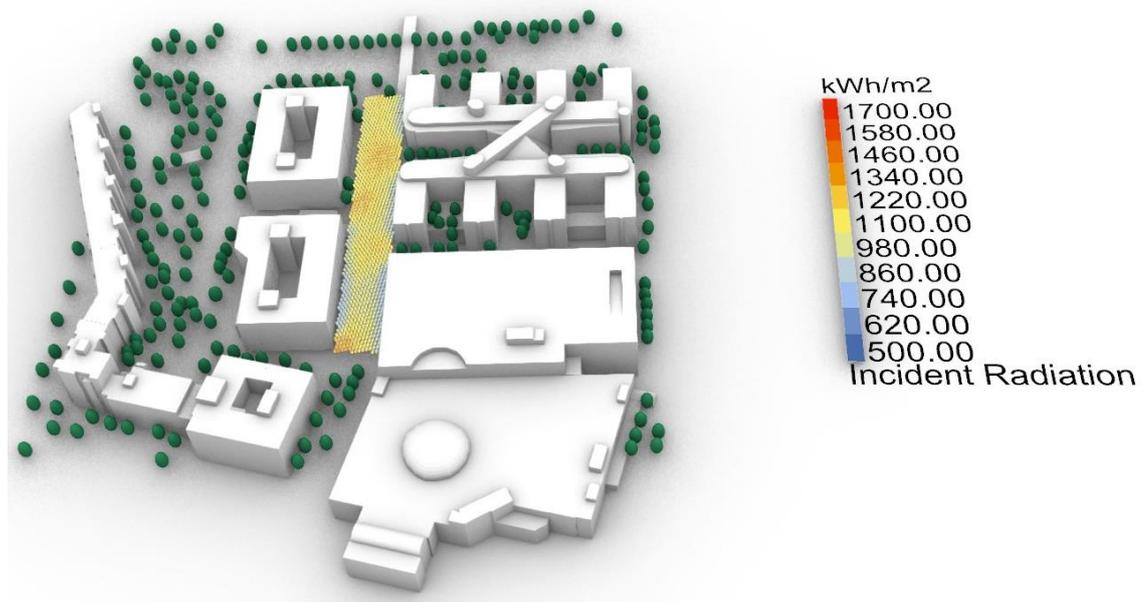


Abbildung 74 - Strahlungsanalyse 1b kumuliert; Überdachung 4,50 m einzeln Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

In dieser Konfiguration erreichen einige der Paneele das Maximum von 1.600 kWh/m², und auch generell kann nahezu jedes der Module durch die spezifische optimale Ausrichtung einen höheren Ertrag erzielen. Insgesamt ergibt sich in dieser Untersuchung eine Gesamtenergiemenge von 1.297.700 kWh für das gesamte Jahr. Dies entspricht in etwa 59 % des Ertrags der waagerechten Überdachung und damit 3 %p weniger als die einfach optimierte Ausrichtung. Jedoch mussten für die freie Schwenkbarkeit der Module ein seitlicher Abstand von 0,50 Metern zwischen den Modulen

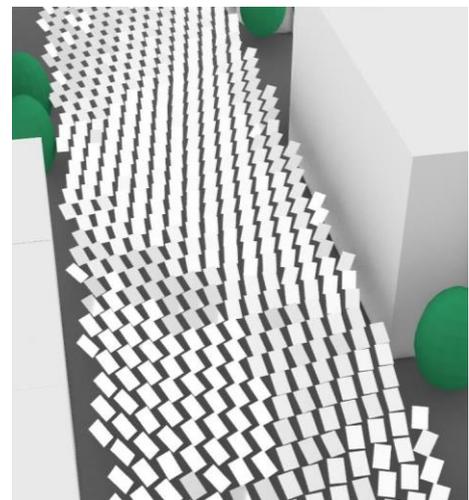


Abbildung 73 - Individuell ausgerichtete PV-Paneele (eigene Darstellung)

eingehalten werden (siehe Abbildung 73). Daher konnten in der Untersuchung im Vergleich zu waagerechten Anordnung nur ca. 36 % der Module verwendet werden, was 14 %p weniger ist als bei der einfach optimierten Überdachung. Die Effizienz ist somit erneut deutlich gestiegen. Im Vergleich zur einfach optimierten Konfiguration erreicht die individuelle Optimierung mit nur ca. 71 % der Module ca. 95 % der Energiemenge. Bei einer Verwendung von monokristallinen PV-Paneelen mit einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von ca. 22 % könnte man bei einer individuell optimierten Ausrichtung in einem Jahr ca. 285.494 kWh an elektrischer Energie generieren.

4.2.2. Untersuchungsbereich 1c

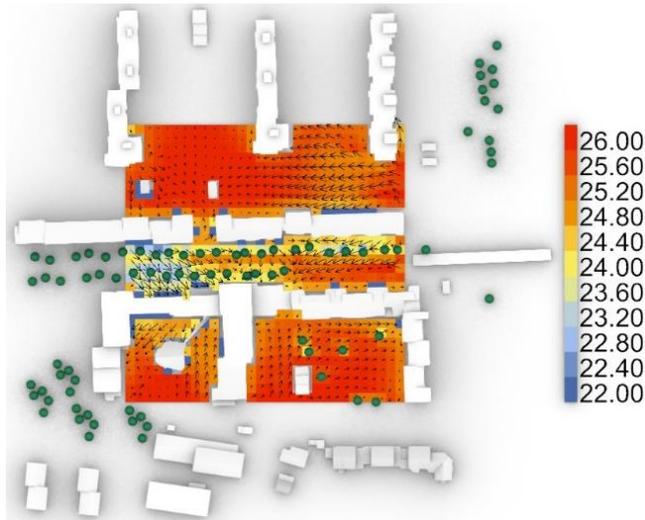


Abbildung 75 - UTCl-Analyse 1c; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die Abbildung 75 zeigt die Ausgangssituation des Untersuchungsbereichs 1c bei einer UTCl-Analyse im Zeitraum der wärmsten Woche über 24 Stunden am Tag. Die durchschnittliche UTCl-Temperatur schwankt zwischen 22,5 °C und 26 °C. In diesem Untersuchungsbe- reich lässt sich der große Einfluss der Luftbewegung auf die UTCl-Temperatur besonders eindrücklich beobachten. Die großen freien Flä- chen im Norden sind der größten

Hitze ausgesetzt. Die Temperatur sinkt allerdings merklich in den Bereichen, welche eine höhere Windgeschwindigkeit erkennbar an den längeren Vektorpfeilen aufweisen. Auch in der Straßenschlucht ist dieser Effekt erkennbar. Am westlichen Ende der Straße sind die Windgeschwindigkeiten relativ hoch. In Verbindung mit den Bäumen entstehen hier angenehm kühle Temperaturen. Am Ostende der Straßenschlucht, wo weniger Bäume zu finden und die Windgeschwindigkeiten geringer sind, sind die Temperaturen deutlich höher. Grundsätzlich gilt allerdings auch hier, dass die Temperaturen nahe Gebäuden geringer sind.

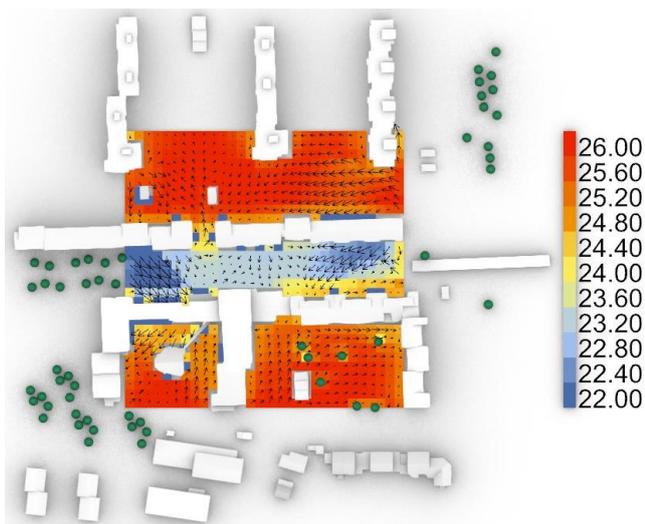


Abbildung 76 - UTCl-Analyse 1c; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Eine Überdachung in einer Höhe von 4,50 Metern sorgt auch in die- sem Untersuchungsbereich für eine deutliche Abkühlung der UTCl-Durchschnittstemperatur, wie die Abbildung 76 deutlich zeigt. Beson- ders die bereits in der Ausgangssi- tuation durch die stärkere Windge- schwindigkeit kühlen Stellen erfah- ren eine weitere deutliche Abküh- lung von 1 K bis 1,5 K auf ca. 22 °C. Der mittlere Bereich der Straße er- fährt die größte Abkühlung von bis

zu 2 K auf ca. 23 °C. Lediglich am Ostende der Straßenschlucht am Rande der südlichen

Fassade ist die Abkühlung deutlich geringer. Hier sind immer noch Durchschnittstemperaturen von bis zu ca. 24,5 °C möglich. Die Abkühlung beträgt somit vereinzelt unter 0,5 K. Dies lässt sich mit der regelmäßig vorspringenden Fassade erklären, an welche die Überdachung nicht bündig anschließt. Die Überdachung ist rechteckig modelliert und füllt die Rücksprünge der Gebäude nicht aus (siehe Abbildung 79). Die hochstehende Sonne in den Sommermonaten kann durch diese Lücken dringen und für eine Erwärmung des Bereiches vor dem Gebäude führen.

Die Abbildung 77 zeigt die Situation mit einer in 8,00 Metern Höhe angebrachten Überdachung. Die zuvor bei niedrigerer Überdachung beobachteten Effekte sind hier nochmals ausgeprägter. Entlang der südlichen Fassade der Straßenschlucht haben sich die Flächen mit höherer Temperatur ausgeweitet. Dies ist dadurch zu erklären, dass eine höher angebrachte Überdachung der leicht schräg stehenden Sonne mehr Raum bietet, durch die

Lücken zu dringen. Auch im Bereich des Durchgangs durch den nördlichen Blockrand bildet sich eine etwas erwärmte Fläche aus. Die im August morgens im Nordosten schon und abends im Nordwesten noch vergleichsweise hochstehende Sonne kann in diesem Bereich sogar im Norden durch die Lücke zu einer Erwärmung der im Bereich des Durchgangs führen.

Die Auswirkungen einer in 11,50 Metern angebrachten Überdachung auf die UTCI-Temperatur wird in der Abbildung 78 gezeigt. Wiederum zeigt sich deutliche eine weitere Verstärkung der Erwärmung in den Randbereichen der Straße. Im östlichen Teil ist bereits über die Hälfte der Fläche einer deutlichen Erwärmung ausgesetzt. Hier können die Temperaturen im Durchschnitt schon ca. 25 °C erreichen. Die in

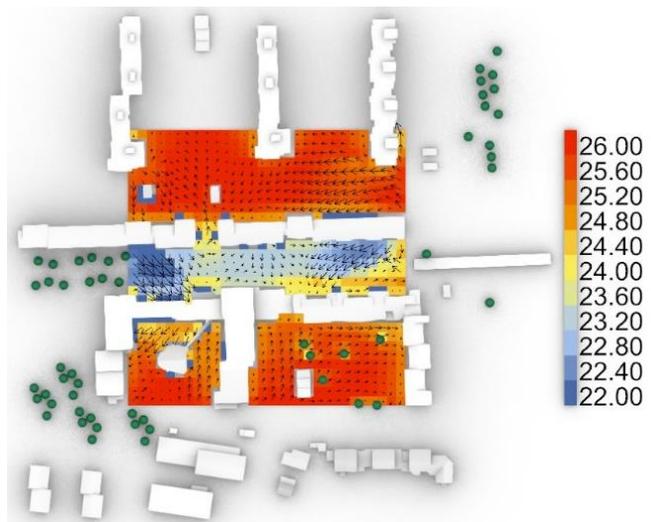


Abbildung 77 - UTCl-Analyse 1c; Überdachung 8,00 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

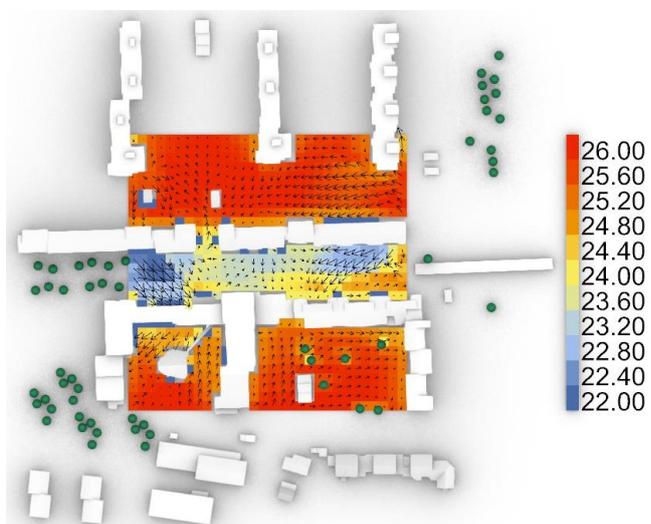


Abbildung 78 - UTCl-Analyse 1c; Überdachung 11,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

den Mittagsstunden intensivste Strahlung gelangt an diesen Stellen direkt in den Straßenraum. Selbst die hohen Windgeschwindigkeiten im westlichen Bereich der Straßenschlucht können die gestiegenen Temperaturen nur noch teilweise kompensieren.

In der Analyse des Untersuchungsbereichs 1c stellte sich die niedrigste mögliche Überdachung von 4,50 Metern als für die Kühlung des Straßenraums am effektivsten heraus. Aus diesem Zweck wird im nächsten Schritt das Potenzial einer energetischen Nutzung der Überdachung durch die Bestückung mit PV-Paneelen untersucht.

Die Abbildung 79 zeigt das Ergebnis dieser Analyse. Es ist deutlich zu sehen, dass sich diese Überdachung sehr gut für die Nutzung mit PV-Paneelen eignet. Ein großer Teil der Fläche kann den maximalen möglichen Ertrag von 1.300 kWh/m² erzielen. Lediglich am südlichen Rand der Überdachung ist ein Bereich zu erkennen, welchen lediglich ca. 900 kWh/m² Energie erreicht. Im mittleren Bereich der Straße wirft das etwas höher Gebäude zusätzlich einen merklichen Schatten auf die Überdachung, welcher sich in der Reduzierung der Energiemenge auf ca. 600 kWh/m² bemerkbar macht. Insgesamt erreicht die Überdachung eine Gesamtenergiemenge von 3.508.500 kWh. Ohne Verschattung wäre mit dieser Fläche eine Energiemenge von 4.253.775 kWh und damit rund 21 % mehr möglich gewesen.

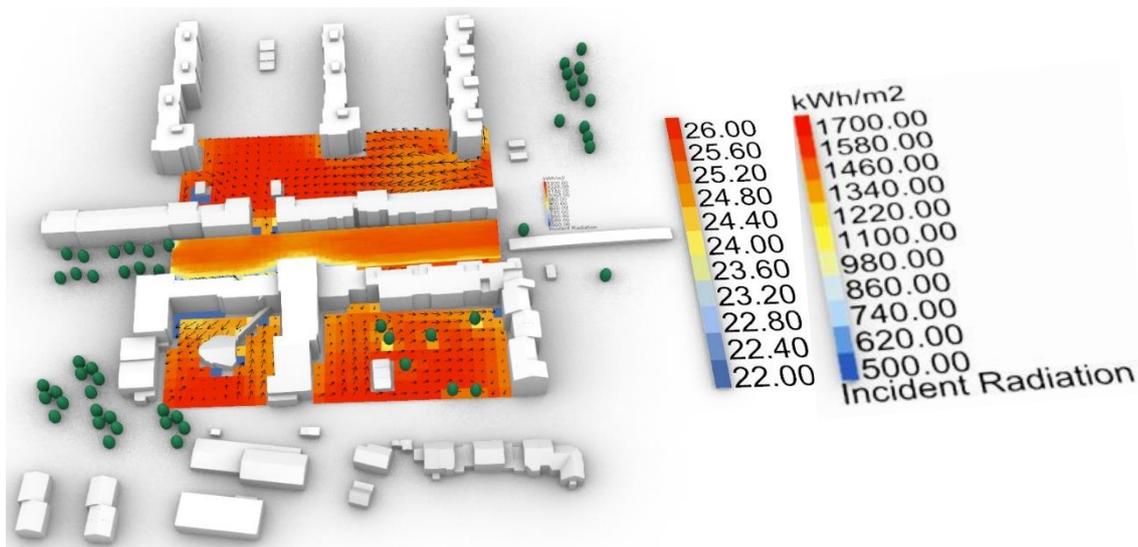


Abbildung 79 - Strahlungsanalyse 1c kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die Optimierung der Ausrichtung der Paneele in Abbildung 80 zeigt, dass sich die Erträge in nahezu allen Bereichen der Überdachung erhöhen konnten. Lediglich die in der Mitte der Straßen vom südlichen, höheren Gebäude verschatteten Bereiche erreichen keine höheren Erträge. Jedoch erreichen auch nur wenige Bereiche das den Maximalwert von 1.600 kWh/m². Somit erreicht die Überdachung mit der optimierten Ausrichtung eine Gesamtenergiemenge von 2.145.300 kWh im Untersuchungs-jahr. Dies entspricht

ca. 61 % der Energiemenge einer waagerechten Überdachung bei ca. 50 % des Flächenbedarfs.



Abbildung 80 - Strahlungsanalyse 1c kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Bei einer Bestückung mit monokristallinen PV-Paneelen mit einem Wirkungsgrad von 22 % könnte eine waagerechte Überdachung in einem Jahr somit ca. 771.870 kWh an elektrischer Energie erzeugen. Die Variante mit optimierter Ausrichtung könnte ca. 471.966 kWh Strom produzieren.

4.2.3. Untersuchungsbereich 2a

Die Ausgangssituation im Untersuchungsbereich 2a, welche in der Abbildung 81 dargestellt ist, zeigt erneut den deutlichen Einfluss der Luftbewegung. In den von Bäumen verschatteten sowie mit starken Luftbewegungen versehenen Bereichen bleiben die durchschnittlichen UTCI-Temperaturen bei ca. 22 °C, während sie auf Freiflächen mit moderater Luftbewegung auf bis zu 26 °C ansteigen. Dieser Effekt verstärkt sich zusätzlich in der Nähe von Gebäudefassaden.

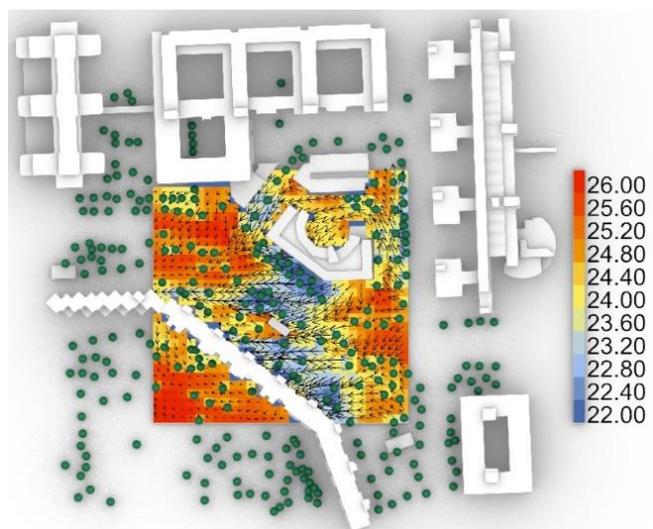


Abbildung 81 - UTCI-Analyse 2a; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Im halbrunden Hof des nördlich der Straße gelegenen Gebäudes sind trotz der Abwesenheit von Bäumen lediglich Temperaturen von ca. 24 °C zu beobachten.

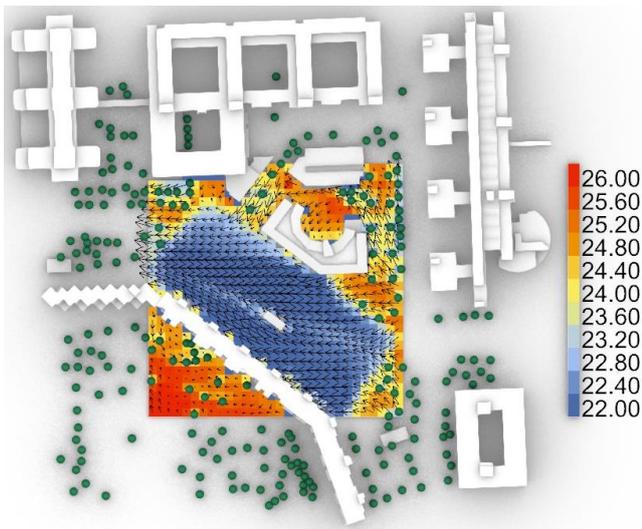


Abbildung 82 - UTCI-Analyse 2a; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

In der Abbildung 82 sieht man deutlich den Schattenwurf der rechteckigen Überdachung in 4,50 Metern Höhe. Nahezu der komplette Bereich unter der Überdachung erfährt eine drastische Reduzierung der durchschnittlichen UTCI-Temperatur auf 22 °C bis 22,5 °C. Dabei haben Bereiche mit einer geringeren Luftgeschwindigkeit wie beispielsweise im Windschatten des kleinen Bauwerks in der Mitte der überdachten Fläche eine leicht höhere Temperatur als ihre Umgebung. Auch am nördlichen Eck der Überdachung steigen die Temperaturen an. Hier ist von einem Einfall von direkter solarer Strahlung aus Westen auszugehen. Ein ähnlicher Effekt, wenn auch nicht so ausgeprägt, lässt sich an der östlichen Ecke der Überdachung erkennen.

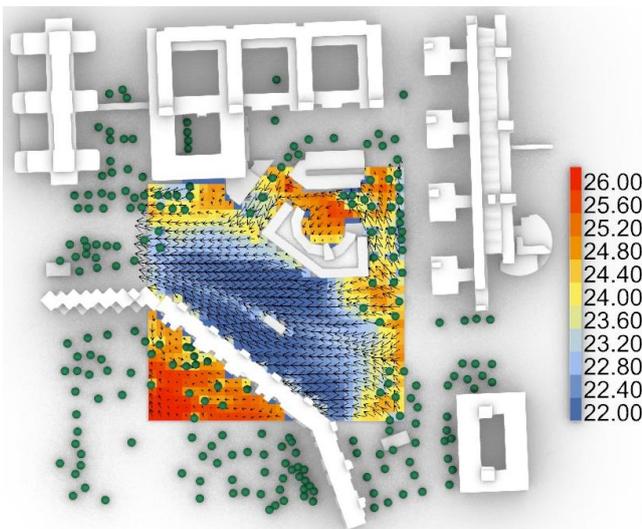


Abbildung 83 - UTCI-Analyse 2a; Überdachung 14,00 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Dieser Effekt verstärkt sich deutlich bei einer Erhöhung der Überdachung auf 14,00 Meter, wie in der Abbildung 83 zu sehen ist. Die Form der Überdachung ist dadurch deutlich weniger scharf zu erkennen. Während sich am Rande der südlichen Gebäude kaum eine Veränderung bemerkbar macht, ist der Abkühlungseffekt an der nördliche Spitze der Überdachung bereits deutlich zurückgegangen. Auch an der östlichen Spitze der Überdachung steigen die Temperatur im Vergleich zur niedrigeren Überdachung merklich und erreichen bereits Temperaturen von ca. 24,5 °C. Weder im Osten noch im Westen sind unmittelbar Gebäude vorhanden, welche die morgendliche und abendliche Sonne verschatten könnten.

Auch bei einer weiteren Erhöhung der Überdachung auf 23,50 Meter (siehe Abbildung 84), was der Bebauungshöhe der südlichen Gebäude entspricht, verändert sich der Kühleffekt am Rand der flankierenden Bebauung nur marginal. Lediglich in den östlichen und westlichen Randbereichen ist eine Erhöhung festzustellen. Auch der Kernbereich des überdachten Straßengrabs profitiert immer noch deutlich von dem kühlenden Effekt der Über-

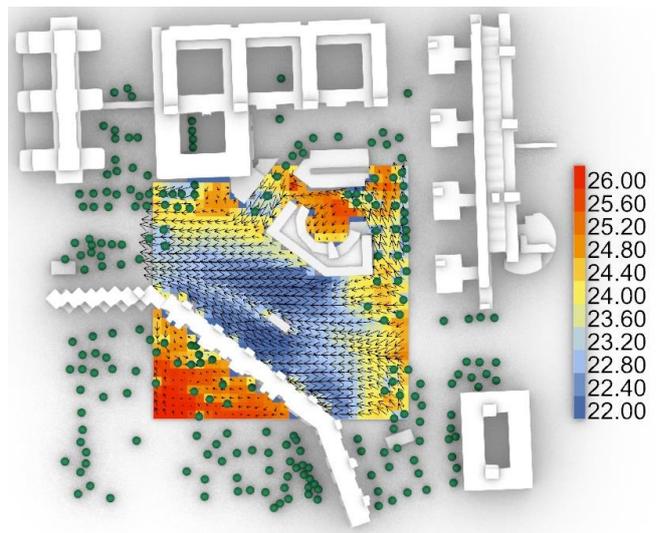


Abbildung 84 - UTCI-Analyse 2a; Überdachung 23,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

dachung. Jedoch weitet sich die erwärmte Fläche im Nordwesten sowie im Nordosten weiterhin deutlich aus. Durch die deutlich höher angebrachte Überdachung kann die direkte Sonneneinstrahlung deutlich mehr der Fläche erreichen, welche unter der Überdachung liegt. Im Bereich der Ecken der Überdachung kann die direkte Solarstrahlung sogar von beiden Seiten den Bereich unter der Überdachung erreichen. Somit ist eine noch deutlich höhere Erwärmung der Fläche möglich.

In der Analyse des Untersuchungsbereichs 2a stellte sich die niedrigste mögliche Überdachung von 4,50 Metern als für die Kühlung des Straßenraums am effektivsten heraus. Aus diesem Zweck wird im nächsten Schritt das Potenzial einer energetischen Nutzung der Überdachung durch die Bestückung mit PV-Paneelen untersucht.

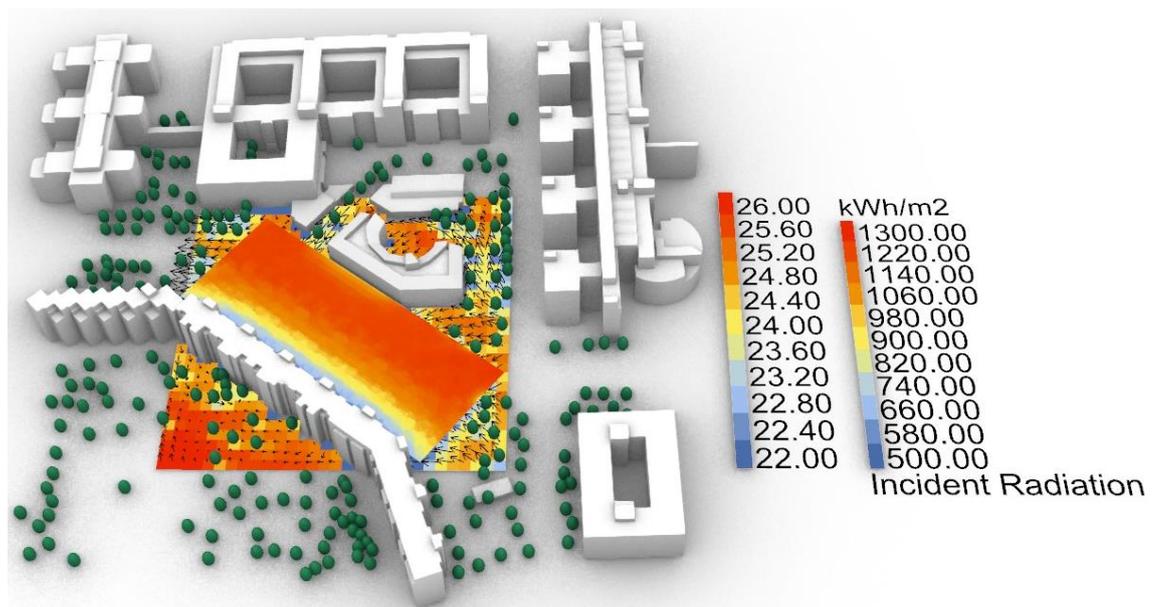


Abbildung 85 - Strahlungsanalyse 2a kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die Abbildung 85 zeigt die Energiemenge, welche durch das Auftreffen von direkter und indirekter solarer Strahlung auf der Überdachung über das Untersuchungsjahr zu erwarten ist. Es ist deutlich zu sehen, dass ein großer Teil der Fläche die maximal mögliche Energiemenge von 1.300 kWh/m² umsetzen kann. Jedoch zeigt sich auch deutlich, dass die Verschattung durch die südlich angrenzenden Gebäude einen signifikanten Effekt auf die Energiemenge auf der Südseite der Überdachung haben. Direkt an der Bebauungsgrenze wird kaum mehr als 500 kWh/m² an Energie umgesetzt und auch noch weiter mittig ist die Verschattung deutlich erkennbar. Auch am nördlichen Rand der Überdachung ist im Bereich des nördlich anschließenden Gebäudes ein schmaler Rand von der Verschattung dieses Gebäudes betroffen. Dieser ist aber im Vergleich nahezu vernachlässigbar. Der gesamte Energieertrag auf der Überdachungsfläche beläuft sich über das Untersuchungsjahr auf 8.701.400 kWh. Eine unverschattete Fläche dieser Größe könnte ca. 10.796.279 kWh, also ca. 24 % mehr an Energie umsetzen.

Auch in diesem Fall wurde die Ausrichtung der PV-Paneele für einen größeren Ertrag optimiert simuliert. Die Abbildung 86 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung. Auch hier ist die Verschattung ausgelöst von den die Straße flankierenden Gebäude im Süden als auch im Norden deutlich zu erkennen. Jedoch erreichen die Paneele auf der nördlichen Hälfte der Überdachung deutlich höhere Erträge als bei einer waagerechten Überdachung. Insgesamt erreicht die Überdachung in der optimierten Konfiguration eine Gesamtenergiemenge im Untersuchungsjahr von 5.375.100 kWh, was bei ca. 50 % des Flächenbedarfs ca. 62 % der Energiemenge der waagerechten Überdachung entspricht.

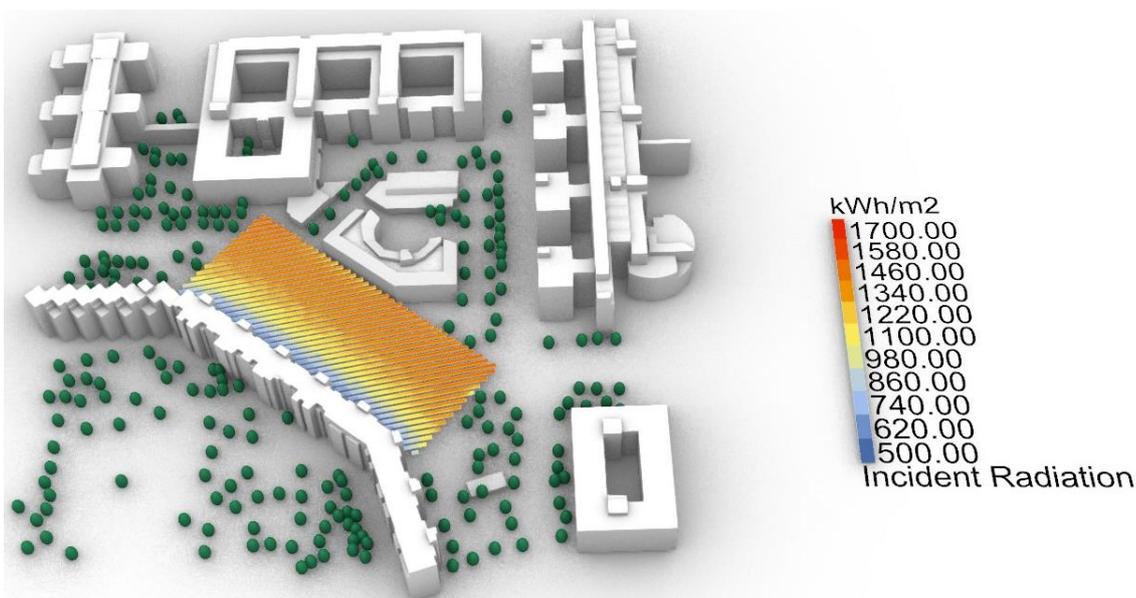


Abbildung 86 - Strahlungsanalyse 2a kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Bei einer Bestückung mit monokristallinen PV-Paneelen mit einem Wirkungsgrad von 22 % könnte eine waagerechte Überdachung in einem Jahr somit ca. 1.914.308 kWh an

elektrischer Energie erzeugen. Die Variante mit optimierter Ausrichtung könnte ca. 1.182.522 kWh Strom produzieren.

4.2.4. Untersuchungsbereich 2b

Die Abbildung 87 zeigt die Ausgangssituation des Untersuchungsbereichs 2b. Die zu überdachende Straße in diesem Untersuchungsbereich ist in großen Teilen ohne die Verschattung durch Bäume angelegt. Jedoch kommt es hier im Untersuchungszeitraum der wärmsten Woche zu starker Luftbewegung, weshalb die durchschnittlichen UTCI-Temperaturen etwas geringer sind als auf einer vergleichbaren

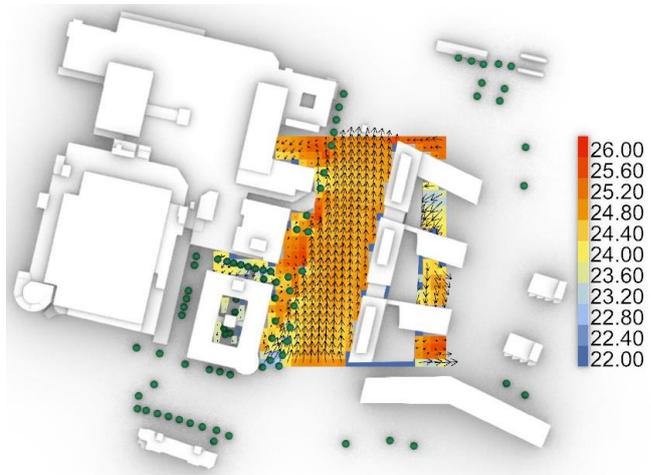


Abbildung 87 - UTCI-Analyse 2b; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Fläche ohne Luftbewegung. Die Temperaturen schwanken zwischen ca. 22,5 °C in den Höfen und Gassen und ca. 26 °C an den unverschatteten Flächen mit geringer Luftbewegung. Im zu überdachenden Bereich kann eine Temperatur von ca. 24,5 °C beobachtet werden.

In der Abbildung 88 ist die Auswirkung einer in 4,50 Metern Höhe angebrachten Überdachung auf die durchschnittlichen UTCI-Temperaturen der Straßenschlucht im Untersuchungsbericht 2b in der wärmsten Woche dargestellt. Die Temperaturen unter der Überdachung sinken universell deutlich auf ca. 22 °C bis 22,5 °C. Lediglich ganz am nördliche und am südlichen Rand der Überdachung ist der Kühleffekt etwas geringer.

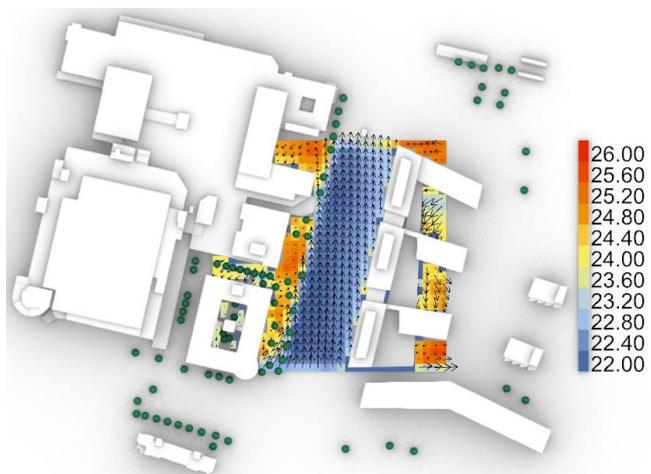


Abbildung 88 - UTCI-Analyse 2b; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Auch sind die Temperaturen nahe der östlichen Bebauung etwas höher, was mit der etwas niedrigeren Windgeschwindigkeit in diesem Bereich korreliert. Die Temperaturen im nicht verschatteten Bereich sind von der Überdachung unbeeinträchtigt.

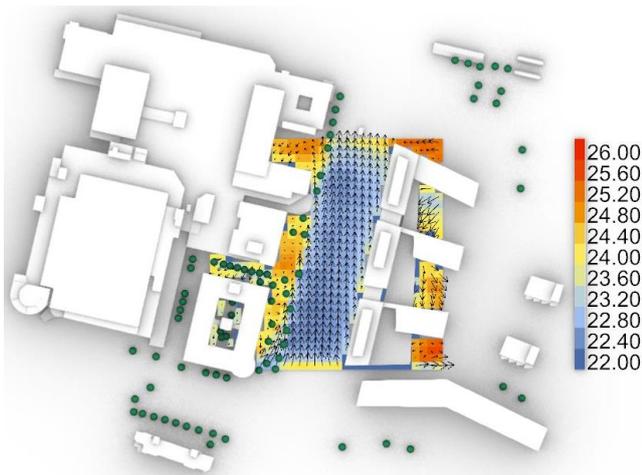


Abbildung 89 - UTCl-Analyse 2b; Überdachung 12,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Bei einer Überdachung in einer Höhe von 12,50 Metern zeigt sich das in Abbildung 89 dargestellte Bild. Im gesamten Bereich der Überdachung ist eine leichte Erwärmung der UTCl-Temperatur um ca. 0,5 K zu erkennen. Zusätzlich sind die wärmeren Bereiche am Nord- und Südende der Überdachung ausgeprägter als noch bei der niedrigeren Überdachung. Vor allem an der nordöstlichen Ecke der Überdachung ist eine deutliche Erwärmung festzustellen. Hier kann die morgens im Osten stehende Sonne durch ihre noch etwas flacheren Einfallswinkel für eine Erwärmung sorgen, da es im Osten durch die seitlich einmündende Straße keine Verschattung in dieser Richtung gibt.

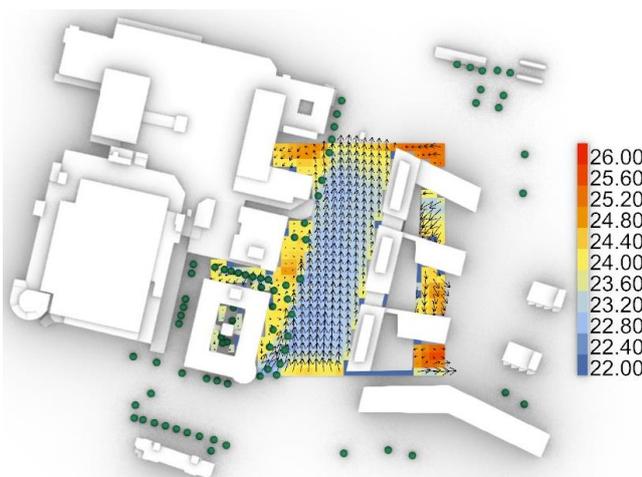


Abbildung 90 - UTCl-Analyse 2b; Überdachung 20,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Dieselbe Situation mit einer Überdachung in einer Höhe von 20,50 Metern zeigt die Abbildung 90. Die gesamte verschattete Fläche erwärmt sich in etwa um weitere 0,5 K. Die leichte Erwärmung durch die geringeren Luftgeschwindigkeiten am Rande der östlichen Bebauung sind nach wie vor unverändert vorhanden sowie die Erwärmung der Flächen unter dem Süd- und Nordende der Überdachung. Auch an diesen

beiden Stellen beträgt die Erhöhung der durchschnittlichen UTCl-Temperatur ca. 0,5 K

Auch in der Analyse des Untersuchungsbereichs 2b stellte sich die niedrigste mögliche Überdachung von 4,50 Metern als für die Kühlung des Straßenraums am effektivsten heraus. Aus diesem Zweck wird im nächsten Schritt das Potenzial einer energetischen Nutzung der Überdachung durch die Bestückung mit PV-Paneelen untersucht.

Wie in der Abbildung 91 zu sehen ist, hat die östliche Bebauung den größten Einflussfaktor auf die durch solare Einstrahlung auf die Überdachung treffende Energiemenge. Im östlichen Randbereich ist diese deutlich geringer als auf dem Rest der Überdachung. Dies liegt nicht nur daran, dass die Bebauung im Gegensatz zu der im Westen direkt an die Überdachung angrenzt, sondern auch an der leichten Neigung der Straße und Bebauung in die Nordost- bzw. Südwest-Richtung. Wie in Kapitel 3.1.1 „Wetterdaten“ (s. 30) beschrieben, ist die größte Energiemenge durch solare Einstrahlung aus einer leichten Südsüdost-Richtung zu erwarten. Die Bebauung verschattet dadurch besonders effektiv. Auf der Westseite erfolgt die einzige Verschattung durch die angrenzenden Bäume, welche ihr Blattwerk über die Überdachung hängen lassen. Ansonsten ist die Energiemenge auf der Ostseite deutlich größer als auf der Ostseite und erreicht sogar die Maximalmenge von 1.300 kWh/m². Insgesamt erreicht die waagerechte Überdachung eine Gesamtenergiemenge über das Untersuchungsjahr von 6.346.200 kWh von den bei dieser Größe möglichen 8.317.350 kWh, was etwa 31 % weniger entspricht.

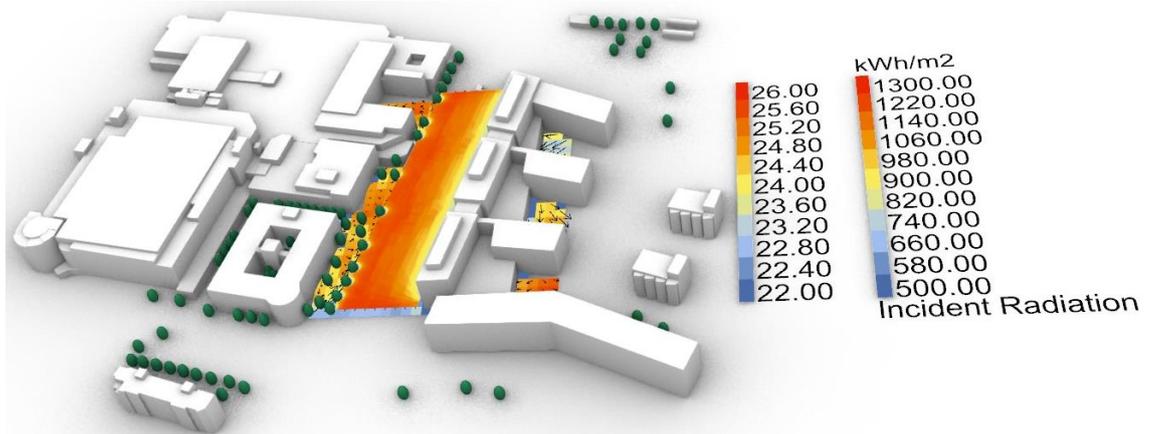


Abbildung 91 - Strahlungsanalyse 2b kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

In der optimierten Konfiguration der Paneele ist die Verschattung der östlichen Bebauung noch deutlicher zu sehen (siehe Abbildung 92). Auch macht die Neigung der Paneeleihen das oben geschilderte Problem nochmals deutlich. Auf der Westseite jedoch ist bis auf die der Bäume nahezu keine Verschattung zu bemerken. Hier ist die eintreffende Energiemenge durch die Optimierung der Anordnung noch einmal höher als in der waagerechten Ausrichtung. Bei einem Einsatz von nur etwa der Hälfte der Fläche kommt die Überdachung mit optimierter Anordnung der Paneele auf 3.928.000 kWh, was ca. 62 % der Energiemenge der waagerechten Überdachung entspricht.

Bei einer Bestückung mit monokristallinen PV-Paneele mit einem Wirkungsgrad von 22 % könnte eine waagerechte Überdachung in einem Jahr somit ca. 1.396.164 kWh an elektrischer Energie erzeugen. Die Variante mit optimierter Ausrichtung könnte ca. 864.160 kWh Strom produzieren.

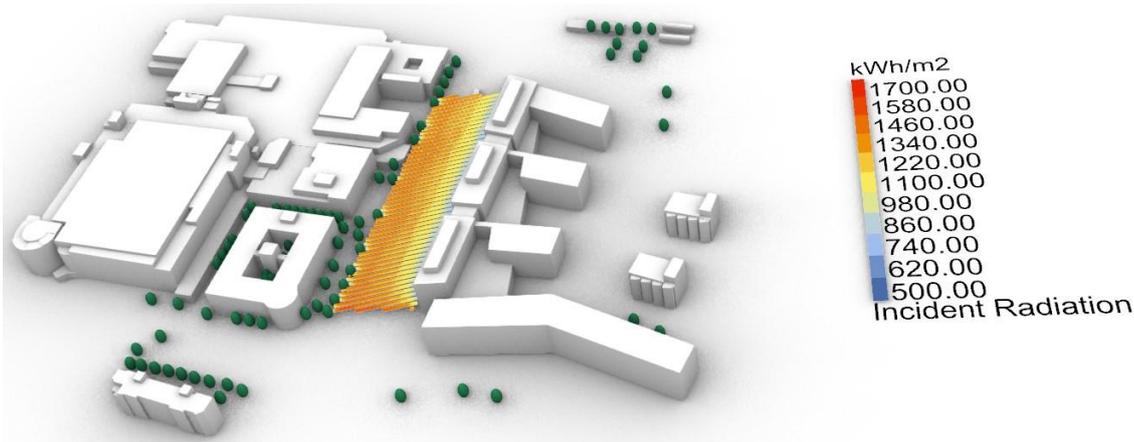


Abbildung 92 - Strahlungsanalyse 2b kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

4.2.5. Untersuchungsbereich 2c

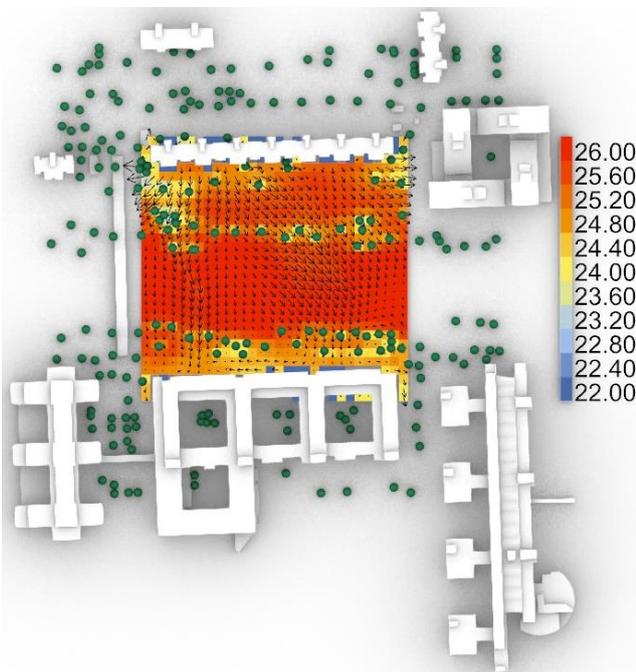


Abbildung 93 - UTCl-Analyse 2c; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die Ausgangssituation des Untersuchungsbereichs 2c, dargestellt in der Abbildung 93, zeigt eine in großem Maße sehr stark erwärmte Freifläche. Der größte Teil dieser Freifläche ist, wie in Kapitel 3.2.1 „Untersuchungsgebiet“ (s. 39) gezeigt, mit der großen Hauptzubringerstraßen von Neuperlach belegt, weshalb der thermische Komfort in einem großen Teil des Gebiets keine übergeordnete Rolle spielt. Der im Norden entlang der Straße verlaufende Fußweg würde eine lokale Verschattung in gewisser Weise rechtfertigen, jedoch belegt

dieser nur einen Bruchteil der Fläche. Dennoch soll die Untersuchung der Systematik entsprechend durchgeführt werden, da sie trotz allem stellvertretend für andere Situationen in ähnlicher Konfiguration stehen kann. Außerdem ist das energetische Nutzungspotenzial dieser Fläche vermutlich sehr hoch, was die Untersuchung zusätzlich rechtfertigt.

Die untersuchte Fläche erfährt ein Spektrum der durchschnittlichen UTCl-Temperatur von 23,5 °C bis zu 26 °C. Die geringeren Temperaturen entstehen vor allem in den von Bäumen verschatteten Bereichen und nahe der Fassaden der angrenzenden Bebauung. Der größte Teil der Fläche ist allerdings unverschattet und selbst die teilweise hohen Windgeschwindigkeiten können die Temperaturen kaum verringern.

Das Einbringen einer Überdachung in einer Höhe von 4,50 Metern verändert die Situation drastisch. Die Abbildung 94 zeigt dieses Szenario. Der kühlende Effekt der Überdachung zeigt sich direkt durch eine Absenkung der UTCI-Temperatur auf 22 °C bis 24,5 °C. Vor allem dicht an der Fassade der nördlichen Bebauung sowie in der Mitte der Freifläche ist die Abkühlung, unterstützt durch die höheren Windgeschwindigkeiten signifikant. Am linken und rechten Rand der Überdachung ist die Abkühlung am geringsten. Hier sind deutlich die Auswirkungen der unter

der Überdachung scheinenden morgendlichen und abendlichen Sonne zu erkennen. Außerdem kommt es in den Randbereichen zu geringeren Windgeschwindigkeiten, was den Kühleffekt etwas abmildert. Die Luftverwirbelung auf der Westseite der überdachten Fläche sorgt auch noch bis in die zentralen Bereiche der Freifläche für langsamere Luftgeschwindigkeiten.

Die Abbildung 95 zeigt die Veränderung bei einer Anbringung der Überdachung auf einer Höhe von 12,75 Metern. Bis auf den Bereich an der nördlichen Fassade, welcher noch immer bei ca. 22 °C UTCI-Temperatur liegt, hat sich die gesamte Fläche um etwa 0,5 K erwärmt. In den östlichen und westlichen Randbereichen werden sogar bereits wieder Temperaturen von rund 25 °C gemessen. Man sieht deutlich, wie die hohen Windgeschwindigkeiten die UTCI-Temperatur um teilweise über 1 K verändert, was zu sehr starken

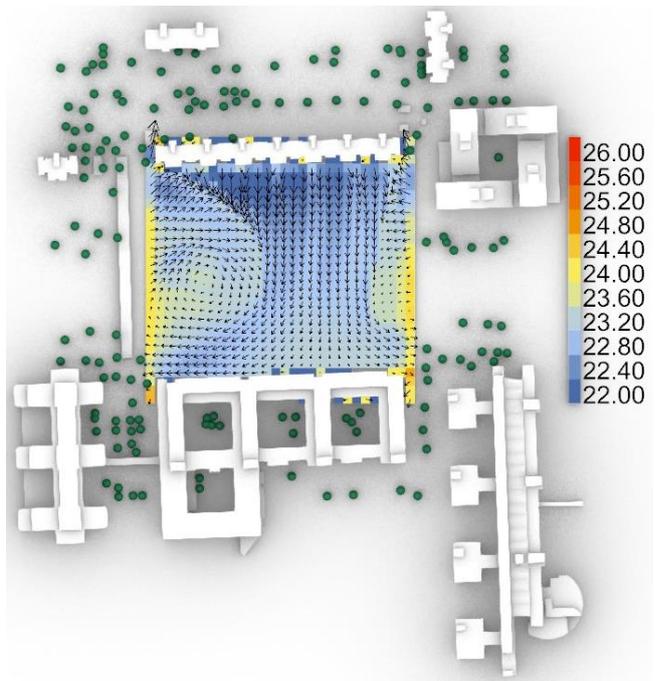


Abbildung 94 - UTCI-Analyse 2c; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

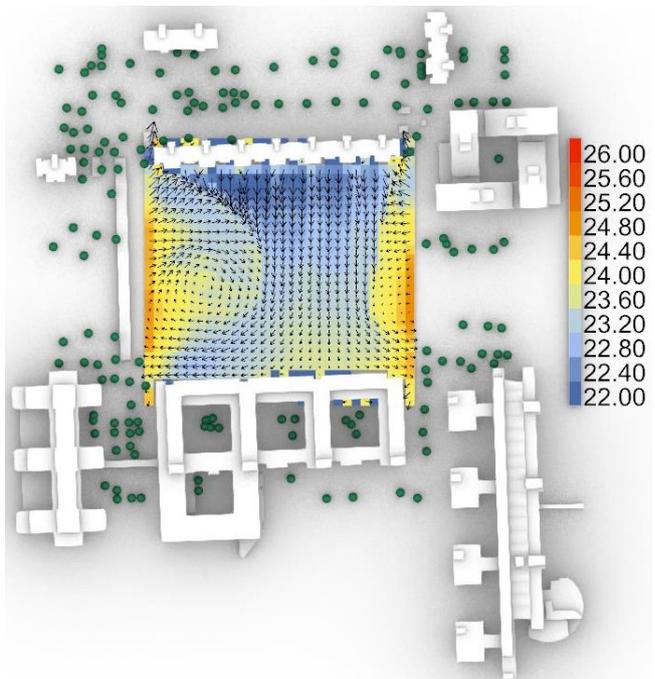


Abbildung 95 - UTCI-Analyse 2c; Überdachung 12,75 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Temperaturwechseln innerhalb weniger Meter führen kann.

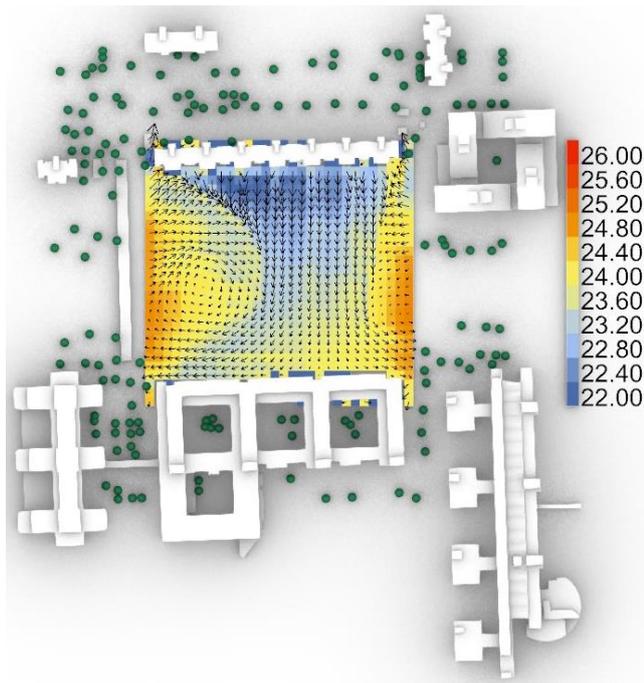


Abbildung 96 - UTCI-Analyse 2c; Überdachung 21,00 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die Veränderung der Überdachung auf eine Höhe von 21 Meter stellt sich als nicht sehr gravierend heraus. Die Abbildung 96 zeigt, dass die allgemeine Erhöhung der UTCI-Temperatur im Vergleich zum Wechsel der Überdachungshöhe von 4,50 Meter auf 12,75 Meter deutlich geringer ausfällt. In den meisten Bereichen erwärmt sich der Bereich nur um ca. 0,2 K. Interessanterweise bleiben die Temperaturen am Rande der nördlichen Bebauung deutlich weniger von der allgemeinen Erwärmung beeinflusst als der Rest der Fläche. Lediglich di-

rekt an der Fassade der Bebauung erfolgt durch die Erhöhung der Überdachung eine leichte Erwärmung. Im Bereich der östlichen und westlichen Kante der Überdachung ist deutlich zu sehen, wie die direkte solare Einstrahlung durch die größere Höhe der Überdachung weiter unter diese eindringen kann.

Wiederum zeigt sich in der Analyse des Untersuchungsbereichs 2b, dass die niedrigste mögliche Überdachung von 4,50 Metern als für die Kühlung des Straßenraums am effektivsten herausstellt. Aus diesem Zweck wird im nächsten Schritt das Potenzial einer energetischen Nutzung der Überdachung durch die Bestückung mit PV-Paneelen untersucht.

Die deutliche Verschattung der Überdachung durch das im Süden stehende Gebäude zeigt sich klar in der Abbildung 97. Hier kann nur eine signifikant geringere Energiemenge durch direkte und diffuse solare Einstrahlung die Überdachung erreichen. Auch die nördliche Bebauung sowie das im Nordosten stehende Gebäude zeigt einen deutlichen Schattenwurf auf die Überdachung, was sich in einer geringeren auftreffenden Energiemenge niederschlägt. Jedoch erfährt der gesamte mittlere Teil bis fast an den äußersten nördlichen Rand der Überdachung eine sehr hohe auftreffende Energie. In den meisten Bereichen der Überdachung wird der maximal mögliche Wert von 1.300 kWh/m² erreicht, was das im Vorhinein vermutete sehr gute Potenzial dieser Überdach-

ung zu energetischen Nutzung bestätigt. Dies erklärt auch den enormen Wert von insgesamt 20.137.000 kWh, welcher über das gesamte Untersuchungsjahr auf der Überdachung umgesetzt wird. Ohne Verschattung könnte diese Fläche eine Energiemenge von 22.946.102 kWh umsetzen, was lediglich 14 % mehr entspricht.

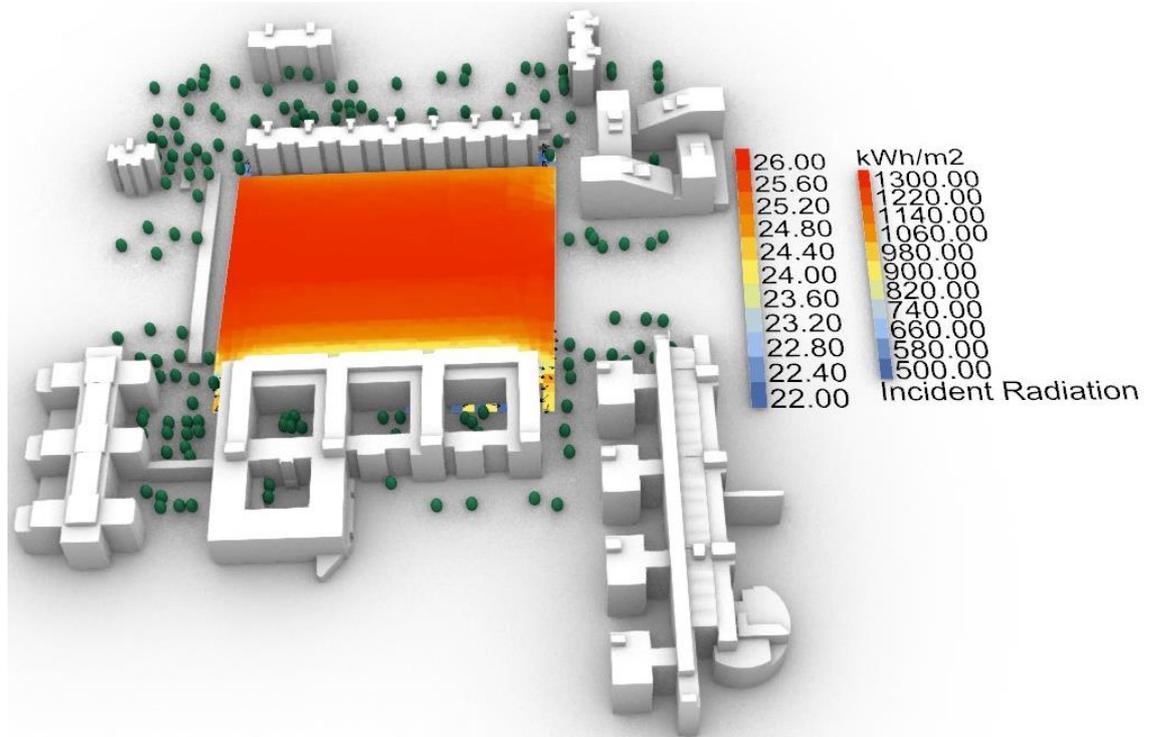


Abbildung 97 - Strahlungsanalyse 2c kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Auch in der optimierten Konfiguration, dargestellt in der Abbildung 98, ist die Verschattung der Südseite deutlich erkennbar und beeinträchtigt die volle Ausschöpfung der maximalen Energiemenge. Die Verschattung der Bebauung im Norden fällt allerdings durch die Anstellung der Paneele in eine Südausrichtung sehr viel weniger stark ins Gewicht. Umso deutlicher zeigt sich allerdings die Verschattung durch das nordöstliche Gebäude, welches den Ertrag der nordöstlichen Ecke der Überdachung limitiert. Insgesamt erreicht die optimierte Konfiguration der Überdachung eine über das gesamte Jahr kumulierte Gesamtenergiemenge von 12.647.000 kWh bei nur etwa der Hälfte der eingesetzten Fläche, was ca. 63 % der Energiemenge der waagerechten Überdachung entspricht.

Bei einer Bestückung mit monokristallinen PV-Paneele mit einem Wirkungsgrad von 22 % könnte eine waagerechte Überdachung in einem Jahr somit ca. 4.430.140 kWh an elektrischer Energie erzeugen. Die Variante mit optimierter Ausrichtung könnte ca. 2.782.340 kWh Strom produzieren.

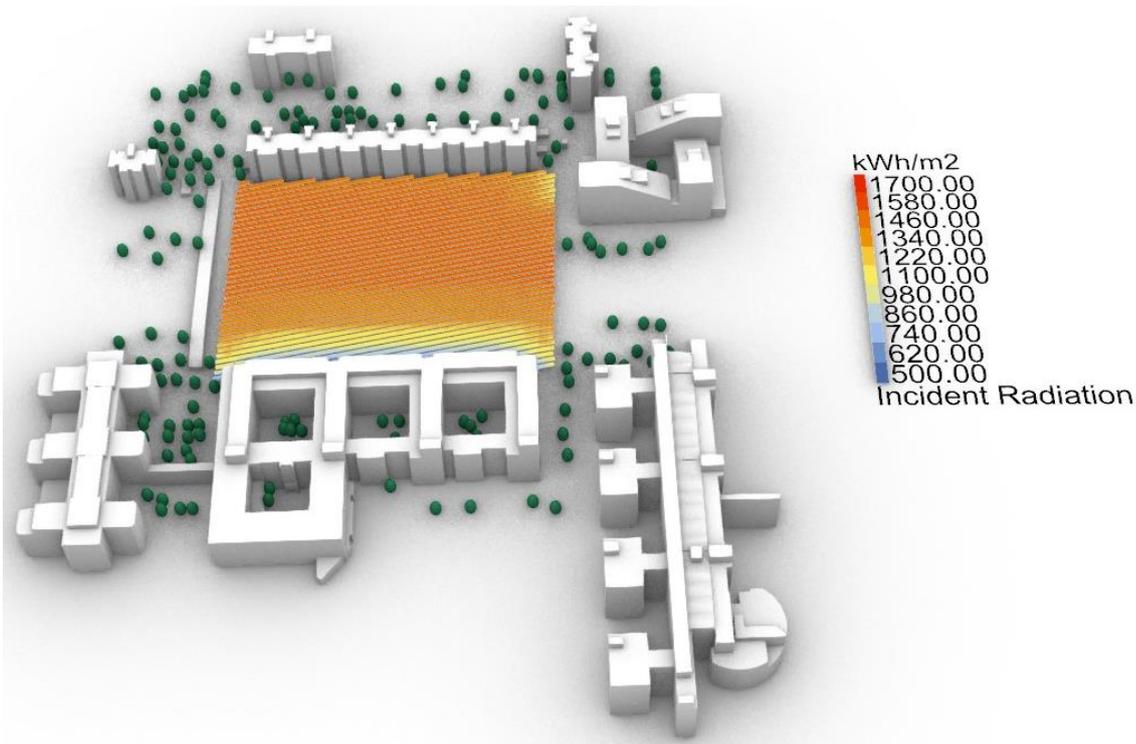


Abbildung 98 - Strahlungsanalyse 2c kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

4.2.6. Untersuchungsbereich 2d

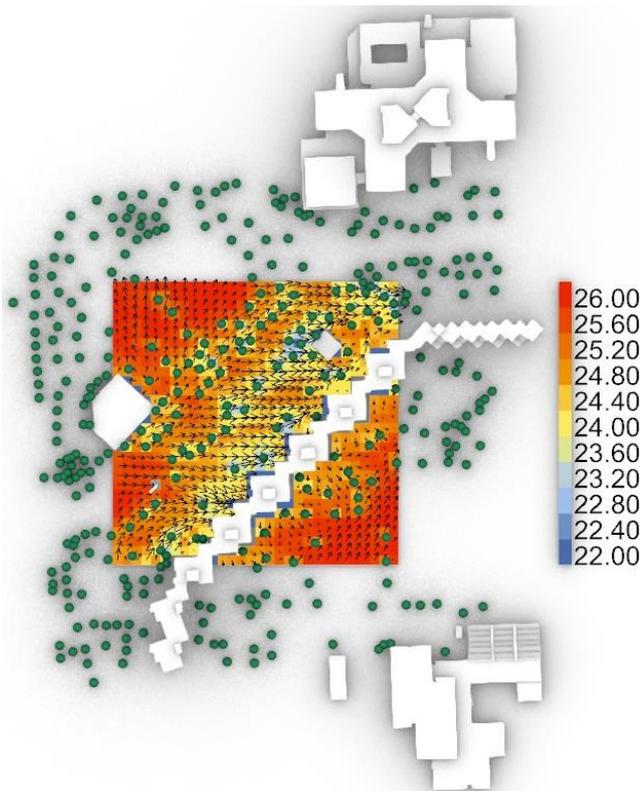


Abbildung 99 - UTCI-Analyse 2d; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Der Untersuchungsbereich 2d ist erneut geprägt von teilweise sehr starken Windgeschwindigkeiten im Bereich der Straßenschlucht, wie die Abbildung 99 zeigt. Außerdem bieten einige Bäume lokale Verschattung, welche einen signifikanten Einfluss auf die UTCI-Temperatur hat. Grundsätzlich sind im Untersuchungsbereich Temperaturen von 22,5 °C bis 26 °C zu finden, wobei zweitens vor allem in jenen Bereichen ohne Verschattung und außerhalb der Straßenschlucht wie ganz im Nordwesten und im Südosten sowie am Westende der Straßenschlucht auftreten. Direkt an der Fassade der südlichen Bebauung

sind deutlich tiefere Temperaturen von ca. 24 °C bis 24,5 °C zu erkennen. In den Berei-

chen, die zusätzlich mit Bäumen verschattet sind, oder in Bereichen mehrerer aneinander stehender Bäume kann die durchschnittliche Temperatur sogar unter 23 °C fallen. Auch die im Bereich der Straßenschlucht hohen Windgeschwindigkeiten sorgen für Abkühlung der durchschnittlichen UTCI-Temperatur. In unverschatteten Bereichen kann allein der Wind zu einer Senkung der Temperatur von 1,5 K bis 2 K sorgen.

Die Abbildung 100 zeigt die deutliche Veränderung der durchschnittlichen UTCI-Temperatur durch die Installation einer Überdachung in 4,50 Meter Höhe. Der „Abdruck“ der Überdachung durch die veränderte Temperatur ist deutlich und scharf zu erkennen. Zusätzlich ist die Veränderung der Luftbewegung deutlich sichtbar. Diese ist durch die Entfernung der Bäume im überdachten Bereich deutlich gleichgerichteter und homogener. Dies führt auch zu einer sehr homogenen Temperatur von ca. 22 °C unter der Überdachung. Lediglich im Windschatten der südwestlich angrenzenden Bäume und im Bereich der etwas geringere Windgeschwindigkeit im Südosten der Überdachung sind die Temperaturen etwa 0,5 K höher. Zusätzlich kommt es durch den veränderten Luftstrom im Norden des Untersuchungsbereichs außerhalb des verschatteten Bereichs zu einer stärkeren durchschnittlichen Windgeschwindigkeit und somit zu einer Verringerung der Temperatur im Vergleich zur Ausgangssituation.

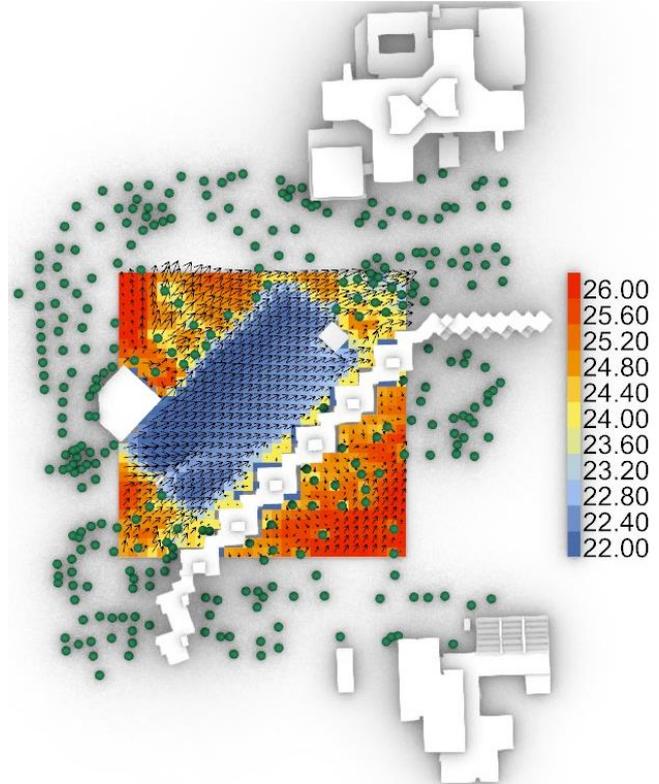


Abbildung 100 - UTCI-Analyse 2d; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

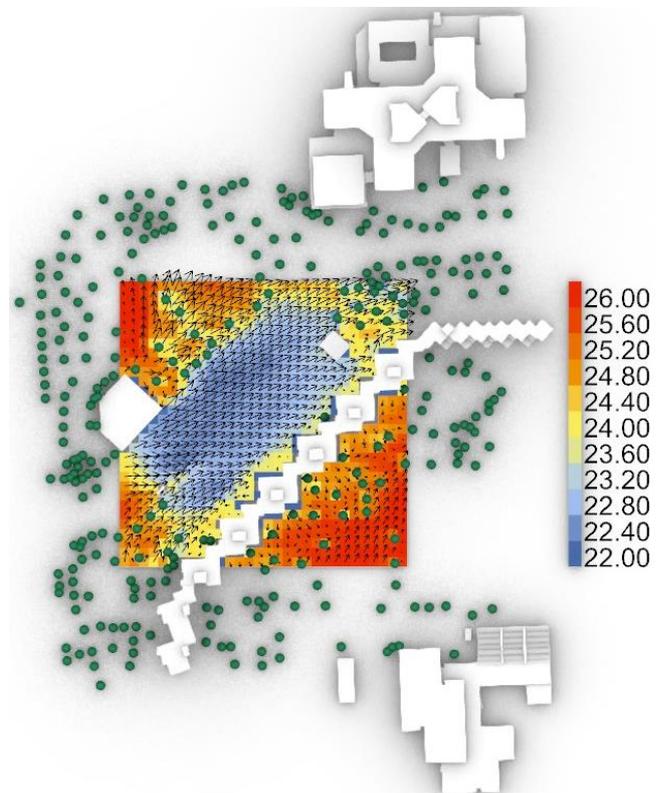


Abbildung 101 - UTCI-Analyse 2d; Überdachung 13,00 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die Veränderung der Überdachungshöhe auf 13,00 Meter verändert die UTCI-Temperatur im Untersuchungsbereich nur marginal. Die Abbildung 101 zeigt, dass sich die durchschnittliche Temperatur unter der Überdachung ganzflächig um ca. 0,5 K hebt. Zusätzlich sind die nordwestliche sowie die südöstliche Ecke der Überdachung nicht mehr so scharf in der Temperaturveränderung zu erkennen. Dies liegt erneut an der durch die Erhöhung der Überdachung verursachten, weiter unter den überdachten Bereich dringenden direkten solaren Strahlung.

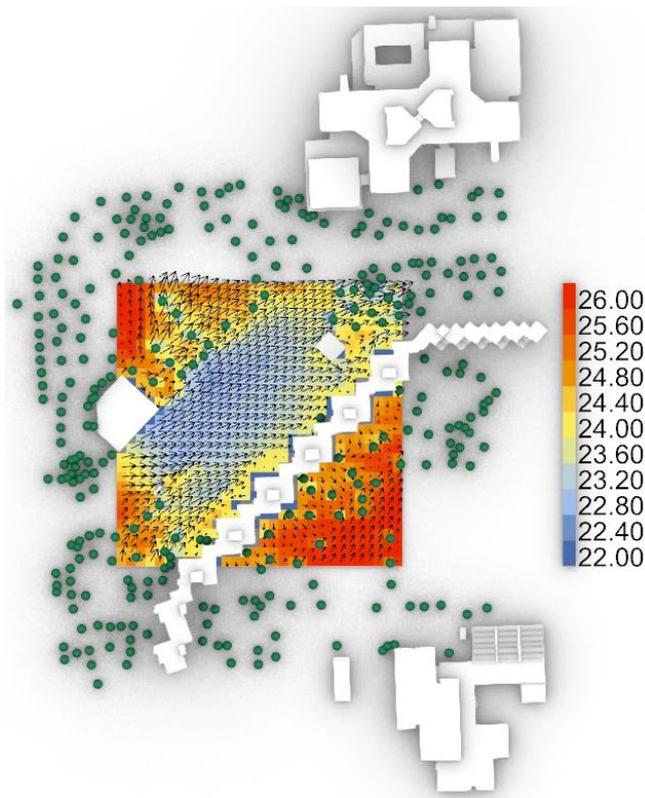


Abbildung 102 - UTCI-Analyse 2d; Überdachung 21,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die in der Abbildung 102 gezeigte weitere Erhöhung der Überdachung auf 21,50 Meter verstärkt die oben genannten Effekt noch einmal. Die durchschnittliche UTCI-Temperatur unter der Überdachung steigt abermals um ca. 0,5 K und an der westlichen und östlichen Kante der Überdachung verschiebt sich der kühlende Effekt durch die schräg einfallende Sonne weiter nach innen. Besonders an der östlichen Kante ist der Effekt deutlich verstärkt zu beobachten, da dieser durch die zackige Fassade der westlichen Bebauung verstärkt wird.

Auch die Analyse des Untersuchungsbereichs 2b zeigt, dass die niedrigste mögliche Überdachung von 4,50 Meter als für die Kühlung des Straßenraums am effektivsten ist. Aus diesem Zweck wird im nächsten Schritt das Potenzial einer energetischen Nutzung der Überdachung durch die Bestückung mit PV-Paneelen untersucht.

Wie bereits in den Strahlungsanalysen des vorherigen Untersuchungsbereichs festgestellt, ist eine Verschattung aus südöstlicher Richtung störend für die energetische Nutzung der Überdachung. Dies lässt sich auch in diesem Fall in der Abbildung 103 feststellen. Die Verschattung der südöstlichen Bebauung ist deutlich durch die auf der Überdachung eintreffenden Energiemenge zu erkennen. Das Ausmaß der Verschattung ist allerdings durch die zackige Fassadenkonstruktion deutlich geringer, als es bei einer gerade entlang der Überdachung verlaufenden Bebauung derselben Höhe sein könnte. Der Rest der Überdachung wird nahezu vollständig mit der maximalen Energiemenge

von 1.300 kWh/m² bestrahlt. Die nordwestliche Bebauung hat keinen Einfluss auf die auf der Überdachung eintreffende Energiemenge. Auch eine höhere Bebauung, welche der Systematik wegen eigentlich in dieser Kategorie vorhanden sein müsste, hätte keine nennenswerte Verschattung bewirkt. Dies wurde in einer separaten Untersuchung belegt. Auf der Überdachungsfläche konnte über das Untersuchungsjahr eine eintreffende Gesamtenergiemenge von 8.392.200 kWh festgestellt werden. Dies entspricht 17 % weniger als die 9.781.387 kWh, welche ohne Verschattung möglich gewesen wären.

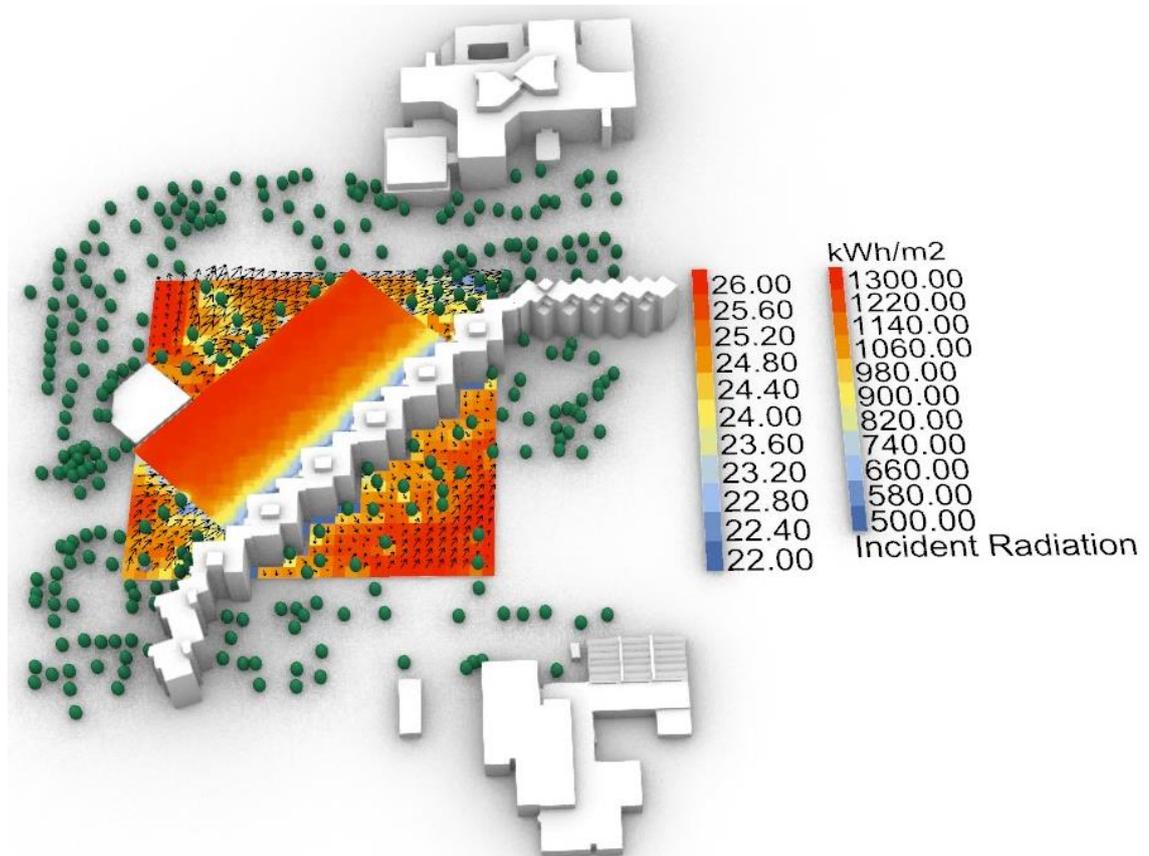


Abbildung 103 - Strahlungsanalyse 2d kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Auf die optimierte Konfiguration der Überdachung, welche in der Abbildung 104 analysiert wurde, scheint die Verschattung der südlichen Bebauung trotz der zackenförmigen Konstruktion einen größeren Einfluss zu haben. Derjenige Teil der Verschattung, welcher eine deutlich geringere Menge an Energie einfängt, ist deutlich ausgeprägter als bei der waagerechten Verschattung. Insgesamt erreicht die Überdachung in dieser Ausführung eine Gesamtenergiemenge von 5.092.200, was in etwa 61 % der Energiemenge der waagerechten Überdachung bei ca. 50 % der Fläche entspricht.

Bei einer Bestückung mit monokristallinen PV-Paneelen mit einem Wirkungsgrad von 22 % könnte eine waagerechte Überdachung in einem Jahr somit ca. 1.846.284 kWh an elektrischer Energie erzeugen. Die Variante mit optimierter Ausrichtung könnte ca. 1.120.284 kWh Strom produzieren.

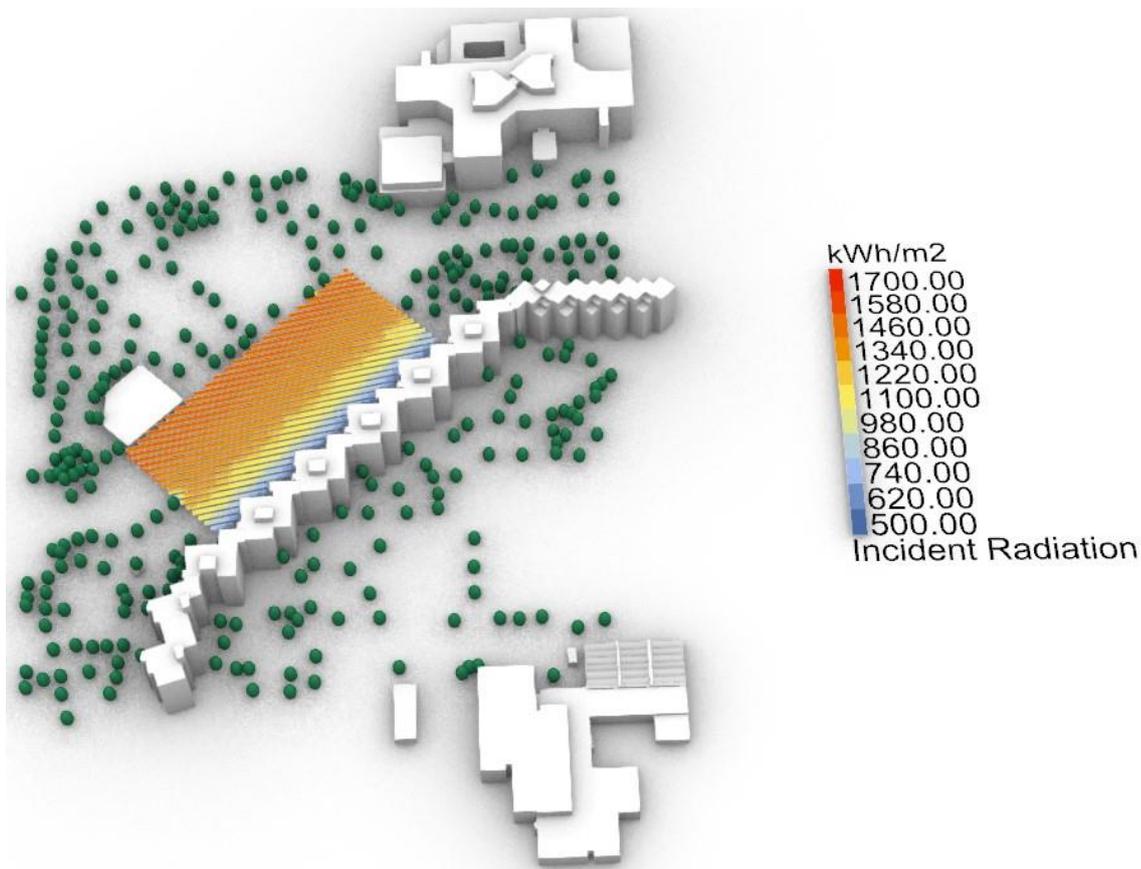


Abbildung 104 - Strahlungsanalyse 2d kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

4.2.7. Untersuchungsbereich 3a

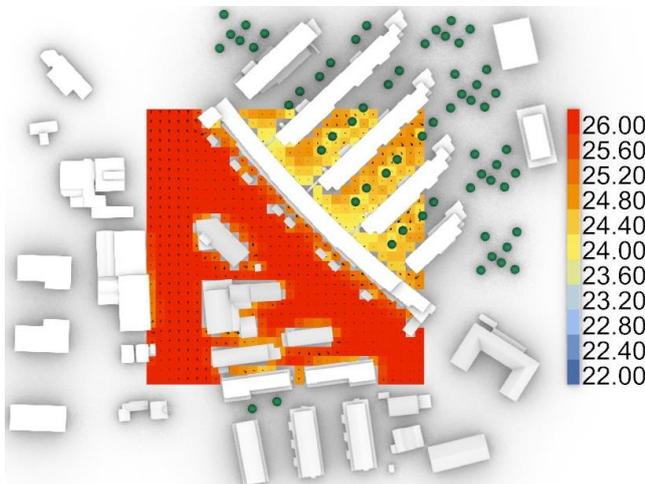


Abbildung 105 - UTCI-Analyse 3a; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die Abbildung 105 zeigt die UTCI-Analyse der Ausgangssituation des Untersuchungsbereichs 3a. Die untersuchte Straßenschlucht hat nahezu gänzlich eine durchschnittliche UTCI-Temperatur von 26 °C. Lediglich nahe der Gebäude im südwestlichen Bereich sowie besonders zwischen den Zeilenbauten im nordöstliche Bereich des Untersuchungsbereichs sind geringere Temperaturen von 24 °C bis 25 °C

zu beobachten. Dies ist nicht nur auf den stärkeren Verschattungseffekt von Bebauung auf der Südostseite zurückzuführen, sondern auch auf die Verschattung durch Bäume zwischen den Gebäudezeilen. Die Windgeschwindigkeit ist im gesamten Untersuchungsbereich ehr gering und hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Durchschnittstemperatur.

Da die Straßenschlucht im Untersuchungsbereich sehr viel weniger breit ist als in den vergangenen Analysen, ist auch die in der Abbildung 106 simulierte Überdachung vergleichsweise schmal. Dies hat einen direkten Einfluss auf die durchschnittliche UTCI-Temperatur unter der Überdachung, da nicht über die gesamte Länge der Überdachung ein kühler Kernbereich eingehalten werden konnte. In diesem Kernbereich

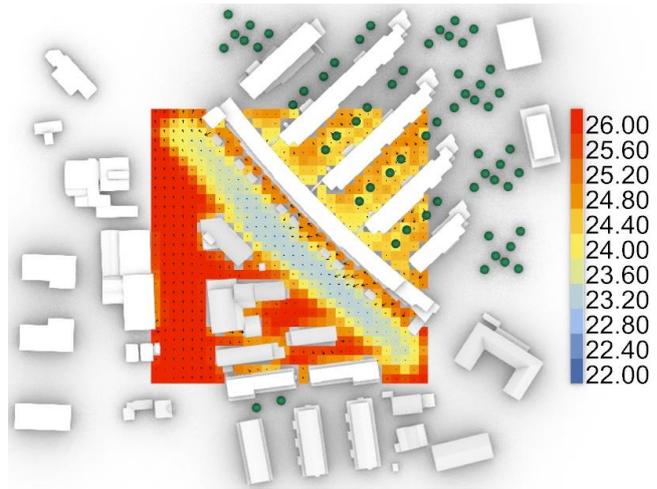


Abbildung 106 - UTCI-Analyse 3a; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

konnte die Überdachung eine Senkung der Temperatur von ca. 3 K erreichen. Dies ist allerdings nur in denjenigen Bereichen möglich, welche von beiden Seiten mit Bebauung flankiert sind. Am südöstlichen Ende sowie im nordwestlichen Teil der Überdachung ist der Kühlungseffekt deutlich geringer, da hier die schräg stehende Sonne bereits bei dieser geringen Überdachungshöhe unter selbige dringen kann. Bei dieser schmalen Überdachung kann dadurch bereits bei geringer Überdachungshöhe der Kernschattenbereich stark verkleinert werden.

Die Abbildung 107 zeigt die UTCI-Analyse bei einer Überdachung in einer Höhe von 9,50 Metern. Wie auch schon in den vorangegangenen Analysen zu sehen erwärmt sich die gesamte überdachte Fläche signifikant bei einer Erhöhung der Überdachung. In diesem Fall zeigt sich erneut deutlich, dass bei einer schmalen Überdachung die schräg einfallende solare Strahlung sehr schnell den gesamten über-

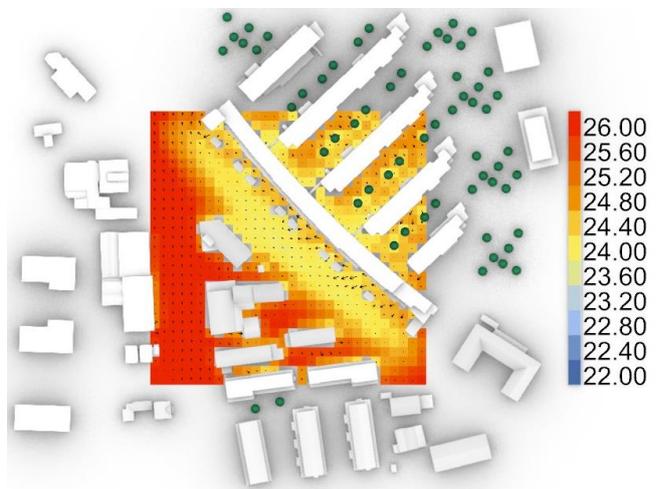


Abbildung 107 - UTCI-Analyse 3a; Überdachung 9,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

dachten Bereich erreichen und erwärmen kann. Das südliche sowie das nördliche Ende der Überdachung hat bei dieser Höhe bereits beinahe wieder dieselbe Temperatur wie ohne Verschattung erreicht.

In der Analyse des Untersuchungsbereichs 3a stellte sich die niedrigste mögliche Überdachung von 4,50 Metern als für die Kühlung des Straßenraums am effektivsten heraus.

Aus diesem Zweck wird im nächsten Schritt das Potenzial einer energetischen Nutzung der Überdachung durch die Bestückung mit PV-Paneelen untersucht.

Die Strahlungsanalyse, deren Ergebnis in der Abbildung 108 dargestellt ist, zeigt, dass die nördliche Bebauung wie bereits in Kapitel 3.2.1 „Untersuchungsgebiet“ (s. 39) vermutet, trotz der Systematik entsprechend zu hoher Bebauung keinen Einfluss auf die Verschattung der Überdachung hat. Lediglich die Bebauung im Süden sorgt am äußersten Rand der Überdachung für ein kleines Einknicken der eintreffenden Energiemenge. Insgesamt erreicht die Überdachung über das Untersuchungsjahr eine Gesamtenergiemenge von 5.075.800 kWh, was nur ca. 10 % weniger als die maximal mögliche 5.561.313 kWh auf dieser Fläche ist.

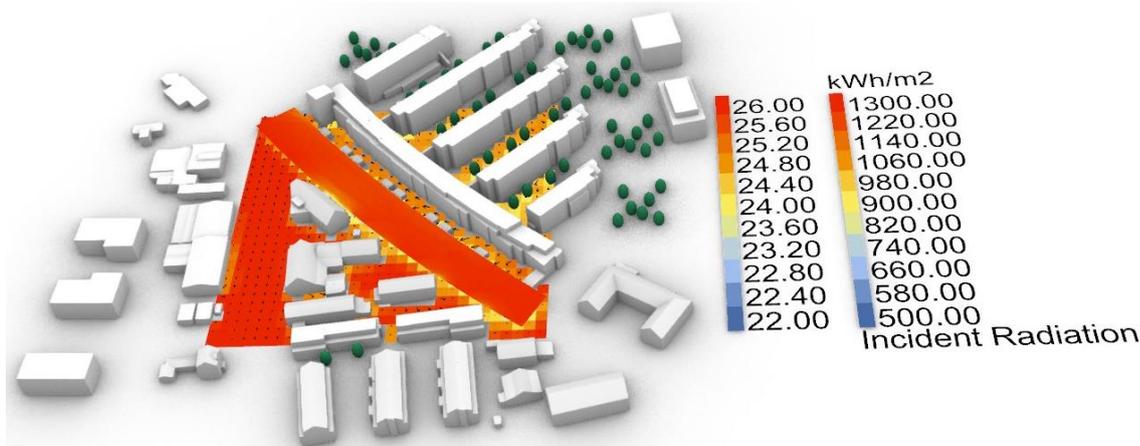


Abbildung 108 - Strahlungsanalyse 3a kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Interessanterweise zeigt die Abbildung 109 in der optimierten Konfiguration einen größeren Einfluss der Bebauung auf der Westseite der Überdachung auf den Energieertrag. Jedoch profitiert ein Großteil der Paneelreihen von der optimierten Ausrichtung. Insgesamt kommt die Überdachung in dieser Ausführung auf eine Gesamtenergiemenge von 3.274.100 kWh, was bei einem Flächeneinsatz von nur ca. 50 % eine Energiemenge von ca. 65 % im Vergleich zu waagerechten Überdachung entspricht.

Bei einer Bestückung mit monokristallinen PV-Paneelen mit einem Wirkungsgrad von 22 % könnte eine waagerechte Überdachung in einem Jahr somit ca. 1.116.676 kWh an elektrischer Energie erzeugen. Die Variante mit optimierter Ausrichtung könnte ca. 720.302 kWh Strom produzieren.

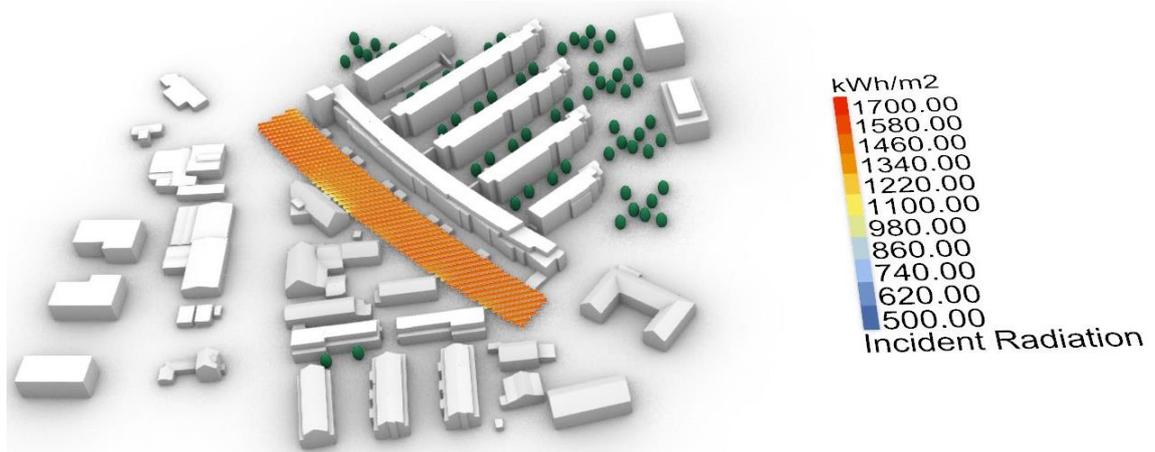


Abbildung 109 - Strahlungsanalyse 3a kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

4.2.8. Untersuchungsbereich 3b

Die Abbildung 110 zeigt die Ausgangssituation des Untersuchungsbereichs 3b in der UTCI-Analyse. Die durchschnittlichen Temperaturen schwanken hier zwischen ca. 24 °C und 26 °C. In der zu überdachenden Straßenschlucht jedoch fallen die Temperaturen nicht unter 25,5 °C, da in diesem Bereich keine Verschattung vorhanden ist. In den angrenzenden Straßen sorgen Bäume hin und wieder für Schatten, was die Temperaturen merklich senkt. Auch höhere Windgeschwindigkeiten können vereinzelt die Durchschnittstemperatur senken.

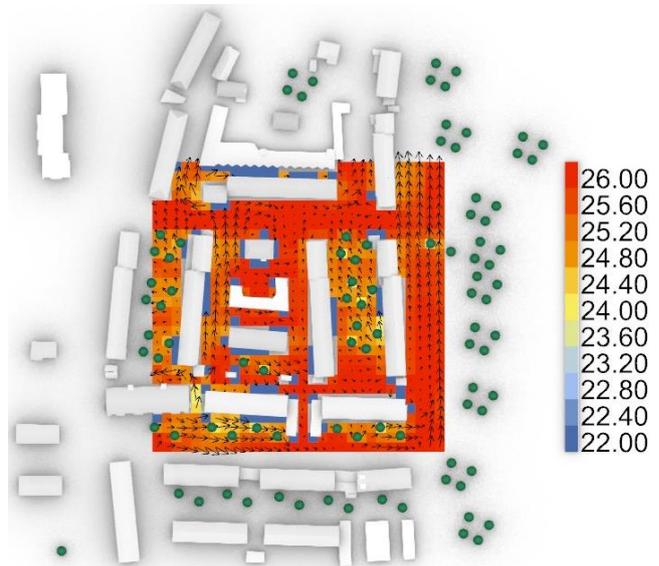


Abbildung 110 - UTCI-Analyse 3b; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Nach der Modellierung eine Überdachung in einer Höhe von 4,50 Metern ändern sich die durchschnittlichen UTCI-Temperaturen in der Straßenschlucht deutlich. Die Abbildung 111 zeigt ein Absinken der Temperaturen im überdachten Bereich auf 23,5 °C bis 24 °C, was eine



Abbildung 111 - UTCI-Analyse 3b; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Verringerung um immerhin 2 K bedeutet. Lediglich am südlichen Ende der Verschattung ist der kühlende Effekt etwas abgeschwächt, da in diesem Bereich keine Bebauung auf der Westseite unmittelbar an die Überdachung anschließt. Dadurch kann schräg einfallende abendliche Sonnenstrahlung zu Erwärmung beitragen.

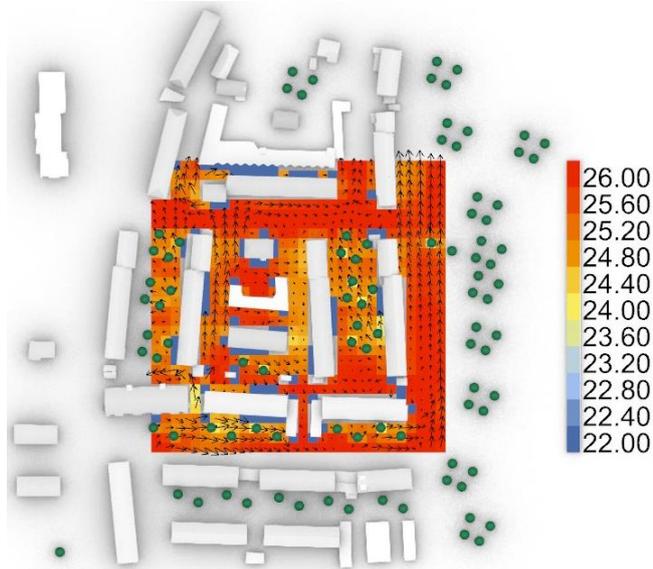


Abbildung 112 - UTCl-Analyse 3b; Überdachung 9,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die Abbildung 112 zeigt die Ergebnisse einer UTCl-Analyse des Untersuchungsereichs mit einer Überdachung in 9,50 Metern Höhe. Es zeigt sich, dass die Überdachung nur noch in wenigen Bereichen signifikant zur Abkühlung des Straßenraums beiträgt. Die Abkühlung ist in denjenigen Bereichen noch am ausgeprägtesten, welche von beiden Seiten unmittelbar von Bebauung flankiert sind. Die anderen Bereiche werden durch die tief stehende Sonne in den Morgen- und

Abendstunden erhitzt. Dies wird dadurch verstärkt, dass die Überdachung nicht direkt an die östliche Bebauung anschließen kann, da die Gebäude, wie in Kapitel 3.2.1 „Untersuchungsgebiet“ (s. 39) gezeigt mit einem kleinen Vorgarten ausgestattet sind.

Auch die Analyse des Untersuchungsereichs 2b zeigt, dass die niedrigste mögliche Überdachung von 4,50 Metern als für die Kühlung des Straßenraums am effektivsten ist. Aus diesem Zweck wird im nächsten Schritt das Potenzial einer energetischen Nutzung der Überdachung durch die Bestückung mit PV-Paneelen untersucht.

Die in der Abbildung 114 dargestellten Ergebnisse der Strahlungsanalyse zeigen, dass nahezu die gesamte Fläche der Überdachung der für eine waagerechte Fläche maximalen Energiemenge von 1.300 kWh/m² ausgesetzt ist. Lediglich ein sehr kleiner Teil an der Kante des südwestlich unmittelbar angrenzenden Gebäudes ist einer leichten Verschattung ausgesetzt. Insgesamt erreicht die Überdachung eine Gesamtenergiemenge von 792.145 kWh über das gesamte Untersuchungsreich. Bei einer Fläche dieser Größe wäre eine maximale Menge von 836.510 kWh möglich gewesen, was lediglich knapp 6 % mehr entspricht.

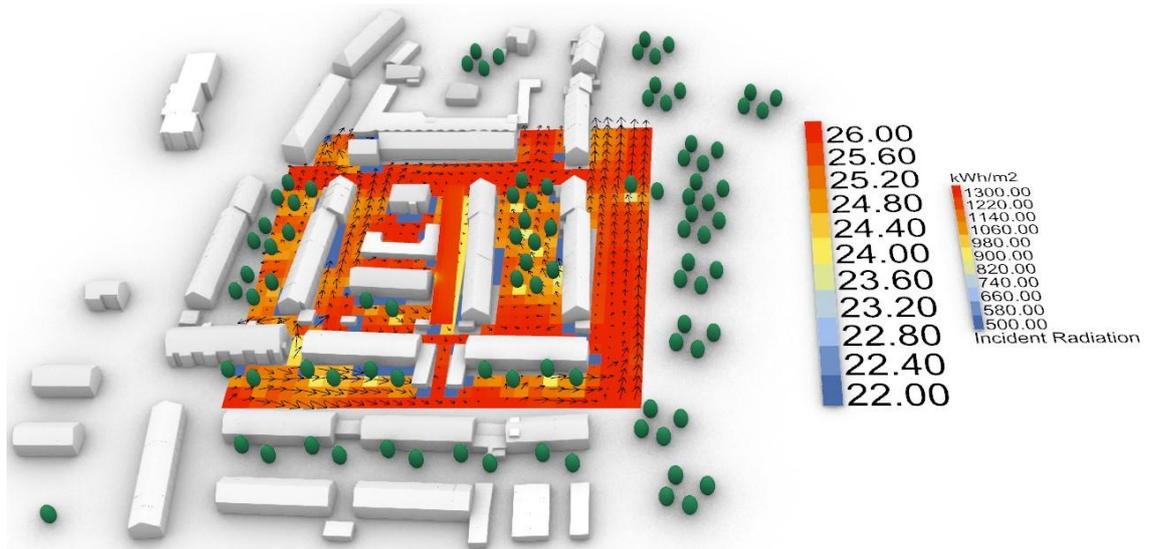


Abbildung 114 - Strahlungsanalyse 3b kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

In der Strahlungsanalyse der optimierten Überdachung, welche in der Abbildung 113 zu sehen ist, zeigt sich das bereits in der Analyse der waagerechten Überdachung gewonnene Bild erneut. Nahezu der gesamte Bereich der Überdachung profitiert von sehr guten Energiemengen bis auf einen kleinen Teil der Überdachung im Bereich des südwestlich anschließenden Gebäudes. Die Gesamtenergiemenge über das gesamte Jahr beläuft sich somit auf 531.459 kWh, was 67 % der Energiemenge der waagerechten Überdachung entspricht, obwohl nur ca. 50 % der Fläche eingesetzt werden musste.

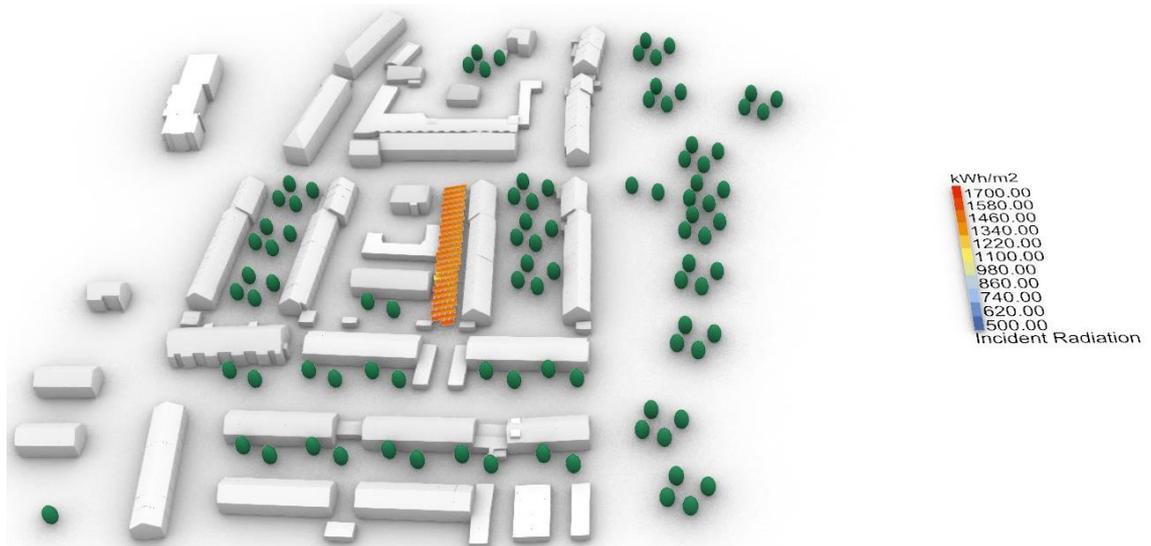


Abbildung 113 - Strahlungsanalyse 3b kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Bei einer Bestückung mit monokristallinen PV-Paneelen mit einem Wirkungsgrad von 22 % könnte eine waagerechte Überdachung in einem Jahr somit ca. 174.272 kWh an elektrischer Energie erzeugen. Die Variante mit optimierter Ausrichtung könnte ca. 116.921 kWh Strom produzieren.

4.2.9. Untersuchungsbereich 3c



Abbildung 115 - UTCI-Analyse 3c; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die Abbildung 115 zeigt die Ergebnisse der UTCI-Analyse der Ausgangssituation des Untersuchungsberichts 3c. Die Temperaturen befinden sich in einem Spektrum von ca. 24 °C bis 26 °C. In der zu überdachenden Straßenschlucht erreichen die Temperaturen mehrheitlich ebenfalls Temperaturen von 26 °C. Durch Bäume in den Vorgärten der nördlichen Reihenhäuser sinkt die Temperatur teilweise jedoch darunter. Zusätzlich sorgen stärkeren

Windgeschwindigkeiten westlich der Mitte der Straße für eine Absenkung der UTCI-Temperatur.

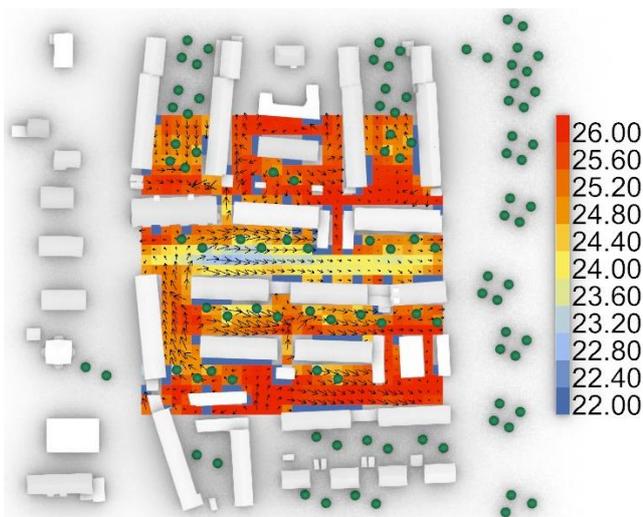


Abbildung 116 - UTCI-Analyse 3c; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die Abbildung 116 zeigt die UTCI-Analyse mit einer Überdachung in 4,50 Metern Höhe. Die Überdachung schafft es, die Temperatur unter ihr um 2 K bis 3 K zu senken. Besonders im Bereich der höheren Windgeschwindigkeiten ist die Senkung der Temperatur sehr deutlich. Da sich sowohl auf der nördlichen wie auch auf der südlichen Seite der Straße Gärten befinden, welche nicht überdacht werden, ist der kühlende Effekt in der Nähe der Fassaden nicht so stark ausgeprägt. Auch am westlichen und östliche Ende der Überdachung sowie im Bereich der südlich einmündenden Straße nimmt der Kühleffekt der Überdachung deutlich ab.

Eine Überdachung in einer Höhe von 9,50 Metern kann, wie die Abbildung 117 zeigt, nur noch in kleinen Bereichen für Abkühlung sorgen. Im westlichen Bereich der Straßenschlucht ist durch die von Süden einmündende Straße sowie durch das Ende der Überdachung kaum doch eine Temperaturveränderung wahrnehmbar. Auch im gesamten

südlichen Bereich der Straße sind die Temperaturen nahezu auf dem Niveau ohne Überdachung. Lediglich ein kleiner Bereich in der Mitte der Straße, welcher zusätzlich stärkere Windgeschwindigkeiten aufweist, erreicht noch eine signifikante Temperaturreduzierung.

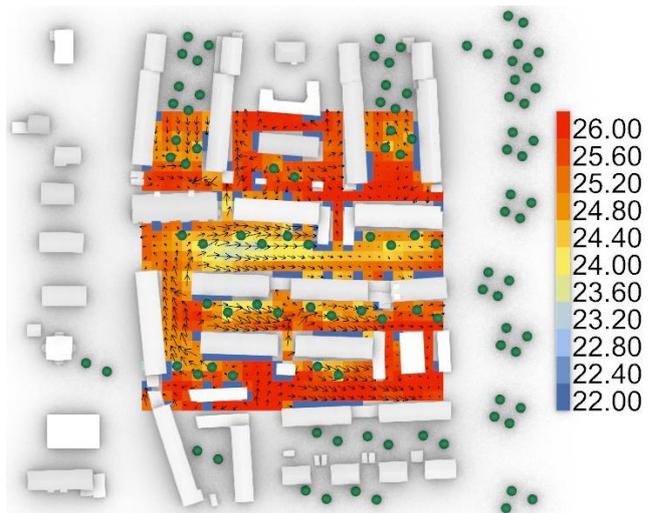


Abbildung 117 - UTCI-Analyse 3c; Überdachung 9,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

In der Analyse des Untersuchungsbereichs 3c stellte sich die niedrigste mögliche Überdachung von 4,50 Metern als für die Kühlung des

Straßenraums am effektivsten heraus. Aus diesem Zweck wird im nächsten Schritt das Potenzial einer energetischen Nutzung der Überdachung durch die Bestückung mit PV-Paneelen untersucht.

Die Abbildung 118 zeigt das Ergebnis dieser Strahlungsanalyse. Durch den etwas größeren Abstand der Überdachung von der südlichen Bebauung, welche aufgrund der Vorgärten zustande kommt, wird die Überdachung in fast keinem Bereich nennenswert verschattet. Lediglich das westlichste Haus auf der Südseite der Straßenschlucht, welches mit der Giebelwand zur Überdachung ausgerichtet ist, sorgt für einen kleinen verschatteten Bereich auf der Überdachung. Die Gesamtenergiemenge erreicht somit über das gesamte Untersuchungs Jahr nur 1.924.500 kWh der bei dieser Fläche möglichen 2.018.070 kWh, was allerdings nur 5 % weniger entspricht.

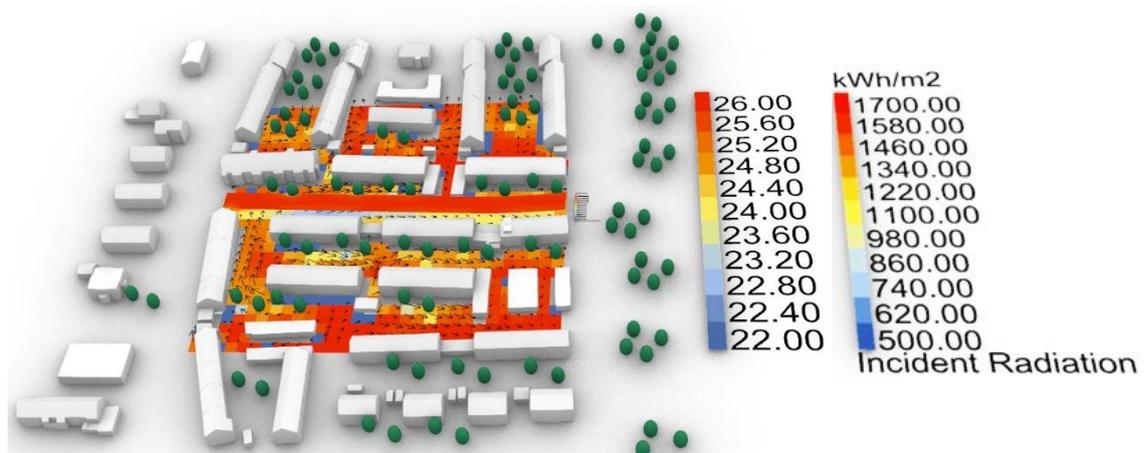


Abbildung 118 - Strahlungsanalyse 3c kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die Energiemenge auf der optimierten Überdachung ist deutlich stärker von der Verschattung durch die südliche Häuserreihe betroffen (siehe Abbildung 119). Nahezu über die gesamte Breite der Überdachung kommt es im Süden zu Einbußen in der Energiemenge. Lediglich im Bereich der südlich einmündenden Straße erreicht die optimierte Überdachung sehr gute Energiemengen. Die Gesamtenergiemenge der optimierten Konfiguration der Überdachung über das gesamte Jahr beträgt dadurch bei ca. 50 % der eingesetzten Fläche mit 1.167.100 kWh nur ca. 61 % der Energiemenge der waagerechten Überdachung.

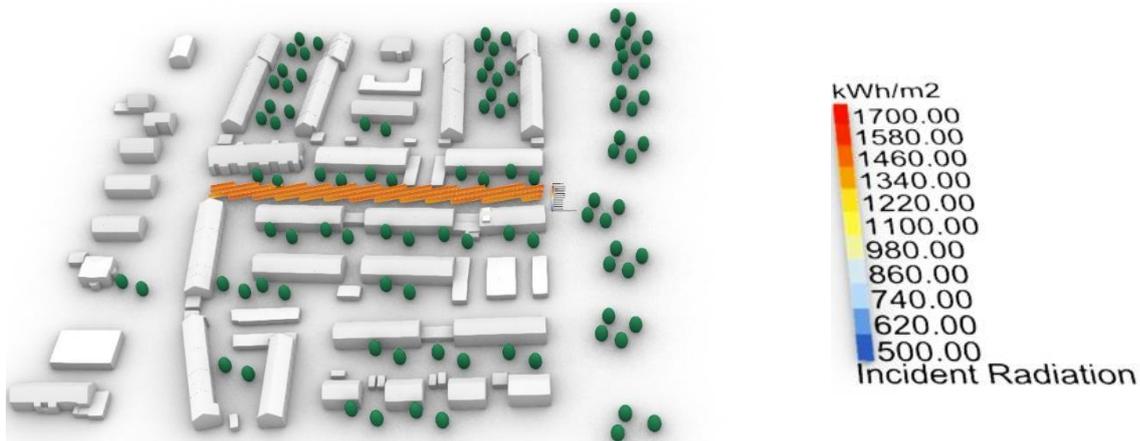


Abbildung 119 - Strahlungsanalyse 3c kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Bei einer Bestückung mit monokristallinen PV-Paneelen mit einem Wirkungsgrad von 22 % könnte eine waagerechte Überdachung in einem Jahr somit ca. 423.390 kWh an elektrischer Energie erzeugen. Die Variante mit optimierter Ausrichtung könnte ca. 256.762 kWh Strom produzieren.

4.2.10. Untersuchungsbereich 4a

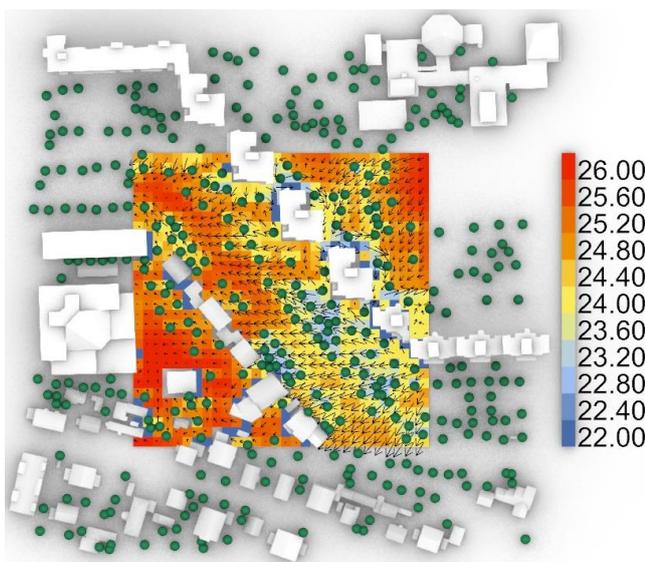


Abbildung 120 - UTCI-Analyse 4a; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

In der Abbildung 120 zeigt sich das Ergebnis der UTCI-Untersuchung der Ausgangssituation des Untersuchungsbereichs 4a. Dieser Bereich unterliegt erneut einem breiten Spektrum an durchschnittlichen UTCI-Temperaturen von 22,5 °C bis 26 °C. Innerhalb der Straßenschlucht kommen diese sehr hohen Temperaturen allerdings nur sehr vereinzelt vor, beispielsweise ganz im Nordwesten. Verringert wird die Temperatur vor allem durch die Verschattung der große Anzahl von Bäumen sowie zwischen den höheren Gebäuden als

auch durch die teils sehr hohen Windgeschwindigkeiten, welche besonders im südwestlichen Teil der Straßenschlucht auftreten. In Verbindung von Verschattung und starker Luftbewegung ergeben sich vereinzelt Temperaturen von unter 23 °C.

Durch die Modellierung einer Überdachung in einer Höhe von 4,50 Metern verändert sich die Temperatursituation drastisch. Die Abbildung 122 zeigt, dass die UTCI-Temperaturen im gesamten überdachten Bereich deutlich sinken. Besonders im südöstlichen Teil der Straßenschlucht, wo die Luftgeschwindigkeit deutlich höher ist, erreichen die Temperaturen großflächig ca. 22 °C. Bei niedrigerer Windstärke wie beispielsweise im Nordwesten sinkt

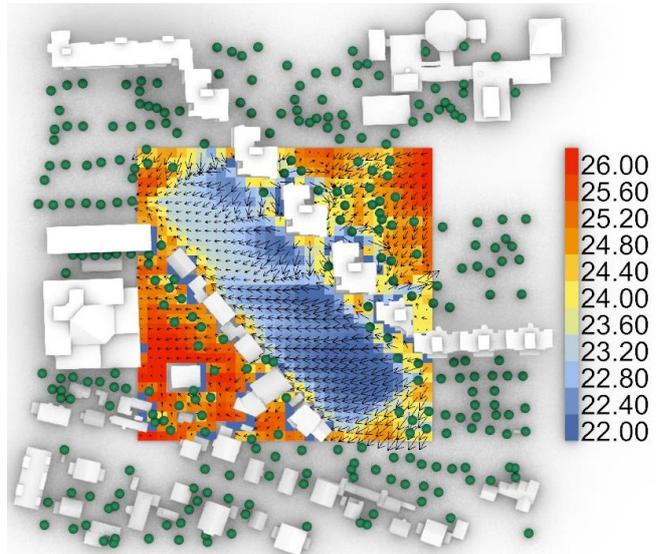


Abbildung 122 - UTCI-Analyse 4a; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

die Temperatur immerhin noch auf ca. 23 °C. Im Bereich der nordwestlichen Ecke der Überdachung, wo im Süden keine Gebäude angrenzen, gibt es im Randbereich der überdachten Fläche bereits eine wahrnehmbare Erwärmung sowohl an der Süd- als auch an der Westkante.

Eine Überdachung in einer Höhe von 10,00 Metern verändert die Situation noch einmal deutlich. Wie die Abbildung 121 zeigt, verkleinern sich die südöstlichen Bereiche sehr niedriger Durchschnittstemperatur drastisch, wobei die wärmeren Flächen im Süden und Westen deutlich weiter unter die Überdachung vordringen. Vor allem in den Bereichen, wo die angrenzende südliche Bebauung niedriger ist als die Überdachung (Garagen), ist keine Verschattung aus dieser Richtung gegeben, was die Temperaturen unter der Überdachung steigen lässt. Die wärmeren Flächen an der nordwestlichen Ecke der Überdachung breitet sich aus diesem Grund ebenfalls weiter aus.

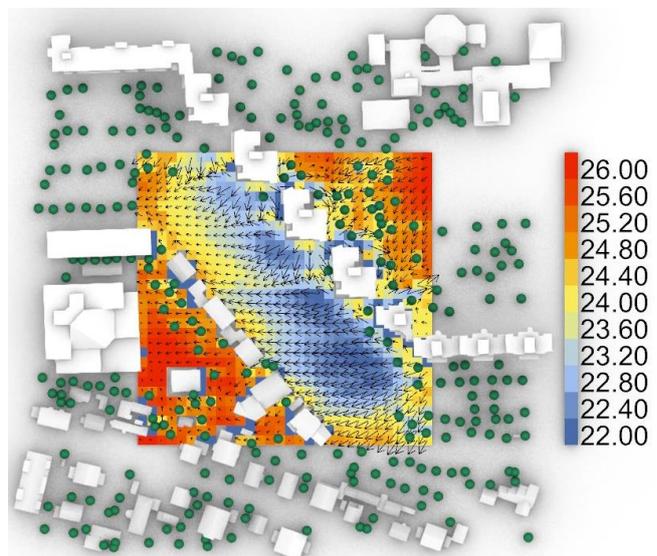


Abbildung 121 - UTCI-Analyse 4a; Überdachung 10,00 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

steigen lässt. Die wärmeren Flächen an der nordwestlichen Ecke der Überdachung breitet sich aus diesem Grund ebenfalls weiter aus.

Wiederum zeigt sich in der Analyse des Untersuchungsbereichs 2b, dass die niedrigste mögliche Überdachung von 4,50 Metern als für die Kühlung des Straßenraums am effektivsten herausstellt. Aus diesem Zweck wird im nächsten Schritt das Potenzial einer energetischen Nutzung der Überdachung durch die Bestückung mit PV-Paneelen untersucht.

Wie in Kapitel 3.2.1 „Untersuchungsgebiet“ (s. 39) beschrieben, überschreitet die nördliche Bebauung die Kategoriegrenze in dieser Untersuchung verwendeten Systematik. Wie in der Abbildung 123 zu sehen ist, hat die im Norden befindende Bebauung jedoch einen relevanten Einfluss auf die Verschattung der Überdachung, was in einer separat durchgeführten Untersuchung nochmals bestätigt werden konnte. Somit scheidet dieser Untersuchungsbereich aus der Systematik aus. Dennoch soll die Analyse an dieser Stelle fortgesetzt werden.

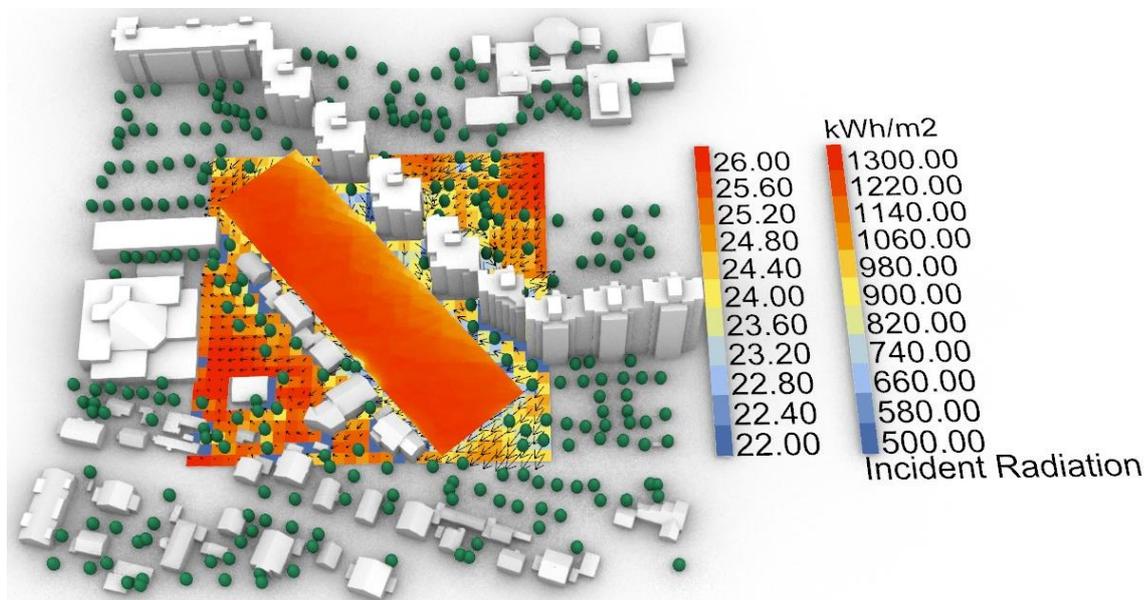


Abbildung 123 - Strahlungsanalyse 4a kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Zusätzlich zur oben erwähnten Verschattung der Überdachung durch die hohen Gebäude im Norden kommt es zu nahezu keiner anderen relevanten Verschattung. Lediglich sorgt einer der im Süden angrenzenden Bäume für eine Reduzierung der eintreffenden Energiemenge in einem kleinen Bereich. Insgesamt erreicht die Überdachung über das Untersuchungsjahr durch solare Einstrahlung eine Energiemenge von 8.299.300 kWh. Eine unverschattete Fläche dieser Größe würde einen Ertrag von 9.107.167 kWh an Energie erreichen. Die tatsächlich erreichte Energiemenge entspricht dementsprechend ca. 90 % des maximal Möglichen.

In der Analyse der optimierten Konfiguration der Überdachung, deren Ergebnisse in der Abbildung 124 dargestellt sind, zeigt sich, dass die Verschattung durch die nördliche Bebauung weniger gravierend ins Gewicht fällt als bei der waagerechten Überdachung.

Die Verschattung durch die südliche Bebauung ist im Gegensatz dazu verstärkt wahrzunehmen. Insgesamt erreicht die Energiemenge in dieser Ausführung bei nur ca. 50 % der Fläche 5.390.400 kWh, was etwa 65 % des Ertrags der waagerechten Überdachung entspricht.

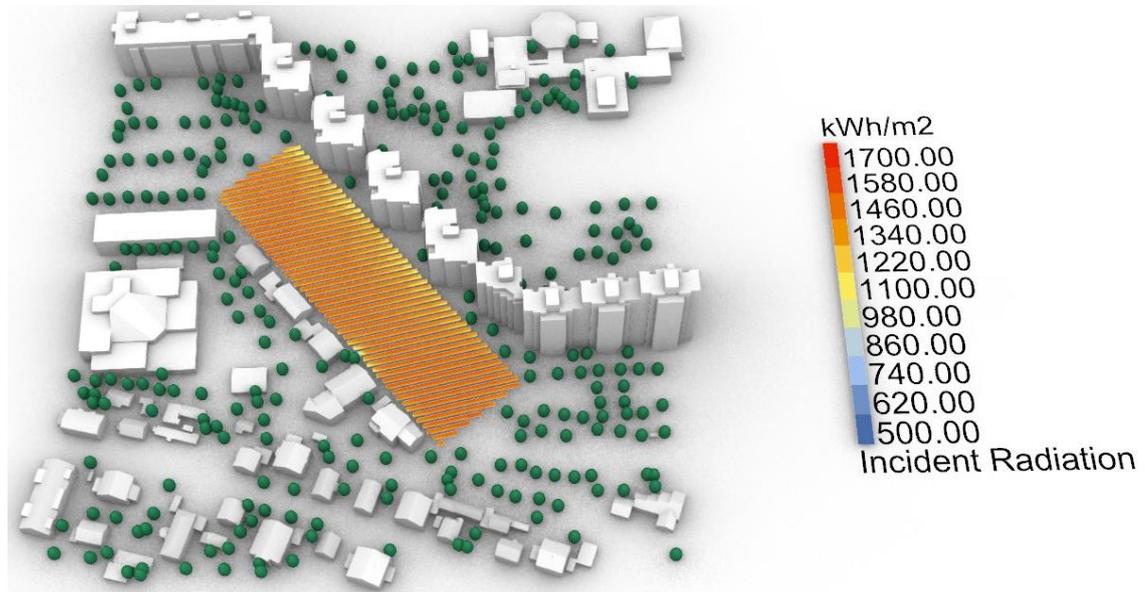


Abbildung 124 - Strahlungsanalyse 4a kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Bei einer Bestückung mit monokristallinen PV-Paneelen mit einem Wirkungsgrad von 22 % könnte eine waagerechte Überdachung in einem Jahr somit ca. 1.825.846 kWh an elektrischer Energie erzeugen. Die Variante mit optimierter Ausrichtung könnte ca. 1.185.888 kWh Strom produzieren.

4.2.11. Untersuchungsbereich 4b

Im Ergebnis der UTCI-Analyse des Untersuchungsbereichs 4b, welches in der Abbildung 125 zu sehen ist, zeigt sich eine hoch erhitze Straßenschlucht ohne nennenswerte Verschattung, jedoch geprägt von hohen Luftgeschwindigkeiten. Die durchschnittlichen UTCI-Temperaturen in der Straßenschlucht schwanken zwischen 25,5 °C und 26 °C. Im restlichen Untersuchungsbereich erreichen lediglich durch Bäume verschattete und nahe an Gebäuden liegende Flächen niedrigere Temperaturen.

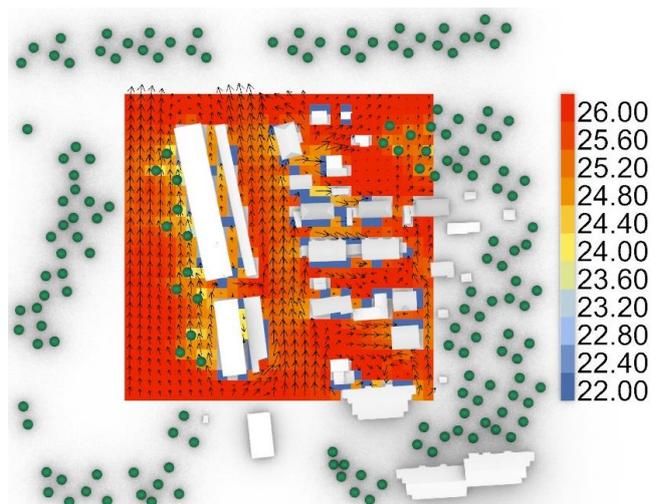


Abbildung 125 - UTCI-Analyse 4b; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Bäume verschattete und nahe an Gebäuden liegende Flächen niedrigere Temperaturen.

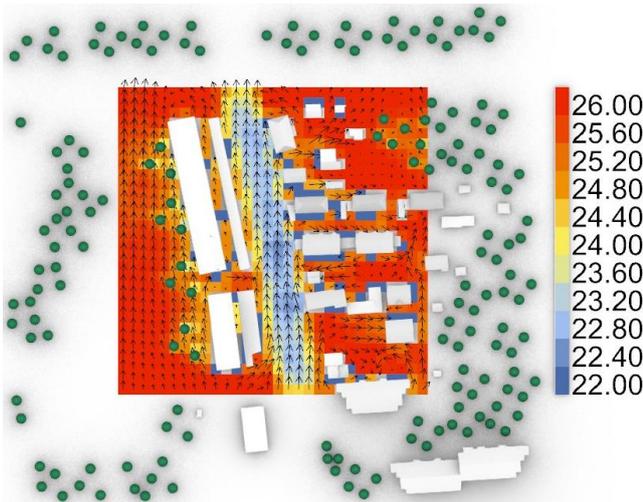


Abbildung 126 - UTCI-Analyse 4b; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

überdachten Fläche jedoch an den meisten Seiten bereits leicht erwärmt. Vor allem das südliche sowie das nördliche Ende der Überdachung sorgt nur für eine geringe Kühlung.

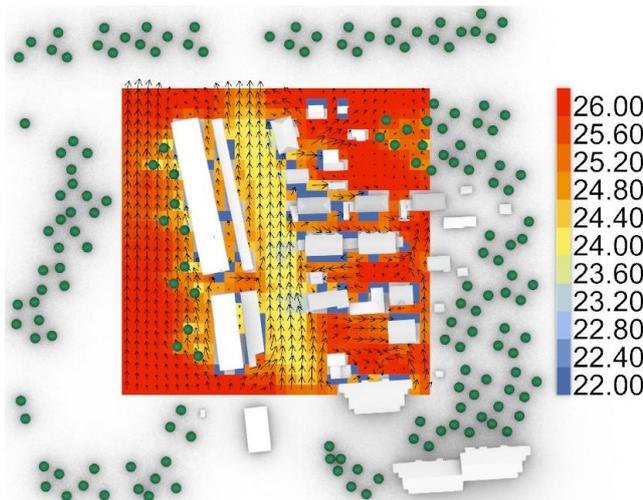


Abbildung 127 - UTCI-Analyse 4b; Überdachung 10,00 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

K entspricht.

Dennoch zeigt sich in der Analyse des Untersuchungsbereichs 2b, dass sich die niedrigste mögliche Überdachung von 4,50 Metern als für die Kühlung des Straßenraums am effektivsten herausstellt. Aus diesem Zweck wird im nächsten Schritt das Potenzial einer energetischen Nutzung der Überdachung durch die Bestückung mit PV-Paneelen untersucht.

Die Strahlungsanalyse des Untersuchungsberichts, dargestellt in der Abbildung 128, zeigt, dass es über die gesamte Fläche der Überdachung nur an einer Stelle zu einer relevanten Verschattung kommt. Das höchste Gebäude auf der Ostseite der Überdach-

Die Abbildung 126 zeigt die Ergebnisse der UTCI-Analyse bei einer 4,50 Meter hohen Überdachung. Zumindest im Kernbereich der Verschattung ist hier eine deutliche Abkühlung der Durchschnittstemperaturen festzustellen. Hier sinken diese teilweise sogar bis auf 22,5 °C. Wie bei einer so schmalen Überdachung, welche nicht direkt mit der Bebauung abschließt, bereits oben festgestellt, ist der Randbereich der

Die Erhöhung der UTCI-Durchschnittstemperatur durch die auf 10,00 Meter verschobene Überdachung fällt, wie in der Abbildung 127 zu sehen, sehr homogen aus. Der gesamte überdachte Bereich erwärmt sich um ca. 1K. Die Abkühlung ist selbst nach der Erhöhung noch deutlich und im Kernbereich bewegen sich die Temperaturen zwischen 23,5 °C und 24 °C, was immer noch einer Abkühlung von 2

ung, welches zusätzlich am nächsten an die Überdachung angrenzt, wirft einen deutlichen Schatten auf die Überdachung. Insgesamt bringt die gesamte Fläche der Überdachung über das Untersuchungsjahr eine Gesamtenergiemenge von 3.447.800 kWh ein. Die sind nur ca. 2 % weniger als die maximal mögliche Energiemenge dieser Fläche von 3.520.622 kWh.

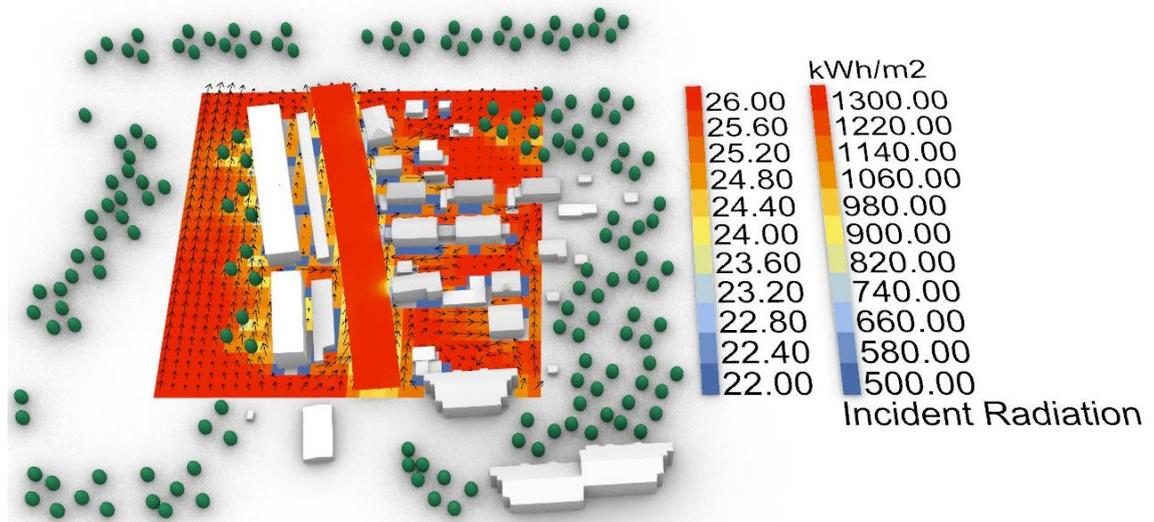


Abbildung 128 - Strahlungsanalyse 4b kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die Abbildung 129 zeigt die Ergebnisse der Strahlungsanalyse für die optimierte Konfiguration der Überdachung. Auch hier ist die Verschattung an derselben Stelle wie schon bei der waagerechten Überdachung zu erkennen. Insgesamt erreicht diese Variante der Überdachung mit ca. 50 % der Fläche über das gesamte Jahr 2.201.900 kWh an Energie. Das entspricht etwa 64 % der Energie, welche die waagerechte Überdachung umsetzt.

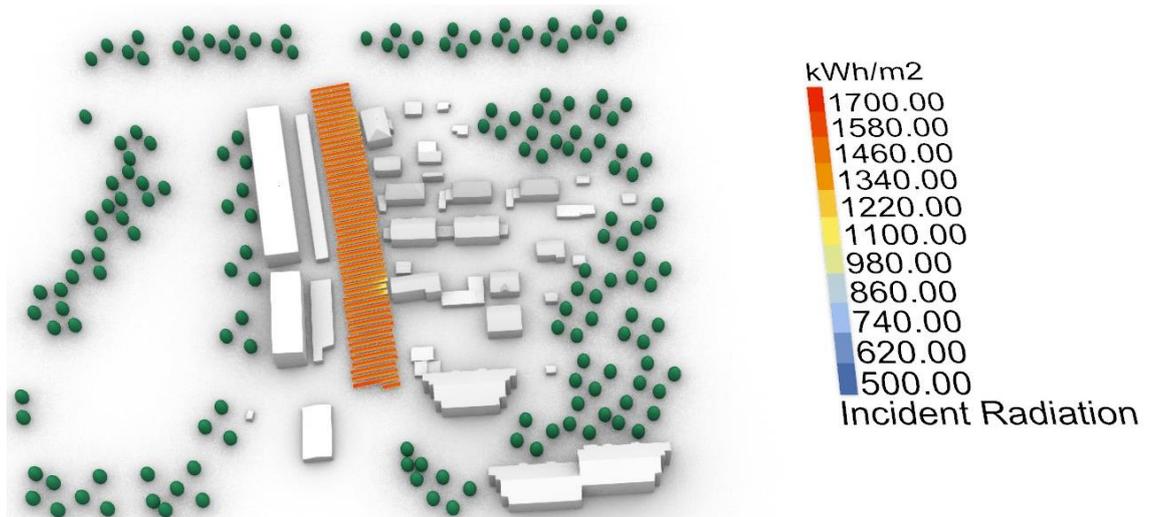


Abbildung 129 - Strahlungsanalyse 4b kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Bei einer Bestückung mit monokristallinen PV-Paneelen mit einem Wirkungsgrad von 22 % könnte eine waagerechte Überdachung in einem Jahr somit ca. 758.516 kWh an

elektrischer Energie erzeugen. Die Variante mit optimierter Ausrichtung könnte ca. 484.418 kWh Strom produzieren.

4.2.12. Untersuchungsbereich 4c

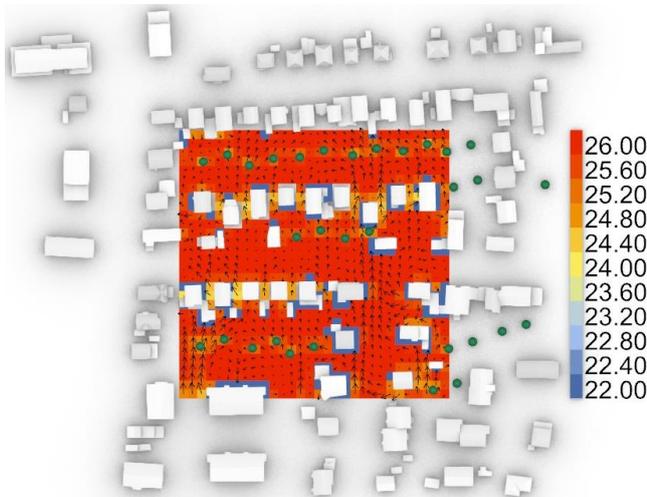


Abbildung 130 - UTCI-Analyse 4c; Ausgangssituation; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

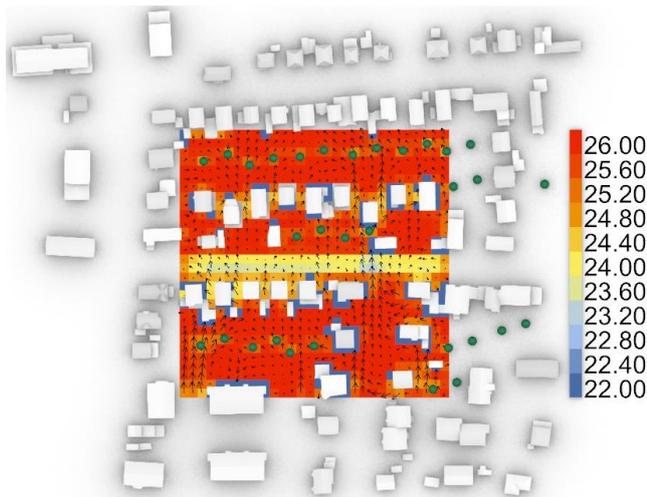


Abbildung 131 - UTCI-Analyse 4c; Überdachung 4,50 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

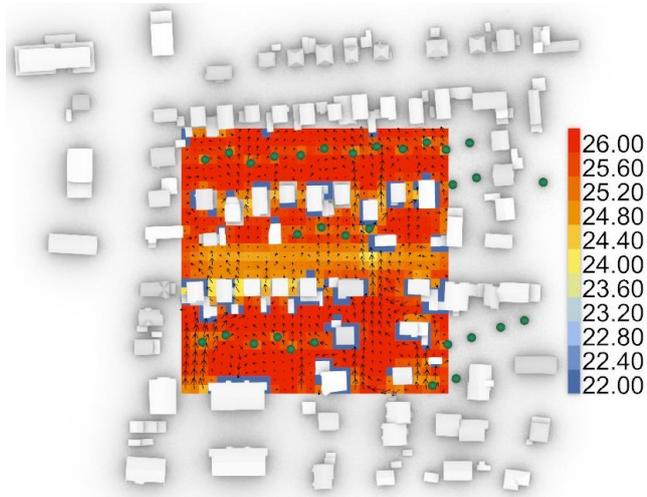


Abbildung 132 - UTCI-Analyse 4c; Überdachung 9,00 m; Wärmste Woche (7 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die UTCI-Analyse Ausgangssituation des Untersuchungsgebiets 4c lieferte das in der Abbildung 130 gezeigte Ergebnis. Das gesamte Untersuchungsgebiet ist geprägt von sehr hohen Temperaturen von flächendeckend ca. 26 °C. Lediglich zwischen den nahe aneinander stehenden Gebäuden und unter den vereinzelt stehenden Bäumen kommt es zu niedrigeren UTCI-Temperaturen von ca. 24 °C. Die teilweise mittelhohen Windgeschwindigkeiten sorgen für keine relevante Abkühlung der Umgebung.

Die im nächsten Schritt modellierte Überdachung in einer Höhe von 4,50 Metern schließt in diesem Untersuchungsbereich aufgrund der privaten Gärten nicht bündig mit der Bebauung ab. Der in der Abbildung 131 gezeigte Kühlungseffekt der Überdachung ist trotzdem deutlich relevant. Dieser erreicht in der Mitte der Überdachung Temperaturen von 23,5 °C bis 24 °C. Am östlichen und westlichen Rand der Überdachung können diese Temperaturen nicht ganz erreicht werden.

Eine Erhöhung der Überdachung auf 9,00 Meter lässt die Temperaturen unter dieser stark ansteigen, wie die Abbildung 132 zeigt. Selbst in

der Mitte der Überdachung sind kaum noch Temperaturen von unter 24.5 °C zu erkennen. Die kältesten Stellen im verschatteten Bereich sind außerdem deutlich nach Norden gerutscht. Im Süden dringt die schräg einfallende Sonnenstrahlung bereits weit unter die Verschattung.

Erneut zeigt sich, dass die niedrigste mögliche Überdachung von 4,50 Metern für die Kühlung des Straßenraums am effektivsten ist. Aus diesem Zweck wird im nächsten Schritt das Potenzial einer energetischen Nutzung der Überdachung durch die Bestückung mit PV-Paneelen untersucht.

Die Ergebnisse dieser Analyse sind in der Abbildung 133 dargestellt. Die gesamte Überdachung bleibt selbst auf dieser Höhe nahezu unverschattet. Selbst auf der Südseite ist keine Verschattung sichtbar. Die ist zum einen auf die geringe Höhe der Bebauung in diesem Untersuchungsbereich und zum anderen auf den großen Abstand zwischen Bebauung und Überdachung durch die privaten Gärten zurückzuführen. Insgesamt erreicht diese Überdachung einen Gesamtenergieertrag von 2.170.600 kWh, was fast der maximal möglichen Menge dieser Größe für das Untersuchungsjahr von 2.217.819 kWh und damit lediglich knapp 2 % mehr entspricht.

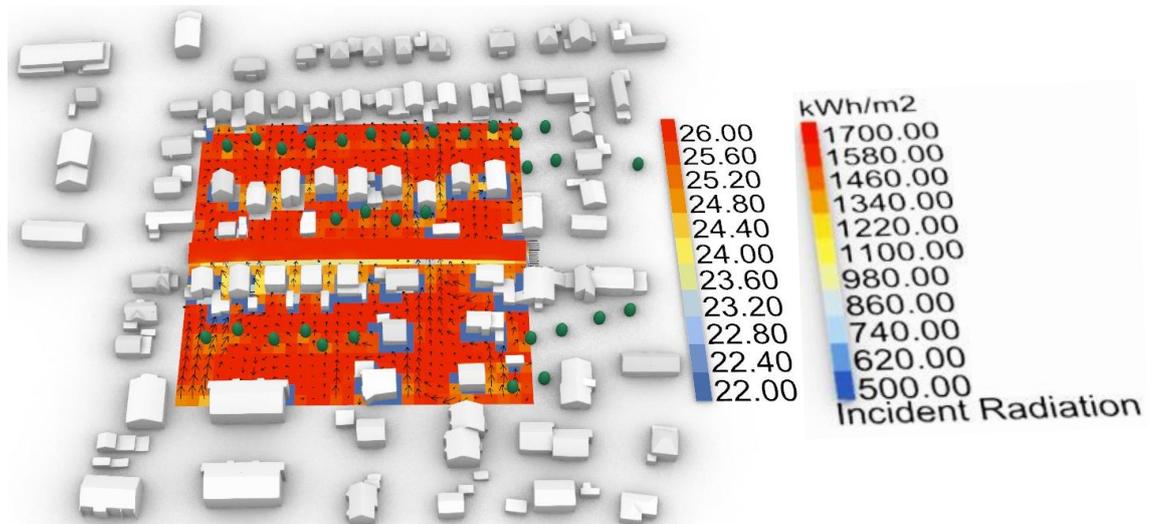


Abbildung 133 - Strahlungsanalyse 4c kumuliert; Überdachung 4,50 m; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

Die Abbildung 134 stellt die Strahlungsanalyse der optimierten Anordnung der Überdachung in einer Höhe von 4,50 Metern dar. Hier ist die Verschattung der sich um Süden befindenden Bebauung vor allem im Bereich der Giebel leicht erkennbar. Die gesamte Energiemenge, welche auf dieser angewinkelten Überdachung über das ganze Jahr eingefangen werden kann, beläuft sich auf 1.315.000 kWh. Dies entspricht etwa 61 % der Energiemenge, welche die waagerechte Überdachung bei ca. 50 % der Fläche erreicht.

Bei einer Bestückung mit monokristallinen PV-Paneelen mit einem Wirkungsgrad von 22 % könnte eine waagerechte Überdachung in einem Jahr somit ca. 477.532 kWh an

elektrischer Energie erzeugen. Die Variante mit optimierter Ausrichtung könnte ca. 291.930 kWh Strom produzieren.

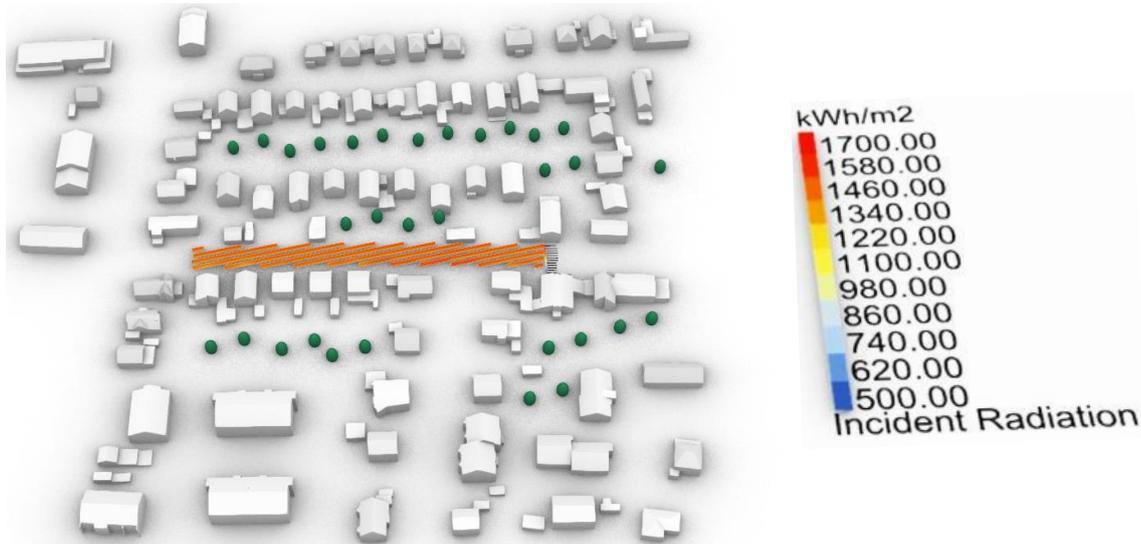


Abbildung 134 - Strahlungsanalyse 4c kumuliert; Überdachung 4,50 m Optimiert; Ganzjährig (365 Tage / 24 Stunden) (eigene Darstellung)

4.3. Beschränkungen und Grenzen

Auch wenn bei den vorangegangenen Untersuchungen möglichst viele Faktoren mit einbezogen wurden, kann die Computersimulation das sehr komplexe System Stadt und Außenraumkomfort nur annähernd nachbilden. Eine Simulation unter Berücksichtigung aller relevanten Faktoren überschreitet die verfügbaren Ressourcen und die Zeit dieser Untersuchung bei Weitem. Im Rahmen dieser Thesis wurde sich aus diesem Grund auf die für die Zielsetzung relevantesten und einflussreichsten Faktoren beschränkt. Im Folgenden sollen aus diesem Grund die dadurch auftretenden Beschränkungen und Grenzen der Untersuchung klargestellt werden.

Zunächst handelt es sich bei den verwendeten Wetterdaten wie in Kapitel 3.1.1 „Wetterdaten“ (s. 30) beschrieben um keine direkt im Untersuchungsgebiet gemessenen Daten. Vielmehr wurden Wetterdaten verwendet, welche ein Musterjahr zusammengestellt aus den Wetterdaten mehrerer Jahre darstellt. Zusätzlich stammen die Messungen aus einer Wetterstation einige Kilometer entfernt des Untersuchungsgebiets. Auch wenn der Stadtteil, in welchem die Wetterstation ihre Messungen nimmt, durchaus Ähnlichkeiten zum Untersuchungsgebiet hat und ein Musterjahr weniger anfällig für statistische Ausnahmereignisse aufweist, kann die tatsächliche Situation im Untersuchungsgebiet deutlich von den Simulationswerten abweichen. Zusätzlich wurde die Erwärmung in Folge des Klimawandels in den Wetterdaten nicht berücksichtigt. Durch ein Ansteigen der Temperaturen, wie im Kapitel 2.2 „Klimawandel“ (s. 5) beschrieben, können sich die

Auswirkungen der Überdachungen in den einzelnen Situationen zukünftig deutlich verändern.

Des Weiteren waren die zu Verfügung gestellten 3D-Daten des Stadtteils, wie bereits in Kapitel 3.2.1 „Untersuchungsgebiet“ (s. 39) beschrieben, ohne Informationen über das geografische Relief des Stadtteils. Deshalb wurde die gesamte Grundfläche des Untersuchungsgebiets als eben dargestellt. Dabei wurde eine Höhendifferenz von ca. 4,5 Metern über das gesamte Untersuchungsgebiet ausgeglichen. Auch zu den Bäumen waren in den 3D-Daten lediglich die Positionen vermerkt. Für die Simulation wurde ein Baum durchschnittlicher Größe und Form modelliert und an jede vermerkte Stelle gesetzt. Die real vorhandenen Bäume können in Form und Größe und dadurch auch in ihrer Verschattungsleistung teilweise stark von den modellierten Bäumen abweichen.

Für die UTCI-Analysen wurde an jedem Punkt des Rasters individuell für jede simulierte Stunde eine lokale Temperatur entsprechend der UTCI-Berechnung ermittelt. Dabei wurde die Lufttemperatur, die direkte und diffuse solare Einstrahlung, der SVF, die lokale durchschnittliche Windgeschwindigkeit sowie der Anteil des Körpers, der direkt der solaren Strahlung ausgesetzt ist, berücksichtigt. Bei der Berechnung der MRT jedoch wurde zur Vereinfachung die Temperatur aller den Untersuchungsort umschließender Oberflächen als gleich der Lufttemperatur angenommen. Die Temperatur der Flächen, mit der eine Person im Außenraum im Strahlungsaustausch steht, kann jedoch in der Realität stark von der Lufttemperatur abweichen. Die Oberflächentemperatur der umgebenden Flächen ist dabei selbst von vielen verschiedenen Faktoren wie Farbe, Material und Beschaffenheit abhängig, welche aus Zeit- und Ressourcenmangel nicht für jede Oberfläche in jedem Untersuchungsbereich festgestellt werden konnte. Für den Reflexionsgrad des Bodens wurde ein städtischer Mittelwert angenommen.

Weitere für das städtische Mikroklima relevante Faktoren sind die latenten Wärmeströme, die Wärmespeicherfähigkeiten der in der Stadt verwendeten Baumaterialien und die anthropogene Wärmeabgabe zum Beispiel durch Fahrzeuge, Klimageräte, Heizungen oder industrielle Maschinen. All diese Punkte wurden in den Simulationen nicht berücksichtigt, sind allerdings auch meist konstant und verändern sich nicht oder nur sehr wenig durch das Anbringen einer Überdachung. Aus diesem Grund sind sie für diese Untersuchung nur von geringer Relevanz. Wichtig ist allerdings, dass sie das Mikroklima der verschiedenen Untersuchungsbereiche relevant verändern können und die reale Situation deshalb mitunter stark von den Simulationsergebnissen abweichen kann. Auch können die Simulationsergebnisse keine relevante Aussage über den UHI-Effekt treffen.

Der tatsächliche kühlende Effekt der vorhandenen Grünflächen oder der Bäume abgesehen vom Schattenwurf konnte in den Simulationsergebnissen ebenfalls nicht abgebildet werden.

5. Zusammenfassung und Fazit

Die zu Beginn der Thesis formulierte Hypothese: „Die Installation von Überdachungen im öffentlichen Straßenraum hat das Potenzial, deren Überhitzung an heißen Tagen auf ein thermisches Komfortniveau zu begrenzen und gleichzeitig relevante Mengen an Strom durch Photovoltaik auf der Dachfläche zu generieren.“ kann nach Auswertung der Ergebnisse der Untersuchung eindeutig bestätigt werden. In jeder der untersuchten Straßenschluchten konnte durch das Einbringen einer Überdachung eine relevante Abkühlung der überdachten Fläche an heißen Tagen festgestellt sowie durch das Bestücken der Überdachung mit PV-Paneelen eine relevante Menge an Strom erzeugt werden.

In der ausführlicheren Analyse des Untersuchungsbereichs 1b konnte zusätzlich festgestellt werden, dass die überdachten Flächen im Sommer am Tag deutlich kühler sind als ohne Überdachung, die Überdachung jedoch auch in der Nacht einen kühlenden Effekt auf die überdachte Fläche ausübt. Die im Sommer kühlende Überdachung scheint Außerdem im Winter eine wärmende Auswirkung auf die überdachten Bereiche zu haben. Dennoch ergibt sich auch im ganzjährigen Durchschnitt eine leichte kühlende Wirkung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die niedrigste mögliche Überdachung in eine Höhe von 4,50 Metern in jedem einzelnen Fall die für die Abkühlung effektivste Variante war. Dabei ist die Höhe der Überdachung bei hoher angrenzender Bebauung weniger ausschlaggebend als bei niedriger angrenzender Bebauung.

Bei höherer angrenzender Bebauung, vor allem in Osten, Westen und Süden ist der kühlende Effekt der Überdachung auch noch bei einer höher angebrachten Überdachung deutlich, wie beispielsweise die Analyse des Untersuchungsbereichs 2a zeigt. Bei einer niedrigeren Bebauung wie im Untersuchungsbereich 4a erwärmt sich die überdachte Fläche bereits bei einer geringen Erhöhung der Überdachung signifikant. Dabei ist die Ausrichtung der Straße, wie die Untersuchungsbereiche 2b und 2d zeigen, von geringer Relevanz.

Am besten ist der kühlende Effekt der Überdachung bei möglichst direktem Anschluss an die Fassade der Bebauung. Bei Durchbrüchen, einmündenden Straßen sowie Fassaden mit häufigen Rücksprüngen oder Erkern verringert sich die Effektivität der Überdachung in diesen Bereichen signifikant. Besonders wenn diese Unregelmäßigkeiten auf der Süd-, West- oder Ostseite auftreten. Wie die Untersuchungsbereiche 1b und 3c zeigen, ist die Ausrichtung der Straße dabei nicht unbedingt relevant. Bei schmalen Straßen ist eine homogene und eng an die Überdachung anschließende Bebauung im Süden,

Westen und Osten besonders relevant. Bei unregelmäßiger Bebauung wie im Untersuchungsbereich 3c ist der kühlende Effekt deutlich eingeschränkt. Bei breiteren Überdachungen ist in ähnlicher Situation meist nur der Randbereich betroffen und der Kernbereich der Überdachung profitiert immer noch deutlich von der Überdachung, wie im Untersuchungsbereich 4a zu sehen ist.

Die Windgeschwindigkeit hat ebenfalls einen sehr großen Einfluss auf die UTCI-Temperatur, wie die Ergebnisse des Untersuchungsbereichs 2c eindrücklich zeigen. Dabei sind die Windgeschwindigkeiten in breiten Straßenschluchten wie in den Untersuchungsbereichen der Kategorie 2 und 4 meist deutlich und konstant höher. In schmaleren Straßenschluchten kommt es hingegen wie die Ergebnisse der Untersuchungsbereiche 1c und 3c zeigen gelegentlich zu lokal begrenzten starken Windgeschwindigkeiten.

Die Ergebnisse der Strahlungsanalysen lassen sich in der Tabelle 4 zusammenfassend auswerten.

Untersuchungs- bereich	Waagerechte Konfiguration				Optimierte Konfiguration		
	Gesamtertrag [kWh]	Flächenertrag [kWh/m²]	Potential [kWh]	Ausnutzungsgrad	Gesamtertrag [kWh]	Flächenertrag [kWh/m²]	Vergleich zu Waagrecht
1b	2.635.400	883	3.937.215	51 %	1.638.200	1.035	62 %
1c	3.508.500	1.088	4.253.775	79 %	2.145.300	1.255	61 %
2a	8.701.400	1.063	10.796.279	76 %	5.375.100	1.239	62 %
2b	6.346.200	1.006	8.317.350	69 %	3.928.000	1.175	62 %
2c	20.137.000	1.158	22.946.102	86 %	12.647.000	1.372	63 %
2d	8.392.200	1.132	9.781.387	83 %	5.092.200	1.296	61 %
3a	5.075.800	1.204	5.561.313	90 %	3.274.100	1.465	65 %
3b	792.145	1.249	836.510	94 %	531.459	1.581	67 %
3c	1.924.500	1.258	2.018.070	95 %	1.167.100	1.439	61 %
4a	8.299.300	1.202	9.107.167	90 %	5.390.400	1.473	65 %

Untersuchungsbe- reich	Waagerechte Konfiguration				Optimierte Konfiguration		
	Gesamter- trag [kWh]	Flächener- trag [kWh/m ²]	Potential [kWh]	Ausnut- zungsgrad	Gesamter- trag [kWh]	Flächener- trag [kWh/m ²]	Vergleich zu Waage- recht
4b	3.447.800	1.292	3.520.622	98 %	2.201.900	1.556	64 %
4c	2.170.600	1.291	2.217.819	98 %	1.315.000	1.476	61 %
Gesamt	71.430.845	1.131	83.293.610	83 %	44.705.759	1.336	63 %

Tabelle 4 - Ergebnisse Strahlungsanalysen

Insgesamt könnten alle der untersuchten Überdachungen gemeinsam in der waagerechten Konfiguration und einer Bestückung mit monokristallinen PV-Modulen mit einem Wirkungsgrad von ca. 21 % über das Untersuchungs-jahr ca. 15 GWh an elektrischer Energie erzeugen. Dies allein würde fast 2 % der im Masterplan solaren München bis 2035 geplanten Stromkapazität von 0,8 TWh durch PV-Anlagen im Münchner Stadtgebiet liefern. Das Potential ist durch die gute Skalierbarkeit über das gesamte Münchner Stadtgebiet allerdings riesig.

Die gesamte Energiemenge, welche durch direkte und indirekte solare Strahlung auf den in 4,50 Metern Höhe angebrachten Überdachungen eintrifft, ist denjenigen Untersuchungsgebieten, welche Straßenschluchten mit niedriger angrenzender Bebauung aufweisen, deutlich höher am maximal möglichen als in denjenigen mit hoher angrenzender Bebauung. Die Überdachungen der Untersuchungsbereiche der Kategorien 1 und 2 mit hoher angrenzender Bebauung weisen eine durchschnittlich 26 % geringere Energiemenge auf, als bei einer unverschatteten Flächen derselben Größe möglich wäre. Bei den Überdachungen der Kategorien 3 und 4 mit niedriger angrenzender Bebauung beträgt die Diskrepanz durchschnittlich nur rund 6 %. In den Kategorien 1 und 2 schneiden die auf der Nord-Süd-Achse verlaufenden Straßenschluchten in den Untersuchungsbereichen 1b und 2b zusätzlich überdurchschnittlich schlecht ab.

Grundsätzlich zeigt sich in allen Untersuchungen, dass Bebauung in Südosten, Süden und Südwesten den größten Einfluss auf die Verschattung der Überdachungsfläche haben. Deutlich zu sehen ist das an den Beispielen der Untersuchungsbereiche 2a, 2c, 2d und 4a.

Für die auf solare Erträge optimierten Konfigurationen der Überdachungen zeigen sich Verschattungen auf der Süd- und Südostseite als besonders gravierend. Fast alle Untersuchungsbereiche der Kategorie c, deren Straßenschlucht auf der Ost-West-Achse

liegt, haben die schlechtesten Ertragssteigerungen durch die Neigung der Paneelreihen. Lediglich die Überdachung des Untersuchungsbereichs 2c kann diesen Verlust durch die besondere Größe der Überdachung kompensieren. Auch der Untersuchungsbereich der Kategorie d mit einer Verschattung durch Gebäude direkt aus der Südost-Richtung kann nur deutlich unterdurchschnittliche Ertragssteigerungen durch die Neigung der Paneelreihen erzielen. Zusammengenommen erhalten diese Überdachungen mit ca. 50 % der eingesetzten Fläche nur deutlich unter 61 % des Energieertrags der waagerechten Überdachungen.

Die Überdachungen der Untersuchungsbereiche der Kategorien a und b profitieren vor allem bei niedriger Bebauung hingegen am stärksten von der angewinkelten Überdachungskonstruktion. Diese erhalten trotz des Einsatzes lediglich der Hälfte der Fläche noch durchschnittlich 65 % des Energieertrags der waagerechten Überdachungen.

Die individuelle Optimierung jedes einzelnen PV-Paneels, wie es für die Überdachung des Untersuchungsbereichs 1b durchgeführt wurde, scheint, wenn auch aufwendig, sehr vielversprechend zu sein. Die Steigerung des Energieertrags bei einer gleichzeitigen Einsparung von Paneelen könnte eine gute Maßnahme zur Steigerung der kosteneffizienz zu sein. Zusätzlich ergibt sich eine architektonisch interessante Form.

6. Ausblick

Diese Arbeit legt eine gute Grundlage für weitere Untersuchungen in diesem Bereich. Da die erfolgreiche individualisierte Optimierung von Photovoltaik-Paneele im Untersuchungsbereich 1b ein vielversprechendes Ergebnis lieferte, wäre die Möglichkeit einer Übertragung dieses Ansatzes auf die anderen Untersuchungsbereiche durchaus interessant zu untersuchen.

Eine weitere Untersuchung der besten Ergebnisse unter Berücksichtigung der tatsächlichen Oberflächentemperaturen der Straßenschluchten, des latenten Wärmestroms der Grünflächen und Bäume, der Wärmespeicherfähigkeit der in den Straßenschluchten verwendeten Baumaterialien sowie der anthropogenen Wärmeabgabe von Maschinen und Verkehr würde zusätzlich ein noch schärferes und realitätsnäheres Bild der Situation liefern. Dazu müsste jedes der Untersuchungsgebiete entsprechend der genannten Parameter vor Ort und en détail untersucht, vermessen und dokumentiert werden. Auch die Verkehrssituation müsste approximiert werden.

Um eine Überdachung der gezeigten Art zu realisieren, ist es unerlässlich, zusätzliche technische Lösungen für die Installation zu erarbeiten. Die Ausführung wie auch die Auswahl der Materialien der Überdachungen sowie der PV-Anlage kann die Ergebnisse der Simulation stark beeinflussen. Hier könnten weitere Simulationen mit detaillierteren Modellierungen der Überdachungen folgen, um die Einflüsse auf die zu überdachende Fläche und auf den Energieertrag bewerten und somit die optimale Lösung ermitteln zu können.

Interessant wäre zusätzlich eine Untersuchung der Auswirkung der Lichtverhältnisse unterhalb der Überdachungen sowie in den angrenzenden Gebäuden bei einem Einsatz von verschiedenen Materialien und Konfigurationen der Überdachungen. Durch eine nahezu vollständige Abdunkelung der überdachten Bereiche könnte der steigende Strombedarf durch den nötig werdenden Einsatz von künstlicher Beleuchtung den energetischen Nutzen teilweise konterkarieren. Außerdem wäre zu befürchten, dass die positiven sozialen Effekte durch die Rückgewinnung der Aufenthaltsqualität des Straßenraums an heißen Tagen durch die Erschaffung von dunklen, künstlich belichteten Straßenräumen ebenfalls kontradiktorisch zum erwünschten Effekt wirken.

Es bleibt daher noch zu erwähnen, dass neben der effektiven Kühlung der Straßenräume und der Menge an durch die PV-Anlage generierten elektrischen Energie auch die Akzeptanz der Bewohner für die Installation eine solche Überdachung übergeordnet wichtig ist. Diese lässt sich allerdings bis dato nicht über eine Computersimulation ermitteln.

Trotz allem wird durch die Ergebnisse dieser Thesis jedoch deutlich, dass Überdachungen wie die in dieser Untersuchung gezeigten einen wertvollen und wichtigen Beitrag zur Energiewende sowie zur Aufenthaltsqualität in Städten in Zeiten rasant steigender Temperaturen leisten können.

Literaturverzeichnis

- ASHRAE, A. (2017). ASHRAE Standard 55: Thermal environmental conditions for human occupancy. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: Atlanta, GA, USA*.
- Barack Hussein Obama II (2015, 30. November). *Äußerungen von Präsident Obama auf der ersten Sitzung der UN-Klimakonferenz*. UN-Klimakonferenz, Paris, Le Bourget.
- Bradtke, F. & Liese, W. (1952). *Hilfsbuch für raum- und außenklimatische Messungen für hygienische, gesundheitstechnische und arbeitsmedizinische Zwecke: Mit Berücksichtigung des Katathermometers* (Zweite, verbesserte Auflage). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-92569-6>
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.). (2023, 25. August). *Neues Europäisches Bauhaus (NEB)*. <https://www.nks-dit.de/weitere-foerdermoeglichkeiten/new-european-bauhaus>
- Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung. (2023, 6. September). *Klimaabkommen von Paris*. <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/klimaabkommen-von-paris-14602>
- Bundeszentrale für politische Bildung (25. November 2022). Industrialisierung/industrielle Revolution. *Bundeszentrale für politische Bildung*. <https://www.bpb.de/kurzknapp/lexika/lexikon-in-einfacher-sprache/328544/industrialisierung-industrielle-revolution/>
- Chokhachian, A. (2023). *Urban Microclimate Sensing & Modeling* [Vorlesung]. Technische Universität München, München.
- Dear, R. de [Richard], Brager, G. & D., C. (1997). Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference - Final Report on RP-884. *ASHRAE Transactions*, 104.
- Dentel, A. & Dietrich, U. (2005). *Thermische Behaglichkeit – Komfort in Gebäuden*. Hamburg. https://www.rom-umwelt-stiftung.de/wp-content/uploads/2006/02/Dokumentation_Thermische_Behaglichkeit.pdf
- der Heiden, M. an, Muthers, S., Niemann, H., Buchholz, U., Grabenhenrich, L. & Matzarakis, A. (2019). Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015 [Estimation of heat-related deaths in Germany between 2001 and 2015]. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 62(5), 571–579. <https://doi.org/10.1007/s00103-019-02932-y>
- Deutscher Wetterdienst (Hrsg.). (2023, 22. August). *Wetter und Klima: Basisfakten zum Klimawandel*. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimawandel_node.html;jsessionid=CC2B9CDD9C4C69A42B5F7C0CAC38C585.live31093
- Deutsches Institut für Normung e.V. (06.2007). *Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005* (DIN EN ISO 7730:2005). Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Europäische Kommission. (2023a, 25. August). *Europäischer Grüner Deal*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de
- Europäische Kommission (Hrsg.). (2023b, 25. August). *New European Bauhaus*. https://new-european-bauhaus.europa.eu/index_en
- Fanger, P. O. (1970). Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. (2013). *Richtlinien für die Anlage von Landstraßen RAL*. FGVS: Bd. 201. FGVS-Verl.

- Geisser, P. (2017). Grau, Grün und Blau: die Bodennutzung in München. In *Münchner Statistik* (4. Quartalsheft 2017, S. 14–23). https://stadt.muenchen.de/dam/jcr:93314652-5c20-4bea-b303-f2eb3160526a/MueSta_4_17_Grau%2CGruen%2520und%2520Blau_die%2520Bodennutzung%2520in%2520Muenchen.pdf (Erstveröffentlichung 2017)
- Gerhardt, N., Sandau, F. & Deutsch, M. (2015). *Wie hoch ist der Stromverbrauch in der Energiewende?* Agora Energiewende. <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/dfbde46-aef7-4e52-bbd7-b170e9358f20/details>
- Graw, K., Muthers, S. & Matzarakis, A. (2019). Hitzewellen und Hitzewarnungen in Städten. *Warnsignal Klima: Die Städte*, 152–158.
- Hausladen, G [G.], Saldanha, M. de [M.], Sager, C. & Liedl, P [P.]. (2005). *ClimaDesign: Lösungen für Gebäude, die mit weniger Technik mehr können*. Callwey.
- Hausladen, G [Gerhard], Liedl, P [Petra] & Saldanha, M. de [Michael]. (2012). Klimagerecht Bauen: Ein Handbuch. In G. Hausladen, P. Liedl, M. de Saldanha, A. Gref, B. Liedtke & S. Schwarz (Hrsg.), *Klimagerecht Bauen: Ein Handbuch* (Online-Ausg, S. 61–67). Birkhäuser. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9783034612111/html?lang=de>
- Hegger, M. (2007). *Energie Atlas: Nachhaltige Architektur* (1. Aufl.). *Edition Detail*. Inst. für Internationale Architektur-Dokumentation; De Gruyter. <https://www.degruyter.com/isbn/9783034614498> <https://doi.org/10.11129/detail.9783034614498>
- Henninger, S. & Weber, S. (2020). *Stadtklima. UTB: Band 4849*. Ferdinand Schöningh.
- IEA. (2018). *The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning* (License: CC BY 4.0). Paris. IEA. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>
- IPCC. (2023a). *Climate change 2021: The physical science basis : Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2021-the-physical-science-basis/415F29233B8BD19FB55F65E3DC67272B> <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IPCC. (2023b, 23. August). IPCC. <https://www.ipcc.ch/>
- Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Weihs, P., Batchvarova, E. & Dear, R. de [R.] (2009). Der Thermische Klimaindex UTCI. *Klimastatusbericht*, 96–101.
- Kemen, J. & Kistemann, T. (2019). Gesundheitliche Gefährdungen in Städten. *Warnsignal Klima: Die Städte*, 113–119.
- Kenkmann, T [T.], Stieß, I., Winger, C., Birzle-Harder, B. & Sunderer, G. (2019). „Entwicklung des Energiebedarfs für die Wohngebäudeklimatisierung in Deutschland 2030/2050“ 11. *Internationale Energiewirtschaftstagung, Wien*.
- Kriele, A. & Krug, W. (2014). *Die Bildungsregion Neuperlach in Zahlen*. <https://www.pimuenchen.de/profil/wir-ueber-uns/stabsstelle-kommunales-bildungsmanagement/kommunales-bildungsmonitoring/bildungsregion-neuperlach-in-zahlen/>
- Kümpel, N. (2022). *Poly- und monokristalline Module im Vergleich*. <https://www.wegatech.de/ratgeber/photovoltaik/grundlagen/poly-oder-monokristalline-module/>
- Ladybug Tools LLC. (2023). *Ladybug Tools*. <https://www.ladybug.tools/index.html#header-slide-show>
- Lepik, A. & Strobl, H. (Hrsg.). (2020). *Die Neue Heimat (1950-1982): Eine sozialdemokratische Utopie und ihre Bauten* (Zweite Auflage). Edition DETAIL; Architekturmuseum der TUM.
- Lozán, J. L., Breckle, S.-W., Graßl, H., Kasang, D. & Matzarakis, A. (2019). *Städte im Klimawandel*. Universität Hamburg. <https://www.fdr.uni-hamburg.de/record/9360> <https://doi.org/10.25592/uuhfdm.9360>
- Maaß, C., Werner, R. & Häsel, S. (05.2020). *Ausbauoffensive Erneuerbare Energien der Stadtwerke München: Zwischenbilanz, regionale Potenziale und Ausblick*. Hamburg. https://www.hamburg-institut.com/wp-content/uploads/2021/06/Studie_Ausbauoffensive_Erneuerbare_Energien_SWM.pdf

- Michael, T. (2015). *Diercke Weltatlas* (1. Aufl.). Westermann. http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=5128820&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm
- Nass, O. (2023, 5. September). *UTCI - Universal Thermal Climate Index*. <http://www.utci.org/index.php>
- NEBourhoods (Hrsg.). (2023, 25. August). *Creating NEBourhoods Together*. <https://www.nebourhoods.de/>
- Nerdinger, W. & Barthel, R. (Hrsg.). (2005). *Frei Otto - das Gesamtwerk: Leicht bauen, natürlich gestalten ; [anlässlich der Ausstellung "Frei Otto - Leicht Bauen, Natürlich Gestalten" im Architekturmuseum der TU München in der Pinakothek der Moderne vom 26. Mai bis 28. August 2005]*. Birkhäuser. http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/webclient/DeliveryManager?application=DIGITool-3&owner=resourcediscovery&custom_att_2=simple_viewer&user=GU-EST&pid=1507316
- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung. (2022). *Klimaschutzgesetz: Klimaneutralität bis 2045*. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>
- Robert McNeel & Associates. (2023). *Rhinoceros 3D*. <https://www.rhino3d.com/>
- Sangster, W. (1871). *Umbrellas and their History*. Cassell, Petter, and Galpin.
- Schmidt, C. (2016). *Entwicklung eines Modellansatzes zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit unter inhomogenen Klimabedingungen* (HT019010313) [Dissertation]. RWTH Aachen, Aachen. <https://publications.rwth-aachen.de/record/658613/files/658613.pdf>
- Scott Davidson. (2023). *Grasshopper 3D*. <https://www.grasshopper3d.com/>
- SL Rasch GmbH. (2023, 7. September). *Special & Lightweight Structures - SL Rasch*. <https://www.sl-rasch.com/de/>
- Masterplan solares München (2023). <https://risi.muenchen.de/risi/dokument/v/7771851>
- structure GmbH. (2023, 7. September). *structure – Lightweight Design. Made in Stuttgart*. <https://www.structure.com/>
- Süddeutsche Zeitung (5. Juli 2023). Klimawandel: Zwei globale Temperaturrekorde innerhalb einer Woche. *Süddeutsche Zeitung*. <https://www.sueddeutsche.de/wissen/klimawandel-hitze-temperaturrekord-el-nino-weltweit-1.6000076>
- Timpe, C., Kenkmann, T [Tanja], Hesse, T., Mundt, J., Maaß, C., Kapfer, J., Claas-Reuther, J., Rudolf, A. & Kluth, T. (11.2021). *Maßnahmenplan Klimaneutralität München: Im Auftrag der Landeshauptstadt München*. Freiburg, Hamburg, München. Öko-Institut e.V.; HIC Hamburg Institut Consulting GmbH; INTRAPLAN Consult GmbH.
- Timpe, C., Kenkmann, T [Tanja], Hesse, T., Reise, J., Maaß, C., Westholm, H., Claas-Reuther, J., Mundt, J., Kapfer, J. & Gerlach, M.-J. (08.2022). *Abschlussbericht zum Fachgutachten Klimaneutralität München 2035*. Freiburg, Hamburg, München. Öko-Institut e.V.; HIC Hamburg Institut Consulting GmbH; INTRAPLAN Consult GmbH.
- Umweltbundesamt. (2023, 23. August). *Häufige Fragen zum Klimawandel*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/haeufige-fragen-klimawandel#klima>
- Verein Deutscher Ingenieure e. V. (06.2022). *Umweltmeteorologie: Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas* (VDI 3787). Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- W. Kuttler (2010). Urban climate: Part 1. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft*, 70(7), 329–340. https://www.researchgate.net/publication/285954221_Urban_climate_Part_1
- Weiß, M. (6. September 2023). Sommer 2023 war so heiß wie nie - und ein Klimaphänomen baut sich gerade erst auf. *Süddeutsche Zeitung*. <https://www.sueddeutsche.de/wissen/hitze-sommer-temperatur-rekord-klimawandel-1.6199594>
- Wirth, H. (2023, 17. Mai). *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. Fraunhofer ISE. www.pv-fakten.de

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Textpassagen, die wörtlich oder dem Sinn nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

München, den 31. Oktober 2023

Unterschrift (Autor) :