

Professur für Hydrologie
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br.

Philipp Zurmöhle

Kleinräumliche Variabilität der potenziellen Verdunstung in und unter städtischen Bäumen

Referent: Prof. Dr. Markus Weiler

Korreferent: Prof. Dr. Jens Lange

Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg i.Br., Dezember 2022

Inhaltsverzeichnis

I.	Verzeichnis der Abbildungen im Text	IV
II.	Verzeichnis der Tabellen im Text	VI
	Danksagung	- 1 -
	Zusammenfassung	- 2 -
1	Einleitung	- 2 -
1.1	Hinführung zum Thema	- 2 -
1.2	Vorgehen	- 3 -
2	Stand der Forschung	- 5 -
3	Problemstellung und Zielsetzung	- 8 -
3.1	Problemstellung	- 8 -
3.2	Ziel der Arbeit	- 8 -
4	Grundlagenwissen	- 10 -
4.1	Verdunstung	- 10 -
4.2	Solarstrahlung	- 12 -
4.2.1	Allgemein	- 12 -
4.2.2	Im Stadtbaum	- 12 -
4.3	LiDAR	- 14 -
4.4	Charakteristika der untersuchten Baumarten	- 15 -
4.4.1	Spitzahorn (<i>Acer platanoides</i>)	- 15 -
4.4.2	Winterlinde (<i>Tilia cordata</i>)	- 16 -
5	Methoden und Vorgehensweisen	- 17 -
5.1	Standortauswahl und Standortbeschreibung	- 17 -
5.1.1	Untersuchungsgebiet	- 17 -
5.1.2	Beschreibung der Messstandorte	- 20 -
5.2	Laufende Messungen der Doktorarbeit	- 27 -
5.2.1	Baummorphologische Messungen	- 27 -
5.2.2	BFI (Blattflächenindex)	- 27 -
5.2.3	Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit	- 27 -
5.2.4	Kurzwellige Sonnenstrahlung	- 27 -
5.2.5	Saftstrom	- 27 -
5.3	Zusätzliche meteorologische Datenerhebung	- 29 -
5.4	Messung der kurzwelligen Einstrahlung für die vorliegende Arbeit	- 29 -
5.4.1	Messdurchführung	- 29 -
5.4.2	Messskizzen	- 29 -
5.5	Verarbeitung der Rohdaten	- 32 -
5.5.1	Kalibrierung & Umrechnung der Messwerte	- 32 -

5.5.2	Ermittlung der Tagesgänge	- 32 -
5.5.3	Ermittlung der Lichtdurchlässigkeit der individuellen Bäume	- 32 -
5.6	Erfassung der LIDAR-Daten.....	- 33 -
5.7	Modellierung der Sonneneinstrahlung	- 34 -
5.7.1	Arc GIS Pro (Version: ArcGIS Pro 3.0.3)	- 34 -
5.7.2	Modellierung der solaren Einstrahlung mit SOLWEIG	- 36 -
5.8	Messdatenanalyse.....	- 43 -
5.8.1	Deskriptive Darstellung der Ergebnisse.....	- 43 -
5.8.2	Test auf signifikante Unterschiede in der Einstrahlung	- 43 -
5.8.3	Umrechnung der solaren Einstrahlung in die potenzielle Verdunstung.....	- 43 -
6	Ergebnisse	- 44 -
6.1	Modellvalidierung	- 44 -
6.1.1	Visuelle Prüfung der Modellgüte.....	- 44 -
6.1.2	Gütemaße	- 47 -
6.2	Messedatenanalyse	- 48 -
6.2.1	Transmissionsgrad	- 48 -
6.2.2	Standortvergleich / Darstellung und Analyse von Boxplots	- 48 -
6.2.3	Vergleich der Messhöhen	- 54 -
6.2.4	Vergleich nach Exposition.....	- 55 -
6.2.5	Unterschiede der Einstrahlung in Bodennähe versiegelt / unversiegelt	- 59 -
6.3	Potenzielle Verdunstung	- 60 -
6.3.1	Innerhalb der Baumkrone	- 60 -
6.3.2	Direkt unter der Baumkrone	- 61 -
7	Diskussion.....	- 63 -
7.1	Mobile Messung der kurzwelligen Einstrahlung im Baum.....	- 63 -
7.2	Modellierung	- 63 -
7.2.1	Modellierung mit Arc GIS Pro	- 63 -
7.2.2	Modellierung mit SOLWEIG	- 63 -
7.2.3	Modellvalidierung.....	- 63 -
7.3	Messdatenanalyse.....	- 64 -
7.3.1	Transmissionsgrad	- 64 -
7.3.2	Analyse der grafischen Darstellung der Messergebnisse.....	- 65 -
7.3.3	Mann-Whitney-U-Test.....	- 67 -
7.3.4	Berechnungsmethode der potenziellen Verdunstung.....	- 67 -
7.3.5	Kleinräumliche Variabilität der potenziellen Verdunstung in und unter städtischen Bäumen	- 68 -
8	Schlussfolgerung.....	- 69 -
9	Ehrenwörtliche Erklärung	- 71 -

Literaturverzeichnis.....	- 72 -
10 Anhang.....	- 75 -

I. Verzeichnis der Abbildungen im Text

Abbildung 1:	Flächenversiegelung in Deutschland von 1993-2018 aus „Nachhaltige Entwicklung in Deutschland – Indikatorenbericht“ (2021).	2 -
Abbildung 2:	Schematischer Überblick über Fernerkundungsmethoden zur Schätzung der Einstrahlung unter der Baumkrone ((A. Olpenda et al., 2018)	6 -
Abbildung 3:	Verdunstungskomponente modifiziert nach Fohrer et al., (2016)	10 -
Abbildung 4:	Elektromagnetisches Spektrum aus (“Introduction to the Electromagnetic Spectrum Science Mission Directorate,” 2010)	12 -
Abbildung 5:	Berechnungsansatz nach Nyman et al., (2017). Modifiziert aus A. S. Olpenda et al., (2018)	13 -
Abbildung 6:	Laserrückgaben nach Wellenlängerm und Laufzeit aus (“Was sind LIDAR-Daten?—ArcGIS Pro Dokumentation,” 2015).	15 -
Abbildung 7:	Typische Blattform und Frucht des Spitzahorn aus Heß et al., (1977).	15 -
Abbildung 8:	Typische Blattform und Frucht der Winterlinde aus Heß et al., (1977)	16 -
Abbildung 9:	Übersichtskarte der Baumstandorte und Standort der Wetterstation „Chemiehochhaus“	18 -
Abbildung 10:	Übersichtskarte der einzelnen Bäume ; rot markiert die vermessenen Bäume je Standort.....	19 -
Abbildung 11:	Messpunktskizze	29 -
Abbildung 12:	Geländemessungen; Montage der Messkonstruktion, Messdurchführung	30 -
Abbildung 13:	Kalibriergerade	32 -
Abbildung 14:	Beispielhafte Darstellung des Sichtfeldes.....	35 -
Abbildung 15:	Einstellung desSolarstrahlungswerkzeug aus Arc GIS Pro	36 -
Abbildung 16:	Schematische Modellstruktur des SOLWEIG Modells .(Lindberg et al., 2018) -	37 -
Abbildung 17:	Gebäuderaster, Baumkronenraster mit Höheninformation und Baumkronenmorphologie und berechnete Horizontüberhöhung am Beispiel HHS9	39 -
Abbildung 18:	Eingabefenster des SOLWEIG-Modells.....	41 -
Abbildung 19:	Vergleichende Darstellung von Messergebnissen (schwarz) und Modellierungsergebnissen (rot) für die Baumart Winterlinde	45 -
Abbildung 20:	Vergleichende Darstellung von Messergebnissen (schwarz) und Modellierungsergebnissen (rot) für die Baumart Spitzahorn.....	46 -
Abbildung 21:	Bestimmte Gütemaße, Abweichung der Residuen, Verteilung der Residuen .	47 -
Abbildung 22:	HHS9_WL1 „klare“ Messung	49 -
Abbildung 23:	HHS9_WL1 „diffuse“ Messung	49 -
Abbildung 24:	Boxplots der vermessenen Winterlinden bei „klaren“ Messbedingungen.....	50 -
Abbildung 25:	Boxplots der vermessenen Spitzahorne bei „klaren“ Messbedingungen.....	51 -
Abbildung 26:	Boxplots der vermessenen Winterlinden bei „diffusen“ Messbedingungen...	52 -
Abbildung 27:	Boxplots der vermessenen Spitzahorne bei „diffusen“ Messbedingungen.....	52 -

Abbildung 28:	Vergleich der Baumarten über die Höhe bei Messbedingung „klar“ und „diffus“ - 54 -
Abbildung 29:	Boxplots nach Messpunkten zusammengefasst - 55 -
Abbildung 30:	Netzdiagramm für TUF_SA3 bei diffusen und klaren Messbedingungen..... - 56 -
Abbildung 31:	Netzdiagramm für JCBS_WL1 und WL2 und URS21_SA2 bei diffusen und klaren Messbedingungen - 57 -
Abbildung 32:	Netzdiagramm für GTS71_SA2 und SWB22_SA2 bei diffusen und klaren Messbedingungen - 58 -
Abbildung 33:	Netzdiagramm für IVM2_WL1 bei diffusen und klaren Messbedingungen ... - 59 -
Abbildung 34:	Tagesgang der potenziellen Verdunstung innerhalb der Baumkrone - 60 -
Abbildung 35:	Tagesgang der potenziellen Verdunstung direkt unter der Baumkrone..... - 61 -
Abbildung 36:	Berechnete Reduzierung der potenziellen Verdunstung für jeden Baum - 62 -
Abbildung 37:	Visuelle Prüfung der Messdaten auf „Normalverteilung“ - 77 -
Abbildung 38:	Testergebnisse bei klarer Messung..... - 77 -
Abbildung 39:	Testergebnisse bei diffuser Messung - 77 -
Abbildung 40:	Messpunkte 3D-Ansicht SMS und HHS..... - 78 -
Abbildung 41:	Gemessener (schwarz) und modellierter (rot) Tagesgang der kurzwelligen Einstrahlung an Baum SWB19_SA2 - 79 -
Abbildung 42:	Gemessener (schwarz) und mdellierter (rot) Tagesgang der kurzwelligen Einstrahlung an Baum IVM2_WL1..... - 80 -
Abbildung 43:	Modelloutput der kurzwelligen Einstrahlung, beispielhaft für IVM_WL1. Schwarzen Punkte= Messspunkte im Baum. Grün hinterlegt, Raster der aus LiDAR Daten erstellten Baumkronen..... - 81 -

II. Verzeichnis der Tabellen im Text

Tabelle 1:	Richtwerte für die solare Einstrahlung	- 14 -
Tabelle 2:	Übersicht über die Baumstandorte / charakteristische Standorteigenschaften	- 17 -
Tabelle 3:	Fotodokumentation und Charakteristika der vermessenen Bäume	- 22 -
Tabelle 4:	Messzeitpunkte der vermessenen Bäume	- 31 -
Tabelle 5:	Informationen zur Erfassung der Strukturoberfläche der Stadt Freiburg.....	- 33 -
Tabelle 6:	Kommentierte Klassifizierung der erfassten LiDAR-Daten.....	- 33 -
Tabelle 7:	Ermittelte Transmissionsgrade [%] der Bäume / Messung bei klaren und diffusen Wetterbedingungen.....	- 48 -
Tabelle 8:	Mittleren Transmissionsgrade über den Tag anhand der Nord/Süd installierten Pyranometer bestimmt	- 65 -
Tabelle 9:	Charakteristische Eigenschaften der vermessenen Bäume	- 67 -

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben. Zuerst möchte ich meinem Betreuerteam Herrn Prof. Markus Weiler und Markus Anys für ihre wertvollen Kommentare und Anregungen zu dieser Arbeit danken. Ein besonderes Dankeschön gilt Markus Anys, der mich an den Messungen seiner Doktorarbeit teilnehmen ließ, immer für Rückfragen bereit stand und mir die Daten seiner laufenden Messungen zur Verfügung stellte. Ein herzlichen Dank gilt auch Andreas Steinbrich, der mir bei GIS-Fragen Auskunft und Hilfestellung leistete.

Mein herzlicher Dank gilt auch meiner Familie und meiner Freundin, die mich sowohl bei Geländemessungen unterstützt haben als auch bei der Erleichterung des alltäglichen Lebens, sodass ich mich auf die Ausarbeitung dieser Masterarbeit konzentrieren konnte.

Abschließend möchte ich mich besonders bei meinen Eltern bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für mich hatten.

Zusammenfassung

Die Erhaltung und Entwicklung von städtischen Grünflächen gewinnt auf dem Hintergrund der Bevölkerungszunahme in Städten, der Klimaerwärmung und dem Nutzungsdruck auf die verbleibenden Grünflächen zunehmend an Bedeutung. Hier übernehmen haben Stadtbäume wegen ihrer vertikalen Raumnutzung und daraus resultierend der vergleichsweise niedrigen Aufstandsfläche (Kronenfläche) eine besondere Bedeutung für das Stadtklima. Diese spenden in unterschiedlichem Umfang je nach Größe und Form direkten Schatten, kühlen durch die Verdunstung die nahe Umgebung und produzieren Sauerstoff.

Haupttreiber der potenziellen Verdunstung in und unterhalb städtischer Bäume ist die Intensität der ankommenden Solarstrahlung und die morphologische Charakteristik des Baums. Neben anderen baummorphologischen Kenngrößen wie Größe, Kronenlänge- und Radius, Kronenprojektionsfläche- und Kronenvolumen beschreibt der Blattflächenindex (BFI) und die Blattflächendichte (BFD) wichtige Parameter bei der Untersuchung der potenziellen Verdunstung.

Um Aussagen über die potenzielle Verdunstung in und um Stadtbäume zu erhalten, wird in sechs Untersuchungsgebieten in Freiburg an zwei häufigen Baumarten (7 Winterlinden - *Tilia cordata* und 8 Spitzahornen – *Acer platanoides*) die solare Einstrahlung gemessen. In und um die insgesamt 15 Bäume wird in 1 Meter, 4 Meter, 7 Meter und 10 Meter Höhe an jeweils 96 Messpunkten die solare Einstrahlung gemessen. Diese Daten werden als Grundlage für die Modellvalidierung verwendet und für eine umfangreiche Datenanalyse herangezogen. Die grafische Darstellung der Messdaten in Boxplots und in Netzdiagrammen lässt eine einzelbaumweise Interpretation der Variabilität der Blattverteilung in der Baumkrone zu.

Die Prüfung der Modellierung in ArcGIS Pro gelangt zum Ergebnis, dass mit den hier enthaltenen Werkzeugen zur Berechnung der Solareinstrahlung die Transmissionsgrade der Baumkrone nicht berücksichtigt werden. Das Vorgehen und die Erkenntnisse sind dokumentiert. Die Modellierung nach SOLWEIG kann die Transmissionsgrade der Baumkrone berücksichtigen und wird deshalb für die Modellierung der solaren Einstrahlung in Baumkronen geprüft. Eine Modellierung und Validierung wird durchgeführt und beschrieben. Es bestätigt sich hier die Erkenntnis, die bereits bei der Prüfung in ArcGIS Pro gewonnen wurde. Auf der Grundlage von LiDAR-Daten, die in unbelaubtem Zustand aufgenommen wurden, sind validierbare Ergebnisse für Bäume in belaubtem Zustand nicht zu erreichen. In der einzelbaumweisen grafischen Darstellung der Modellierungsergebnisse sind im Vergleich zu den Messdaten die überhöhten Ergebnisse der Modellierung deutlich zu erkennen.

In der gewählten Baumstichprobe können bei der kurzwelligen solaren Einstrahlung zwischen Bäumen auf unversiegelten Flächen gegenüber der Messungen von Bäumen auf versiegelten Flächen keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden.

Die Untersuchung der kleinräumlichen Variabilität der Verdunstung kommt zu folgendem Ergebnis: Die potenzielle Verdunstung in und unterhalb der Baumkrone variiert im Tagesverlauf und korreliert mit dem Tagesgang der kurzwelligen solaren Einstrahlung. Sie wird in Abhängigkeit von den baummorphologischen Eigenschaften in unterschiedlichem Umfang reduziert. Zur Mittagszeit kann bei Bäumen mit hohem BFI und BFD eine geringere potenzielle Verdunstung festgestellt werden.

Es können Unterschiede in der berechneten potenziellen Verdunstung zwischen den Messungen bei klaren Wetterbedingungen gegenüber von Messungen bei diffuser Wetterlage belegt werden. Obgleich die berechnete potenzielle Verdunstung bei klarem Wetter aufgrund der stärkeren Einstrahlung höher liegt, wird die potenzielle Verdunstung um etwa 10 % mehr reduziert. Zwischen den Standorten sind bei diffuser und klaren Wetterbedingungen keine deutlichen Unterschiede zu erkennen.

Auf der Grundlage der Erkenntnisse der Modellvalidierung formuliert der Verfasser in der Schlussfolgerung einen Ausblick für die Fortsetzung bzw. weitere, vertiefende Untersuchungen.

Abstract

The preservation and development of urban green spaces is becoming increasingly important against the background of population growth in cities, global warming and the pressure of use on the remaining green spaces. Here, urban trees take on a special significance for the urban climate due to their vertical use of space and the resulting comparatively low footprint (crown area). To varying degrees depending on their size and shape, these trees provide direct shade, cool the nearby environment through evaporation, and produce oxygen.

The main driver of potential evaporation in and below urban trees is the intensity of incoming solar radiation and the morphological characteristics of the tree. In addition to other tree morphological characteristics such as size, crown length and radius, crown projection area and crown volume, leaf area index (LAI) and leaf area density (LAD) describe important parameters in the study of potential evapotranspiration.

To obtain information about the potential evapotranspiration in and around urban trees, solar irradiance is measured in six study areas in Freiburg on two common tree species (7 lime trees - *Tilia cordata* and 8 norway maples - *Acer platanoides*). In and around the total of 15 trees, the solar irradiance is measured at 1 m, 4 m, 7 m and 10 m height at 96 measuring points each. These data are used as a basis for model validation and for extensive data analysis. The graphical representation of the measured data in boxplots and in network diagrams allows an individual tree-by-tree interpretation of the variability of the leaf distribution in the tree canopy.

The review of the modeling in ArcGIS Pro concludes that the solar irradiance calculation tools included do not account for tree canopy transmittance. The procedure and findings are documented. SOLWEIG modeling can account for tree canopy transmittance and is therefore being evaluated for modeling solar irradiance in tree canopies. A modeling and validation is performed and described. The findings already obtained from the testing in ArcGIS Pro are confirmed here. Based on LiDAR data acquired in an unfoliated state, validatable results for trees in a foliated state cannot be achieved. In the single-tree graphical representation of the modeling results, the inflated results of the modeling are clearly visible compared to the measured data.

In the selected tree sample, no significant differences can be found in shortwave solar irradiance between trees on unsealed surfaces compared to measurements on sealed surfaces.

The investigation of the small-scale variability of evaporation comes to the following conclusion: The potential evaporation in and below the tree canopy varies during the day and correlates with the diurnal variation of the short-wave solar irradiation. It is reduced to varying degrees depending on tree morphological characteristics. At midday, lower potential evaporation can be observed for trees with high LAI and LAD.

Differences in calculated potential evaporation can be evidenced between measurements made during clear weather conditions versus measurements made during diffuse weather conditions. Although the calculated potential evaporation is higher in clear weather due to the higher irradiance, the potential evaporation is reduced by about 10% more. No significant differences are seen between sites under diffuse and clear weather conditions.

Based on the findings of the model validation, the author formulates an outlook for continuation or further, more in-depth investigations in the conclusion.

Stichpunkte, die die Arbeit zusammenfassen: LiDAR, GIS-Modellierung, Modellierung der solaren Einstrahlung mit SOLWEIG, Messung der solaren Einstrahlung, Winterlinde (*T. cordata*), Spitzahorn (*A. platanoides*), Messdatenanalyse

1 Einleitung

1.1 Hinführung zum Thema

In Zukunft wird mit einem Bevölkerungszuwachs und einer räumlichen Umlagerung der Bevölkerung zu rechnen sein. Für das Jahr 2050 wird prognostiziert, dass 70 % der Bevölkerung in Städten lebt (Kiss et al., 2015). Einhergehend ist die Zunahme der Flächeninanspruchnahme.

Siedlungen und insbesondere große städtische Gebiete verändern die Umwelt erheblich. Die Luftqualität in Städten wird von Industrie und Straßenverkehr stark beeinflusst. Mehr Menschen in Städten benötigen auch mehr Wohnraum. Dafür werden weitere Flächen versiegelt. Diese künstliche Bedeckung (z. B. Beton, Asphalt) beeinflussen den Energiehaushalt der städtischen Regionen und damit die lokalen klimatischen Bedingungen (Pongrácz et al., 2010). Eines der am häufigsten untersuchten Phänomene im Zusammenhang mit Städten ist der Effekt der städtischen Wärmeinsel (z. B. Blankenstein and Kuttler, (2004)

Die gegenwärtige Struktur der Flächeninanspruchnahme für Siedlungs- und Verkehrszwecke zeigt zum Stichtag 31.12.2021 folgendes Bild: 14,5 % und damit 5,2 Millionen Hektar der Gesamtfläche Deutschlands wird für Siedlungs- und Verkehrszwecke in Anspruch genommen. Davon entfallen 9,4 % (3,4 Millionen Hektar) auf die Siedlungsfläche (einschließlich Bergbaubetrieb, Tagebau, Grube und Steinbruch) und 5,1 % (1,8 Millionen Hektar) auf die Verkehrsfläche. In der nachfolgenden Grafik ist als Indikator für Deutschland der durchschnittliche tägliche Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche in Hektar pro Tag dargestellt. Obgleich der Flächenverbrauch seit dem Jahr 2000 mit ca. 120 ha/Tag auf 56 ha/Tag im Jahr 2018 gesunken ist, ist der Flächenverbrauch noch sehr hoch. Siedlungs- und Verkehrsfläche sind in der Grafik nicht gleichzusetzen mit versiegelter Fläche. Nach Berechnungen der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen der Länder wird der Versiegelungsanteil der Siedlungs- und Verkehrsfläche im Länderdurchschnitt auf 45 % geschätzt. D.h. dass im Jahr 2018 täglich excl. der Teilversiegelungen in Sport, Freizeit- und Erholungsflächen ca. 21,5 ha Fläche neu und vollversiegelt werden.

Anstieg der Siedlungs- und Verkehrsfläche in Hektar pro Tag

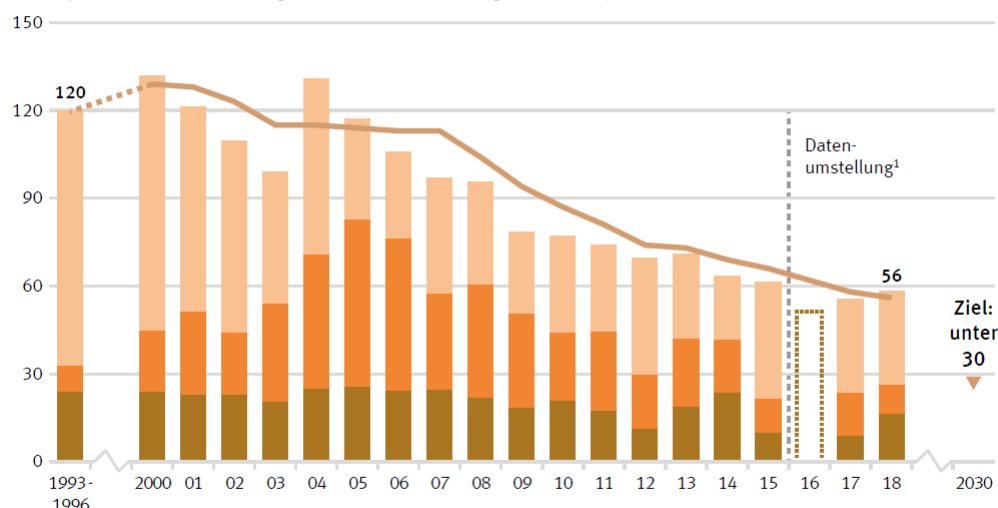
Siedlungsfläche:

Wohnbau, Industrie und Gewerbe (ohne
Abbauland), Öffentliche Einrichtungen

Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche, Friedhof

Verkehrsfläche

gleitender Vierjahresdurchschnitt



¹ Die Datenbasis für Auswertungen der Siedlungs- und Verkehrsfläche ist die amtliche Flächenerhebung. Ab dem Berichtsjahr 2016 basiert diese auf dem Amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS). Dadurch ist der Vergleich zu den Vorjahren beeinträchtigt und die Berechnung von Veränderungen erschwert. Die nach der Umstellung ermittelte Siedlungs- und Verkehrsfläche enthält weitgehend dieselben Nutzungsarten wie früher.
Quelle: Statistisches Bundesamt

Abbildung 1: Flächenversiegelung in Deutschland von 1993-2018 aus „Nachhaltige Entwicklung in Deutschland – Indikatorenbericht“ (2021).

Um mit anhaltender anthropogener Klimaerwärmung ein angenehmes Stadtklima zu erhalten, kommt der Vegetation eine hohe Bedeutung zu. Neben der Sauerstoffproduktion ist die direkte Verschattung und die Kühlungswirkung durch Verdunstung für die Verbesserung des Stadtklimas verantwortlich. Ohne Stadtbegrünung wird sich in der „Wärmeinsel Stadt“ die lufthygienische Situation für die Stadtbewohner verschlechtern. Der Kühlungseffekt durch die Verdunstung wird unter Annahme ausreichender Wasserverfügbarkeit primär durch die solare Einstrahlung gesteuert. Eine höhere solare Einstrahlung führt potenziell zu einer höheren Verdunstung und damit zur Kühlung der Umgebung. Stadtbäume, insbesondere großen Stadtbäumen kommt dabei im Gegensatz zu Wiesenflächen eine besondere Bedeutung zu, da auf vergleichbar kleiner Grund- bzw. Standfläche ein hoher Anteil an photosynthesewirksamer Blattoberfläche verfügbar ist. D. h. die verbleibende Grünfläche wird für die lufthygienische Verbesserung des Stadtklimas besonders effizient genutzt.

Daraus resultiert die Frage, welche Bäume bzw. Baumarten und unter welchen Standortbedingungen diese Funktionen am besten erfüllen.

1.2 Vorgehen

Am 08.06.2022 wurde die Fachtagung „Baumstandorte der Zukunft - Herausforderungen und Lösungsmöglichkeiten“ der FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e.V.) besucht. Hier wurde die Problematik von Stadtbäumen im Hinblick auf Wassermangel, zunehmender Verdichtung bzw. Versiegelung des Untergrunds und Klimaerwärmung vorgestellt. Es wurden Lösungsmöglichkeiten in Orientierung an das „Stockholmer Modells“ diskutiert. Kurze Erläuterung des Stockholmer Modells: Hierbei wird der Baumstandort so gestaltet, dass er trotz hoher Versiegelung effizient genutzt wird. Über ein bestimmtes Substrat und einem bestimmten Einbauverfahren wird Stabilität als auch Nährstoffversorgung sowie Wasserspeicherung gewährleistet.

Mit der Bearbeitung der Masterarbeit wurde am 13.06.2022 begonnen. In einer vierwöchigen Literaturrecherche wurden Veröffentlichungen im Hinblick auf das Thema analysiert und relevante Aussagen zusammengefasst. Die Ausarbeitung wurde dem Betreuer Herr Prof. Weiler am 13.07.2022 vorgelegt und auf dieser Grundlage das weitere Vorgehen der Geländearbeit festgelegt.

Parallel zu den Geländearbeiten wurde mit der Modellierung der Solarstrahlung mit den zur Verfügung gestellten Werkzeugen in ArcGIS Pro begonnen. Die spezifischen Werkzeuge in diesem Programm wurden auf seine Anwendbarkeit im Hinblick die Fragestellung geprüft. Der Verfasser gelangte nach Prüfung zum Ergebnis, dass dieses Modell den Transmissionsgrad der Vegetation nicht erfassen kann. Das Vorgehen und die Erkenntnisse sind in vorliegender Arbeit dokumentiert. Nachdem dieses Ergebnis durch Herr Prof. Weiler geprüft und bestätigt wurde, wurde nach erneuter Prüfung anderer Modellierungsansätze am 10.11.2022 auf das bereits im Forschungsstand dargestellte Modell SOLWEIG gewechselt.

Als weiteres, wichtiges Ergebnis der Modellierung in ArcGIS Pro war festzustellen, dass die zur Verfügung gestellten und in unbelaubtem Zustand erfassten LiDAR-Daten für die Modellierung von Bäumen in belaubtem Zustand (Untersuchungsziel Variabilität in Bäumen) auch im Hinblick auf die Validierung der Messungen ungeeignet bzw. nur sehr eingeschränkt geeignet sind.

Die Messungen an 96 Messpunkten in jedem der 15 Bäume konnte am 31.08.2022 abgeschlossen werden. Um die erforderliche Messhöhe in den Bäumen zu erreichen, wurde vom Verfasser eine Teleskopstange mit einer Messhöhe bis zu 14 m beschafft und auf deren Tauglichkeit geprüft. Ab einer Messhöhe von ca. 5 m war es damit nicht mehr möglich, die Messposition ausreichend gut zu halten. Darum entwickelte der Verfasser ein variables Stecksystem aus Aluminiumrohren, das sich im Gelände besser bewährte (siehe Kapitel 5.4.1). Der zugehörige Sensor zur Messung der Solarstrahlung wurde seitens der Universität zur Verfügung gestellt und musste während der Arbeiten mehrfach in Stand gesetzt werden.

Bestimmend für die weitere Vorgehensweise war zum einen die Erkenntnis, dass ArcGIS Pro für die Modellierung der Solareinstrahlung in und unter der Baumkrone nicht geeignet ist. Zum anderen das Ergebnis, dass die Modellierung von Bäumen im belaubten Zustand auf der Grundlage von LiDAR-

Daten, die in unbelaubtem Zustand aufgenommen wurden, grundsätzlich nicht möglich ist. Dennoch wurde die grundsätzliche Funktion der Modellierung nach SOLWEIG geprüft und beschrieben. In Folge konzentrierte sich der Verfasser in der kurzen verbleibenden Bearbeitungszeit auf eine Darstellung und Analyse der eigenen Messdaten. Die ursprüngliche Zielsetzung der Masterarbeit musste im Hinblick auf die in Aussicht stehenden Ergebnisse modifiziert werden.

2 Stand der Forschung

Wie in der Einleitung beschrieben wird, bekommt der Stadtbegrünung als Steuerelement des Mikroklimas eine zunehmende Bedeutung zu. Eines der wichtigsten Steuerelemente ist der durch die Transpiration bewirkten Kühlungseffekt. Haupttreiber der Transpiration ist wiederum die solare Einstrahlung. In Rahman et al., 2019 wurde das Transpirations- und Kühlungspotential von zwei Baumarten, Winterlinde (*Tilia cordata*) und Platane (*Robinia pseudoacacia*) in München untersucht. Dafür wurden Baummorphologische -und meteorologische Messungen durchgeführt. Anhand der Globalstrahlung und Saftflussmessungen wird die Transpiration der untersuchten Bäume abgeschätzt. Das Ergebnis der Studie war, dass *T. cordata* im Vergleich zur *R. pseudoacacia* eine dreimal höhere Transpiration aufweist. Damit einhergehend war auch der Kühlungseffekt innerhalb der Baumkrone bei dieser Baumart wesentlich höher. Die Oberflächenabkühlung von *T. cordata* war unter dichten Baumkronen höher als die der *R. pseudoacacia* über Asphaltflächen. Die Oberflächenkühlung für Grasflächen unterschied sich nicht signifikant unter den beiden Baumarten. Eine Regressionsanalyse ergab, dass die Oberflächentemperatur von Grasflächen mit der Zunahme des Blattflächenindex (BFI) um 3 °C abnimmt. Bei Asphalt war dieser Effekt mit etwa 6° C Temperaturabnahme deutlich ausgeprägter. Das Resultat dieser Studie war, dass Arten mit höherer Kronendichte über Asphaltflächen bevorzugt werden, wohingegen Arten mit geringerer Kronendichte auf Grasflächen.

Die Studien von Konarska et al., 2015) und Wessolek and Kluge, 2021) beschäftigen sich ebenfalls mit der Transpiration von städtischen Bäumen. In Konarska et al., 2015) wird wie in (Rahman et al., 2019) die Transpiration über Messungen am Baum quantifiziert. In (Wessolek and Kluge, 2021) wird sie anhand von Boden-Wasserfunktionen kurz HPTF (Hydro Pedo Transfer Functions) und dem Aufstellen eines SVAT-Modells (Soil Vegetation Atmospheric Transpiration) modelliert. Im Gegensatz zu den genannten Veröffentlichung wird hier die Evapotranspiration nicht primär aus Messungen im und um den Baum, sondern vom Ansatz der Bodeneigenschaften aus, geschätzt.

Folgende Veröffentlichungen beschäftigen sich mit der Modellierung der Verdunstung, Strahlungstemperatur und Solarstrahlung anhand von stadtgeometrischen Daten und der Bestimmung von Horizontüberhöhungen (engl. Sky view factor). Horizontüberhöhungen quantifizieren den Anteil des Himmels, der von einem Beobachtungspunkt aus sichtbar ist. In Chen et al., 2012) wird das Mikroklima der Stadt Hongkong untersucht. Dabei wird ein Überblick über bereits vorhandenen Methoden zur Bestimmung der Horizontüberhöhungen gegeben sowie eine selbst entwickelter GIS-basierter Ansatz zur Berechnung der Horizontüberhöhung vorgestellt. In der Studie „Sky-View Faktor als Vorhersagemaß für langwellige Einstrahlung“ von Blankenstein and Kuttler, 2004) wird die Beziehung zwischen der abwärts gerichteten langwelligen Strahlung, der Lufttemperatur und Horizontüberhöhung untersucht. Dabei wurden die Parameter Lufttemperatur und langwellige Strahlung mit Messfahrten an bestimmten Messtransekten in der Stadt Krefeld gemessen. Ein Hauptergebnis dieser Untersuchung war, dass in Anwesenheit von Bebauung und einem geringen SVF die Intensität der städtischen Wärmeinseln zunahm.

In der Veröffentlichung “The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation“, wird der Einfluss der Vegetation und Gebäude auf die mittlere Strahlungstemperatur und die Schattenmuster in städtischen Gebieten untersucht. Dabei wird ein in QGIS integrierbares Modell der solaren und langwelligen „Umweltbestrahlungsgeometrie“ kurz SOLWEIG, mitentwickelt von Lindberg et al. (2008), verwendet. Als Eingabe benötigt das Modell die globale kurzwellige Strahlung, die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, geografische Informationen wie Breitengrad, Längengrad und Höhe und die städtische Geometrie, die durch hochauflösende digitale Boden- und Gebäudehöhenmodelle (DEM) dargestellt wird. Als Modellergebnis liefert das Modell die mittlere Strahlungstemperatur sowie die ankommende solare Einstrahlung (Siehe Kapitel 5.7.2).

Das Paper „Nature of vegetation and building morphology characteristics across a city: Influence on shadow patterns and mean radiant temperatures in London“ verfasst von (Lindberg and Grimmond, 2011a) untersucht die Merkmale der Vegetation und der Gebäudemorphologie an 19 Standorten auf einem Nord-Süd-LiDAR-Transekt durch London. Als Ergebnis der Untersuchung wird festgestellt,

dass die mittleren Gebäudehöhe und die Bebauungsflächendichte im Stadtzentrum am höchsten sind. Dies korrelierte in dieser Untersuchung positiv mit der mittleren Vegetationshöhe, die auch im Stadtzentrum am höchsten war. Aus den LiDAR-Daten werden verschiedene morphologische Parameter sowie Schattenmuster abgeleitet (Lindberg and Grimmond, 2011b).

Die wissenschaftliche Zeitschrift Hydrology and Earth Science kurz "HESS" veröffentlichte 2021 folgendes Paper „Downscaling potential evapotranspiration to the urban canyon von M. Koelbing et al. (2021)

Dies ist eine Studie, die ebenfalls im Untersuchungsgebiet dieser Masterarbeit stattfand. Dabei wurden mithilfe einer mobilen Klimastation Parameter das städtischen Mikroklimas erfasst und anhand dieser Beobachtungen die potenzielle Verdunstung auf Straßenebene simuliert. Mit der mobilen Klimastation wurde in zwei Straßenschluchten in Freiburg an acht ausgewählten Messstellen gemessen. Die Messungen fanden in Bereichen mit hoher Vegetationsdichte und geringer Vegetationsdichte statt. Gemessen wurde die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, die Windgeschwindigkeit, die einfallende kurzwellige Strahlung sowie die Infrarot-Oberflächentemperatur am Boden. Die Messungen fanden im Frühling, Sommer und Herbst der Jahre 2016 und 2017 an ausgewählten Messtagen statt. Der tägliche Beobachtungszeitraum begann in jeder Jahreszeit ca. zwei Stunden nach Sonnenaufgang und endete zwei Stunden vor Sonnenuntergang. Zusätzlich dienten zwei Referenzklimastationen zum späteren Abgleich der simulierten Werte. Im Gelände wurde mit einer Kamera der Grad der Horizontüberhöhung erfasst.

Anhand der gemessenen Werte wurde die FAO-56 (Food and Agriculture organisation) Penman-Monteith Referenz-Evapotranspiration (Allen and Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998a) berechnet. Hauptergebnis der Untersuchung war, dass die potenzielle Evapotranspiration am empfindlichsten auf Veränderungen der einfallenden kurzwelligen Strahlung reagiert. Die Änderung der einfallende kurzwellige Strahlung auf Bodenebene wird hauptsächlich durch die Beschattung von Gebäuden und höhere Vegetation verursacht. Dies führt generell zu einer Abnahme der potenziellen Evapotranspiration in Bodennähe im Vergleich zur höheren, auf einem Dach gelegenen Referenzstation.

In (A. Olpenda et al., 2018) wird ein schematischer Überblick über die gängigsten Fernerkundungsmethoden und deren Datengrundlagen zur Ermittlung der Solarstrahlung, gegeben. In Abbildung 2 sind diese dargestellt. Hauptgruppen sind die Terrestrischen Laser Scandaten (TLS) und die Airborne Laserscandaten (ALS). Über die Rekonstruktion von geometrischen Formen (z. B. Bäume) erfolgen anhand dieser Datengrundlage mehrere Modellierungsmöglichkeiten.

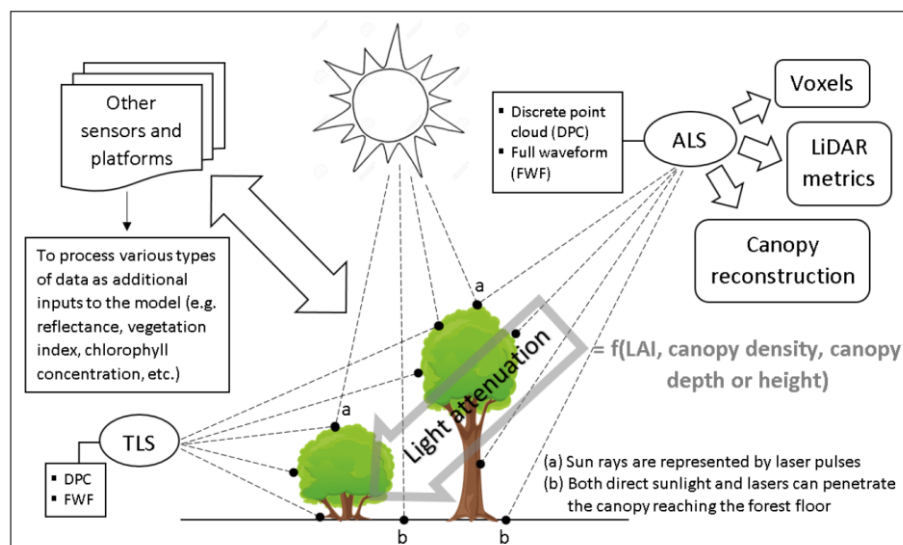


Abbildung 2: Schematischer Überblick über Fernerkundungsmethoden zur Schätzung der Einstrahlung unter der Baumkrone ((A. Olpenda et al., 2018)

Anhand der dargestellten Literatur wird folgende Forschungslücke formuliert: Vorhanden sind mehrere, vor allem GIS basierte Modelle zur Modellierung der Solarstrahlung in städtischen Strukturen. Ansätze zur Implementierung der Vegetation und deren Einfluss auf die Einstrahlung und Evapotranspiration sind ebenfalls vorhanden. Auch gibt es Verdunstungsberechnungen/Modellierungen auf großskaligeren Ebenen wie zum Beispiel Straßenschluchten. Die Variabilität der Verdunstung in der Baumkrone (kleinräumige Skala) wurde in den oben genannten und weiteren gesichteten Literatur noch nicht untersucht.

Ebenfalls ist der Einfluss des Schattenwurfs der bebauten städtischen Strukturen auf die Vegetation bis dato noch unzureichend untersucht worden. Damit einhergehend ist durch die Beschattung der Gebäude und die Beschattung des Baums selbst die eintreffende Solarstrahlung und somit die potenzielle Verdunstung direkt außerhalb der Baumkrone und innerhalb der Baumkrone sehr variabel. Dies gilt es zu untersuchen.

3 Problemstellung und Zielsetzung

3.1 Problemstellung

Die im Forschungsstand dargestellten Forschungsergebnisse zeigen, dass die potenzielle Verdunstung in Städten sehr stark von der Einstrahlung abhängt. Dabei wird der Einfluss des Schattenwurfs der Gebäude und des Baums selbst und damit die Veränderung der potenziellen Verdunstung innerhalb und um die Baumkrone noch nicht berücksichtigt.

Bäume in der Stadt bzw. in Verdichtungsräumen gewinnen zunehmend an Bedeutung. Durch die Photosyntheseleistung wird unter Lichtzufuhr Sauerstoff produziert und Wasser verbraucht. Einerseits wird durch die Pumpleistung von Bäumen Wasser verdunstet das ansonsten Zusatzkosten für die Ableitung von Oberflächenwasser verursachen würde. Andererseits sorgt die Sauerstoffproduktion und die Abkühlung durch Verdunstung sowie die Verschattungswirkung zu einer Verbesserung der lufthygienischen Situation und damit der Gesundheit des Menschen.

Durch die zunehmende Bebauung bzw. Innenverdichtung in den Städten nimmt der Anteil der Grünflächen ab. Auf den verbleibenden Flächen nimmt die Bedeutung der vertikalen gegenüber der horizontalen Begrünung (z.B. Rasen- Wiesenflächen) zu, da Bäume auch im Vergleich zur vertikalen Fassadenbegrünung den Vorteil zeigen, dass diese bei geringer Flächenbeanspruchung eine hohe lichtabsorbierende Oberfläche bieten und damit die Pumpwirkung und die Sauerstoffproduktion wesentlich höher ist.

Diese Wirkungen des Baumes werden primär bestimmt durch die Größe und Blattoberfläche des Baumes, d.h. der Baumart sowie der Kontaktfläche zwischen Blatt und Licht und dem Anteil des verfügbaren Wassers. Die photosynthesewirksame Kontaktfläche zwischen Blatt und Licht wird wiederum beeinflusst durch die Lage des Blattes im Baum und der Verschattung durch benachbarte Bäume oder/und Gebäude. Die Verfügbarkeit von Wasser hängt von der Art der Bodendeckung insbesondere im Kronenbereich (versiegelt, teilversiegelt, unversiegelt), der Bodenart sowie der Zufuhr von Oberflächenwasser ab. D.h. die Baumartenwahl sowie die Standortwahl oder/und die Gestaltung des Baumstandortes beeinflusst die lufthygienische Leistung des Stadtbaumes maßgeblich.

3.2 Ziel der Arbeit

Auf diesem Hintergrund verfolgt die vorliegende Arbeit im Rahmen einer weiter gefassten Dissertation folgende Ziele:

- Als Grundlage für die weitergehende Untersuchung wird an einer Stichprobe in und unter der Baumkrone von 7 Winterlinden und 8 Spitzahorn die solare Einstrahlung gemessen. Dadurch wird die Verschattungswirkung innerhalb der Baumkrone zu unterschiedlichen Tageszeiten abgebildet.
- Dazu soll eine Messtechnik entwickelt werden, mit der eine möglichst stabile Positionierung für Wiederholungsmessungen am gleichen Messpunkt und in großer Höhe in der Baumkrone ermöglicht.
- Aus den Messungen werden die Transmissionsgrade der einzelnen Bäume ermittelt und bei der Modellierung nach SOLWEIG als Eingangsparameter verwendet.
- Daraus soll die tägliche Einstrahlung und die daraus resultierende Reduzierung der potenziellen Verdunstung bestimmt werden.
- Es sollen Modelle (Solarstrahlungstool ArcGIS Pro und das Modell SOLWEIG) anhand von 3-D LiDAR-Daten auf ihre Funktionsfähigkeit für die Modellierung der solaren Einstrahlung in Stadtbäumen geprüft werden.
- Anschließend werden die Ergebnisse nach Modellierung mit SOLWEIG mit den eigenen Messungen verglichen, um damit das Modell zu validieren.

- Messdatenanalyse: Anhand der Ergebnisse der eigenen Messung wird die kleinräumliche Variabilität der Einstrahlung dargestellt und analysiert.

Anhand der Messdatenanalyse werden Aussagen darüber getroffen;

- Wie sich das Einstrahlungsverhalten bei klarem Himmel und demgegenüber bei bedecktem Himmel, d.h. bei diffuser Wetterlage unterscheidet ?
- Ob, bzw. wie sich die Einstrahlung und daraus resultierend die potenzielle Verdunstung zwischen den Baumarten und den Standorteigenschaften unterscheidet ? Bei den Standorteigenschaften werden folgende Merkmalsgruppen untersucht:
 - Verschattet – unverschattet;
 - Versiegelt – unversiegelt.

4 Grundlagenwissen

4.1 Verdunstung

Steuergröße für die Verdunstung ist die Temperatur und damit einhergehend die Sonneneinstrahlung. Je höher die Temperatur, desto mehr Wasserdampf kann potenziell in der Atmosphäre gehalten werden.

„**Verdunstung ist nach DIN 4049-3** ein Prozess, bei dem Wasser bei Temperaturen unter dem Siedepunkt vom festen und flüssigen Aggregatzustand in den gasförmigen übergeht“ (Fohrer et al., 2016). Sie wird wie folgt unterteilt und definiert:

Als **Evaporation** wird die Verdunstung über unbewachsenen Landflächen, freien Wasserflächen und vom Menschen künstlich geschaffenen Oberflächen bezeichnet. Sie folgt dabei ausschließlich den physikalischen Gesetzmäßigkeiten.

Die **Interzeptionsverdunstung** ist die Verdunstung des Niederschlags, welcher bei einem Niederschlagsereignis auf der Blattoberfläche liegen bleibt und von dort aus in die Atmosphäre übergeht.

Die **Transpiration** definiert die Verdunstung von Pflanzenoberflächen. Dabei wird vorwiegend Wasser über die Spaltöffnungen der Blätter an die Umwelt abgegeben.

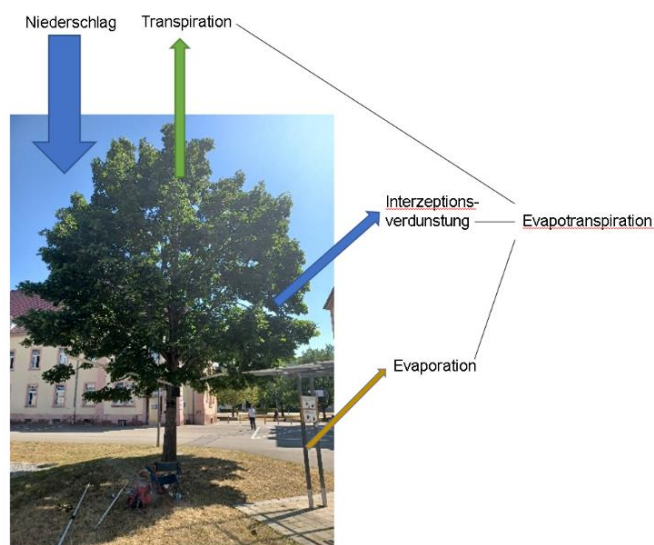


Abbildung 3: Verdunstungskomponente modifiziert nach Fohrer et al., (2016)

Die Überlagerung dieser Prozesse wird als **Evapotranspiration** bezeichnet. Diese quantifiziert die vollständige Verdunstung an einem bestimmten Ort mit Vegetationsbedeckung. (Fohrer et al., 2016).

„Die Evapotranspirationsrate wird normalerweise in Millimetern (mm) pro Zeiteinheit ausgedrückt. Die Rate drückt die Menge des von einer Oberfläche verlorenen Wassers in Einheiten der Wassertiefe aus. Die Zeiteinheit kann eine Stunde, ein Tag, ein Jahrzehnt, ein Monat oder sogar eine ganze Wachstumsperiode oder ein Jahr sein“ (Allen and Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998b).

„Die Verdunstung von Wasser erfordert relativ große Mengen an Energie, entweder in Form von fühlbarer Wärme oder Strahlungsenergie. Daher wird der Verdunstungsprozess durch den Energieaustausch an der Vegetationsoberfläche bestimmt und ist durch die verfügbare Energiemenge begrenzt. Aufgrund dieser Begrenzung ist es möglich, die Evapotranspirationsrate durch Anwendung des Energieerhaltungssatzes vorherzusagen. Die Energie, die an der Oberfläche ankommt, muss der Energie entsprechen, die die Oberfläche im gleichen Zeitraum verlässt“ (Allen and Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998b).

$$R_n + B + H + L = 0 \quad (4-1)$$

Dabei ist R_n die Nettostrahlung, H die fühlbare Wärme, B der Bodenwärmestrom und L der latente Wärmestrom. „Die verschiedenen Terme können entweder positiv oder negativ sein. Bei positivem

R_n wird der Oberfläche Energie zugeführt, bei positivem B, H und L wird der Oberfläche Energie entzogen“ (Allen and Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998b).

„Die wichtigsten Wetterparameter, die sich auf die Evapotranspiration auswirken, sind Strahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit. Es wurden mehrere Verfahren entwickelt, um die Verdunstungsrate anhand dieser Parameter zu ermitteln“ (Allen and Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998a).

Gängigste Methode zur Verdunstungsbestimmung ist der Ansatz nach Penman-Monteith, welcher die direkte aktuelle Verdunstung berechnet.

„Dieser Ansatz basiert auf einem Widerstandskonzept in Analogie zum elektrischen Strom und geht davon aus, dass der Wasserstrom von den Wurzeln bis in die Atmosphäre verschiedene Widerstände überwinden muss. Berücksichtigt werden der Stomata- bzw. Bestandswiderstand r_s und der aerodynamische Widerstand r_a . Der Stomatawiderstand hängt von der Strahlung und der Wasserversorgung der Pflanze ab, r_a von der Windgeschwindigkeit, Höhe und Struktur des Pflanzenbestands“ (Fohrer et al., 2016).

Da die benötigten Eingangsgrößen wie der Bestandswiderstand der Vegetation und der aerodynamische Widerstand meistens sehr schwer zu ermitteln sind, wird die Verdunstungsleistung der Atmosphäre, also die potenzielle Verdunstung durch die Evapotranspiration der Grasreferenzverdunstung (ET_0) ausgedrückt. Dies ist ein Spezialfall des Penman-Monteith-Ansatzes und gibt die potenzielle Verdunstung über einer Grasbestand mit 12 cm Wuchshöhe und unlimitierter Wasserverfügbarkeit und 23 % Reflexionsvermögen, an. Dabei wird die unlimitierte Wasserverfügbarkeit über einen minimalen Bestandswiderstand der Größe $r_s = 70 \text{ s/m}$ und der aerodynamische Widerstand durch die Beziehung $r_a = 208/v_{2m}$ bestimmt (4-1).

$$ET_{pot} = \frac{s \times R_n}{s + \gamma_{mod}} + \frac{90 \times \gamma}{s + \gamma_{mod}} \times v_{2m} \times \frac{e_s}{T + 273} \times \left(1 - \frac{u}{100}\right) \quad (4-2)$$

Dabei ist T die Lufttemperatur in [°C], v_{2m} die Windgeschwindigkeit in 2m Höhe [m/s], R_n die Nettostrahlung in [mm/d], γ_{mod} der modifizierte Wert der psychometrischen Konstante γ , $\gamma_{mod} = \gamma \times (1 + 0,34 \times v_{2m})$ und u die relative Luftfeuchte in %.

Für den Fall, dass die benötigten Klimadaten nicht oder nur unvollkommen vorhanden sind schlägt Wendling (1995) zitiert in (Fohrer et al., 2016) eine vereinfachte Formel zur Berechnung der Grasreferenzverdunstung vor. Dabei wird als Eingabe die ankommende Globalstrahlung R_G in [J/cm²], die mittlere Monats oder Tagestemperatur T in [°C], die Höhenlage h der Messtation ü. NN (bei $h > 600 \text{ m}$ gilt $h = 600 \text{ m}$), n_M die Anzahl der Monatstage bei Berechnung von Monatswerten, bei Tageswerten =1, k der Küstenfaktor (zu berücksichtigen bis 50 km Abstand zur Küste mit $k = 1 - (\varphi - 53 - (\lambda - 8/6))$ und λ, φ geographische Längen und Breitengrade, benötigt. Es gilt $k = 1$ bei $k > 1$ und $k = 0,5$ bei $k < 0$.

$$ET_0 = \frac{(R_G + 93 \times k) \times (T + 22)}{165 \times (T + 22)} \times \frac{n_M}{1 + 0,00019 \times h} \quad (4-3)$$

Nach dieser vereinfachten Berechnung der Grasreferenzverdunstung muss diese über den k_c Faktor in die maximal mögliche Verdunstung des betrachtenden Bestands C umgerechnet werden.

$$ET_{potC} = k_c \times ET_0 \quad (4-4)$$

Zu Beginn der Wachstumsphase(in diesem Fall Austriebszeit der Bäume) gilt in der Regel $k_c < 1$. $K_c = 1$, wird etwa mit dem Höhepunkt der Blütezeit und k_{cmax} zum Zeitpunkt des höchsten BFI erreicht vgl (Fohrer et al., 2016)

4.2 Solarstrahlung

4.2.1 Allgemein

Die am Oberrand der Atmosphäre ankommende Solarstrahlung auch kurzwellige Strahlung genannt, wird zu 20-30 % absorbiert und zu 20-30 % zurück in den Weltraum reflektiert. Ca. 50 % durchdringen die Erdatmosphäre und gelangen bis auf die Erdoberfläche. Die an der Erdoberfläche ankommende Solarstrahlung wird auch als Globalstrahlung bezeichnet. Die Intensität der auf die Erdatmosphäre treffende Strahlung wird in der Solarkonstante quantifiziert. Sie ist die maximal mögliche Energie, welche die Sonne bei mittleren Abstand zur Erde auf ein senkrechte zur Strahlungsrichtung ausgerichtete Oberfläche aufbringt. In (Li et al., 2011) sind Werte für die Solarkonstante zusammengefasst. Nach Literaturrecherche in (Li et al., 2011) variiert die mittlere globale Solarkonstante von 1353-1373 W/m². Die Strahlungsanteile im auf der Erde eintreffenden Licht sind der ultraviolette Bereich von 300-380 nm, der sichtbare Bereich von 380-750 nm und die ultrarote Strahlung von 750-3000 nm. Die Hälfte der kurzwelligen Strahlung kommt aus dem sichtbaren Bereich. Etwa die andere Hälfte aus dem ultraroten Bereich. Die ultraviolette Strahlung macht nur etwas mehr als 8 % des Gesamtspektrums aus. „Das gesamte Spektrum der absorbierten Strahlung treibt die Photosynthese an, fördert die Verdunstung, lässt Schnee und Eis schmelzen und erwärmt die Erde“ („Climate and Earth's Energy Budget,” 2009). Abbildung 4 stellt das elektromagnetische Spektrum mit den oben genannten Wellenlängenbereichen dar.

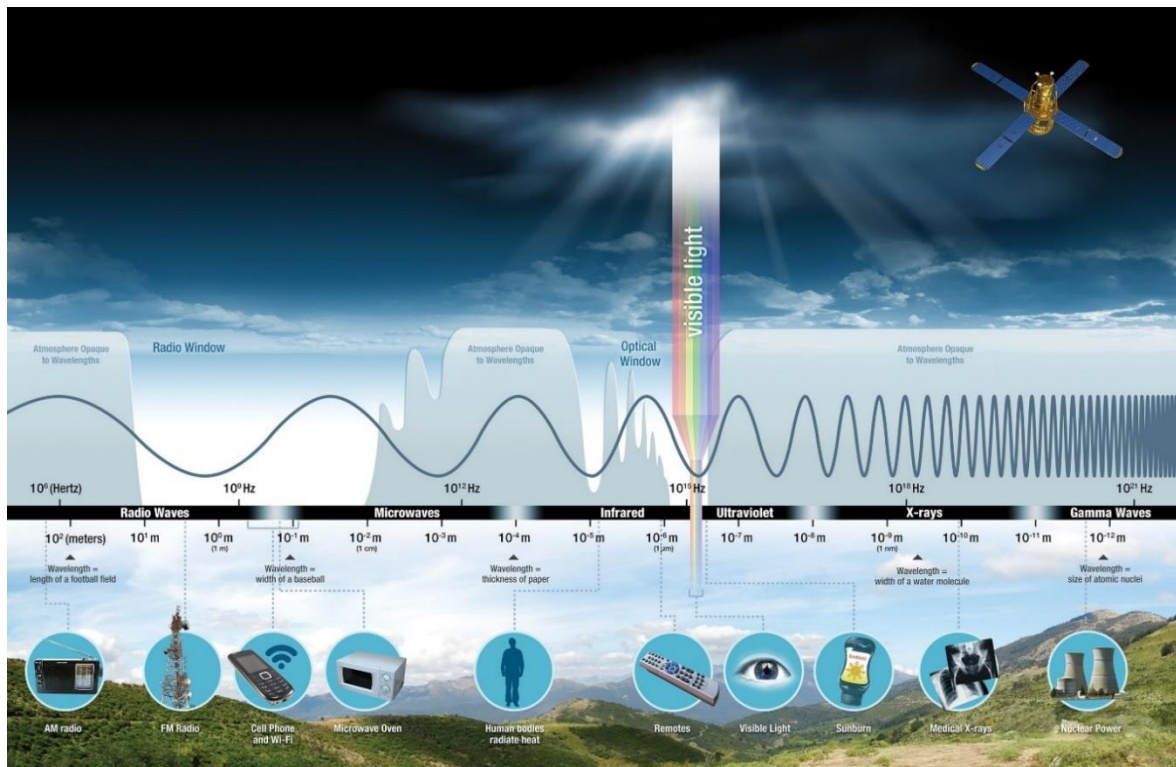


Abbildung 4: Elektromagnetisches Spektrum aus („Introduction to the Electromagnetic Spectrum | Science Mission Directorate,” 2010)

4.2.2 Im Stadtbaum

Die an der Baumkronenoberfläche auftretende Globalstrahlung besteht aus der kurzwellige Strahlung mit einer Wellenlänge von 300 bis 3000 nm. Sie setzt sich aus der direkten Sonnenstrahlung und der diffusen Himmelsstrahlung aus allen Richtungen kommend, zusammen (Schwoerbel and Brendelberger, 2013). Sobald die kurzwellige Strahlung die Baumoberfläche erreicht, finden drei Arten von Wechselwirkungen statt: Absorption, Transmission und Reflexion. Deren Zusammensetzung wird hauptsächlich von den Eigenschaften der Wellenlänge der Energie, dem Material und der Beschaffenheit der Oberfläche bestimmt. Nach (Schwoerbel and Brendelberger,

2013) gilt in Mitteleuropa ein mittlere Strahlungsverlust durch Reflexion von 3% im Sommer und 14% im Winter, von dem auf der Erdoberfläche auftretende Licht. Nach Brown und Gillespie zitiert in (A. Olpenda et al., 2018) absorbiert eine einzelne Blattschicht im Allgemeinen 80 % der einfallenden sichtbaren Strahlung, während sie 10 % reflektiert und die restlichen 10 % hindurchlässt. Die Infrarotstrahlung wird zu 20 % absorbiert, 50 % reflektiert und 30% passieren die Blattschicht. Wie groß diese Anteil sind , hängt in erster Linie vom Sonnenstand, der Blattgeometrie und Blattmenge des Baumes ab. Die direkte Strahlung in der Baumkrone eines stark belaubten Baums ist meist heterogener als die diffuse Himmelstrahlung, da sie von den Faktoren des Zusammentreffen des Sonnenpfads mit einer Lücke im Blätterdach des Baumes, der Verdeckung der der Sonne durch Wolken, den Windbedingungen und damit der Bewegung der Blätter und Äste abhängt. Die direkte Strahlung, die durch eine Öffnung in der Baumkrone fällt, wird auch als Sonnenfleck bezeichnet. Generell ist die ankommende diffuse Strahlung meist homogener, und variiert innerhalb der Baumkrone nicht so stark, da sie von der Himmelschelligkeit, der Anzahl, Größe und räumlichen Verteilung der Sonnenflecken, der Kronengeometrie und den optischen Eigenschaften der Umgebung abhängt. In städtischen Strukturen kann die diffuse Strahlung innerhalb eines Stadtbaums je nach optischen Eigenschaften der Umgebungsbebauung (Reflexion, Absorption und Transmission) stärker variieren (zum Beispiel bei hohem Reflexionsanteil der Umgebung). Die Sonneneinstrahlung, die unterhalb der Baumkrone und auf dem Erdboden ankommt, wird im Transmissionsgrad ausgedrückt. Dieser ist im Allgemeinen eine Stoffeigenschaft und wird durch das Lambert-beersche Gesetz ausgedrückt. In der Baumkrone hängt dieser von der Dicke und Dichte der Baumkrone ab. Je dichter und Dicker die Baumkrone ist desto weniger Strahlung kommt unter der Baumkrone an. Der zurückgehaltene Strahlungsanteil ist die Extinktion oder Attenuation. Der Transmissionsgrad wird wie folgt berechnet:

$$I = I_0 e^{kB} \quad (4-5)$$

Dabei ist I die Strahlungsintensität unter der Baumkrone, I_0 die ankommende Solarstrahlung direkt oberhalb der Baumkrone, k der Extinktionskoeffizient und B der Blattflächenindex (BFI). Der Extinktionskoeffizient hängt von der Verteilung der Blattwinkel, d. h. wie die Blätter im Raum zueinander stehen, der Struktur des Kronendachs und der Blattflächendichte ab (A. Olpenda et al., 2018). Für eine angenommene kugelförmige Blattwinkelverteilung wird k als Funktion des solaren Zenit Winkels θ angenähert (Macfarlane et al., 2007) zitiert in (A. Olpenda et al., 2018).

$$k = 0,5 \times \cos \theta \quad (4-6)$$

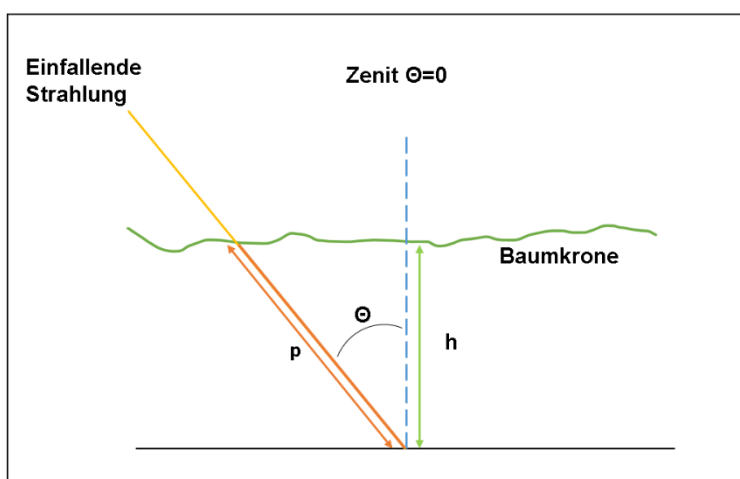


Abbildung 5: Berechnungsansatz nach Nyman et al., (2017).
Modifiziert aus A. S. Olpenda et al., (2018)

In Nyman et al., (2017) zitiert in (A. S. Olpenda et al., 2018) wird eine andere Methode zur Messung des Transmissionsgrads in Abhängigkeit von der Weglänge (P), vorgestellt. „Bei diesem Ansatz werden die Dichte der Vegetation und die Extinktionskoeffizienten zu einem einzigen Parameter kombiniert, der die Absorptionsrate pro Pfadlängeneinheit beschreibt. Die Weglänge des direkten Strahls wird als das Verhältnis zwischen der Höhe der Baumkronen und dem Kosinus

des Zenitwinkels θ der Sonne berechnet (Abbildung 5). Die Wahrscheinlichkeit der Abschwächung einer einfallenden Strahlung ist direkt proportional zur Weglänge selbst, zur Blattdichte (Verhältnis

von BFI und Baumkronenhöhe) und zu der dem Lichtstrahl zugewandten Blattfläche“ (A. S. Olpenda et al., 2018). Die solare Strahlungsenergie wird häufig als Energiestromdichte in W/m^2 gemessen. In nachfolgender Tabelle sind Richtwerte für die, in den mittleren Breiten auf der Nordhalbkugel ankommende Einstrahlung zusammengefasst. („Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Leistungen - Global-, Diffus- und Direktstrahlung (Monats- und Jahressummen sowie Abweichungen),“ 2022)

Tabelle 1: Richtwerte für die solare Einstrahlung

Wetterverhältnisse	Einstrahlung [W/m^2]	
	Sommer	Winter
größtenteils klarer Himmel	bis 1.000	bis 500
leicht bis mittlere Bewölkung	bis 600	bis 300
starke Bewölkung	bis 300	bis 150

4.3 LiDAR

LiDAR (Light Detection And Ranging) ist eine optische Fernerkundungstechnologie, die Laserlicht verwendet, dass die Erdoberfläche scannt, um hochgenaue X-, Y- und Z-Messwerte zu vermessen. „LiDAR wird hauptsächlich für die Kartierung in luftgestützten Laseranwendungen verwendet und setzt sich zunehmend als kostengünstige Alternative zu herkömmlichen Vermessungstechniken wie der Photogrammetrie durch“. LiDAR erzeugt Massenpunktwolken-Datensätze, die mit zum Beispiel ArcGIS, QGIS oder andere frei verfügbaren Softwares verarbeiten werden können.

Für die Erfassung wird ein Flugzeug, ein Laser, ein GPS-System und ein Trägheitsnavigationssystem, dass die Roll und Neigungswinkel des Lasers misst, benötigt. LiDAR ist ein aktiver optischer Sensor. Während er sich entlang einer bestimmten Vermessungsrouten bewegt, sendet er Laserpulse aus. Diese werden an einem Hindernis reflektiert. Die Laserreflexionen vom Ziel werden vom Empfänger des LiDAR-Sensors erfasst und analysiert. Die Empfänger erfassen die genaue Zeit zwischen der Emission und der Rückkehr des Laserpulses und berechnen so die Entfernung zwischen dem Sensor und dem Ziel. In Kombination mit Positionsinformationen (GPS und Trägheitsnavigationssystem) bestimmen diese Entfernungsmessungen das tatsächliche „3D-Bild“ des reflektierenden Ziels.

„Die von einem LiDAR-System ausgegebenen Laserpulse reflektieren von Objekten auf und oberhalb der Bodenoberfläche: Vegetation, Gebäude, Brücken usw. Ein ausgegebener Laserpuls kann einfach oder auch mehrfach zum LiDAR-Sensor zurückgegeben werden. Wenn ein ausgegebener Laserpuls auf seinem Weg zum Boden auf mehrere Reflexionsoberflächen trifft, wird er in ebenso viele Rückgaben wie Reflexionsoberflächen geteilt“.

Der zuerst wieder eintreffende Laserpuls ist die wichtigste Rückgabe und wird dem höchsten Punkt einer der Bodenoberfläche zugeordnet, Zum Beispiel einem Baumwipfel oder dem Dach eines Gebäudes. „Die erste Rückgabe kann auch den Boden darstellen; in diesem Fall erkennt das LiDAR-System nur eine Rückgabe. Bei mehreren Rückgaben ist es möglich, die Höhen mehrerer Objekte innerhalb des Laser-Fußabdrucks eines ausgehenden Laserpulses zu erkennen. Die mittleren Rückgaben werden im Allgemeinen für die Vegetationsstruktur verwendet und die letzte Rückgabe wird für Bodenoberflächenmodelle verwendet. Die letzte Rückgabe muss nicht immer vom Boden stammen. So kann beispielsweise ein Puls auf einen dicken Ast treffen und den Boden gar nicht erreichen. In diesem Fall stammt die letzte Rückgabe nicht vom Boden, sondern von dem Ast, der den gesamten Laserpuls reflektiert hat“ („Was sind LIDAR-Daten?—ArcGIS Pro | Dokumentation,“ 2015) und (Buyuksalih et al., 2019). Abbildung 6 stellt schematisch die unterschiedlichen Rückgaben der reflektierten Oberfläche dar.

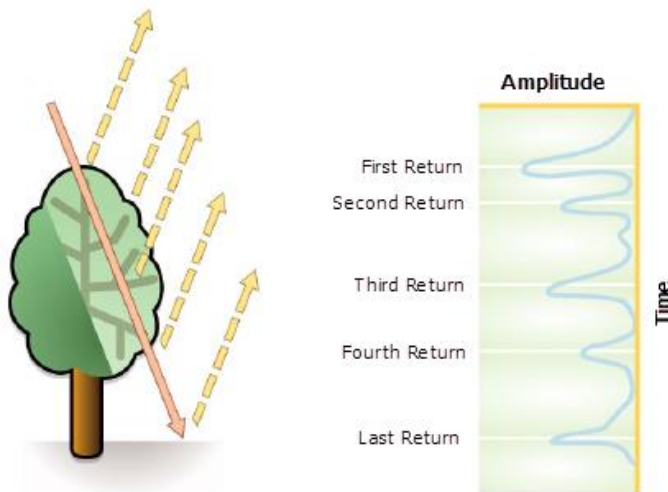


Abbildung 6: Laserrückgaben nach Wellenlängen und Laufzeit aus („Was sind LIDAR-Daten?—ArcGIS Pro | Dokumentation,” 2015).

4.4 Charakteristika der untersuchten Baumarten

4.4.1 Spitzahorn (*Acer platanoides*)

„Der Spitzahorn (lat. *Acer platanoides*) gehört zur Familie der Seifenbaumgewächse (*Sapindaceae*). Der Spitzahorn ist ein Laubbaum und wird durchschnittlich 20 bis 30 Meter hoch und 15 bis 22 Meter breit“ (Heß et al., 1977).



Abbildung 7: Typische Blattform und Frucht des Spitzahorn aus Heß et al., (1977).

Der Spitzahorn ist eine schnell wachsende Pionierart mit flach entwickeltem Herz-Senkwurzelsystem. Der **Austrieb erfolgt im April/Mai**, die Fruchtreife Ende September. Das Blatt des Spitz-Ahorns ist fünf bis sieben-lappig, bis zu 18 cm lang und mit einem langen Blattstiel. Es handelt sich um eine Halbschattenbaumart mit gut zersetzbarer Streu, der sehr frosthart ist. Das Höchstalter liegt bei 150 Jahren. Natürliche Vorkommen befinden sich von der Ebene bis in mittlere Gebirgslagen, in Linden-Ahorn-Hangwäldern, in Schlucht Wäldern, im Eichen-Ulmen-Auwald und im Eichen-Hainbuchen-Wald. Im Offenland kommt der Spitzahorn außerdem in Feldgehölzen und häufig als Pionierbaum auf Ruderal- und Rohbodenflächen, z. B. auf Industriebrachen vor.

Neben der Wildform gibt es ca. 90 Kulturformen von denen eine Vielzahl als Stadtbäume bzw. Straßenbäume geeignet sind und darum auf der GALK-Liste (Deutsche Gartenbaumsammlerkonferenz e.V., GALK-Straßenbaumliste 09.2022) stehen.

(„Der Arbeitskreis „Stadtbäume der Gartenamtsleiterkonferenz (GALK)“ beim Deutschen Städtetag arbeitet bereits seit vielen Jahren erfolgreich mit dem Bund deutscher Baumschulen (BdB) e.V. zusammen. Ausdruck dieser jahrelangen guten Zusammenarbeit ist die sogenannte GALK-Straßenbaumliste, die sich als anwenderbezogene Empfehlungsliste für die Pflanzung von Bäumen an Stadtstraßen versteht. Die Erarbeitung der GALK-Straßenbaumliste erfolgt unter besonderer Beachtung der extremen Standortbedingungen an den Straßen und der klimatischen Bedingungen in

den meist stark verdichteten Städten. Der GALK- Arbeitskreis Stadtbäume testet bereits seit Mitte der 1990er-Jahre in der mittlerweile zweiten Untersuchungsreihe „neue“ Bäume am realen Standort „Stadtstraße“. ... Zu den größten Herausforderungen des Klimawandels wird es gehören, deutlich mehr Vielfalt in die städtischen Baumbestände zu bringen, die heute größtenteils aus den drei Baumgattungen Linde, Ahorn und Platane bestehen“ („Zukunftsbäume für die Stadt, Auswahl aus der GALK-Straßenbaumliste,” 2022)

„Verbreitung in Baden-Württemberg: Der Spitzahorn ist ein von Natur aus seltener Waldbaum der in Hang-, Schlucht- und Klebwäldern vor allem wärmebegünstigter Lagen des Schwarzwaldes, der Gäulandschaften, der Schwäbischen Alb, des Hochrhein- und Bodenseegebiets vorkommt. Er wird vielfach gepflanzt und verwildert ausgehend von den Pflanzungen (Forstkulturen, Straßenbäume) und ist deshalb vor allem in den warmen Tieflagen heute weit verbreitet und häufig.

Standortansprüche: Der Spitzahorn benötigt sommerwarmes Klima und frische bis mäßig feuchte, nährstoff- und basenreiche, humose, lockere Lehm- oder Steinschuttböden.

Ausbreitung und Konkurrenzkraft: Windausbreitung, reichliche Naturverjüngung, leicht verwildernde und sehr ausbreitungsfähige Pionierart.

Verwendung: In Feldgehölzen, Sichtschutzpflanzungen, Gehölzpflanzungen an Verkehrswegen, Baumreihen und Alleen und zur Sicherung von Böschungen“ (Thomas Breunig et al, 2002).

4.4.2 Winterlinde (*Tilia cordata*)



Abbildung 8: Typische Blattform und Frucht der Winterlinde aus Heß et al., (1977)

Die Winterlinde (*lat. Tilia cordata*) ist ein 10-40 m hoher Laubbaum mit breit-runder, scharf umgrenzter Krone. Die Lebensdauer beträgt mehrere 100 Jahre. **Der Austrieb erfolgt Anfang Mai.** Bei der Winterlinde handelt es sich um einen Oberboden- und Tiefwurzler mit Herzwurzelsystem (Bodenfestiger).

Sie entwickelt sich als Halbschatten/Schattenpflanze und wirkt durch ihren leicht zersetzbaren Laubstreu bodenverbessernd. Sie dient als Nutzholz und Zierbaum und hat neben der Wildform mehrere Kulturformen. Früher wurde sie oft außerhalb des Waldes gepflanzt. Natürliches Vorkommen hat sie von der Ebene bis in mittlere Gebirgslagen in Eichen-Hainbuchen-Wäldern, Eichen- Ulmen-Auwäldern und Linden-Ahorn-Hangwäldern (Heß et al., 1977). Auch sie wird häufig als Straßenbaum verwendet und steht deshalb auf der GALK-Liste.

„Verbreitung in Baden-Württemberg: Ursprünglich war die Winterlinde weitgehend auf sommerwarme Gebiete beschränkt. Infolge von Anpflanzung ist sie heute weit verbreitet jedoch im Schwarzwald selten.

Standortansprüche: Sommerwarmes Klima, mäßig frosthart. Bevorzugt frische bis mäßig trockene, nährstoff- und basenreiche, humose, tiefgründige Lehmböden, wächst aber auch auf flachgründigen und steinigen Böden.

Ausbreitung und Konkurrenzkraft: Windausbreitung, vegetative Vermehrung durch Wurzelsprosse und Absenkeräste, mäßig rasch wachsend, stockausschlagfähig.

Verwendung: Für Baumhecken und Feldgehölze, als Einzelbaum oder in Baumgruppen, als Alleebaum, gut schnittverträglich, empfindlich gegenüber Bodenverdichtung und Luftverunreinigung“ (Thomas Breunig et al, 2002).

5 Methoden und Vorgehensweisen

5.1 Standortauswahl und Standortbeschreibung

Die Auswahl der Baumstandorte war als Bestandteil der laufenden Doktorarbeit von Markus Anys über die „Ökohydrologische Untersuchung von Stadtbäumen“ bereits getroffen. Anhand der eingangs formulierten Ziele und Fragestellungen der laufenden Doktorarbeit als auch der Masterarbeit, wurden die Standorte so ausgewählt, dass eine hohe Variabilität des Versiegelungsgrads und/oder eine hohe Variabilität der Umgebungsbebauung vorzufinden ist. Das Untersuchungsgebiet und die Standorte werden im Folgenden charakterisiert.

5.1.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in der Stadt Freiburg im Breisgau. Die Stadt Freiburg befindet sich im Südwesten Deutschlands (47,99853° N, 7,84965° W) auf 280 m über dem Meeresspiegel. Nach Stuttgart, Mannheim und Karlsruhe ist sie mit 230.940 Einwohner die Viertgrößte Stadt des Bundeslandes Baden-Württemberg. Verglichen mit anderen Großstädten wie zum Beispiel Stuttgart (3040/km²) weist Freiburg eine geringe Bevölkerungsdichte (1509/km²) auf („Bevölkerung, Gebiet und Bevölkerungsdichte - Statistisches Landesamt Baden-Württemberg,” 2020). Aufgrund seiner Lage am Rand des Schwarzwalds im Oberrheingraben herrscht ein warm/feucht -gemäßigtes Klima vor. Die Jahresmitteltemperatur beträgt 11,4 °C mit einer Temperaturspanne von 3°C im Januar und 20,9°C im Juli. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 837mm und fällt überwiegend in den Sommermonaten, wobei er sein Maximum mit 107 mm im Monat Juli hat („Bevölkerung, Gebiet und Bevölkerungsdichte - Statistisches Landesamt Baden-Württemberg,” 2020). Das Untersuchungsgebiet lässt sich in sechs räumliche Einheiten teilen. Die Lage dieser Gebiete ist in Karte in Abbildung 9 dargestellt. In diesen Einheiten wurden insgesamt 25 Bäume ausgewählt: 13 Spitzahorn und 12 Winterlinden. Die nachfolgende Tabelle 2 gibt eine einführende Kurzbeschreibung der Untersuchungseinheiten und der Anzahl der Bäume in diesen Raumeinheiten. Eine differenzierte Beschreibung der Messtandorte folgt in Kapitel 5.1.2.

Tabelle 2: Übersicht über die Baumstandorte / charakteristische Standorteigenschaften

Baumart	Baum-anzahl	Standort	Standorttyp	Einschätzung der Größe des Wurzelraums anhand des oberflächlichen Versiegelungsgrads
<i>Tilia cordata</i>	3	Jacobistraße 42	Straße, Grünstreifen, Bürgersteig	stark beschränkter Wurzelraum
<i>Tilia cordata</i>	3	Institutsviertel Mensa 2 / Stefan-Meier Straße 30	Parkplatz, Baumscheibe, Bürgersteig	stark beschränkter Wurzelraum
<i>Tilia cordata</i>	2	Institutsviertel Mensa 2 / Hermann-Herderstraße 9	Parkplatz, Wiese	beschränkter Wurzelraum
<i>Tilia cordata</i>	2	Institutsviertel Mensa 2	Wiese, gepflasterter Weg	kaum beschränkter Wurzelraum
<i>Acer platanoides</i>	1	Institutsviertel Mensa 2	Wiese, gepflasterter Weg	kaum beschränkter Wurzelraum
<i>Acer platanoides</i>	3	Schwimmbadstraße 19	Straße, Baumscheibe, Bürgersteig	stark beschränkter Wurzelraum
<i>Acer platanoides</i>	3	Goethestraße 71	Straße, Grünstreifen, Bürgersteig	stark beschränkter Wurzelraum
<i>Acer platanoides</i>	3	Urachstraße 21	Straße, Grünstreifen	beschränkter Wurzelraum
<i>Acer platanoides</i>	3	Technische Fakultät	Wiese, gepflasterter Weg	kaum beschränkter Wurzelraum

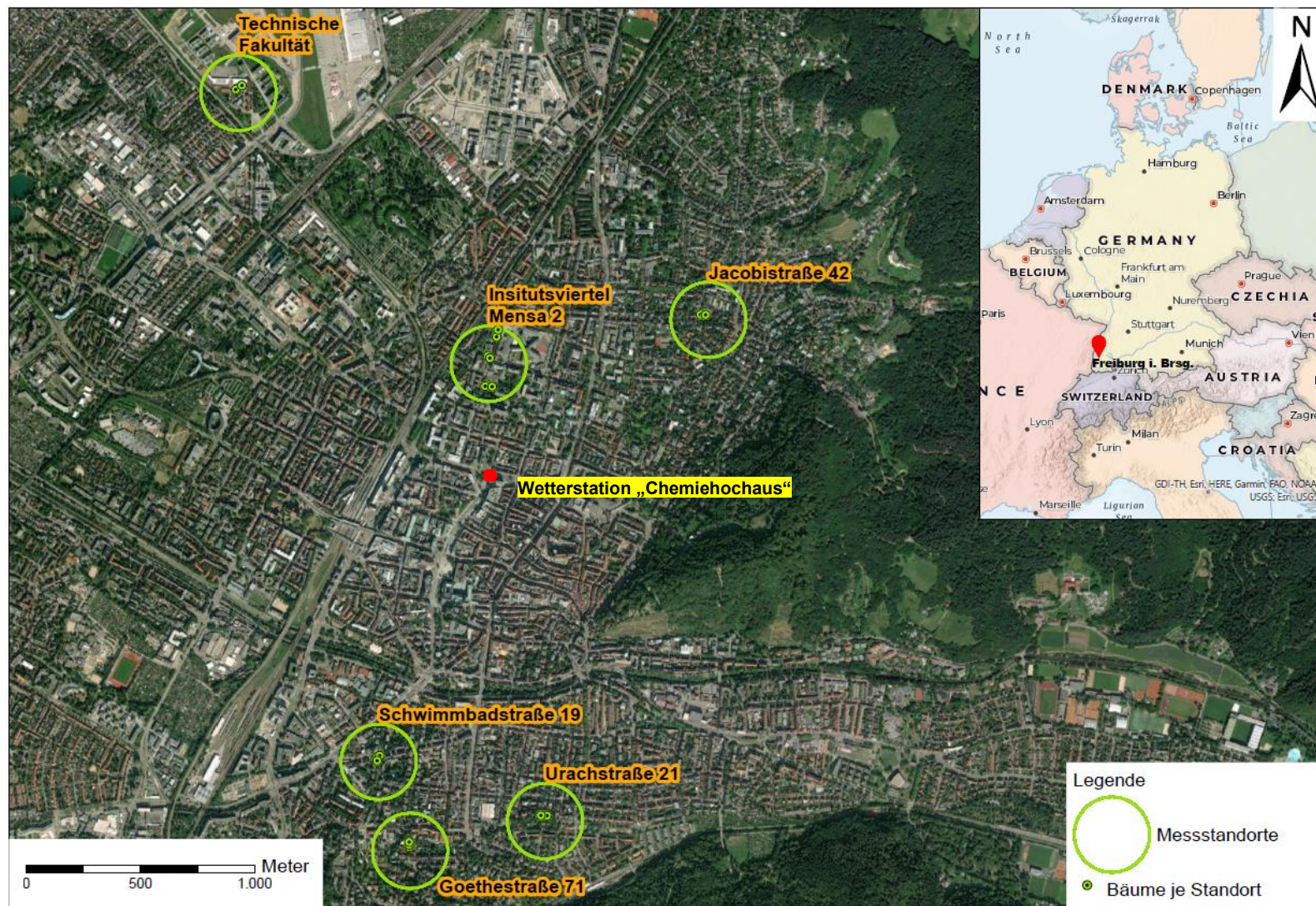
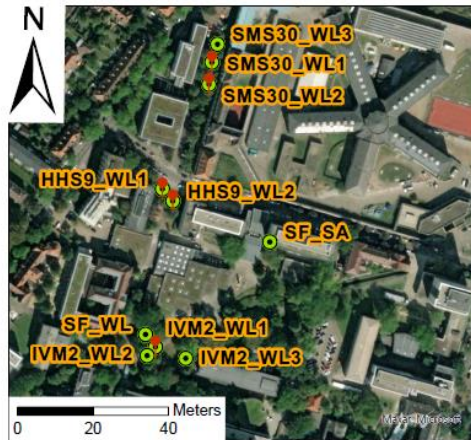


Abbildung 9: Übersichtskarte der Baumstandorte und Standort der Wetterstation „Chemiehochhaus“

Institutsviertel Mensa 2



Technische Fakultät



Jacobistraße 42



Schwimmbadstraße 22



Goethestraße 71



Urachstraße 40



Abbildung 10: Übersichtskarte der einzelnen Bäume ; rot markiert die vermessenen Bäume je Standort

5.1.2 Beschreibung der Messstandorte

Wie oben bereits dargestellt lässt sich das Untersuchungsgebiet in sechs räumliche Einheiten teilen. In diesen Einheiten wurden insgesamt 25 Bäume ausgewählt: 13 Spitzahorn und 12 Winterlinden. Von diesen 25 Bäumen werden an jedem Standort jeweils die Bäume mit bereits installierten Pyranometer auf ihr Strahlungsverhalten untersucht. Dies sind 8 Spitzahorn und 7 Winterlinden (siehe Karte: Abbildung 10). Im Folgenden werden trotzdem alle Bäume kurz erläutert, um eine Übersicht über die Gesamtheit der Bäume zu bekommen und die unterschiedlichen Baummorphologien und Umgebungsfaktoren herauszuarbeiten. In anschließender Tabelle 2 werden die 15 untersuchten Bäume tiefergehend charakterisiert.

Der Standort Institutsviertel Mensa 2 befindet sich im Institutsviertel des Freiburger Universitätsgeländes. Dieser Standort ist untergliedert in Hermann-Herder-Straße 9, Stefan-Meier-Straße 30 und dem Gelände südöstlich des Mensagebäudes. Insgesamt werden dort 9 Winterlinden und 1 Spitzahorn untersucht mit den Baumidentifikationsbezeichnungen: IVM2_WL1, IVM2WL2, IVM2_WL3, HHS9_WL1, HHS9_WL2, SMS30_WL1, SMS30_WL2, SMS_WL3. Bäume an denen Stammabflussproben entnommen werden: SF_TC und SF_AP (s. Karte Abbildung 10). An diese zwei Bäumen finden sonst keine weiteren Untersuchungen statt.

Die drei Winterlinden (SMS30_WL1, SMS30_WL2, SMS_WL3) in der Stefan-Meier-Straße 30 grenzen im Osten an das Gefängnis an und sind von der hohen Gefängnismauer ca. 10 Meter und im Westen von den etwa 12 Meter hohen Mehrfamilienhäusern umgeben. Der Abstand, gemessen von Baumstamm zu Bauwerk beträgt ca. 5 Meter und 10 Meter. Die Bäume befinden sich auf 1,5 m x 3 m großen Baumscheibe auf ansonsten von Parkplatz, Straße und Bürgersteig versiegelter Fläche. Mit einer Höhe von 12 Metern und einem geschätzten Alter von 60 Jahren haben alle Bäume einen DBH (Durchmesser in Brusthöhe) von ca. 50 cm. Besonders erwähnenswert ist hier, dass die zwei untersuchten Bäume (SMS30_WL1, SMS30_WL2) jeweils im Norden und Süden in die Krone des Nachbarbaums hineinreichen. Auf Strahlungsverhalten untersucht werden hier: SMS30_WL1, SMS30WL2.

Zwei weitere Winterlinden (HHS9_WL1, HHS9_WL2) mit vergleichbarer Größe und Form befinden sich auf Grünflächen am Parkplatz östlich des Institutsgebäudes für Immunologie der Uniklinik Freiburg. Somit weist ihre Umgebung zur einen Baumseite hin versiegelte Fläche (Parkplatz) und zur anderen Seite unversiegelte Fläche (Grünfläche) auf. Der Abstand zum Gebäude beträgt bei Winterlinde HHS9_WL1 8 Meter von Baumstamm zu Gebäudegrund. Das Gebäude grenzt im Westen an den Baum. Die Krone reicht bis wenige Meter an das Gebäude heran, berührt dieses jedoch nicht. Winterlinde HHS9_WL2 hat ähnlichen Abstand zum östlich angrenzenden Gebäude und ragt ebenfalls bis wenige Meter an das Gebäude heran. Auf Strahlungsverhalten untersucht werden hier: HHS9_WL1, HHS9_WL2.

Weitere fünf Bäume (IVM2_WL1, IVM2WL2, IVM3_WL3, SF_TC, SF_AP), stehen auf den Wiesen südöstlich der Freiburger Institutsmensa (IVM2). Die drei Winterlinden am westlichen Rand des Standortes haben alle mindestens 20 Meter Abstand zum nächsten, höheren Gebäude und werden somit vorwiegend durch die angrenzende Vegetation beeinflusst/beschattet. Die Winterlinde IVM2_WL1 steht etwa 10 Meter vom etwa 4 Meter breiten Kanal entfernt, der durch das Institutsgelände fließt. Der Kanal führt periodisch Wasser. Zum Zeitpunkt der Messung 23.06.2022 führte er kein Wasser. Der untersuchte Baum reicht bis auf die Ostseite in die angrenzenden Baumkronen hinein. Die Winterlinde am östlichen Rand des Standorts steht ebenfalls auf freier Wiesenfläche, umgeben von gepflasterten Fuß und-Radwegen. Fünf Meter westlich grenzt ein 10 Meter hohes Universitätsgebäude an. Der Spitzahorn für (SF_AP) steht südöstlich im Untersuchungsgebiet (Abbildung 10) auf Gras bedeckter Fläche direkt angrenzend an das Gebäude der Medizinischen Fakultät. Auf Strahlungsverhalten untersucht wird hier: IVM2_WL1.

Der Standort der technischen Fakultät der Universität liegt am nordwestlichen Stadtrand von Freiburg. Im Norden an das Gebiet angrenzend befindet sich der Freiburger Flugplatz. Nordwestlich beginnt in ca. einem Kilometer Abstand der Mooswald. Auf diesem Standort befinden sich auf einer Wiese zwischen den Fakultätsgebäuden 3 Spitzahorn (TUF_SA1, TUF_SA2, TUF_SA3). Diese sind

in einer Reihe von Südwest nach Nordost ausgerichtet und weisen einen Abstand von etwa 10 Meter zueinander auf. Südöstlich etwa 5 Meter entfernt befinden sich ein oberflächenversiegelter, asphaltierte Fuß- und Radweg. Als besondere Standorteigenschaft ist das im Norden stehende etwa 10 Meter entfernte Gewächshaus der Universität zu nennen. Eine weitere Besonderheit ist das stark unterschiedliche Alter und die Unterschiede in der Vitalität der 3 Bäume. Der mit etwa 10 Jahren jüngste Baum in der Mitte der Baumreihe weist mehrere Kahlstellen auf und der dichtere Teil der Baumkrone ist nach Südwesten ausgerichtet. Die beiden anderen Bäume sind vitaler und um die 50 Jahre alt. Auf Strahlungsverhalten untersucht werden hier: TUF_SA2, TUF_SA3.

Der westlichste Standort im Untersuchungsgebiet befindet sich im Stadtteil Herdern in der Jacobistraße 42. An diesem Standort stehen 3 Winterlinden (JCS42_WL1, JCS42_WL2, JCS42_WL3), ca. 50 Jahre alt und über 10 Meter hoch. Durch die angrenzende Straße und den schmalen Grünstreifen (ca. 1,5 Meter) zum Bürgersteig hin, sind auch hier starke Einschränkungen des Wurzelraums zu erwarten. Die Umgebung weist überwiegend alte, große Einfamilienhäuser auf. Auf Strahlungsverhalten untersucht werden hier: JCS42_WL1, JCS42_WL2.

Auch in der Schwimmbadstraße 19 befinden sich 3 zu untersuchende Bäume in einem Wohngebiet im Stadtteil Freiburg-Wiehre. Hier stehen drei Spitzahorn (SWB19_SA1, SWB19_SA2, SWB19_SA3). Auf Strahlungsverhalten untersucht werden hier: SWS19_SA1 und SWS19_SA2.

Der vorletzte Standort befindet sich in der Goethestraße 71 ebenfalls im Stadtteil-Wiehre (GTS71_SA1, GTS71_SA2, GTS71_SA3). Von den Standorteigenschaften weist er kaum Unterschiede zum Standort in der Schwimmbadstraße auf. Auch hier ist der Wurzelraum stark eingengt und die Bäume von großen älteren Einfamilienhäusern umgeben. Untersucht werden hier die zwei Ahorn, GTS71_SA1 und GTS71_SA2.

Der letzte Standort befindet sich nahe des Wiehre Bahnhofs in der Urachstraße 21. Hier stehen drei Spitzahorn (URS21_SA1, URS21_SA2, URS21_SA3) auf einem etwas ansteigenden Grünstreifen am Straßenrand. Südlich angrenzend befindet sich eine größere Grünfläche mit weiterer Baumvegetation. Der Einfluss der umliegenden Gebäude ist hier geringer, da diese weiter von den Baumstandorten entfernt sind. Die Krone der Bäume ragt nach Osten und Westen jeweils in die Nachbarbäume hinein. Untersucht werden hier die zwei Ahorn URS21_SA1 und URS21_SA2.

Die Baumstandorte HHS9, SWS22 und GTS71 liegen in Straßenschluchten, welche von Süden nach Norden ausgerichtet sind. Die Straßen mit den beiden Baumstandorten JCS42, URS21 verlaufen von West nach Ost.

Tabelle 3: Fotodokumentation und Charakteristika der vermessenen Bäume

Standort	Bezeichnung	Foto „klar“	Foto „diffus“	Besondere Merkmale / Kronen- beschreibung (Gleichförmige Krone = „Eiförmig“)
Institutsviertel Mensa	IVM2_WL1			• Gleichförmige, gleichmäßig belaubte Krone • Kronenansatz 3,6 m
	HHS9_WL1			• Krone nicht gleichförmig • Kronenansatz 4,4 m • Kronenlücke nordwestlich bis in 7 Meter Höhe • Gleichmäßig belaubt
	HHS9_WL2			• Gleichförmige Krone • Kronenansatz 4,6 m

Standort	Bezeichnung	Foto „klar“	Foto „diffus“	Besondere Merkmale / Kronen- beschreibung (Gleichförmige Krone = „Eiförmig“)
Institutsviertel Mensa	SMS30_WL1			• Nicht gleichförmige Krone • Kronenansatz 5 m • Spärlicher belaubt
	SMS30_WL2			• Nicht gleichförmige Krone • Kronenansatz ca. 3,4 m • Spärlicher belaubt
Jacobistraße 42	JCS42_WL1			• Gleichförmige, gleichmäßig belaubte Krone • Kronenansatz 5,2 m • Fehlende Krone auf Nordseite bis in 7 m

Standort	Bezeichnung	Foto „klar“	Foto „diffus“	Besondere Merkmale / Kronen- beschreibung (Gleichförmige Krone = „Eiförmig“)
Jacobistraße 42	JCS42_WL2			• Gleichförmige, gleichmäßig belaubte Krone • Kronenansatz 4,5 m
Technische Universität Freiburg	TUF_SA2			• Gleichförmige, gleichmäßig belaubte Krone • Kronenansatz 2,2 m
	TUF_SA3			• Gleichförmige, gleichmäßig belaubte Krone • Kronenansatz 2,4 m

Standort	Bezeichnung	Foto „klar“	Foto „diffus“	Besondere Merkmale / Kronen- beschreibung (Gleichförmige Krone = „Eiförmig“)
Schwimmbadstraße 19	SWS19_SA1			• Nicht gleichförmige Krone • Kronenansatz 4,4 m • Spärlich belaubt • Krone fehlend in NW, S, SW bis in 7 Meter Höhe • Krone lückenhaft in Fahrraumprofil
	SWS19_SA2			• Nicht gleichförmige Krone • Kronenansatz 3,4 m • Spärlich belaubt • Krone lückenhaft in Fahrraumprofil bis ca. 6m
Goethestraße 71	GTS71_SA1			• Nicht gleichförmige Krone • Kronenansatz 3,6 m • Spärlich belaubt • Krone lückenhaft in Fahrraumprofil bis ca. 6m

Standort	Bezeichnung	Foto „klar“	Foto „diffus“	Besondere Merkmale / Kronen- beschreibung (Gleichförmige Krone = „Eiförmig“)
Goethestraße 71	GTS71_SA2			• Nicht gleichförmige Krone • Kronenansatz 5,7 m • Krone lückenhaft in Fahrraumprofil bis ca. 6m
Urachstraße 21	URS21_SA1			• Kronenansatz 2,3 m • Krone lückenhaft in Fahrraumprofil bis ca. 6m
	URS21_SA2			• Gleichförmige Krone • Kronenansatz 3 m • Krone lückenhaft in Fahrraumprofil bis ca. 6m

5.2 Laufende Messungen der Doktorarbeit

Um das Verständnis der im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit durchgeführten Messungen und Modellierungen zu gewährleisten, wird im Folgenden zusammengefasst, welche Messungen bereits über längeren Zeitraum für die Doktorarbeit durchgeführt wurden und noch durchgeführt werden.

5.2.1 Baummorphologische Messungen

Um die Baummorphologie zu erfassen, wurden die wichtigsten Kenngrößen bestimmt. Dafür wurde der Durchmesser in Brusthöhe (DBH) in 1,3 m Höhe gemessen. Die Messwerte sind in Tabelle 9 dargestellt. Die Baumhöhe und die Kronenlänge wurden mithilfe des Vertex IV ("Vertex_IV_Manual_2007.pdf") vermessen. Die Kronenprojektionsfläche wurde anhand der Kronenradien in acht Himmelsrichtungen entlang der Bodenoberfläche mit einem Laserdistanzmesser (Leica DISTO A2) von der Mitte des Stammes bis zur Spitze des am weitesten nach unten ragenden Triebs vermessen. Das Kronenvolumen wurde nach Lawrence (1985) über Kategorisierung in einem von drei Kronenformtypen: eiförmig, halb-ellipsoid und kugelförmig, berechnet. Das Kronenvolumen CV und die Kronenprojektionsfläche (CPA) wurden orientiert an (Franceschi et al., 2022) berechnet (Tabelle 9).

Auf Grundlage des DBH wurde das Baumalter in Jahren für *T.cordata* nach der Gleichung von Lukaszewicz and Kosmala, (2008) berechnet. Für *A.platanoides* wurde die Altersberechnung auf der Grundlage der Gleichung nach Herzog (2021) durchgeführt.

5.2.2 BFI (Blattflächenindex)

Der BFI (Blattflächenindex) wurde mit dem Messgerät BFI-2200C LI-Cor bestimmt. Dabei wurde in monatlichem Zeitintervall von Juni bis September 2021 alle Bäume vermessen. Durchschnittlich wurden pro Baum und Datum 3-4 Messungen durchgeführt. Basierend auf den Feldmessungen konnten zusätzlich folgende Parameter berechnet werden (Baptista et al. 2018): Blattfläche, Blattflächendichte, Astfläche, Pflanzenfläche, Pflanzenoberfläche, Pflanzenflächendichte und Pflanzenflächenindex.

5.2.3 Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit

Seit dem 01.03.2021 wird innerhalb der Baumkrone die Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit gemessen. Zur Messung in der Krone wird die Messsonde Campbell CS215 verwendet. Die Krone wurde in 3 Höhenbereiche unterteilt. Dabei wurden in jedem Bereich die Sensoren in der Mitte, in Nordexposition und wenn möglich in einem Abstand von ca. 50 cm vom Hauptstamm des Baumes angebracht. Am Standort der Technischen Fakultät wurde je Baum nur ein Sensor installiert. An allen anderen Standorten wurden an Baum ID 2 und 3 je ein Sensor in mittlerer Kronenhöhe angebracht. An den Bäumen mit der ID 1 wurden an jedem Standort drei Sensoren installiert.

5.2.4 Kurzweilige Sonnenstrahlung

Die Messung der solaren Einstrahlung findet mit dem Pyranometer SP-110-SS Apogee statt. (Spektralbereich = 360 bis 1120 nm (180°), Messintervall = 10-Min). Die kurzweilige Sonnenstrahlung wird unter der Basis der Baumkrone in einer durchschnittlichen Höhe von 3-4 m über dem Boden erfasst. Dabei kamen pro Baum zwei Pyranometer, nach Norden und Süden ausgerichtet zum Einsatz.

5.2.5 Saftstrom

Zur Messung des Saftstroms wurde das East30 Heat Pulse Velocity-Messgerät benutzt. Dieses Messgerät besteht aus 3 Nadeln. Dabei wird die mittlere Nadel für 60 Sekunden beheizt und die anderen Nadeln messen die Temperatur in 3 Tiefen über das Xylem vor und nach dem Heizzyklus. Die Nadeln sind in 5 mm, 17,5 mm und 30 mm Tiefe angebracht, um den Saftfluss über die gesamte Tiefe des Splintholzes (Xylem) zu erfassen. Die daraus resultierende Temperaturdifferenz gibt

Aufschluss über die Geschwindigkeit des Saftflusses. Zur Messung wurden die Geräte auf der nördlichen/östlichen Seite des Stammes unter dem Kronenansatz in einer Höhe von 1,5-4 m über der Oberfläche an jedem Baum installiert. Aufgrund der Holzanatomie, (Verzweigung, abgeschnittene Äste und Wülste) ist bei manchen Standorten eine geringe Abweichung von der nördlichen Einbauposition möglich, Der Sensor wurde nur auf der Stammseite installiert, wo ein guter Xylem Fluss anzunehmen war. Aufgebaut wurde das Messgerät so das ein 5cm² großes Quadrat aus Rinde und Phloem entfernt wurde, um das Kambium freizulegen. Nach der Installation wurden die Sonden mit Aluminiumfolie abgeschirmt, um thermische Einflüsse von außen zu minimieren. Die Messwerte werden in einem Messintervall von 30 Minuten aufgezeichnet. Zur Berechnung des Saftfluss siehe Hasler et al. (2018) und Campbell et al., (1991)

Die Messungen der Lufttemperatur, relativen Luftfeuchtigkeit und kurzwelligen Strahlung sowie des Saftfluss laufen seit dem 01.04.2021 und finden voraussichtlich noch bis Ende 2023 statt.

5.3 Zusätzliche meteorologische Datenerhebung

Die benötigten meteorologischen Daten wurden von der Wetterstation der Freiburger Universität bezogen.

Wetterstation: Chemie-Hochhaus „Dach“, auf dem Dach des Chemiegebäudes: Albertstraße 21 <https://weather.uni-freiburg.de/>.

Für die Modellierung benötigt wurden die Parameter: Globalstrahlung [W/m^2], relative Luftfeuchte in [%], Lufttemperatur in [$^{\circ}\text{C}$], Luftdruck in [kPa], Windgeschwindigkeit in [m/s] und Niederschlag in [mm/h].

5.4 Messung der kurzwelligen Einstrahlung für die vorliegende Arbeit

5.4.1 Messdurchführung

An 7 Spitzahorn und 8 Winterlinden, die bereits auf im Mittel 2-4 Meter Höhe mit nach Nord und Süd ausgerichteten Pyranometern ausgestattet sind, werden zusätzliche Pyranometermessungen an einem Tag mit Bewölkung (diffuse Strahlung) und an einem Tag mit klarem Himmel durchgeführt. Die Messungen finden bevorzugt vor- und nachmittags zwischen 9 und 18 Uhr statt. So wird auch der Einfluss der Gebäudeverschattung erfasst, da zu dieser die Tageszeit der Gebäudeschatten auf die Bäume fällt.

5.4.2 Messskizzen

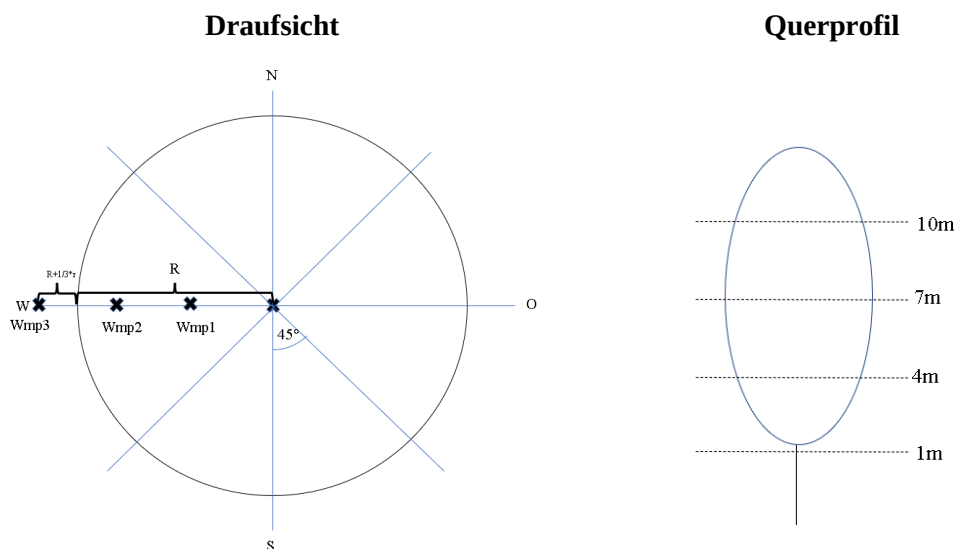


Abbildung 11: Messpunktskizze

Gemessen wurde mit dem Pyranometer SP-110-SS Apogee (“SP-110-manual.pdf”) (Spektralbereich = 360 bis 1120 nm), welches auf zusammensteckbaren Aluröhren befestigt wurde. Das Messgerät wurde auf die Spitze der Aluröhren installiert und mit einem 20 Meter langen Kabel an einen Datenlogger angeschlossen. So konnte in unterschiedlichen Höhen im Baum gemessen werden. Gemessen wurde auf den in Abbildung 11 dargestellten Transekten. Dabei sitzt der dritte Messpunkt bei Kronenradius + $\frac{1}{3} \times \text{Kronenradius}$ außerhalb der Krone und zwei weitere folgen in gleichmäßigen Abständen in der Krone. Für jeden Baum ergeben sich anhand der Vermessungsdaten und der variierenden Radien je Himmelsrichtung individuelle Messpunkte. Somit finden die Messungen 1 und 2 jeweils in der Krone statt und Messpunkt 3 liegt außerhalb.

Der Kronenradius wird vom Zentrum des Baumstammes aus gemessen. Direkt in der Baummitte findet keine Messung statt. Mit der Information des Baummittelpunkts und dem Abstand zu den

Messpunkten ergeben sich die x/y Messkoordinaten. Die Z-Koordinate, also die Höhe wurde so gewählt, dass eine Messung unterhalb der Baumkrone in Bodennähe stattfand, und die restlichen Messungen bei einem Baumkronenansatz ab 4 Meter in der Baumkrone. Gemessen wurde dann in 1, 4, 7 und 10 Meter Höhe. Die Messkonstruktion wurde selbst entwickelt. Es wurden 2 Konstruktionen getestet: eine Teleskopstange bis 14 m Höhe. Diese hat sich bei den Messungen zu instabil erwiesen, sodass die Position ab einer Höhe von ca. 10m für die Messung nicht gehalten werden konnte. Darum wurde das beschriebene Stecksystem aus Aluminiumstangen entwickelt, das bis zu einer Höhe von 10 m variabel angepasst werden konnte und durch sein leichteres Gewicht stabiler an der Messposition gehalten werden konnte. Die maximal Messhöhe ist dadurch konstruktionsbedingt auf 10 Meter Höhe begrenzt. Ab dieser Höhe konnte das Messgerät nicht mehr stabil an den Messpunkten platziert werden. Somit wurden nur bei den Bäumen auf dem Gelände der Technischen Fakultät bis an das obere Ende der Baumkrone gemessen. Die zusammensteckbaren Aluröhren wurden dabei senkrecht in die Baumkrone zeigend auf den Untergrund gestellt. Bei unebener Bodenoberfläche wurde die Alustange so justiert, dass alle Messpunkte von einem gleichen Grundniveau aus vermessen wurden. Dabei galt die Bodenhöhe direkt am Baumstamm als Referenzhöhe. Sobald sich ein plausibler/stabiler Messwert eingependelt hat wurde dieser vom Datenlogger abgelesen und in der Einheit mV notiert.



Abbildung 12: Geländemessungen; Montage der Messkonstruktion, Messdurchführung

Gemessen wurde an den in Tabelle 4 zu entnehmenden Tagen und Uhrzeiten:

Tabelle 4: Messzeitpunkte der vermessenen Bäume

Diffus	Datum	Uhrzeit	Klar	Datum	Uhrzeit
GTS71_SA2_d	26.08.2022	12:45-13:45	GTS71_SA2	11.08.2022	10:15-11:35
GTS71_SA1_d	26.08.2022	12:45-13:45	GTS71_SA1	11.08.2022	10:15-11:35
URS21_SA1_d	26.08.2022	11:00-12:30	URS21_SA1	11.08.2022	8:30-10:00
URS21_SA2_d	26.08.2022	11:00-12:30	URS21_SA2	11.08.2022	8:30-10:00
IVM2_WL1_d	24.08.2022	13:30-14:30	IVM2_WL1	02.08.2022	9:30-11:30
JCS42_WL1_d	05.08.2022	9:00-11:30	JCS42_WL1	24.08.2022	14:30-15:45
JCS42_WL2_d	05.08.2022	9:00-11:30	JCS42_WL2	24.08.2022	14:30-15:45
TU_SA2_d	06.08.2022	11:11-12:30	TU_SA3	15.07.2022	11:40-14:00
TU_SA3_d	06.08.2022	11:11-12:30	TU_SA2	28.08.2022	15:45-16:35
HHS9_WL2_d	17.08.2022	10:30-12:00	HHS9_WL1	04.08.2022	15:30-17:30
HHS9_WL1_d	17.08.2022	10:30-12:00	HHS9_WL2	04.08.2022	16:15-17:30
SWS22_SA1_d	26.08.2022	14:00-15:15	SWS22_SA1	11.08.2022	11:30-12:45
SWS22_SA2_d	26.08.2022	14:00-15:15	SWS22_SA2	11.08.2022	11:30-12:45
SMS30_WL1_d	15.08.2022	13:00-14:00	SMS30_WL1	04.08.2022	13:00-15:20
SMS30_WL2_d	15.08.2022	13:00-14:00	SMS30_WL2	04.08.2022	13:00-15:20

5.5 Verarbeitung der Rohdaten

5.5.1 Kalibrierung & Umrechnung der Messwerte

Um mit den gewonnen Rohdaten weiterzuarbeiten, wurden diese in W/m^2 umgerechnet. Dafür wurde das Apogee Pyranometer mit dem Huksefluxpyranometer kalibriert. Über die vorhanden Referenzspannung der Huksefluxpyranomter von $14,1\mu\text{V/W/m}^2$ ("SR20_manual_v2117.pdf ") konnte Folgende Kalibriergerade aufgestellt werden.

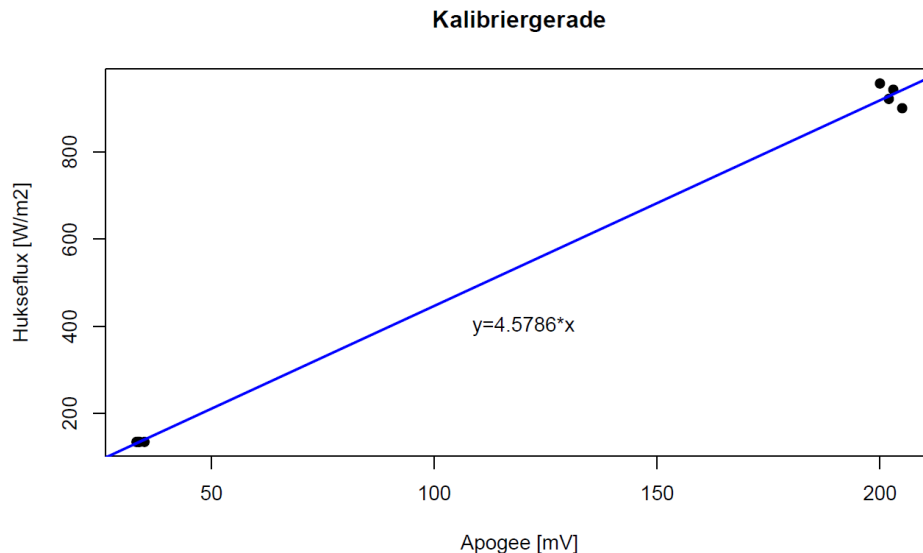


Abbildung 13: Kalibriergerade

5.5.2 Ermittlung der Tagesgänge

Da die Messungen auf bestimmte Uhrzeiten beschränkt waren und nicht über den ganzen Tag stattfanden, wurden die Messdaten mithilfe der Globalstrahlungsdaten von der Wetterstation „Chemiehochhaus“ normiert. So konnte anhand der Messdaten ein Tagesgang der solaren Einstrahlung erstellt werden. Dieser wird benötigt, um die Messdaten mit dem modellierten Tagesgang zu vergleichen. Dabei wurde wie folgt vorgegangen. Mit den stündlich Globalstrahlungsdaten des Chemiehochhaus zum Zeitpunkt der Messung wurden die Messwerte mit dem entsprechenden Zu bzw. Abnahmefaktor multipliziert. Am Beispiel der Messdaten GTS1_SA2 sieht das wie folgt aus. Die Messungen fanden am 11.08.2022 von 10:15 Uhr bis 11:35 statt. Der stündliche Strahlungswert der Wetterstation, welcher zur gleichen Zeit gemessen wurde (11 Uhr) wird herangezogen, um die Zu bzw. Abnahmefaktoren zu ermitteln. In diesem Fall lag die Globalstrahlung um 11 Uhr auf dem Dach des Chemiehochhaus bei 621 W/m^2 . Um 7 Uhr morgens lag der Wert bei 9 W/m^2 . Um nun die Messdaten auf die Uhrzeit von 7 Uhr morgens anzupassen, wurde Sie mit dem Faktor $9/621 = 0,015$ multipliziert. Dies wurde zu allen Zeitpunkten mit dem entsprechenden Faktor von Sonnen auf bis Sonnenuntergang durchgeführt. Wichtig ist hierbei, dass für jeden Messpunkt angenommen wird, dass die Beschattung für die berechneten Uhrzeiten genauso ist wie zum Messzeitpunkt. Dies ist in Realität nicht der Fall.

5.5.3 Ermittlung der Lichtdurchlässigkeit der individuellen Bäume

Zur Ermittlung der Lichtdurchlässigkeit der Baumkrone wurde die Differenz der ankommende Solarstrahlung der Wetterstation mit der gemessenen in 4 Meter Höhe unter dem Baum gebildet. Diese Abmilderung der Strahlung entspricht der Lichtdurchlässigkeit bzw. dem Transmissionsgrad der Baumkrone.

Diese Transmissionswerte sind in Tabelle 7 dargestellt und wurden später als Input in das SOLWEIG Modell zum Erstellen der Horizontüberhöhungen verwendet.

5.6 Erfassung der LIDAR-Daten

Die Erfassung der Strukturoberfläche der Stadt Freiburg erfolgte mit einem Flugzeug vom 17.03-26.03.2017 (Dipl. Hydrologe A. Steinbrich, Professur für Hydrologie, Universität Freiburg., 27.10.2022). Die Daten wurden der Professur für Hydrologie von der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg bereitgestellt. Tabelle 5 gibt Auskunft über das verwendete Messgerät, die Punktdichte, den Scanwinkel und die Flughöhe.

Tabelle 5: Informationen zur Erfassung der Strukturoberfläche der Stadt Freiburg

Flugdatum	Punktdichte	Scanner	Scanwinkel	Flughöhe über Grund
17.03. - 26.03.2017	8 Punkte/m ²	Riegl LMS-Q680i und Riegl LMS-Q780	+/- 20 deg	600 m

In nachfolgender Tabelle 6 ist die Klassifizierung der Punktdaten dargestellt. Diese Punktdaten sind Grundlage für die Modellierung in ArcGIS Pro und SOLWEIG. Dem Verfasser wurden die Daten im .zlas-Format bereitgestellt. Dies ist eine von ESRI (*Environmental Systems Research Institut* ("Home | Esri Deutschland," 2018)) optimierte LiDAR-Datei, in der die Daten in komprimierter Form gespeichert sind.

Tabelle 6: Kommentierte Klassifizierung der erfassten LiDAR-Daten

LAZ-Klasse	Namenserweiterung ASCII Datei last pulse	Namenserweiterung ASCII Datei first pulse	Beschreibung	Hinweise
2	gde	gdf	Bodenpunkte	- Schwimmbecken: - ist der Rand gleich hoch als das umliegende Gelände gehört er zu Klasse 2 - ist der Rand höher als das umliegende Gelände gehört er zu Klasse 8 - Punkte, die die Wasserfläche repräsentieren sind der Klasse 2 zuzuordnen. - Felsen: - Punkte auf dem Felsen gehören zu Klasse 2 - Punkte unter dem Felsüberhang gehören zu Klasse 8
17	bru	brf	Brückenpunkte	- hierzu zählen Brücken und Stege - Brückenaufbauten wie z.B. Geländer, Lampen gehören zu Klasse 8 - Bodenpunkte unterhalb der Brücke gehören zu Klasse 2
6	kub	kuf	Gebäudepunkte	- beinhaltet alle Gebäude unabhängig von Höhe oder Größe - hierzu zählen sowohl die Dach- als auch die Wandpunkte - Punkte unterhalb von Glasdächern gehören zu Klasse 8 - Tiefgaragen, die oben bodengleich sind oder sich nur geringfügig vom Gelände abheben gehören zu Klasse 2
7	ugr	ugf	Unterbodenpunkte	- z.B. Treppenabgänge, Schwimmbecken, Licht- und Kellerschächte, Klärbecken, u.a. - Garagenein- und auffahrten gehören unabhängig ihrer Größe zu Klasse 2 - Lichtgräben mit mehreren Metern Länge und Breite gehören zu Klasse 2
8	vge	vgf	Vegetation und sonstige Nichtbodenpunkte	- Punkte innerhalb der Wasserflächen (z.B. Schiffe, Messrauschen etc.) sind der Klasse 8 zuzuordnen. - Objekte auf Lagerplätzen (Kisten, Container, Reifen, Schrott, u.a.) - Fahrsilos für Schüttgut im landwirtschaftlichen Bereich, in Deponien und Abbaugeländen

5.7 Modellierung der Sonneneinstrahlung

5.7.1 Arc GIS Pro (Version: ArcGIS Pro 3.0.3)

5.7.1.1 Datenaufbereitung

Die bereits klassifizierten LiDAR-Daten wurden mit dem Umwandlungstool von Arc GIS Pro von .zlas zu der unkomprimierten Dateiform .las umgewandelt und anschließend in Arc GIS Pro eingelesen. Danach wurden alle Bodenpunkte über die Filterfunktion „alle Bodenpunkte“ ausgewählt und mit dem Werkzeug „LAS Dataset to Raster“ ein digitales Höhenmodell der Bodenoberfläche der Stadt Freiburg erstellt. Nachdem die LAS-Bodenpunkte ausfindig gemacht wurden, wurden Rauschpunkte, die keiner Klasse zugeordnet werden konnten, ausfindig gemacht und mit dem Werkzeug „Classify LAS Noise“ bereinigt. Nach dieser Vorarbeit wurden nach den „Gebäudepunkten“ gefiltert und ein digitales Höhenmodell der Gebäude erstellt. Dies wurde auch für die Vegetationsklasse durchgeführt. Als letzter Schritt wurden alle Messkoordinaten aus der Geländeerfassung als Punkt-Shape eingelesen. Somit standen alle Daten zur Verwendung des „Solarstrahlungswerkzeug“ in Arc GIS Pro bereit.

Die detaillierte Anleitung zum Vorgehen ist unter nachfolgendem Link nachzulesen. (<https://learn.arcgis.com/de/projects/extract-3d-buildings-from-LiDAR-data/>)

5.7.1.2 Solarstrahlungswerkzeug

Nachfolgend ist das unter (‐Modellierung der Sonneneinstrahlung—ArcMap | Dokumentation,‑ 2012) einsehbare Vorgehen zur Modellierung der Sonneneinstrahlung zusammengefasst. Das Werkzeug „Solarstrahlung“ berechnet die Gesamtstrahlung durch die Summe der direkten und diffusen Strahlungsflüsse. Um an einem beliebigen Punkt die Einstrahlung zu simulieren, wird wie folgt vorgegangen:

1. Berechnung eines nach oben gerichteten hemisphärischen Sichtfeldes basierend auf der Topografie.
2. Überlagerung des Sichtfeldes auf einer Karte der direkten Sonnenstrahlung, um die direkte Strahlung zu schätzen.
3. Überlagerung des Sichtfeldes auf einer Karte der diffusen Himmelsstrahlung, um die diffuse Strahlung zu schätzen.
4. Wiederholung des Prozesses für jede Eingabeposition, um eine Sonneneinstrahlungskarte zu erstellen.

Eines der Haupteingaben ist die Erstellung des nach oben gerichteten Sichtfeldes, da der Berechnungsalgorithmus die ankommende Solarstrahlung anhand dieser Eingabeinformationen berechnet

Das folgende Bild stellt ein nach oben gerichtetes hemisphärisches Foto dar, das den sichtbaren Himmel und die Himmelsrichtungen zeigt, die durch die umgebenden Topografie- und Oberflächen-Features begrenzt werden.

5.7.1.2.1 Berechnung des Sichtfeldes

‐Das Sichtfeld ist eine Raster-Darstellung des gesamten sichtbaren oder verdeckten Himmelsausschnitts von einer bestimmten Position aus. Ein Sichtfeld wird berechnet, indem in eine angegebene Anzahl von Richtungen um eine bestimmte Position gesucht und der maximale Winkel der Begrenzung des Himmels – oder Horizontwinkel – ermittelt wird. Für alle anderen Richtungen, in die nicht gesucht wird, werden die Horizontwinkel interpoliert. Horizontwinkel werden dann in ein hemisphärisches Koordinatensystem konvertiert, in dem sie eine dreidimensionale Hemisphäre mit den Himmelsrichtungen als zweidimensionales Raster-Bild darstellen. Jeder Raster-Zelle des Sichtfeldes wird ein Wert zugewiesen, der davon abhängig ist, ob der Himmel in die Richtung

sichtbar oder verdeckt ist. Die Ausgabe-Zellenpositionen (Zeile und Spalte) entsprechen dem Zenitwinkel und dem Azimutwinkel auf der Hemisphäre mit den Himmelsrichtungen“ vgl. („Modellierung der Sonneneinstrahlung—ArcMap | Dokumentation,” 2012)

Nachfolgende Abbildung 14 stellt das Ergebnis dieser Berechnung für eine Zelle des Sichtfeldrasters dar.

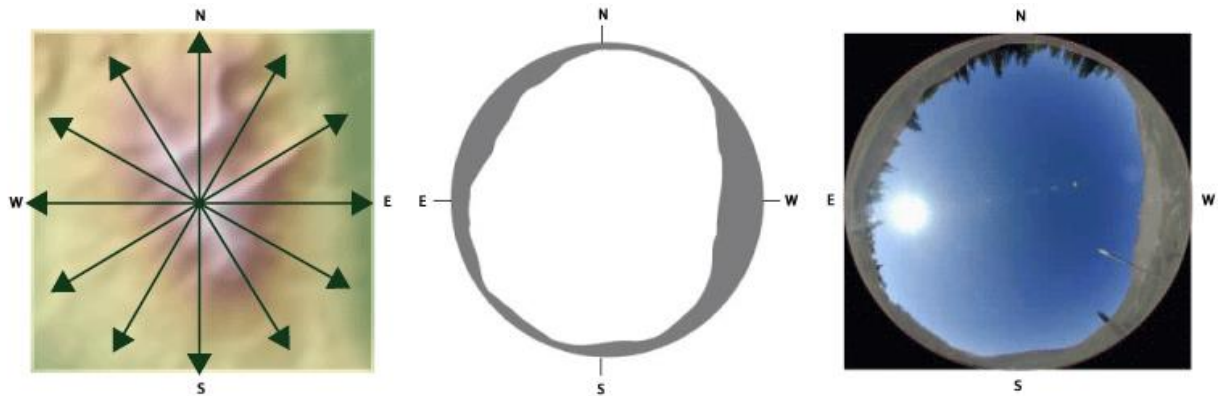


Abbildung 14: Beispielhafte Darstellung des Sichtfeldes

5.7.1.2.2 Berechnung der Sonnenkarte

„Die direkte Sonneneinstrahlung aus jeder Himmelsrichtung wird berechnet, indem eine Sonnenkarte in derselben hemisphärischen Projektion wie das Sichtfeld verwendet wird. Eine Sonnenkarte ist eine Raster-Darstellung, die die Sonnenspur oder die scheinbare Position der Sonne im Verlauf der Stunden eines Tages oder der Tage eines Jahres anzeigt. Das ist damit vergleichbar, in den Himmel zu blicken und eine Zeit lang zu beobachten, wie sich die Sonne über den Himmel bewegt. Die Sonnenkarte besteht aus einzelnen Sektoren, die durch die Position der Sonne in bestimmten Intervallen des Tages (Stunden) und des Jahres (Tage oder Monate) definiert werden. Die Sonnenspur wird basierend auf dem Breitengrad des Untersuchungsgebiets und der Zeitkonfiguration, die die Sonnenkartenbereiche definiert, berechnet. Für jeden Sektor der Sonnenkarte wird ein eindeutiger Identifikationswert zusammen mit den Zenit- und Azimutwinkeln am Schwerpunkt angegeben. Die Sonneneinstrahlung aus den einzelnen Sektoren wird getrennt berechnet und die Sonnenkarte wird mit dem Sichtfeld überlagert, um die direkte Strahlung zu berechnen.“ vgl. („Modellierung der Sonneneinstrahlung—ArcMap | Dokumentation,” 2012).

5.7.1.2.3 Berechnung der Himmelskarte

„Die diffuse Strahlung kommt aus allen Himmelsrichtungen und entsteht dadurch, dass die Strahlung durch atmosphärische Bestandteile (Wolken, Partikel usw.) gestreut wird. Um die diffuse Strahlung für eine bestimmte Position zu berechnen, wird eine Himmelskarte erstellt, die eine hemisphärische Ansicht des gesamten Himmels darstellt. Diese Ansicht ist in eine Reihe von Himmelssektoren unterteilt, die durch Zenit- und Azimutwinkel definiert sind. Jedem Sektor wird ein eindeutiger Identifikationswert zusammen mit den Zenit- und Azimutwinkeln am Schwerpunkt zugeordnet. Die diffuse Strahlung wird für jeden Himmelssektor basierend auf der Richtung (Zenit und Azimut) berechnet“ vgl. („Modellierung der Sonneneinstrahlung—ArcMap | Dokumentation,” 2012).

5.7.1.2.4 Überlagerung des Sichtfeldes mit den erstellten Sonnen- und Himmelskarten.

„Bei der Berechnung der Sonneneinstrahlung wird das Sichtfeld-Raster mit den Sonnenkarten- und Himmelskarten-Rastern überlagert, um die diffuse und direkte Strahlung aus jeder Himmelsrichtung zu berechnen. Der Anteil der sichtbaren Himmelsfläche in jedem Sektor wird berechnet, indem die Anzahl der nicht verdeckten Zellen durch die Gesamtzahl der Zellen in jedem Sektor geteilt wird. Dabei wird berücksichtigt, dass einige Himmelssektoren zum Teil verdeckt sind“ .zitiert in („Modellierung der Sonneneinstrahlung—ArcMap | Dokumentation,” 2012) aus (Rich and Fu, 2000), („Solar Analyst Manual,”) und (Fu and Rich, 2002).

5.7.1.2.5 Modelleinstellungen im “Punkt Sonnenstrahlungswerkzeug”

Nachfolgend ist das Eingabefenster zur Berechnung der solaren Einstrahlung dargestellt. Anhand der Einstellung „Transmittivity“ kann für unterschiedliche Transmissionsgrade der Atmosphäre also für die Messbedingungen „klar“ und „diffus“ modelliert werden. Sonstige Eingaben sind ähnlich wie bei der späteren Modellierung mit SOLWEIG. Als Eingaberaster wird das Raster aus Überlagerung von Sichtfeld und erstellten Sonnen- und Himmelskarten verwendet. Nun kann für verschiedene POIs (z.B. Messpunkte URS_SA1) die direkte und diffuse Solarstrahlung ermittelt werden.

Abbildung 15: Einstellung des Solarstrahlungswerkzeug aus Arc GIS Pro

5.7.1.3 Anmerkung

Nach mehrmaligem testen dieses Tools wurde festgestellt, dass die modellierten Daten optisch sehr stark von den gemessenen Daten abweichen. Hauptgrund liegt darin, dass dieses Modell den Transmissionsgrad der zu modellierenden Vegetation nicht berücksichtigt. Zusätzlich wurden die LiDAR-Daten in unbelaubten Zustand erfasst, was nach diesem Ansatz eine Validierung mit den Messdaten im belaubten Zustand erschwert.

5.7.2 Modellierung der solaren Einstrahlung mit SOLWEIG

5.7.2.1 Das SOLWEIG -Modell

Nach mehreren Probeläufen und der Erkenntnis, dass das Sonneneinstrahlungswerkzeug in Arc GIS Pro den Transmissionsgrad der Vegetation nicht berücksichtigen kann, wird nun auf das bereits im

Forschungsstand erwähnte Modell SOLWEIG gewechselt (Solar and LongWave Environmental Irradiance Geometry Modell), um die kurzwellige Solarstrahlung zu simulieren. Dieses Modell wird zur Berechnung der räumlichen Variation von Strahlungsflüssen in Städten verwendet. Hauptzielgröße ist dabei die mittlere Strahlungstemperatur in Bodennähe. Diese wird berechnet, um Aussagen über die thermalen Bedingungen in einer städtischen Region in Bezug auf das menschliche Wohlbefinden zu treffen. (Lindberg et al., 2008) Auf Grundlage der Modellierung von kurz- und langwelliger Strahlung kann die mittlere Strahlungstemperatur berechnet werden. Dabei werden die Strahlungsflüsse an einem Point of Interest (POI) in sechs Richtungen ermittelt, d.h. von der Atmosphäre kommend auf die Erdoberfläche treffend und umgekehrt, sowie in alle vier Himmelsrichtungen. Als Input für die Modellierung sind Klimadaten und Geometriedaten der zu modellierenden Region erforderlich. Hauptinputklimadaten sind die ankommende Globalstrahlung, die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte. Als Inputgeometriedaten wird ein digitales Höhenmodell der Region, ein digitales Oberflächenmodell, welches die abiotische Stadtgeometrie beinhaltet (Häuser und andere feststehende Objekte) und ein Oberflächenmodell der biotischen Stadtgeometrie (Vegetation) benötigt. Abbildung X stellt schematisch dar, welche Inputdaten für die Modellierung benötigt sind. Da in der vorliegenden Arbeit die Modellierung der ankommenden Solarstrahlung (K_{down}) im Vordergrund der Untersuchung, wird die Information der Oberflächenbedeckung nicht als Input verwendet. Später wird dafür der Faktor des Emissionsgrad und des Albedo an die jeweilige Standortumgebung angepasst (versiegelt, nicht versiegelt).

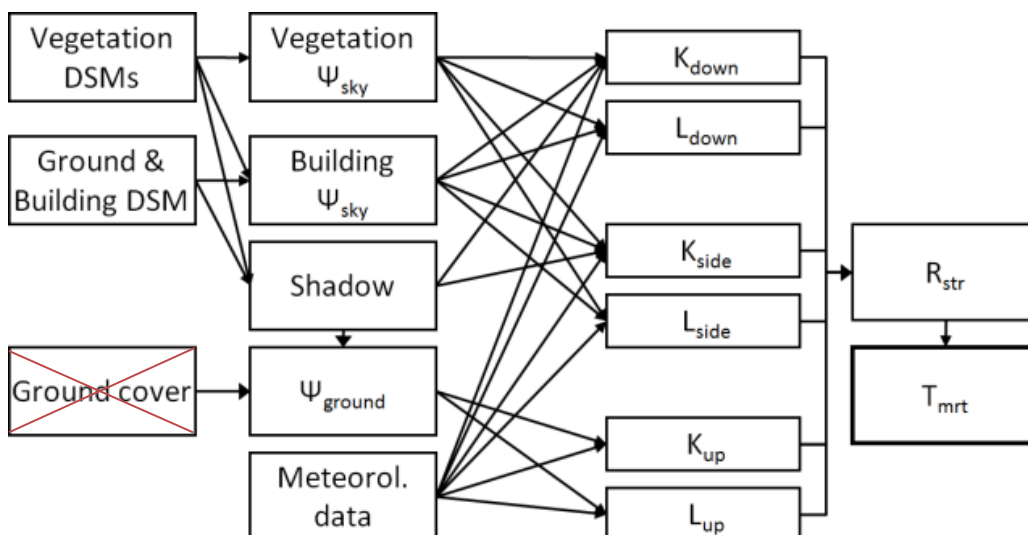


Abbildung 16: Schematische Modellstruktur des SOLWEIG Modells. (Lindberg et al., 2018)

5.7.2.2 Modellumgebung (QGIS-Version: QGIS 3.28 Firenze)

„Das SOLWEIG Modell steht als „UMEP“ Plugin- Modul für das Opensource Programm QGIS zur Verfügung. „UMEP (Urban Multi-scale Environmental Predictor), ein stadtbasiertes Klimadienstleistungswerkzeug, kombiniert Modelle und Werkzeuge, die für Klimasimulationen unerlässlich sind. Es werden Anwendungen vorgestellt, die das Potenzial von UMEP bei der Erkennung von Hitzewellen und Kältewellen, den Auswirkungen grüner Infrastruktur auf den Abfluss, den Auswirkungen von Gebäuden auf die thermische Belastung des Menschen, der Solarenergieerzeugung und den Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf Wärmeemissionen veranschaulichen. UMEP hat einen breiten Nutzen für Anwendungen im Zusammenhang mit dem thermischen Komfort im Freien, Wind, städtischem Energieverbrauch und der Eindämmung des Klimawandels. Es enthält Werkzeuge, die es den Nutzern ermöglichen, atmosphärische und Oberflächendaten aus verschiedenen Quellen einzugeben, die städtische Umwelt zu charakterisieren, meteorologische Daten für den Einsatz in Städten aufzubereiten, Simulationen durchzuführen und Szenarien zu betrachten sowie verschiedene Kombinationen von Klimaindikatoren zu vergleichen und zu visualisieren. Als Open-Source-Tool ist UMEP so konzipiert, dass es leicht aktualisiert

werden kann, wenn neue Daten und Werkzeuge entwickelt werden, und dass es für Forscher, Entscheidungsträger und Praktiker zugänglich ist“.(Lindberg et al., 2018)

5.7.2.3 Vorarbeit

Um die vorhandenen LiDAR-Daten von ganz Freiburg vorzufiltern und auf den entsprechenden Standortausschnitt anzupassen wurden diese in RStudio mit dem Paket LidR bereinigt und ausgeschnitten. „LidR ist ein open source R-Paket zur Manipulation und Visualisierung von Airborne Laser Scanning (ALS) Daten mit Schwerpunkt auf forstwirtschaftliche Anwendungen (Tompalski, 2022.). Zu den wichtigsten Funktionen zählen:

- Das Einlesen und Ausgeben von .las Dateien
- Die Verarbeitung von Punktwolken und Punktklassifizierung
- Die Erstellung digitaler Geländemodelle
- Die Normalisierung
- Und Vegetationssegmentierung

Nach Eingrenzung der Standorte wurde zur Erstellung der Oberflächen und Höhenmodelle die Software CloudCompare benutzt. CloudCompare ist ebenfalls eine Opensource Software zur Bearbeitung und Verarbeitung von 3D-Punktwolken (und Dreiecksnetzen). (“CloudCompare v2.6.1 - User manual.pdf,” 2022.) CloudCompare wurde entwickelt um Punktwolken mit mehr als 10 Millionen Punkte (im Jahr 2005) zu verarbeiten. Im ersten Schritt wurden die mit lidR erstellten LAS-Ausschnitte in das Programm eingelesen. Anschließend wurden diese in die bereits vorhandenen Klassen Erdoberfläche, Vegetation und Gebäude gegliedert, um anschließend die drei benötigten Höhenmodelle zu generieren.

5.7.2.4 Eingabedaten

5.7.2.4.1 Oberflächenmodelle

Wichtig für die spätere Modellierung ist, dass alle Erstellten Oberflächen- und Höhenmodelle einheitliche Rastergrößen und Ausdehnung aufweisen.

Grund und Gebäude DSM (Digitale Surface Model): Digitales Oberflächenmodell aus Erdoberfläche und Gebäudeoberfläche.

Vegetation DSM: Die 3D-Vegetation wird durch zwei Gitternetze beschrieben. Das Erste enthält die Information über die Baumkrone, das den oberen Teil der Vegetation darstellt. Das Zweite stellt den Bereich unterhalb der Baumkrone dar, d.h. den Beginn der Baumkrone am Stamm des Baumes (Lindberg and Grimmond, 2011c).

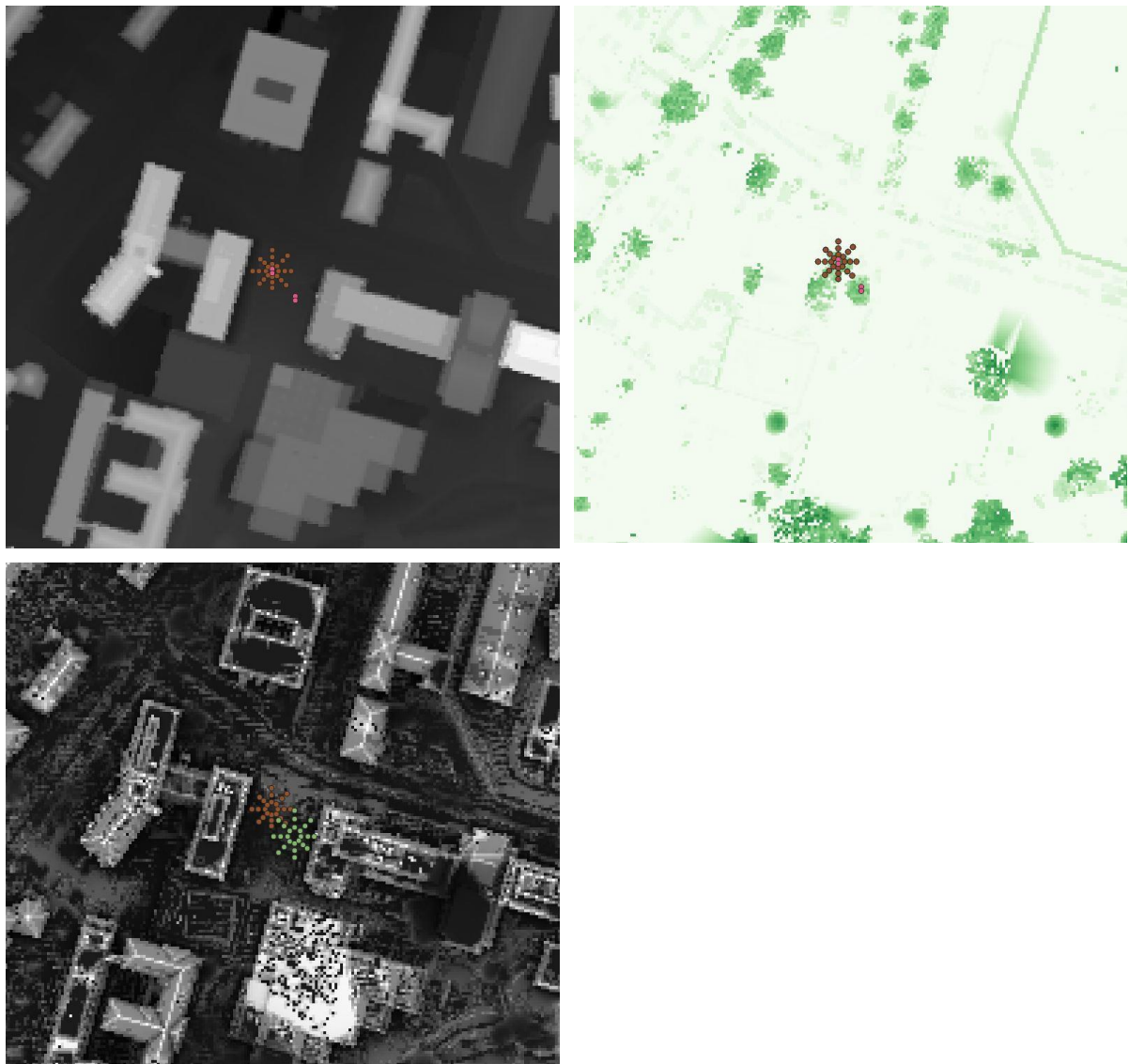


Abbildung 17: Gebäuderaster, Baumkronenraster mit Höheninformation und Baumkronenmorphologie und berechnete Horizontüberhöhung am Beispiel HHS9

5.7.2.4.2 Digitale Höhenmodelle

Um jeder Rasterzelle nun die Eigenschaft Erdoberfläche/Vegetation/Gebäude zu zuordnen, werden die erstellten Oberflächenmodelle mit einem Höhenmodell DEM (Digital Elevation Model) verschnitten.

5.7.2.4.3 Meteorologische Daten

Die meteorologischen Inputdaten sind

- Lufttemperatur [degC]
- Luftfeuchte [%]
- Eintreffende Globalstrahlung [W m^{-2}]
- Niederschlag [mm]
- Luftdruck [kPa]

Für diese Messgrößen wurden die Daten von der nächstgelegenen Klimastation „Chemiehohe“ (siehe Karte) für den Messzeitraum entnommen. Daraus wurde mit dem Werkzeug „Preprocessing tool meteorological Data“ das erforderliche Klimaformat der benötigten Klimaparameter erstellt.

5.7.2.4.4 Horizontüberhöhungen

Die als Eingabe benötigten Horizontüberhöhungen werden mit dem „Sky View Factor“ Werkzeug anhand der Erstellten Höhenmodell für Gebäude und Vegetation berechnet. Dabei wird bereits der Transmissionsgrad in % und die Höhe des Baumkronenansatz eingegeben. Die Höhe des Kronenansatz wird in % von der Gesamthöhe eingegeben, der Transmissionsgrad wird aus den bereits ermittelten Werten (siehe Tabelle 7) herangezogen. Ausgegeben wird ein Raster von 1m Auflösung in der jeder Rasterzelle eine Horizontüberhöhung von 0-1 zugeordnet wird. Der Wert 0 entspricht einer völlig verdeckten Horizontüberhöhung, der Wert 1 einer völlig freien.

5.7.2.5 Berechnung der kurzwelligen Strahlungsflüsse

Die Berechnung der kurzwelligen Strahlung benötigt Daten zur direkten, diffusen und globalen Strahlung als Eingaben in das Modell. Gleichung (5-1) stellt die Berechnung der einfallenden Kurzwellenstrahlung an einem bestimmten Ort ($K_{\downarrow ij}$) in einer städtischen Umgebung dar. Die Kalkulation der kurzweligen Solarstrahlung an einem POI in SOLWEIG beruht auf folgende 4 Gleichungen (Lindberg, 2007).

$$K_{\downarrow ij} = K_{dir} * Sh_{ij} * \sin \eta + K_{diff} * \psi_{ij} * G * \alpha * (1 - \psi_{ij}) * \sin \eta \quad (5-1)$$

$$K_{\uparrow ij} = K_{\downarrow ij} * \alpha \quad (5-2)$$

Gleichung (5-1) stellt die Berechnung der solaren Einstrahlung an einem POI dar (K_{poi}). K_{dir} , K_{diff} und G sind die meteorologischen Inputgrößen der direkten, diffusen und globalen Strahlung. Sh_{ij} ist ein boolescher Wert und gibt Auskunft über die Verschattung. Dabei entspricht 0 keinem Schatten und 1 entspricht der Information Beschattung. Für die Berechnung des Sonnenstands (η) über dem Horizont, wird ein Algorithmus verwendet, der auf Basis von Beobachtungen des Umlaufs der Erde um die Sonne erstellt wird. Durch Unregelmäßigkeiten des Erdumlaufs entstehen Unsicherheiten bei der Kalkulation von η 0,0003°. Weitere Erläuterung siehe (Reda and Andreas, 2004). ψ_{ij} ist der „Himmelsichtfaktor“ (hier auch als Horizontüberhöhung bezeichnet). Er gibt an wie viel Prozent des Himmels an einem POI bzw. in jedem generierten Pixels des Geländemodells zu sehen sind. 0 entspricht keinem sichtbaren Himmel wohingegen 1 einem komplett einsehbaren Himmel entspricht. Anhand der erstellten DEM wird nach der von (Ratti and Richens, 1999) zitiert in (Lindberg et al., 2008) entwickelten Methodik vorgegangen. Dabei wird unter Verwendung von Rasterbasierten Modellen eine Methode entwickelt um geometrische Parameter wie den „Himmelsichtungsfaktor“ zu bestimmen. Anhand dieser Methodik wird das DSM der Gebäude mit dem DSM der Vegetation überlagert und jeder Rasterzelle wird eine Himmelsfaktor zwischen 0 und 1 zugeordnet. Alpha (α) entspricht einem durchschnittlichen Albedowert für das gesamte Modellgebiet. Die abstrahlende kurzwellige Strahlung wird somit wie in Gleichung (5-2) beschrieben anhand des Albedo bestimmt.

Die kurzwellige Strahlung aus den vier Himmelsrichtungen ($K_{\rightarrow}$) ist eine Modifikation von Gl. (5-1) und kann wie folgt abgeschätzt werden, wenn $\theta > 0$ und $\theta < 180$ dann gilt:

$$K_{\rightarrow ij} = K_{dir} * Sh_{ij} * \cos \eta * \sin (\theta) + K_{diff} * \psi_{ij} * G * \alpha * (1 - \psi_{ij}) * \sin \eta \quad (5-3)$$

Ansonsten gilt:

$$K_{\rightarrow ij} = K_{diff} * \psi_{ij} * G * \alpha * (1 - \psi_{ij}) * \sin \eta \quad (5-4)$$

wobei θ der Azimutwinkel der Sonne d.h. der Winkel bei der ein Punkt an der Himmelskugel im horizontalen Koordinatensystem verortet werden kann ist. „Der wichtigste Unterschied zwischen den

Gleichungen (5-1) und (5-3) ist, dass der Sonnenhöhenwinkel im ersten Term Cosinus anstatt Sinus gewichtet ist. Dies ist, weil die östliche Strahlungsflusskomponente ein anderes Sichtfeld hat. Im Vergleich zur Abwärtskomponente ist der Zenitwinkel um 90° versetzt. Der Sinusgewichtete Sonnenazimutwinkel θ in Gleichung (5-3) ist so eingefügt, dass bei θ von 90° die Position der Sonne senkrecht zur östlichen Komponente steht und ein Wert von 1 in die Gleichung aufgenommen wird. Zur Berechnung der kurzwelligen Strahlung aus einer anderen Himmelsrichtung, z. B. der Südkomponente in Gleichung (5-3) wird 90° von θ subtrahiert und die Bedingung wird in wenn $\theta > 90$ und $\theta < 270$, Gleichung (5-3) sonst Gleichung (5-4), geändert. Für die westliche und nördliche Komponente wird θ in -180° bzw. -270° und die Bedingungen in $\theta > 180$ und $\theta < 360$ bzw. $\theta > 270$ oder $\theta < 90$, geändert (Lindberg et al., 2008).

5.7.2.6 Modellverarbeitung

Modelliert wurde nur für die Einstellung „Isotropic Sky“ was einem wolkenlosen Himmel entspricht. Der Standort der TUF konnte nicht modelliert werden, da hier keine LiDAR-Daten vorhanden waren. Zur späteren Validierung wurden demnach nur die bei „klarem“ Himmel gemessenen Werte herangezogen.

Spatial data

Building and ground DSM: Select

SkyViewFactor grids (.zip): Select

☒ Use vegetation scheme (Lindberg, Grimmond 2011) Vegetation Canopy DSM: Select

☐ Trunk zone DSM exist Vegetation Trunk zone DSM: Select

☐ Save generated Trunk zone DSM

Transmissivity of light through vegetation (%): Percent of canopy height:

☐ Conifer trees (deciduous default) First day of year with leaves: Last day of year with leaves:

☐ Use land cover scheme (Lindberg et al. 2016) UMEP land cover grid: Select

☐ Use land cover grid to derive building grid

☐ Save generated building grid

Ground DEM: Select

Wall aspect raster: Select

Wall height raster: Select

☐ Use anisotropic model for diffuse shortwave (Perez et al. 1993) and longwave (Martin Berdahl, 1984) radiation

Shadow maps (.npz): Select

Meteorological data

☒ Use continuous meteorological dataset Select

Estimate diffuse and direct shortwave components from global radiation: ☐

June 1997						
Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun
22	26	27	28	29	30	1
23	2	3	4	5	6	7
24	9	10	11	12	13	14
25	16	17	18	19	20	21
26	23	24	25	26	27	28
27	30	1	2	3	4	5

Air temperature (degC): Water temperature (degC):

Relative Humidity (%): Wind speed (m/s):

Global radiation (W/m²): Wind sensor height (m):

Direct radiation (W/m²): UTC offset (hours):

Diffuse radiation (W/m²): Local standard time:

Output maps

☐ Tmrt ☐ Kup ☒ Kdown ☐ Ldown ☐ Lup ☐ Shadow

Environmental parameters

Emissivity (walls): Albedo (walls):

Emissivity (ground): Albedo (ground):

T_HRT parameters

Absorption of shortwave radiation:

Absorption of longwave radiation:

Posture of the body:

PET parameters

Age (yy): Weight (kg):

Activity (W): Height (cm):

Clothing (do): Sex:

Optional settings

☒ Include POI(s) Vector point file:

☒ Consider human as cylinder instead of box ID field:

☐ Adjust sky emissivity according to Jonsson et al. (2005) ☐ Save file(s) for TreePlanter

Output folder: Select

☐ Add average mean radiant temperature map to project

Abbildung 18: Eingabefenster des SOLWEIG-Modells

5.7.2.7 Modellausgabe

Als Ergebnis stehen die berechnete Raster verschiedener Parameter und vollständige Modellausgaben von bestimmten (POI) zur Verfügung. Die berechneten Raster sind:

Es gibt sechs verschiedene Raster, die von jeder Modelliteration gespeichert werden können:

1. Mittlere Strahlungstemperatur
2. **Eingehende kurzwellige Strahlung**
3. Ausgehende kurzwellige Strahlung

4. Einfallende langwellige Strahlung
5. Ausgehende langwellige Strahlung
6. Schattenmuster

Dabei wurde das Output Raster der eingehende kurzwellige Strahlung (Kdown) berechnet.

5.7.2.8 POI.txt

Durch Ankreuzen der Option zur „Einbeziehung von POIs“ (siehe Grafik in Abbildung 18), kann eine Vektorpunktebene hinzugefügt werden, und die vollständige Modellausgabe wird in eine Textdateien für den jeweiligen POI geschrieben. Als POI wurden die Messpunkte der vermessenen Bäume verwendet.

5.7.2.9 Nachbearbeitung

Die einzelnen Textdateien der (96Messpunkte*13Bäume) wurden in RStudio in ein Dataframe geschrieben und mit den Messdaten validiert.

5.7.2.10 Modellkalibrierung

Das Modell wurde von „Hand“ mit dem Transmissionsgrad kalibriert. Dabei wurde zuerst ein Transmissionsgrad von 0% und anschließend ein Transmissionsgrad von 20% verwendet. Zwischen diesen Transmissionswerte wurde in Einer Schritten von 0-20% erhöht. Dabei liefert der Transmissionsgrad von 3% die optisch beste Übereinstimmung von gemessenen und modellierten Daten.

5.7.2.11 Modellvalidierung

Die Modellgüte, d.h. wie gut ein Modell zu den real gemessenen Werten passt, kann anhand verschiedener mathematisch-statistischen Methoden überprüft werden. vgl. (Fohrer et al., 2016). Gängige Gütemaße sind zum Beispiel der Root mean square error (RMSE), der mittlere absolute Fehler (Mean Absolute Error, MAE) und die Korrelation (Dormann, 2013). Nach Modellierung mit SOWLEIG wird der RMSE, MAE und Spearmans ρ bestimmt.

Der RMSE beschreibt Standartabweichung der Residuen. Er gibt an, wie weit Datenpunkte von der Regressionsgerade gemessener und modellierter Werte entfernt liegen. Gängige Anwendungsbereiche liegen im Bereich der Klimaforschung. (Chai and Draxler, 2014). Der MAE ist die mittlere absolute Abweichung von gemessenen und modellierte Daten. In Chai und Draxler (2014) werden Vor- und Nachteile der beiden Gütemaße diskutiert. Ein Argument für den RMSE ist, dass dieser die absoluten Werte nicht beachtet. Bei nahezu gaußförmiger Verteilung der Residuen ist der RMSE dem MAE, ebenfalls zu bevorzugen. Der RMSE kann mit folgender Gleichung berechnet werden.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (5-5)$$

Für die vorliegende Modellierung wurde die Spearman Korrelation berechnet. Dieser Korrelationskoeffizient basiert auf Rangwerten und ist zu bevorzugen, wenn die Daten schief verteilt sind und hohe Ausreißer beinhalten. Spearmans ρ kann anhand folgender Gleichung berechnet werden.

$$\rho = 1 - \frac{6 * \sum d_i^2}{(n^2 - 1) * n} \quad (5-6)$$

5.8 Messdatenanalyse

5.8.1 Deskriptive Darstellung der Ergebnisse

Um die Messergebnisse deskriptiv zu analysieren, werden alle Messergebnisse beschrieben und dargestellt. Es wurden Boxplots von jedem Baum und für die zwei Messbedingungen „klar“ und „diffus“ erstellt. Weiter wird die Auswirkung der Exposition der Messungen dargestellt, beschrieben und interpretiert.

5.8.2 Test auf signifikante Unterschiede in der Einstrahlung

Um Unterschiede der Einstrahlung in Bodennähe zu untersuchen, wurden die vermessenen Bäume in die Gruppe „versiegelter Untergrund“ und „unversiegelter Untergrund“ eingeteilt. Danach wurden die Messdaten in ein Meter Höhe dieser zwei Gruppen für klare und diffuse Messbedingungen mittels Mann-Whitney-U-Test auf signifikante Unterschiede geprüft. Das Signifikanzniveau beträgt 5 %.

Der Mann-Whitney-U-Test oder auch Wilcoxon-Rangsummentest ist praktisch das Gegenstück zum t-Test, welcher seine Anwendung bei normalverteilten Daten findet. Der nichtparametrische Mann-Whitney-U-Test wird immer dann angewandt, „[...wenn Unterschiede zwischen zwei Gruppen bei einer einzigen ordinalen Variablen ohne spezifische Verteilung...]“ vorliegen (McKnight and Najab, 2010). Die Messdaten wurden auf „Normalverteilung“ geprüft (siehe Anhang Abbildung 37). Da diese nicht normalverteilt sind kam der beschriebene Mann-Whitney-U-Test zur Anwendung.

5.8.3 Umrechnung der solaren Einstrahlung in die potenzielle Verdunstung

Für die Umrechnung der kurzweiligen Einstrahlung in die potenzielle Verdunstung wurde nach der in Kapitel 4.1 vorgestellten vereinfachten Methode Gleichung (4-3 und (4-4) vorgegangen. Dabei wurden die gemessene Globalstrahlung R_n , die Temperatur T aus den gemessenen Lufttemperaturdaten in den Baumkronen über die Höhe gemittelt (stündlicher Auflösung) und h die Höhenlage der Baumstandorte als Eingabe verwendet. Der K_c -Faktor des Bestands wurde auf Eins gesetzt. Dieser Faktor entspricht der maximalen Belaubung der untersuchten Bäume. (Annahme: maximale Belaubung zum Messzeitpunkt).

6 Ergebnisse

6.1 Modellvalidierung

6.1.1 Visuelle Prüfung der Modellgüte

In Abbildung 19 (Hinweis: Innerhalb der Abbildung gemeint sind: HHS_WL_1 17 Uhr bis JCBS_WL2 15 Uhr) sind die Messungen des Lichteinfalles an den 96 Messpunkten für die 7 erfassten Winterlinden dargestellt. Auf der x-Achse sind die Messpunkte aufgetragen. Auf der y-Achse ist die Sonneneinstrahlung in W/m^2 dargestellt. In der Grafik sind die Ergebnisse der eigenen Solarmessungen schwarz aufgetragen. Rot dargestellt sind die Ergebnisse der modellierten kurzwelligen Sonneneinstrahlung. In Abbildung 20 folgt die gleiche Darstellung für die 6 untersuchten Spitzahorne (ohne den Standort TUF, da hier keine LiDAR-Daten vorhanden sind). Die 7 Winterlinden wurden im Zeitfenster von 10 Uhr (IVM_WL1) und 17 Uhr (HHS_WL_1 und 2) vermessen, die 6 dargestellten Spitzahorne im Zeitfenster von 9 Uhr bis 11 Uhr.

Darüber hinaus wird für die beiden Arten auch der Tagesgang im Zeitfenster von 7 – 22 Uhr modelliert. Dieser ist beispielhaft für einen Spitzahorn (SWB19_SA2) und eine Winterlinde (IVM2_WL1) dargestellt (Abbildung 41 und Abbildung 42 im Anhang). Die Messung der kurzwelligen Einstrahlung wurden bei der Winterlinde um 10 Uhr und beim Spitzahorn um 11 Uhr durchgeführt. Bei der Überprüfung des Belaubungszustandes zum Zeitpunkt der Erfassung der LiDAR-Daten im März 2022 war die Winterlinde unbelaubt, beim Spitzahorn war der Laubaustrieb in den Luftbilddarstellungen in Google Earth (Luftbild 19.03.2022) bereits zu erkennen.

Sowohl die Messergebnisse bei Spitzahorn als auch bei den Winterlinden konzentrieren sich in zwei Messbereichen: Der überwiegende Teil der Messungen (ca. ± 60 Messergebnisse) streut mit geringer Varianz im Intervall von 30 W/m^2 bis ca. 180 W/m^2 (Abstand 150 W/m^2). Ein geringerer Anteil von Messungen (ca. ± 30 Messergebnisse) streut bzw. konzentriert sich mit größerer Varianz im Wertebereich von ca. 400 W/m^2 bis 800 W/m^2 (Abstand 400 W/m^2). Die größere Varianz lässt sich damit erklären, dass die Mehrzahl dieser Werte außerhalb der Krone oder/und im äußeren und oberen Kronenbereich gemessen wurde und hier die Einstrahlungswerte höher liegen. Auffällige Abweichungen treten z.B. bei der Messung des Spitzahorn in der Urachstraße (URS21_SA1) auf. Dieser wurde um 9 Uhr morgens vermessen. Der Baum steht in einer Baumreihe, die von Westen nach Osten orientiert ist. Morgens um 9 Uhr wird er von dem östlich stehenden Baum verschattet weswegen die Messwerte auf der Nordwestseite und Westseite des Baumes niedriger gemessen wurden.

Bei der Mehrzahl der vermessenen Bäume und beim überwiegenden Teil der modellierten Werte liegen diese erheblich über den gemessenen Werten und in einem Abstand von bis zu ca. $200 - 250 \text{ W/m}^2$. Besonders deutlich wird dieser Sachverhalt bei den Winterlinden die zwischen 10 Uhr und 15 Uhr gemessen wurden, d.h. im Zeitraum hoher Einstrahlung.

Es fällt auf, dass bei dem Spitzahorn in der Schwimmbadstraße (SWB19_SA2) die Modellierungsergebnisse dann nahe an den Messwerten liegen, wenn die Messpunkte im oberen Wertebereich unberücksichtigt bleiben. Wie oben bereits dargestellt, treiben Spitzahorn bereits im März aus. Das Modellierungsergebnis bei diesem Spitzahorn weist darauf hin, dass dieser Spitzahorn zum Zeitpunkt der Aufnahme der LiDAR-Daten bereits eine leichte Belaubung hatte und darum die Modellierungsergebnisse häufig näher bei den gemessenen Werten liegen.

Betrachtet man den aus den gemessenen Daten ermittelten Tagesgang sowie die darauf basierende Modellierung für den Spitzahorn in der Schwimmbadstraße (SWB19_SA2) so lässt sich folgendes feststellen: im Tagesverlauf nehmen sowohl die Messwerte als auch die modellierten Werte mit zunehmender Einstrahlung bis ca. 13 Uhr zu und dann wieder ab. Die modellierten Werte folgen diesem Trend und zeigen den größten Abstand zu den Messwerten um 13 Uhr, d.h. zum Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung.

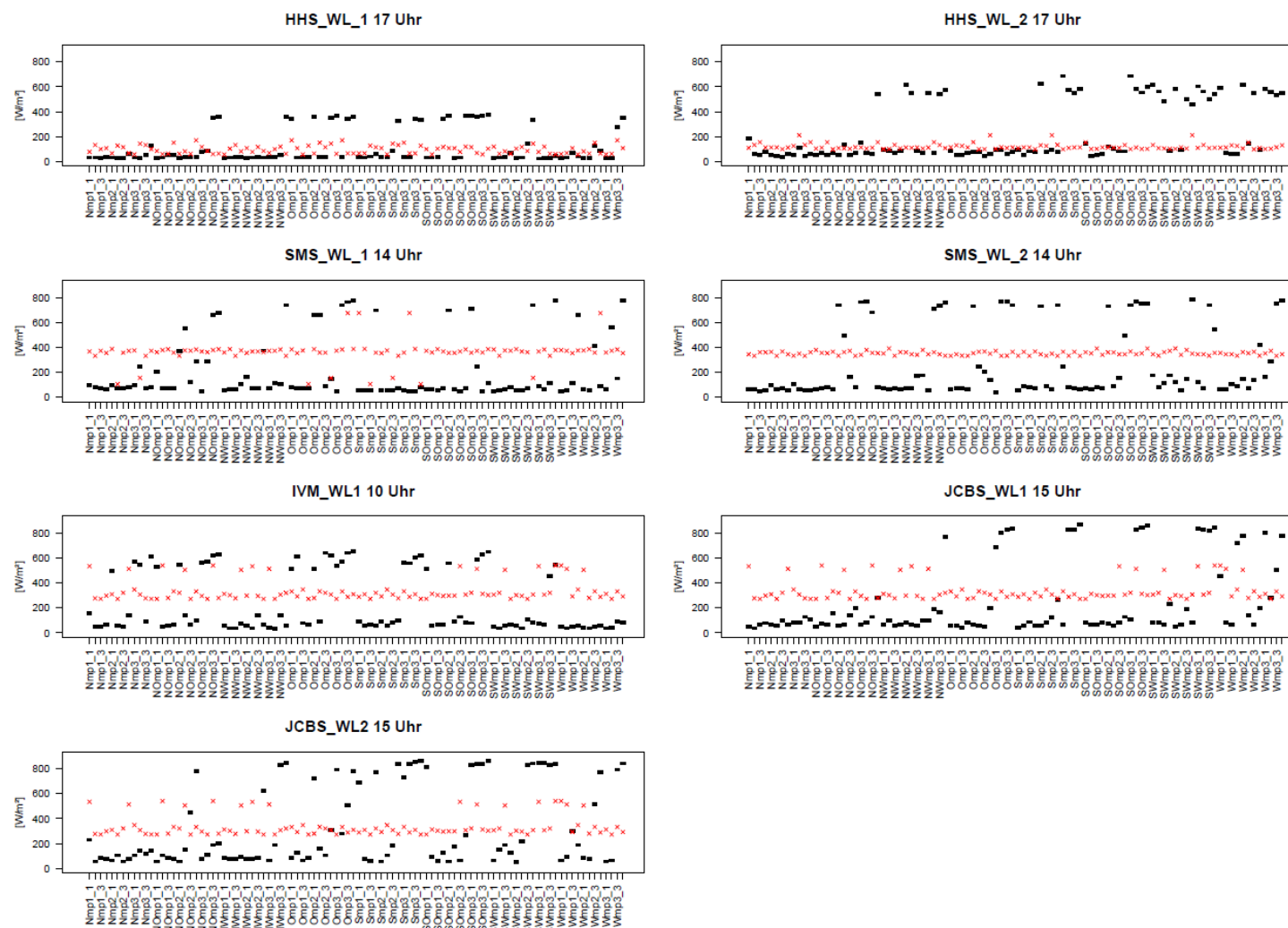


Abbildung 19: Vergleichende Darstellung von Messergebnissen (schwarz) und Modellierungsergebnissen (rot) für die Baumart Winterlinde

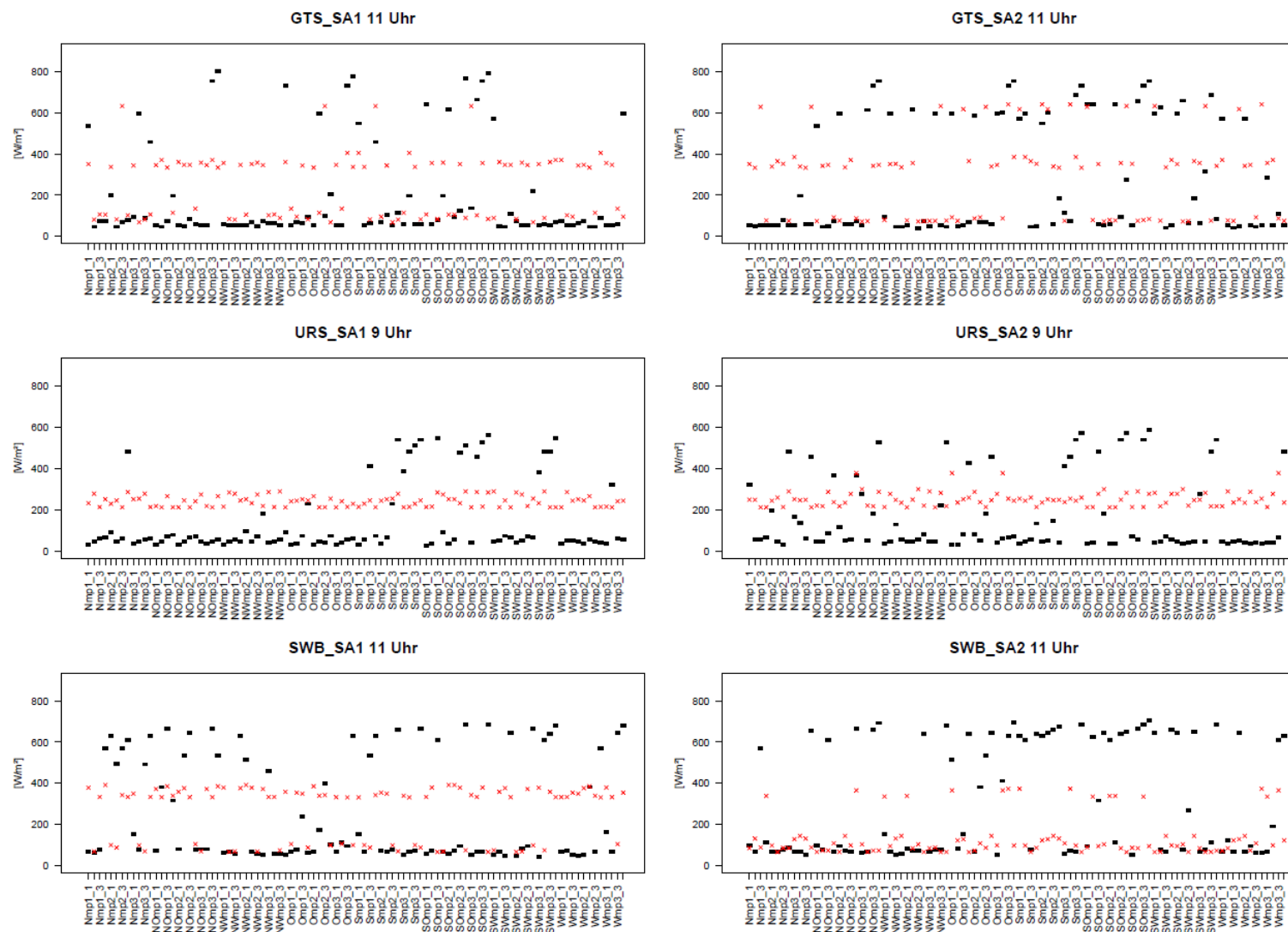


Abbildung 20: Vergleichende Darstellung von Messergebnissen (schwarz) und Modellierungsergebnissen (rot) für die Baumart Spitzahorn

6.1.2 Gütemaße

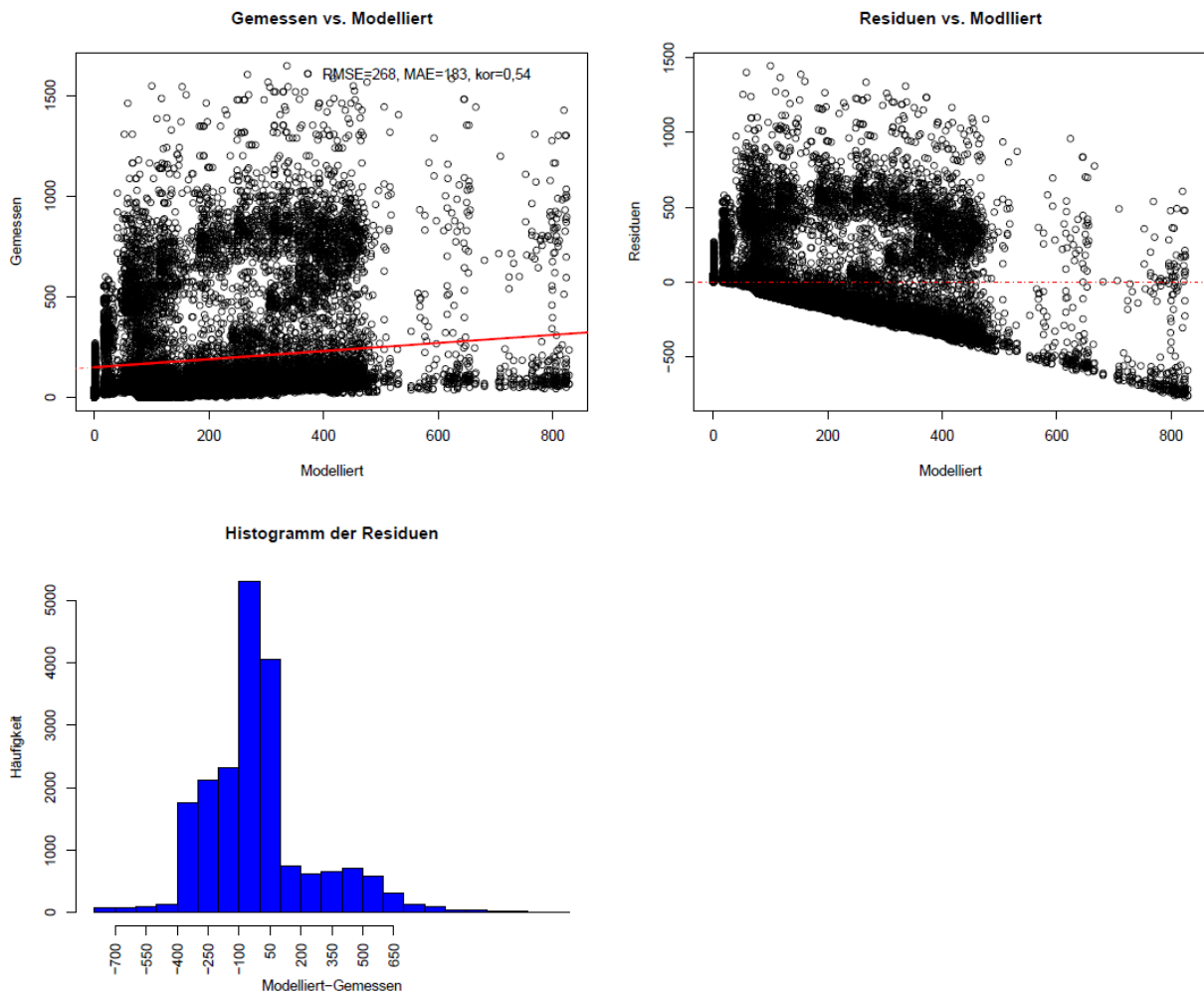


Abbildung 21: Bestimmte Gütemaße, Abweichung der Residuen, Verteilung der Residuen

Nach der Modellkalibrierung wurden die in der Methodik beschriebenen Gütemaße bestimmt und für die gemessenen und modellierten Daten eine Regressionsanalyse durchgeführt.

In Abbildung 21 links oben sind die Ergebnisse der Regressionsanalyse von gemessenen gegen modellierte Daten dargestellt. Rechts oben sind die Residuen gegen die Modellwerte geplottet und links unten ist die Verteilung der Residuen abgebildet. Der RMSE beträgt 268 W/m^2 , der MAE 183 W/m^2 und der Spearman Korrelationskoeffizient $\rho=0,54$.

Anhand der Verteilung der Residuen ist zu beobachten, dass diese einer nach links verschobenen gaußförmigen Verteilung folgt. Dies hat zur Folge, dass Spearmans Rangkorrelation der Pearson Korrelation zu bevorzugen ist.

Der Modelldiagnostik ist zu entnehmen, dass sich zwischen Messung und Modellierung große Unterschiede ergeben. Die berechneten Gütemaße bestätigen diese Beobachtung. Messdaten und Modellierung korrelieren leicht positiv, sowohl der RMSE als auch der MAE sind sehr hoch. Die Abbildung der Residuen macht deutlich, dass die Residuen bei höheren Modellwerten zunehmend negativer werden. Bei der Regressionsgeraden als auch bei den Residuen lässt sich eine „bananenförmige“ Punktwolkenform erkennen. Die Punktwolke wölbt sich links unten auf, verläuft dann etwas nach oben und fällt bei Modellwerten um 400 W/m^2 wieder ab. Unter dem „Bananenbauch“ sind Bereiche mit geringeren Punktdichten vorzufinden.

6.2 Messdatenanalyse

6.2.1 Transmissionsgrad

Tabelle 7 zeigt die ermittelten Transmissionsgrade für alle 15 Bäume. Bei den Messungen bei klaren Wetterverhältnissen lag der durchschnittliche Transmissionsgrad der Winterlinden bei 12,43 %. Der mittlere Transmissionsgrad der Spitzahorne bei 13,91 %. Bei diffusen Wetterbedingungen sind diese Werte deutlich höher. Aus den Mittelwerten sind bei den zwei Baumarten mit 25,21 und 25,26 keine Unterschiede zu erkennen.

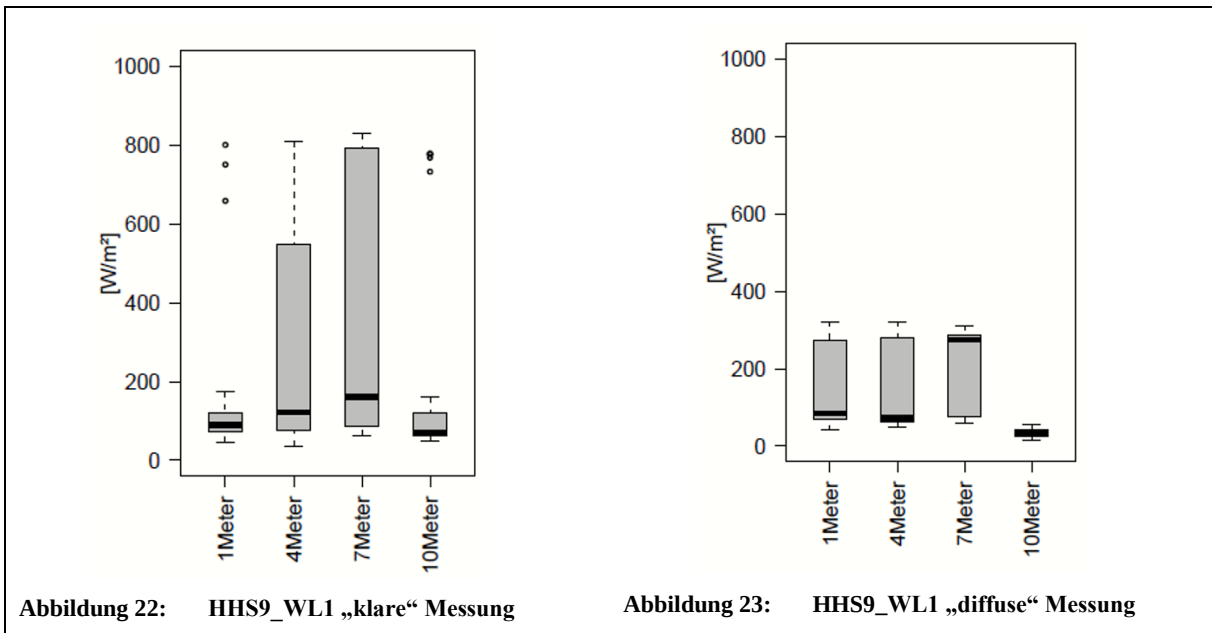
Tabelle 7: **Ermittelte Transmissionsgrade [%] der Bäume / Messung bei klaren und diffusen Wetterbedingen**

Baumart	Baum_ID	Klar	Diffus
Winterlinde	SMS30_WL_1	12.00	33.38
	SMS30_WL2	13.80	32.21
	HHS9_WL1	8.63	16.46
	HHS9_WL2	23.23	26.44
	IVM2_WL1	7.77	7,73
	JCBS42_WL1	8.19	25.25
	JCBS42_WL2	13.36	17.50
	Mittelwert	12.43	25.21
Spitzahorn	URS21_SA1	9.00	20.87
	URS21_SA2	7.47	18.00
	GTS71_SA1	11.64	16.79
	GTS71_SA2	7.42	28.64
	SWB19_SA1	24.93	44.00
	SWB19_SA2	28.85	31.50
	TUF_SA2	10.08	19.80
	TUF_SA3	11.91	22.50
	Mittelwert	13.91	25.26

6.2.2 Standortvergleich / Darstellung und Analyse von Boxplots

6.2.2.1 Exemplarische Beschreibung am Beispiel HHS_WL1

Das methodische Vorgehen bei der visuellen Interpretation eines Boxplot wird am Beispiel der Messergebnisse der Winterlinde im Institutsviertel (HHS9_WL1) erläutert. Nachfolgend sind die Messergebnisse für diese Winterlinde mit den Messungen bei klarem Himmel links dargestellt. Rechts dargestellt sind die Messungen bei diffuser Wetterlage.



Die Box bzw. der Kasten spannt den **Interquartilsabstand** auf. Dieser besteht aus dem **dritten Quartil** und dem **ersten Quartil**. Das dritte Quartil ist der Wert unter dem 75% der Werte der Verteilung liegen. Das erste Quartil ist entsprechend der Wert unter dem 25% der Werte liegen. Im dargestellten Beispiel ist bei den Messungen in 7 Meter Höhe der größte Unterschied in der Verteilung der Messungen „klar“ gegen „diffus“ zu erkennen. Bei „klar 7 Meter“ liegt das dritte Quartil bei 795 W/m² und das erste Quartil bei 95 W/m². Bei „diffus 7 Meter“ liegt das dritte Quartil bei 295 W/m² und das erste Quartil bei 90 W/m².

Die Differenz des dritten Quartil zum ersten Quartil ist der sogenannte Interquartilsabstand. Die Box hat also immer die Länge drittes Quartil bis erstes Quartil. Im Beispiel liegt dieser Abstand bei „klar 7 Meter“ bei 700 W/m² (795 - 95) und bei „diffus 7 Meter“ bei 205 W/m² (295 - 90). Bei den Messungen „klar“ liegen also 50 % der Messwerte in einem Abstand von 700 W/m². Bei diffuser Wetterlage und der daraus resultierenden reduzierten Einstrahlung verringert sich dieser Abstand auf 200 W/m².

Der **Median**, auch **zweites Quartil** genannt, ist ein sehr wichtiger Lageparameter. Er teilt die Verteilung in zwei gleich große Hälften und ist im Gegensatz zum Mittelwert gegenüber Ausreißern nicht anfällig. Im Beispiel liegt der Median bei „klar“ 7 Meter“ bei 180 W/m² und der Median „diffus 7 Meter“ bei 305 W/m². Demzufolge sind 50% der Werte niedriger oder gleich diesem Wert und 50% sind größer oder gleich diesem Wert.

Die Antennen bilden den Minimumwert (untere Antenne) und Maximalwert (obere Antenne) ab. Allerdings stimmt das nur insofern keine Ausreißer vorhanden sind. Ausreißer sind so definiert, dass sie mindestens die anderthalbfache Boxlänge (der Interquartilsabstand) von jener Box entfernt sind. Im Beispiel ist dies der Falle bei der Messung „klar 1 Meter“ und „klar 10 Meter“. Hier überschreiten 3 Ausreißer den Interquartilabstand und liegen weit ab in einem Wertebereich von ca. 650 W/m² bis ca. 800 W/m².

6.2.2.2 Analyse der Messergebnisse aller 15 Bäume

Wie an dem voran dargestellten Beispiel bildet erläutert gibt der Interquartilabstand in den unterschiedlichen Messhöhen und die Lage des Median Information über die Variabilität der Baumkrone.

Nachfolgend werden die Messdaten für alle 15 gemessenen Bäume in je einem Boxplot dargestellt. Zuerst sind die Messergebnisse der Winterlinden und Spitzahorn bei klaren Messbedingungen zu sehen. Danach werden die Messergebnisse der Winterlinden und Spitzahorn die bei diffuser Wetterlage gemessen wurden dargestellt. Nach der Beschreibung der Boxplots erfolgt die vergleichende Analyse.

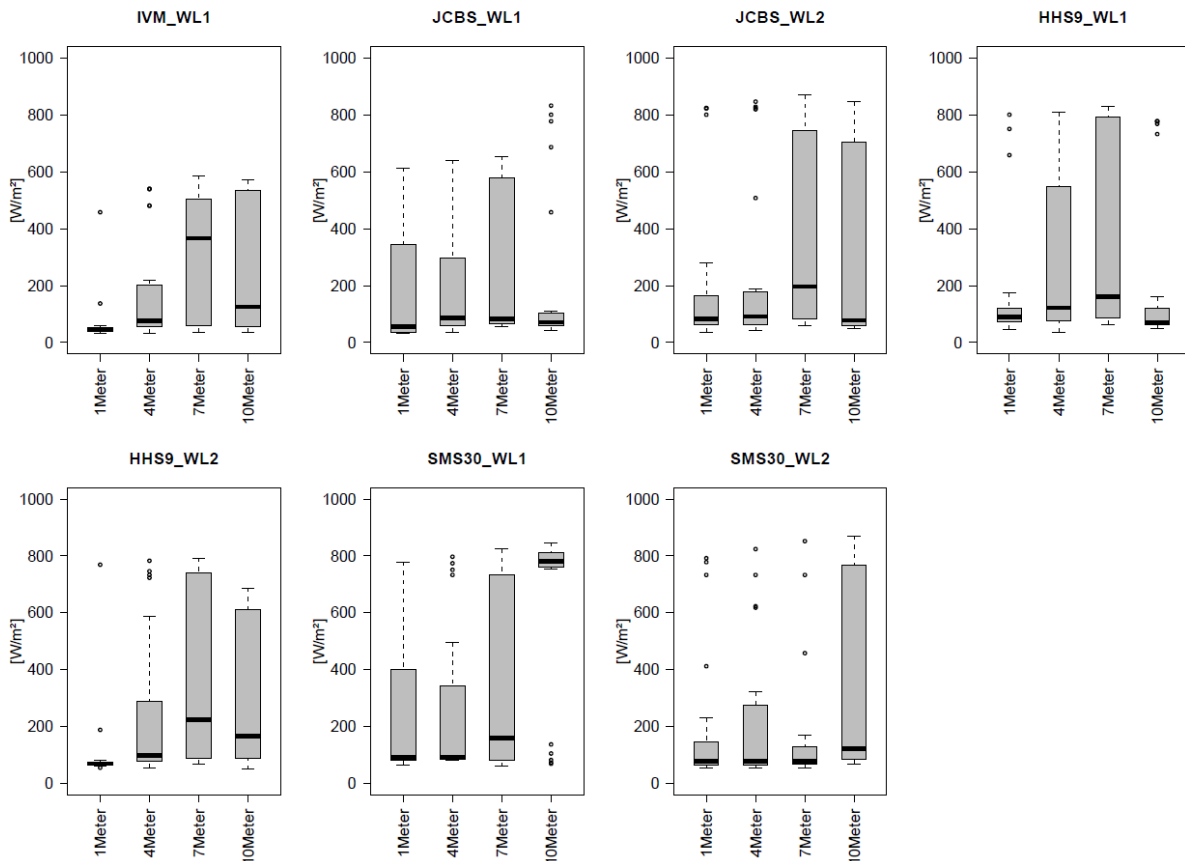


Abbildung 24: Boxplots der vermessenen Winterlinden bei „klaren“ Messbedingungen

Abbildung 24 stellt die Messergebnisse der kurzwelligen Einstrahlungen für die Baumart Winterlinde bei „klaren“ Messbedingungen in einem Boxplot dar. Auf der x-Achse ist die Einstrahlung in W/m^2 und auf der y-Achse die Messhöhen eins, vier, sieben und zehn Meter dargestellt. Betrachtet man den Interquartilabstand fällt auf, dass dieser sehr stark variiert. Bei der Mehrheit der Bäume lässt sich die Tendenz feststellen, dass in 1 Meter Höhe die geringste Streuung innerhalb eines Baum zu beobachten ist. Lediglich die Bäume JCBS_WL1 und SMS30_WL1 weisen ein gegenläufiges Muster auf. Bei diesen ist die Streuung in 10 Meter Höhe am geringsten. Der Median nimmt bei allen Bäumen, exklusive SMS30_WL1, bis in eine Höhe von 7 Meter zu und fällt dann wieder ab. Ausreißer lassen sich bei jedem Baum beobachten wobei kein höhenabhängiges Muster zu erkennen ist.

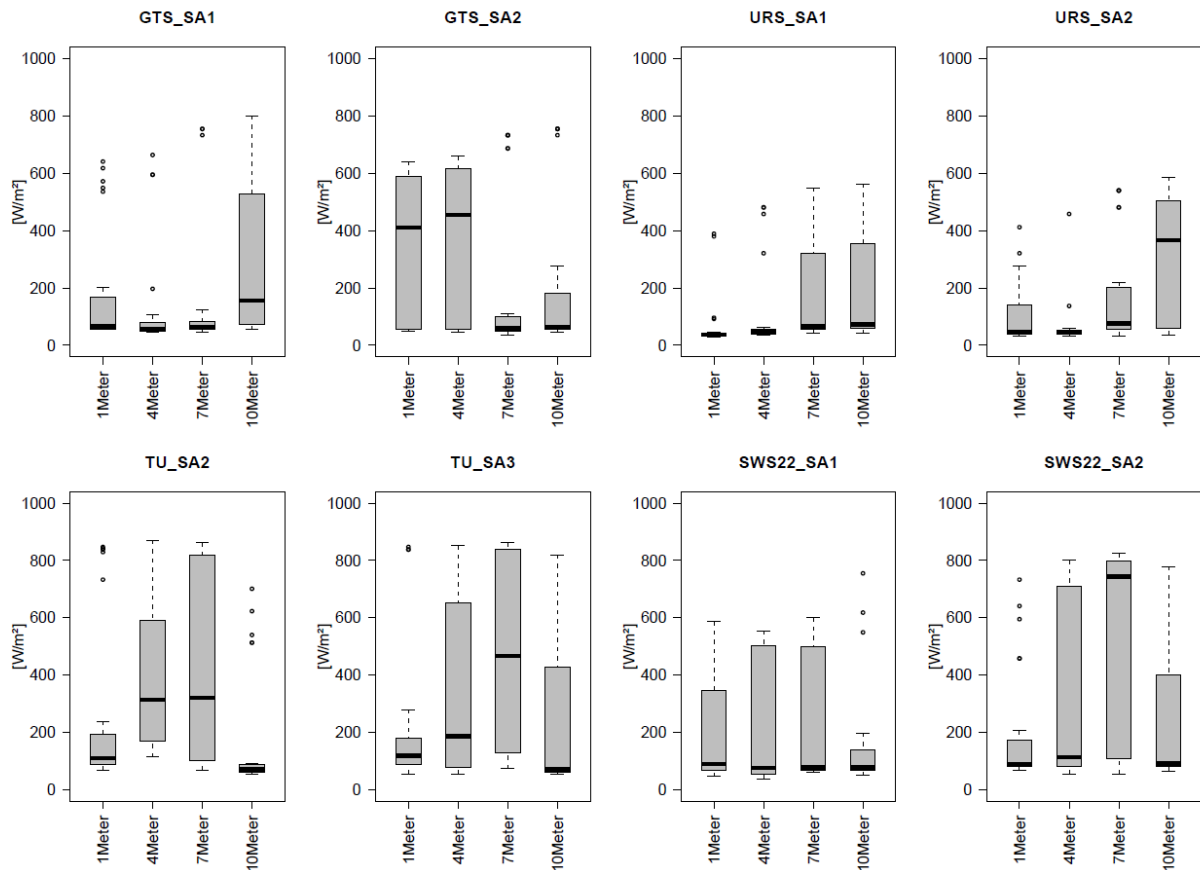


Abbildung 25: Boxplots der vermessenen Spitzahorne bei „klaren“ Messbedingungen

Abbildung 25 stellt die Messergebnisse der kurzwelligen Einstrahlungen für die Baumart Spitzahorn bei „klaren“ Messbedingungen in einem Boxplot dar. Insgesamt ist hier die Streuung d.h. die Variabilität innerhalb eines Baumes von Höhe zu Höhe ausgeprägter als bei den Winterlinden. Der Median variiert hier stärker und folgt nicht demselben Muster wie bei der Winterlinde. Bei GTS_SA1 sind die Mediane der vier Höhen sehr ähnlich. Dagegen unterscheiden sich diese bei dem Spitzahorn GTS_SA2 von Höhe 1 und 4 Meter zu Höhe 7 und 10 Meter deutlich.

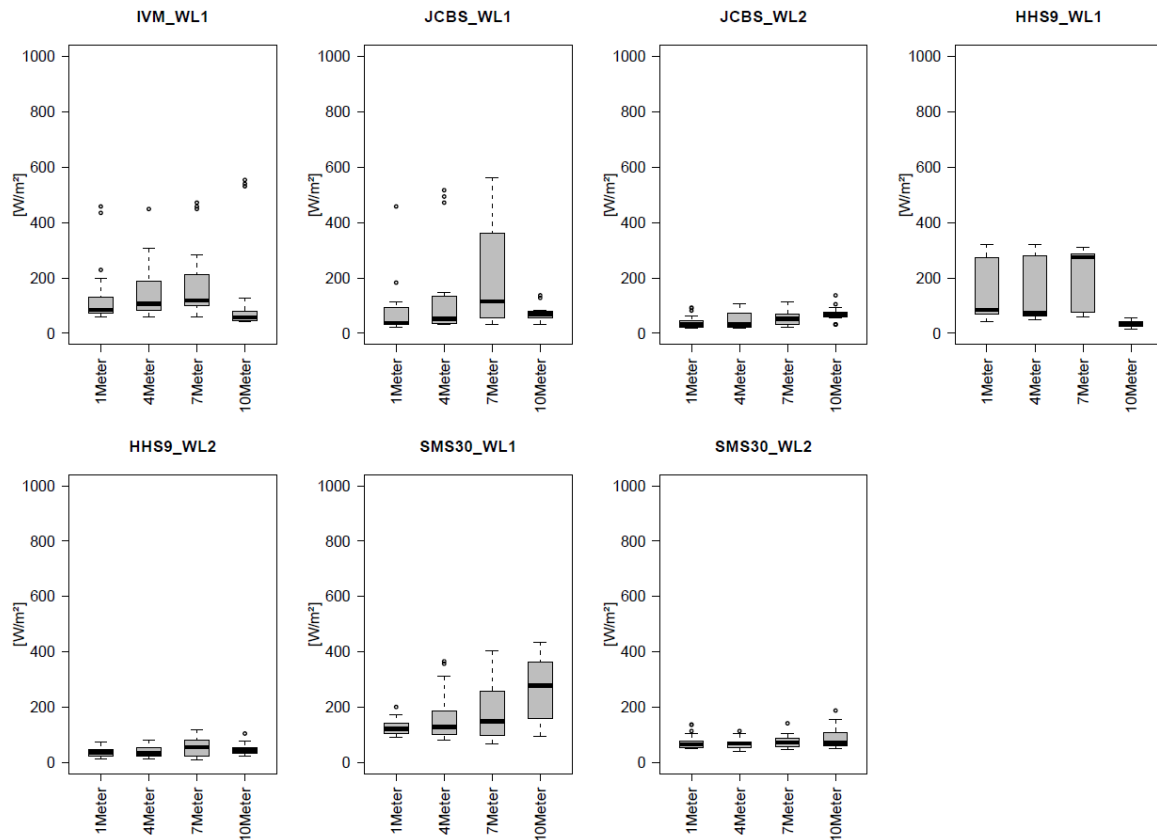


Abbildung 26: Boxplots der vermessenen Winterlinden bei „diffusen“ Messbedingungen

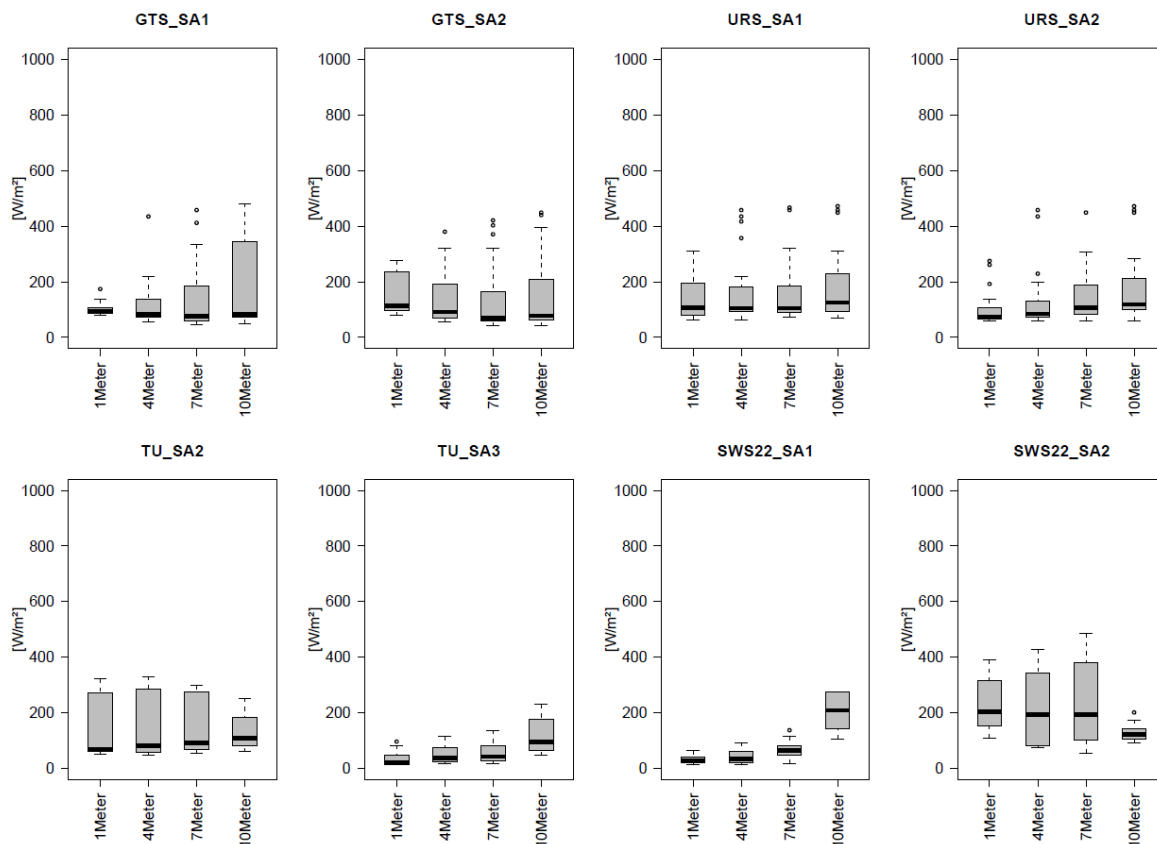


Abbildung 27: Boxplots der vermessenen Spitzahorne bei „diffusen“ Messbedingungen

Abbildung 26 stellt die Messergebnisse der kurzwelligen Einstrahlungen für die Baumart Winterlinde bei „diffusen“ Messbedingungen dar. Hier fällt auf, dass die Wertebereiche der Messungen sowie die Streuung niedriger sind als die Messungen bei „klarem“ Himmel.

Abbildung 27 stellt die Messergebnisse der kurzwelligen Einstrahlungen für die Baumart Spitzahorn bei „diffusen“ Messbedingungen in einem Boxplot dar. Auch hier ist zu erkennen, dass die Wertebereiche der Messungen sowie die Streuung niedriger sind als die Messungen bei „klarem“ Himmel.

Vergleicht man die in den Boxplots dargestellten Messungen über alle 15 Bäume, so lässt sich folgendes feststellen:

- Der Interquartilabstand ist bei beiden Baumarten bei diffusen Wetterbedingen deutlich erkennbar niedriger als bei den Messungen bei klarem Himmel. Dies ist durch die erhöhte Einstrahlung bei klarem Wetter zu erklären.
- Der Interquartilabstand, d.h. die Höhen der dargestellten Boxen die 50 % der gemessenen Werte beinhalten, variieren bei beiden Baumarten bei klarem Himmel stärker als bei diffusen Wetterbedingungen. Die Variabilität der Messungen in den Baumkronen ist bei klarem Himmel bei beiden Baumarten sichtbar höher.
- Die gemessene Wertespanne der Streuung liegt zwischen 20 und 700 W/m² und variiert bei beiden Baumarten sehr stark. Der Interquartilabstand liegt im Maximum bei etwa 700 W/m² bei Spitzahorn TUF_SA2 in einer Messhöhe von 7 Meter und im Minimum bei 20 W/m² gemessen in 1 Meter Höhe bei der Winterlinde IVM2_WL1 und dem Spitzahorn URS21_SA1. D.h. die großen Interquartilabstände über 500 W/m² werden bei klaren Wetterbedingungen und hier bei den Winterlinden in den oberen Kronenbereichen (Messung 7 und 10 Meter Höhe) häufiger gemessen.
- Bei den Spitzahorn ist diese Erscheinung nicht vergleichbar stark abgebildet und wird ergänzt durch die kleinen, aber im Vergleich zu den Winterlinden auch hohen Interquartilabständen bei den Messhöhen 1 Meter und 4 Meter. Bei den gemessenen Spitzahornen liegt der Kronenansatz höher, ausgeprägt erkennbar z.B. bei GTS71_SA2 und SWB19_SA2. Bei den unter der Krone durchgeführten Messungen ist die Verschattungswirkung der Krone reduziert und eine diffuse seitlich Einstrahlung möglich. Die Kastenhöhe des Boxplots ist demzufolge höher und der Median auch. D.h. über 50 % der gemessenen Einstrahlungswerte liegen zwar unterhalb 400 W/m². Insgesamt liegen jedoch die Messwerte höher als in der darüber liegenden Krone und der Wertebereich ist breiter, d.h. die Varianz der gemessenen Werte höher.
- Der Median liegt bei Messungen bei diffusen Wetterverhältnissen ebenfalls niedriger als bei den Messungen bei klarem Himmel. Die Änderungen sind nicht so hoch bzw. eindeutig abgebildet wie bei der Darstellung der Interquartilabstände.
- Die Lage des Median im Boxplot ist ein Maß für die Werteverteilung. Liegt er mittig zwischen den Antennen, sind die Einstrahlungswerte in etwa oberhalb und unterhalb gleichverteilt. Die Box bei den Messungen in 7 Meter Höhe bei Spitzahorn TUF_SA3 kommt dieser Verteilung am nächsten, d.h. 50 % der Messungen liegen hier über ca. 430 W/m² und ca. 50 % der Messungen liegen darunter.
- In fast allen Boxplots zeigt der Median eine stark einseitige Orientierung. Bei den Winterlinden und insgesamt 56 dargestellten Boxen liegt der Median nur bei 3 Boxen über der Mitte zwischen den Antennen (IVM2_WL1-klar-7 Meter, HHS9_WL1-diffus-7 Meter, SMS30_WL1-diffus-10 Meter). Hier ist die Anzahl niedriger gemessener Solareinstrahlung höher als die Anzahl hoher gemessener Einstrahlung, d.h. eine einseitige Verteilung. Bei den Spitzahorn und insgesamt 56 dargestellten Boxen liegt der Median nur bei 4 Boxen und nur bei klarem Himmel über der Mitte zwischen den Antennen (zwei Mal bei GTS71_SA2-1 Meter und 4 Meter, URS21_SA2-10 Meter, SWS_SA2 – 7 Meter). Hier liegt der wesentlich höhere Anteil der Messungen im hohen Wertebereich oberhalb der Mitte zwischen den Antennen, d.h. die Messungen werden hier nicht von den Blättern der Krone überdeckt.
- Umgekehrt liegt bei den Winterlinden in 53 von 56 Boxen der Median stark unterhalb der Mitte zwischen den Antennen. Bei den Spitzahornen trifft dieser Sachverhalt bei 52 von 56 dargestellten

Messhöhen zu. Hier liegt der wesentlich höhere Anteil der Messungen im niedrigeren Messwertebereich. D.h. die Blätter innerhalb der Baumkrone verschatten die Messung.

6.2.3 Vergleich der Messhöhen

Abbildung 28 fasst die in Abbildung 24-Abbildung 27 dargestellten Ergebnisse über die Höhe für „klare“ und „diffuse“ Messbedingungen über den Mittelwert zusammen. Deutlich zu erkennen sind die niedrigeren Einstrahlungswerte bei „diffusen“ Messbedingungen. Auch liegen die Mittelwerte hier über die Höhe in sehr ähnlichen Wertebereichen. Bei „klaren“ Messbedingungen sind die mittleren Einstrahlungswerte höher und variieren stärker über die Höhe. Beim Spitzahorn ist zu erkennen, dass dieser bei beiden Messbedingungen die niedrigsten Einstrahlungswerte in 1 Meter Höhe aufweist und diese bis in 4 Meter Höhe leicht zunehmen. Bei den Winterlinden ist dies in 1 Meter Höhe nicht der Fall. Hier liegen die Werte meist höher als in 2 Meter. Ab 2 Meter Höhe folgen sie demselben Muster wie bei den Spitzahornen und nehmen bis in 10 Meter Höhe zu.

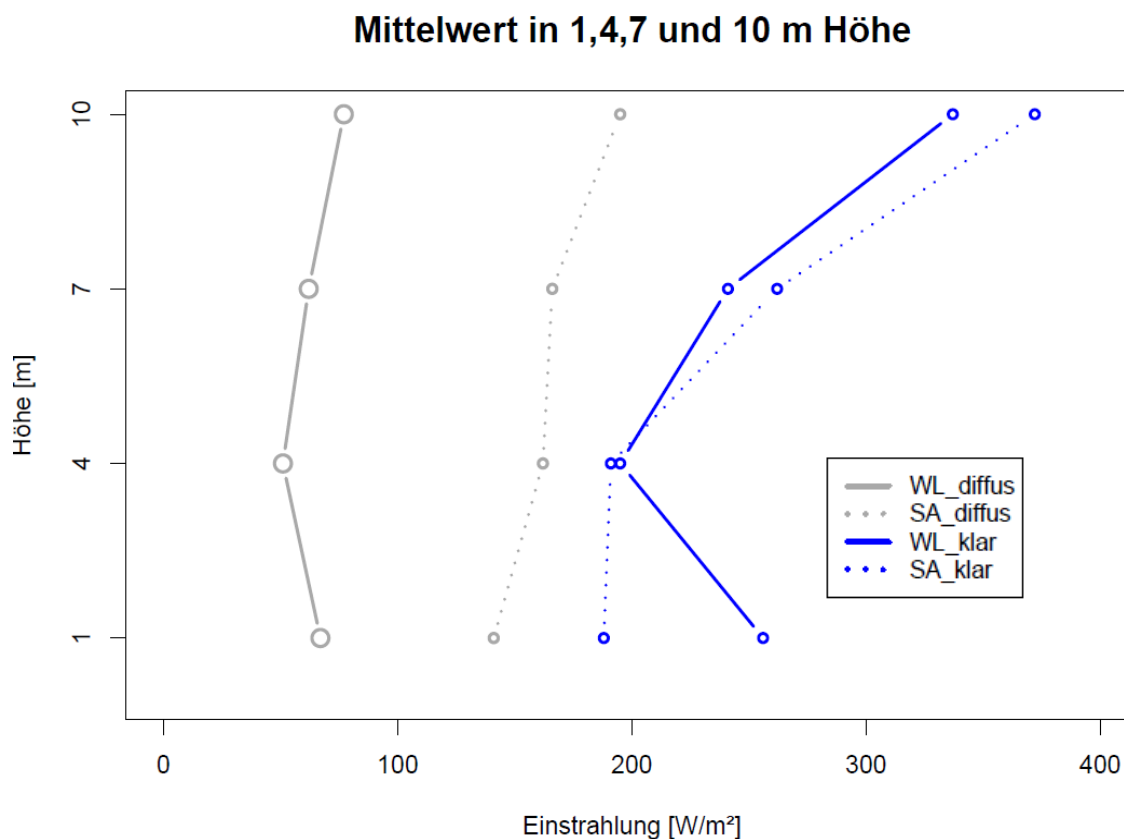


Abbildung 28: Vergleich der Baumarten über die Höhe bei Messbedingung „klar“ und „diffus“

6.2.4 Vergleich nach Exposition

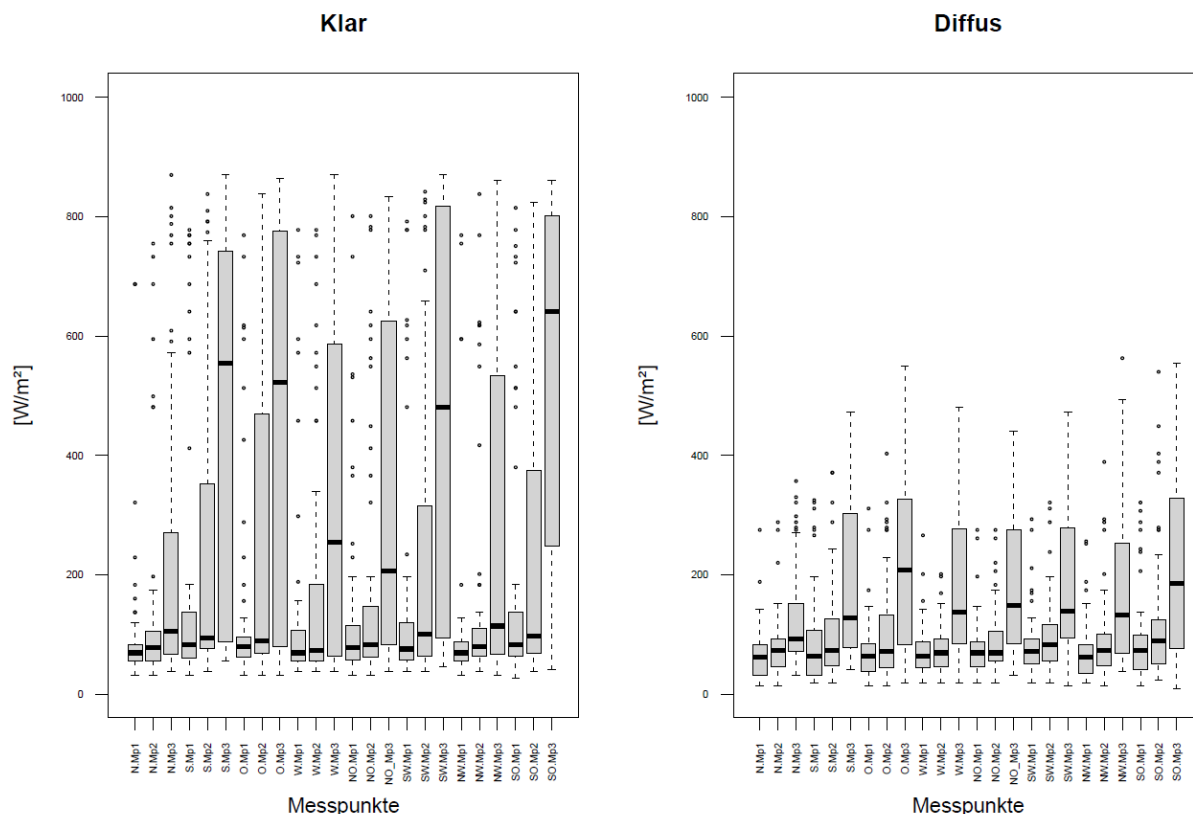


Abbildung 29: Boxplots nach Messpunkten zusammengefasst

Um eine Übersicht über die Auswirkungen der Exposition auf die kurzwellige Einstrahlung zu bekommen sind in Abbildung 29 die kurzwellige Einstrahlung auf der y-Achse und die Messpunkte (Exposition) auf der x-Achse dargestellt. N,S,O,W,NO,SW, NW, SO sind die Himmelsrichtungen und Mp1, 2 und 3 die Messpunkte. Dabei befindet sich Messpunkte 3 immer außerhalb der Baumkrone. Sowohl bei klaren als auch diffusen Messbedingungen weisen die Messpunkte außerhalb der Baumkrone (Mp3) deshalb die höchsten Werte je Himmelsrichtung auf.

6.2.4.1 Einfluss von Baum- und Gebäudeverschattung auf das Strahlungsverhalten

Um den Effekt der Beschattung durch umliegende Gebäude und Bäume zu untersuchen, werden ausgewählte Standorte herausgesucht und in folgende Kategorien eingeteilt. Kategorie 1: Ohne Gebäude und ohne Nachbarbaum/ unversiegelt, Kategorie 2: „Gebäude / Nachbarbaum/ Straßenverlauf W-O/ versiegelt“, Kategorie 3: „Mit Gebäude und Nachbarbaum / Straßenverlauf N-S / versiegelt“ und Kategorie 4: „Nachbarbaum / unversiegelt“. Nachfolgende Grafiken stellen die über die Höhe gemittelte Einstrahlung für jede Himmelsrichtung dar. Auf den Kreislinien sind die Einstrahlungswerte in W/m^2 dargestellt. Bei der Betrachtung und späteren Interpretation der Messzeitpunkt (Tabelle 4) ist zu beachten, dass die Tagesgänge wie in Kapitel 5.5.2 beschrieben lediglich den Betrag der Einstrahlung wiedergeben. Die Information zur Beschattung ist nur auf den Messzeitraum begrenzt. Aus diesem Grund verlaufen alle dargestellten Uhrzeiten in alle Himmelsrichtungen gleich, lediglich ihre Beträge sind unterschiedlich. Somit kann durch visuelle Interpretation erkennbar, warum die Strahlung in bestimmten Himmelsrichtungen Unterschiede aufweist. Anhand der ausgewählten Bäume untersucht und geschlossen werden, woher die Bäume beschattet werden. Folgende Beschattungsquellen können identifiziert werden: Beschattung durch umliegende Gebäude, Verschattung durch Nachbarbäume, Verschattung durch den Baum selbst.

Die sternförmige Anordnung der Strahlungsverläufe wird durch die Messpunkte mp3 verursacht die außerhalb der Baumkrone liegen. Findet keine Verschattung statt und / oder liegt der Messzeitpunkt

um die Mittagszeit liegen diese Messwerte höher als die innerhalb der Baumkrone gemessenen Einstrahlungswerte. Bei allen Grafiken ist zu erkennen, dass die Messwerte bei der „diffusen“ Messung in allen Himmelsrichtungen geringer sind und nicht so große Unterschiede zwischen den einzelnen Himmelsrichtungen aufweisen. Tendenziell ist auch zu erkennen, dass die Messwerte im Norden meistens geringer sind.

1. Ohne Gebäude und ohne Nachbarbaum, unversiegelt
 - TU_SA3

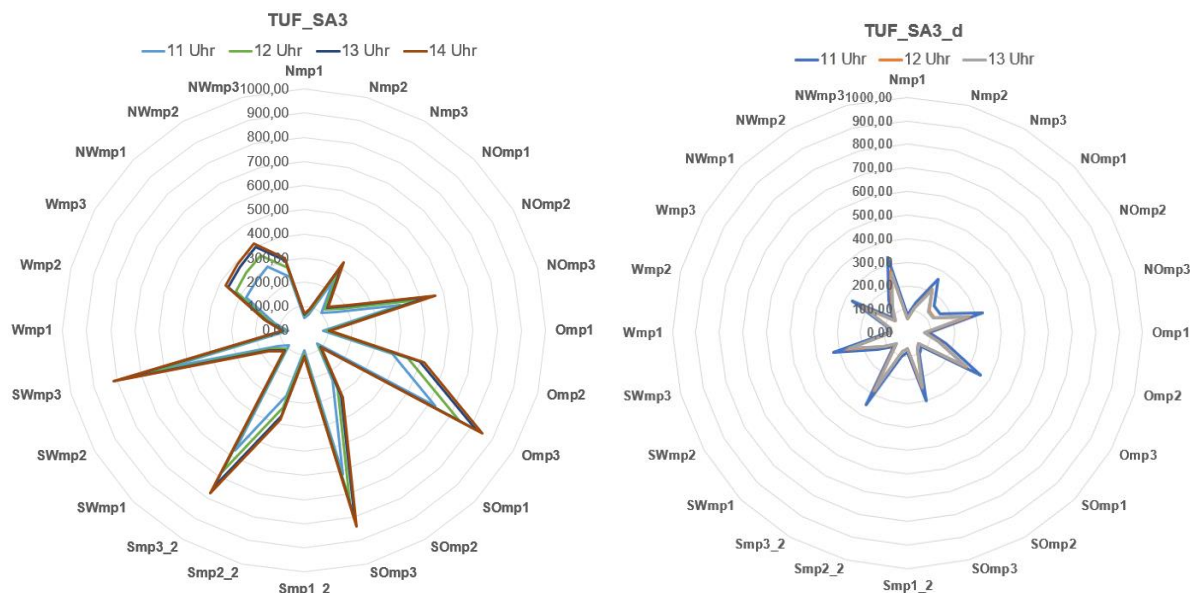


Abbildung 30: Netzdiagramm für TUF_SA3 bei diffusen und klaren Messbedingungen

Der Messbaum TUF_SA3 ist durch einen unversiegelten Untergrund und keine direkt angrenzenden Gebäude charakterisiert. Nördlich des Messbaums steht in ca. 10 Meter Abstand zum Baumstamm ein Gewächshaus aus Glas. Zum Messzeitpunkt war somit kein Beschattungseinfluss zu erkennen. Die Einstrahlung verläuft gleichmäßig nach dem Muster „von innen nach außen (mp1-mp3) höher werdend“. In einzelnen Messrichtungen wie z.B. N, liegt der Messwert mp2 höher als der Messwert bei mp3. Das Strahlungsverhalten wird an diesem Messbaum von der Beschattung bestimmt die Belaubung des Baumes selbst verursacht.

2. Gebäude/ Nachbarbaum, Straßenverlauf W-O, versiegelt
 - JCBS42_WL1 und WL2
 - URS21_SA2

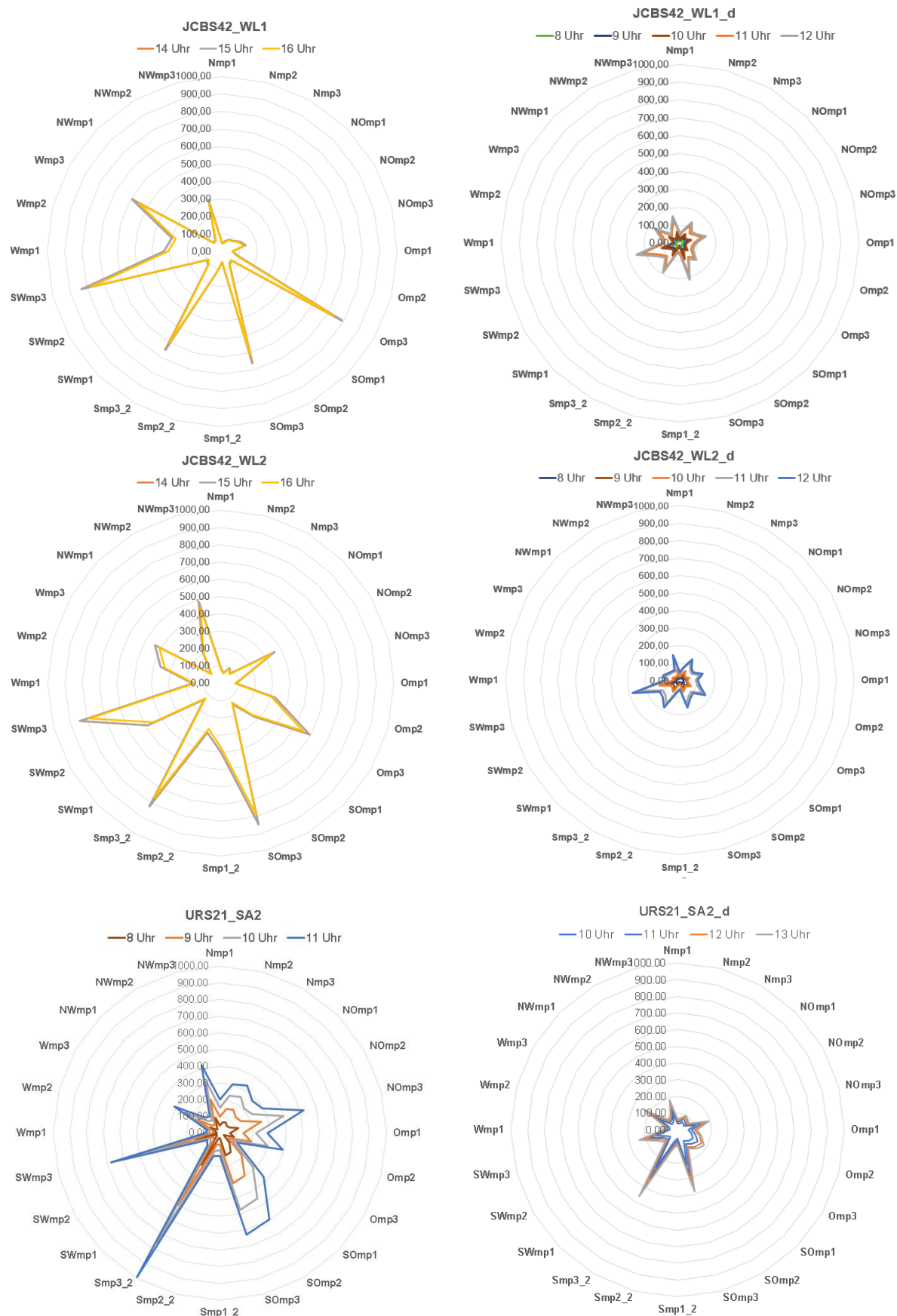


Abbildung 31: Netzdiagramm für JCBS_WL1 und WL2 und URS21_SA2 bei diffusen und klaren Messbedingungen

Diese drei voran dargestellten Messbäume befinden sich alle in Straßenschluchten von West nach Ost verlaufend mit mehr oder weniger Einfluss durch benachbarte Gebäude. An Messbaum JCBS42_WL1 und WL2 grenzen nördlich und südlich Gebäude an. Bei URS21_SA1 sind die Gebäude zu weit entfernt, um sich auf das Strahlungsverhalten auswirken zu können. Bei Messbaum JCBS42 fällt auf, dass dieser bei „klaren“ Messbedingungen in nördlicher bis östlicher Richtung einen deutlich geringeren Strahlungswert aufweist. Zum Messzeitpunkt warf der Baum selbst einen Schatten in diese Richtung. Die geringeren Messwerte sind also auf den Schattenwurf des Baums selbst zurückzuführen.

3. Mit Gebäude und Nachbarbaum, Straßenverlauf N-S, versiegelt
 - GTS71_SA2
 - SWB_SA2

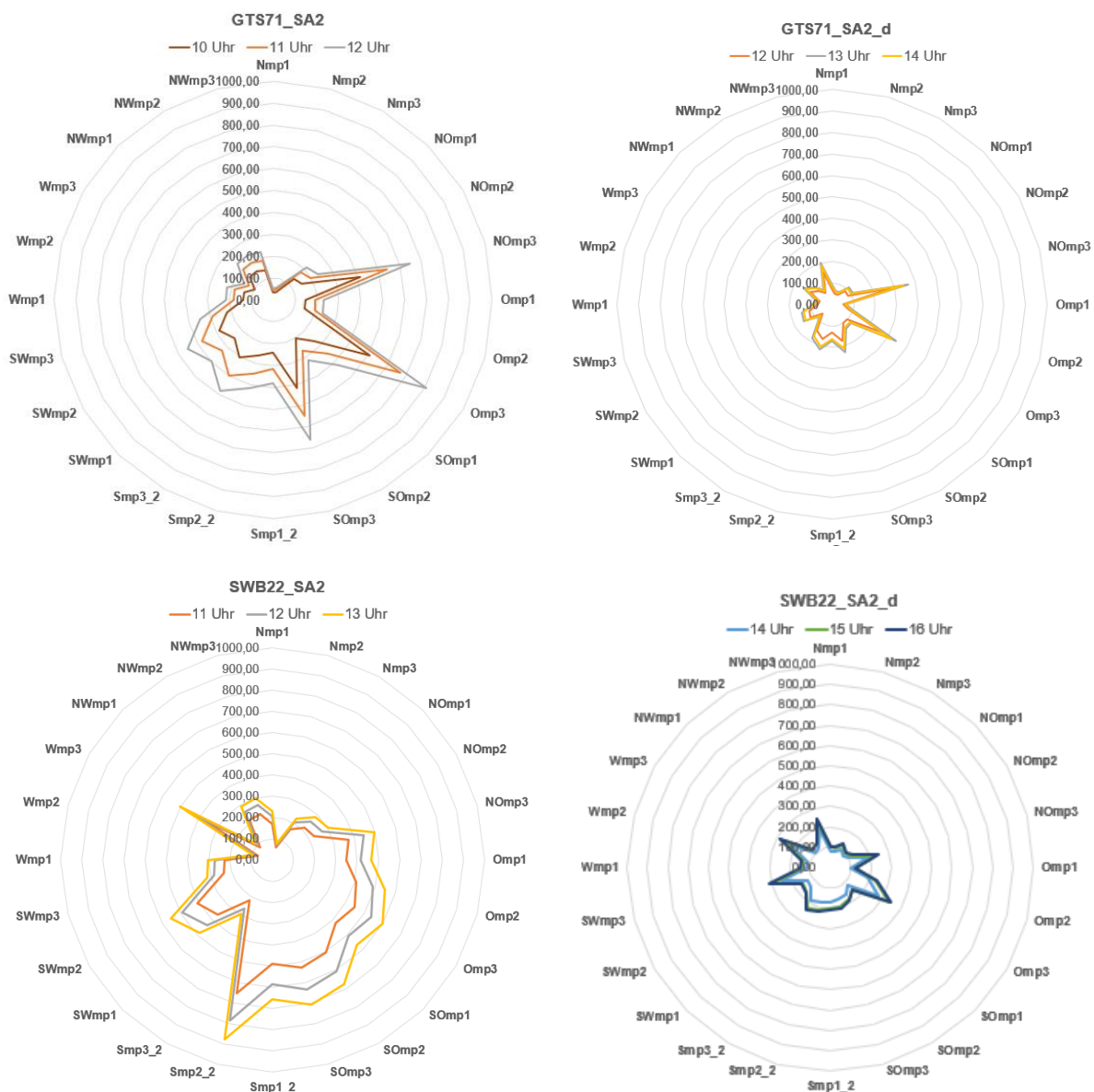


Abbildung 32: Netzdiagramm für GTS71_SA2 und SWB22_SA2 bei diffusen und klaren Messbedingungen

GTS71_SA2 befindet sich westlich nahe angrenzend an die Wohnbebauung. Es fällt hier auf, dass bei klaren und diffusen Messbedingungen die Messstellen mp3 südlich bis nordwestlich geringer ausfallen als in den anderen Himmelsrichtungen. Zu diesem Messzeitpunkt lag die untere Hälfte der Baumkronen jeweils im Gebäudeschatten. Dies führte im dargestellten Mittelwert zu geringeren Werten auch außerhalb der Krone. Zusätzlich war zu diesem Zeitpunkt die sonnenabgewandte

Westseite durch den Baum selbst verschattet. Dies erklärt auch die im Mittel höheren Messwerte Nmp3 und NOmp3 auf der sonnenzugewandten Ostseite. Diese Messstellen befanden sich zum Messzeitpunkt überwiegend in besonnten Bereichen. SWB22_SA2 weist besonders auf der Ost-Südseite höhere Werte auf. Es fällt weiterhin auf, dass es kaum Unterschied zwischen den Messpunkten in und außerhalb der Baumkrone gibt.

4. Nachbarbaum/unversiegelt

- IVM2_WL1

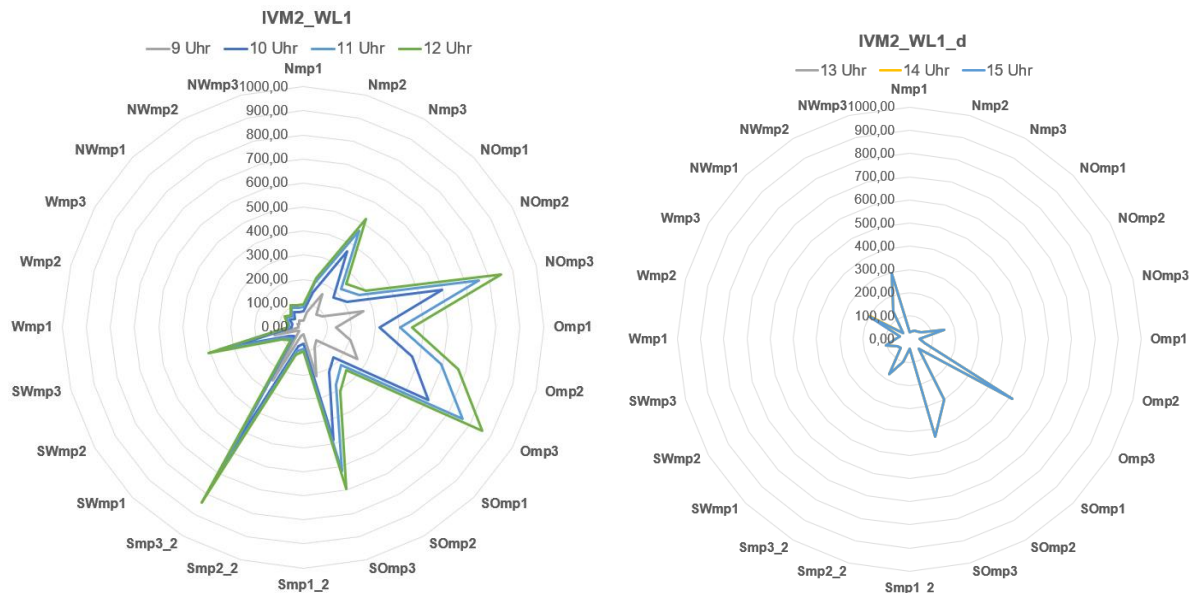


Abbildung 33: Netzdiagramm für IVM2_WL1 bei diffusen und klaren Messbedingungen

An diesem Baum wird bei der Verteilung der gemessenen Einstrahlungswerte die Verschattung durch umliegende Bäume und dem Baum gut abgebildet. Zum Zeitpunkt der klaren Messungen weist die sonnenabgewandte West und Nordwestseite deutlich geringere Werte auf. Verursacht durch den Schattenwurf des Baumes selbst sowie dem Schattenwurf des im Süden angrenzenden Baums.

6.2.5 Unterschiede der Einstrahlung in Bodennähe versiegelt / unversiegelt

Mit dem Mann-Whitney-U-Test ergibt sich ein p-Wert von 0,43 bei klarer Messung und p-Wert von 0,12 bei diffuser Messung. Damit kann kein signifikanter Unterschied zwischen versiegelten und unversiegelten Standorten nachgewiesen werden. Vergleiche Abbildung 38 und Abbildung 39 im Anhang.

6.3 Potenzielle Verdunstung

Um die in den oben dargestellten Reduzierung der potenziellen Verdunstung weiter zu untersuchen, wird die potenzielle Verdunstung für klare Messbedingungen für die Messwerte innerhalb der Baumkrone und unterhalb der Baumkrone dargestellt. Dabei wird die gemessene Einstrahlung innerhalb der Baumkrone über alle Messpunkte gemittelt und die potenzielle Verdunstung zu jeder Uhrzeit berechnet. Für die Berechnung der potenziellen Verdunstung unterhalb der Baumkrone werden die bereits installierten Pyranometer in Nord-Süd Ausrichtung herangezogen.

6.3.1 Innerhalb der Baumkrone

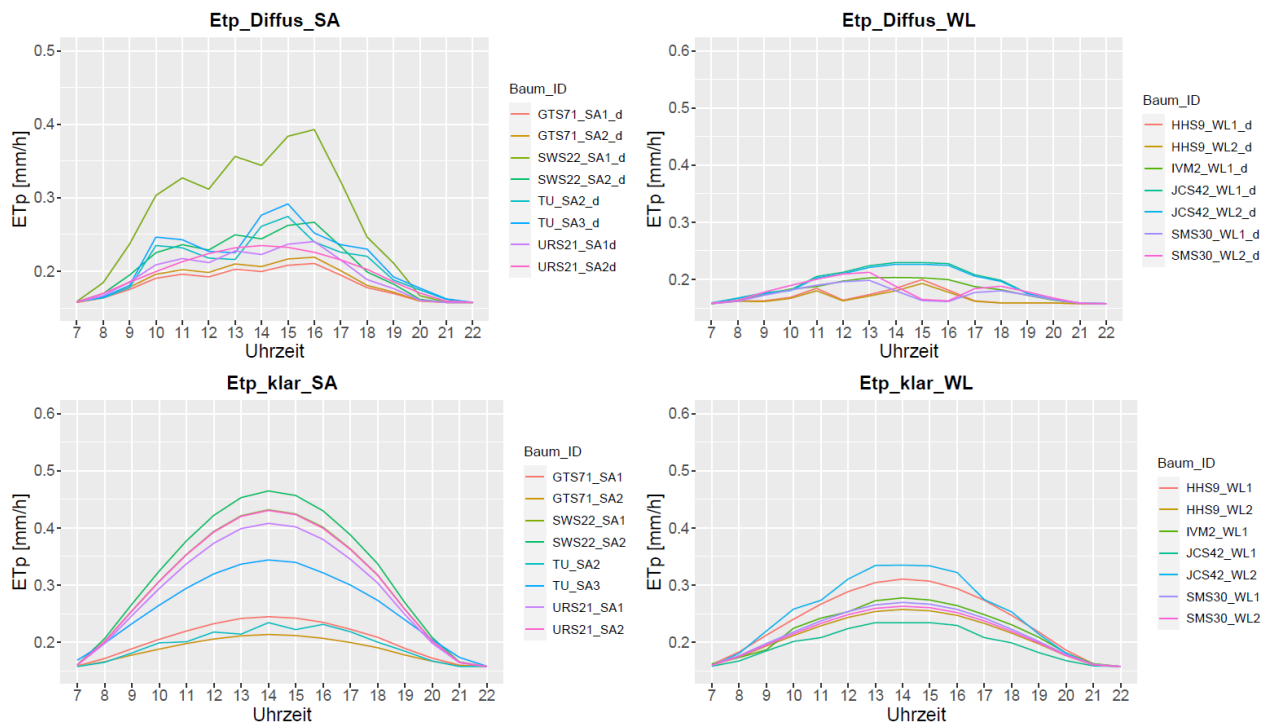


Abbildung 34: Tagesgang der potenziellen Verdunstung innerhalb der Baumkrone

Abbildung 34 zeigt die potenzielle Verdunstung innerhalb der Baumkrone der einzelnen Messbäume für „klare“ und „diffuse“ Messbedingungen. Auf der y-Achse ist die potenzielle Verdunstung in mm/h dargestellt. Auf der x-Achse ist die Uhrzeit beginnend kurz nach Sonnenaufgang (7 Uhr) bis kurz vor Sonnenuntergang (22 Uhr) skaliert. Die potenzielle Verdunstung bei klaren Messbedingungen liegt deutlich höher als bei diffusen Messbedingungen. Innerhalb der Spitzahorne lässt sich folgendes feststellen. Der Baum GTS_SA2 weist innerhalb der Baumkrone die geringsten Verdunstungsraten über den Tag auf. SWS22_SA1/SA2 die höchsten Werte. Die einzelnen Bäume innerhalb eines Standortes unterscheiden sich stark voneinander. Bei der Artengruppe der Winterlinde weist JCS42_WL2 die höchsten Verdunstungsraten und JCS42_WL1 die niedrigsten Werte auf. Auch hier lassen sich keine Gemeinsamkeiten innerhalb der Messbäume eines Messtandortes erkennen. Deutlich zu erkennen ist, dass der Kurvenverlauf der potenziellen Verdunstung von allen Messbäumen sehr gleichförmig verläuft. Dies ist wiederum auf die Erstellung der Tagesgänge der Feldmessungen zurückzuführen. Die Information der Beschattung wird nur, wie in den Ergebnissen der Netzdiagramme und Boxplots dargestellt, zum Vermessungszeitpunkt erfasst.

Eine detaillierte Beschreibung und die in der Diskussion fortgeführte Interpretation erfolgt nun an den kontinuierlichen Pyranometermessungen unterhalb der Baumkrone. Diese bilden den Einfluss der Beschattung über den ganzen Messtag ab.

6.3.2 Direkt unter der Baumkrone

Abbildung 35 zeigt die potenzielle Verdunstung unterhalb der Baumkrone für klare und diffuse Messbedingungen. Generell fällt auf, dass die Verdunstungsraten bei klaren Messbedingungen höher sind und stärker variieren als bei diffusen Wetterverhältnissen. Bei der Artengruppe der Spitzahorne verläuft die Kurve der Bäume SWB22_SA1 und SWB22_SA2 meist höher als der Kurvenverlauf der anderen Bäume. Auch variiert hier die potenzielle Verdunstung im Tagesverlauf am stärksten. Der Baum GTS71_SA1 wird in der folgenden Beschreibung nur ab dem Zeitpunkt 14 Uhr betrachtet. Vor diesem Messzeitraum wurden fehlerhafte Datenaufzeichnungen in der Einstrahlungsmessung festgestellt. Dieser Messfehler spiegelt sich auch in der berechneten Verdunstung wider. Die Verdunstungsraten bei klarer Messung bleiben bei TUF_SA2 und TUF_SA3 von 9 bis 14 Uhr nahezu konstant auf 0,2 mm/h. Nach dieser Uhrzeit steigt die Verdunstungsrate von TUF_SA3 bis 16 Uhr an und weist hier seinen Höchstwert auf. TUF_SA2 hingegen hat seine höchsten Verdunstungsraten in den Morgenstunden von 9 bis 10 Uhr, danach sinken diese bis in die Abendstunden ab. Die Wertebereiche zwischen 14 und 17 Uhr unterscheiden sich in diesen Bäumen stark. TUF_SA2 weist um 14 Uhr Verdunstungsraten um 0,18 mm/h auf und sinkt bis 17 Uhr auf 0,175 mm/h. TUF_SA3 steigt auf Werte über 0,26 mm/h an. Bei klarer Messung weist der Baum mit der ID GTS71_SA2 um die Mittagszeit die geringsten Verdunstungsraten auf. Es fällt hier auf, dass bei der Artengruppe der Ahorne sowie bei der Artengruppe der Winterlinden um die Mittagszeit die Verdunstungsraten bei vielen Messbäumen deutlich zurück geht. Für klare Messungen ist dies der Fall für die Bäume des Standort SWB22, URS21 GTS71_SA2, SMS30 und JCBS42. Für diffuse Messbedingungen ist dies besonders auffällig für den am Standort SMS30.

Bei der Artengruppe der Winterlinde stechen die deutlich höheren Verdunstungsraten bei diffuser Messung des Baums SMS30_WL1 hervor. Diese überschreiten die Verdunstungsrate bei klarer Messung von 11-13 Uhr deutlich (fast 1mm höhere Verdunstungsraten um 11 Uhr).

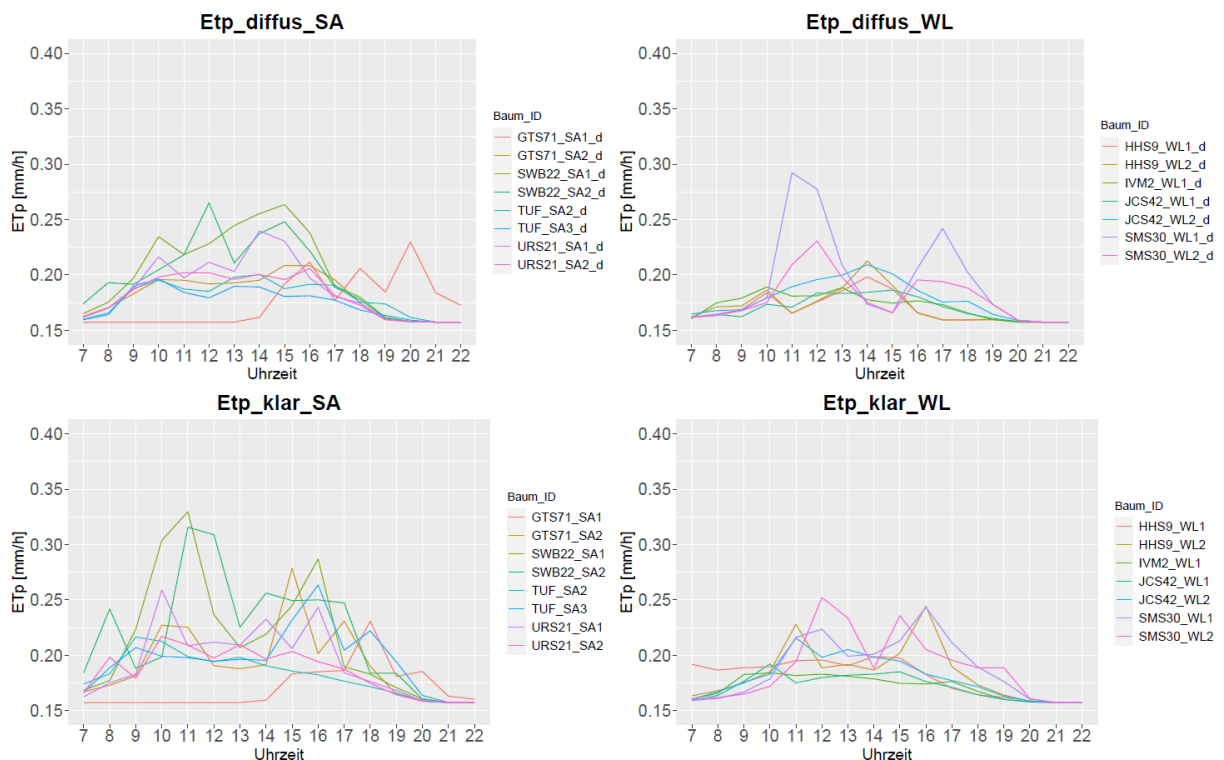


Abbildung 35: Tagesgang der potenziellen Verdunstung direkt unter der Baumkrone

Generell hat die Mehrzahl der Kurven nach Sonnenaufgang und vor Sonnenuntergang einen gleichförmigen Verlauf. Die starke Variation beginnt ca. um 10 Uhr und nimmt dann bei fast allen Bäumen zu. Ab ca. 18 Uhr glätten sich die Kurvenverläufe wieder und es kommt zu einem Abfall der Verdunstungsraten. Die geringsten potenziellen Verdunstungsraten mit der geringsten

Variabilität bei klarer Messung weisen die Bäume URS_SA2, IVM2_WL1 und JCS_WL1 auf. Bei diffuser Messung sind es die Bäume TUF_SA2, TUF_SA3 sowie IVM2_WL1 und JCS42_WL1. Insgesamt werden um die Mittagszeit Verdunstungsraten von fast 0,35 mm/h erreicht. Bei der Artengruppe der Winterlinden steigt die maximale Verdunstung um die Mittagszeit auf 0,3 mm/h. Generell liegen hier die berechneten potenziellen Verdunstungsraten niedriger. Um die Mittagszeit hat IVM2_WL1 die geringsten Verdunstungsraten. Den höchsten Wert zeigt Baum SWB22_SA1 um 11 Uhr. Insgesamt variieren die Verdunstungsraten der Winterlinden über den Tag nicht so stark wie die der Artengruppe Spitzahorne (exklusiv Baum SMS30_WL1_d). Morgens und abends pendeln sich bereits 4 Stunden vor Sonnenaufgang bzw. -untergang gleichförmigere Kurvenverläufe ein.

Die charakteristische Reduzierung der potenziellen Verdunstung aufgrund des individuellen Einstrahlungsmuster ist in Abbildung 36 für jeden Baum dargestellt. Dafür wird die Differenz der potenziellen Verdunstung auf Höhe der Wetterstation mit der potenziellen Verdunstung unter der Baumkrone gebildet. Die Reduzierung der potenziellen Verdunstung wird über einen Tag bei diffusen und klaren Messbedingungen ermittelt. Auf der y-Achse ist die Reduzierung in % abgebildet und auf der x-Achse der Baumstandort. Bei diffusen Messbedingungen wird die potenzielle Verdunstung um knapp 50 % der berechneten, potenziell möglichen Verdunstung auf Höhe der Wetterstation „Chemiehochhaus“ reduziert. Bei klaren Messbedingungen etwa um 60 %. GTS71_SA1, IVM2_WL1 und JCS42_WL1 weisen die größte Reduzierung auf. Dahingegen SWB22_SA1 und SWB22_SA2 die geringsten Reduzierungswerte.

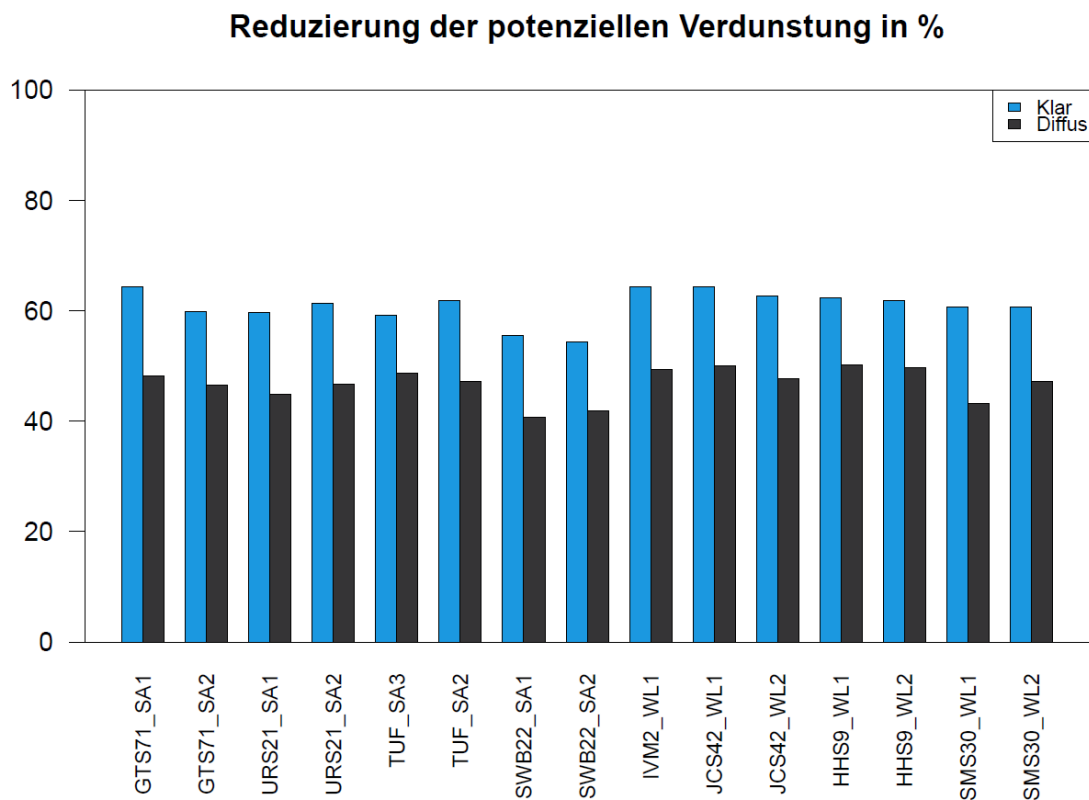


Abbildung 36: Berechnete Reduzierung der potenziellen Verdunstung für jeden Baum

7 Diskussion

7.1 Mobile Messung der kurzwelligen Einstrahlung im Baum

Bei der Literaturrecherche ergaben sich keine Hinweise bzw. konstruktive Beschreibungen für die mobile und punktgenauen Messung der Solareinstrahlung im Baum. Darum wurde, wie unter den Methoden beschrieben, die Messkonstruktion selbst entwickelt. Nachdem die Messung mit einer Teleskopstange (genaue Bezeichnung: Axis Line Profi Teleskopstange 14 m) nicht zu einer stabilen Positionierung führte, wurde ein Stecksystem aus Aluminiumstangen konstruiert. Damit konnten für 15 Bäume jeweils 96 Einstrahlungswerte gemessen werden. Die standardisierte Positionierung der Messungen im Baum ist in den Methoden beschrieben (Kap. 5.4.2).

Bei Messwiederholung, d.h. bei der Messung zu verschiedenen Wetterbedingungen (diffus – klar) wird es jedoch unabhängig von der verwendeten Stabtechnik mit zunehmender Messhöhe immer schwieriger, die Messung an genau derselben Stelle zu wiederholen. D.h. es kann hier zu Abweichungen kommen. Hinzu tritt die Möglichkeit unterschiedlicher Blätterpositionen z.B. durch Windbewegungen. Dadurch kann der gemessene Einstrahlungswert an derselben Position bereits kurze Zeit danach stark abweichen. Bei dem gewählten Stichprobenumfang (96 Messungen pro Baum) verfälschen diese Abweichungen jedoch das Gesamtergebnis nicht.

7.2 Modellierung

Auf der Grundlage der LiDAR-Daten wurde die Sonneneinstrahlung mit den Tools der Software Arc GIS Pro und danach mit der Software QGIS nach dem Modell SOLWEIG modelliert.

7.2.1 Modellierung mit Arc GIS Pro

Eine Modellierung der solaren Einstrahlung mithilfe des Strahlungswerkzeug in ArcGIS Pro ist dann hinreichend genau, wenn die Eingangsdaten der Vegetation zum Beispiel auf photogrammetrische oder terrestrische Laserscandaten beruhen, welche zum Zeitpunkt der Messung der solaren Einstrahlung erstellt wurden. Durch diese Aufnahme können die Horizontüberhöhungen wesentlich genauer berechnet werden und es benötigt keinen Transmissionsgrad der Baumkrone, da diese Information bereits in der Aufnahmemethode, über die photogrammetrische Abbildung des Baums enthalten ist. Mit diesen Eingangsdaten ist anhand der genau ermittelten Horizontüberhöhungen (Sky View Factors) ein deutlich besserer Modellfit zu erwarten.

7.2.2 Modellierung mit SOLWEIG

7.2.3 Modellvalidierung

Wie die Modellvalidierung zeigt, kann das Modell die Messdaten nicht abbilden. In der Gesamtübersicht in Abbildung 21 links oben werden zur Validierung die über den Tag ermittelten Messdaten herangezogen. Dies ist ein Grund, wieso die Abweichungen zwischen Modellwerten und den Messwerten sehr hoch sind. Fanden die Messungen z.B. von 10 - 11:45 Uhr statt, werden die Messwerte auf den Messzeitpunkt 11 Uhr normiert und anschließend mit der Referenzstation der Tagesgang von 7 - 22 Uhr berechnet. Bei dieser Umrechnung wird die solare Einstrahlung bei einigen Messungen geringfügig höher ermittelt. Außerdem ist bei der Validierung mit den berechneten Tagesgängen die Beschattungsinformation von umliegenden Objekten nur zum Messzeitpunkt wiedergegeben. Diese Information ist bei der Validierung der Messdaten zum Messzeitpunkt enthalten. Die Modellgüte verbesserte sich geringfügig (Vgl. Abbildung 19 und Abbildung 20). Ursache für die starke Abweichung sind jedoch die für die Modellierung genutzten LiDAR-Daten. Der Aufnahmezeitpunkt lag im unbelaubten Zustand der Vegetation im März 2022. Das führt dazu, dass die Struktur der Baumkrone zum Messzeitpunkt nicht abgebildet wird. Die Reflektion der Laserpulse stammen von den Ästen im Baum. Die Kronenhöhe als auch die Kronenradien und somit das Kronenvolumen werden somit stark unterschätzt. Aus der in Abbildung 21 links oben abgebildeten Punktwolke lässt sich auch erkennen, dass im Bereich von 250-600 W/m²

der gemessenen und von 150-300 W/m² im modellierten Bereich die Punktdichte geringer ist. Dies wiederum lässt den Schluss zu, dass das Modell den Effekt der Blattverschattung im Baum abbilden kann. Bei den Messungen (vgl. Boxplots Abbildung 24 - Abbildung 29) werden die Messwerte zwischen 200 und 600 W/m² weniger oft erfasst. Dies liegt daran, dass bei klaren Messbedingungen alle Werte, die in Bereichen völliger bis nahezu vollständiger Besonnung erfasst werden, höhere Werte über 600 W/m² aufweisen. Die Messwerte unter einem Blatt liegen meist deutlich geringer als 200 W/m². Die Spanne zwischen diesen Werten wird bei den Messungen seltener erfasst. Bei der Modellierung ist dies auch der Fall. Lediglich die Wertespanne ist geringer und bewegt sich zwischen 150-300 W/m².

Wie auf der Abbildung 20 zu erkennen ist, ist die Modellgüte bei Spitzahorn SWB_SA2 besser als bei den anderen Messtandorten. Diese Erscheinung wird damit begründet, dass das Laub in diesem Baum zum Zeitpunkt der LiDAR-Datenerfassung bereits leicht ausgetrieben hatte. Dies war generell bei fast allen Spitzahornen der Fall, jedoch bei diesem Standort am stärksten ausgeprägt (vgl. Google Earth Luftbild Ende März 2/2022). Die Winterlinden waren zu diesem Aufnahmezeitpunkt noch unbelaubt.

7.3 Messdatenanalyse

7.3.1 Transmissionsgrad

In Konarska et al., (2014) wurde in Göteborg in Schweden die Durchlässigkeit der gesamten und direkten Sonnenstrahlung durch die Kronen einzelner Straßenbäume untersucht. Ergebnis dieser Untersuchung war, dass der Transmissionsgrad mit 1,3 % bzw. 1,7 % im Sommer bei Linden und der Kastanie sehr niedrig ist (Variabilität während des Tages von 0,03%; klare Messbedingungen).

Der berechnete Transmissionsgrad der Winterlinde weicht deutlich von dem in dieser Untersuchung ermitteltem Transmissionsgrad ab. Der durchschnittliche Transmissionsgrad der Winterlinde bei klaren Messbedingungen wird in der vorliegenden Arbeit mit 12,43 % ermittelt. Methodische Unterschiede beruhen darauf, dass in die mittlere Einstrahlung von mehreren Messpunkten direkt unterhalb der Baumkrone herangezogen und mit der einkommenden Einstrahlung der Referenzklimastation der Transmissionsgrad ermittelt werden. In der Studie von Konarska et al., (2014) wurde ein Pyranometer auf der nördlichen Seite des Baumes in 1,1 m Höhe installiert und mit einer Referenzmessung auf einem naheliegenden Gebäude wurde der mittlere Transmissionsgrad über den Tagesverlauf errechnet. Zum einen beruhen die höheren Werte auf der Anwendung unterschiedlicher Messmethoden. Zum anderen und dominierend sind jedoch die Unterschiede im Belaubungsgrad der vermessenen Bäume. Diese sind für die in vorliegender Arbeit berechneten wesentlich höheren Transmissionsgrade verantwortlich. Die in der Studie vermessenen Bäume waren wesentlich dichter belaubt (siehe Abbildung 2 in Kornaska et al., (2014)).

Zieht man nun die Messungen der dauerhaft installierten Pyranometer jedes Messbaums auf der Nord und Südseite heran, ergeben sich die in Tabelle 8 dargestellten Transmissionsgrade. Es fällt auf, dass die bei klaren Messbedingungen ermittelnden Transmissionsgrade mit den in der in vorliegenden Arbeit ermittelten Werte vergleichbar sind. Die Transmissionsgrade des Spitzahorn stimmen mit 13,91 % und 13,85 % fast überein. Die Transmissionsgrade bei diffuser Messung liegen mit um die 25 % für beide Baumarten deutlich über 8,95 und 13,82%.

Nach dem Vergleich mit den Ergebnissen aus der Literatur und dem Vergleich des berechneten Transmissionsgrad anhand der bereits installierten Pyranometer ist festzustellen, dass die Messmethodik zur Bestimmung des mittleren Transmissionsgrads bei klaren Messbedingungen als hinreichend genau einzuordnen ist. Die Abweichungen des mittleren Transmissionsgrad bei diffuser Messung könnten sich daraus ergeben, dass die Messungen bei diffuser Wetterlage häufiger um die Morgenstunden stattfand. Somit war die kurzweilige Einstrahlung deutlich geringer und der Einstrahlungswinkel auf das Pyranometer flacher, sodass nicht die vollständige Transmission durch die gesamte Baumkrone erfasst wurde.

Tabelle 8: Mittleren Transmissionsgrade über den Tag anhand der Nord/Süd installierten Pyranometer bestimmt

Baumart	Klar	Diffus
Winterlinde	8.11	8.95
Spitzahorn	13.85	13.82

7.3.2 Analyse der grafischen Darstellung der Messergebnisse

In Kapitel 6.2.2 sind die Ergebnisse der Einstrahlungsmessungen für 15 Bäume in Boxplots dargestellt. Dabei werden die Messergebnisse nach der Baumart (Spitzahorn, Winterlinde) und nach den Messbedingungen „Erfassung bei klarem Himmel“ und „Erfassung bei diffuser Wetterlage“ gruppiert. Dabei liegt die Annahme zu Grunde, dass die höheren kurzwelligen Einstrahlungswerte bei klarem Himmel unabhängig von der Baumart zu höheren Messergebnissen im Baum führen. Dieser Befund deckt sich auch mit den Darstellungen in den Netzdiagrammen (Abbildung 30 -Abbildung 33)

An einer Winterlinde im Institutsviertel (HHS9_WL1) wird exemplarisch der Interquartilsabstand bei „klar 7 Meter“ mit 700 W/m^2 (795 - 95) und bei „diffus 7 Meter“ mit 205 W/m^2 (295 - 90) beschrieben. Bei klarem Himmel liegen also 50 % der Messwerte in einem Abstand von 700 W/m^2 und bei diffuser Wetterlage verringert sich dieser Abstand auf 200 W/m^2 . D.h. die Breite der Streuung als Maß für die Variabilität der Messwerte nimmt bei diffuser Wetterlage stark ab. Diese Verringerung der Einstrahlung bei bedecktem Himmel bildet sich in den Boxplots bei allen 15 Bäumen und damit auch bei beiden Baumarten vergleichbar ab. Die Annahme wird bestätigt, dass unabhängig von der Baumart die gemessene Einstrahlung im Baum bei klarem Himmel wesentlich höher liegt. Dieser Befund wird auch durch die vergleichende Darstellung der beiden Baumarten gegliedert nach den Messhöhen in Abbildung 28 bestätigt. Die Mittelwerte in 1 Meter, 4 Meter, 7 Meter und 10 Meter Höhe liegen bei allen 15 Bäumen bei klarem Himmel sichtbar höher als bei bedecktem Himmel. Bei den Winterlinden sind die Unterschiede größer als bei den Spitzahornen. Bei den Winterlinden ist die Höhenstaffelung insbesondere bei klarem Himmel deutlicher abgebildet. Der Mittelwert der gemessenen Einstrahlung ist auf 10 Meter Höhe am größten und nimmt dann bis zu einer Messhöhe von 4 Meter ab. Danach steigt er unterhalb des Kronenansatzes in 1 Meter Höhe durch die hier hinzutretende diffuse Einstrahlung wieder an. Auch die Darstellung in den Netzdiagrammen macht sichtbar, dass die kurzwelligen Einstrahlungswerte bei diffuser Wetterlage niedriger liegen, d.h. bei der grafischen Darstellung in den Abbildung 30 -Abbildung 33 sind diese Werte in der rechten Abbildung immer niedriger.

Aus diesem Befund lässt sich folgender Vorteil für die lufthygienische Wirkung von Stadtbäumen ableiten. Die positive Wirkung von Stadtbäumen für den Menschen ist bei hohen Temperaturen um die Mittagszeit am größten. Hier ist auch die Einstrahlung am größten und daraus resultierend insbesondere bei klarem Himmel unter Voraussetzung ausreichender Wasserverfügbarkeit die Verdunstungswirkung, d.h. der Kühlungseffekt von Stadtbäumen am größten.

Die 4 Messhöhen im Baum werden durch den Interquartilabstand und dem Median im Boxplot charakterisiert. Die Streuungsbreite der Messwerte, d.h. der Interquartilabstand und die Verteilung der Werte, d.h. die Lage des Medians variieren hier stark. Diese Charakteristik wird bei klarem Himmel aufgrund höherer Einstrahlung stärker abgebildet. Es wird die Annahme geprüft, dass Bäume mit einer dichteren Belaubung geringere solare Einstrahlungswerte erwarten lassen. D.h. auch, dass in Bäumen mit einem hohen Blattflächenindex (BFI) und einer hohen Blattflächendichte (BFD) geringere Einstrahlungsmesswerte gemessen werden. Dazu werden zwei Bäume mit großer Blattflächendichte und hohem Blattflächenindex betrachtet (Tabelle 9), ein Spitzahorn in der Goethestraße GTS_SA2 (BFI 3.94 und BFD 0.79) und ein Spitzahorn bei der technischen Fakultät TUF_SA2 (BFI 4.0 und BFD 0.85). Beide Bäume weichen in der Darstellung im Boxplot deutlich von anderen Bäumen ab. Der Median bei GTS_SA2 (klar - 1 Meter und 4 Meter) und der Interquartilabstand (ca. 550 W/m^2) liegt im unteren Kronenbereich des Baumes bei ca. 400 W/m^2 sehr hoch, d.h. hier wurden um die Mittagszeit (12:45-13:45 Uhr) hohe Einstrahlungswerte gemessen. Bei diffuser Wetterlage sinkt der Median in allen gemessenen Höhen in GTS_SA2 auf

ca. 50 – 150 W/m² (gemessen 10:15-11:35 Uhr). Die letzteren Werte zeigen allerdings keine starken Abweichungen zu den anderen Messungen bei den Spitzahornen und bei diffuser Wetterlage.

Der Spitzahorn TU_SA2 zeigt bei klarem Himmel in mittlerer Kronenhöhe bei 4 und 7 Meter einen Interquartilabstand von ca. 400 W/m² und 700 W/m². Der Median liegt bei ca. 300 W/m², d.h. 50 % die gemessenen Einstrahlungswerte liegen darüber und sind hoch. Bei diffuser Wetterlage sinkt der Median in allen Messhöhen auf ca. $\pm$ 80 W/m². An diesen beiden Bäumen mit einem hohen Blattflächenindex (BFI) und einem hohen Blattflächendichte (BFD) lässt sich die Annahme nicht bestätigen, dass die gemessenen Einstrahlungsmesswerte geringer ausfallen. Dieses Erscheinungsbild kann dadurch erklärt werden, dass es sich bei diesen beiden Bäumen um die kleinsten Bäume mit der geringsten Kronenlänge (GTS_SA2, 7,5 m und TUF_SA2, 7,1 m) und einem geringen Kronenvolumen handelt. Die Durchdringungstiefe und damit die Einstrahlungsintensität bis zu den Messpositionen ist bei kleinkronigen Bäumen geringer. Dadurch können auch bei hohem BFI und hohem BFD höhere und über die Höhe verteilt inhomogene Einstrahlungswerte verursacht werden. Umgekehrt werden bei großem Kronenvolumen (große Kronenlänge und Kronenradius) auch niedrige BFI und BFD ermittelt. So wurden z.B. bei einem großen Spitzahorn SWB_SA2 mit einem BFI von 2,55 und einem BFD von 0,36 sowie einer großen Winterlinde HHS_WL2 mit einem BFI von 3,15 und einem BFD von 0,37 bei dem größtem Kronenvolumen (1.023 m³ und 1.013 m³) aller erfassten Bäume niedrige BFI und BFD ermittelt. Bei älteren und großkronigen Bäumen sind die hohen Blattdichten an der Peripherie konzentriert, d.h. die Krone lichtet innen aus. Dies ist eine baumphysiologische Reaktion des Baumes, d.h. er orientiert die Blattfläche nach außen zum Ort des höchsten Lichteinfalls. Dadurch reduziert sich der Blattflächenindex und die Blattflächendichte, die sich auf die gesamte überdeckte Bodenoberfläche beziehen. (siehe Tabelle 9). Weiterhin korrespondiert dieses Ergebnis mit der Darstellung im Boxplot klar – HHS9_WL2 zu dem Erscheinungsbild eines großen Laubbaumes mit lichter Innenkrone. Der Interquartilabstand ist im oberen Kronenbereich am größten und liegt in 7 Meter Höhe bei ca. 600 W/m² und sinkt dann in 4 Meter und 1 Meter Höhe sehr stark ab, d.h. der untere Kronenbereich wird durch die weit außen liegenden Blätter im großkronigen Laubbaum stärker verschattet.

Um den Effekt der Beschattung durch umliegende Gebäude und Bäume zu untersuchen, werden ausgewählte Bäume kategorisiert und die Messergebnisse in Netzdiagrammen dargestellt.

- Kategorie 1: Ohne Gebäude und ohne Nachbarbaum/ unversiegelt
- Kategorie 2: Gebäude / Nachbarbaum/ Straßenverlauf W-O/ versiegelt
- Kategorie 3: Mit Gebäude und Nachbarbaum / Straßenverlauf N-S / versiegelt und
- Kategorie 4: Nachbarbaum / unversiegelt.

Das Netzdiagramm in Abbildung 30 (TUF_SA3) charakterisiert einen frei stehenden Baum ohne seitliche Verschattung. Die Verteilung liegt gleichmäßig um den Mittelpunkt mit leichter Orientierung auf die Südseite da hier aufgrund des Sonnenstandes die Einstrahlungswerte höher liegen. Das Strahlungsverhalten wird im Baum durch die Blattverteilung bzw. daraus resultierend die Verschattung des Baumes selbst beeinflusst. In Abbildung 31 und Abbildung 32 sind die Netzdiagramme von Bäumen dargestellt, die in Straßenschluchten stehen und vom Nachbarbaum oder von Gebäuden verschattet sind. Die Reaktion auf die Verschattung ist in den Grafiken bei klarer Witterung (Abbildung 31 links) besser zu erkennen. Die Verteilung der Messwerte um den Kreismittelpunkt orientieren sich auch leicht erhöht nach Süden. Die Messpunkte 3 liegen außerhalb der Krone und zeigen darum meist höhere Einstrahlungswerte. Alle anderen Messpunkte orientieren sich z.B. bei URS_SA2 oder GTS_SA2 und SWB_SA2 einseitig nach Osten. Diese Verteilung der Messpunkte im Netzdiagramm wird durch die einseitige Verschattung von außen verursacht. Die Winterlinde IVM_WL1 zeigt eine vergleichbare räumliche Verteilung der Messwerte, hier jedoch verursacht durch die Verschattung umliegender Bäume.

Tabelle 9: Charakteristische Eigenschaften der vermessenen Bäume

Charakteristische Baummorphologie									
ID	DBH	Baumhöhe	Kronenlänge	Kronenradius	Kronenprojektionsfläche	Kronenvolumen	Alter*	BFI	BFD
	[cm]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ³]	[yrs]	[l]	[m ² m ⁻³]
GTS_SA1	46.4	17.48	13.9	5.64	100.04	839.08	78.5	3.14	0.34
GTS_SA2	31.4	13.23	7.5	5.30	88.34	624.64	54.9	3.94	0.79
HHS_WL1	51.9	14.90	10.5	5.45	93.29	653.02	65.7	3.73	0.53
HHS_WL2	56.3	17.34	12.8	6.15	118.99	1013.02	72.8	3.15	0.37
IVM_WL1	43.6	17.75	14.2	5.22	85.55	595.23	58.9	4.81	0.51
JCS_WL1	42.7	17.05	11.9	5.54	96.50	713.13	57.4	3.94	0.50
JCS_WL2	37.3	15.40	10.9	4.40	60.90	357.53	50.2	3.53	0.49
SMS_WL1	44.8	17.60	12.6	5.61	98.95	740.39	60.1	2.83	0.34
SMS_WL2	45.3	15.65	12.3	5.65	100.20	754.52	59.0	3.50	0.43
SWB_SA1	40.4	16.93	12.5	5.47	93.87	684.17	69.0	2.57	0.31
SWB_SA2	47.9	13.98	10.6	6.25	122.78	1023.43	80.8	2.55	0.36
TUF_SA2	25.5	9.30	7.1	4.14	53.85	297.23	45.6	4.00	0.85
TUF_SA3	29.4	11.00	8.7	3.98	49.88	265.04	51.7	3.93	0.68
URS_SA1	38.3	14.53	12.2	5.40	91.67	660.20	65.6	3.59	0.44
URS_SA2	45.3	17.33	14.3	6.16	119.16	978.46	76.7	4.13	0.43
Mittelwert	41.8	15.3	11.5	5.4	91.6	679.9	63.1	3.6	0.5
Mittelwert Tilia c.	46.0	16.5	12.2	5.4	93.5	689.6	60.6	3.6	0.5
Mittelwert Acer p.	38.1	14.2	10.9	5.3	89.9	671.5	65.3	3.5	0.5

*T. cordata calculated after Lukaszkiwicz and Kosmala (2008) / A. platanoides after Herzog (2021)

7.3.3 Mann-Whitney-U-Test

Der Mann-Whitney-U-Test belegt keinen signifikanten Unterschiede in der bodennahen Einstrahlung zwischen den beiden Gruppen „unversiegelt“ und „versiegelt“. Die mittlere Einstrahlung war mit 180 W/m² zu 185 W/m² bei klaren Messbedingungen auf versiegelten Flächen leicht höher. Da bei diesem Vergleich die Baumart als Unterscheidungskriterium nicht beachtet wird, wird deutlich, dass auch die berechnete potenzielle Verdunstung unterhalb der Baumkrone zwischen den Artengruppen keine signifikant Unterschiede aufweist. Dies deckt sich auch mit den berechneten Verdunstungsraten in Abbildung 35. Daraus lässt sich ableiten, dass bei den vermessenen Bäumen die solare Einstrahlung in Bodennähe und die daraus berechnete potenzielle Verdunstung unabhängig von der Baumart auf versiegelten und unversiegelten Flächen sehr ähnliche Wertebereiche aufweist.

Die Annahme, dass die Einstrahlung unter Bäumen mit versiegelten Flächen wesentlich höher ist und damit die potenzielle Verdunstung ansteigt, ist nicht nachweisbar. Weitergefasst folgt daraus, dass aufgrund der spezifischen Standorteigenschaften und Baumcharakteristik die Einstrahlung der untersuchten Bäume so beeinflusst wird, dass freistehende Bäume auf Grünflächen in Bodennähe ähnliche kurzweilige Einstrahlungsintensitäten wie Bäume auf überwiegend versiegelter Fläche mit Gebäudeverschattung aufweisen.

7.3.4 Berechnungsmethode der potenziellen Verdunstung

Die Berechnungsergebnisse der potenziellen Verdunstung werden nach vereinfachter Methode nach Gleichung (4-3) und (4-4) berechnet. Dabei wird der K_c-Faktor auf 1 geschätzt, was einem K_c-Faktor bei Bestandschluss entspricht (Fohrer et al., 2016). Nicht beachtet sind auch sich ergebenden Unterschiede im K_c Faktor aufgrund von Baumspezifischen Eigenschaften. Da der K_c-Faktor wie in Allen and Food and Agriculture Organization of the United Nations, (1998a) beschrieben von der Pflanzenhöhe, dem Reflexionsgrad der Pflanzen, dem Widerstand der Baumkrone und der Bodenverdunstung beeinflusst wird. Diese Eigenschaften variieren zwischen den Messstandorten. Um die potenzielle Verdunstung des vorhandenen Bestands exakter zu berechnen, müsste der K_c-Faktor auf die Standorteigenschaften angepasst werden.

Vergleicht man jedoch die Größenordnungen der berechneten Verdunstung mit z.B. anderen Berechnungsansätzen in derselben geographischen Region lässt sich feststellen, dass diese im Sommer tagsüber von 7 bis 22 Uhr auch in einem Wertebereich von ,05-0,55 mm/h liegen (Koelbing

et al., 2021; Seite 11, Abbildung 8). Da hier, wie im Forschungsstand die potenzielle Verdunstung auf Straßenebene untersucht wird, und die kurzweilige Solarstrahlung nicht unter der Baumkrone gemessen wurde, liegen diese Werte etwas höher.

7.3.5 Kleineräumliche Variabilität der potenziellen Verdunstung in und unter städtischen Bäumen

Die berechnete potenzielle Verdunstung direkt unterhalb der Krone variiert im Tagesverlauf von 0,15- 0,33 mm/h. Der Einfluss der Gebäudeverschattung spiegelt sich in der potenziellen Verdunstung wider. Am eindeutigsten wird dies am Beispiel des Standorts SMS30 sichtbar. Hier werden die Bäume SMS30_WL1 und WL2 bis um 9 Uhr bis in 10 Meter Höhe vollständig verschattet. Die Verdunstungsraten direkt unterhalb der Bäume steigen somit erst nach 10 Uhr deutlich an. Es ist festzustellen, dass an Standort HHS9 Baum WL2 und SMS30 die Verdunstungsraten aufgrund der östlich angrenzenden Gebäude und der darum minimierten Einstrahlung in den Morgenstunden geringer sind. Bei westlich nahe liegenden Gebäuden ist dieser Effekt in den Abendstunden zu erkennen.

Der um die Mittagszeit beobachtete Rückgang der potenziellen Verdunstung lässt sich in Zusammenhang mit der Blattdichte (vgl. Tabelle 9) so interpretieren, dass mit zunehmender Blattdichte die Verdunstung um die Mittagszeit zurück geht. Die Sonneneinstrahlung muss zur Mittagszeit den längsten Weg durch die Baumkrone zurücklegen und wird somit am stärksten reduziert. Vergleicht man die in Tabelle 9 dargestellten Blattflächendichten der Einzelbäume mit den Verdunstungsraten um die Mittagszeit kann diese Annahme bestätigt werden.

Um die Mittagszeit ist die Einstrahlung unter dem Baum direkt abhängig von der Blattflächendichte. Je höher der BFI und die BFD, desto niedriger die potenzielle Verdunstung unter der Baumkrone.

Die oben beschriebenen Verläufe der Verdunstungsraten von SWB22_SA1, SWB22_SA2 und TUF_SA2 lassen anhand der Standorteigenschaften so deuten, dass der stärkere Abfall der Verdunstungsraten um 17/18 Uhr auf die Verschattung durch das westlich angrenzende Gebäude zurückzuführen ist. SWB22 ist ebenfalls durch Gebäudeverschattung charakterisiert. Auch hier spiegeln sich die Schattenverläufe der Gebäude in den berechneten Verdunstungsraten unter der Baumkrone wider. SWB22_SA1 steht an im Westen (5m entfernt) und Osten (ca. 30 m entfernt) angrenzender Wohnbebauung und wird in den Morgenstunden von 7-10 Uhr und von 16 Uhr bis hin zum Sonnen Untergang teilweise und früh morgens und abends vollständig vom Gebäude verschattet. Dies spiegelt sich auch in den flacheren und niedrigeren Kurvenverläufe in den Morgen und Abendstunden wider. Sobald die Verschattung nachlässt, steigt auch die potenzielle Verdunstung deutlich an (Vgl. z.B. SMS30_WL1, flacherer Kurvenverlauf bis 10 Uhr und ab 18 Uhr, Nach 10 Uhr bis 12 Uhr und nach 16 bis 18 Uhr deutlicher Anstieg/Abfall). Dies ist bei Bäumen, die von Gebäudeverschattung unbeeinflusst sind oder an Nord und südlich angrenzenden Gebäuden stehen nicht der Fall. Diese haben zu diesen Zeitpunkte höhere Verdunstungsraten, da sie nicht verschattet werden. Die in Abbildung 36 dargestellt Reduzierung der potenziellen Verdunstung der Einzelbäume liefert über den Tag gemittelt keine deutlichen Unterschiede. Zwischen den Messbedingungen „klar“ und „diffus“ lässt sich jedoch feststellen, dass die Reduzierung bei „diffuser“ Wetterlage geringer ist als bei „klarer“. Trotz geringerer „Reduzierungswirkung“ bei diffuser Wetterlage wurden niedrigere potenzielle Verdunstungsraten ermittelt. Hauptgrund dafür ist die bei klarer Wetterlage dennoch viel höhere kurzweilige Einstrahlung (Vgl. Abbildung 25 - Abbildung 35). Bei diffuser Wetterlage gelangt durch eine höhere Streuung der Einstrahlung auch deutlich mehr kurzweilige Einstrahlung bis unter die Baumkrone. Zwischen den beiden Baumarten und Standorten konnte kein deutlicher Unterschied festgestellt werden. (Siehe: Abbildung 36). Die Reduzierung der potenziellen Verdunstung bewegt sich bei den untersuchten Bäumen in derselben Größenordnung. Vergleicht man dies mit der in Tabelle 9 dargestellten Baumcharakteristika ist zu erkennen, dass sich diese zwischen den vermessenen Baumarten kaum unterscheiden. BFI und BFD sind für alle vermessenen Winterlinden und Spitzahorne mit 3,6/3,5 und 0,5/0,5 nahezu gleich.

8 Schlussfolgerung

Nach der Analyse der Messergebnisse kommt der Verfasser zur Einschätzung, dass das selbst entwickelte Stecksystem aus Aluminiumrohren für die mobile und lagegenaue Messungen der Solareinstrahlung bis in eine Höhe von 10 m gut geeignet ist.

In Orientierung an die Aussagen in der Literatur und dem Vergleich des berechneten Transmissionsgrads anhand der bereits installierten Pyranometer kann festgestellt werden, dass die Messmethodik zur Bestimmung des mittleren Transmissionsgrads bei klaren Messbedingungen hinreichend genau ist.

Auf der Grundlage der Analyse der Modellgüte kann zusammenfassend festgestellt werden, dass das Modell SOLWEIG mit LiDAR-Daten, die in unbelaubtem Zustand erfasst wurden, die gemessene Solarstrahlung nicht gut abbilden kann. Die modellierte kurzwellige Strahlung variiert jedoch über die Messstellen ähnlich den Messungen, nur in anderen Wertebereichen. Dies legt die Vermutung nahe, dass das Modell SOLWEIG grundsätzlich die Variabilität der solaren Einstrahlung in und um Stadtbäume gut abbilden kann. Für eine zielführende Validierung und Modellierung müssen allerdings LiDAR-Daten in belaubten Zustand verwendet werden. Nur so können anhand der Modellierung und der darauf basierenden Berechnung der potenziellen Verdunstung auch Aussagen über die in der Zielsetzung formulierten Fragestellung abgeleitet werden. Bei höheren Temperaturen im Sommerhalbjahr (in Vegetationszeit also belaubten Zustand der Vegetation) ist die Verdunstungs- und der daraus resultierenden Kühlungswirkung besonders wichtig.

Das Modell SOLWEIG wurde primär dafür entwickelt, die mittlere Strahlungstemperatur in städtischen Strukturen zu modellieren (Lindberg et al., 2018). Bei der Ermittlung der Strahlungsflüsse unterhalb des Baums wird dazu ein mittlerer Transmissionsgrad der Vegetation für die zu modellierende Region verwendet. Die Variabilität der Baumkrone wird somit nicht ausreichend abgebildet. Um diese abzubilden, müssten für jede Messposition im Baum ein spezifischer Transmissionsgrad (aus den Geländeerhebungen ermittelt) herangezogen werden. Dieser Ansatz sollte für im belaubten Zustand aufgenommenen LiDAR-Daten eine deutlich bessere Modellgüte ergeben und das Modell könnte dann für die Ermittlung bzw. der kurzwelligen Einstrahlung in der Baumkrone verwendet werden.

Baumstandorte an Gebäuden beeinflussen die potenzielle Verdunstung durch Beschattung. Ebenfalls beeinflusst der Baum selbst durch seine baummorphologischen Eigenschaften die Quantität der potenziellen Verdunstung. Je höher der Transmissionsgrad der Baumkrone, desto mehr kann der Baum potenziell verdunsten. Auf dieser Grundlage kann die Standortwahl im Hinblick auf die standortspezifische Verdunstungsleistung und damit dem Kühlungseffekt als Faktor für die Luftthygiene in der Stadt optimiert werden.

In Bezug auf die Variabilität der potenziellen Verdunstung in und unter Stadtbäumen lässt sich festhalten, dass diese in den untersuchten Baumarten nahezu homogen ist. Dies ist dadurch zu erklären, dass der Mittelwert der erfassten baummorphologischen Eigenschaften für die beiden Baumarten nahezu gleich ist (Tabelle 9).

Ausblick

Auf der Grundlage der Modellierung nach SOLWEIG in Verbindung mit der Nutzung von LiDAR-Daten, die in belaubtem Zustand aufgenommen sind, kann die kurzwellige solare Einstrahlung innerhalb und unter der Baumkrone städtischer Bäume modelliert werden. Darüber hinaus kann anhand der Messdaten zum Saftfluss aus der Dauererfassung der laufenden Doktorarbeit und die zusätzliche Hinzuziehung von Klimadaten die reale Verdunstung der untersuchten Bäume berechnet werden. Für eine Abschätzung der Verdunstungswirkung für viele Stadtbäume bzw. großflächiger und überschlägiger Abschätzung der realen Verdunstung z.B. für die Bäume in der Kernstadt Freiburgs ist die Stichprobe der Messungen im Hinblick auf die Fragestellung auszudehnen. Hier z.B. die Untersuchung eines weiteren häufigen Straßenbaumes in Freiburg, der Rosskastanie.

Bei Ausdehnung der Untersuchungen auf viele in der Stadt inzwischen häufig gepflanzte Bäume, die in der GALK-Liste aufgeführt sind, könnten individuelle und ergänzende Aussagen zu den bereits vorhandenen Empfehlungen auch im Hinblick auf die reale Verdunstung und damit der Kühlungswirkung getroffen werden. Darüber hinaus steigt mit zunehmender Verdunstung bei ausreichender Wasserverfügbarkeit auch die Pumpleistung eines Baumes. Dies kann wiederum in der Stadt für die Planung der Oberflächenentwässerung von Bedeutung sein (Schwammstadt).

Auf dem Hintergrund der geringen Grünflächenverfügbarkeit in Städten drängen sich folgende Fragen auf, die mit der in vorliegender Arbeit beschriebenen Methodik weitergehend untersucht werden können:

- Führt auf gleicher Fläche eine höhere Anzahl klein- mittelkroniger Bäume gegenüber einer geringeren Zahl großkroniger Bäumen bei ansonsten gleichen Bedingungen zu höheren Verdunstungsraten ? D.h. nutzen diese die zur Verfügung stehende Fläche besser ?
- Sind hier Nadelbäume mit von oben nach unten gestaffeltem Kronenaufbau gegenüber den gängigen Stadtbäumen (Spitzahorn, Winterlinde, Rosskastanie usw.) besser geeignet ?
- Nutzen schlanke und hohe Laubbäume mit pyramidalen Form wegen der geringeren Durchdringungstiefe der Einstrahlung den zur Verfügung stehenden Raum besser ?

Zusammenfassend gefragt: Kann die lufthygienische Wirkung (Verdunstungskühlung, Schattenspende, Sauerstoffproduktion) durch die Wahl der Baumart mit entsprechender Größe und Form optimiert werden ?

9 Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Ort, Datum:

Unterschrift:

Literaturverzeichnis

- Allen, R.G., Food and Agriculture Organization of the United Nations (Eds.), 1998a. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO irrigation and drainage paper. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Allen, R.G., Food and Agriculture Organization of the United Nations (Eds.), 1998b. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO irrigation and drainage paper. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Bevölkerung, Gebiet und Bevölkerungsdichte - Statistisches Landesamt Baden-Württemberg [WWW Document], 2020. URL <https://www.statistik-bw.de/BevoelkGebiet/Bevoelkerung/01515020.tab?R=GS311000> (accessed 6.29.22).
- Blankenstein, S., Kuttler, W., 2004. Impact of street geometry on downward longwave radiation and air temperature in an urban environment. *metz* 13, 373–379. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2004/0013-0373>
- Buyuksalih, G., Baskaraca, P., Bayburt, S., Buyuksalih, I., Abdul Rahman, A., 2019. 3D CITY MODELLING OF ISTANBUL BASED ON LIDAR DATA AND PANORAMIC IMAGES – ISSUES AND CHALLENGES. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XLII-4/W12*, 51–60. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-51-2019>
- Chai, T., Draxler, R.R., 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development* 7, 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., He, Z., 2012. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach: GIS-BASED SVF ANALYSIS AND APPLICATION IN HONG KONG. *Int. J. Climatol.* 32, 121–136. <https://doi.org/10.1002/joc.2243>
- Climate and Earth's Energy Budget [WWW Document], 2009. URL <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance> (accessed 11.24.22).
- CloudCompare v2.6.1 - User manual.pdf, n.d.
- Dormann, C.F., 2013. *Parametrische Statistik*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34786-3>
- Fohrer, N., Bormann, H., Miegel, K., Casper, M., Bronstert, A., Schumann, A.H., Weiler, M. (Eds.), 2016. *Hydrologie*, 1. Auflage. ed, utb Hydrologie, physische Geographie. Haupt Verlag, Bern.
- Franceschi, E., Moser-Reischl, A., Rahman, M.A., Pauleit, S., Pretzsch, H., Rötzer, T., 2022. Crown Shapes of Urban Trees-Their Dependences on Tree Species, Tree Age and Local Environment, and Effects on Ecosystem Services. *Forests* 13, 748. <https://doi.org/10.3390/f13050748>
- Fu, P., Rich, P.M., 2002. A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture* 37, 25–35. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00115-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00115-1)
- Heß, H.E., Landolt, E., Hirzel, R., 1977. *Flora der Schweiz und angrenzender Gebiete*. Birkhäuser, Basel. <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-5105-3>
- Home | Esri Deutschland [WWW Document], 2018. URL <https://www.esri.de/de-de/home> (accessed 11.25.22).
- Introduction to the Electromagnetic Spectrum | Science Mission Directorate [WWW Document], 2010. URL https://science.nasa.gov/ems/01_intro (accessed 11.24.22).

- Kiss, G., Jansen, H., Castaldo, V.L., Orsi, L., 2015. The 2050 City. *Procedia Engineering*, Defining the future of sustainability and resilience in design, engineering and construction 118, 326–355. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.434>
- Koelbing, M., Schuetz, T., Weiler, M., 2021. Downscaling potential evapotranspiration to the urban canyon. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 1–23. <https://doi.org/10.5194/hess-2021-24>
- Konarska, J., Lindberg, F., Larsson, A., Thorsson, S., Holmer, B., 2014. Transmissivity of solar radiation through crowns of single urban trees—application for outdoor thermal comfort modelling. *Theor Appl Climatol* 117, 363–376. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1000-3>
- Konarska, J., Uddling, J., Holmer, B., Lutz, M., Lindberg, F., Pleijel, H., Thorsson, S., 2015. Transpiration of urban trees and its cooling effect in a high latitude city. *International Journal of Biometeorology*. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1014-x>
- Li, H., Lian, Y., Wang, X., Ma, W., Zhao, L., 2011. Solar constant values for estimating solar radiation. *Energy* 36, 1785–1789. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.050>
- Lindberg, F., 2007. Modelling the urban climate using a local governmental geo-database: MODELLING THE URBAN CLIMATE USING A GEO-DATABASE. *Met. Apps* 14, 263–273. <https://doi.org/10.1002/met.29>
- Lindberg, F., Grimmond, C.S.B., 2011a. The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation. *Theor Appl Climatol* 105, 311–323. <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0382-8>
- Lindberg, F., Grimmond, C.S.B., 2011b. Nature of vegetation and building morphology characteristics across a city: Influence on shadow patterns and mean radiant temperatures in London. *Urban Ecosyst* 14, 617–634. <https://doi.org/10.1007/s11252-011-0184-5>
- Lindberg, F., Grimmond, C.S.B., 2011c. The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation. *Theor Appl Climatol* 105, 311–323. <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0382-8>
- Lindberg, F., Grimmond, C.S.B., Gabey, A., Huang, B., Kent, C.W., Sun, T., Theeuwes, N.E., Järvi, L., Ward, H.C., Capel-Timms, I., Chang, Y., Jonsson, P., Krave, N., Liu, D., Meyer, D., Olofson, K.F.G., Tan, J., Wästberg, D., Xue, L., Zhang, Z., 2018. Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services. *Environmental Modelling & Software* 99, 70–87. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.09.020>
- Lindberg, F., Holmer, B., Thorsson, S., 2008. SOLWEIG 1.0 – Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings. *Int J Biometeorol* 52, 697–713. <https://doi.org/10.1007/s00484-008-0162-7>
- Lukaszkiwicz, J., Kosmala, M., 2008. Determining the Age of Streetside Trees with Diameter at Breast Height-based Multifactorial Model. *AUF* 34, 137–143. <https://doi.org/10.48044/jauf.2008.018>
- Macfarlane, C., Hoffman, M., Eamus, D., Kerp, N., Higginson, S., McMurtrie, R., Adams, M., 2007. Estimation of leaf area index in eucalypt forest using digital photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 143, 176–188. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.10.013>
- McKnight, P.E., Najab, J., 2010. Mann-Whitney U Test, in: *The Corsini Encyclopedia of Psychology*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 1–1. <https://doi.org/10.1002/9780470479216.corpsy0524>
- Modellierung der Sonneneinstrahlung—ArcMap | Dokumentation [WWW Document], 2012. URL <https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/modeling-solar-radiation.htm> (accessed 10.21.22).

- Nyman, P., Metzen, D., Hawthorne, S.N.D., Duff, T.J., Inbar, A., Lane, P.N.J., Sheridan, G.J., 2017. Evaluating models of shortwave radiation below Eucalyptus canopies in SE Australia. *Agricultural and Forest Meteorology* 246, 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.05.025>
- Olpenda, A., Stereńczak, K., Będkowski, K., 2018. Modeling Solar Radiation in the Forest Using Remote Sensing Data: A Review of Approaches and Opportunities. *Remote Sensing* 10, 694. <https://doi.org/10.3390/rs10050694>
- Olpenda, A.S., Stereńczak, K., Będkowski, K., 2018. Modeling Solar Radiation in the Forest Using Remote Sensing Data: A Review of Approaches and Opportunities. *Remote Sensing* 10, 694. <https://doi.org/10.3390/rs10050694>
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Dezső, Z., 2010. Application of remotely sensed thermal information to urban climatology of Central European cities. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 35, 95–99. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.03.004>
- Rahman, M.A., Moser, A., Rötzer, T., Pauleit, S., 2019. Comparing the transpirational and shading effects of two contrasting urban tree species. *Urban Ecosyst* 22, 683–697. <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00853-x>
- Ratti, C., Richens, P., 1999. Urban Texture Analysis with Image Processing Techniques, in: Augenbroe, G., Eastman, C. (Eds.), *Computers in Building*. Springer US, Boston, MA, pp. 49–64. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5047-1_4
- Reda, I., Andreas, A., 2004. Solar position algorithm for solar radiation applications. *Solar Energy* 76, 577–589. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.003>
- Rich, P.M., Fu, P., 2000. *Topoclimatic Habitat Models* 14.
- Schwoerbel, J., Brendelberger, H., 2013. *Einführung in die Limnologie*, 10. Aufl. ed. Springer Spektrum, Berlin Heidelberg.
- Solar Analyst Manual, n.d. 53.
- SP-110-manual.pdf, n.d.
- SR20_manual_v2117.pdf, n.d.
- Thomas Breunig et al, 2002. *Gebietsheimische Gehölze in Baden-Württemberg* [WWW Document]. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg. URL <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/63670> (accessed 11.24.22).
- Tompalski, J.-R.R., Tristan R.H. Goodbody, Piotr, n.d. The lidR package.
- Vertex_IV_Manual_2007.pdf, n.d.
- Was sind LIDAR-Daten?—ArcGIS Pro | Dokumentation [WWW Document], 2015. URL <https://pro.arcgis.com/de/pro-app/latest/help/data/las-dataset/what-is-lidar-.htm> (accessed 11.25.22).
- Wessolek, G., Kluge, B., 2021. Predicting Water Supply and Evapotranspiration of Street Trees Using Hydro-Pedo-Transfer Functions (HPTFs). *Forests*. <https://doi.org/10.3390/f12081010>
- Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Leistungen - Global-, Diffus- und Direktstrahlung (Monats- und Jahressummen sowie Abweichungen) [WWW Document], 2022. URL https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/strahlungskarten_sum.html?nn=16102 (accessed 11.29.22).
- Zukunftsbäume für die Stadt, Auswahl aus der GALK-Straßenbaumliste, 2022. . BdB / Bund deutscher Baumschulen e.V. / GALK Deutsche Gartenbauamtsleiterkonferenz.

10 Anhang

Liste der verwendeten Abkürzungen und Symbole

Name	Einheit	Symbol	Synonym
Goethestraße 71, Spitzahorn 1		GTS71_SA1	GTS_SA1
Goethestraße 71, Spitzahorn 2		GTS71_SA2	GTS_SA2
Urachstraße 21, Spitzahorn 1		URS21_SA1	URS_SA1
Urachstraße 21, Spitzahorn 2		URS21_SA2	URS_SA2
Institutsviertel Mensa 2, Winterlinde 1		IVM2_WL1	IVM_WL1
Jacobistraße 42, Winterlinde 1		JCS42_WL1	JCBS_WL1
Jacobistraße 42, Winterlinde 2		JCS42_WL2	JCBS_WL2
Technische Universität Freiburg, Spitzahorn 3		TUF_SA3	TU_SA3
Technische Universität Freiburg, Spitzahorn 2		TUF_SA2	TU_SA2
Hermann-Herder-Straße 9, Winterlinde 1		HHS9_WL1	HHS_WL1
Hermann-Herder-Straße 9, Winterlinde 2		HHS9_WL2	HHS_WL2
Schwimmbadstraße 22, Spitzahorn 1		SWS22_SA1	SWB_SA1
Schwimmbadstraße 22, Spitzahorn 2		SWS22_SA2	SWB_SA2
Stefan-Meier-Straße 30, Winterlinde 1		SMS30_WL1	SMS_WL1
Stefan-Meier-Straße 30, Winterlinde 2		SMS30_WL2	SMS_WL2
LiDAR		Light detection and ranging	
FLL		Forschungsgesellschaft Landschaftsent- wicklung	
SOLWEIG		Solar and longwave environmental irradiance Geometry Modell	
GALK		Gartenamtsleiter- konferenz	
diffuse Messung		_d	
GIS		Geoinformations- system	
CDSM		Canopy digital surface model	
POI		Point of Interest	
kurwellige Einstrahlung	[W/m ²]	kdown	
Lufttemperatur	[°C]	T	
relative Luftfeuchte	[%]		
Etpot	[mm/h]	potenzielle Verdunstung	
R _G	[J/cm ²]	Globalstrahlung	
r _s	[s/m]	Bestandswiderstand	
r _a	[s/m]	aerodynamischer Widerstand	
K _c	[]	Crop factor	
BFI	[]	Baltpflächenindex= Blattfläche/Boden- obefläche	

Name	Einheit	Symbol	Synonym
BFD	[]	Blattflächendichte	
DEM	[]	Digital elevation model	
DSM	[]	Digital surface model	
I	[W/m ²]	Strahlungsintensität	
I0	[W/m ²]	Strahlungsintensität unter dem Baum	
k	[]	Extinktionskoeffizient	
θ	[°]	Zenitwinkel	
DBH	[]	Durchmesser	
relative Luftfeuchte	[%]	Brusthöhe	
Niederschlag	[mm/h]		
Luftdruck	[kPa]		
Windgeschwindigkeit	[m/s]		
N_Mp1 u.f.	[]	Norden Messpunkt 1	
Kdir	[W/m ²]	direkte Strahlung	
Kdiff	[W/m ²]	diffuse Strahlung	
Sh	[%]	Verschattung	
G	[W/m ²]	Globalstrahlung	
α	[%]	Albedowert	
η	[°]	Sonnenstand	
y	[%]	Himmelsichtfaktor	Horizontüber- höhung/ Sky view factor
θ	[°]	Azimutwinkel	

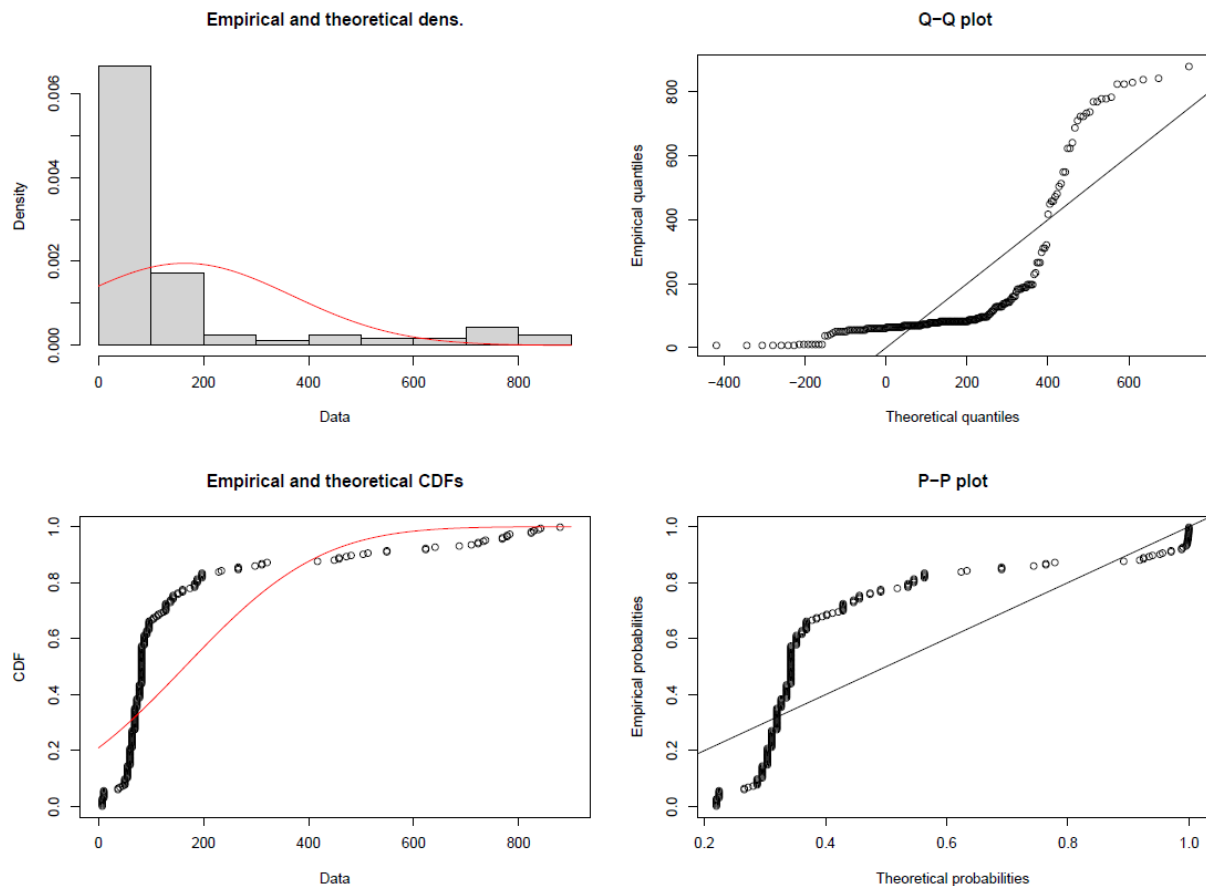


Abbildung 37: Visuelle Prüfung der Messdaten auf „Normalverteilung“

Wilcoxon rank sum test with continuity correction

data: IVM_TU2_TU3 and GTS_SMS_SWB

W = 2393, p-value = 0.4272

alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0

Abbildung 38: Testergebnisse bei klarer Messung

Wilcoxon rank sum test with continuity correction

data: IVM_TU2_TU3 and GTS_SMS_SWB

W = 2199, p-value = 0.1164

alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0

Abbildung 39: Testergebnisse bei diffuser Messung

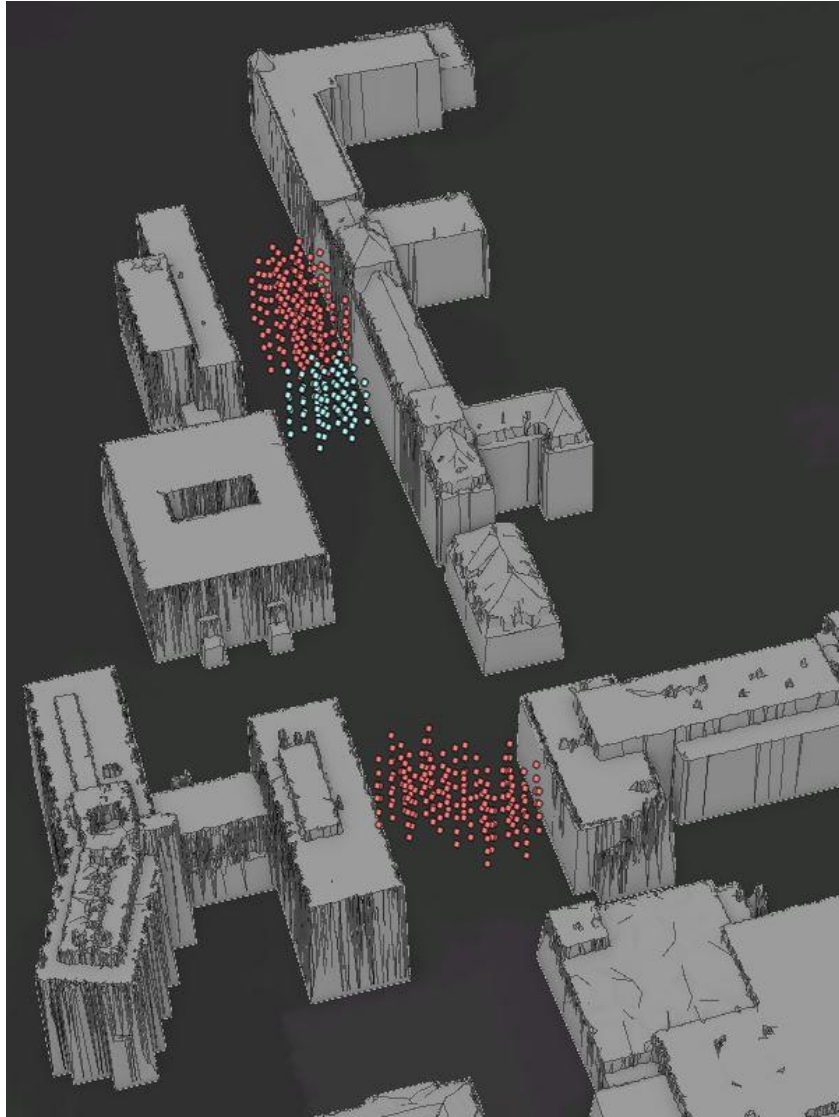


Abbildung 40: Messpunkte 3D-Ansicht SMS und HHS

- 79 -

- 80 -

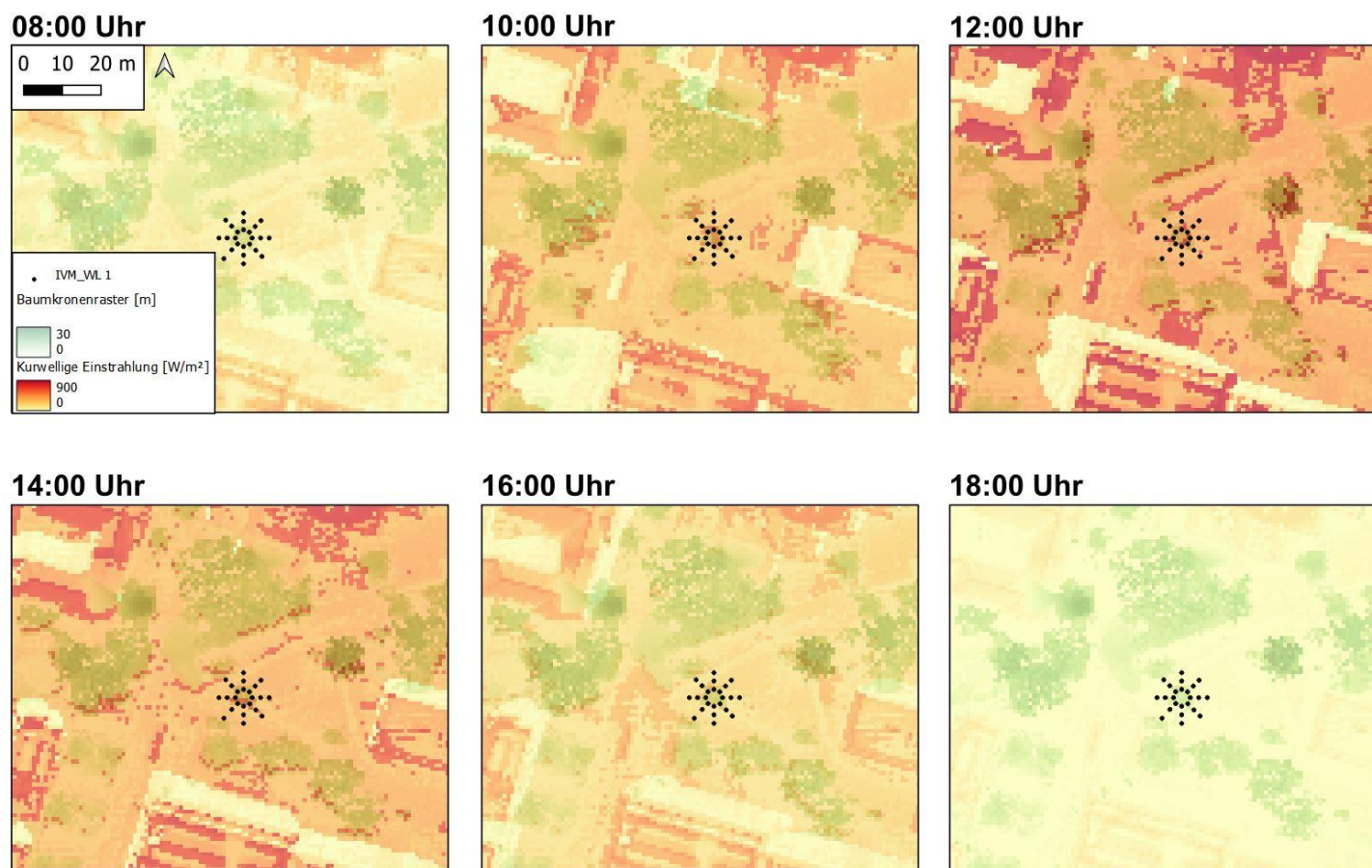


Abbildung 43: Modelloutput der kurzwelligen Einstrahlung, beispielhaft für IVM_WL1. Schwarzen Punkte= Messspunkte im Baum. Grün hinterlegt, Raster der aus LiDAR Daten erstellten Baumkronen.