



Schlussbericht

Klimaerlebnis Würzburg

Einfluss von Stadtbäumen auf das Mikroklima am Beispiel der Großstadt Würzburg

Messung des Wachstums und der Ökosystemleistungen von Stadtbäumen und Beurteilung ihrer Leistungsfähigkeit für das Stadtklima

Projektkennzeichen TLK01UFuE69397

30. April 2021

Berichtszeitraum: 01.06.2017 – 31.12.2020

Projektkoordination

Prof. Dr. Thomas Rötzer (Lehrstuhl für Waldwachstumskunde)

Projektpartner

Prof. Dr. T. Rötzer, Dr. A. Reischl, E. Franceschi, Prof. Dr. H. Pretzsch

Lehrstuhl für Waldwachstumskunde (WWK), TU München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, 85354 Freising

Prof. Dr. S. Pauleit, Dr. M. Rahman

Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschaftsentwicklung (SMLE), TU München, Emil-Ramann-Str. 6, 85354 Freising

Prof. Dr. H. Paeth, M.Sc. C. Hartmann

Professur für Klimatologie, Institut für Geographie und Geologie (KLI), Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg



finanziert durch
**Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz**



Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	6
Zusammenfassung	7
1. Stand der Forschung und Vorarbeiten	9
2. Aufgabenstellung und Zielsetzung	10
3. Planung und Ablauf der Arbeiten	13
4. Methodik	14
4.1. Auswahl und Beschreibung der Messstationen	14
4.1.1. Wetterstationen	16
4.1.2. Baumlabore	17
4.2. Messmethodik und Instrumentierung.....	20
4.3. Messkampagnen	22
5. Darstellung und Bewertung der Ergebnisse sowie praktische Anwendbarkeit .	23
5.1. Lokale Klimawandelauswirkungen	23
5.1.1. Klimaänderungen und das Skalenproblem.....	23
5.1.2. Stadtklimatische Charakteristik	26
5.1.3. Klimatologische Kennwerte im Projektzeitraum.....	29
5.1.4. Ausprägung des städtischen Wärmeinseleffekts in Würzburg	31
5.1.5. Kühleffekte der Bäume.....	33
5.1.6. Einflüsse der Großwetterlagen auf das Stadtklima	35
5.2. Wachstum und Ökosystemleistungen von Stadtbäumen	38
5.2.1. Stammzuwachs.....	38
5.2.2. Wachstumsphasen	43
5.2.3. Biomassen	51
5.2.4. Bodenfeuchte und Transpiration	52
5.2.5. Ökosystemleistungen.....	56
5.2.6. Hochskalieren der Ökosystemleistungen auf Platzebene.....	57
5.3. Mikroklima und Stadtgrün	60
5.3.1. Baumwachstum und Wasserhaushalt	60
5.3.2. Temperatur und Wachstumsphasen	62
5.3.3. Transpiration, Abkühlungseffekte und Lufttemperatur	64
5.3.4. Mikroklima und Thermaler Komfort Index.....	64
5.4. Bedeutung für die Stadtplanung.....	67
5.5. Sensibilisierung der Öffentlichkeit	69
5.5.1. Homepage	71

5.5.2.	Infotonnen.....	72
5.5.3.	Videoleinwand.....	73
5.5.4.	Öffentlich zugänglicher Bildschirm	74
5.5.5.	Abschlussarbeiten.....	75
5.5.6.	Vorträge, Veröffentlichungen und weitere Öffentlichkeitsarbeit	76
6.	Schlussfolgerungen und Ausblick	77
7.	Fachliche Ergebnisse des Projekts	79
8.	Glossar	84
9.	Literaturverzeichnis	87
10.	Anlage.....	90

Abbildungsverzeichnis

ABB. 1: ARBEITSPAKETE DES KEW-Projekts	13
ABB. 2: LAGE DER WETTERSTATIONEN UND BAUMLABORE IN WÜRZBURG	15
ABB. 3: BEBAUUNGSDICHTE UND LAGE DER WETTERSTATIONEN UND BAUMLABORE (AUSSCHNITTGRÖÖE: 500 M X 500 M)	15
ABB. 4: LUFTBILDER DER STANDORTE LANDESGARTENSCHAU, LUDWIGKAI, PARADEPLATZ, RENNWEG, ZU RHEIN-STRASSE, ROTTENDORFER TOR, MARKTPLATZ UND GERBRUNN (VON LINKS OBEN NACH RECHTS UNTEN)	16
ABB. 5: AUFBAU EINES BAUMLABORS BZW. EINER WETTERSTATION	20
ABB. 6: JAHRESMITTELTEMPERATUR UND HITZETAGE PRO JAHR IN WÜRZBURG FÜR DAS GEGENWÄRTIGE KLIMA UND ANHAND VON KLIMAPROGNOSEN (DATENGRUNDLAGE: EFRE-Projekt BIGDATA@GEO)	24
ABB. 7: TEMPERATURABWEICHUNGEN AM MARKTPLATZ DER JAHRE 2018, 2019 UND 2020 GEGENÜBER DEM LANGJÄHRIGEN MITTEL DES DWD	24
ABB. 8: NIEDERSCHLAGSABWEICHUNGEN AM MARKTPLATZ DER JAHRE 2018, 2019 UND 2020 GEGENÜBER DEM LANGJÄHRIGEN MITTEL DES DWD	25
ABB. 9: WÄRMEBEZOGENE KLIMATOLOGISCHE KENNTAGE IN DEN JAHREN 2018, 2019 UND 2020 SOWIE IM LANGJÄHRIGEN MITTEL AN DREI STANDORTEN IM WÜRZBURGER STADTGEBIET	29
ABB. 10: NIEDERSCHLAGSVERTEILUNG AM MARKTPLATZ	31
ABB. 11: UHI-AUSPRÄGUNG IN ABHÄNGIGKEIT VON T_{MAX} MARKTPLATZ	32
ABB. 12: TEMPERATURUNTERSCHIED NACH TAGESZEIT IM VERGLEICH DER STANDORTE GERBRUNN UND MARKTPLATZ	33
ABB. 13: KÜHLUNGSEFFEKT VON $T_{CORDATA}$ IM LAUFE DES TAGES	34
ABB. 14: AUSPRÄGUNG DER UHI IN ABHÄNGIGKEIT DER ZYKLONALITÄT	35
ABB. 15: ZUSAMMENHÄNGER UHI UND GROBWETTERLAGEN GWL (HM = HOCH MITTELEUROPA, SA = SÜDLAGE, MITTELEUROPA ÜBERWIEGEND ANTIZYKLONAL, BM = HOCHDRUCKBRÜCKE MITTELEUROPA, SEA = SÜDOSTLAGE, MITTELEUROPA ÜBERWIEGEND ANTIZYKLONAL, SWZ = SÜDWESTLAGE, MITTELEUROPA ÜBERWIEGEND ZYKLONAL, TM = TIEF MITTELEUROPA, NWZ = NORDWESTLAGE, MITTELEUROPA ÜBERWIEGEND ZYKLONAL, WW = WINKELFÖRMIGE WESTLAGE, Ü = ÜBERGANGSLAGE / UNBESTIMMT)	36
ABB. 16: JAHRESVERLAUF DES STAMMZUWACHSES (TAGESMITTELWERTE) VON WINTERLINDEN UND ROBINIEN AN 5 STANDORTEN IN WÜRZBURG IM JAHR 2018	39
ABB. 17: JAHRESVERLAUF DES STAMMZUWACHSES (TAGESMITTELWERTE) VON WINTERLINDEN UND ROBINIEN AN 5 STANDORTEN IN WÜRZBURG IM JAHR 2019	40
ABB. 18: JAHRESVERLAUF DES STAMMZUWACHSES (TAGESMITTELWERTE) VON WINTERLINDEN UND ROBINIEN AN 5 STANDORTEN IN WÜRZBURG IM JAHR 2020	41
ABB. 19: JAHRESVERLAUF DES STAMMZUWACHSES (TAGESMITTELWERTE UND STANDARDFEHLER) FÜR WINTERLINDE UND ROBINIE IN WÜRZBURG FÜR DIE JAHRE 2018 BIS 2020 (N= ANZAHL BÄUME PRO JAHR)	42
ABB. 20: DENDROMETERVERLAUF (TAGESWERTE) EINER WINTERLINDE (GRÜN; BAUM-NR. T4003, 2018) UND ANGEPASSTE S- KURVE (ROT)	44
ABB. 21: SCHEMA ZUR BESTIMMUNG DER S-KURVE AUS DEM DENDROMETERVERLAUF (BEISPIEL BAUM-NR. T4003, 2018)	46
ABB. 22: SCHEMA ZUR INVERTIERUNG DER WACHSTUMSKURVE	46
ABB. 23: SCHEMA DER BESTIMMUNG DER HAUPTWACHSTUMSPHASE DES STAMMES	47
ABB. 24: SCHEMA DER BESTIMMUNG VON BEGINN (RAW), ENDE (REW) UND DAUER DER GESAMTWACHSTUMSPHASE DES STAMMES	47
ABB. 25: BEGINN (OBEN LINKS), ENDE (OBEN RECHTS) UND DAUER DER HAUPTWACHSTUMSPHASE (UNTEN LINKS) SOWIE DER GESAMTWACHSTUMSPHASE (UNTEN RECHTS) DES STAMMES VON WINTERLINDE UND ROBINIE (MITTELWERT +/- STANDARDABWEICHUNG) IN DEN JAHREN 2018 BIS 2020	49
ABB. 26: BEGINN (LINKS) UND ENDE (RECHTS) DER HAUPTWACHSTUMSPHASE (UNTEN LINKS) DES STAMMES VON WINTERLINDE UND ROBINIE (MITTELWERT +/- STANDARDABWEICHUNG) AN DEN EINZELNEN STANDORTEN IM MITTEL DER JAHRE 2018 BIS 2020	50
ABB. 27: MITTLERE BIOMASSEN DER WINTERLINDEN UND ROBINIEN AM ENDE DER JAHRE 2018 BIS 2020 AN DEN STANDORTEN IN WÜRZBURG	51

ABB. 28: MITTLERE BIOMASSEZUWÄCHSE DER WINTERLINDEN (OBEN) UND ROBINIEN (UNTEN) IN DEN JAHREN 2018 BIS 2020 AN DEN STANDORTEN IN WÜRZBURG.....	51
ABB. 29: DURCHSCHNITTliche BODENFEUCHTE AM RENNWEG IN WÜRZBURG FÜR 2018 (ROT), 2019 (GRÜN) UND 2020 (BLAU) FÜR WINTERLINDEN (LINKS) UND ROBINIEN (RECHTS).....	53
ABB. 30: TRANSPIRATION VON WINTERLINDEN (LINKS) UND ROBINIEN (RECHTS) AM RENNWEG IN WÜRZBURG FÜR DIE JAHRE 2018 (OBEN), 2019 (MITTE) UND 2020 (UNTEN); FEHLENDE DATEN BERUHEN AUF TECHNISCHEM PROBLEME.....	54
ABB. 31: JAHRESSUMMEN DER TRANSPIRATION VON WINTERLINDEN (OBEN) UND ROBINIEN (UNTEN) (MITTEL +/- STANDARDABWEICHUNG) AN DEN EINZELNEN STANDORTEN IN WÜRZBURG IN DEN JAHREN 2018 BIS 2019.....	55
ABB. 32: JAHRESSUMMEN DER TRANSPIRATION VON WINTERLINDEN UND ROBINIEN IN WÜRZBURG FÜR DIE JAHRE 2018 BIS 2019) (MITTEL +/- STANDARDABWEICHUNG).....	56
ABB. 33: LAGE DES PARADEPLATZES IN DER ALTSTADT VON WÜRZBURG UND LUFTBILD DES PARADEPLATZES	57
ABB. 34: ZUSAMMENHANG MITTLERER BIOMASSEZUWACHS UND TRANSPIRATION VON WINTERLINDEN (LINKS) UND ROBINIEN (RECHTS) FÜR DIE JAHRE 2018 BIS 2020 IN WÜRZBURG.....	61
ABB. 35: ZUSAMMENHANG BIOMASSEZUWACHS UND TRANSPIRATION VON WINTERLINDEN UND ROBINIEN IM ZEITRAUM 2018 BIS 2020 IN WÜRZBURG	61
ABB. 36: MITTLERER BEGINN UND ENDE DER HAUPTWACHSTUMSPHASE VON WINTERLINDEN AN DEN STANDORTEN IN WÜRZBURG FÜR DIE JAHRE 2018 BIS 2020 IN ABHÄNGIGKEIT DER MITTLEREN TEMPERATUREN VON MÄRZ BIS MAI	63
ABB. 37: MITTLERER BEGINN UND ENDE DER HAUPTWACHSTUMSPHASE VON ROBINIEN AN DEN STANDORTEN IN WÜRZBURG FÜR DIE JAHRE 2018 BIS 2020 IN ABHÄNGIGKEIT DER MITTLEREN TEMPERATUREN VON MÄRZ BIS MAI (BEGINN) BZW. VON APRIL BIS JUNI (ENDE).....	63
ABB. 38: BEISPIEL ZUR VERANSCHAULICHUNG VON MESSERGEBNISSEN.....	69
ABB. 39: ABBILDUNG DER UNTERSCHIEDLICHEN GEMÜTSZUSTÄNDE VON MICHEL JE NACH GEFÜHLTER TEMPERATUR.....	70
ABB. 40: ABBILDUNG DER WASSERVERSORGUNG/TROCKENSTRESS BEI „TILIA“	70
ABB. 41: STARTSEITE DER HOMEPAGE WWW.KLIMAERLEBNIS.DE	71
ABB. 42: AUFBAU DER INFOTONNEN	72
ABB. 43: INFOTONNE AM MESSBAUM	73
ABB. 44: KONZEPTIONSSKIZZE UND FOTO NACH REALISIERUNG DES PAVILLONS MIT BILDSCHIRMWAND AUF DEM LGS-GELÄNDE (ZEICHNUNG: R. SCHELLE)	73
ABB. 45: BILDSCHIRMWAND AUF DEM LGS-GELÄNDE	74
ABB. 46: ÖFFENTLICH ZUGÄNGLICHER BILDSCHIRM IN DER AUSSTELLUNG IM GEBÄUDE DES ZAE BAYERNS	74

Tabellenverzeichnis

TAB. 1: LAGE UND BESCHREIBUNG DER STANDORTE	14
TAB. 2: KENNWERTE DER MESSBÄUME ZU BEGINN DER VEGETATIONSPERIODE 2018 SOWIE DIE STANDORTSPEZIFISCHE CHARAKTERISIERUNG DES BODENWASSERHAUSHALTS (BHD=DURCHMESSER AUF BRUSTHÖHE, CPA=KRONENPROJEKTIONSFLÄCHE, VF%= VERSIEGELTE FLÄCHE IN PROZENT DER BAUMWACHSTUMSZONE, NFK= NUTZBARE FELDKAPAZITÄT PRO DM BODENTIEFE DES OBERBODENS (0-30 CM)).....	18
TAB. 3: MORPHOLOGISCHE MERKMALE DER BÄUME UND VERSIEGELTE FLÄCHE IN PROZENT DER BAUMWACHSTUMSZONE VF% DER 5 WINTERLINDEN- SOWIE DER 3 ROBINIEN-STANDORTE ZU BEGINN DES JAHRES 2018 (N = ANZAHL DER BÄUME PRO STANDORT, SE = STANDARDFEHLER, BHD = BRUSTHÖHENDURCHMESSER, H =HÖHE, LAI = BLATTFLÄCHENINDEX; CR = KRONENRADIUS; CPA = KRONENPROJEKTIONSFLÄCHE; CV = KRONENVOLUMEN)	19
TAB. 4: GERÄTETYPEN DER WETTERSTATIONEN UND DER BAUMLABORE	21
TAB. 5: GEGENÜBERSTELLUNG DER DREI MESSJAHRE MIT DEM DWD-MITTEL UND DEN MODELLPROGNOSEN (CORDEX)	26
TAB. 6: METEOROLOGISCHE WERTE DER TEMPERATUR, FEUCHTE, NIEDERSCHLAG, WINDGESCHWINDIGKEIT, WINDRICHTUNG UND DES URBAN HEAT ISLAND EFFEKTS (UHI) IM MITTEL UND ALS MAXIMUM FÜR ALLE STANDORTE IN WÜRZBURG ÜBER DEN MESSZEITRAUM 2018 BIS 2020	27
TAB. 7: GRUNDFLÄCHENZUWACHS (CM ²) DES STAMMES VON WINTERLINDEN UND ROBINIEN (MITTELWERT +/- STANDARDABWEICHUNG) DER JAHRE 2018 BIS 2020 AN DEN EINZELNEN STANDORTEN IN WÜRZBURG (KEMPKENS (2021))	43
TAB. 8: BEGINN, ENDE UND DAUER DER HAUPTWACHSTUMSPHASE SOWIE DAUER DER GESAMTWACHSTUMSPHASE (MITTELWERT +/- STANDARDABWEICHUNG) FÜR DIE JAHRE 2018 BIS 2020 IM MITTEL ALLER BÄUME UND STANDORTE.....	48
TAB. 9: BEGINN, ENDE UND DAUER DER HAUPTWACHSTUMSPHASE SOWIE DAUER DER GESAMTWACHSTUMSPHASE (MITTELWERT +/- STANDARDABWEICHUNG) AN DEN EINZELNEN STANDORTEN IM MITTEL DER JAHRE 2018 BIS 2020	50
TAB. 10: STARTBIOMASSEN SOWIE ABSOLUTE UND RELATIVE ZUWÄCHSE VON WINTERLINDEN UND ROBINIEN AN DEN EINZELNEN STANDORTEN IN WÜRZBURG IM MITTEL DER JAHRE 2018 BIS 2020.....	52
TAB. 11: ÖKOSYSTEMLEISTUNGEN DER WINTERLINDEN (MITTELWERT +/- STANDARDABWEICHUNG) AN DEN EINZELNEN STANDORTEN IM MITTEL DER JAHRE 2018 BIS 2020	56
TAB. 12: ÖKOSYSTEMLEISTUNGEN DER ROBINIEN (MITTELWERT +/- STANDARDABWEICHUNG) AN DEN EINZELNEN STANDORTEN IM MITTEL DER JAHRE 2018 BIS 2020	57
TAB. 13: MITTLERE KENNWERTE DER WINTERLINDEN AM PARADEPLATZ IN WÜRZBURG (STAND 2019)	58
TAB. 14: BESTANDSBIOMASSE, WACHSTUM UND ÖKOSYSTEMLEISTUNGEN ALLER BÄUME AM PARADEPLATZ.	59
TAB. 15: WASSERNUTZUNGSEFFIZIENZ [KG TM (KG H ₂ O)-1] VON WINTERLINDEN UND ROBINIEN (MITTELWERT +/- STANDARDABWEICHUNG SA) AN DEN EINZELNEN STANDORTEN IM MITTEL DER JAHRE 2018 BIS 2020	62
TAB. 16: WORKSHOPS UND SEMINARE DURCHGEFÜHRT IM PROJEKTZEITRAUM.....	79
TAB. 17: VORTRÄGE ZUM PROJEKT AUF TAGUNGEN UND KONFERENZEN	80
TAB. 18: VERÖFFENTLICHTE ARTIKEL ZUM PROJEKT	81
TAB. 19: ABSCHLUSSARBEITEN IM PROJEKT.....	82
TAB. 20: ARTIKEL ÜBER DAS PROJEKT, RADIO- UND FERNSEHBEITRÄGE ÜBER KEW	83

Zusammenfassung

Das Teilprojekt des ZSK „Klimaerlebnis Würzburg (KEW)“ beschäftigte sich mit der Untersuchung des Einflusses von Stadtbäumen auf das städtische Mikroklima an verschiedenen Standorten am Beispiel des Stadtgebiets von Würzburg. Das Projekt wurde in das Programm der Landesgartenschau 2018 in Würzburg integriert. So war ein weiteres Projektziel, die Bevölkerung im Rahmen der Landesgartenschau für die Themen der urbanen Klimaanpassung durch grüne Infrastrukturen zu sensibilisieren.

Die drei Messjahre 2018, 2019 und 2020 waren im Vergleich zum langjährigen Mittel (1981-2010) insgesamt, nicht nur in Würzburg und Bayern, sondern deutschlandweit sehr warm und trocken. Dies spiegelt sich auch in den erhobenen Messergebnissen wider. Insbesondere im Jahr 2018 konnte eine deutlich über dem Mittel des DWD liegende Anzahl an Hitze- und Sommertagen sowie Tropennächten festgestellt werden (DWD, 2021). Die Innenstadtbereiche heizten sich dabei im Vergleich zum Umland stark auf, sodass in der Spitze exorbitant hohe Wärmeinsel-Effekte von über 8 °C zwischen dem Innenstadtbereich am Marktplatz und dem Umland gemessen wurden. Die Niederschlagssummen stellten sich zudem stark unterdurchschnittlich dar. Häufig fielen sie in Form von schwachen und somit wenig ergiebigen und kaum speicherfähigen Regenschauern. Deutlich messbar war der Kühlungseinfluss der Bäume mit bis zu 3 °C niedrigeren Lufttemperaturen bezogen auf die Umgebungstemperatur an einigen Standorten, insbesondere an heißen Tagen. Die gemessenen Witterungsdifferenzen zeigen starke Unterschiede hinsichtlich der aktuell vorherrschenden Großwetterlagen und der damit einhergehenden Zyklonalität. Besonders bei windschwachen Druckkonstellationen kann sich das Stadtzentrum tagsüber stark aufheizen und in den Abendstunden für einen ausgeprägten Stadtklimaeffekt sorgen.

Im Rahmen des Projekts wurden das Baumwachstum und die Ökosystemleistungen von den zwei Stadtbaumarten Robinien (*Robinia pseudoacacia*) und Winterlinden (*Tilia cordata*) entlang eines Stadtklimagradienten von der stark überwärmten Innenstadt bis an den Stadtrand kontinuierlich über drei Jahre hinweg gemessen. Grundlage der Analysen bilden 8 Wetterstationen und 9 Baumlabor, die im November 2017 bis März 2018 in Würzburg bzw. in der Gemeinde Gerbrunn eingerichtet worden sind.

Die Analysen zeigen, dass das Wachstum der Robinien in allen Jahren ausgeprägter war als das der Winterlinden. Die Winterlinden zeigten im Jahr 2020 den geringsten Jahreszuwachs, evtl. bedingt durch die trockenen Vorjahre. Im Mittel der drei trockenen Jahre 2018-2020 ist der Grundflächenzuwachs des Stammes der Robinien mehr als dreimal so hoch wie der der Winterlinden. Ein hoher Einfluss des Standorts auf den Zuwachs sowohl der Winterlinden als auch der Robinien wurde sichtbar.

Während die Höhe des Zuwachses eng mit der Wasserversorgung des Baumes verknüpft ist, wird die Phänologie wie der Beginn des Stammwachstums klar von der Temperatur beeinflusst. Die Transpiration der Winterlinden ist in allen Jahren deutlicher größer als die der Robinien. Somit zeigen Winterlinden einen höheren Kühleffekt in der Krone, Robinien sind dagegen sparsamer in ihrem Wassermanagement. Damit ergibt sich für Robinien eine markant höhere Wassernutzungseffizienz von 3,9 kg (kg H₂O)⁻¹ im Mittel der drei Jahre im Vergleich zu Winterlinden mit 1,4 kg (kg H₂O)⁻¹. Das unterschiedliche Wachstumsverhalten aufgrund der Witterung, aber auch aufgrund des Alters bzw. der Dimension der Bäume spiegelt sich in ihren Ökosystemleistungen wider. Es ergaben sich deutlich differenzierte Ökosystem-

leistungen an den einzelnen Standorten und für die zwei Baumarten. Im Vergleich der Winterlindenstandorte zeigten die Bäume am Ludwigkai, einem Standort am Flussufer mit mittlerer Bebauungsdichte die höchsten Ökosystemleistungen mit 33,7 kg CO₂ Fixierung pro Jahr, ca. 23,5 m³ Wasserverbrauch, ca. 18.800 L Sauerstofffreisetzung und eine Kühlleistung von 19,4 W m⁻². Im Vergleich der Robinienstandorte zeigten die Bäume am Rennweg, einem Standort am Stadtrand mit geringer Bebauungsdichte die höchsten Leistungen mit 76 kg CO₂ Fixierung pro Jahr, 9,8 m³ Wasserverbrauch, 42.200 L Sauerstofffreisetzung und 12,9 W m⁻² Kühlleistung.

Schließlich zeigten die Untersuchungen die Bedeutung der städtischen Topographie, wie z.B. die Orientierung der Straßen, der Gestaltung der Freiflächen und der umgebenden Bebauung für die Möglichkeiten der urbanen Klimaanpassung. Sie beeinflussen die Windgeschwindigkeit, die Transpirationsleistung der Bäume und den menschlichen thermischen Komfort im Freien. Vom dicht bebauten Zentrum bis hin zu vorstädtischen Gebieten mit geringerer Bebauungsdichte sinkt die Lufttemperatur, während die Windgeschwindigkeit zunimmt. Die erhöhte Bodenverdichtung führt zusammen mit der verringerten Bodenfeuchtigkeit zu geringeren Transpirationswerten der Bäume, insbesondere bei hochversiegelten Oberflächen.

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Empfehlungen für die Baumartenwahl zur urbanen Klimawandelanpassung ableiten, grundlegende Annahmen wurden durch die Versuche bestätigt:

- Bei hoch versiegelten Oberflächen wie Asphalt sollten an stark hitzebelasteten Standorten möglichst dichtlaubige Baumarten gewählt werden, um die Sonneneinstrahlung zu minimieren (Voraussetzung: genügend großer Bodenwasserspeicher).
- Baumarten mit hoher Transpirationsleistung sind zu bevorzugen, sofern die Wasserversorgung gewährleistet ist.
- Bei eingeschränkter Wasserverfügbarkeit sollten trockenheitsangepasste Baumarten gewählt werden, die ihren Wasserverbrauch besser regulieren können.
- Die Wassernutzungseffizienz kann als Maß für die Anpassung einer Baumart an die standörtlichen Wasserverhältnisse und ihrer Reaktionen gegenüber Trockenheiten verwendet werden.
- Gruppenpflanzungen - insbesondere von Baumarten mit hoher Transpirationsleistung - können den thermischen Komfort für den Menschen deutlicher verbessern als Einzelpflanzungen.
- In städtischen Parks und auf Grünflächen ist eine Mischung aus Rasenflächen und locker belaubten Bäumen vorteilhaft, da sie den thermischen Komfort verbessern auch die Durchlüftung weniger stark behindern, was besonders in der Nachbarschaft von verkehrsbelasteten Straßen wichtig ist.

Über verschiedene Medien (Internetauftritt, Informationstonnen in der Stadt, Auftritt an der Landesgartenschau) konnte die Aufmerksamkeit von Bürgern und Bürgerinnen erregt werden. Die Bedeutung und das Wissen über die Funktionen von Bäumen in Städten in der Öffentlichkeit konnte somit der Bevölkerung nähergebracht und deutlich gefördert werden wie eine projektinterne Umfrage ergab.

1. Stand der Forschung und Vorarbeiten

Stand der Forschung

Die Stadtklimaforschung der letzten Jahre beschäftigte sich intensiv mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Ausprägung der urbanen Wärmeinsel (Collier, 2006; IPCC, 2013; Paeth et al., 2012). Die Temperaturen des Stadtkörpers und der fühlbare Wärmestrom sind meist deutlich höher und ausgeprägter als im Umland, was insbesondere in den Sommermonaten negative Auswirkungen auf den menschlichen Komfort und die Gesundheit hat (Hendel et al., 2017; Kuttler, 2004).

Der Klimawandel und die durch den Klimawandel beförderte urbane Wärmeinsel beeinflussen jedoch nicht nur die Menschen in der Stadt, sondern auch die Vegetation. Seit längerem werden die Wirkungen von Klimaveränderungen auf die Wälder intensiv beobachtet und untersucht (Dyderski et al., 2018; Prentice et al., 1993; Spittlehouse & Stewart, 2003). Vermehrte Dürreereignisse im Sommer zeigen sich durch reduziertes Wachstum der Bäume, vermehrte Stresssymptome wie verfrühter Blattabfall und die Abnahme ihrer Vitalität (Littell et al., 2008; Schwab et al., 2018). Auch Stadtbäume sind durch Klimaveränderungen - in der Stadt noch verstärkt durch den urbanen Wärmeineleffekt - stark in ihrem Wachstum beeinflusst. Mehrere Studien (u.a. Nitschke et al. (2017), Lanza & Stone Jr (2016)) konnten einen negativen Zusammenhang zwischen Sommertrockenheiten und Baumwachstum in der Stadt beobachten. Pretzsch et al. (2017) dagegen fanden ein besseres Wachstum von Stadtbäumen in Vergleich zu Bäumen in ruralen Bereichen, gefördert vor allem durch erhöhte CO₂-Konzentrationen und eine längere Vegetationszeit in der Stadt. Dieser Effekt war insbesondere in borealen Klimazonen sichtbar, in denen Wassermangel eine geringe Rolle spielt, und stark von der Baumart beeinflusst. Auch ist nach Erreichen einer maximalen Wachstumsphase in der Jugend mit einem Wachstumsrückgang zu rechnen. Es zeigt sich, dass Stadtbäume aufgrund ihrer extremen Standortbedingungen vermehrt Stress ausgesetzt sind, was langfristig zu Wachstums- und Leistungseinbrüchen führen kann.

Die Stadt Würzburg weist aufgrund ihrer dichten Bebauung, hoher Oberflächenversiegelung, geringer Vegetationsbedeckung und wenig Frischluftschneisen und aufgrund ihrer Kessel-lage im Vergleich der bayerischen Städte besondere Hitzebelastungen in den Sommermonaten auf (DWD, 2019). Viele Bereiche der Stadt Würzburg sind durch eine starke Überwärmung und stark eingeschränkten Wurzelraum für die Bäume in Straßen und auf Plätzen gekennzeichnet, weshalb davon auszugehen ist, dass Stadtbäume dort bei einer weiteren Temperaturerhöhung mit häufigeren und längeren Trockenperioden zukünftig noch schwierigere Wuchsbedingungen vorfinden werden. Somit ist auch mit einer Verringerung der erbrachten Ökosystemdienstleistungen durch die vorhandenen Stadtbäume zu rechnen. Vegetation in der Stadt, insbesondere Bäume, wirken aufgrund ihrer Kühlleistungen durch Verdunstung und Verschattung positiv auf den thermischen Komfort, sie reduzieren den Hitzeineleffekt sowie den Energieverbrauch zum Kühlen überhitzter Gebäude und speichern CO₂ (MA, 2005; Moser et al., 2018; Zölch et al., 2016).

Vorarbeiten der Forschergruppe:

Das Vorhaben ist in das Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK) als Forschungsprojekt (TP6) eingebunden. Die Forschungsarbeiten schlossen an die abgeschlossenen Projekte „Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt“ (TP1) und „City Trees II - Stadtbäume im Klimawandel“ (TP3) an. Im TP1 wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf bayerische Städte untersucht. Anhand von Modellquartieren wurden verdichtete Siedlungstypen

genauer analysiert. Ein Modellquartier lag in Würzburg Heidingsfeld. Ergebnisse zeigen gravierende Auswirkungen des Klimawandels auf den Energiebedarf zur zukünftig erforderlichen Kühlung von Gebäuden in den warmen Sommermonaten, eine Verschlechterung des thermischen Komforts im Außenraum an Hitzetagen sowie eine starke Zunahme von Starkregenereignissen, die zu Überschwemmungen im ganzen Stadtgebiet führen können (Lang et al., 2018). Die Auswirkungen auf bayerische Städte - ihre Bewohner, Artenvielfalt, Baustruktur und Infrastruktur - erfordern neue stadtplanerische Strategien. Grüne Infrastruktur kann die Klimawandelauswirkungen reduzieren und birgt sogar neue Chancen für eine nachhaltige, lebenswerte Stadtentwicklung. Bäume erweisen sich als besonders wirksam, um tagsüber den thermischen Komfort in den Freiräumen zu verbessern (Zölch et al., 2016).

Das ZSK-Teilprojekt CityTrees beschäftigte sich mit dem Wachstum und den Leistungen von Stadtbäumen in Bayern. Für sechs häufige Stadtbaumarten wurden unter Einbeziehung von Messergebnissen von Stadtbäumen in Würzburg allometrische Wachstumsbeziehungen aufgestellt. Mit dem im Projekt entwickelten prozessbasierten Einzelbaummodell CityTree (Rötzer et al., 2019) konnten das Wachstum und die Ökosystemleistungen Verdunstung, Abfluss, Beschattung und Kohlenstoffspeicherung für Stadtbäume in Würzburg für das gegenwärtige und zukünftige Klima errechnet werden.

Klimaforschung:

Insbesondere Deutschland und Mitteleuropa zeichnen sich inzwischen durch eine exzellente Datenbasis zur Klimavariabilität und zum Klimawandel aus, die jedoch stadtklimatisch bislang kaum in Wert gesetzt wurde. Mit den koordinierten Modellinitiativen EURO-CORDEX, ReKliEs-DE und HErZ (Bollmeier et al., 2015; Hübener et al., 2017) stehen Datensätze zur Verfügung, die für stadtklimatische Fragestellungen genutzt werden können (www.euro-cordex.net).

Größere und längerfristige Forschungsprojekte zum Mikroklima deutscher Großstädte wurden bislang vor allem in Berlin, Essen, Aachen und Hamburg durchgeführt (Goldbach & Kuttler, 2015; Maras et al., 2016; Scherer & Endlicher, 2013; Seidel et al., 2016). In einem interdisziplinären Kontext ist dies bislang nur in der DFG-Forschergruppe „Urban Climate and Heat Stress in mid-latitude cities in view of climate change“ in Berlin erfolgt, allerdings mit einem medizinischen Schwerpunkt, z.B. was die Hitzebelastung auf den menschlichen Körper betrifft (www.ucahs.org).

Die Forschungs Kooperation zwischen Pflanzenphysiologen, Landschaftsentwicklern, Klimatologen und Stadtplanern in dem Forschungsprojekt „Klimaerlebnis Würzburg“ war beispiellos und innovativ. Das Forschungsprojekt konnte dazu auf einige Vorarbeiten zum Würzburger Stadt- und Umgebungsklima zurückgreifen (Rauh & Paeth, 2011). In dem beispielsweise die Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Weinbau untersucht wurden.

2. Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Fragen und Ziele des Projekts lassen in folgende Bereiche gliedern:

- (1) Lokale Klimawandelauswirkungen
 - Wie verändert sich das Klima auf der regionalen und mikroklimatischen Skala am Beispiel des Würzburger Großraums und welche Unsicherheitsbereiche lassen sich aus aktuellen Modellierungsinitiativen wie beispielsweise EURO-CORDEX auf der regionalklimatischen Skala ableiten?

- Inwiefern setzen sich diese Veränderungen insbesondere im Hinblick auf Extremereignisse wie Hitzewellen von der Klimavariabilität vergangener Jahrzehnte ab?
 - Welche der gewählten Freiraumtypen sind am stärksten vom Würzburger Stadtklima und von Klimawandelauswirkungen betroffen?
- (2) Mikroklima und Stadtgrün
- Welche stadtklimatischen Charakteristika weist das Würzburger Stadtgebiet lagespezifisch und kleinräumig auf?
 - Welchen Einfluss haben die gewählten Freiraumtypen auf das Mikroklima?
 - Welchen Einfluss haben Baumbestände in unterschiedlichen Freiraumtypologien auf die mikroklimatischen Ausprägungen des Stadtklimas in Würzburg?
- (3) Leistungen von Stadtbäumen
- Welchen Einfluss hat das spezifische Standortsklima auf das Wachstum und die Transpirationsleistung von Stadtbäumen?
 - Treten baumartenspezifische Unterschiede auf?
 - Welche mikroklimatischen Parameter zeigen den größten Einfluss auf das Wachstum und die Transpirationsleistung von Stadtbäumen?
 - Welche Konsequenzen ergeben sich unter künftigen Klimabedingungen?
- (4) Bedeutung für die Stadtplanung
- Für welche der gewählten Freiraumtypen ist eine Klimaanpassung mit Bäumen notwendig?
 - Wie viel können die Stadtbäume zu Klimaschutz (CO₂-Speicherung, Kühlung von Gebäuden) und Klimaanpassung (Thermischer Komfort Außenraum, Regenwassermanagement) beitragen?
 - Welchen Einfluss haben das Mikroklima und die Stadtbäume auf die Aufenthaltsqualität im öffentlichen Raum?
 - Welche der untersuchten Baumarten eignen sich besser für die Klimaregulation in Städten?
- (5) Sensibilisierung der Öffentlichkeit
- Wie können die Leistungsfähigkeit von Bäumen und die mikroklimatischen Charakteristika des Stadtklimas einer breiten Öffentlichkeit vermittelt werden?
 - Wie kann die Bedeutung von Stadtbäumen für das Mikroklima einen möglichst großen Stellenwert in der öffentlichen Diskussion um zukünftige Stadtentwicklung erlangen?
 - Wie können die Chancen und Probleme der Auswirkungen des Klimawandels einer breiten Öffentlichkeit anschaulich vermittelt werden?
- (6) Jahresübergreifende Auswertungen
- Wie unterscheiden sich die drei Messjahre hinsichtlich der Witterungsbedingungen sowie der Wachstums- und Ökosystemleistungen der Stadtbäume, wie hoch

sind deren standortspezifische Unterschiede? Wie reagieren die Versuchsbäume an den unterschiedlichen Untersuchungsstandorten im dritten Messjahr vergleichend mit den Vorjahren? Wie rasch, inwieweit vollständig erholen sich die Stadtbäume nach den beiden Hitze/Dürresommern bzw. trockenen Wintern an den verschiedenen Standorten?

- Wie kann Stadtgrün besser an die Folgen des Klimawandels angepasst werden?
- Inwieweit wird die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel von vorherrschenden Großwetterlagen beeinflusst? Müssen generell Stadtklimamodelle angepasst werden?
- Wie kann das urbane Grün durch die Verwendung von Bäumen gestaltet werden, um die negativen Auswirkungen von längerfristigen Hitzewellen auf den thermischen Komfort wirkungsvoll abzuschwächen?

3. Planung und Ablauf der Arbeiten

Im Projekt „Klimaerlebnis Würzburg“ waren folgende Arbeitspakete bzw. Arbeitsschritte sowie Workshops und Meilensteine zu erfüllen (Abb. 1).



Abb. 1: Arbeitspakete des KEW-Projekts

4. Methodik

4.1. Auswahl und Beschreibung der Messstationen

Im Rahmen des Projekts wurden das Baumwachstum und die Ökosystemleistungen von zwei ausgewählten Stadtbaumarten entlang eines Stadtklimagradients von der stark überwärmten Innenstadt bis an den Stadtrand untersucht. Winterlinde (*Tilia cordata*) und Robinie (*Robinia pseudoacacia*) wurden als Baumarten ausgewählt, weil sie häufig in Städten gepflanzt werden und sich physiologisch deutlich voneinander unterscheiden, wie bereits vorhergehende Untersuchungen gezeigt hatten (Moser-Reischl et al., 2019; Rahman et al., 2019; Rötzer et al., 2019). Die Winterlinde ist eine dichtbelaubte Schattenbaumart mit zerstreutporigem Holz und anisohydrischem Charakter (Radoglou et al., 2009). Dagegen hat die Robinie eine sehr lichte Belaubung und ringporiges Holz, sie ist eine Lichtbaumart mit isohydrischen Eigenschaften (Keresztesi, 1988). Wie Stratopoulos et al. (2018) zeigen konnten, hat die Holzanatomie starken Einfluss auf die Wasserverdunstung durch die Bäume, da sie für die Leitung des Wassers von der Wurzel in die Blätter von großer Bedeutung ist.

Die Grundlage der Messungen und Analysen des Wachstums und der Ökosystemleistungen von Winterlinden und Robinien im Stadtgebiet von Würzburg bilden 8 Wetterstationen und 9 Baumlabor, die im November 2017 bis März 2018 in Würzburg bzw. in der Gemeinde Gerbrunn eingerichtet worden sind.

Auf Basis der Klimafunktionskarte von Würzburg, mehreren Begehungen und unter Hinzuziehung des Baumkatasters der Stadt Würzburg wurden die Standorte für die Wetterstationen und Baumlabor ausgewählt. Folgende Kriterien wurden berücksichtigt:

- o Lage im Stadtraum mit unterschiedlichen das Mikroklima beeinflussenden Faktoren (Fluss, wenig bis hoch verdichtet, Stadtzentrum, Grünanlagen)
- o Freiraumtyp (Straße, Platz, Park)
- o Baumbestand (mit und ohne Vorkommen der beiden ausgewählten Baumarten)
- o stadträumlich relevante und gut besuchte Orte wie beispielsweise das Mainufer, der Marktplatz oder am Paradeplatz

Tab. 1 und die Abb. 2, Abb. 3 und Abb. 4 zeigen die Lage und die Umgebungsbedingungen der sieben Hauptstandorte, an denen Wetterstationen aufgestellt wurden. Während am Standort Marktplatz kein Baumlabor eingerichtet wurde (=Referenzstation ohne Baumbestand), wurden an den restlichen sechs Standorten Baumlabor für Winterlinden aufgebaut. An den Standorten Rennweg, Zu Rhein-Straße und Rottendorfer Tor entstanden zusätzlich Baumlabor für Robinien.

Tab. 1: Lage und Beschreibung der Standorte

Nr	Standort	Lage	Breite °	Länge °	Höhe m	Freiraum- typ	Baumlabor	
							Linde	Robinie
1	Landesgartenschau	Park	49,786	9,967	262	Park	x	
2	Ludwigkai	Flußufer	49,786	9,928	174	Straße	x	
3	Paradeplatz	Zentrum, stark versiegelt	49,793	9,933	178	Platz	x	
4	Rennweg	Straße durch Park	49,794	9,941	185	Straße	x	x
5	Zu-Rhein-Straße	Wohnbebauung, offen	49,786	9,948	205	Straße	x	x
6	Rottendorfer Tor	Wohnbebauung, offen	49,791	9,962	254	Park / Straße	x	x
7	Marktplatz	Zentrum, stark versiegelt	49,795	9,930	178	Platz		

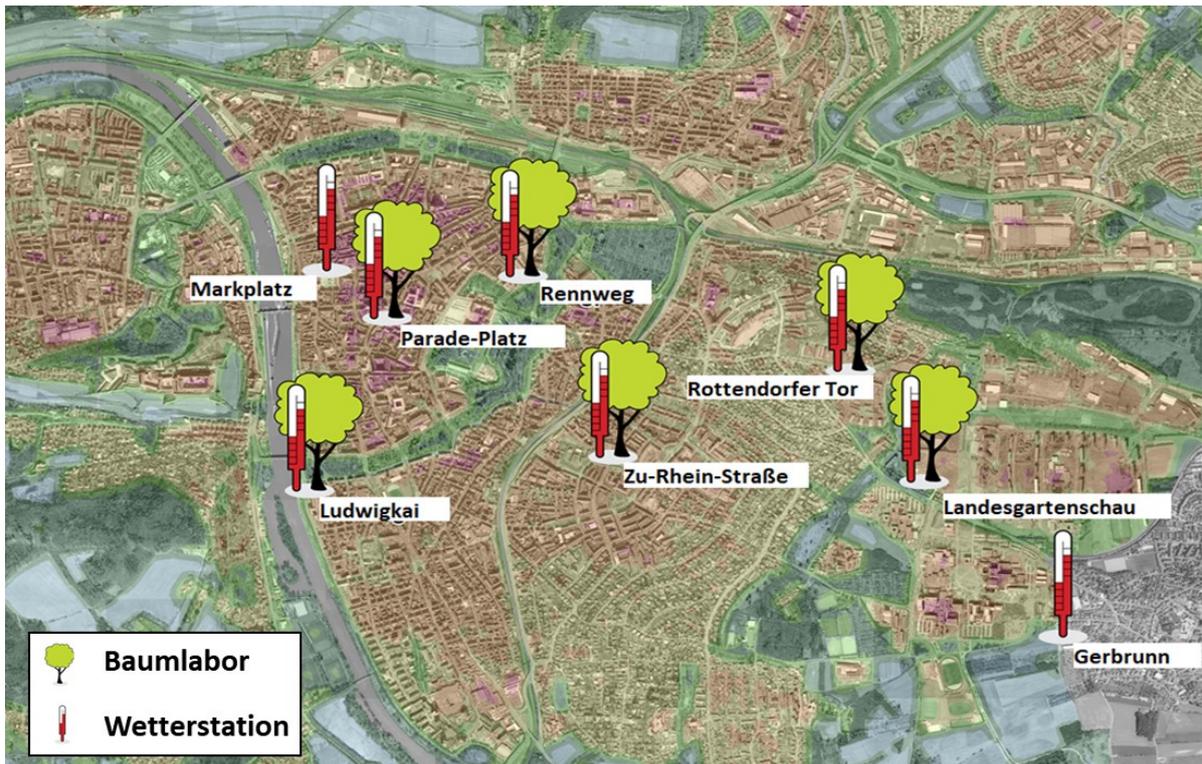


Abb. 2: Lage der Wetterstationen und Baumlabore in Würzburg

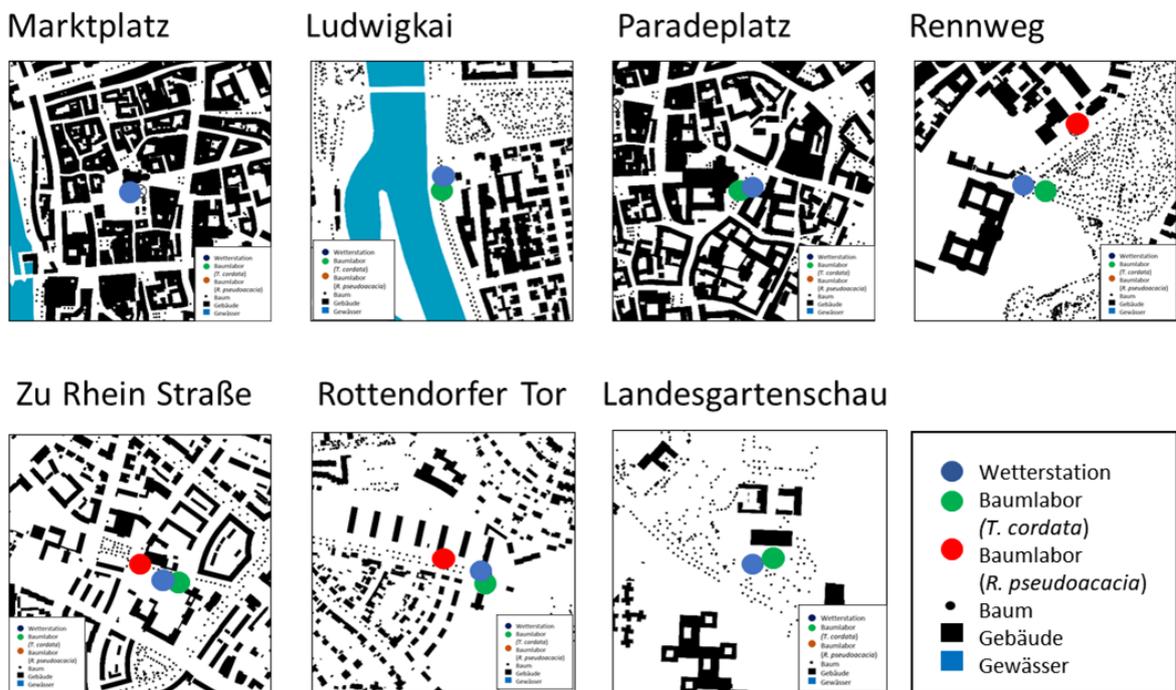


Abb. 3: Bebauungsdichte und Lage der Wetterstationen und Baumlabore (Ausschnittgröße: 500 m x 500 m)

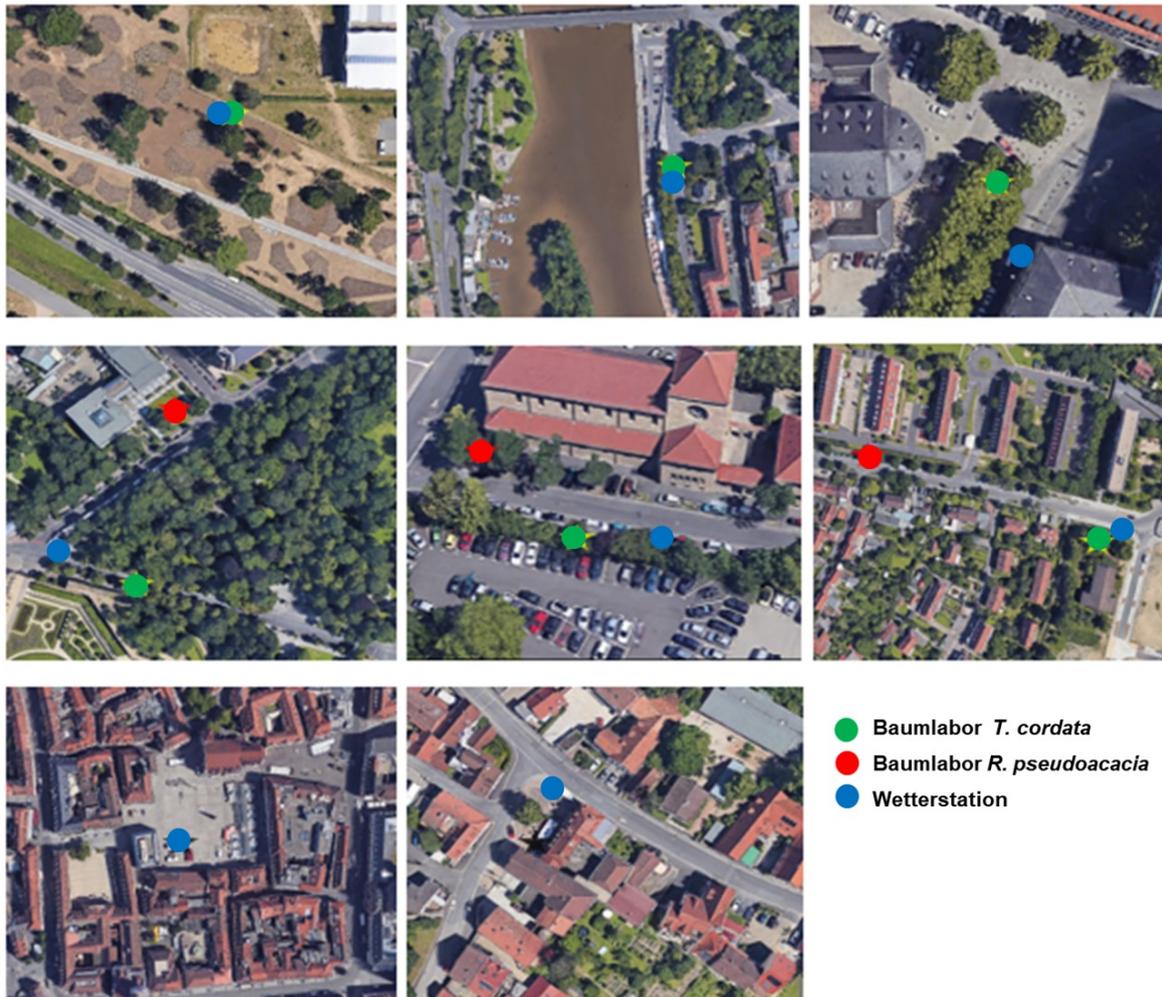


Abb. 4: Luftbilder der Standorte Landesgartenschau, Ludwigkai, Paradeplatz, Rennweg, Zu Rhein-Straße, Rottendorfer Tor, Marktplatz und Gerbrunn (von links oben nach rechts unten)

4.1.1. Wetterstationen

Im Zuge des Forschungsprojekts wurden insgesamt sieben Wetterstationen beschafft. Eine weitere achte baugleiche Wetterstation wurde von der Gemeinde Gerbrunn dem Forschungsprojekt zur Verfügung gestellt.

Da sich bei den Messungen an der Station Rennweg frühzeitig zeigte, dass der Ringpark je nach Staudichte der Bäume über unterschiedlich starke Kühleffekte verfügt, wurde zusätzlich ein weiterer Temperatur- und Feuchtesensor im Kernbereich des Parks montiert.

Der genaue Standort der Wetterstationen erfolgte nach Festlegung der Baumstandorte. Da sich die Baumstandorte aufgrund der Artenauswahl von Winterlinde und Robinie auf Orte reduzierte, an denen diese beiden möglichst nahe vorkommen, mussten geeignete Montagemöglichkeiten in unmittelbarer Umgebung gefunden werden. Aufgrund der erforderlichen Stromversorgung zum Aufladen der Akkus fiel die Wahl zur Installation der Wetterstationen auf Straßenlaternen.

Für die Auswahl der geeigneten Straßenlaterne mussten unterschiedliche Kriterien abgewogen werden. So durfte beispielsweise der Abstand zur Baumstation wegen der Energiever-

sorgung nicht zu groß sein, zeitgleich durften die Bäume oder andere Störobjekte die Messungen der meteorologischen Parameter nicht beeinflussen. Letzteres wurde durch eine ausgedehnte Messkampagne im Rahmen einer studentischen Geländeübung ermittelt (siehe Kap. 5.2).

An Standorten, die über keinen Stromanschluss durch die Straßenbeleuchtung verfügten, wurden Individuallösungen gesucht. So konnte beispielsweise durch die Installation einer Steckdose im Bereich eines Kircheneingangs die Stromversorgung an der Station Zu Rheinstraße (Robinie) sichergestellt werden.

Als Installationsmöglichkeit der Messinstrumente musste an den Standorten Landesgartenschau und Marktplatz auf einen Fahnenmast beziehungsweise ein Aluminiumrohr zurückgegriffen werden. Die nötigen Montagematerialien wurden dabei in Eigenregie gefertigt und angebracht.

Die Messgeräte wurden an jedem Standort in möglichst identischer Höhe angebracht, um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten. Wegen der räumlichen Gegebenheiten war eine Messung aller Parameter nach gültigem Standard der World Meteorological Organization (WMO) nicht möglich. So wurde beispielsweise der Temperatursensor in 3 m über Geländeoberkante (GOK) montiert (statt 2 m ü. GOK nach WMO-Standard), um Schäden durch Vandalismus zu vermeiden. Da sich die Masthöhen der Laternen im Bereich zwischen 7 m und 10 m bewegten war eine Windfeldmessung in 10 m Höhe nach WMO Standard ebenfalls nicht an allen Stationen möglich.

Um Störeinflüsse durch vorhandene Gebäude oder Objekte bei den Messungen zu vermeiden, wurden sensitive Messgeräte möglichst exponiert an den Masten montiert. So befanden sich an der Spitze der Laternen (7-10 m über GOK) die Sensoren für die Globalstrahlung und Windmessung, im unteren Bereich (3 m über GOK) die Messgeräte für Temperatur, Feuchte, Niederschlag und gegebenenfalls Luftdruck.

4.1.2. Baumlabore

An 5 der 7 Standorte wurden zusätzlich Baumlabore eingerichtet. An den „Linden“-Baumlaboren wurden bis zu fünf Winterlinden, an den drei „Robinien“- Baumlaboren wurden jeweils drei Robinien mit Sensorik versehen. Insgesamt konnten so 32 Bäume mit Messgeräten ausgerüstet werden. Der Standort Marktplatz in Würzburg sowie der Standort Gerbrunn waren baumlos und dienten als Referenzstationen.

Bei der Auswahl der Bäume wurde versucht, möglichst gleichaltrige Bäume mittleren Alters (35-60 Jahre) mit Messgeräten auszustatten. Die Abschätzung des Baumalters beruhte auf dem Stammdurchmesser (= Durchmesser auf Brusthöhe, BHD). Da zunächst nach den Auswahlkriterien „Lage in der Stadt“, „Freiraumtyp“ und „Baumart“ selektiert werden musste, war eine Auswahl von Bäumen mit möglichst gleichem Alter/gleicher Dimension nicht immer möglich.

Wichtig für die Auswertung des Zuwachses der Bäume und der Bestimmung der Ökosystemleistungen sind die initialen Kennwerte der Einzelbäume zu Beginn des Monitorings (Tab. 2).

Tab. 2: Kennwerte der Messbäume zu Beginn der Vegetationsperiode 2018 sowie die standortspezifische Charakterisierung des Bodenwasserhaushalts (BHD=Durchmesser auf Brusthöhe, CPA=Kronenprojektionsfläche, vF%= versiegelte Fläche in Prozent der Baumwachstumszone, nFK= nutzbare Feldkapazität pro dm Bodentiefe des Oberbodens (0-30 cm)).

Baumnummer	Standort	Alter [Jahre]	BHD [cm]	Höhe [m]	Kronenansatz [m]	CPA [m ²]	vF% [%]	nFK [mm]
<i>T. cordata</i>							%	
1001	Landesgartenschau	35	27,8	9,0	3,0	39,5	35	13,9
2001	Ludwigkai	72	57,3	15,0	4,0	103,8	73	16,8
2002	Ludwigkai	70	55,8	14,5	4,5	90,2	70	16,8
2003	Ludwigkai	61	47,5	15,0	4,0	66,3	33	16,8
2004	Ludwigkai	61	45,7	17,0	5,0	74,7	51	16,8
2005	Ludwigkai	73	56,7	17,0	3,0	107,1	78	16,8
3001	Paradeplatz	49	36,3	15,0	3,0	95,4	95	15,6
3002	Paradeplatz	41	31,2	12,0	3,5	63,2	97	15,6
3003	Paradeplatz	40	29,2	13,0	3,0	78,7	98	15,6
3004	Paradeplatz	42	31,6	13,0	3,0	80,5	96	15,6
3005	Paradeplatz	43	32,2	13,5	3,0	66,9	95	15,6
4001	Rennweg	56	41,7	17,0	5,0	84,7	72	16,7
4002	Rennweg	46	34,6	13,5	4,0	88,5	72	16,7
4003	Rennweg	42	29,9	15,0	4,5	65,9	61	16,7
5001	Zu-Rhein-Straße	56	45,0	12,0	4,0	51,6	77	14,4
5002	Zu-Rhein-Straße	42	32,2	12,0	3,5	49,6	81	14,4
5003	Zu-Rhein-Straße	69	53,5	17,0	5,0	69,7	67	14,4
5004	Zu-Rhein-Straße	52	40,5	14,0	5,3	33,4	70	14,4
6001	Rottendorfer Tor	42	29,9	15,0	4,5	60,8	0	13,6
6002	Rottendorfer Tor	45	33,2	14,5	4,0	23,9	0	13,6
6003	Rottendorfer Tor	40	27,9	15,5	4,0	21,4	0	13,6
6004	Rottendorfer Tor	40	27,8	15,0	1,5	46,6	0	13,6
6005	Rottendorfer Tor	41	29,7	14,0	4,0	35,8	0	13,6
<i>R. pseudoacacia</i>								
4004	Rennweg	47	47,0	17,0	5,0	51,9	48	17,0
4005	Rennweg	60	60,7	18,0	5,0	44,1	69	17,0
4006	Rennweg	59	59,5	18,0	5,0	99,1	79	17,0
5005	Zu-Rhein-Straße	35	35,0	13,0	3,5	50,4	97	17,6
5006	Zu-Rhein-Straße	39	39,6	12,5	3,0	62,5	95	17,6
6006	Rottendorfer Tor	35	34,7	11,5	3,0	56,4	71	16,3
6007	Rottendorfer Tor	44	44,4	12,0	4,0	61,7	72	16,3
6008	Rottendorfer Tor	36	36,1	11,5	3,5	51,3	73	16,3

Fasst man die Werte der Einzelbäume zusammen, erhält man die in Tabelle 3 dargestellten Durchschnittswerte. Im Mittel waren die Winterlinden mit 39 Jahren signifikant jünger als die Robinien mit 44 Jahren (Stand 2018). Im Vergleich der Standorte waren die Winterlinden am Ludwigkai die ältesten, gefolgt von Zu Rhein-Straße, Rennweg, Paradeplatz, Rottendorfer Tor und Landesgartenschau. Die ältesten Robinien stehen am Rennweg, gefolgt von den Bäumen am Rottendorfer Tor und an der Zu Rhein-Straße. Die Stammdurchmesser der bei-

den Baumarten folgen dem Alterstrend, nicht aber die Baumhöhen. Die kleinsten Winterlinden wurden am Paradeplatz, die kleinsten Robinien am Rottendorfer Tor gefunden. Insgesamt zeigten Winterlinden einen signifikant höheren LAI im Vergleich zur Robinie. Weder bei der Winterlinde noch bei der Robinie ergaben sich jedoch signifikante Unterschiede zwischen den Standorten.

Die Winterlinden am Paradeplatz wiesen mit 96 % die höchste versiegelte Oberfläche auf, gefolgt von Zu Rhein-Straße, Rennweg und Ludwigkai. Dagegen waren die Bäume am Rottendorfer Tor innerhalb ihrer Wuchszone völlig unversiegelt. Für Robinie wurde für die Zu Rhein-Straße der höchsten Versiegelungsgrad mit 96 % berechnet (Tab. 3), gefolgt vom Rottendorfer Tor (72 %) und dem Rennweg (65 %). Für die Auswertungen wurde der Standort Landesgartenschau nicht berücksichtigt, da diese Station lediglich einen Baum aufweist.

Tab. 3: Morphologische Merkmale der Bäume und versiegelte Fläche in Prozent der Baumwuchszone vF% der 5 Winterlinden- sowie der 3 Robinien-Standorte zu Beginn des Jahres 2018 (n = Anzahl der Bäume pro Standort, SE = Standardfehler, BHD = Brusthöhendurchmesser, H = Höhe, LAI = Blattflächenindex; CR = Kronenradius; CPA = Kronenprojektionsfläche; CV = Kronenvolumen)

Art	BHD	H	LAI	CR	CPA	CV	vF%	Alter
Standort (n)	±SE (cm)	± SE (m)	±SE (m ² /m ²)	±SE (m)	±SE (m ²)	±SE (m ³)	±SE (%)	±SE (Jahr)
<i>Tilia cordata</i>								
Ludwigkai (5)	52,6 ± 2,5	15,7 ± 0,5	3,3 ± 0,4	5,3 ± 0,2	88,4 ± 7,9	1034 ± 134	61 ± 8	67 ± 2,7
Paradeplatz (5)	32,1 ± 1,1	13,3 ± 0,5	3,2 ± 0,4	4,9 ± 0,2	76,9 ± 5,7	795 ± 99	96 ± 0,6	43 ± 1,6
Rennweg (3)	35,4 ± 3,4	15,2 ± 1,0	3,1 ± 0,2	5,0 ± 0,2	79,7 ± 7,0	850 ± 94	68 ± 4	48 ± 4,2
Zu Rhein- Straße (4)	43,7 ± 4,6	13,8 ± 1,2	3,5 ± 0,4	4,0 ± 0,3	51,1 ± 7,4	491 ± 119	74 ± 3	55 ± 5,6
Rottendorfer Tor (5)	29,8 ± 0,8	14,8 ± 0,3	3,4 ± 0,3	3,4 ± 0,3	37,7 ± 7,3	424 ± 88	0	42 ± 0,9
<i>Robinia pseudoacacia</i>								
Rennweg (3)	56,6 ± 4,8	17,7 ± 0,3	2,4 ± 0,6	4,5 ± 0,6	65,0 ± 17,2	828 ± 231	65 ± 9	55 ± 4,2
Zu Rhein- Straße (2)	37,3 ± 2,3	12,8 ± 0,3	2,1 ± 0,4	4,2 ± 0,2	56,5 ± 6,1	537 ± 58	96 ± 1	37 ± 2,0
Rottendorfer Tor (3)	38,4 ± 3,0	11,7 ± 0,2	2,1 ± 0,3	4,2 ± 0,1	56,5 ± 3,0	461 ± 26	72 ± 0,6	38 ± 2,9

4.2. Messmethodik und Instrumentierung

Jede Wetterstation wurde mit Geräten zur Messung der Lufttemperatur, der relativen Feuchte, des Niederschlags, der Strahlung, der Windgeschwindigkeit und -richtung ausgestattet (Abb. 5 und Tab. 4). An den Stationen Marktplatz und Landesgartenschau wurden zudem Luftdruckmessgeräte installiert, ebenso an der Station Gerbrunn. Der Aufbau einer Wetterstation ist in Abb. 5 dargestellt.

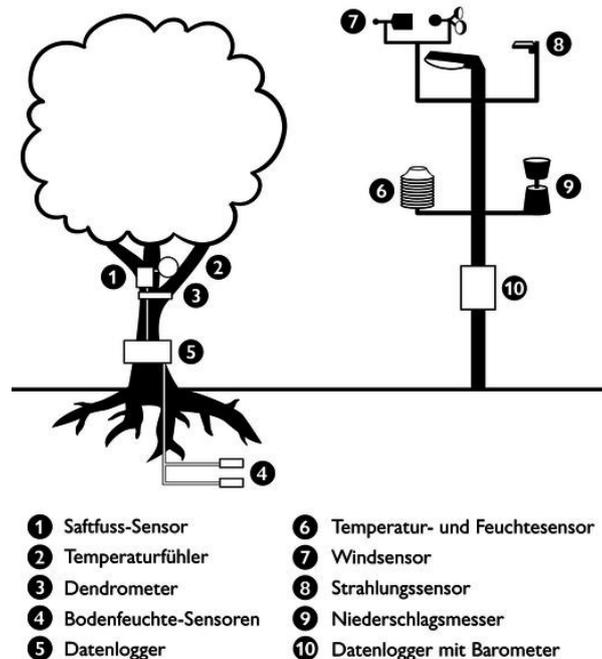


Abb. 5: Aufbau eines Baumlaboratoriums bzw. einer Wetterstation

Die Messgeräte basieren auf elektrischen Messungen. Bei der Erhebung von Luftdruck und Temperatur/ Luftfeuchte wird auf das Prinzip der elektrischen Feldkapazitätsmessung durch einen Kondensator zurückgegriffen. Im Niederschlagssensor ist eine Kippwaage verbaut, welche bei einer Regenmenge von $0,2 \text{ l/m}^2$ kippt. Während des Kippprozesses wird eine Spannung induziert, welche vom Gerät als entsprechende Niederschlagsmenge dokumentiert wird. In dem Sensor für die Solarstrahlung ist ein Photovoltaiksensoren verbaut, dessen Funktion einer Solarzelle gleicht, wonach bei einem Einfall von Licht Spannung erzeugt wird. Es gilt, je höher der Lichteinfall ist, desto größer ist die Ausgangsspannung des Sensors. Die Windrichtung wird über ein Potentiometer ermittelt. Dabei ist (schematisch) in einem Stromkreis von jedem Pol zum Verbraucher je ein Widerstand verbaut. Über die Differenz der Spannung kann letztendlich die Windrichtung ermittelt werden. Die Windgeschwindigkeit hingegen wird über Induktion durch eine Magnetspule ermittelt. Je schneller sich das Schalenanemometer durch den Wind dreht, desto mehr Spannung wird durch die Induktion erzeugt.

An Bäumen wurden neben Geräten zur Messung der Lufttemperatur und der relativen Feuchte unter der Baumkrone Dendrometer zur Stammzuwachs- und Saftflussmessgeräte installiert. Zudem wurden an allen Baummessstandorten Bodenfeuchtesensoren zur Messung des Wassergehalts der obersten Bodenschicht eingebracht (Abb. 5).

Der Saftfluss, aus dem die Transpiration des Baumes abgeleitet werden kann, wurde mit Saftflussmessgeräten des Typs SF 20 oder SF 23 SF-G gemessen. Diese messen kontinuierlich nach dem Prinzip von Granier den Wasserfluss im Xylem eines Baumes, indem die Temperaturdifferenz zwischen zwei übereinander angeordneten Nadeln bestimmt wird (Granier, 1987). Dabei wird die obere Nadel mit einer konstanten Energiezufuhr beheizt. Aus der Temperaturdifferenz kann dann mittels einer empirischen Gleichung der Wasserfluss im Baum berechnet werden. Kennt man die wasserführende Fläche des Baumes, kann die Transpiration abgeschätzt werden. Je nach Länge der Nadeln – für Winterlinden sind aufgrund des dickeren leitenden Gewebes längere Nadeln notwendig als für Robinien – wurde der Typ 20 oder 23 verwendet. Zur Minimierung von Temperatur- und Strahlungseinflüssen wurde der Sensor mit einer Silberfolie abgedeckt.

Der Stammradiuszuwachs wird mit einem Radiusdendrometer (Punktdendrometer), Typ DR 20 der Firma Ecomatic gemessen. Dabei wurde der Messsensor mit 2 Spezialschrauben im Kernholz verankert. Die Änderungen außerhalb des Kernholzes, gemessen mittels eines Stiftes, der an den Baumoberfläche drückt, entsprechen dem radialen Wachstum. Mit elektronischen Dendrometern kann so die Größenänderung des Stammes kontinuierlich erfasst werden (Drew & Downes, 2009; Liu et al., 1994).

Mit den HS-10 Bodenfeuchtesensoren kann die Bodenfeuchte direkt über den Scheinleitwert (Dielektrizitätskonstante) in Volumenprozent bestimmt werden. Die Sensoren wurden in einer Tiefe von 10-20 cm eingebracht, um den Wassergehalt in der obersten Bodenschicht zu messen. In dieser Schicht sind die stärksten Veränderungen des Bodenwasserspeichers zu erwarten.

Alle verwendeten Gerätetypen für die Wetterstationen und der Baumlabore sowie deren Funktion sind in Tab. 4 zusammengefasst.

Tab. 4: Gerätetypen der Wetterstationen und der Baumlabore

Gerät	Hersteller und Modellnummer	Technische Funktion	Anzahl Sensoren
Barometer	Vaisala – Barocap PTB110	Elektrische Feldkapazitätsmessung	2
Niederschlag	Campbell Scientific – ARG100 Raingauge	Induktion durch Kippwaage in 0,2mm Auflösung	7
Temperatur + Luftfeuchte	Campbell Scientific – CS215	Elektrische Feldkapazitätsmessung	17
Solarstrahlung	Campbell Scientific – CS300 Pyranometer	Photovoltaiksensoren	7
Windrichtung	RM Young – Wind Sentry Model 03002-5	Potentiometer/ Widerstandmessung	7
Windgeschwindigkeit		Magnetspule/ Induktion	7

Datenlogger	Campbell Scientific – CR300	Datenspeicherung und Steuerung	17
Saftfluss	SF 20/23 SF-G Sap Flow Sensor	Temperaturdifferenzmethode nach Granier	32
Stammradiuszuwachs	D-20 Radiusdendrometer (Punktdendrometer), Typ DR	Potentiometer	32
Bodenfeuchte	HS-10 Bodenfeuchte- sensoren	Kapazitäts- / Frequenz-Do- main-Sensor	34

4.3. Messkampagnen

Zur Untersuchung der mikrometeorologischen Verhältnisse unter den Baumkronen kam ein einzigartiges experimentelles Design zur Anwendung, für das acht klare und warme Tage während der wärmsten Woche des Jahres 2018 (23. bis 31. Juli) ausgewählt wurden. Aufgrund der starken Verkehrsbelastung musste der Paradeplatz von den Messungen ausgeschlossen werden. Die Oberflächentemperaturen von Gras- und Asphaltflächen wurden zwischen 10 und 16 Uhr mit einer Laserpistole (PTD 1, Bosch GmbH, Deutschland) ausgehend vom Stammfuß der Bäume in mindestens 2 und maximal 6 Richtungen gemessen. Mit dieser Vorgehensweise konnten sowohl ständig beschattete Oberflächen nahe dem Stamm als auch ständig besonnte Oberflächen außerhalb des Kronenraums erfasst werden. Aus diesen Werten wurde die Differenz zwischen sonniger und schattiger Oberflächentemperatur (ΔST) ermittelt. Gleichzeitig wurde in der Nähe der Messpunkte die Windgeschwindigkeit mit dem Kaindl Windmaster 2 und die Windrichtung mit einer Windfahne (Thies CLIMA) gemessen. Trocken- und Feuchtkugeltemperatur wurden mit einem Assmann-Psychrometer und der Luftdruck mit einem Aneroid-Barometer (Fischer-Barometer) gemessen. Alle Messungen wurden in einer Höhe von 1,3 m über dem Boden durchgeführt.

Daten von den meteorologischen Messstationen außerhalb der Baumkronen und Saftstromdaten wurden für die Berechnung des Grenzschicht-Luftkühlungseffekts von Bäumen verwendet (ΔAT und ΔAH , Differenzen zwischen der Lufttemperatur innerhalb und außerhalb der Baumkronen bzw. der absoluten Feuchtigkeit). Für die Berechnungen des Beschattungseffekts auf die Oberflächentemperatur (ΔST , Differenzen zwischen sonniger und beschatteter Oberflächentemperatur), Lufttemperatur ($\Delta AT_{1,3\text{ m}}$, Differenzen zwischen sonniger und beschatteter Lufttemperatur in 1,3 m Höhe über dem Boden), sowie für die Berechnungen der physiologischen Äquivalenttemperatur (PET) wurden die meteorologischen Daten und Oberflächentemperaturen unterhalb der Baumkronen der wärmsten Woche des Jahres 2018 verwendet. Für die PET-Berechnung wurden alle gemessenen bio-meteorologischen Daten sowie die baummorphologischen Daten und die geschätzte Wolkenbedeckung (auf einer Skala von 0-6) in die frei verfügbare Software Ray Man 1.2 (Matzarakis et al., 2007) eingespeist, um die PET im Baumschatten und im Freien sowohl über Grasflächen als auch über Asphaltflächen zu berechnen.

5. Darstellung und Bewertung der Ergebnisse sowie praktische Anwendbarkeit

Im Rahmen des Projekts konnten Messungen über die Jahre 2018 bis 2020 durchgeführt werden. Auf Basis der DWD-Wetterdaten für die Region Würzburg war der Messzeitraum im Vergleich zum langjährigen Mittel überdurchschnittlich warm und trocken. Dies spiegelt sich in allen nachfolgenden Ergebnissen und Auswertungen wider.

5.1. Lokale Klimawandelauswirkungen

5.1.1. Klimaänderungen und das Skalenproblem

Klimaänderungen treten nicht innerhalb weniger Tage, Wochen oder Monate auf, sondern sind langfristige Prozesse. Somit lassen sich beispielsweise Einzelereignisse, wie ein zu warmer Sommer oder ein zu milder Winter, nicht direkt als ein Indikator für Klimaänderungen festmachen. Treten diese aber immer gehäuft und intensiver auf, so kann dies durchaus als ein Indiz für eine nachhaltige Änderung des (Lokal-)Klimas gedeutet werden. Meist wird dabei auf einen Referenzzeitraum von 30 Jahren zurückgegriffen (Normalperiode), je nach Fragestellung sind auch kürzere Zeiträume gebräuchlich.

Mit Hilfe numerischer Klimamodelle können die zeitlichen Veränderungen in einer bestimmten Raumeinheit projiziert werden. Globalmodelle rechnen dabei in einer groben Auflösung mit einer hohen Flächenabdeckung. Mittels des sog. „Downscaling“ ist es möglich, die grobe Auflösung auf einen regionalen Maßstab detaillierter darzustellen. Die neuesten Regionalen Klimamodelle (RCM) haben dabei eine Auflösung von $0,11^\circ$ (Giorgi, 2019).

Eine für Europa zentrale Informationsquelle für den Klimawandel ist durch die Initiative EURO-CORDEX gegeben (Giorgi, 2019). In einem international abgestimmten Modellieransatz wurden von zehn Modellierergruppen Simulationen mit unterschiedlichen regionalen Klimamodellen durchgeführt. Dabei wurden auch unterschiedliche Emissionsszenarien für die zukünftige Klimaentwicklung angenommen. Neben mittleren Verläufen lassen sich so auch die Unsicherheiten der zukünftigen Klimaentwicklung quantifizieren.

In den Klimamodellen zeigen sich für die Referenzperiode von 1991 bis 2020 bei der Jahresmitteltemperatur für Würzburg Werte von etwa $9,6^\circ\text{C}$, was auch dem aktuellen langjährigen Mittelwert des Deutschen Wetterdienstes entspricht (vgl. Abb. 6). Die Anzahl der Hitzetage im Jahr ($T_{\text{max}} > 30^\circ\text{C}$) wird mit etwa 10 Tagen angegeben (DWD: 10,5).

Die Modellprognose für die nachfolgende 30-Jahresperiode prognostiziert bei den Temperaturen für Würzburg bis zum Jahr 2050 für das Szenario RCP 8.5 („Worst-Case Szenario“) einen Anstieg der Jahresmitteltemperatur auf etwa 11°C bei rund 15 Hitzetagen im Jahr (vgl. Abb. 6). Das Ausmaß dieser Veränderungen verstärkt sich in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts noch deutlich.

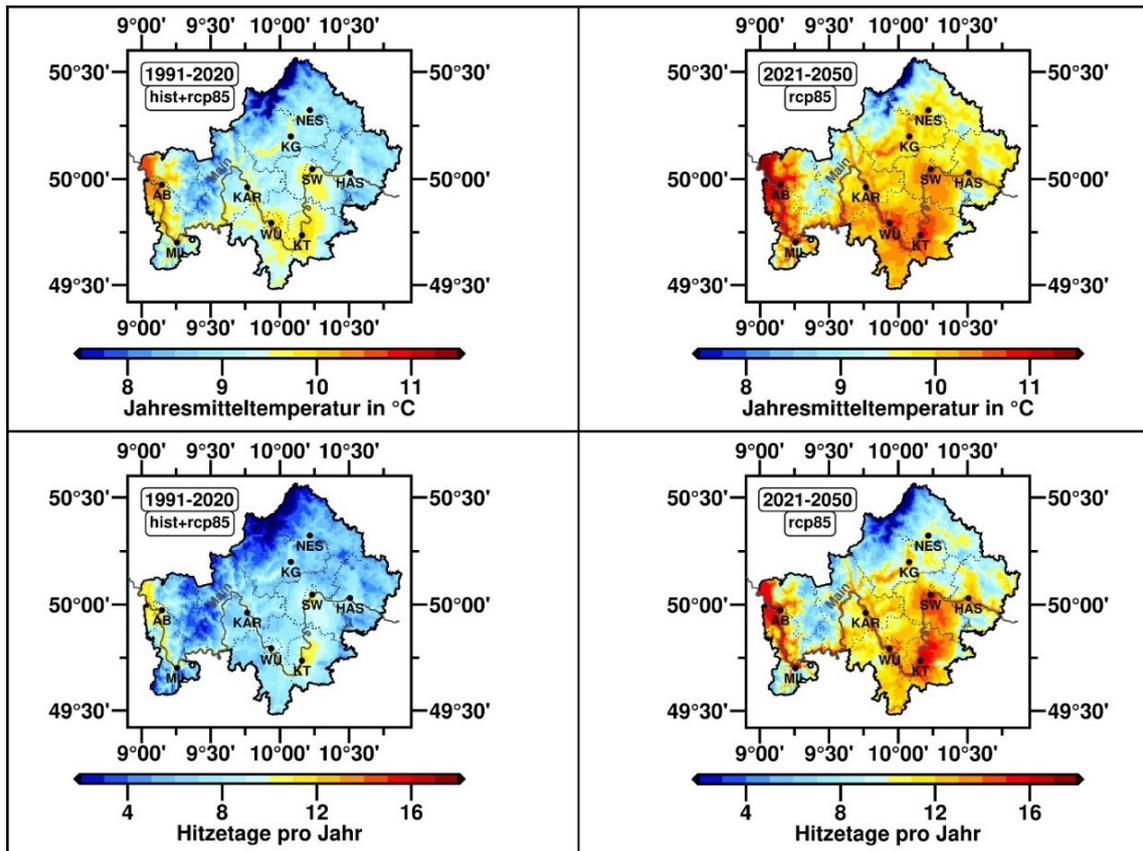


Abb. 6: Jahresmitteltemperatur und Hitzetage pro Jahr in Würzburg für das gegenwärtige Klima und anhand von Klimaprognosen (Datengrundlage: EFRE-Projekt BigData@Geo)

Bei der Gegenüberstellung der Modellprognose mit den im Projektzeitraum gemessenen Werten ergibt sich folgendes Bild:

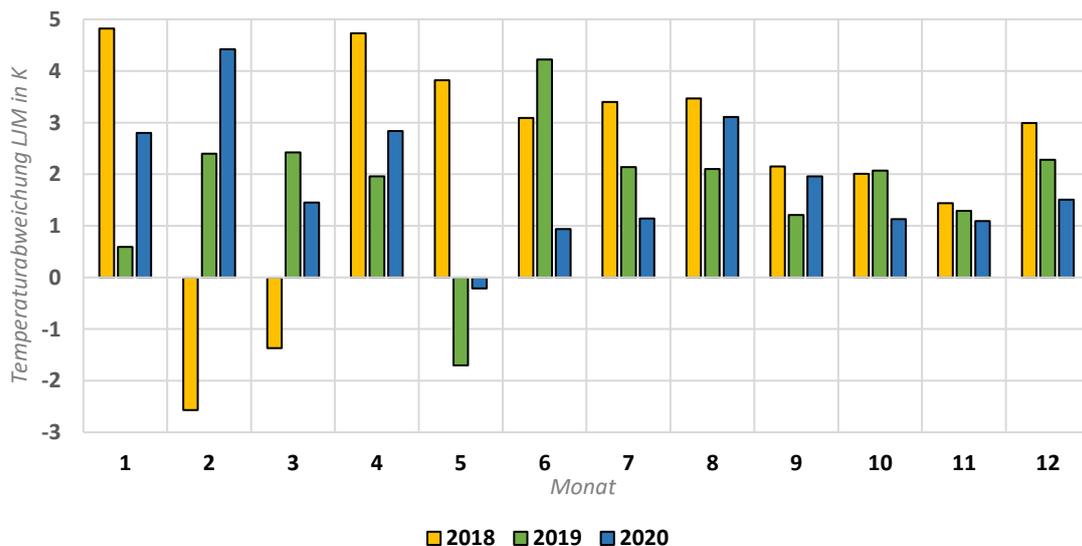


Abb. 7: Temperaturabweichungen am Marktplatz der Jahre 2018, 2019 und 2020 gegenüber dem langjährigen Mittel des DWD

Für den Messzeitraum von 2018 bis 2020 wurden für die Monate die Temperaturabweichungen vom langjährigen Mittel (LJM) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zum Bezugszeitraum 1981-2010 bestimmt (Abb. 7). Aufgrund der unterschiedlichen Höhengniveaus der DWD-Station und der Messstation am Marktplatz sind dazu die Temperaturen des Marktplatzes auf das Höhengniveau der DWD-Station angeglichen worden.

Insgesamt stellten sich von den 36 gemessenen Monaten 32 als zu warm und vier als zu kalt dar. Dabei stechen insbesondere die im Jahr 2018 ermittelten positiven Abweichungen der Monatsmitteltemperatur um bis zu 5 K besonders hervor, ähnlich hohe Werte finden sich im Juni 2019 und im Februar 2020, die ca. 4 K zu warm ausfielen.

Negative Anomalien sind im Zuge des späten Kaltlufteinbruchs 2018 im Februar und März durch einen Polarwirbelsplit zu verzeichnen, sowie im Mai 2019 und 2020.

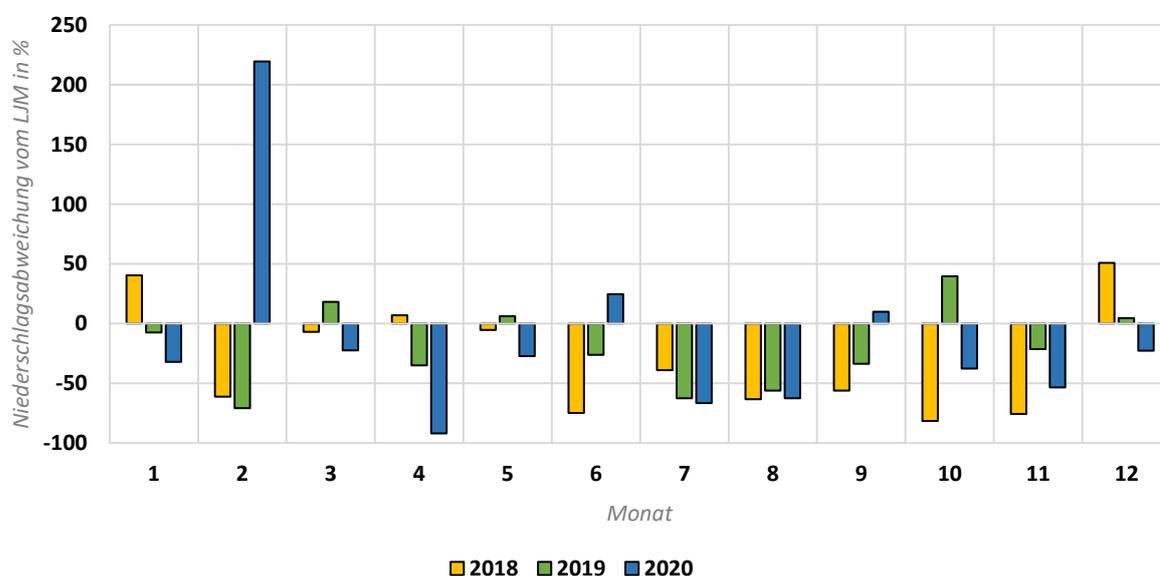


Abb. 8: Niederschlagsabweichungen am Marktplatz der Jahre 2018, 2019 und 2020 gegenüber dem langjährigen Mittel des DWD

Bei den Niederschlägen fallen 27 der 36 gemessenen Monate deutlich zu trocken aus (Abb. 8). In 13 Monaten fiel weniger als die Hälfte der sonst üblichen Monatssumme. Als negativer Spitzenreiter ist dabei der April 2020 zu nennen, in dem gerade einmal 7 % der sonst üblichen Regenmenge gefallen ist. Diese gefallene Menge kam durch insgesamt zwei Niederschlagsereignisse zustande.

Die positiven Anomalien fallen mit Ausnahme der Summen vom Dezember 2018 mit ca. 51% mehr Niederschlag und dem Februar 2020 mit + 220% nur geringfügig höher aus.

Somit lässt sich festhalten, dass in dem dreijährigen Messzeitraum eine insgesamt sehr warme und trockene Phase vorgeherrscht hat.

Bei der Gegenüberstellung der EURO-CORDEX-Daten mit den Messwerten der Wetterstationen ist zu erkennen, dass die Jahresdurchschnittstemperaturen im Projektzeitraum deutlich

über den Jahresmittelwerten des Deutschen Wetterdienstes und der EURO-CORDEX Prognose lagen (Tab. 5). Die Temperaturwerte entsprechen dabei eher denen für das RCP8.5 Szenario im Zeitraum 2021-2050.

Tab. 5: Gegenüberstellung der drei Messjahre mit dem DWD-Mittel und den Modellprognosen (CORDEX)

Jahresmittel	2018	2019	2020	DWD-Mittel	CORDEX 2020	CORDEX 2050
Temperatur Marktplatz*	12,0	11,4	11,5	9,6	9,6	11,0
Temperatur Gerbrunn*	11,5	11,0	11,2	9,6	9,6	11,0

* Temperaturwerte auf DWD-Höheniveau angeglichen

Es wird aber auch deutlich, dass die Klimamodelle im EURO-CORDEX-Verbund nicht in der Lage sind, die kleinräumigen Temperaturunterschiede im Jahresmittel (hier ca. 0,5 K) zu erfassen. Dies ist der zu groben räumlichen Auflösung von 0,11° geschuldet.

Somit können regionale Klimamodelle zwar gut erfassen, wie sich das Klima in einer Region über einen bestimmten Zeitraum verändert, die kleinräumigen Klimacharakteristika einer Stadt sind jedoch – zumindest auf diesem Skalenniveau – nur bedingt abbildbar.

Hierzu sind hochaufgelöste Stadtklimamodelle, wie beispielsweise das PALM4U-Modell geeignet, die wiederum durch Downscaling der RCM-Daten eine noch höhere räumliche Auflösung erreichen und als eine vielversprechende Perspektive in der stadtklimatologischen Forschung in Kapitel 6 aufgegriffen werden.

5.1.2. Stadtklimatische Charakteristik

Da sich die Messstationen in unterschiedlichen Stadtquartieren befanden, ergibt sich für jeden Standort eine eigene Charakteristik.

Nachfolgender Tab. 6 sind die gemittelten Werte der meteorologischen Daten für den Messzeitraum von 2018 bis 2020 zu entnehmen.

Die Station am Marktplatz zeigt mit einer Durchschnittstemperatur von 12,3 °C den höchsten Wert. Die benachbarte Station am Main (Ludwigkai) weist hingegen eine Durchschnittstemperatur von 11,5 °C auf. Im Mittel beträgt die Ausprägung des UHI dort 0,8 K, im Mittel der Spitzen 2,7 K.

Am kühlfsten fällt die mittlere Temperatur am Standort Landesgartenschau mit 11,0 °C aus. Die UHI-Ausprägung beträgt dort im Schnitt 1,3 K, im Mittel der Spitzenwerte 3,0 K, die Station Gerbrunn zeigt sogar Werte von 3,3 K.

Tab. 6: Meteorologische Werte der Temperatur, Feuchte, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und des Urban Heat Island Effekts (UHI) im Mittel und als Maximum für alle Standorte in Würzburg über den Messzeitraum 2018 bis 2020

Standort	Temperatur (°C)	Feuchte (% / g/m ³)	Niederschlag (mm)	Windgeschwindigkeit (m/s)	Windrichtung	UHI Mittel (K)	UHI Ø Max (K)
Ludwigkai	11,5	74,7/7,8	487	0,43	S	0,8	2,7
Marktplatz	12,3	69,6/7,6	461	0,92	SW	0,0	0,0
Paradeplatz	12,2	70,6/7,7	514	0,79	S	0,1	1,8
Rennweg	11,9	73,1/7,8	479	0,65	SO	0,4	2,2
Zu Rhein-Straße	11,8	73,0/7,7	423	0,51	SW	0,5	2,0
Rottendorfer Tor	11,3	73,8/7,6	460	1,0	SW	0,9	2,6
LGS	11,0	74,4/7,6	444	1,23	S	1,3	3,0
Gerbrunn	11,2	75,1/7,9	456	1,47	SW	1,0	3,3

Für die Feuchte werden die Werte nach dem gängigen Maß der „Relativen Luftfeuchtigkeit“ in Prozent, sowie dem Absolutmaß in Gramm pro Kubikmeter herangezogen. Letzteres ermöglicht den tatsächlichen Wassergehalt der Atmosphäre zu bestimmen, wohingegen die relative Luftfeuchtigkeit den Sättigungsgrad angibt. Bei der Interpretation ist zu beachten, dass die Wasseraufnahmekapazität der Luft unter anderem in Abhängigkeit zur Lufttemperatur steht.

Die wärmste Station am Marktplatz zeigt im Mittel eine relative Luftfeuchtigkeit von 69,6 %. Der tatsächliche Wassergehalt beträgt im Mittel 7,62 g/m³. Die in der Nähe liegende Station am Main zeigt bei deutlich kühleren Temperaturen höhere Werte hinsichtlich der relativen Feuchte mit 74,7 %. Ebenso ist der absolute Wassergehalt mit 7,82 g/m³ um 0,2 g/m³ höher als an der Station am Marktplatz. Ein höherer mittlerer Wassergehalt konnte lediglich an der Station Gerbrunn mit 7,9 g/m³ (75,1 %) bei einer noch kühleren Durchschnittstemperatur gemessen werden. Die Station an der Landesgartenschau, die im Mittel die geringste Durchschnittstemperatur aufweist, hat mit einem Wassergehalt von 7,55 g/m³ auch den niedrigsten Wert aller acht Stationen. Die relative Feuchte befindet sich jedoch auf ähnlichem Niveau mit den Stationen Ludwigkai und Gerbrunn.

Die Niederschlagssummen liegen im Jahresmittel über alle Stationen bei 465 l/m². Aufgrund der hohen räumlichen Variabilität der Niederschläge sind einige Standorte humider beziehungsweise arider. Insbesondere durch konvektive Niederschlagsereignisse, wie Schauer und Gewitter im Sommer, ergeben sich dadurch mitunter deutliche Abweichungen bei den mittleren Niederschlagssummen, wie beispielsweise zwischen Marktplatz (461 l/m²) und Ludwigkai (487 l/m²). Ein räumliches Muster bei dem Unterschied der Niederschlagsmengen zwischen den einzelnen Stadtquartieren konnte nicht festgestellt werden.

Die am häufigsten detektierte Windrichtung an nahezu allen Stationen weist eine südliche bis südwestliche Komponente auf. Einzige Ausnahme stellt dabei der Standort Rennweg mit einer südöstlichen Anströmung dar. Aufgrund der Bebauungsdichte der Innenstadt und der Montage der Wetterstationen an den Laternen sind einige Messstationen in der Anströmung

durch Störobjekte wie Häuser, aber auch Baumbestände, beeinflusst. Insbesondere die Innenstadtstationen Marktplatz und Paradeplatz zeigen in den Windrosen eine deutliche Kanalisierung des Windes und somit auch dessen Richtung.

Diese Kanalisierung ist auch an den Windgeschwindigkeiten ersichtlich. So beträgt die mittlere Windgeschwindigkeit am Marktplatz 0,9 m/s (3,2 km/h) und liegt somit höher als in den lockeren bebauten Gebieten wie beispielsweise am Rennweg. Hier wäre wegen des höheren Rauigkeitskoeffizienten ein umgekehrter Sachverhalt zu erwarten. Den stärksten Mittelwind weist die Station Gerbrunn mit 1,5 m/s (5,4 km/h) auf.

Auf Basis der Werte in Tabelle 6 lassen sich die Standorte wie folgt beschreiben:

Ludwigkai:

Anhand der Messwerte von Temperatur und Luftfeuchtigkeit ist im Vergleich zum Marktplatz ein Kühleffekt des Mains messbar. Dieser wird im Wesentlichen durch die Verdunstungskälte der Wasserflächen hervorgerufen. Dadurch ergeben sich mittlere maximale UHI-Effekte von 2,7 K. Die Niederschläge liegen leicht über den Durchschnitt aller Stationen. Durch die naheliegende Baumallee und den damit einhergehenden erhöhten Rauigkeitskoeffizienten ist die mittlere Windgeschwindigkeit gering.

Marktplatz/ Paradeplatz:

Die beiden Innenstadtstationen sind nicht nur die wärmsten Stationen, sondern auch die mit der geringsten Luftfeuchtigkeit. Die Niederschläge sind am Paradeplatz dabei insgesamt etwas höher. Durch die hohe Bebauungsdichte liegen beide Stationen in einem gestörten Windfeld, besonders am Marktplatz liegt ein ausgeprägter Windkanal vor. Durch die Häuserschluchten im Bereich der Station „Paradeplatz“ und dem damit einhergehenden Schattenschwurf am Morgen werden in den Mittagsstunden UHI-Effekte mit 1,8 K generiert. Im Mittel liegen die Unterschiede der beiden Stationen jedoch im Bereich des statistischen Messfehlers des Sensors (0,1 K).

Rennweg:

Durch den in unmittelbarer Nähe liegenden Ringpark ist ein Kühleffekt der Bäume messbar. Dieser spiegelt sich in den hohen Feuchtegehalten der Messungen wider. Die Niederschläge fallen dabei im Vergleich zu den anderen Stationen etwas höher aus. Durch den freieren Standort ist hier das Windfeld weniger stark gestört. Die Kühlleistung der Bäume erzeugt, besonders am Nachmittag und in den Abendstunden, einen UHI Wert von rund 2 K.

Zu Rhein-Straße:

Das Temperaturniveau der Zu Rhein-Straße liegt nur geringfügig niedriger als das des Ringparks. Der Feuchtegehalt stellt sich diesem gegenüber leicht rückläufig dar. Die Niederschlagssummen fielen an diesem Standort am geringsten aus. Durch die räumliche Nähe zu den untersuchten Bäumen ist eine Beeinträchtigung des Windfeldes, insbesondere was die Strömungsgeschwindigkeit betrifft, messbar. Die Ausprägung des UHI liegt auf dem Niveau des Standorts Rennweg.

Rottendorfer Tor:

Durch die immer lockerer werdende Bebauungsdichte ist eine weitere Reduktion der mittleren Temperatur erkennbar. Zudem steigt der relative Feuchtegehalt der Luft weiter an. Die Abnahme der absoluten Feuchte ist mit dem Zusammenhang der Temperaturabnahme begründbar. Der mittlere Jahresniederschlag liegt im Bereich des Durchschnitts. Die geringere

Bebauungsdichte sorgt zudem für eine weniger starke Reduktion der Windgeschwindigkeit. Zeitgleich wird, besonders in den Abendstunden, eine stärkere Abkühlung als im Innenstadtbereich ermöglicht, sodass die höchste Ausprägung der UHI im Mittel 2,6 K beträgt.

Landesgartenschau / Gerbrunn:

Die beiden Stationen am Stadtrand zeigen nicht nur die geringsten Temperaturen, sondern auch die höchsten Feuchtegehalte auf. Der mittlere Jahresniederschlag ist im Vergleich zu den anderen Stationen durchschnittlich bis leicht unterdurchschnittlich. Durch die nur punktuell vorhandene Bebauung im Umkreis der Stationen wird das Windfeld noch weniger beeinträchtigt, sodass dort auch die höchsten Mittelwinde festgestellt werden können. Insbesondere in dem Zeitraum kurz vor Sonnenuntergang bis etwa Mitternacht ist die Ausprägung des Stadtklimaeffektes an diesen beiden Stationen besonders stark messbar. So werden im Mittel über die höchsten Differenzen Temperaturunterschiede von 3 bis 3,3 °C gemessen.

5.1.3. Klimatologische Kennwerte im Projektzeitraum

Klimatologische Kenntage markieren Tage, an denen für einen bestimmten Parameter, wie beispielsweise die Temperatur, bestimmte Schwellenwerte über- oder unterschritten werden. Insbesondere bei den „warmen“ Kenntagen ergibt sich daraus die Möglichkeit, Aussagen hinsichtlich der thermischen Belastung oder der Intensität eines Sommers abzuleiten.

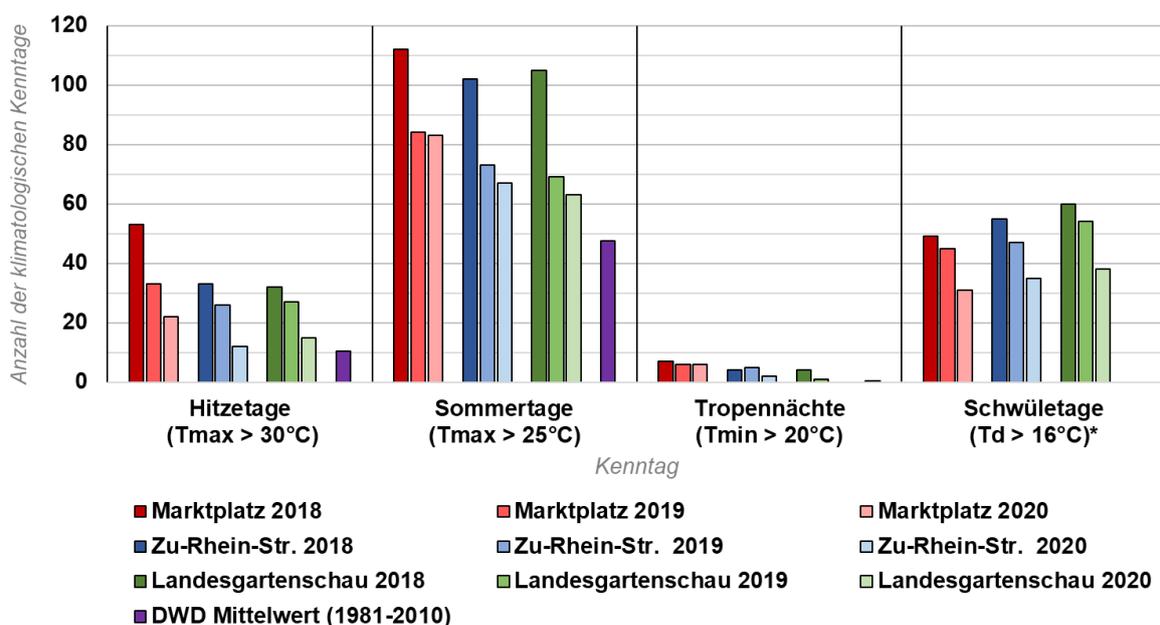


Abb. 9: Wärmebezogene klimatologische Kenntage in den Jahren 2018, 2019 und 2020 sowie im langjährigen Mittel an drei Standorten im Würzburger Stadtgebiet

Abb. 9 veranschaulicht die thermisch warmen klimatologischen Kenntage. Diese bestehen aus:

- Hitzetagen: Tage mit einer Tageshöchsttemperatur von mind. 30,0 °C
- Sommertagen: Tage mit einer Tageshöchsttemperatur von mind. 25,0 °C (Ein Hitzetag stellt zeitgleich auch einen Sommertag dar)
- Tropennächten: Tage, an denen die Tiefsttemperatur nicht unter 20,0 °C fällt

- Schwületagen: Tage mit einer Taupunkttemperatur von mindestens 16,0 °C

Bei den Hitze- und Sommertagen ist die höchste Anzahl im Jahr 2018 an der Station am Marktplatz im Innenstadtbereich von Würzburg festzustellen. Im Vergleich zum langjährigen Mittel des Deutschen Wetterdienstes (1981-2010) traten fünfeinhalb Mal so viele Hitzetage (55) und rund zweieinhalb Mal so viele Sommertage (113) auf. Zudem konnten sieben Tropennächte gemessen werden, im Mittel ist eine Tropennacht pro Jahr zu erwarten. Weiterhin lag an 50 Tagen die Taupunkttemperatur über dem Schwülewert von 16 °C. Ein Referenzwert vom DWD hierzu liegt nicht vor.

Im Vergleich zu den anderen Standorten an der Zu Rhein-Straße und der Landesgartenschau gab es dort 2018, aber auch in den folgenden Jahren, insgesamt weniger Hitze- und Sommertage als an der Station am Marktplatz. Ebenso waren dort weniger Tropennächte zu verzeichnen als im hochverdichteten Innenstadtbereich. Erhöht ist hingegen die Anzahl der Schwületage gegenüber der Referenzstation am Markt. Ursächlich dafür ist vermutlich ein erhöhter Feuchteeintrag in die Atmosphäre durch die Evapotranspirationsleistung der vermehrt auftretenden Vegetationsflächen zum Stadtrand hin zu nennen. Da die Schwüle eine Kombination aus Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit darstellt, ist eine gewisse Sensitivität gegenüber diesem Feuchteeintrag vorhanden.

Insgesamt zeigt sich über die drei Messjahre eine stufenweise Abnahme der warmen klimatologischen Kenntage gegenüber dem Extremjahr 2018. Dennoch ist festzuhalten, dass auch das Jahr 2020 eine überdurchschnittliche Anzahl an Hitze-, Sommer- und Schwületagen sowie Tropennächten aufweist.

Da es durch die hohe Anzahl an Sommer- und Hitzetagen auch zu einer Zunahme der potenziellen Evapotranspiration kommt ist für einen ausgeglichenen Wasserhaushalt häufiger und nachhaltiger Niederschlag wichtig.

Anhand der Niederschlagsabweichungen pro Monat ist ersichtlich, dass die gefallenen Niederschlagssummen der Monate zum größten Teil deutlich unterhalb des langjährigen Mittelwertes lagen und diese somit zu trocken ausgefallen sind (Abb. 10). Umso wichtiger ist es daher für den Wasserhaushalt des Bodens, und damit auch für die Pflanzen, dass die Niederschläge in den Boden infiltrieren können. Voraussetzung dafür ist, dass diese zum einen in ausreichender Menge, zum anderen über einen längeren Zeitraum fallen.

Die Niederschlagsverteilung am Marktplatz, dargestellt in Abbildung 10, steht dabei beispielhaft für die anderen KEW-Standorte. Die entsprechende Einteilung und Definition der Niederschläge sind der Anlage zu entnehmen.

Es wird ersichtlich, dass in allen Monaten über 50 % der gefallenen Niederschlagssummen durch Regenschauer zustande gekommen sind. Bis auf wenige Ausnahmen sind diese der Kategorie „leicht“ einzuordnen und generieren keine nachhaltig speicherfähigen Niederschläge.

Ein weiterer Teil der Niederschläge fällt als Sprühregen, auch als Nieselregen bekannt. Durch die geringe Ergiebigkeit dieser Niederschlagsart ist ebenfalls keine nachhaltige Durchfeuchtung zu erwarten.

Regen, der über einen längeren Zeitraum eine höhere Niederschlagsmenge erzeugt, macht je nach Monat rund 10 bis maximal 30 % der gefallenen Niederschläge aus. Es sind auch

Monate vorhanden, in denen sehr wenige Regenereignisse gefunden wurden, so zum Beispiel im April 2020, in dem lediglich 7 % des sonst üblichen Niederschlags gefallen sind und sich die gefallene Regenmenge auf zwei Einzelereignisse verteilt.

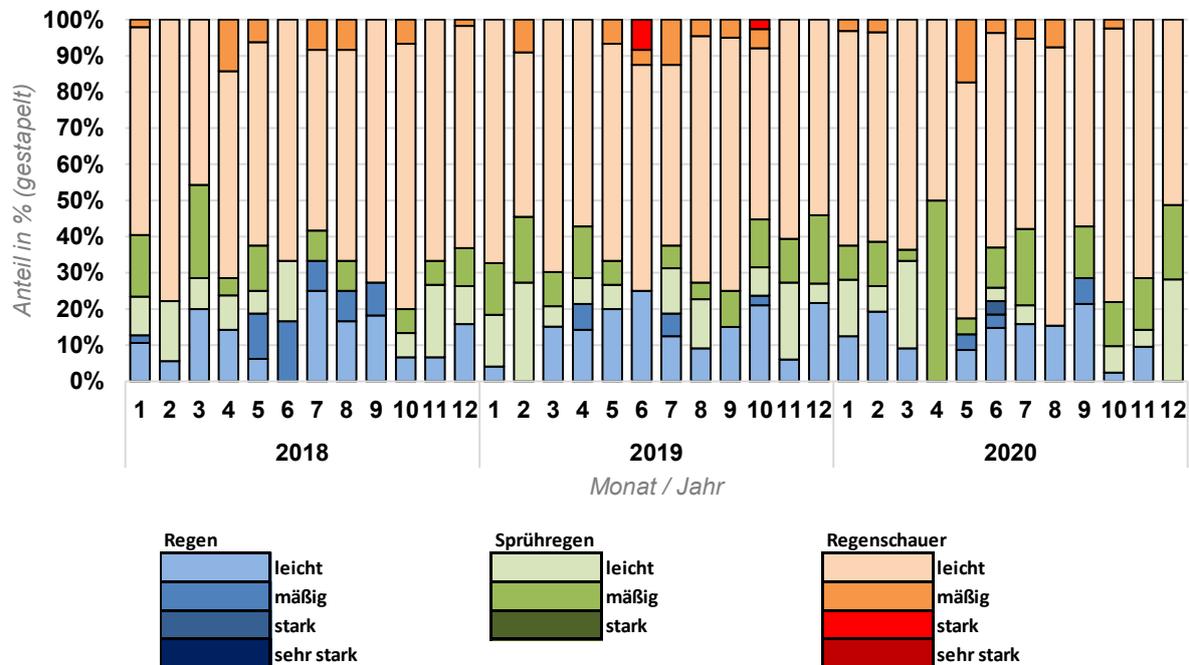


Abb. 10: Niederschlagsverteilung am Marktplatz

Insbesondere in den Sommermonaten können die Niederschlagsintensitäten, vor allem was die Regenschauer, aber auch andere Regenereignisse betrifft, intensiver ausfallen. Dies ist mit dem höheren Feuchtegehalt der Atmosphäre aufgrund der höheren Temperaturen zu erklären. Stärkere Niederschlagsintensitäten im Winter sind meist an Wetterfronten gekoppelt, die eine Luftmassengrenze erzeugen.

Durch konvektiv generierte Niederschläge im Sommer kommt es gelegentlich zu mäßigen, seltener zu starken Regenschauern beziehungsweise Regenereignissen. Gerade bei den Regenschauern, die meist kurz und stark ausfallen, findet ein großer Teil des Abflusses oberflächlich statt, solange die Bodenschichten nicht ausreichend tief durchfeuchtet werden. Hier besteht in hochverdichteten urbanen Gebieten die Gefahr von Überflutungen, in den Randgebieten an Hanglagen die Gefahr von Bodenerosion. Stadtbäume können hier das Niederschlagswasser zwar nur bedingt nutzen, durch Interzeption und höheres Bodenwasserspeichervermögen das Überflutungsrisiko jedoch erheblich senken.

5.1.4. Ausprägung des städtischen Wärmeineffekts in Würzburg

Anhand der Werte in Tab. 6 erkennt man, dass die Stationen „Gerbrunn“ und „Landesgartenschau“ mit die stärksten Temperaturdifferenzen zum Innenstadtbereich von Würzburg aufweisen.

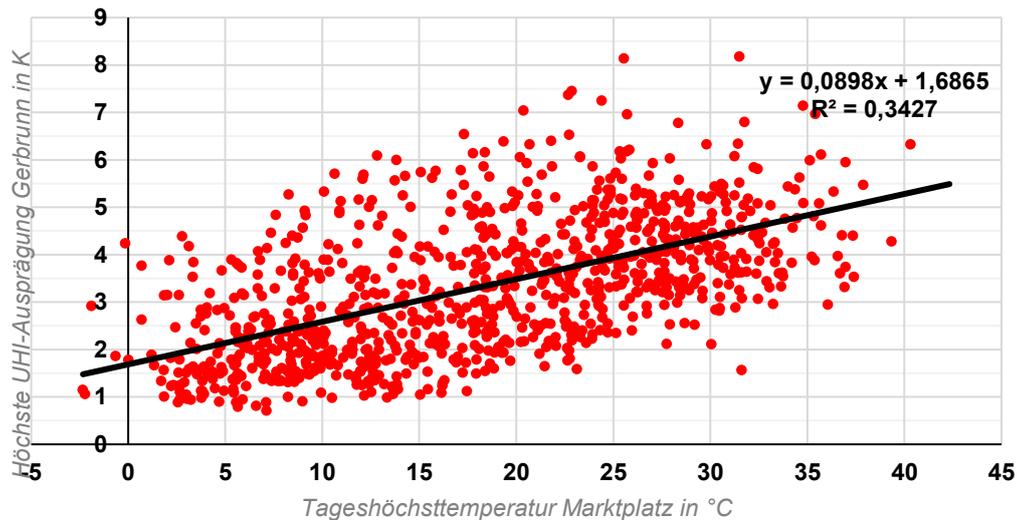


Abb. 11: UHI-Ausprägung in Abhängigkeit von T_{\max} Marktplatz

Abb. 11 zeigt, wie stark die höchste UHI-Ausprägung an einem Tag an der Station Gerbrunn in Abhängigkeit zur Tageshöchsttemperatur am Marktplatz war. In Schwarz ist die zugehörige Trendlinie zu erkennen.

Aus der Grafik ist zu entnehmen, dass sich die Ausprägung des Stadtklimaeffekts in Würzburg mit zunehmender Tageshöchsttemperatur verstärkt. Aufgrund verschiedener Einflüsse sind die Ausprägungen der UHI bei bestimmten Temperaturen einer gewissen Streuung ausgesetzt.

Weiterhin sind der Grafik folgende Extrema aus der dreijährigen Messreihe zu entnehmen: Die höchste gemessene Temperatur am Marktplatz betrug $40,3\text{ °C}$ (gemessen 25.07.2019). Aus diesem Messwert generierte sich eine Temperaturdifferenz von $6,3\text{ K}$ zum Standort Gerbrunn in den Abendstunden. Die höchste Ausprägung des Stadtklimaeffekts betrug $8,2\text{ K}$ (gemessen 02.08.2019) bei einer Tageshöchsttemperatur von $31,5\text{ °C}$.

In Abb. 12 ist dargestellt, zu welchen Tageszeiten an der Station Gerbrunn die höchsten Temperaturdifferenzen zum Innenstadtbereich am Marktplatz gemessen werden. Die blauen Balken geben dabei die relative Häufigkeit des jeweiligen Stundenwertes wieder, die rote Linie repräsentiert das dazu gehörige Mittel der UHI-Ausprägung.

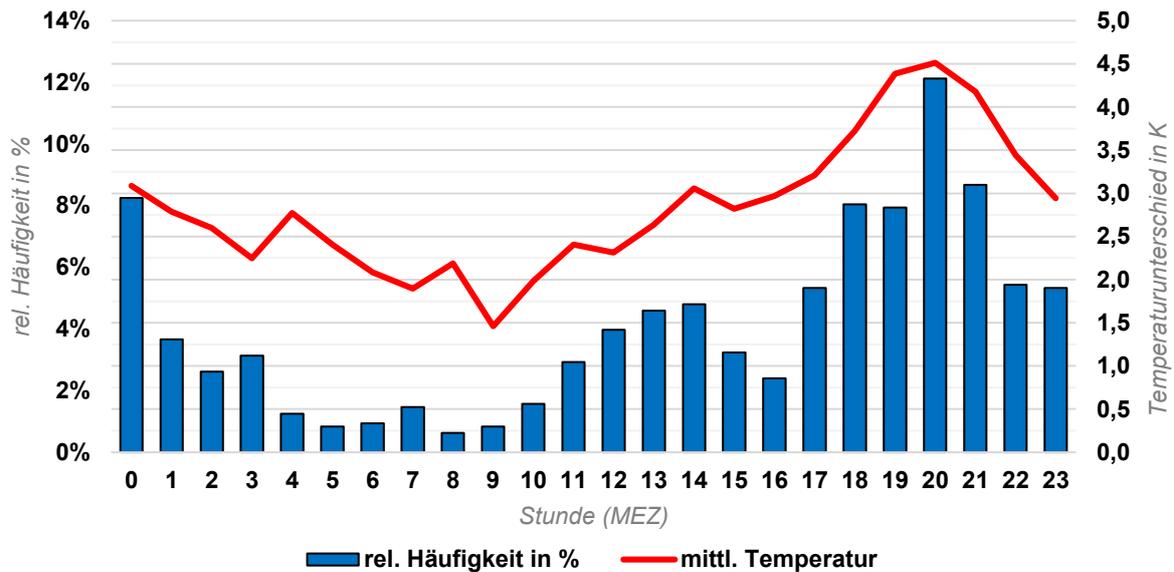


Abb. 12: Temperaturunterschied nach Tageszeit im Vergleich der Standorte Gerbrunn und Marktplatz

Es zeigt sich, dass die höchsten Stadtklimaefekte insbesondere in den Abendstunden um den Bereich des Sonnenuntergangs (je nach Jahreszeit) zu messen sind. In die Wertebereiche von 18-22 Uhr fallen rund 45 % der Daten. Neben der Häufigkeit ist auch zu erkennen, dass um diese Zeit im Mittel die höchste UHI-Ausprägung gemessen wird. Im Zeitraum von 20-21 Uhr, auf den mit 12 % die meisten Werte fallen, ist auch der Stadtklimaefekt mit im Schnitt 4,51 K am intensivsten messbar. Fallen die Tageshöchstwerte auf einen früheren Zeitpunkt so ist die Intensität der UHI statistisch geringer, um 9 Uhr ist diese mit nur ca. 1,5 K beispielsweise schwach ausgeprägt.

5.1.5. Kühleffekte der Bäume

Durch die separate Anbringung der Temperatur- und Feuchtesensoren sowohl an der Wetterstation als auch im Bereich unter der Baumkrone lässt einen direkten Rückschluss auf die Unterschiede zu. So konnte im Bereich der Bäume insbesondere im Sommer eine Reduktion der Lufttemperatur von mehr als 3,5 K gemessen werden. Zeitgleich sind die Werte der Luftfeuchtigkeit im Baumbestand höher als an der nahegelegenen Wetterstation, was auf die Transpirationsleistung der Bäume zurückzuführen ist.

Das Thermoisoplethendiagramm in Abb. 13 zeigt den für jede Stunde gemittelten Verlauf der Temperaturunterschiede zwischen Wetterstation und dem Baumbestand der Winterlinden am Messpunkt Rennweg über die Zeitspanne der drei Messjahre.

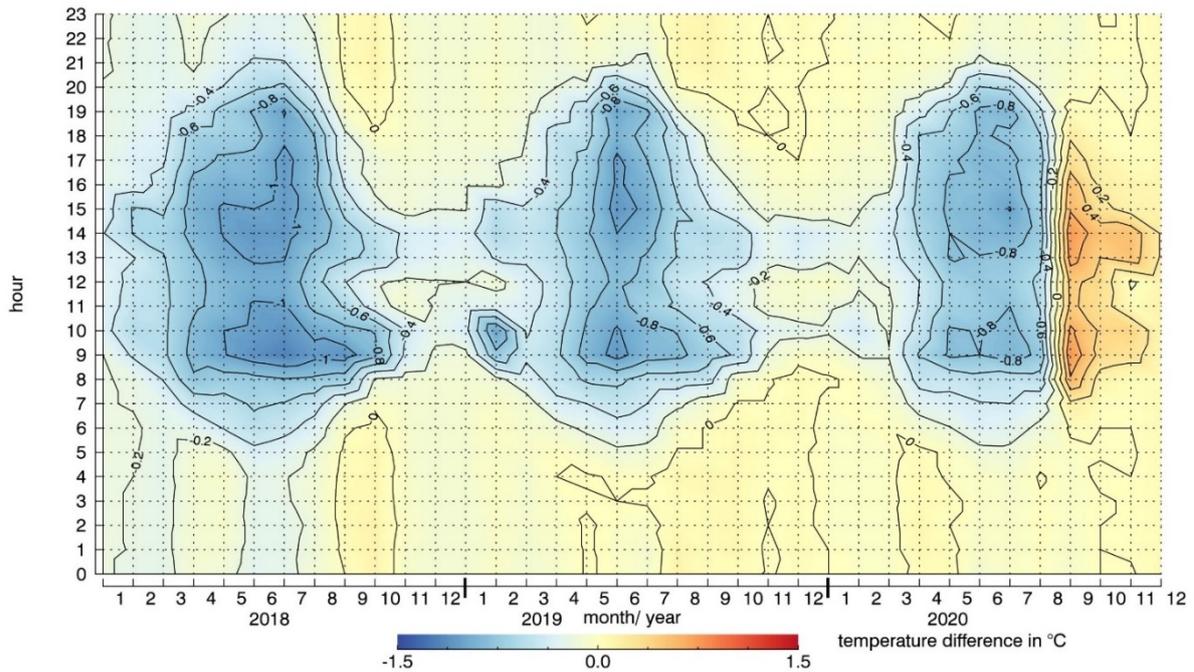


Abb. 13: Kühlungseffekt von *T. cordata* im Laufe des Tages

Aus dem Isoplethendiagramm erkennt man, dass die höchsten Kühleffekte der Winterlinden in den Monaten mit der höchsten Belaubung zu finden sind. Insbesondere in den Sommermonaten sind in den Nachmittagsstunden im Mittel Kühleffekte von über 1 K gemessen worden. An heißen Tagen sind die Unterschiede deutlich ausgeprägter und bewegen sich im Bereich von 2-3 K. Mit einsetzendem Laubfall und in den Nachtstunden verschwimmen die Temperaturgradienten zwischen Wetterstation und Baumbestand, sodass die Differenzen gegen null gehen. Auffällig ist, dass es im September 2020 anscheinend plötzlich zu einer Polumkehr des warmen Umfeldes und dem kühlen Baumbestand kommt. Dies ist im Wesentlichen auf zwei verschiedene Ursachen zurückzuführen: Zum einen war der September 2020, wie in Abb. 13 zu sehen ist, überdurchschnittlich warm und erzeugte drei Hitze- und 13 Sommertage. Zum anderen waren an den Winterlinden bereits Anfang August erste Trockenstressschäden erkennbar (Laubfärbung), bis zur letzten Augustwoche hatten die Bäume einen Großteil ihres Laubes bereits abgeworfen. Somit konnte sich der Bereich unter der Baumkrone tagsüber verstärkt aufheizen und das Temperaturniveau der Wetterstation sogar übertreffen.

Es fällt auf, dass im Verlauf der drei Messjahre die mittleren Unterschiede zwischen dem Winterlindenbestand und der Wetterstation mit jedem Jahr geringer ausfallen und auch die Zeiträume, an denen eine intensive Kühlung am Tag stattfindet, geringer werden. Hier liegt die Vermutung nahe, dass durch die trockenen und heißen Sommer die Kühlleistung der Bäume nachhaltig beeinträchtigt wird, was der geringen Laubdichte geschuldet ist.

5.1.6. Einflüsse der Großwetterlagen auf das Stadtklima

Großwetterlagen beschreiben die mittlere Luftdruckverteilung eines Großraumes wie Europa über einen mehrtägigen Zeitraum. Hess und Brezowsky definieren diesen auf eine Zeitspanne von drei Tagen (DWD, 2001). Die Großwetterlagenklassifikation von Hess und Brezowsky ist weit verbreitet und umfasst 30 verschiedene Großwetterlagen. Zudem lassen sich mit diesen Klassifikationen Aussagen hinsichtlich der Zyklonalität treffen.

Während der Projektlaufzeit von 2018 bis 2020 lag bei 55,1 % der Großwetterlagen ein zyklonales Strömungsmuster (=Tiefdruck) vor. 44,5 % dagegen waren antizyklonal ausgeprägt (=Hochdruck). Für 0,4 % der Großwetterlagen konnte keine eindeutige Klassifikation gefunden werden. Diese stellen eine sogenannte Übergangslage dar. Aufgrund der geringen Stichprobenanzahl werden diese in den Auswertungen separat betrachtet.

In Abb. 14 sind die Auswirkungen der Zyklonalität auf den Stadtklimaeffekt für die Standorte am Main (Ludwigkai), den Stadtrand (Gerbrunn) und den Bereich mit auflockernder Bebauungsdichte (Zu Rhein-Straße) dargestellt. Der linke Bereich (Max) zeigt dabei die gemittelten höchsten Ausprägungen der UHI an, der rechte Bereich (Avg) die mittlere Tagesausprägung.

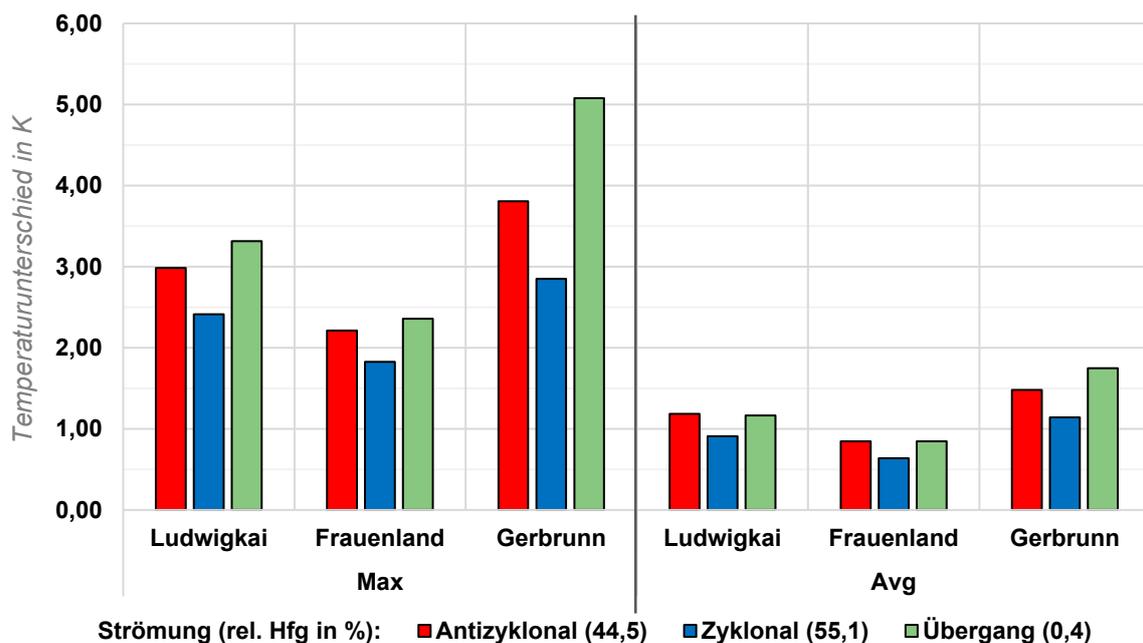


Abb. 14: Ausprägung der UHI in Abhängigkeit der Zyklonalität

Es zeigt sich, dass das Verteilungsmuster sowohl an allen Standorten als auch in den beiden Bereichen identisch. Die stärkste Ausprägung des Stadtklimaeffekts ist bei den antizyklonalen Strömungsverhältnissen festzustellen. Am Standort Gerbrunn erreichen diese in der Spitze im Schnitt knapp 4 K, am Ludwigkai wurden 3 K gemessen. Im Tagesmittel ergeben sich Unterschiede zwischen 1,2 und 1,5 K. Sind die Strömungsverhältnisse hingegen zyklonal, so ist die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel, je nach Standort 0,5 bis 1 K geringer, sodass in Gerbrunn in der Spitze rund 3 K, am Ludwigkai 2,5 K Temperaturunterschied erreicht werden. Die Tagesmittel bewegen sich ebenfalls auf einem niedrigeren Niveau.

Bei den Übergangswetterlagen ist eine deutlich stärkere Ausprägung des Stadtklimaeffekts zu erkennen. Im Mittel wurden für den Standort Gerbrunn die höchsten Temperaturunterschiede zum Marktplatz mit Werten von 5,1 K gemessen, das Tagesmittel beträgt 1,75 K.

Somit lässt sich ein Einfluss des Strömungsmusters auf die Ausprägung des Stadtklimaeffekts feststellen.

Um einen detaillierteren Einblick in die damit einhergehenden Zusammenhänge zu erhalten, wurde für jede Großwetterlage die mittlere und durchschnittlich höchste UHI-Ausprägung ermittelt. In Abb. 15 sind die daraus resultierenden vier Großwetterlagen mit der höchsten (rot) beziehungsweise niedrigsten (blau) Ausprägung des Stadtklimaeffekts (mit Bezug auf Gerbrunn) zu sehen. Die Übergangswetterlage ist wiederum separat betrachtet worden.

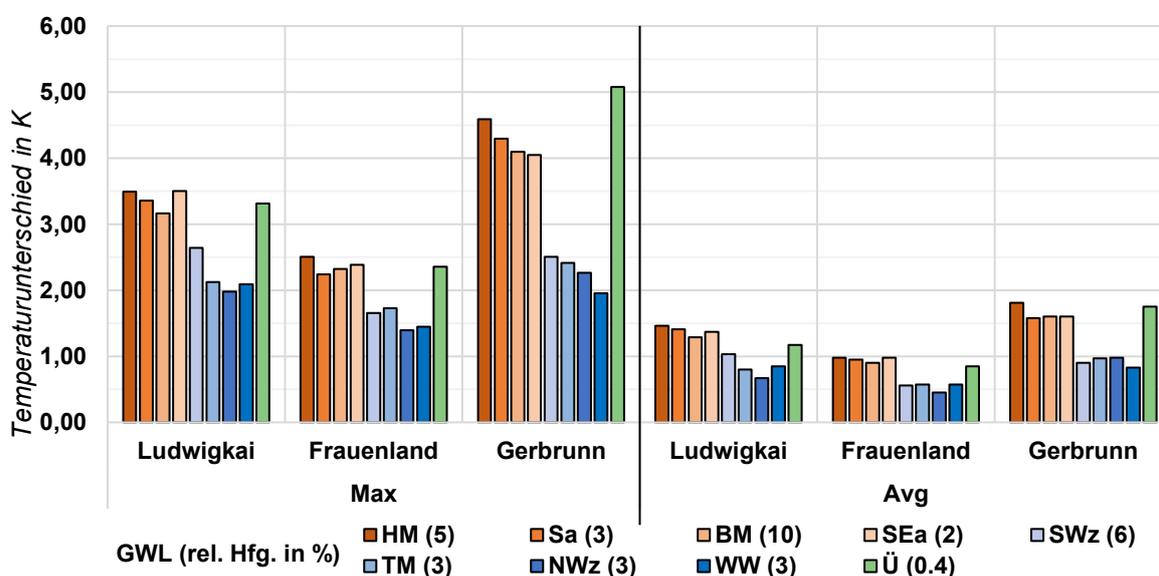


Abb. 15: Zusammenhänger UHI und Großwetterlagen GWL (HM = Hoch Mitteleuropa, Sa = Südlage, Mitteleuropa überwiegend antizyklonal, BM = Hochdruckbrücke Mitteleuropa, SEa = Südostlage, Mitteleuropa überwiegend antizyklonal, SWz = Südwestlage, Mitteleuropa überwiegend zyklonal, TM = Tief Mitteleuropa, NWz = Nordwestlage, Mitteleuropa überwiegend zyklonal, WW = Winkelförmige Westlage, Ü = Übergangslage / Unbestimmt)

Im Zuge der Aufgliederung lässt sich feststellen, dass die vier Wetterlagen mit der intensivsten UHI-Ausprägung allesamt über ein antizyklonales Strömungsmuster verfügen. Insbesondere bei den Großwetterlagen „Hoch Mitteleuropa“ (HM) und „Hochdruckbrücke Mitteleuropa“ (BM), die mitunter die stärksten Stadtklimaeffekte von bis zu 4,5 K (Max) erzeugen, ist die Lage des Hochdruckgebiets zentral.

Die vier Großwetterlagen mit den geringsten stadtklimatischen Ausprägungen sind dagegen alle zyklonal ausgeprägt. Hier sind vor allem die „Winkelförmige Westlage“ (WW) und die „Nordwestlage, Mitteleuropa überwiegend zyklonal“ (NWz) zu nennen, die im Schnitt Temperaturunterschiede von unter 1 K generieren.

Auch bei den einzelnen Großwetterlagen ist festzustellen, dass die Übergangswetterlage, zumindest an der Station Gerbrunn, nochmals intensivere UHI-Ausprägungen erzeugt als das Hoch Mitteleuropa.

Dennoch kann festgehalten werden, dass die unterschiedlichen Wetterlagen einen differenzierten Impact auf die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Stationen und der Marktplatzstation erzeugen.

Die Auswirkungen der Großwetterlagen und der Zyklonalitäten auf die Ausprägung des Stadtklimaeffekts ist durch die damit verbundenen meteorologischen Gegebenheiten zu erklären.

Ein Hochdruckgebiet ist durch großflächig absinkende und somit stabile Luftmassen gekennzeichnet, wodurch sich diese adiabatisch erwärmt, was meist zur Wolkenauflösung führt. Zudem liegen im Kernbereich des Hochdruckgebiets die Isobaren weit auseinander, sodass insgesamt wenig Wind entsteht. Somit kann die Sonne tagsüber die Oberflächen gut erwärmen, durch den wenigen Wind findet ein Luftmassenaustausch nur bedingt statt. In den Abendstunden können die Flächen im Umland stärker abkühlen als die Bereiche der Innenstadt, welche die gespeicherte Solarenergie in Form von Wärme an die Umgebungsluft abgeben.

Ein Tiefdruckgebiet ist vom Strömungsgefüge wesentlich turbulenter und durch die darin enthaltenen Frontensysteme findet nur selten Wolkenauflösung statt. Gerade im Kernbereich sind die Isobaren dicht gedrängt, sodass hier mehr Wind erzeugt wird. Somit werden die Luftmassen bei Tiefdruckeinfluss mehr miteinander vermischt, sind weniger stabil geschichtet und ein Austausch zwischen Innenstadt und Umland kann leichter stattfinden. Zudem ist ein Energieeintrag durch die Sonneneinstrahlung durch die vorhandene Bewölkung meist gehemmt. Dies wiederum sorgt für eine schwache Ausprägung der städtischen Wärmeinsel.

Durch den Übergang der Strömung von zyklonal zu antizyklonal, oder umgekehrt, kann sich die Übergangswetterlage etablieren. Diese ist durch noch weniger dichte Isobarendrängung gekennzeichnet und somit noch windärmer als die Hochdrucklage. Zusammen mit einer hohen solaren Einstrahlung im Tagesverlauf kann dadurch eine intensive städtische Wärmeinsel ausgebildet werden.

Diese Erkenntnisse sind aufgrund der zusammenhängenden Kausalitäten in der Atmosphärendynamik auch auf andere Städte übertragbar.

Im Zuge der zu erwartenden Klimaveränderungen bis zum Jahr 2100 ist insbesondere in den Sommermonaten mit einer Zunahme der stabilen und lagepersistenten Hochdruckgebiete, wie es beispielsweise auch im Jahr 2018 der Fall war, zu rechnen (Paeth & Pollinger, 2019; StMUV, 2021). Diese sind maßgeblich an hohen Temperaturkontrasten zwischen Innenstadtbereichen und dem naheliegenden Umland beteiligt, indem sie die tagsüber eingetragene Energie vor allem in den Abendstunden wieder an die Umgebung abstrahlen. Dies führt zu einem Anstieg der Temperaturen in den Innenstädten. Insbesondere wenn mehrere heiße Tage mit wenig Luftmassenaustausch aufeinander fallen, ist die Gefahr einer Überhitzung der Innenstädte groß, vor allem wenn auf diese eine oder mehrere Tropennächte folgen.

Zusammenfassung

Die drei Messjahre im Projektzeitraum zeigen einen insgesamt sehr warmen und trockenen Witterungsabschnitt im Vergleich zum langjährigen Mittel. Dies spiegelt sich auch in den Messergebnissen wider. Insbesondere im Jahr 2018 konnte eine deutlich über dem Mittel des DWD liegende Anzahl an warmen klimatologischen Kenntagen wie Hitze- und Sommertagen sowie Tropennächten festgestellt werden. Die Innenstadtbereiche heizten sich dabei im Vergleich zum Umland stark auf, sodass in der Spitze exorbitant hohe UHI-Effekte von über 8 K gemessen werden konnten.

Die Niederschlagssummen waren dabei ebenfalls stark reduziert und fielen häufig in Form von schwachen und somit wenig ergiebigen und kaum speicherfähigen Regenschauern.

Deutlich messbar war der Kühlungseinfluss der Bäume auf die Umgebungstemperatur insbesondere an heißen Tagen mit über 3 K niedrigeren Lufttemperaturen.

Die gemessenen Witterungsdifferenzen zeigen klare Unterschiede hinsichtlich der aktuell vorherrschenden Großwetterlage und der damit einhergehenden Zyklonalität. Besonders bei windschwachen Druckkonstellationen kann sich das Stadtzentrum tagsüber stark aufheizen und in den Abendstunden für einen ausgeprägten Stadtklimaeffekt sorgen.

5.2. Wachstum und Ökosystemleistungen von Stadtbäumen

5.2.1. Stammzuwachs

Anhand von kontinuierlichen Dendrometermessungen wurden über drei Jahre hinweg die Stammsradialzuwächse von Winterlinden und Robinien aufgezeichnet. Die Abb. 16, Abb. 17 und Abb. 18 zeigen die Jahresverläufe der einzelnen Bäume an den jeweiligen Standorten. Um den Jahresgang anschaulicher darstellen und die Wachstumsphasen bestimmen zu können, wurden bereinigte Tagesmittelwerte verwendet (Kempkens, 2021).

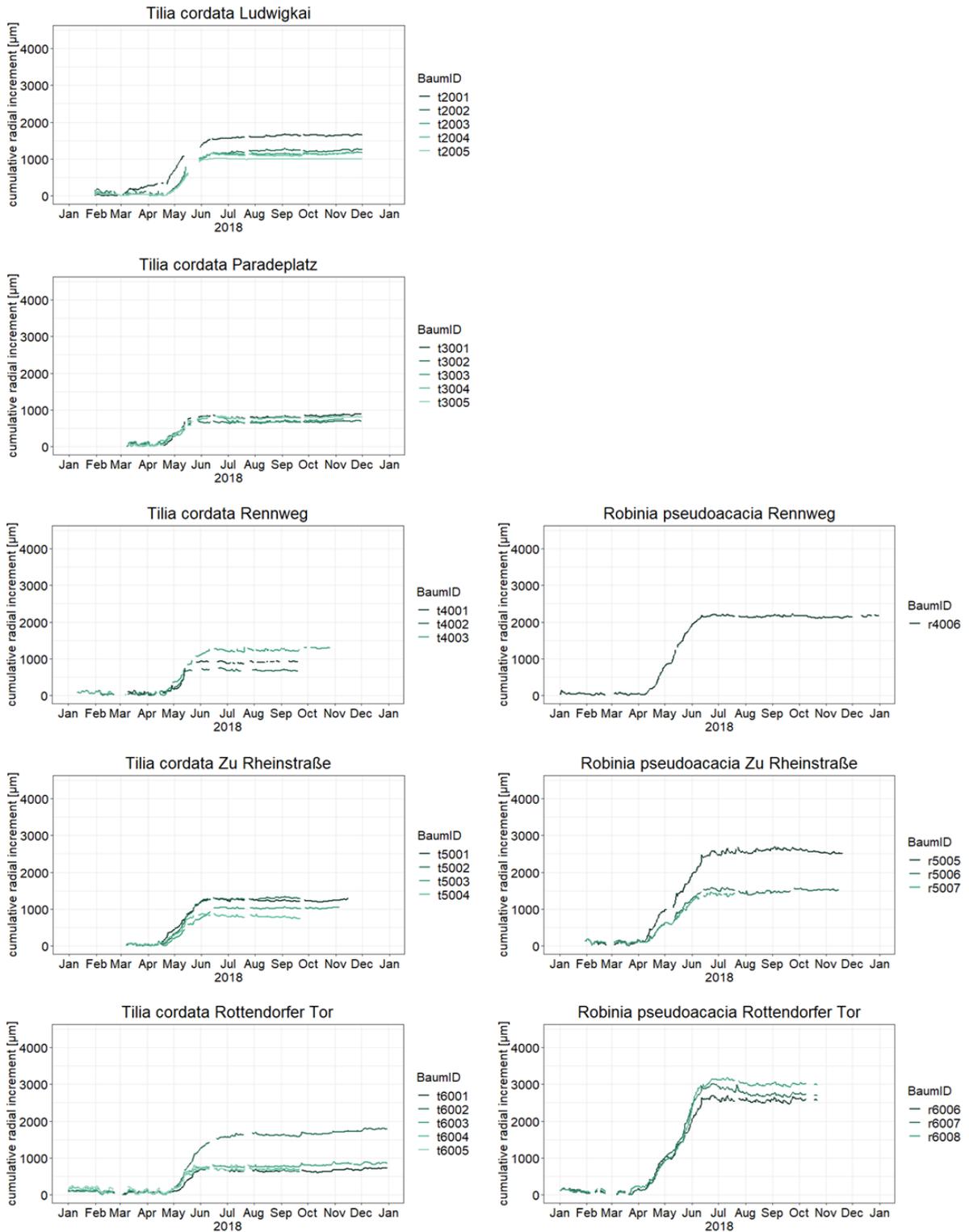


Abb. 16: Jahresverlauf des Stammzuwachses (Tagesmittelwerte) von Winterlinden und Robinien an 5 Standorten in Würzburg im Jahr 2018

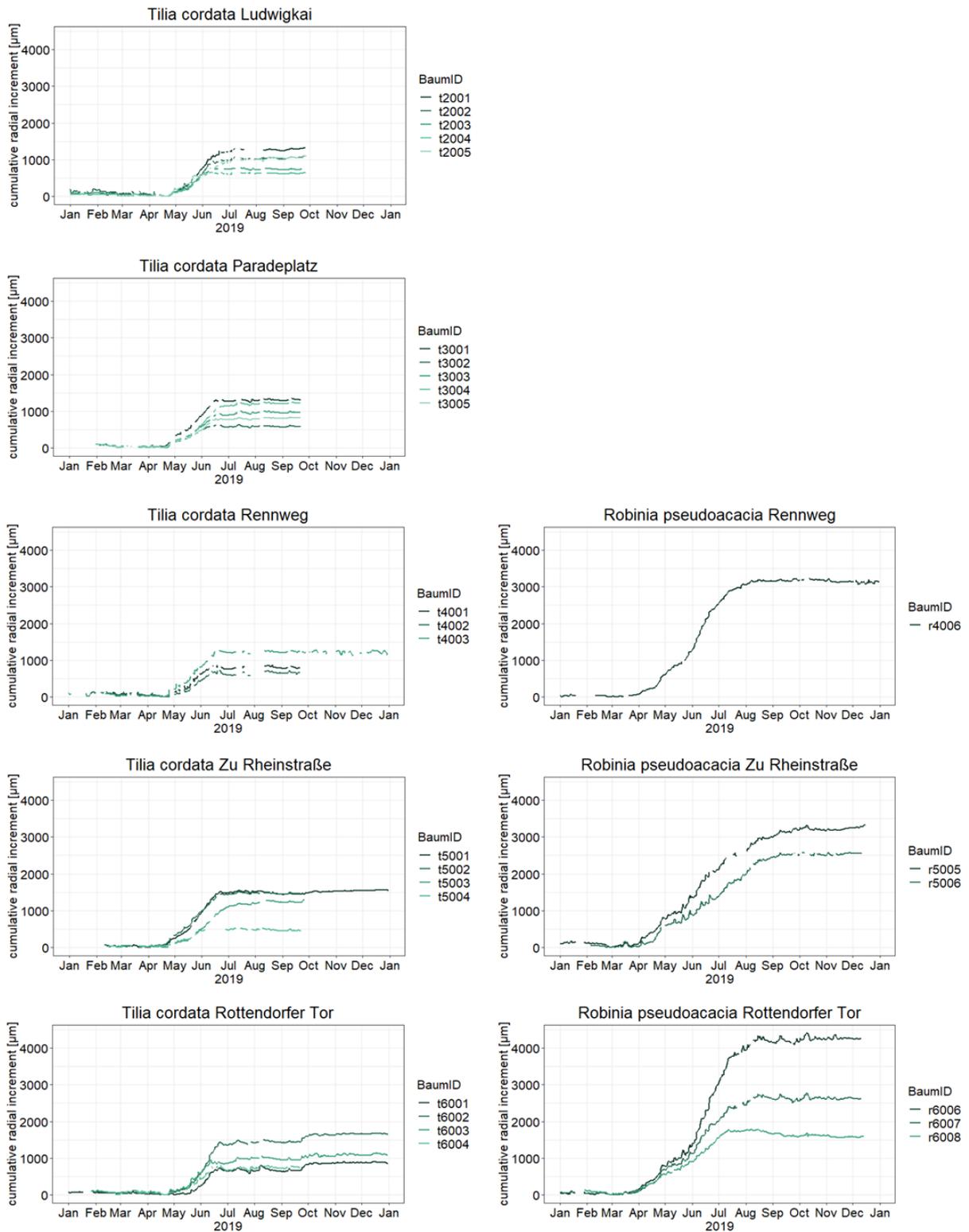


Abb. 17: Jahresverlauf des Stammzuwachses (Tagesmittelwerte) von Winterlinden und Robinien an 5 Standorten in Würzburg im Jahr 2019

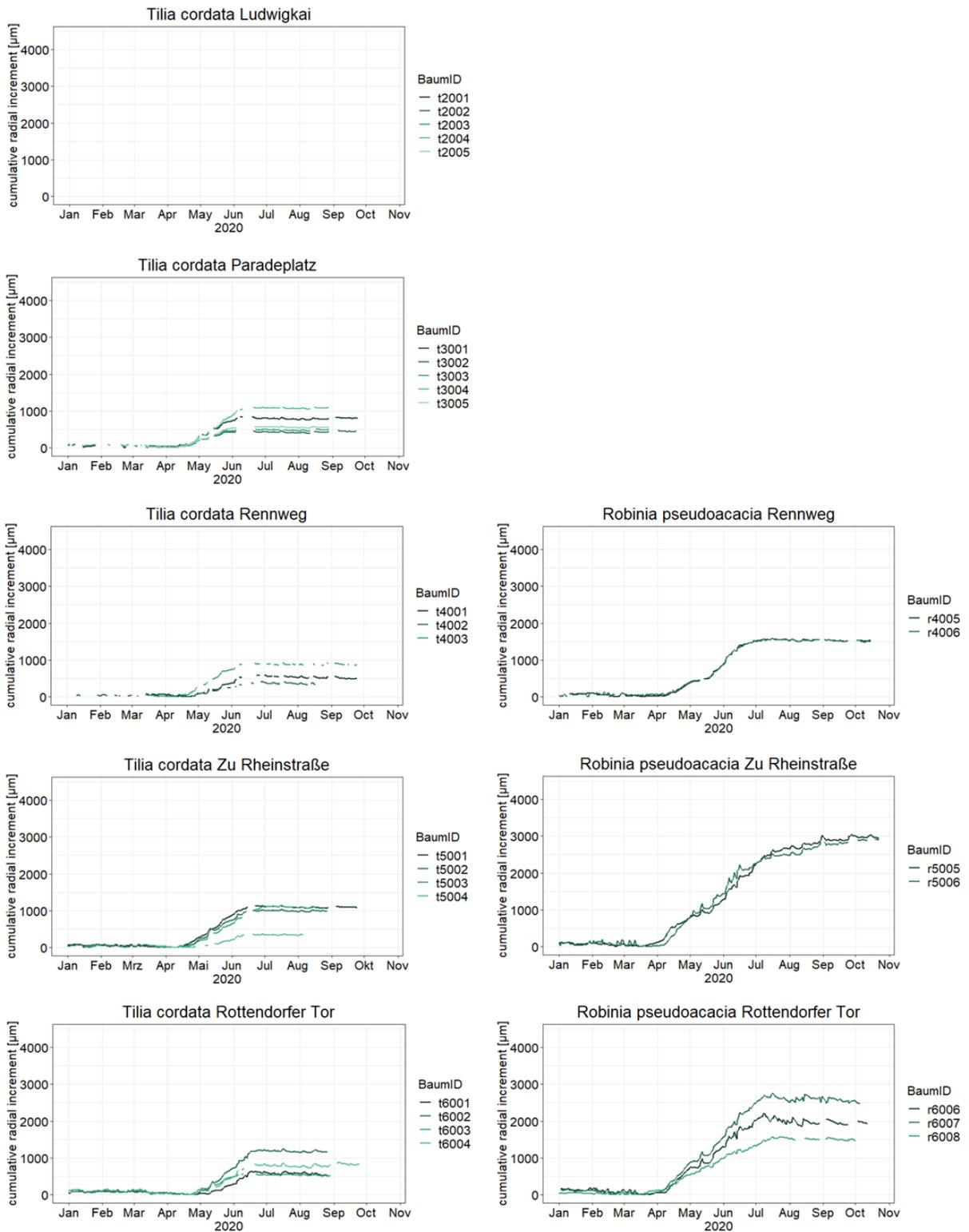


Abb. 18: Jahresverlauf des Stammzuwachses (Tagesmittelwerte) von Winterlinden und Robinien an 5 Standorten in Würzburg im Jahr 2020

Mittelt man die Wachstumsverläufe des Radialzuwachses über die Standorte und Baumarten erhält man charakteristische Jahresverläufe der zwei Baumarten (Abb. 19). Um die Vergleichbarkeit zu garantieren, wurden nur Daten der Bäume verwendet, die für alle Jahre Zeitreihen aufwiesen (Kempkens, 2021).

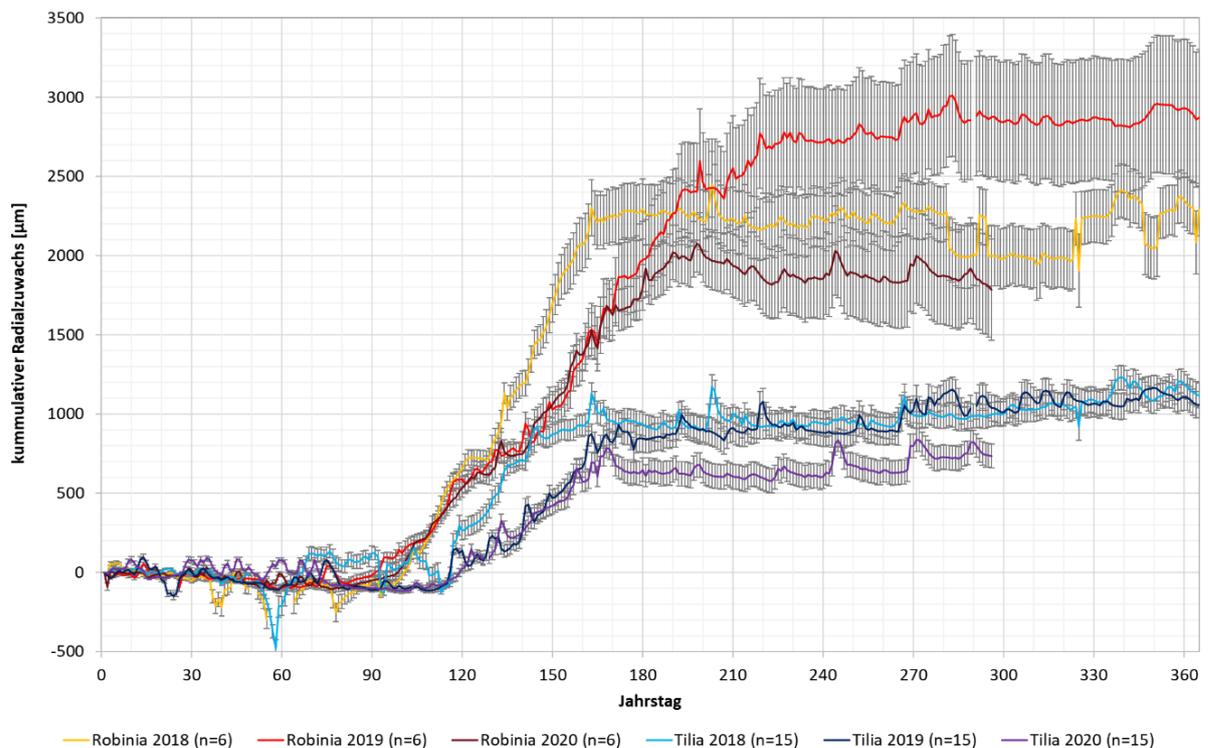


Abb. 19: Jahresverlauf des Stammzuwachses (Tagesmittelwerte und Standardfehler) für Winterlinde und Robinie in Würzburg für die Jahre 2018 bis 2020 (n= Anzahl Bäume pro Jahr)

Klar ersichtlich ist, dass das Stammwachstum bei Robinien deutlich früher beginnt als bei Winterlinden. Der Jahreszuwachs bei Robinien fällt in allen Jahren deutlich höher aus als bei Winterlinden. Insbesondere im Jahr 2019 zeigen die Robinien in Würzburg ein hohes Wachstum, das vor allem auf dem Wachstum in den Sommermonaten (ab Tagnummer 210) verglichen mit 2018 und 2020 beruht. Im Mittel aller Winterlinden wurde im Jahr 2020 der geringste Jahreszuwachs gemessen. Er unterscheidet sich signifikant vom Stammzuwachs der Jahre 2018 und 2019, die beide in etwa auf gleicher Höhe liegen.

Die Jahreszuwächse des Stammes an den einzelnen Standorten für die Jahre 2018 bis 2020 zeigt Tab. 7. Für eine bessere Vergleichbarkeit, d.h. um auch die Dimension (Stammdurchmesser) des Einzelbaumes zu berücksichtigen, wurde der Grundflächenzuwachs gewählt, der die zugewachsene Fläche des Stammes in Brusthöhe angibt (berechnet aus dem BHD und dem Radialzuwachs).

Tab. 7: Grundflächenzuwachs (cm²) des Stammes von Winterlinden und Robinien (Mittelwert +/- Standardabweichung) der Jahre 2018 bis 2020 an den einzelnen Standorten in Würzburg (Kempkens (2021))

Standort	2018	2019	2020	Mittel 2018-2020
<i>T. cordata</i>				
Ludwigkai	20,4 ± 4,9	16,1 ± 5,2		18,3 ± 0,2
Paradeplatz	7,7 ± 1,0	10,0 ± 3,2	7,5 ± 2,7	8,4 ± 0,9
Rennweg	10,4 ± 2,0	9,8 ± 1,9	6,5 ± 1,9	8,9 ± 0,0
Zur Rhein-Straße	14,9 ± 3,0	16,2 ± 6,2	12,6 ± 5,6	14,6 ± 1,4
Rottendorfer Tor	8,5 ± 3,5	9,5 ± 3,1	7,2 ± 2,5	8,4 ± 0,4
Mittelwert	12,4 ± 4,7	12,3 ± 3,1	8,5 ± 2,4	11,1 ± 1,0
<i>R. pseudoacacia</i>				
Rennweg	40,5 ± 0,0	59,8 ± 0,0	29,2 ± 0,0	43,2 ± 0,0
Zur Rhein-Straße	23,7 ± 4,9	34,5 ± 2,0	34,7 ± 0,7	31,0 ± 1,8
Rottendorfer Tor	34,1 ± 4,4	34,7 ± 11,8	26,0 ± 8,3	31,6 ± 3,0
Mittelwert	32,8 ± 6,9	43,0 ± 5,2	30,0 ± 3,6	35,2 ± 1,4

Im Mittel über die drei Jahre weisen die Winterlinden am Ludwigkai und die Winterlinden in der Zu Rhein-Straße mit 18,3 cm² bzw. 14,6 cm² die höchsten Zuwächse auf. Die im Mittel der drei Jahre geringsten Zuwächse findet man bei den Winterlinden am Paradeplatz und am Rottendorfer Tor mit je 8,4 cm² Jahreszuwachs.

Ungleich höher fallen die Jahreszuwächse bei Robinien aus. Sie liegen im Mittel über die Jahre je nach Standort zwischen 31 cm² (Zu Rhein-Straße) und 43,2 cm² (Rennweg). Im Mittel wachsen die Robinien damit mehr als dreimal so viel wie die Winterlinden.

Im Jahresvergleich liegen die Zuwächse der Winterlinden 2018 und 2019 mit 12,4 und 12,3 cm² nahezu gleich auf, während der Zuwachs im Jahr 2020 mit 8,5 cm² deutlich niedriger ausfällt. Auch wenn die Zuwächse der Winterlinden am Standort Ludwigkai der Jahre 2018 und 2019 bei der Mittelung nicht berücksichtigt werden, liegen die Werte der Jahre 2018 und 2019 mit 10,4 cm² und 11,4 cm² immer noch deutlich über den mittleren Zuwachs des Jahres 2020.

Der Zuwachs der Robinien ist im Jahr 2019 mit 43 cm² deutlich höher als im Jahr 2018 (32,8 cm²) bzw. im Jahr 2020 (30,0 cm²)

5.2.2. Wachstumsphasen

Mathematische Ableitung von S-Kurven aus den Dendrometermessungen

Beginn und Ende des Wachstums des Stammdurchmessers können anhand von kontinuierlichen Dendrometermessungen bestimmt werden (Kempkens, 2021). In einem ersten Schritt wurden dazu die täglichen Dendrometerwerte durch Mittelung aus den 10-Minuten-Werten berechnet (Abb. 20).

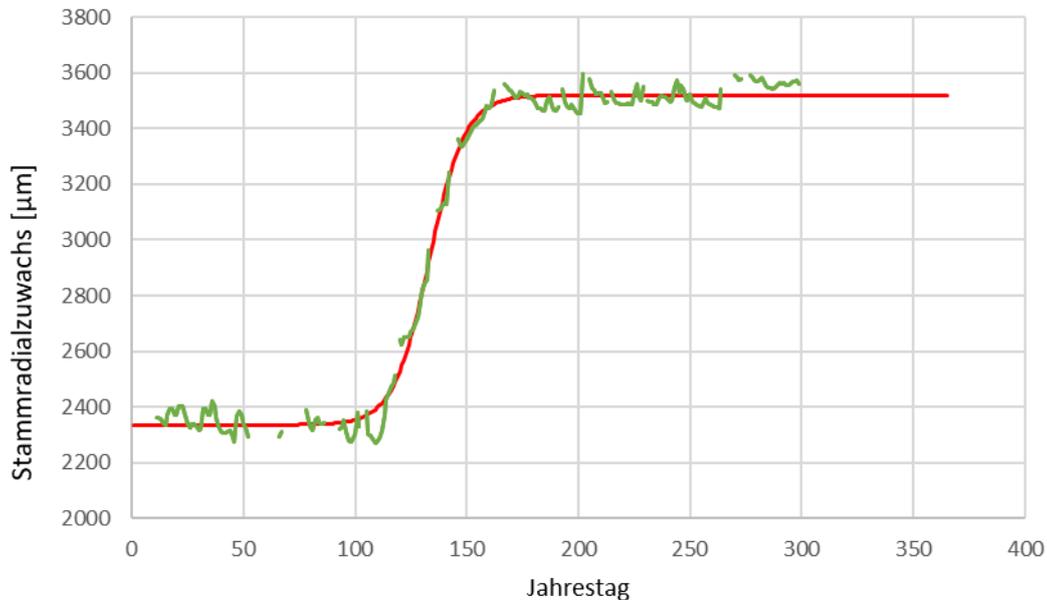


Abb. 20: Dendrometerverlauf (Tageswerte) einer Winterlinde (grün; Baum-Nr. T4003, 2018) und angepasste S-Kurve (rot)

Um Beginn und Ende der Stammwachstumsphase systematisch zu bestimmen, wurden die Dendrometerverläufe mittels S-Kurven angepasst. Für die Wahl eines geeigneten mathematischen Modells wurde der Gauß-Newton-Algorithmus herangezogen, der minimierte Residualquadratsummen berechnet. Eine modifizierte logistische Regression mit vier Parametern wurde zur Erstellung einer symmetrischen S-Kurve verwendet, die anhand von vier Parametern beschrieben werden kann (Abb. 20):

$$f(x) = d + \frac{a - d}{1 + \exp\left(\frac{x - c}{b}\right)}$$

Dabei bedeuten: a = unterer Asymptote, b = Steigung der Kurve, c = Wendepunkt, d = obere Asymptote, x = Jahrestag

Das Modell geht zunächst von einer symmetrischen S-Kurve aus, d.h. der Verlauf zu Beginn der Wachstumsphase gleicht dem Verlauf am Ende der Wachstumsphase. Da diese Annahme normalerweise nicht der Realität entspricht, wurde ein zweites Modell generiert, indem zwei Kurven erstellt werden, die am Wendepunkt c miteinander verbunden sind:

$$f_1(x) = d_1 + \frac{a_1 - d_1}{1 + \exp\left(\frac{x - c}{b_1}\right)}$$

für $1 \leq x \leq c$ (Start Wachstumsphase) und

$$f_2(x) = d_2 + \frac{a_2 - d_2}{1 + \exp\left(\frac{x - c}{b_2}\right)}$$

für $c \leq x \leq 365$ (Ende Wachstumsphase)

Sowohl d_1 als auch b_1 werden in Abhängigkeit die übrigen Parameter berechnet. Diese werden zum Kurvenfitting variiert. Am Wendepunkt werden beide Funktionen gleichgesetzt, da

eine Kontinuität des Baumwachstums angenommen wird. An diesem Punkt mit $x=c$ ist das Exponentialargument:

$$\exp\left(\frac{x-c}{b}\right) = \exp\left(\frac{0}{b}\right) = \exp(0) = 1$$

Daraus folgt für $x=c$:

$$f_1(c) = d_1 + \frac{a_1 - d_1}{(1+1)} = f_2(c) = d_2 + \frac{a_2 - d_2}{(1+1)}$$

$$\Rightarrow d_1 + \frac{a_1 - d_1}{2} = d_2 + \frac{a_2 - d_2}{2}$$

Damit kann die obere Asymptote d_1 bestimmt werden:

$$d_1 = d_2 + a_2 - a_1$$

Unter der Annahme, dass sich das Stammwachstum nicht plötzlich beschleunigt oder verlangsamt, kann die erste Ableitung der zusammengesetzten kontinuierlichen S-Kurve folgendermaßen bestimmt werden als:

$$f'(x) = \frac{(d-a) e^{\frac{x-c}{b}}}{b \left(e^{\frac{x-c}{b}} + 1 \right)^2}$$

Kontinuität für die erste Ableitung bedeutet bei $x=c$:

$$f'_1(c) = f'_2(c)$$

Somit gilt die folgende Gleichung:

$$\frac{(d_1 - a_1) e^{\frac{x-c}{b_1}}}{b_1 \left(e^{\frac{x-c}{b_1}} + 1 \right)^2} = \frac{(d_2 - a_2) e^{\frac{x-c}{b_2}}}{b_2 \left(e^{\frac{x-c}{b_2}} + 1 \right)^2}$$

Daraus kann abgeleitet werden, dass:

$$\frac{(d_1 - a_1)}{b_1} = \frac{(d_2 - a_2)}{b_2}$$

Damit folgt für b_1 :

$$b_1 = \frac{d_1 - a_1}{d_2 - a_2} b_2$$

Nachdem die Parameter d_1 und b_1 bestimmt worden sind, können die Werte a_1 , a_2 , b_2 , c und d_2 aus den minimalen Summen der Quadrate mit einer nichtlinearen „Generalized Reduced Gradient“-Methode (Lasdon et al., 1974) berechnet werden (Abb. 21).

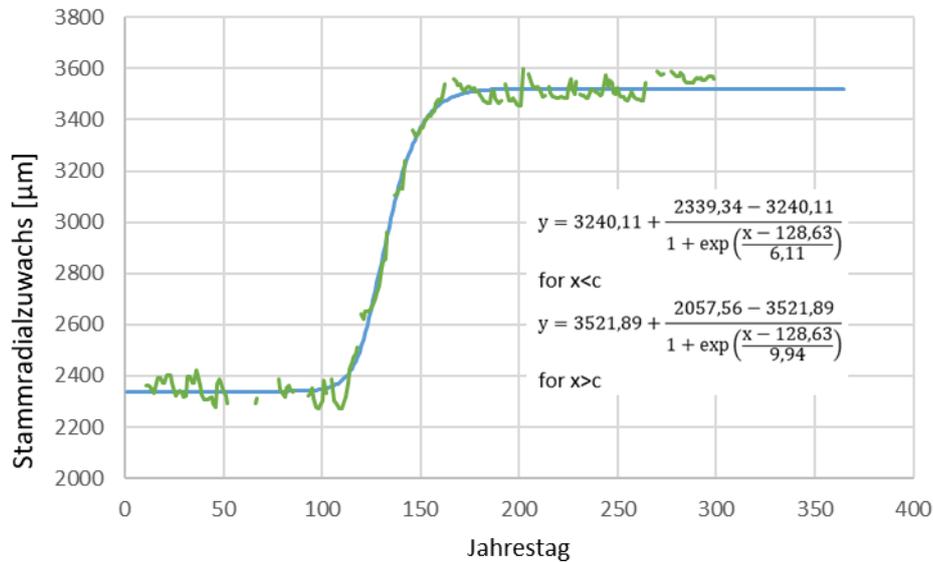


Abb. 21: Schema zur Bestimmung der S-Kurve aus dem Dendrometerverlauf (Beispiel Baum-Nr. T4003, 2018)

Bestimmung von Beginn und Ende sowie der Dauer von Hauptwachstumsphasen

Um die Punkte auf der S-Kurve zu definieren, die den Beginn und das Ende der Hauptwachstumsphase anzeigen, wurde ein Ansatz in Anlehnung an das Verfahren der DIN EN ISO 25178-2 (2012) angewendet. Diese Norm beinhaltet u. a. die Berechnung zur Charakterisierung der vertikalen Verteilung einer Fläche, die eine invertierte S-Kurve darstellt. Um in gleicher Weise vorzugehen, muss die S-förmige Wachstumskurve in die invertierte Funktion transformiert werden, so dass der Jahrestag die abhängige Variable y und der kumulative radiale Zuwachs zur unabhängigen Variable x werden (Abb. 22).

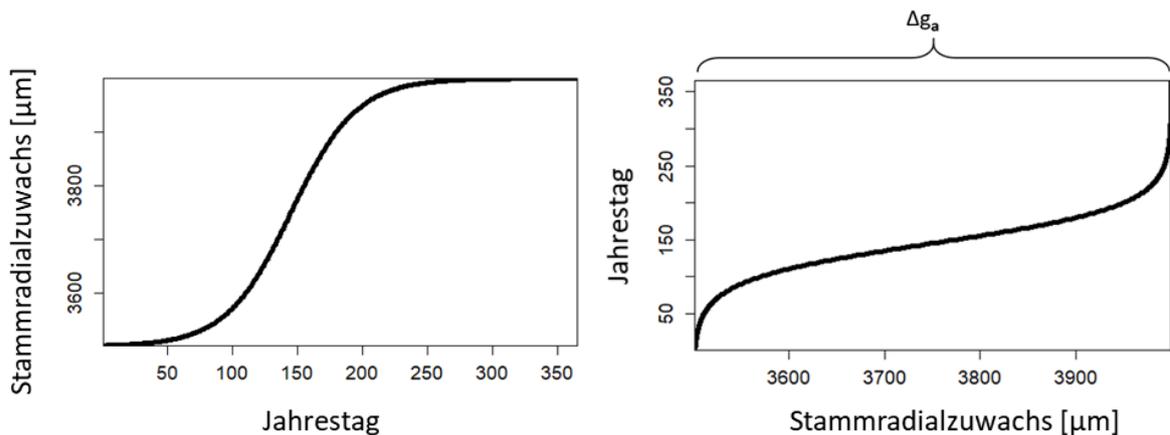


Abb. 22: Schema zur Invertierung der Wachstumskurve

Danach wird das Wachstum in Prozent des Jahreswachstums umgerechnet ($\Delta g_a = d - a$).

Der Beginn (KWA) der Hauptwachstumsphase ist definiert als der Jahrestag, an dem die Gerade mit der kleinsten Steigung die 0%-Wachstums-Abszisse schneidet (Abb. 23, rechts).

Um die Gerade mit der kleinsten Steigung zu finden, muss eine Sekante erzeugt werden, die durch zwei Punkte geht, deren Differenz in der x-Achse 40% der Messpunkte einschließt (Abb. 23, links). Ausgehend von der Position 0%-Wachstum wird diese Sekante entlang der Wachstumskurve so lange verschoben, bis eine Sekante mit der kleinsten Steigung gefunden ist.

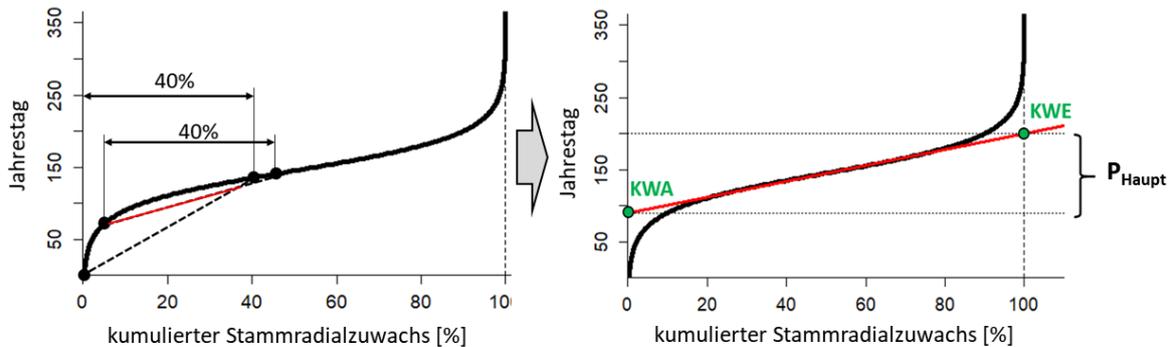


Abb. 23: Schema der Bestimmung der Hauptwachstumsphase des Stammes

Das Ende (KWE) der Hauptwachstumsphase ist definiert als der Jahrestags-Punkt, an dem die gewählte Gerade die 100%-Wachstums-Abszisse schneidet (Abb. 23, rechts). Die auf der y-Achse eingezeichneten Geraden definieren KWA und KWE. Der vertikale Abstand zwischen diesen beiden Punkten KWA und KWE stellt die Länge der Hauptwachstumsphase P_{Haupt} dar.

Bestimmung von Beginn, Ende und Dauer der Gesamtwachstumsphase

Der Beginn und das Ende der Gesamtwachstumsphase des Stammes werden als Höhe der rechtwinkligen Dreiecke $A1'$ und $A2'$ definiert (Abb. 24). Diese Dreiecke sind äquivalent zu den Flächen, die die Kurve unterhalb KWA bzw. oberhalb KWE begrenzen. rAW ist der niedrigste Punkt der Kathete des Dreiecks $A1'$ an der y-Achse, während rEW der höchste Punkt der Kathete des Dreiecks $A2'$ an der 100%-Abszisse ist.

Die Gesamtwachstumsphase (P_{Gesamt}) ist der vertikale Abstand der Punkte rAW und rEW .

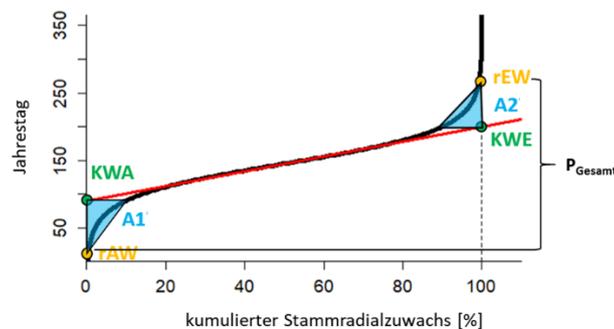


Abb. 24: Schema der Bestimmung von Beginn (rAW), Ende (rEW) und Dauer der Gesamtwachstumsphase des Stammes

Eine ausführliche Beschreibung der Methodik zur Bestimmung von Beginn, Ende und Dauer der Haupt- und Gesamtwachstumsphasen ist in Kempkens (2021) dargestellt.

Beginn, Ende und Dauer der Haupt- bzw. Gesamtwachstumsphase für Robinien und Winterlinden

Tab. 8 zeigt den Beginn, das Ende und die Dauer der Hauptwachstumsphase sowie die Dauer der Gesamtwachstumsphase für die drei Jahre 2018 bis 2020, berechnet auf Basis der Dendrometerzeitreihen und gemittelt über alle Bäume und Standorte.

Tab. 8: Beginn, Ende und Dauer der Hauptwachstumsphase sowie Dauer der Gesamtwachstumsphase (Mittelwert +/- Standardabweichung) für die Jahre 2018 bis 2020 im Mittel aller Bäume und Standorte

Jahr	n	Hauptwachstumsphase			Gesamtwachstumsphase
		Beginn (Jahrestag)	Ende (Jahrestag)	Dauer (Tage)	Dauer (Tage)
2018	29	114 ± 8	150 ± 9	36 ± 15	72 ± 30
2019	26	122 ± 11	176 ± 21	54 ± 28	109 ± 57
2020	24	118 ± 11	165 ± 15	48 ± 22	96 ± 44
Mittel		118 ± 3	164 ± 11	46 ± 8	92 ± 15

Klar zu ersehen ist, dass das Ende der Hauptwachstumsphase deutlich stärker von den Bedingungen in den einzelnen Jahren abhängt im Vergleich zum Beginn der Hauptwachstumsphase, die nur um 8 Tage innerhalb der drei Jahre schwankt. Das Ende der Hauptwachstumsphase ist im Jahr 2018 sehr früh am 150. Jahrestag, während im Jahr 2019 die Hauptwachstumsphase 26 Tage später am 176. Jahrestag endet. Dementsprechend dauert die Hauptwachstumszeit 2019 54 Tage, 2018 dagegen nur 36 Tage. Die Gesamtwachstumsphase zeigt ein ähnliches Bild wie die Hauptwachstumsphase, ist jedoch im Mittel doppelt so lange.

Betrachtet man die Zeiten getrennt für die zwei Baumarten, erkennt man markante Unterschiede (Abb. 25).

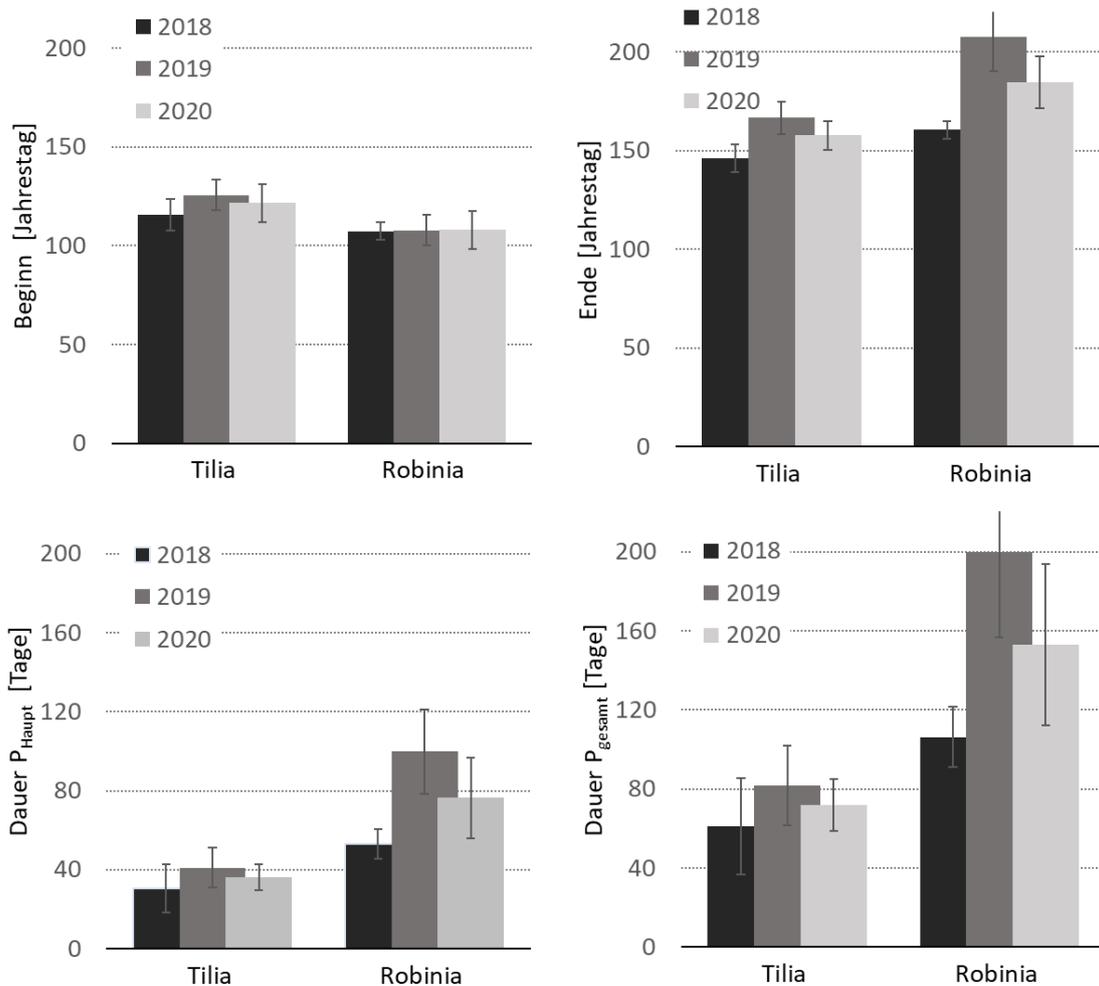


Abb. 25: Beginn (oben links), Ende (oben rechts) und Dauer der Hauptwachstumsphase (unten links) sowie der Gesamtwachstumsphase (unten rechts) des Stammes von Winterlinde und Robinie (Mittelwert +/- Standardabweichung) in den Jahren 2018 bis 2020

Das Hauptwachstum der Robinien beginnt in allen Jahren deutlich früher als das der Winterlinden. Während es bei den Robinien von Jahr zu Jahr nur wenig schwankt (107. – 108. Jahrestag), fängt das Hauptwachstum bei den Winterlinden zwischen dem 116. (2018) und dem 126. Jahrestag (2019) an. Deutlich größere Jahresschwankungen zeigt das Ende der Hauptwachstumsphase, das bei den Robinien in allen Jahren deutlich später endet. Insgesamt führt dies zu einer deutlich längeren Dauer der Hauptwachstumsphase bei Robinien. Im Mittel der drei Jahre dauert sowohl die Hauptwachstumsphase als auch die Gesamtwachstumsphase von Robinien mit 76 bzw. 153 Tagen mehr als doppelt so lange als die der Winterlinden mit 36 bzw. 72 Tagen. Jedoch zeigen sich auch hier von Jahr zu Jahr deutliche Unterschiede.

Auch zwischen den einzelnen Standorten in Würzburg variierten der Beginn, das Ende und die Dauer der Hauptwachstumsphase bzw. die Dauer der Gesamtwachstumsphase (Abb. 26).

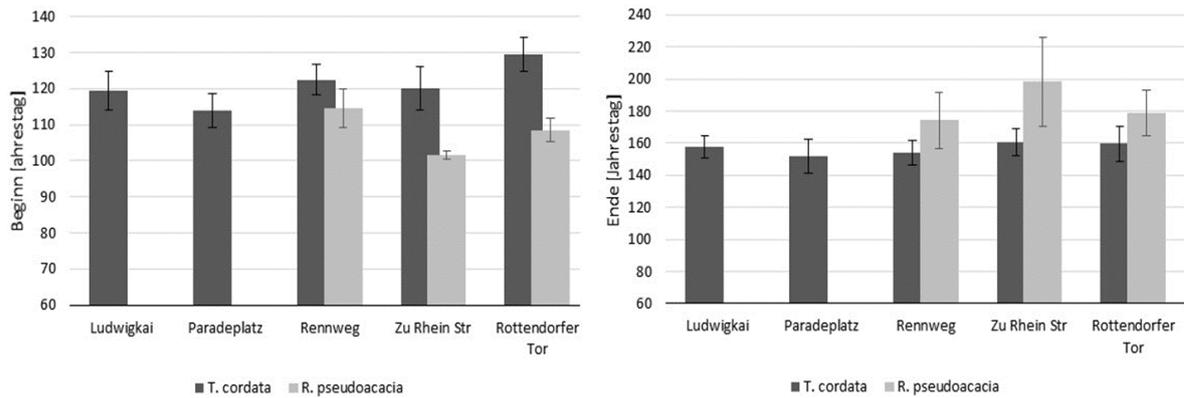


Abb. 26: Beginn (links) und Ende (rechts) der Hauptwachstumsphase (unten links) des Stammes von Winterlinde und Robinie (Mittelwert +/- Standardabweichung) an den einzelnen Standorten im Mittel der Jahre 2018 bis 2020

So liegt beispielsweise der Beginn von P_{Haupt} der Winterlinden zwischen dem 114. Jahrestag am Paradeplatz und dem 130. Jahrestag am Rottendorfer Tor (Tab. 9). Bei Robinien beginnt das Stammwachstum zwischen dem 102. Jahrestag am Standort Zu Rhein-Straße und dem 115. Jahrestag am Standort Rennweg. Das Ende der Hauptwachstumsphase variiert bei Winterlinden um 8 Tage (frühestes Ende Paradeplatz, spätestens Ende Zu Rhein-Straße und Rottendorfer Tor) und bei Robinien um 24 Tage (frühestes Ende Rennweg, spätestens Ende Zu Rhein-Straße).

Tab. 9: Beginn, Ende und Dauer der Hauptwachstumsphase sowie Dauer der Gesamtwachstumsphase (Mittelwert +/- Standardabweichung) an den einzelnen Standorten im Mittel der Jahre 2018 bis 2020

	Ludwigkai	Paradeplatz	Rennweg	Zu Rhein Str	Rottendorfer Tor
<i>Tilia cordata</i>					
Beginn P_{Haupt} [JT]	120 ± 5,5	114 ± 4,7	123 ± 4,1	120 ± 6,0	130 ± 4,7
Ende P_{Haupt} [JT]	158 ± 6,8	152 ± 10,4	154 ± 7,8	160 ± 8,3	160 ± 10,8
Dauer P_{Haupt} [Tage]	38 ± 1,3	38 ± 5,8	31 ± 5,2	40 ± 5,0	30 ± 6,2
Dauer P_{Gesamt} [Tage]	77 ± 2,7	76 ± 11,2	63 ± 10,1	81 ± 10,2	60 ± 12,4
<i>Robinia pseudoacacia</i>					
Beginn P_{Haupt} [JT]			115 ± 5,5	102 ± 1,1	108 ± 3,2
Ende P_{Haupt} [JT]			174 ± 17,5	198 ± 28,0	179 ± 14,4
Dauer P_{Haupt} [Tage]			60 ± 15,3	97 ± 29,1	71 ± 15,0
Dauer P_{Gesamt} [Tage]			120 ± 30,9	193 ± 58,3	141 ± 30,0

Die Haupt- bzw. Gesamtwachstumsphase ist am Standort Rottendorfer Tor mit 30 bzw. 60 Tagen am kürzesten, während sie an der Zu Rhein-Straße mit 40 bzw. 81 Tagen am längsten ist. Auch die Dauer von P_{Haupt} und P_{Gesamt} der Robinien ist mit 97 bzw. 193 Tagen an der Zu Rhein-Straße am längsten, am kürzesten dagegen am Rennweg.

5.2.3. Biomassen

Wie für die Transpirationssummen eines Baumes ist auch für die den Gesamtwuchs eines Baumes seine Dimension entscheidend. Deshalb wurde zunächst die gesamte Biomasse eines jeden Baumes anhand des Biomasse-Moduls aus dem Wachstumsmodell CityTree bestimmt. Abb. 27 zeigt die mittleren Baumbiomassen an jedem Standort vom Beginn der Messungen (Ende des Jahres 2017) bis zum Ende des Jahres 2020.

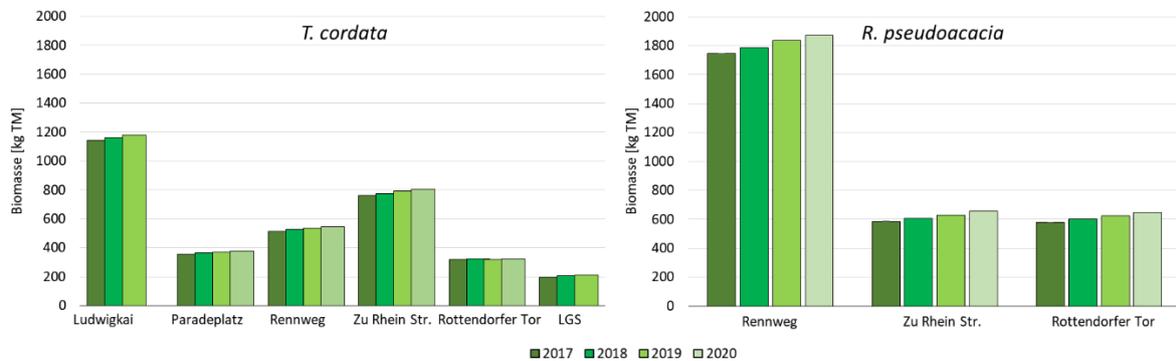


Abb. 27: Mittlere Biomassen der Winterlinden und Robinien am Ende der Jahre 2017 bis 2020 an den Standorten in Würzburg

Hohe Biomassen weisen die Winterlinden am Ludwigkai mit 1.142 kg TM und die Robinien am Rennweg mit durchschnittlich 1.746 kg TM zum Ende des Jahres 2017 auf. Demgegenüber sind die Startbiomassen der Winterlinden an den Standorten Landesgartenschau, Rottendorfer Tor und Paradeplatz mit 196 kg TM, 318 kg TM bzw. 355 kg TM pro Baum deutlich geringer.

Der Zuwachs an Biomasse in den Jahren 2018 bis 2020 kann aus Abb. 27 herausgelesen werden, ist aber deutlicher in Abb. 28 erkennbar.

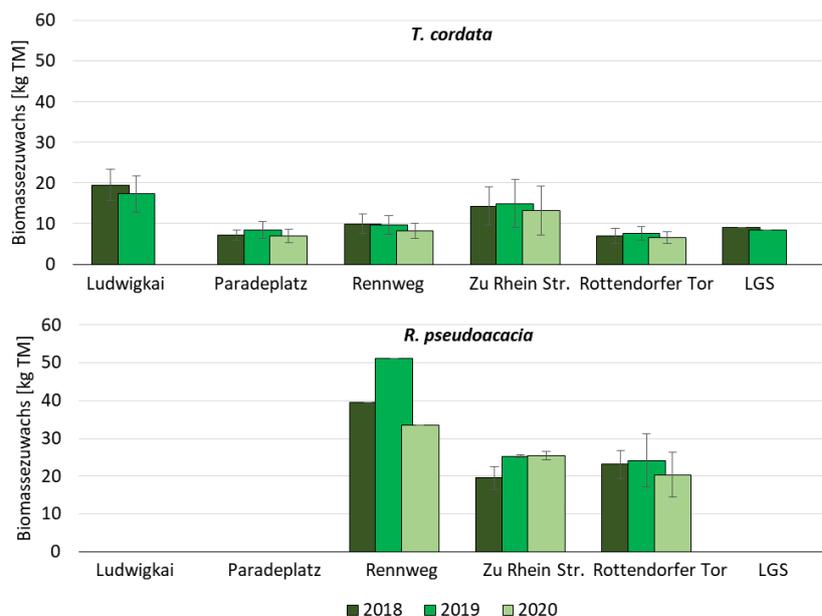


Abb. 28: Mittlere Biomassezuwächse der Winterlinden (oben) und Robinien (unten) in den Jahren 2017 bis 2020 an den Standorten in Würzburg

Hohe, absolute Biomassenzuwächse wurden von den Winterlinden am Ludwigkai und an der Zu Rhein-Straße erreicht. Die geringsten Zuwächse erzielten die Winterlinden am Paradeplatz und am Rottendorfer Tor mit 7,0 kg TM bzw. 6,5 kg TM im Jahr 2020. Auch in den Jahren davor waren die Zuwächse an diesen Standorten nur unwesentlich höher. Deutlich höher fielen dagegen die Zuwächse bei den Robinien aus. In allen Jahren und an allen Standorten war der Biomassezuwachs zum Teil mehr als doppelt so hoch als an den entsprechenden Winterlindenstandorten. So betrug der Zuwachs der Robinien am Standort Zu Rhein-Straße zwischen 19,5 kg TM (2018) und 25,5 kg TM (2020) während der Zuwachs der Winterlinden zwischen 13,2 kg TM (2019) und 15,0 kg TM (2020) lag. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Robinien an diesem Standort deutlich kleiner sind als die Winterlinden (Startbiomassen im Jahr 2017: Robinien 585 kg TM, Winterlinden bei 762 kg TM).

Die über die Jahre gemittelten jährlichen Zuwächse sowie die relativen Zuwächse, die auf die Startbiomassen standardisiert wurden, um die Baumdimension zu eliminieren, zeigt Tab. 10.

Tab. 10: Startbiomassen sowie absolute und relative Zuwächse von Winterlinden und Robinien an den einzelnen Standorten in Würzburg im Mittel der Jahre 2018 bis 2020

Standort	<i>T. cordata</i>			<i>R. pseudoacacia</i>		
	Startbiomasse [kg TM]	jährlicher Zuwachs [kg TM]	relativer Zuwachs [g TM (kg TM) ⁻¹]	Startbiomasse [kg TM]	jährlicher Zuwachs [kg TM]	relativer Zuwachs [g TM (kg TM) ⁻¹]
Ludwigkai	1142	18,4	0,0161			
Paradeplatz	355	7,6	0,0213			
Rennweg	515	9,3	0,0180	1746	41,4	0,0237
Zu Rhein Straße	761	13,8	0,0181	585	23,5	0,0401
Rottendorfer Tor	318	7,1	0,0222	578	22,5	0,0390
Landesgartenschau	196	8,7	0,0446			
Mittelwert	548	10,8	0,0234	970	29,1	0,0343

Robinien weisen an allen Standorten im Mittel über die drei Jahre ein deutlich höheres Wachstum auf als Winterlinden. So ergibt sich im Durchschnitt aller Standorte ein jährlicher Biomassezuwachs bei den Winterlinden von 10,8 kg TM. Der mittlere Zuwachs der Robinien war mit 29,1 kg TM um 170 % höher. Dies liegt zu einem Teil daran, dass die Robinien im Schnitt deutlich größer waren (970 kg vs. 548 kg). Die relativen Zuwächse von 0,0234 g pro kg Biomasse bei den Winterlinden und 0,0343 g pro kg Biomasse bei den Robinien zeigen jedoch, dass auch nach Eliminierung der Baumdimension Robinien am Standort Würzburg unter den trocken-heißen Bedingungen der Jahre 2018 bis 2020 ein um 47 % höheres Wachstum besitzen im Vergleich zu den Winterlinden.

5.2.4. Bodenfeuchte und Transpiration

Aus den Bodenfeuchtedaten der Jahre 2018 bis 2020 ist ersichtlich, dass 2018 das trockenste Jahr war, gefolgt von 2019 und 2020, wie dies bereits aus den meteorologischen Daten hervorgegangen ist. Die Bodenfeuchtedaten zeigten eine enge Kopplung mit den Niederschlagsdaten. Im Mittel war der Bodenfeuchtegehalt unter den Baumkronen von Robinien etwas höher war als bei Winterlinden. Dies könnte mit der höheren Transpirationsleistung

von Winterlinde im Vergleich zu Robinie zusammenhängen sowie mit der größeren Interzeption des Niederschlags durch das Laub der Winterlinden. Darüber hinaus zeigten auch die verschiedenen Standorte signifikante Unterschiede. Insbesondere Bäume, die auf Standorten mit begrenztem Wurzelraum gepflanzt wurden, wie z.B. Paradeplatz, Rennweg (Winterlinde), Zu Rhein-Straße (Winterlinde), Rottendorfer Tor (Winterlinde) zeigten sehr niedrige Bodenfeuchtegehalte, während der Wachstumsperioden von Mai bis Oktober. Dieser Trend ist in dem trockenem-heißem Jahr 2018 deutlicher sichtbar im Vergleich zu einem Jahr wie 2020. Exemplarisch ist dies in Abb. 29 für den Standort Rennweg dargestellt.

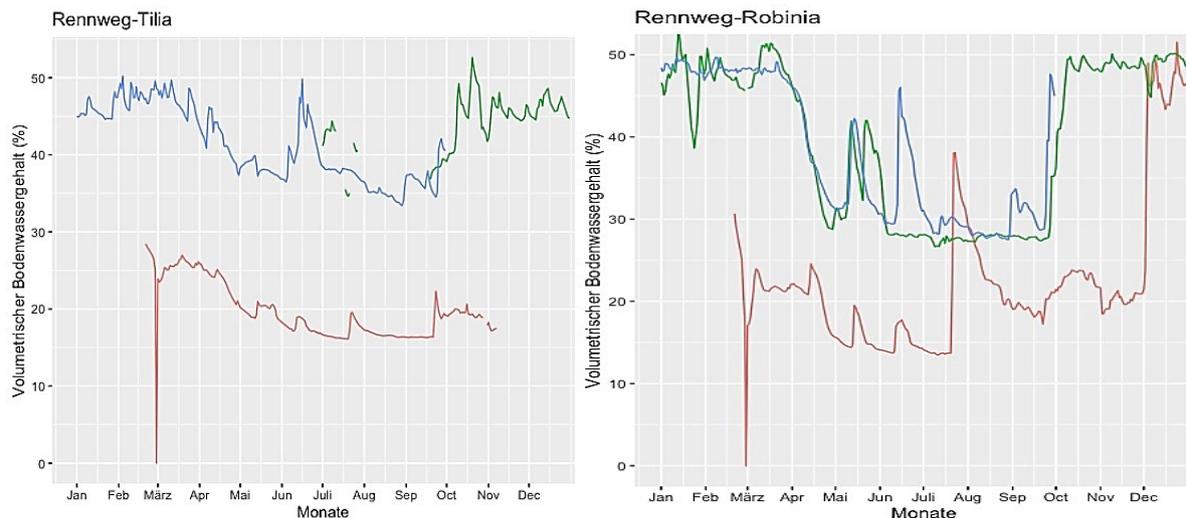


Abb. 29: Durchschnittliche Bodenfeuchte am Rennweg in Würzburg für 2018 (rot), 2019 (grün) und 2020 (blau) für Winterlinden (links) und Robinien (rechts)

Insgesamt zeigten Winterlinden mit einer diffus porösen Holzanatomie und einer größeren wasserleitenden Fläche eine signifikant höhere Transpiration als die ringporige Robinie mit einer geringeren wasserleitenden Holzfläche, da der Saftfluss (Gesamttranspiration) eines Baumes das Produkt von Saftflussdichte, d.h. der Geschwindigkeit, mit der Wasser von den Wurzeln zum Blatt fließt, und Saftholzfläche ist. Aufgrund des Kontakts der Sonden mit inaktivem Xylem (saftleitendes Gewebe) kann der gemessene Saftfluss jedoch weniger als 50% des tatsächlichen Wertes betragen. Deshalb wurden die Berechnungen der Splintholzfläche für die Bestimmung der Transpiration nach Berdanier et al. (2016) und Paudel et al. (2013) im Januar 2021 neu kalibriert.

Die größeren Winterlinden am Ludwigkai wiesen im Vergleich zu den anderen Standorten die höchste Verdunstung auf. Auch bei den Robinien war die Verdunstungsleistung der größeren Bäume am Rennweg und an der Zu Rhein-Straße höher als bei den jüngeren Bäumen am Rottendorfer Tor. Die Verfügbarkeit eines größeren Bodenvolumens (weniger versiegelte Flächen), atmosphärische Trockenheit und das Pflanzschema hatten ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Transpiration der Bäume. Zum Beispiel waren die Winterlinden aufgrund einer höheren Lufttemperatur und einer niedrigeren relativen Luftfeuchtigkeit am Paradeplatz einem höheren Dampfdruckdefizit ausgesetzt was normalerweise zu einer höheren Transpiration führt. Die Verdunstung war jedoch durch die geringere Verfügbarkeit von Bo-

denfeuchte begrenzt. Am Rottendorfer Tor hingegen waren die Winterlinden als Gruppe zusammen gepflanzt und konkurrierten daher um Wasser, was zu geringeren Verdunstungsleistungen und Wachstum führt. Ebenso zeigten die Robinien an der Zu Rhein-Straße oder am Rottendorfer Tor eine geringere Verdunstung gegenüber den Bäumen auf vergleichsweise größeren Freiflächen wie am Rennweg (Abb. 30 exemplarisch für Rennweg).

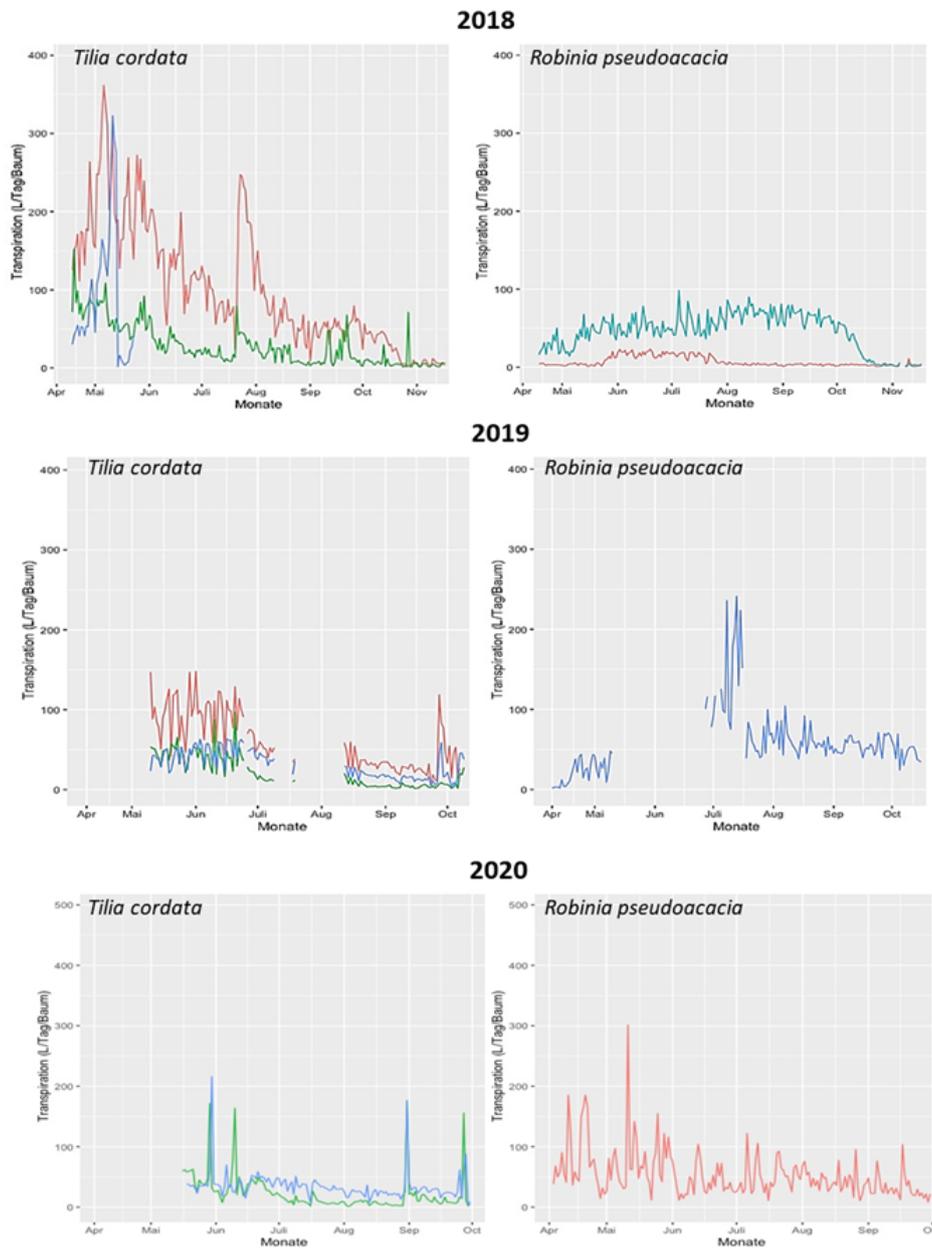


Abb. 30: Transpiration von Winterlinden (links) und Robinien (rechts) am Rennweg in Würzburg für die Jahre 2018 (oben), 2019 (Mitte) und 2020 (unten); fehlende Daten beruhen auf technischen Problemen.

Aufsummiert für die einzelnen Jahre liegen die Transpirationssummen der Winterlinden zwischen $3,7 \text{ m}^3$ (Landesgartenschau 2019) und $30,9 \text{ m}^3$ (Ludwigkai 2020), während Robinien zwischen $5,7 \text{ m}^3$ (Rottendorfer Tor 2020) und $13,2 \text{ m}^3$ (Rennweg 2019) verdunsteten (Abb. 31).

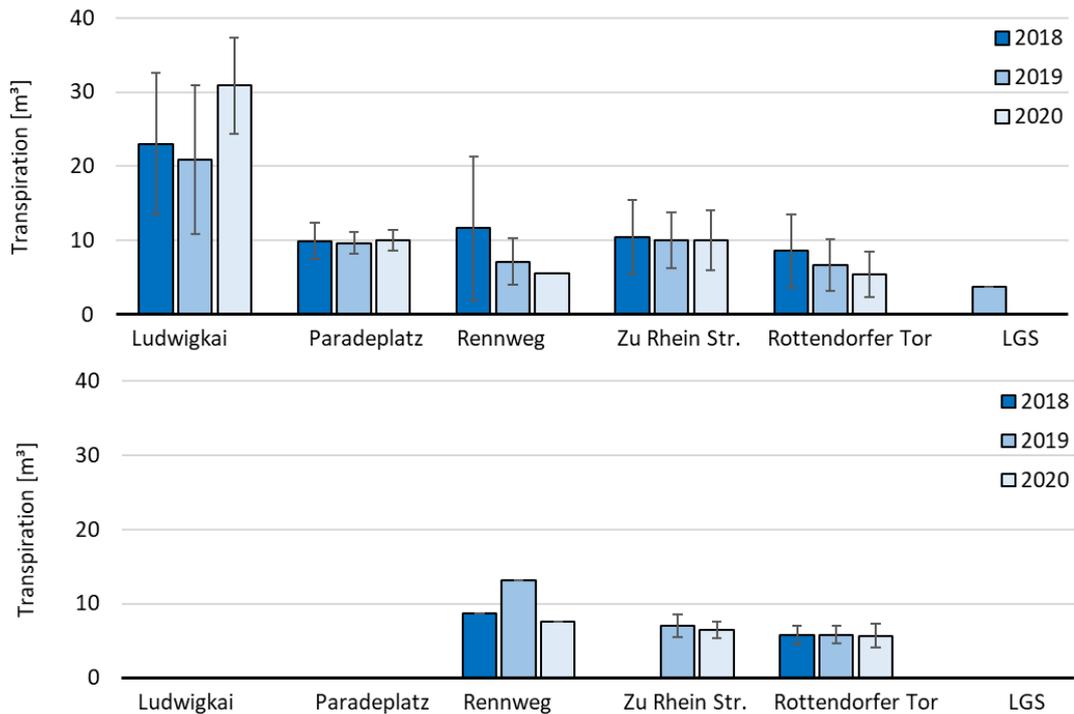


Abb. 31: Jahressummen der Transpiration von Winterlinden (oben) und Robinien (unten) (Mittel +/- Standardabweichung) an den einzelnen Standorten in Würzburg in den Jahren 2018 bis 2019

Klar ersichtlich ist, dass die Transpiration von der Größe der Bäume und dem Vorhandensein von Bodenwasservorrat geprägt wird. Die hohen Transpirationssummen der Winterlinden am Ludwigkai sind hierfür ein gutes Beispiel. Aber auch die deutlich größeren Robinien am Rennweg im Vergleich zu den Robinien an der Zu Rhein-Straße und am Rottenburger Tor verdunsten deutlich mehr, d.h. hier werden die mikroklimatischen Einflüsse auf den Wasserverbrauch der Bäume deutlich von der Baumart, der Baumdimension und den Bodenwasserspeichervermögen überlagert.

Gemittelt über alle Standorte Würzburgs (Abb. 32) ergeben sich Verdunstungssummen für die Winterlinden von 13,0 m³ im Jahr 2018, 11,1 m³ im Jahr 2019 und 11,7 m³ im Jahr 2020. Mit 6,5 m³, 6,3 m³ und 6,4 m³ liegt die Transpiration der Robinien sehr deutlich unter den Werten der Winterlinden. Während bei Winterlinden starke Schwankungen von Jahr zu Jahr sichtbar sind (maximale Differenz: 1,9 m³), liegen die Verdunstungssummen der Robinien in allen Jahren nahezu gleichauf (maximale Differenz: 0,2 m³).

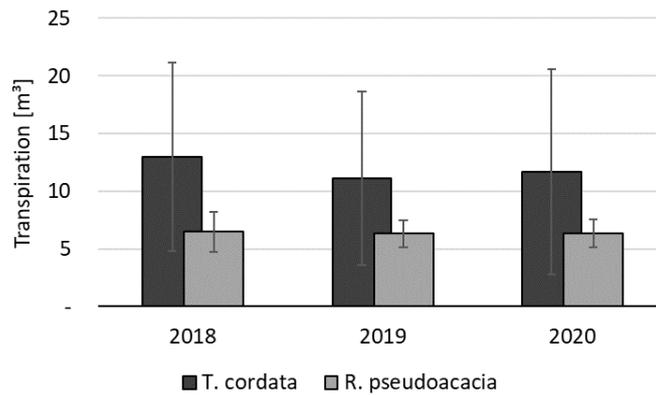


Abb. 32: Jahressummen der Transpiration von Winterlinden und Robinien in Würzburg für die Jahre 2018 bis 2019) (Mittel +/- Standardabweichung)

5.2.5. Ökosystemleistungen

Auf Basis der kontinuierlichen Messungen über die Jahre 2018 bis 2020 konnten mit Hilfe eines Moduls des CityTree-Modells (Rötzer et al., 2019) die mittleren jährlichen Ökosystemleistungen CO₂-Fixierung, Wasserverbrauch, Sauerstofffreisetzung und Kühlleistung quantifiziert werden (Tab. 11).

Tab. 11: Ökosystemleistungen der Winterlinden (Mittelwert +/- Standardabweichung) an den einzelnen Standorten im Mittel der Jahre 2018 bis 2020

Standort	CO ₂ Fixierung [kg CO ₂]			Wasserverbrauch [m ³]			O ₂ Freisetzung [L]			Kühlleistung [W m ⁻²]		
	n	Mittel	sa	n	Mittel	sa	n	Mittel	sa	n	Mittel	sa
Ludwigkai	10	33,7	± 7,5	12	23,5	± 9,3	10	18759	± 4172	12	19,4	± 4,9
Paradeplatz	15	13,9	± 3,2	14	9,8	± 1,7	15	7706	± 1753	14	9,9	± 2,3
Rennweg	9	17,0	± 3,8	5	8,6	± 5,8	9	9458	± 2125	5	8,3	± 5,0
Zu Rhein Straße	9	25,3	± 9,6	9	8,7	± 2,5	9	14041	± 5326	9	13,1	± 4,5
Rottendorfer Tor	13	12,9	± 2,9	13	7,1	± 3,9	13	7191	± 1639	11	17,1	± 10,4
Landesgartenschau	2	16,0	± 1,0	1	3,7	± 0,0	2	8904	± 578	1	7,2	± 0,0
Mittelwerte	58	19,8	± 7,4	54	10,2	± 6,2	58	11010	± 4115	52	12,5	± 4,5

Winterlinden an Standorten wie Ludwigkai oder Zu Rhein-Straße mit hohen CO₂-Fixierungsraten (33,7 bzw. 25,3 kg CO₂ pro Jahr) zeigen auch hohe Sauerstofffreisetzungsraten von 18.759 bzw. 14.041 L O₂ pro Jahr. Sehr niedrige Werte sind am hoch versiegelten Paradeplatz und bei den jungen Winterlinden am Rottendorfer Tor mit Fixierungsraten von 13,9 und 12,9 kg CO₂ pro Jahr bzw. Freisetzungsraten von 7.706 bzw. 7.191 L O₂ pro Jahr zu finden.

Auch der Wasserverbrauch und die Kühlleistung sind am Standort Ludwigkai mit 23,5 m³ Verdunstung und 19,4 W m⁻² Kühlleistung am größten. Die niedrigsten Verdunstungssummen hingegen verzeichnen die Winterlinden an den Standorten Landesgartenschau und Rottendorfer Tor mit 3,7 und 7,1 m³. Die niedrigsten Kühlleistungen der Winterlinden findet man am Standort Landesgartenschau mit 7,2 W m⁻² und am Rennweg mit 8,3 W m⁻².

Im Vergleich zu den Winterlinden liegen die CO₂-Fixierungsraten und Sauerstofffreisetzungsraten der Robinien an allen Standorten markant höher (Tab. 11 und Tab. 12), während der Wasserverbrauch und die Kühlleistung unter den Werten der Winterlinden liegen.

Tab. 12: Ökosystemleistungen der Robinien (Mittelwert +/- Standardabweichung) an den einzelnen Standorten im Mittel der Jahre 2018 bis 2020

Standort	CO ₂ Fixierung [kg CO ₂]			Wasserverbrauch [m ³]			O ₂ Freisetzung [L]			Kühlleistung [W m ⁻²]		
	n	Mittel	sa	n	Mittel	sa	n	Mittel	sa	n	Mittel	sa
Rennweg	3	75,9	± 16,5	3	9,8	± 3,0	3	42182	± 9158	3	12,9	± 2,4
Zu Rhein Straße	6	43,0	± 6,1	4	6,7	± 1,1	6	23907	± 3417	4	9,1	± 0,6
Rottendorfer Tor	9	41,3	± 9,6	8	5,8	± 1,1	9	22975	± 5316	8	7,9	± 1,0
Mittelwerte	18	53,4	± 15,9	15	7,4	± 1,7	18	29688	± 8843	15	10,0	± 2,1

So beträgt im Mittel über alle Standorte die CO₂-Fixierungsrate bei Robinien 53,4 kg CO₂ pro Jahr, die der Winterlinden lediglich 19,8 kg CO₂ pro Jahr. Auch die mittleren Sauerstofffreisetzungsraten der Robinien zeigen mit 29.688 L O₂ pro Jahr klar höhere Werte als die der Winterlinden mit 11.010 L O₂ pro Jahr. Umgekehrt verdunsten die Robinien im Durchschnitt alle Standorte und aller Jahre 7,4 m³ Wasser, die Winterlinden hingegen 10,2 m³. Demzufolge ist die Kühlleistung der Robinien mit 10 W m⁻² geringer als die der Winterlinden mit 12,5 W m⁻².

5.2.6. Hochskalieren der Ökosystemleistungen auf Platzebene

Um die Ökosystemleistungen des Grünbestands eines gesamten Platzes zu quantifizieren, d.h. vom Einzelbaum auf eine größere Fläche hochzuskalieren, muss zunächst der gesamte Baumbestand eines Platzes vermessen werden. Dann können mit Hilfe des Modells CityTree (Rötzer et al., 2019) das Wachstum und die Ökosystemleistungen aller Einzelbäume simuliert und auf Platzebene hochgerechnet werden.

Im Rahmen einer Masterarbeit (Hammel, 2019) wurden 2019 alle 28 Bäume auf dem Paradeplatz vermessen. Dieser Platz liegt östlich des St. Kiliansdoms in der Altstadt von Würzburg und ist von Gebäuden mit verschiedenen Nutzungen umgeben. Der Platz wird als Parkplatz genutzt und hat eine Fläche von 5.200 m² (Abb. 33).



Abb. 33: Lage des Paradeplatzes in der Altstadt von Würzburg und Luftbild des Paradeplatzes

Die Charakteristika der 28 Winterlinden auf dem Paradeplatz sind in Tab. 13 zusammengefasst. Eine genaue Beschreibung der Einzelbäume ist in Hammel (2019) zu finden.

Tab. 13: Mittlere Kennwerte der Winterlinden am Paradeplatz in Würzburg (Stand 2019)

Parameter	Mittelwert	Minimum	Maximum
Alter [Jahre]	44	28	60
Durchmesser [cm]	33.1	20.2	45.5
Höhe [m]	13.2	9.0	18.0
Kronendurchmesser [m]	8.1	5.0	11.0
versiegelte Fläche [%]	90	80	97

Anhand des Modells CityTree wurden im nächsten Schritt das Wachstum und die Ökosystemleistungen aller Bäume des Paradeplatzes sowohl für das langjährige Mittel (1965-2015) als auch für das Trockenjahr 2018 simuliert. Neben dem Biomassezuwachs, der CO₂-Speicherung, des Wasserverbrauchs und der Verschattung wurde auch die Kühlung durch Transpiration berechnet. Diese kann auch als Abkühlung in Kelvin pro Stunde für ein gegebenes Volumen berechnet werden. Als Basis dient der für die Transpiration erforderliche Durchschnittswert der Kühlungsleistung aller 28 Bäume. Nach Kuchling (2014) kann die Abkühlung Q folgendermaßen berechnet werden:

$$Q = m_{Luft} \cdot c \cdot \Delta T$$

Für die Wärmekapazität c der Luft wird ein Wert von $1.03 \text{ kJ} \cdot (\text{kg K})^{-1}$ angenommen. Die zu erwärmende Luftmasse m_{Luft} ergibt sich aus:

$$m_{Luft} = A_{Platz} \cdot h \cdot \rho_{Luft}$$

Der Paradeplatz hat eine Fläche von 5.200 m^2 , als Höhe h wird die mittlere Baumhöhe von 13.2 m angenommen. Die Luftdichte ρ_{Luft} beträgt 1.2 kg m^{-3} .

Da die Transpiration nur tagsüber und während der Vegetationsperiode erfolgt, wird angenommen, dass die für die Transpiration benötigte Energie nur in der 180 Tage andauernden Vegetationsperiode entzogen wird. Außerdem gilt die Annahme einer mittleren Tageslänge von 14 Stunden. Somit ergibt sich:

$$\Delta Q = \frac{\Delta Q_{Transp}}{180 \text{ d} \cdot 14 \text{ h}}$$

Die Gesamtformel für die mittlere Abkühlung in der Vegetationszeit in K h^{-1} des Platzes lautet demnach:

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{m_{Luft} \cdot c} \cdot \frac{1}{Tage_{Vegetation} \cdot Std_{Tag}} = \frac{\Delta Q}{A_{Platz} \cdot h \cdot \rho \cdot c} \cdot \frac{1}{180 \cdot 14}$$

Für den mittleren klimatischen Zeitraum sowie für das Trockenjahr 2018 ergeben sich die in Tab. 14 dargestellten Ökosystemleistungen aller Bäume am Paradeplatz.

Tab. 14: Bestandsbiomasse, Wachstum und Ökosystemleistungen aller Bäume am Paradeplatz.

Parameter	1965-2015	2018
Gesamte Biomasse [t TM]	11,17	11,17
Jährlicher Zuwachs [kg TM pro Jahr]	95,9	75,9
CO ₂ -Fixierung [kg CO ₂ pro Jahr]	345	304
Wasserverbrauch [m ³ pro Jahr]	288	262
Verschattete Fläche (Mitte Juni) [m ²]	2574	2574
Kühlleistung durch Transpiration [W m ⁻²]	15,1	13,7
Kühlung des Platzes [K pro Stunde]	3,2	2,9

Die gesamte Biomasse der 28 Winterlinden beträgt 11,2 t. Im langjährigen Mittel nimmt die Biomasse um 96 kg zu, während der Zuwachs im Trockenjahr 2018 nur bei 76 kg lag. Das sind 21% weniger. Die CO₂-Fixierungsrate ist im Trockenjahr um 12 % verringert.

Die beschattete Fläche des gesamten Baumbestandes beträgt zum Stichtag am 21. Juni 2.574 m².

Der Verdunstung der Bäume liegt im Mittel bei 288 m³ Wasser, im Trockenjahr dagegen nur bei 262 m³, wodurch die Kühlleistung durch Transpiration von 15,1 W m⁻² auf 13,7 W m⁻² absinkt. Die Kühlung des gesamten Platzes durch die Transpiration der Bäume verringert sich damit von 3,2 K h⁻¹ im langjährigen Mittel auf 2,9 K h⁻¹ im Trockenjahr 2018.

Zusammenfassung

Der Jahreszuwachs im Mittel der Jahre 2018-2020 ist bei Robinien deutlich höher als bei Winterlinden. Letztere zeigten im Jahr 2020 den geringsten Jahreszuwachs, evtl. auch bedingt durch die trockenen Vorjahre. Im Mittel der Jahre ist der Grundflächenzuwachs des Stammes der Robinien mehr als dreimal so hoch wie der der Winterlinden. Ein hoher Einfluss des Standorts auf den Zuwachs sowohl der Winterlinden als auch der Robinien wurde sichtbar.

Standorte mit einer guten Wasserversorgung des Wurzelraums (z. B. Ludwigkai) und/oder Standorte mit wenig Oberflächenversiegelung (z. B. Zu Rheinstraße, Landesgartenschau) zeigten hohe Biomassezuwächse. An diesen Standorten überstanden die Bäume die drei Trockenjahre am besten. Die Wachstumsreaktionen von Stadtbäumen während der trocken-warmen Jahre von 2018 bis 2020 liefern damit vor allem im Hinblick auf den Klimawandel mit künftig vermehrten und stärkeren Trockenperioden wertvolle Erkenntnisse.

Der Beginn des Wachstums des Stammes schwankt nur sehr gering von Jahr zu Jahr, während das Ende des Stammwachstums deutlich stärker von den Bedingungen in den einzelnen Jahren abhängt. Zwischen den Baumarten Winterlinde und Robinie erkennt man markante Unterschiede. Das Stammwachstum der Robinien begann in allen Jahren deutlich früher als das der Winterlinden. Auch die Dauer des Stammwachstums ist bei Robinien im Mittel der drei Jahre mehr als doppelt so lange wie das der Winterlinden. Interessant ist, dass die Baumart Winterlinde, deren Blattaustrieb deutlich früher ist als der der Robinie, einen späteren Beginn des Stammwachstums zeigt als die Robinie. Während also bei der

Robinie zunächst die Leitungsbahnen gebildet werden (Stammwachstum), bildet die Winterlinde zunächst die Blätter aus.

Die Biomassenzuwächse sind neben der Baumart vor allem von den Standortbedingungen und der Baumdimensionen, d.h. dem Baumalter geprägt. Der Biomassezuwachs der Robinien ist zum Teil mehr als doppelt so hoch als der der Winterlinden. Auch wenn die Zuwächse auf die Trockenmasse eines jeden Baumes standardisiert werden, zeigen die Robinien ein deutlich höheres Wachstum auf als die Winterlinden. Unter den trocken-heißen Bedingungen der Jahre 2018 bis 2020 war der Zuwachs der Robinien um 47 % höher als der der Winterlinden.

Die Transpiration der Robinien liegt deutlich unter den Werten der Winterlinden. Während bei Winterlinden starke Schwankungen von Jahr zu Jahr sichtbar sind, liegen die Verdunstungssummen der Robinien in allen Jahren nahezu gleichauf. Der Bodenfeuchtegehalt unter den Baumkronen von Robinien war höher als unter den Winterlinden, was mit den unterschiedlichen Transpirationsleistungen sowie mit der größeren Interzeption des Niederschlags durch das Laub der Winterlinden zusammenhängt. Die Größe der versiegelten Flächen, die Größe des Bodenwasserspeichers, das Pflanzschema aber auch Art und Dimension des Baumes spielen eine tragende Rolle für die Höhe der Transpiration. Die Untersuchungen zeigten, dass die mikroklimatischen Einflüsse auf den Wasserverbrauch der Bäume deutlich von der Baumart, der Baumdimension und den Bodenwasserspeichervermögen überlagert wurden.

Die quantifizierten, mittleren jährlichen Ökosystemleistungen CO₂-Fixierung, Wasserverbrauch, Sauerstofffreisetzung und Kühlleistung zeigen deutliche Standortunterschiede. Standorte mit guter Wasserversorgung, d.h. mit geringen Bodenversiegelungsgrad und/oder großem durchwurzelbaren Bodenvolumen zusammen mit hoher Wasserspeicherkapazität, führen zu größeren Wachstumsraten und höheren Transpirationsraten, wodurch sich die CO₂-Fixierung, die Sauerstofffreisetzung und die Kühlleistung ebenfalls erhöht. Zudem wird die Quantität der Ökosystemleistungen deutlich von der Baumart geprägt. Während das Wachstum, die CO₂-Fixierung und die Sauerstofffreisetzung bei Robinien höher sind als bei Winterlinden, sind der Wasserverbrauch und die Kühlleistung bei den Winterlinden höher.

In einem ersten Ansatz wurde gezeigt, dass es mit dem Modell CityTree möglich ist, Wachstum und Ökosystemleistungen vom Einzelbaum auf Platzebene hochzuskalieren. Hierbei zeigt sich, dass z. B. die Bäume am Paradeplatz 11,2 Tonnen Biomasse speichern, maximal 2.574 m² beschatten und 13,7 W m⁻² kühlen.

5.3. Mikroklima und Stadtgrün

5.3.1. Baumwachstum und Wasserhaushalt

Die Wasserverfügbarkeit für die Verdunstung der Bäume ist elementar für deren Wachstum, insbesondere in Zeiten von Trockenheiten. Dies zeigen die Abb. 34 und Abb. 35 sehr eindrucksvoll. In allen drei Jahren steigt der Biomassezuwachs der Winterlinden zwischen 0,50 kg TM (2018) und 0,88 kg TM (2020) pro verdunsteten m³ Wasser an, bei den Robinien ist der Anstieg mit Werten zwischen 2,24 kg TM (2020) und 3,62 kg TM (2019) pro m³ Wasserverbrauch deutlich steiler.

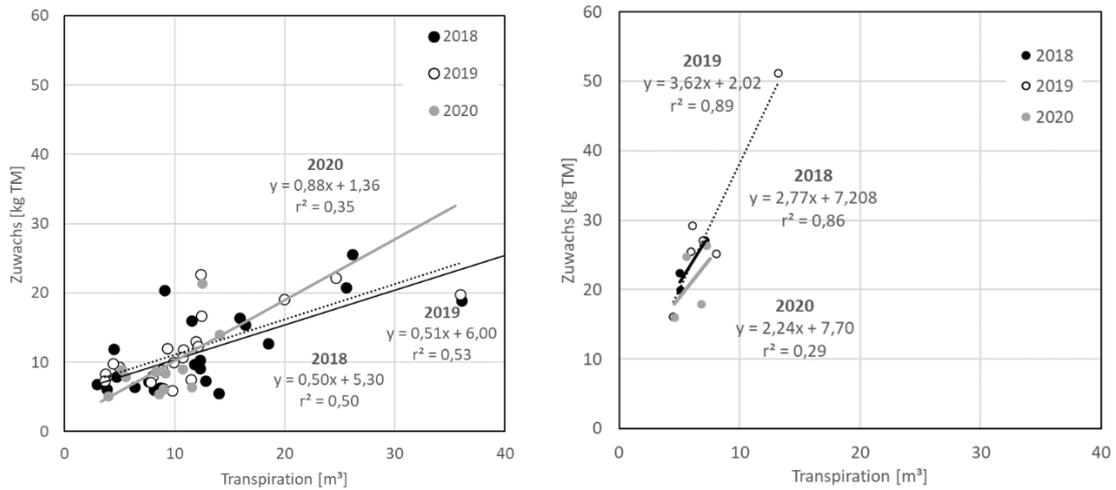


Abb. 34: Zusammenhang mittlerer Biomassezuwachs und Transpiration von Winterlinden (links) und Robinien (rechts) für die Jahre 2018 bis 2020 in Würzburg

Im Mittel der Jahre 2018 bis 2020 ergibt sich für Winterlinden eine Steigerung des Biomassezuwachses von 0,53 kg TM pro m³ Wasserverbrauch. Für Robinien erhöht sich der Zuwachs um 3,58 kg TM pro m³ Wasserverbrauch, was einem 6,8-fachen Zuwachs pro m³ Wasserverbrauch der Winterlinden entspricht (Abb. 35).

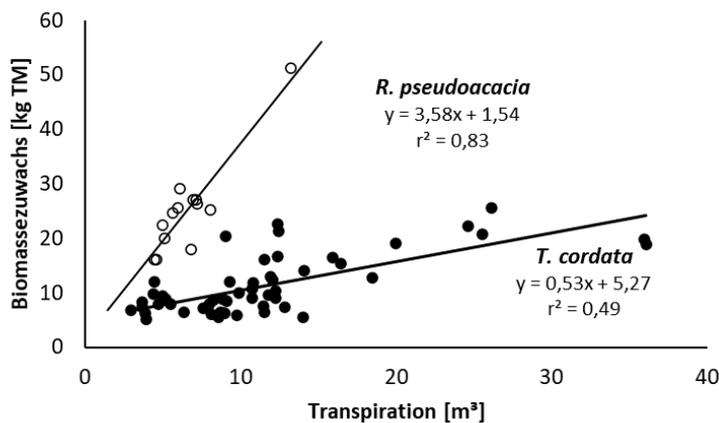


Abb. 35: Zusammenhang Biomassezuwachs und Transpiration von Winterlinden und Robinien im Zeitraum 2018 bis 2020 in Würzburg

Setzt man den Zuwachs und den Wasserverbrauch ins Verhältnis, erhält man die Wassernutzungseffizienz (Tab. 15).

Tab. 15: Wassernutzungseffizienz [kg TM (kg H₂O)⁻¹] von Winterlinden und Robinien (Mittelwert +/- Standardabweichung sa) an den einzelnen Standorten im Mittel der Jahre 2018 bis 2020

Standort	T. cordata			R. pseudoacacia		
	n	Mittel	sa	n	Mittel	sa
Ludwigkai	10	0,9 ± 0,3				
Paradeplatz	14	0,8 ± 0,2				
Rennweg	5	1,4 ± 0,5				
Zu-Rhein-Straße	9	1,7 ± 0,5		1	3,9 ± 0,0	
Rottendorfer Tor	11	1,2 ± 0,6		4	3,9 ± 0,6	
Landesgartenschau	1	2,3 ± 0,0		8	3,8 ± 0,6	
Mittelwerte	50	1,4 ± 0,5		13	3,9 ± 0,0	

Im Mittel der drei Jahre schwankt die Wassernutzungseffizienz der Winterlinden zwischen 0,8 kg TM (kg H₂O)⁻¹ (Paradeplatz) und 2,3 kg TM (kg H₂O)⁻¹ (Landesgartenschau). Dies bedeutet, dass die Winterlinden des hochversiegelten Platzes in der Innenstadt Würzburgs um ca. 65 % weniger effizient sind als die freistehende Winterlinde mit einer geringen Bodenversiegelung am Rande von Würzburg.

Robinien zeigen nur geringe Standortunterschiede in der Wassernutzungseffizienz. Gegenüber den Winterlinden, deren durchschnittliche Wassernutzungseffizienz bei 1,4 kg TM (kg H₂O)⁻¹ liegt, sind Robinien mit im Durchschnitt 3,9 kg TM (kg H₂O)⁻¹ deutlich effizienter.

5.3.2. Temperatur und Wachstumsphasen

Während die Höhe des Zuwachses eng mit der Wasserversorgung des Baumes verknüpft ist (siehe oben), ergaben sich keine signifikanten Abhängigkeiten zwischen den Biomassezuwächsen und der Temperatur (Monatstemperaturen, Temperaturen der Jahreszeiten bzw. der Vegetationszeit). Für die Phänologie des Stammwachstums (siehe Kapitel 5.3.2) konnten jedoch klare Abhängigkeiten gefunden werden.

Zunächst wurden Temperatursummen bis zum Beginn der Hauptwachstumsphase des Stammes gebildet, um zu sehen ob zwischen Winterlinden und Robinien ein signifikanter Unterschied in der nötigen Temperatursumme für den Beginn des Stammwachstums vorhanden ist. Hierzu wurde die Grünlandtemperatursumme nach Ernst & Loeper (1976) berechnet, die die Summe aller positiven Tagesmittelwerte seit dem 1. Januar des jeweiligen Jahres darstellt. Dabei findet eine unterschiedliche Gewichtung der Wintermonate statt. Die positiven Tagesmittel des Januars werden mit dem Faktor 0,5 gewichtet, die positiven Tagesmittel des Februars hingegen mit dem Faktor 0,75. Alle Werte ab dem 1. März fließen mit dem Faktor 1 in die Berechnung ein.

Der Beginn der Hauptwachstumsphase der Robinie ist im Schnitt um 13,2 Tage früher als der der Winterlinde. Die dafür erforderliche Temperatursumme beträgt für die Robinie über alle Standorte gemittelt ca. 547 °C. Für die Winterlinde wurden 719 °C berechnet. Der Unterschied der Temperatursummen der zwei Baumarten zeigt sich dabei in den statistischen Tests signifikant. Somit ist mit steigenden Temperaturen im Zuge der prognostizierten Klimaänderungen – wie z. B. der bayerische Klimareport zeigt (StMUV, 2021) - auch ein früherer Beginn der Hauptwachstumsphase möglich.

Stellt man den mittleren Temperaturen einzelner oder mehrerer Monate den Beginn bzw. das Ende der Hauptwachstumsphase der Winterlinden gegenüber, ergibt sich der stärkste Zusammenhang für die Monatsmittelwerte von März bis Mai (Abb. 36).

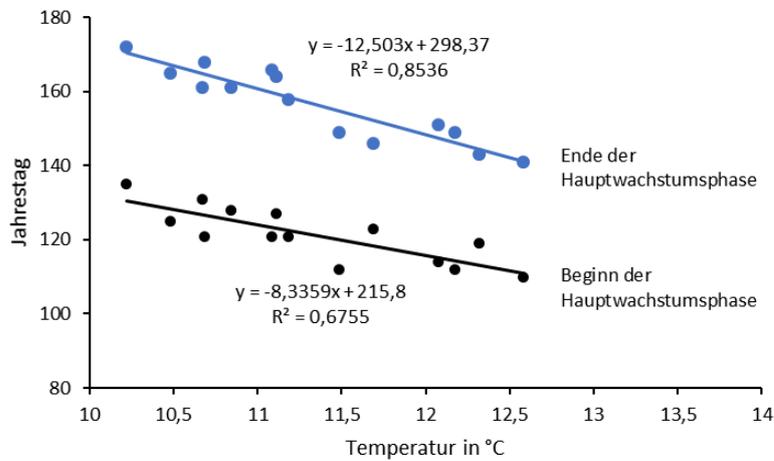


Abb. 36: Mittlerer Beginn und Ende der Hauptwachstumsphase von Winterlinden an den Standorten in Würzburg für die Jahre 2018 bis 2020 in Abhängigkeit der mittleren Temperaturen von März bis Mai

Aus der Regressionsgeraden kann abgeleitet werden, dass der Beginn der Hauptwachstumsphase pro 1 °C Temperaturerhöhung in den Monaten März bis Mai zu einem früheren Beginn von 8 Tagen führt. Das Ende der Hauptwachstumsphase verfrüht sich pro 1 °C Temperaturerhöhung in den Monaten März bis Mai um 12 Tage, so dass sich insgesamt die Dauer der Hauptwachstumsphase pro 1 °C Temperaturerhöhung in den Monaten März bis Mai um 4 Tage verkürzt.

Für die Robinien ergibt sich kein so klares Bild, was auch an dem geringen Stichprobenumfang (Standorte/Bäume) liegen kann (Abb. 37).

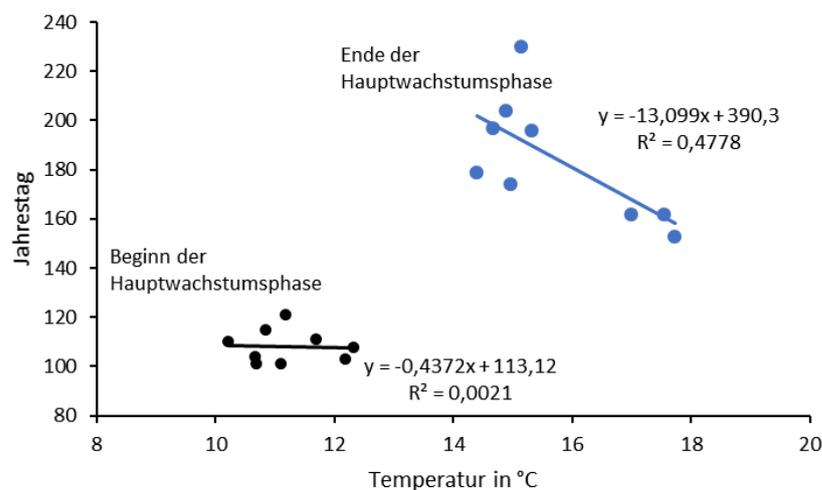


Abb. 37: Mittlerer Beginn und Ende der Hauptwachstumsphase von Robinien an den Standorten in Würzburg für die Jahre 2018 bis 2020 in Abhängigkeit der mittleren Temperaturen von März bis Mai (Beginn) bzw. von April bis Juni (Ende)

Für den Beginn der Hauptwachstumsphase konnte keine Abhängigkeit von den Monatsmitteltemperaturen gefunden werden. Für das Ende der Hauptwachstumsphase ergab sich die stärkste Abhängigkeit von den Mittelwerten der Temperaturen von April bis Juni. Pro 1 °C Temperaturerhöhung im Mittel dieser Monate verfrüht sich das Ende der Hauptwachstumsphase um 13 Tage.

Die Temperaturen in den Frühlings- und Sommermonaten beeinflussen damit die Wachstumszeit des Stammes wesentlich. Zunehmende Temperaturen verkürzen die Hauptwachstumsphasen der Baumarten, womit auch die erbrachten Ökosystemleistungen wie Kühlung und Kohlenstoffspeicherung beeinträchtigt sein können. Unter zukünftigen Klimabedingungen sollte diese Verkürzung der Wachstumszeit beachtet werden.

5.3.3. Transpiration, Abkühlungseffekte und Lufttemperatur

Durch die höhere Transpiration der Bäume bei gleichzeitig dichten Baumkronen der Winterlinden verringerte sich die Lufttemperatur innerhalb der Baumkronen um bis zu 2,8 °C (ΔT), die absolute Luftfeuchtigkeit (ΔAH) erhöhte sich um bis zu 2,6 g m⁻³. Im Vergleich dazu lag die Temperaturdifferenz bei Robinien bei 1,9 ΔT bzw. die Differenz der absoluten Luftfeuchtigkeit bei 1,9 g m⁻³ ΔAH . Die Winterlinden am Ludwigkai zeigten die höchste Reduktion der Lufttemperatur im Kronendach (ΔT). Der Paradeplatz als wärmster Standort zeigte eine vergleichsweise geringe ΔT . Er könnte durch eine höhere Windgeschwindigkeit beeinflusst worden sein, da es hier einen Windkanal parallel zu den Häuserschluchten gibt, der sich bis zum nahen Bodenniveau durchzeichnet. Das höchste ΔAH der Winterlinden am Paradeplatz könnte durch die höchste VPD an der Wetterstation bedingt gewesen sein.

Ökologische Faktoren wie Holzanatomie und Wassernutzungseffizienz verursachen signifikant höhere Geschwindigkeiten der Baumtranspiration (Saftflussdichte) von Winterlinden im Vergleich zu Robinien. Zusammen mit höheren saftleitenden Holzflächen ist die Gesamttranspiration von Winterlinden deutlich höher als die der Robinien. Damit variiert das Abkühlungspotenzial aufgrund der physiologischen Eigenschaften der Bäume aber auch aufgrund der Herkunft der Baumart. Zudem sind der ober- und unterirdische Wuchsraum, die Standortbedingungen einschließlich der mikrometeorologischen Variablen sowie die Geometrie des Raumes entscheidende Parameter für die Quantität des Abkühlungseffekts.

Die Standorte repräsentieren einen Querschnitt durch die Stadt von hoher Bebauungsdichte (Paradeplatz) über moderate Dichte (Rottendorfer Tor) bis hin zu einer Kombination aus bebauter Umgebung und kleinen Parkanlagen (Rennweg), sowie einen Querschnitt von Bäumen mit einem Alter zwischen 35 und 70 Jahren.

Insbesondere Bäume mit dichtbelaubten Kronen können durch hohe Transpirationsraten aber auch durch ihre große Schattendichte für eine deutliche Abkühlung der Lufttemperatur sorgen. Dies wird insbesondere unter künftigen Klimabedingungen wichtig sein. Jedoch ist diese Wirkung der Stadtbäume von einer guten Wasserversorgung abhängig.

5.3.4. Mikroklima und Thermaler Komfort Index

Im Rahmen des KEW-Projekts fanden zwei Messkampagnen in Zusammenarbeit mit Studierenden der Universität Würzburg statt. Die erste Messkampagne diente einer Vorerkundung

der Standorte hinsichtlich der zu erwartenden Temperaturkontraste, die zweite Messkampagne war deutlich größer angelegt und hatte zum Ziel, die mikroklimatischen Einflüsse der Bäume zu untersuchen.

Die erste Messkampagne fand bereits vor Installation der Messsensorik an den entsprechenden Standorten im Sommer 2017 statt. Unterstützt wurden die Messungen durch zwei Studentinnen im Zuge eines Geländepraktikums. Sie diente als Voruntersuchung der ausgeschachteten Messpunkte und sollte zum einen die Eignung der vorgesehenen Laternen für die Wetterstationen zum anderen bereits die Kühleffekte der Bäume erfassen.

Um einen orientierenden Überblick zu gewinnen, fanden die Messungen an vier Tagen mit jeweils unterschiedlichen Wetterlagen statt. Diese gliedern sich in einen kühlen Sommertag mit viel Bewölkung, einen trockenen Sommertag, einen schwül-warmen Sommertag und einen Hitzetag mit jeweils sehr geringem Bedeckungsgrad. Gemessen wurde in der freien Fläche am Straßenrand, an dem geplanten Laternenstandort für die Wetterstation und dem vorgesehenen Baumbestand für die Messungen.

Es zeigte sich, dass alle geplanten Messstellen und Laternenstandorte für die Datenerhebung des KEW-Projekts geeignet sind. Selbst durch die stichprobenartig durchgeführten Messungen konnte beispielsweise ein Kühleffekt des Ringparks im Mittel von 2,2 K und der Baumbestände, je nach Standort von 1 – 1,5 K festgestellt werden. Zudem spiegeln die Laternenstandorte die Eigenschaften der freien Umgebung (ohne Baumbestand) wider.

Um die Auswirkungen der lokalen Baumbestände mikroklimatisch messen zu können, wurden im Jahr 2018 im Zuge eines studentischen Messpraktikums ausgedehnte Messungen an den jeweiligen Standorten durchgeführt. Dazu wurden an acht Tagen in unterschiedlicher Reihenfolge die Standorte abgefahren und vor Ort die meteorologischen Parameter an unterschiedlichen Punkten erhoben. Diese bestanden neben der Temperatur und Luftfeuchte aus dem Luftdruck sowie Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Für die Strahlungsmessung stand ein 4-Wege Pyranometer zur Verfügung. Dieses misst sowohl die einfallende als auch die ausgehende lang- und kurzwellige Strahlung und ermöglicht somit detaillierte Aussagen über die Interaktion der Strahlung mit der Oberfläche zu treffen. Weiterhin wurden an den Standorten mit Infrarotkamera und -thermometer Messungen der Oberflächentemperaturen von Straßen, Grünflächen und den Bäumen durchgeführt. Berücksichtigt wurden dabei die Standorte der Winterlinden und Robinien.

Sowohl Winterlinden als auch Robinien sorgen für eine aktive Kühlung der Oberflächen. Dabei erwiesen sich die Winterlinden aufgrund ihres dichten Blattwerkes als effektivere Oberflächenkühler. Sie erzeugten einen Temperaturunterschied von 23 °C zwischen den Asphaltoberflächen und den Grünflächen, die Robinien kamen hingegen nur auf eine Differenz von 12,9 °C. Der Leaf Area Index, der Versiegelungsgrad und die Beschattungsfläche erwiesen sich als signifikante Einflussfaktoren für den Kühlungseffekt.

Mikroklima und offene Flächen haben einen hohen Einfluss auf den Bodenwassergehalt sowie die Saftstromdichte. Die damit eng verbundene Baumtranspiration sowie die Beschattungsdichte zeigten beide einen signifikanten Einfluss auf den Human Thermal Comfort Index (PET). Die maximale PET-Reduktion betrug bis zu 11 °C unter der Beschattung dichter und höher transpirierender Winterlinden am Rottendorfer Tor, gefolgt vom Ludwiggai mit bis zu 10,7 °C und vom Rennweg mit bis zu 9,7 °C. Unter der Beschattung von Robinien betrug die maximale PET-Reduktion bis zu 4,6 °C am Rottendorfer Tor und bis zu 4,5 °C am Rennweg. Für beide Arten war die PET-Reduktion an der Zu Rhein-Straße gering (Rahman

et al., 2020). Eine höhere Windgeschwindigkeit zusammen mit dem Vorhandensein eines Parks am Rennweg könnte für einen besseren thermischen Komfort des Menschen gesorgt haben, während am Rottendorfer Tor vor allem die Gruppenanordnung der Winterlinden mit höherer Windgeschwindigkeit für eine höhere PET-Reduktion gesorgt haben könnte. Andererseits könnten geringere Windgeschwindigkeiten und ein höherer Anteil an bebauten Flächen die Wirkung der Einzelbäume in der Zu Rhein-Straße verringern. Im Fall des Ludwiggai könnten der Fluss und der umgebende Park trotz der geringsten Windgeschwindigkeit eine Rolle bei der Verbesserung des thermischen Komforts gespielt haben.

Zusammenfassung

Die Wasserverfügbarkeit der Bäume ist elementar für deren Wachstum, insbesondere in Zeiten von Trockenheiten. Winterlinden zeigen eine Steigerung des Biomassezuwachses von 0,5 kg TM wenn der Wasserverbrauch um einem m^3 zunimmt, während sich für Robinien der Zuwachs um 3,6 kg TM erhöht.

Sowohl Winterlinden als auch Robinien sorgen für eine aktive Kühlung der Oberflächen. Das Mikroklima eines Standorts und offene Flächen haben einen hohen Einfluss auf den Bodenwassergehalt sowie die Saftstromdichte, und damit wiederum auf die Verdunstung und Kühlungsleistung.

Winterlinden sind auf hochversiegelten Flächen um bis zu 65 % weniger effizient als freistehende Bäume derselben Art mit einer geringen Bodenversiegelung. Robinien zeigen dagegen nur geringe Standortunterschiede in der Wassernutzungseffizienz. Im Mittel liegt die Wassernutzungseffizienz der Winterlinden bei $1,4 \text{ kg TM (kg H}_2\text{O)}^{-1}$, die der Robinien bei $3,9 \text{ kg TM (kg H}_2\text{O)}^{-1}$.

Während die Höhe des Zuwachses eng mit der Wasserversorgung des Baumes verknüpft ist, wird die Phänologie wie die Blattentfaltung oder der Beginn des Stammwachstums klar von der Temperatur beeinflusst. Die für den Beginn der Hauptwachstumsphase erforderliche Temperatursumme beträgt für die Robinie ca. $547 \text{ }^\circ\text{C}$, für die Winterlinde $719 \text{ }^\circ\text{C}$. Somit ist mit steigenden Temperaturen im Zuge der prognostizierten Klimaänderungen auch ein früherer Beginn der Hauptwachstumsphase möglich. Für die Winterlinden ergibt sich der stärkste Zusammenhang mit den Temperaturmittelwerten von März bis Mai. $1 \text{ }^\circ\text{C}$ Temperaturerhöhung führt bei Winterlinden zu einem früheren Beginn des Stammwachstums von 8 Tagen. Das Ende der Hauptwachstumsphase verfrüht sich pro $1 \text{ }^\circ\text{C}$ Temperaturerhöhung um 12 Tage, so dass sich insgesamt die Dauer der Hauptwachstumsphase pro $1 \text{ }^\circ\text{C}$ Temperaturerhöhung um 4 Tage verkürzt.

Mit einem um 35 % höheren Blattflächenindex verhinderten die Baumkronen der Winterlinde im Vergleich zu Robinien eine höhere einfallende Strahlung und zeigten eine bessere Abkühlung unter der Kronenoberfläche. Darüber hinaus transpirierten die Winterlinden, die ein zerstreutporiges Holz aufweisen, deutlich mehr Wasser als die Robinien, was zu einer Lufttemperaturabsenkung (ΔAT) innerhalb des Baumkronendaches von bis zu $2,8 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer Erhöhung der absoluten Luftfeuchtigkeit (ΔAH) von bis zu $2,6 \text{ g m}^{-3}$ führte, im Vergleich zu einer Lufttemperaturabsenkung von $1,9 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer Erhöhung der absoluten Luftfeuchtigkeit von $1,9 \text{ g m}^{-3}$ für Robinie. Die physiologisch äquivalente Temperatursenkung war daher bis zu $11 \text{ }^\circ\text{C}$ niedriger unter dem Kronenraum von Winterlinden im Vergleich zu außerhalb, während der maximale Unterschied bei den Robinien $4 \text{ }^\circ\text{C}$ betrug.

Schließlich zeigten die Untersuchungen die Bedeutung der städtischen Topographie, wie z.B. die Orientierung der Straßen, der Gestaltung der Freiflächen und der umgebenden Bebauung. Sie beeinflussen die Windgeschwindigkeit und den menschlichen thermischen Komfort im Freien. Vom dicht bebauten Zentrum bis hin zu vorstädtischen Gebieten mit geringerer Bebauungsdichte sinkt die Lufttemperatur, während die Windgeschwindigkeit zunimmt. Die erhöhte Bodenverdichtung führt zusammen mit der verringerten Bodenfeuchtigkeit zu geringeren Transpirationswerten der Bäume.

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende vorläufige Empfehlungen für die Verwendung von Bäumen zur Klimawandelanpassung ableiten:

1. Über befestigten Oberflächen wie Asphalt sollten an stark hitzebelasteten Standorten möglichst dichtlaubige Baumarten verwendet werden, um die Sonneneinstrahlung zu minimieren.
2. Bäume mit höherer Transpirationsleistung sind zu bevorzugen, sofern die Wasserversorgung gewährleistet werden kann. Bei eingeschränkter Wasserverfügbarkeit sind trockenheitsangepasste Baumarten zu verwenden, die ihren Wasserverbrauch besser regulieren können.
3. Die Durchlüftung ist ein entscheidender Faktor für das thermische Komfortempfinden und ist in der Gestaltung von Freiflächen zu fördern bzw. Strömungshindernisse sollten vermieden werden.

5.4. Bedeutung für die Stadtplanung

Die Stadt Würzburg besitzt ein ausgeprägtes Stadtklima, welches sich vor allem in einer starken städtischen Wärmeinsel äußert. Mit Spitzenwerten des Stadtklimaeffekts zwischen der Innenstadt und dem Umland von fast 8 °C an strahlungswetterbeeinflussten Sommerabenden ist die Wärmeinsel stärker ausgeprägt als vor Projektbeginn angenommen worden war. Verstärkt wurde die Wärmeinsel durch das Vorherrschen trockenheißer Witterungsabschnitte in den Sommermonaten der letzten drei Jahre. Da mit solchen Witterungsbedingungen in Zukunft häufiger zu rechnen ist, zeichnet sich ein klarer Handlungsbedarf in der Klimaanpassung am Beispiel der Stadt Würzburg ab. Das Projekt hat auch ein zentrales Handlungsfeld der Stadtplanung zur Abmilderung von städtischen Hitzeextremen aufgezeigt: Für beide untersuchten Baumarten konnten trotz Trockenheit zwar reduzierte, aber insgesamt doch bemerkenswerte Kühlleistungen von bis zu 3 °C ermittelt werden. Auch die Wasseroberfläche des Mains wirkt sich kühlend auf die angrenzenden Uferbereiche aus. Ein probates Mittel der Stadtplanung besteht folglich im Erhalt und klimagerechten Ausbau der grünen und blauen Infrastruktur in der Stadt.

Unsere Studie zeigte, dass Bäume die thermischen Bedingungen in Städten deutlich verbessern können. Ein einzelner Baum kann bis zu 3 °C Luftkühlung im Kronenbereich durch Transpiration, 23 °C Oberflächenkühlung durch Beschattung und eine Senkung der physiologischen Äquivalenttemperatur (PET) um bis zu 11 °C bewirken. Winterlinden verminderten mit einer um 35 % höheren Kronendichte (gemessen als Blattflächenindex) die einfallende Strahlung deutlich stärker als Robinien. Im Vergleich zu Robinien werden über Asphalt bei Winterlinden die Oberflächentemperaturen sehr viel stärker gemindert. Dieses Ergebnis weist auf die Bedeutung von dichten Baumkronen über versiegelten Flächen für den menschlichen thermischen Komfort hin.

Andererseits können bei Rasenflächen die Wasserverdunstung und der daraus resultierende latente Wärmeaustausch unter der lichten Krone der Robinien dem Erwärmungseffekt entgegenwirken, wenn die Verfügbarkeit von Bodenwasser nicht begrenzt ist. Die physiologische Äquivalenttemperatur als ein Maß für das thermische Komfortempfinden des Menschen unterschied sich über Gras kaum zwischen der Winterlinde und der Robinie.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Dimensionen der Bäume (Stammdurchmesser, Höhe, Kronenausdehnung) und die Dichte der Belaubung die Kühlleistung durch Beschattung und Transpiration entscheidend beeinflussen. Die Kenntnis der ökologischen Eigenschaften wie die Holzanatomie oder die Wassernutzungseffizienz ist zur gezielten Baumartenwahl für die Kühlung durch Wasserverdunstung wichtig.

Die Verdunstung von Wasser durch Bäume wird zudem sehr stark von den kleinklimatischen Verhältnissen bestimmt. Topographie, Straßenrichtung und -geometrie, sowie Gebäudehöhen und -dichte sind dabei die entscheidenden Merkmale (Bowler et al., 2010; Jamei et al., 2016). Unsere Messungen zeigen, dass die Oberflächenversiegelung, die Bodenverdichtung, die Größe des Bodenwasserspeichers, das Pflanzschema aber auch Art und Dimension des Baumes die Verdunstung und damit das Wachstumspotenzial der Bäume verändern. Die Untersuchungen verdeutlichen, dass die mikroklimatischen Einflüsse auf den Wasserverbrauch der Bäume von der Baumart, der Baumdimension und den Bodenwasserspeichervermögen überlagert wurden. Dabei übertrifft die Transpiration der Winterlinden die der Robinien deutlich, wenn auch der Wasserverbrauch der Winterlinden von Jahr zu Jahr viel stärker schwankt als der der Robinien.

Demgegenüber ist der Jahreszuwachs der Robinien deutlich höher im Vergleich zu den Winterlinden. Im Mittel der drei trockenen Jahre 2018-2020 ist der Grundflächenzuwachs des Stammes der Robinien mehr als dreimal so hoch wie der der Winterlinden. Der Biomassezuwachs der Robinien ist zum Teil mehr als doppelt so hoch als der der Winterlinden.

Aus den Messungen lässt sich ableiten, dass die Wassernutzungseffizienz, d.h. der Wasserverbrauch pro m³ verdunstetes Wasser, einzelner Baumarten sehr unterschiedlich sein kann. Eine hohe Oberflächenversiegelung mindert die Wassernutzungseffizienz insbesondere von weniger trockenangepassten Baumarten wie Winterlinden sehr stark im Vergleich zu freistehenden Bäumen mit einer geringen Oberflächenversiegelung. Dies hat Auswirkungen auf die Ökosystemleistungen der einzelnen Bäume und Baumarten. Standorte mit guter Wasserversorgung, d.h. mit geringer Oberflächenversiegelung und/oder mit großem durchwurzelbarem Bodenvolumen und hoher Wasserspeicherkapazität, erhöhen die Wachstums- und Transpirationsraten der Bäume, wodurch sich auch die CO₂-Fixierung, die Sauerstofffreisetzung und die Kühlleistung vergrößern. Die Quantität der Ökosystemleistungen wird ferner deutlich von der Baumart geprägt. Während vor allem in Trockenjahren das Wachstum, die CO₂-Fixierung und die Sauerstofffreisetzung bei Robinien höher sind als bei Winterlinden, verbrauchen Winterlinden mehr Wasser und die kühlen stärker.

Eine wichtige Erkenntnis aus den Untersuchungen ist ferner, dass Gruppenpflanzungen den thermischen Komfort für den Menschen deutlich stärker verbessern können als Einzelbaumpflanzungen. Besonders für Baumarten mit höherer Transpiration, wie z. B. Winterlinden, sind Gruppenpflanzungen vorteilhaft, da die Wasserverdunstung in den Gruppen geringer ist und damit die Bäume besser Trockenheitsphasen bewältigen können. In städtischen Parks und Grünflächen ist eine Mischung aus Rasenflächen und locker belaubten Bäumen wie Robinien von Vorteil, weil sie, wie gezeigt, den thermischen Komfort genauso wie dicht belaubte

Baumarten verbessern, aber die Durchlüftung weniger stark behindern. Dies ist besonders in der Nachbarschaft von verkehrsbelasteten Straßen wichtig.

Sowohl die Ausbildung einer städtischen Wärmeinsel als auch die Kühleigenschaften von Stadtbäumen und die genannten möglichen Anpassungsmaßnahmen sind keine nur für die Stadt Würzburg gültigen Effekte der Überhitzung von Siedlungsgebieten bzw. Maßnahmen diesen entgegenzuwirken. Selbst in kleineren Gemeinden lassen sich beispielsweise durch eine Erhöhung des innerörtlichen Grüns Kühleffekte erzielen. Eine Übertragbarkeit auf andere bayerische und deutsche Städte und Gemeinden ist somit ohne weiteres möglich.

5.5. Sensibilisierung der Öffentlichkeit

Detaillierte Informationen zur Sensibilisierung der Öffentlichkeit können dem Bericht „KLIMA-ERLEBNIS WÜRZBURG - SENSIBILISIERUNG DER ÖFFENTLICHKEIT“ von April 2021 entnommen werden (siehe 10. Anlage). Die Sensibilisierung der Öffentlichkeit wurde mit dem Einsatz verschiedener Medien mit Informationsvisualisierungen erreicht. Hauptbestandteil war die Aufbereitung der in Echtzeit übertragenen Messdaten auf eine Bildschirmwand auf der LGS Würzburg 2018 und auf die Webseite www.klimaerlebnis.de. Daneben wurden für die jeweiligen Messstationen sogenannte „Infotonnen“ entworfen, welche im öffentlichen Raum durch ihre Farbgebung auffallen und mit Informationen zum Projekt bedruckt sind.

Ein zentraler Punkt bei der Sensibilisierung der Öffentlichkeit war der Wissenstransfer durch eine einfache und verständliche Darstellung der Messergebnisse für die breite Öffentlichkeit. Dabei wurde insbesondere mit graphischen Schaubildern und Illustrationen gearbeitet (Abb. 38). So wurden die Messergebnisse durch die Darstellung der Situation vor Ort mittels Personalisierung für den Betrachter veranschaulicht. Damit bekommt der Betrachter einen empathischen Bezug zur Situation vor Ort. Analog zum Klima-Michel-Modell (Jendritzky, 1990; Jendritzky & Nübler, 1981) wird das Empfinden des Menschen mit „Michel“ personifiziert.

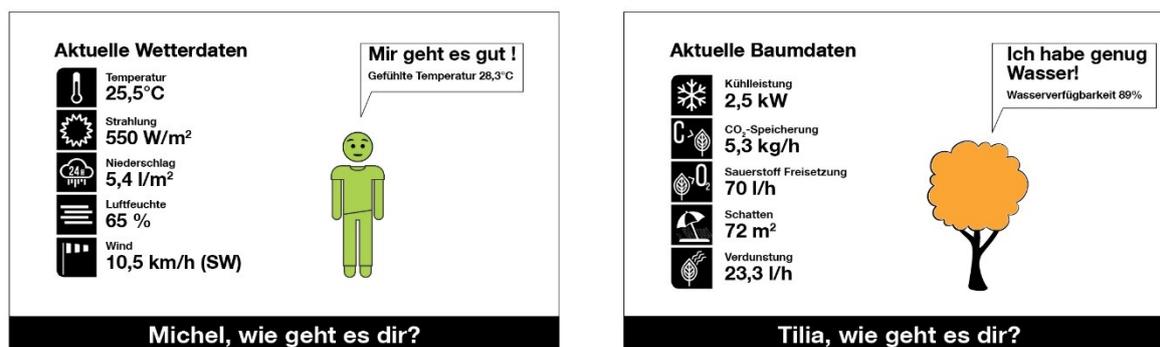


Abb. 38: Beispiel zur Veranschaulichung von Messergebnissen

Zur Veranschaulichung wurde der Klima-Michel je nach gefühlter Temperatur mittels einer siebenstufigen Skala eingefärbt (Abb. 39). Von Blau über Grün nach Rot nimmt der Hitze-stress zu, unter dem er leidet. In Abhängigkeit dazu verändert sich sein Gesichtsausdruck, der durch „Emojis“ verbildlicht wird. Michel beantwortet die Frage „Michel wie geht es Dir?“ je nach Temperatur mit „mir ist sehr kalt“, „mir ist kalt“, „mir geht es sehr gut“, „mir geht es gut“, „mir ist warm“, „mir ist zu warm“ und „mir ist viel zu warm“.



Abb. 39: Abbildung der unterschiedlichen Gemütszustände von Michel je nach gefühlter Temperatur

Auch die Leistungen der Bäume wurden graphisch dargestellt (Abb. 40). Der Baum, „Tilia“, zeigt durch seine Farbe den Zustand bzgl. Wasserversorgung/Trockenstress an und beantwortet die Frage „Tilia wie geht es dir?“ je nach Wasserversorgung mit „Ich habe reichlich Wasser“, „Ich habe genug Wasser“, „Ich habe wenig Wasser“, „Ich habe zu wenig Wasser“. Von Grün nach Rot nimmt der Trockenstress der Bäume zu, der sich aus der Wasserverfügbarkeit in den oberen Bodenschichten ergibt.

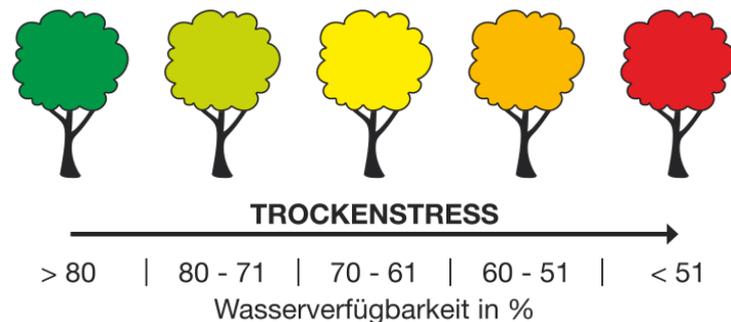


Abb. 40: Abbildung der Wasserversorgung/Trockenstress bei „Tilia“

Daneben wurden weitere Messergebnisse graphisch aufbereitet:

- Temperaturunterschied zwischen Kronenraum und Klimastation neben dem Baum (in der Sonne), um die Kühlwirkung der Bäume durch Schattenspende und Transpiration herauszustellen. Vergleich der Temperatur der jeweiligen Messstation mit der Temperatur auf dem LGS-Gelände
- Tagesmaximum und -minimum des aktuellen Tages sowie den Verlauf der Höchst- und der nächtlichen Tiefsttemperaturen der letzten 30 Tage
- Anzahl der Liter Wasser, die der Baum seit Beginn der Vegetationsperiode verdunstet hat, und die Kühlleistung, die er dadurch in Kilowattstunden erbracht hat. Die Leistung wird damit verglichen, wie viele Kühlschränke ein Jahr lang betrieben werden können. Durch diesen Vergleich wird das Ausmaß für die NutzerInnen verständlich quantifiziert.
- Kohlenstoffspeicherung der Bäume durch das Stammwachstum. Der Zuwachs des Stammdurchmessers seit Jahresbeginn wird mit der Masse an CO₂ in Relation gesetzt, die dadurch gespeichert wurde. Diese wird wiederum mit der Dauer verglichen, die

eine Energiesparlampe brennen kann, was durch die für die Stromerzeugung ausgestoßene Menge an CO₂ berechnet wird. Durch diese Vergleiche wird den NutzerInnen eine Hilfestellung zur Interpretation der Messdaten gegeben.

Diese graphischen Darstellungen können auf der Homepage weiterhin abgerufen werden. Auch wurden die Ergebnisse auf der Videoleinwand am LGS-Gelände dargestellt. Nachfolgend werden alle Medien charakterisiert, welche für die Sensibilisierung der Öffentlichkeit eingesetzt wurden.

5.5.1. Homepage

Nach dem Ende der Landesgartenschau war ein zentraler Punkt der Öffentlichkeitsarbeit die Pflege der Homepage, die laufend aktualisiert und mit neuen Ergebnissen aufgewertet wird (Abb. 41).



Abb. 41: Startseite der Homepage www.klimaerlebnis.de

Auswertungen zu den Zugriffen auf die Homepage zeigen, dass es im April 2018 (Beginn Landesgartenschau) und im August 2018 (Besuch StM und TV-Bericht) die meisten Zugriffe gab. Zudem ist eine Jahresschwankung zu erkennen, d.h. dass im Sommer die Besucherzahlen z. T. deutlich über 400 Personen pro Monat lagen, während im Winter in manchen Monaten weniger als 250 Personen die Seiten besuchten. Die Zugriffe im Sommer erreichten oftmals Werte über 1400, im Winter blieben sie dagegen zumeist unter 1100. Insgesamt lässt die Zahl der abgerufenen Mbytes einen stetigen Anstieg erkennen.

5.5.2. Infotonnen

An allen Messstandorten wurde an jeweils einen Messbaum eine sogenannte Infotonne (Abb. 42) installiert. Durch die orangene Farbgebung machen die Baumfässer auch PassantInnen auf die Messstationen aufmerksam und schaffen einen Bezug zur Landesgartenschau, welche die Farbe als „Corporate Design“ nutzte (Abb. 43).

Gleichzeitig fungieren die Infotonnen als Informationsträger, um PassantInnen über das Projekt aufzuklären. Sie sind mit allgemeinen Informationen zum Projekt, zu den Forschungspartnern, zum Stadtklima, zur Funktion des Baumes für das Stadtklima, zum Standort und seiner Stadt- und Begrünungsstruktur, zum Messaufbau und zu den erhobenen Messdaten versehen.

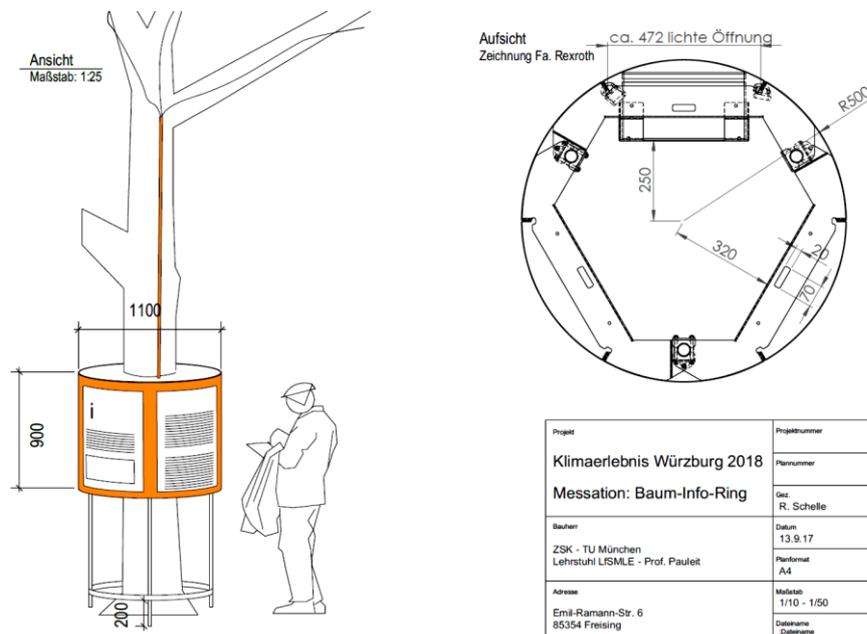


Abb. 42: Aufbau der Infotonnen



Abb. 43: Infotonne am Messbaum

5.5.3. Videoleinwand

Die Bildschirmwand auf der Landesgartenschau befindet sich auf der Klimaforschungsstation. Dem Projekt wurde die Außenwand eines Forschungsgebäudes des ZAEs (Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.) an einem kleinen Platz mit Sonnensegel als Ausstellungsfläche zur Verfügung gestellt. Nur wenige Meter daneben war die Klimastation und die Baummesstation „Landesgartenschau“ (Abb. 44).



Abb. 44: Konzeptionsskizze und Foto nach Realisierung des Pavillons mit Bildschirmwand auf dem LGS-Gelände (Zeichnung: R. Schelle)

Die Bildschirmwand ist ganzflächig mit Informationen zum Projekt und einem Luftbild bedruckt, das transparent von der Klimafunktionskarte von Würzburg überlagert wird. So werden stadtklimatische Unterschiede sichtbar gemacht. Ferner dient dieser Luftbild-Hintergrund zur Orientierung. Acht integrierte Bildschirme zeigten die aufbereiteten Messdaten in Echtzeit von allen Stationen auf einen Blick. Dadurch können sowohl die Unterschiede im Lokalklima als auch die Leistung und der Zustand der Stadtbäume aufgezeigt werden. Die Messdaten wurden alle zehn Minuten aktualisiert und sind synchron mit der Webseite geschaltet. An den Seiten der Bildschirmwand wurden allgemeine Informationen in Form von Texten und Grafiken vermittelt (links) und die Darstellung der Messdaten auf den Bildschirmen erklärt (rechts). Damit NutzerInnen einen Zusammenhang zu den Messstationen herstellen können, waren auf der Bildschirmwand Fotos der Bauminformationssäule abgebildet (Abb. 45).



Abb. 45: Bildschirmwand auf dem LGS-Gelände

Für die Weiterverwendung der Bildschirmwand hat das ZAE angeboten, diese zu übernehmen. Ansonsten müssten sie rückgebaut werden, was mit Kosten verbunden wäre.

5.5.4. Öffentlich zugänglicher Bildschirm

Um die Ergebnisse der Bildschirmwand auch ohne Kauf eines LGS-Tickets öffentlich zugänglich zu machen, wurde im Ausstellungsraum des ZAE Bayern ein ca. 90 x 30 cm großer Bildschirm aufgehängt. Dieser zeigte durchlaufend jeweils die Daten einer Messstation an (Abb. 46, unten) und wechselt anschließend zur nächsten Station.



Abb. 46: Öffentlich zugänglicher Bildschirm in der Ausstellung im Gebäude des ZAE Bayerns

5.5.5. Abschlussarbeiten

Neben den beschriebenen Medien wurden im Projekt zwei Abschlussarbeiten angefertigt, welche sich mit der Sensibilisierung der Öffentlichkeit in Würzburg beschäftigt haben. Timo Limmer (Masterarbeit) beschäftigte sich mit dem Thema „Stadt­bäume in Würzburg: Wie die Öffentlichkeit durch Informationsvisualisierungen sensibilisiert werden kann“ (Limmer, 2018). Im Vordergrund der Arbeit stand die kartographische Visualisierung des Trockenstressrisikos von Würzburger Stadtbäumen auf Basis von Geodaten. Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass rund 64 % der Bäume ein geringes Trockenstressrisiko aufweisen, was vor allem an der meist hohen Trockenstresstoleranz der Würzburger Stadtbäume liegt. Zudem stehen viele Bäume in Parks und am Mainufer, wo gute Standortbedingungen vorherrschen. Bäume mit einem erhöhten Risiko befinden sich überwiegend in stark versiegelten Innenstadtbereichen und an Straßenrändern. Die ermittelten Daten zum Trockenstressrisiko wurden grafisch aufbereitet (Faltplan „Stadtbaumkarte Würzburg“). Neben einer Karte zum Trockenstressrisiko der katalogisierten Bäume, enthält der Entwurf weitere Informationsvisualisierungen zur Veranschaulichung von Methodik und Hintergrundinformationen. Durch emotionale Ansprache und das Bewusstmachen der Betroffenheit ihrer Lebensqualität soll eine Sensibilisierung von BürgerInnen gelingen.

In einer weiteren Masterarbeit von Ni Ke zum Thema „Evaluierung des öffentlichen Bewusstseins, der Wahrnehmung und der Einstellung zu städtischer grüner Infrastruktur und des Einflusses von sozioökonomischen Faktoren: Eine Fallstudie des Projekts "Klimaerlebnis Würzburg" (Evaluation of public awareness, perception and attitude on urban green infrastructure and the impact of social-economic factors: A case study of the project "Climate Experience Würzburg") wurde mit Umfragen die Wahrnehmung des Projekts innerhalb der Würzburger Bevölkerung analysiert (Ke, 2019). So wurden in 208 Interviews Bewohner von Würzburg gefragt, wie ihre Wahrnehmung des Projekts (Tonnen, Projekt, Landesgartenschau) ist. Unter anderem wurden folgende Fragen gestellt: Da steht eine orange Tonne. Ist Ihnen diese vorher schon einmal aufgefallen? Was glauben Sie, wozu sind diese Tonnen da? Haben Sie die Informationen auf den Tonnen gelesen? Wenn ja, wie fanden Sie die Information (bitte ein Schlagwort aufnehmen)? Haben Sie schon einmal vom Projekt „Klimaerlebnis Würzburg“ gehört oder gelesen? Was verbinden Sie mit dem Projekt „Klimaerlebnis Würzburg“?

Die Ergebnisse der Umfrage ergaben, dass einem hohen Anteil der Bevölkerung (38%) die Infotonnen aufgefallen sind. Davon bringen knapp 80 % der Personen, die die Infos gelesen haben, die orangenen Tonnen mit Klima, Bäumen und Umwelt in Verbindung. Zwei Drittel der Personen fanden die Informationen positiv. 30 % der Befragten kennen das Projekt Klimaerlebnis Würzburg und bringen es mit Klima, Bäumen und Umwelt in Verbindung.

Somit lässt sich schlussfolgern, dass durch die durchgeführten Informationskampagnen der Bevölkerung das Projekt Klimaerlebnis Würzburg durchaus bekannt gemacht wurde. Das Projekt wurde zumeist positiv wahrgenommen. Somit hat eine Sensibilisierung der Bevölkerungen zu den Themen Klimawandelanpassung in der Stadt, Erhalt und Leistungen von Grünflächen in der Stadt durch das Projekt stattgefunden.

5.5.6. Vorträge, Veröffentlichungen und weitere Öffentlichkeitsarbeit

Neben den eingesetzten Medien und den Abschlussarbeiten haben Projektvertreter*innen vielfach mit Vorträgen das Projekt und dessen Ergebnisse präsentiert (Tab. 16). Durch mehrere wissenschaftliche und populärmediale Veröffentlichungen wurde das Projekt ebenfalls verbreitet (Tab. 17). Darüber hinaus wurde in einer Vielzahl von Artikeln, Berichten und Beiträgen das Projekt öffentlichkeitswirksam dargestellt (Tab. 19).

Der große Erfolg der Öffentlichkeitsarbeit wird durch mehrfache Anfragen von anderen Städten bestätigt, welche das Konzept ebenfalls etablieren wollen.

Zusammenfassung

Die Sensibilisierung der Öffentlichkeit in Würzburg wurde durch den Einsatz unterschiedlicher Medien (Infotonne, Bildschirmwand, Website) erreicht. Diese Medien enthielten Hintergrundinformationen, welche neben den Zielen des Projekts die Umweltleistungen von Stadtbäumen und deren Bedeutung erklären, sowie stadtklimatische Unterschiede aufzeigen. Leicht verständliche Texte werden dabei durch Informationsvisualisierungen unterstützt. Mikroklimatische Charakteristika des Stadtklimas wurden zusätzlich in einem Comic auf der Bildschirmwand der LGS und auf der Website thematisiert und spielerisch vermittelt. Die leicht verständliche Aufbereitung der Messdaten trug so zu einer Sensibilisierung bei. Somit fand insgesamt eine Demokratisierung von Wissen erfolgt.

Die Lage der verschiedenen Messstandorte im Stadtraum, deren umgebende Bebauungs- und Grünstruktur sowie die daraus resultierenden lokalklimatischen Gegebenheiten wurden auf den Infotonnen und der Webseite beschrieben. Während die Hintergrundinformationen dazu dienen, allgemeine Phänomene zu beleuchten, ermöglichten die Echtzeit-Anzeige von Messdaten, die tatsächliche Leistungsfähigkeit der Bäume und lokale Unterschiede des Stadtklimas in Würzburg darzustellen. Die komplexen Messdaten wurden durch eine ansprechende, visuelle Aufbereitung für eine breite Öffentlichkeit zugänglich, also verständlich gemacht. Somit kann angewandte Forschung live miterlebt werden.

Die LGS bot eine Bühne für ein großes Publikum, dessen Aufmerksamkeit durch die Bildschirmwand geweckt wurde, die eine einzigartige Form der Präsentation aktueller Messdaten darstellt.

Weitere Aufmerksamkeit wurde dem Projekt und damit auch der Bedeutung von Stadtbäumen für das Mikroklima durch Berichte in der Presse zuteil. Durch den heißen und trockenen Sommer 2018 stand das Thema besonders in der Öffentlichkeit.

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Messungen und Datenauswertungen haben es erstmalig ermöglicht, das Stadtklima von Würzburg kleinräumig und quantitativ zu erfassen. Damit reiht sich Würzburg in eine noch relativ kleine Stichprobe von Städten in Deutschland ein, die über ein mehrjähriges ununterbrochenes Monitoring des Stadtklimas verfügen. Ein Alleinstellungsmerkmal liefern die zeitgleich stattfindenden physiologischen Messungen an Stadtbäumen, die die stadtklimatologischen Erhebungen ergänzen und hinsichtlich der von Stadtbäumen offerierten Ökosystemdienstleistungen wie CO₂-Bindung und Kühlleistung am Beispiel Würzburg auf einen zentralen Aspekt des innerstädtischen Klimamanagements abzielen.

Die meteorologischen Messungen weisen für Würzburg eine städtische Wärmeinsel aus, die im Vergleich zu anderen Städten in Mitteleuropa sehr stark ausgeprägt ist. Dies ist der hohen Bebauungsdichte, der topographischen Kessellage und dem relativ reduzierten Anteil des Stadtgrüns an der Gesamtfläche geschuldet und war eine zentrale Motivation für die Verortung des Projekts in ebendieser Stadt. Die höchsten UHI-Werte von über 7 °C wurden an Sommertagen mit Strahlungswetter – also hoher Sonneneinstrahlung bei geringer Wolkenbedeckung – gemessen. Weiterhin als problematisch einzustufen ist die bevorzugte Tageszeit der maximalen UHI-Ausprägung am Nachmittag, wenn die Tagesmaxima der Temperatur erreicht werden, und in den Abendstunden, wenn die Stadtbewohner sich von der Hitze des Tages erholen möchten bzw. Schulkinder zu Bett gehen. Im Hinblick auf den thermischen Komfort macht es einen entscheidenden Unterschied, ob diese abendlichen Aktivitäten bei etwas über 20 °C am Stadtrand oder bei annähernd 30 °C in der Innenstadt stattfinden.

Begünstigt wurden diese extremen Hitzephasen in der Innenstadt wohl auch durch das häufige Auftreten von Hitzewellen und Trockenperioden in den Messjahren 2018 bis 2020. Dies könnte als eine ungewollte Verzerrung in der stadtklimatischen Erfassung interpretiert werden. Schlussendlich können die im Projektzeitraum liegenden Messjahre aber auch als Vorgeschmack auf zukünftige Klimabedingungen in der Region um Würzburg gewertet werden, wo sich bereits seit einigen Jahren eine Tendenz zu deutlich wärmeren und vielfach trockeneren Witterungsbedingungen abzeichnet, die von Klimamodellprojektionen über das gesamte 21. Jahrhundert fortgeschrieben wird (vgl. Kap. 5.1.1). Insofern haben die zurückliegenden Messungen in unerwartetem Ausmaß verdeutlicht, wie groß die Herausforderungen der Stadtplanung im Anpassungsprozess an den regionalen Klimawandel tatsächlich sind, möchte man die Lebensbedingungen in der Innenstadt auch für zukünftige Generationen erhalten bzw. anheben.

Durch grüne Infrastruktur, insbesondere durch Bäume können die thermischen Bedingungen in Städten nachdrücklich verbessert werden. Baumarten mit dichter Belaubung wie z. B. Winterlinden vermögen durch eine Reduzierung der Strahlung sowie durch hohe Verdunstungsraten die Umgebung deutlich abzukühlen und so den thermischen Komfort des Menschen positiv zu beeinflussen. Dabei muss jedoch der eine gute Wasserversorgung der Bäume gewährleistet sein. Über Grasflächen wie z. B. in Parks bieten aber auch Baumarten mit lichten Kronen wie z. B. Robinien durch hohe Verdunstungsleistungen nicht nur der Bäume, sondern auch der Grasflächen gute Voraussetzungen, das thermische Komfortempfinden des Menschen zu vergrößern. Zudem wird dabei die Durchlüftung weniger stark behindert. Auch Gruppenpflanzungen erhöhen den thermischen Komfort für den Menschen deutlich gegenüber Einzelbaumpflanzungen.

Eine große Rolle für das thermische Komfortempfinden des Menschen spielt - wie gezeigt - die Verschattung und die Verdunstungsleistung, die entscheidend von der Baumart als auch von der Baumdimension und dem Pflanzschema abhängt. Weiterhin sollte die Oberflächenversiegelung und die Bodenverdichtung möglichst gering und das Wasserspeichervermögen des Bodens möglichst groß gehalten werden, um die Verdunstung und das Wachstumspotenzial der Bäume zu erhöhen, wodurch die Ökosystemleistungen der Bäume wie z. B. CO₂-Fixierung, Sauerstofffreisetzung oder Kühlleistung maximiert werden können.

Aufgrund der für die Zukunft prognostizierten Erhöhung der Temperaturen in den Städten sowie aufgrund der Zunahme der Häufigkeit, Stärke und Dauer von Extremereignissen wie Trockenheiten oder Hitzewellen ist die standortgerechte Baumartenwahl für Neuanpflanzungen bzw. für Ergänzungspflanzungen besonders wichtig. Trockenstresstolerante Arten - wie z. B. Robinien - sind hier insbesondere bei hochversiegelten Flächen zu bevorzugen. Zumeist sind aber dann die Ökosystemleistungen dieser Baumarten eingeschränkt, wie dies das Beispiel Winterlinde und Robinie für Würzburg zeigt. Ein gutes Maß für das Verhalten einer Baumart unter Trockenstress ist die Wassernutzungseffizienz, da aus ihr herausgelesen werden kann, wie bei einer Baumart der Wasserverbrauch, das Wachstum und zum Teil auch die Ökosystemleistungen miteinander verknüpft sind.

Das Projekt *Klimaerlebnis Würzburg* hat zu einer Sensibilisierung der Öffentlichkeit für den Problemkomplex des Stadtklimas geführt. Dies konnte zum einen durch die weithin sichtbare Beteiligung an der Landesgartenschau 2018 in Würzburg erreicht werden. Zum anderen ist es den Projektleitern gelungen, von Beginn an eine große mediale und politische Aufmerksamkeit zu erzeugen, die sich in zahlreichen Zeitungs-, Rundfunk- und Fernsehbeiträgen niederschlägt. Als sehr fruchtbar und förderlich hat sich ferner die enge organisatorische, technische und inhaltliche Abstimmung mit dem Umweltreferat der Stadt Würzburg erwiesen. Solche Kooperationen und Vernetzungen von Forschungseinrichtungen mit Kommunen sind Grundeigenschaften des ZSK.

Auf Basis dieser exzellenten Zusammenarbeit zwischen Universitäten und Stadtverwaltung wird gerade ein Konzept ausgearbeitet, wie das etablierte Messnetz kontinuierlich weiter zu betreiben ist, um der großen öffentlichen Aufmerksamkeit und den zunehmenden stadtklimatischen Herausforderungen für die Stadtplanung auch zukünftig Rechnung zu tragen. Übergangsweise wird das Messnetz personell aus Haushaltsmitteln der Universität Würzburg und der TU München weiter betrieben. Mittelfristig ist hingegen eine Anschlussfinanzierung durch ein Drittmittelprojekt oder die Überführung des Messnetzes in städtisches Eigentum notwendig. Vor diesem Hintergrund wird in einem neuen Forschungsantrag die Weiternutzung aller installierten Geräte beantragt werden. Im Folgeprojekt KEW 2.0 ist geplant, die Forschungsarbeiten zum Würzburger Stadtklima mit dem zukünftigen regionalen Klimawandel zu überlagern, um somit das zukünftige Ausmaß des Anpassungsbedarfes zu quantifizieren und zukunftsweisende Umsetzungsmaßnahmen in der Klimaanpassung rechtzeitig einzuläuten. Dabei sollen innovative, sehr hoch aufgelöste Modellierungsansätze erstmalig zur Anwendung kommen. Mit dem vorhandenen und fortzuführenden stadtklimatischen Messnetz in Würzburg steht dazu eine beispiellose Datenbasis zur Kalibrierung und Validierung der Modelle zur Verfügung. Eine Ausnahme ist die Bildschirmwand auf dem Gelände der ZAE, die evtl. rückgebaut werden muss oder dem ZAE zur Verfügung gestellt werden kann.

Während das Projekt *Klimaerlebnis Würzburg* einen neuartigen Ansatz zum stadtklimatischen und baumphysiologischen Monitoring praktisch umsetzen konnte und neuartige quantitativ belastbare Einblicke in das Würzburger Stadtklima und der Ökosystemleistungen von

Stadtbäumen eröffnet hat, beschränken sich die Messungen und Datenauswertungen auf einen aus klimatologischer Sicht relativ kurzen Zeitraum und tangieren den Aspekt der zukünftigen Klimaentwicklung nur indirekt. Insofern ergibt sich eine vielschichtige wissenschaftliche und planungsrelevante Anschlussfähigkeit für Folgeprojekte. Dabei möchte die TU München und die Universität Würzburg zum einen das Monitoring des Stadtklimas und der Stadtbäume fortführen, um längere Zeitreihen mit weiteren Witterungs- und Wetterextremen in allen Jahreszeiten und weitere Wachstums- und Ökosystemleistungen von Stadtbäumen zu gewinnen als Basis für zeitliche Trenduntersuchungen. Zum anderen sollen die Messdaten mit Modellierungen des Stadtklimas und der relevanten großräumigeren Wetterlagen verschnitten werden, um frühzeitig Einblicke in zukünftige Risikosituationen zu gewinnen. Mit dem neuartigen Stadtklimamodell Palm4U steht inzwischen ein Instrumentarium zur Verfügung, welches neben solchen zukünftigen Witterungsextremen auch bauliche Modifikationen im Stadtkörper berücksichtigen kann, was ganz neue Perspektiven in der Stadtplanung und städtischen Bauleitplanung unter Einbeziehung der grünen Infrastruktur eröffnet. Die Projektleiter des Projekts Klimaerlebnis Würzburg arbeiten aktuell an diesen Forschungsfronten, um eine Basis für weiterführende Forschungsprojekte zu schaffen.

7. Fachliche Ergebnisse des Projekts

Im Fokus des Projekts standen neben der Aufklärung und Sensibilisierung der Öffentlichkeit hinsichtlich der Klimawandels in Städten und der Leistungen von Stadtgrün auch der wissenschaftliche Austausch und die wissenschaftliche Verbreitung der Ergebnisse. So wurden in der Projektlaufzeit mehrere öffentliche und interne Workshops und Seminar durchgeführt (Tab. 16).

Tab. 16: Workshops und Seminare durchgeführt im Projektzeitraum

Titel	Datum	Ort	Art der Veranstaltung
Abschlussworkshop	Geplant Sommer 2021	Würzburg	Abschluss-symposium
Interner Workshop	14.10.2020	Würzburg	Workshop
Interner Workshop	20.11.2019	Würzburg	Workshop
Studentische Geländeübung im SS 2019 im Rahmen des Moduls 09-MAT2 im Master Angewandte Physische Geographie	SS 2019	Würzburg	Übung
Cool durch grüne Infrastruktur	14.02.2019	Würzburg	Workshop
Konzept-Workshop	26.09.2017	Würzburg	Workshop
Interner Workshop	17.07.2017	Freising	Workshop
Auftaktworkshop	02.06.2017	Würzburg	Workshop

Darüber hinaus haben Vertreter des Projekts an mehreren Veranstaltungen teilgenommen und Präsentationen zum Projekt gehalten, um die Ergebnisse der breiten und wissenschaftlichen Öffentlichkeit vorzustellen (**Tab. 17**).

Tab. 17: Vorträge zum Projekt auf Tagungen und Konferenzen

Vortragende*r	Titel	Datum	Ort	Veranstaltung
Christian Hartmann, Heiko Paeth	Urbane Hitzeextreme und Stadtklimaeffekte während der Hitzejahre 2018 - 2020 in Würzburg - Aktuelle Ergebnisse des Forschungsprojekts "Klimaerlebnis Würzburg"	26.03.2021	Digital	AK Klima Interimstreffen 25./ 26.03.2021 (Online-Veranstaltung)
Christian Hartmann	Klimaerlebnis Würzburg – Stadtklima live erleben	28.01.2021	Würzburg	Vortragsreihe „Klima- und Landschaftswandel in Unterfranken“ der FSI Geographie Würzburg
Christian Hartmann	Klimaerlebnis Würzburg – Stadtklima live erleben	08.12.2020	Hamburg	Ringvorlesung Universität Hamburg „Wasser von vier Seiten“
Christian Hartmann	Klimaerlebnis Würzburg – Stadtklima live erleben	10.11.2020	Essen	Essener Klimagespräche
Christian Hartmann	Ökosystemdienstleistungen der Stadtbäume in Würzburg	05.02.2020	Veitshöchheim	25. bundesweiten Arbeitsbesprechung "Umweltgerechter Pflanzenbau und Pflanzenschutz in Haus und Garten" in der LWG Veitshöchheim
Heiko Paeth, Christian Hartmann	Klimaerlebnis Würzburg - Stadtklima erleben	25.10.2019	Jesteburg	AK Klima
Mohammad Rahman	Designing green public squares with suitable tree species for optimum ecosystem services	01.10.2019	Curitiba, Brasilien	IUFRO 2019
Thomas Rötzer	Quantifying growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions	01.10.2019	Curitiba, Brasilien	IUFRO 2019
Stephan Pauleit	Talking trees: Measuring, Modeling and Communicating the urban forest's ecosystem services	26.09.2019	Kiel	Deutscher Kongress für Geographie
Thomas Rötzer	Stadtbäume im Klimawandel: Wuchsverhalten, Ökosystemleistungen und Perspektiven	22.05.2019	Karlsruhe	Impulstagung "Mikroklima, Städte und Gemeinden mit grünblauer Infrastruktur umplanen und klimafit machen"
Christian Hartmann	Klimaerlebnis Würzburg	14.03.2019	Würzburg	Vortragsreihe des Fränkischen Gartenbauvereins v. 1857

Stephan Pauleit	Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt - Strategien für klimasichere und grüne Städte	24.09.2018	Würzburg	Zukunft urbanes Grün! Perspektiven für klimasichere und grüne Städte im Kontext städtebaulicher Nachverdichtung bei der LGS Würzburg
Christian Hartmann	Klimaerlebnis Würzburg	28.04. und 29.04.2018	Würzburg	Messe „Green Fair“ Würzburg
Mohammad Rahman	Ecosystem services from urban green spaces - a quantitative study to compare the species differences at micro-scale	2018	Mantova	1st World forum on Urban forests
Thomas Rötzer	Mitigating urban climate change - Simulating ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions.	2018	Mantova	1st World forum on Urban forests
Thomas Rötzer	The contribution of urban forests to adapt cities to climate change – Quantifying growth and ecosystem services of trees under present and future climate conditions	2018	Yangling/China	Yangling International AgriScience Forum

Zudem wurden bislang im Rahmen des Projekts neun Veröffentlichungen publiziert, bzw. sind gerade in der Review- oder Erstellungsphase (Tab. 18).

Tab. 18: Veröffentlichte Artikel zum Projekt

Autor*in	Titel	Jahr	Zeitschrift
Rötzer, T., Moser-Reischl, A., Rahman, M. A., Hartmann, C., Paeth, H., Pauleit, S., Pretzsch, H.	Urban tree growth and ecosystem services under extreme drought	2021	Agricultural and Forest Meteorology, in Publikation
Hartmann, C., et al.	Urban heat and city climate effects during the heat wave years 2018-2020 in Würzburg, Germany	2021	In Vorbereitung
Rahman, M.A., Franceschi, E., Pattnaik, N., Reischl, A., Hartmann, C., M., Paeth, H., Pretzsch, H., Pauleit, S., Rötzer, T.,	Spatial and temporal changes of outdoor thermal stresses: influence of urban land cover type. Scientific Reports.	2021	In Vorbereitung
Rötzer, T., Moser-Reischl, A., Rahman, M. A., Grote, R., Pauleit, S., Pretzsch, H.	Modelling urban tree growth and ecosystem services - review and perspectives	2021	Progress in Botany
Rahman, M. A., Hartmann, C., Moser-Reischl,	Tree cooling effects and human thermal comfort under contrasting species and sites	2020	Agricultural and Forest Meteorology 287, DOI:

A., Freifrau von Strachwitz, M., Paeth, H., Pretzsch, H., Pauleit, S., Rötzer, T			10.1016/j.agrformet.2020.107947
Rahman, M.A., Stratopoulos, L.M.F., Moser-Reischl, A., Zölch, T., Häberle, K.H., Rötzer, T., Pretzsch, H., Pauleit, S.	Traits of trees for cooling urban heat islands: A meta-analysis	2020	Building and Environment 170, p. 15, DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106606
Pauleit, S., Zöch, T., Rahman, M.A., Moser, A., Rötzer, T.	Cool durch grüne Infrastruktur - Die Potentiale des Stadtgrüns zur städtischen Klimawandelanpassung	2019	Transforming Cities 3: 60-65
Hartmann, C.	Klimaerlebnis Würzburg	2018	Anthos
Duthweiler, S., Pauleit, S., Rötzer, T., Moser, A., Rahman, M., Stratopoulos, L., Zölch, T.	Untersuchungen zur Trockenheitsverträglichkeit von Straßenbäumen - Research projects about the drought resistance of trees in cities	2017	Jahrbuch der Baumpflege 21. Jg., S.137-154, ISBN: 978-3-87815-253-8.

Im Laufe des Projekts wurden ebenfalls 13 Master- und Bachelorarbeiten durchgeführt sowie zwei Doktorarbeiten begonnen (Tab. 19). Diese haben essenziell zum Projektfortschritt und -gelingen beigetragen.

Tab. 19: Abschlussarbeiten im Projekt

Autor*in	Titel	Jahr	Art
Vivian Kempkens	Ableitung von Wachstumsparametern und Wasserhaushaltsgrößen von Stadtbäumen aus Dendrometerdaten	2021	Master
Mark Weller	Auswertung der Baumkataster mitteleuropäischer Städte: Baumartenzusammensetzung, Verteilung, Altersstruktur und Ökosystemleistungen	2021	Master
Manuel Herzog	Simulation von Wachstum und Ökosystemleistungen von Baumarten mitteleuropäischer Städte unter aktuellen und künftigen Klimabedingungen	2021	Master
Christine Buchner	Untersuchung, Beurteilung und Vergleich blattmorphologischer Merkmale von Stadtbäumen in Bezug auf ihre Trockenheitsresistenz	2020	Bachelor
Annett Rohmer	Klimabedingte Risikofaktoren für historische Gebäude in Europa	2020	Master
Lisa Watschek	Klimasensitivität von Stadtbäumen an den Standorten Hof, Kempten und Würzburg	2020	Bachelor
Martin Melzer	Vergleich von Blatt- und Bodentemperaturen von heimischen und nichtheimischen Baumarten während des Extremsommers 2019	2020	Bachelor
Anna Kirchner	Einfluss des Versiegelungsgrades auf lokale Klimaparameter in Deutschland	2020	Bachelor
Ni Ke	Evaluation of public awareness, perception and attitude on urban green infrastructure and the impact of social-economic factors: A case study of the project "Climate Experience Würzburg"	2019	Master
Christine Hammel	Wachstum und Ökosystemleistungen von Stadtbäumen in Abhängigkeit von Standort und Baumart unter extremer Trockenheit	2019	Master

Fabian Onkels	Erstellung und Auswertung einer Meinungsumfrage zur stadtklimatischen Situation	2019	Master
Alexandra Hetterich	Meteorologische Einflussfaktoren für Wachstumsparameter von Stadtbäumen in Würzburg	2019	Bachelor
Timo Limmer	Stadtbäume im Würzburg: Wie die Öffentlichkeit durch Informationsvisualisierungen sensibilisiert werden kann.	2018	Master
Christian Hartmann	Stadtklimatische Untersuchungen	laufend	Dissertation
Eleonora Franceschi	Growth and ecosystem services of urban trees across three climate zones	laufend	Dissertation

Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit wurden zahlreiche Radio- und Fernsehbeiträge, Presseartikel und weitere Aktivitäten erwirkt bzw. durchgeführt (Tab. 20).

Tab. 20: Artikel über das Projekt, Radio- und Fernsehbeiträge über KEW

Titel	Art	Datum	Wo
Ein Baum leistet mehr als 200 Kühlschränke	Artikel	31.01.2021	Süddeutsche Zeitung
Warum die Bäume noch so viel Laub führen und ist das schon Klimawandel?	Radiointerview	02.12.2019	BR
Kohlhammer „Die Robinie ist Baum des Jahres 2020“	Artikel	24.10.2019	Natur und Landschaft
Würzburger Forscher rechnet mit "Barcelona-Klima" im Maintal	Radiobeitrag	26.06.2019	BR
Artikel zum Klimarundgang in Zusammenarbeit mit der Stadt Würzburg	Artikel	Juni 2019	Main-Echo
Christian Hartmann zu Hitzesommer 2018 und das KEW-Projekt	Interview	15.03.2019	Radio Gong
Gegen Hitzestress in der Stadt hilft nur mehr Grün	Artikel	05.09.2018	Handelsblatt
Beitrag zu Sommerhitzewellen und deren Folgen für Stadtbäume	Fernsehbeitrag	05.08.2018	BR Rundschau
Warum die Stadt nachts heiß bleibt"	Artikel	09.08.2018	TASPO Baumzeitung
Warum die Stadt nachts heiß bleibt	Artikel	03.08.2018	Focus online
Warum die Stadt nachts heiß bleibt	Artikel	02.08.2018	Uni Würzburg, Main-Post und weitere
Stand am „Klimamarkt“; Bildschirmpräsentation auf dem Marktplatz Würzburg	Stand	28.04.2018	Markt
Bäume machen Stadtklima – Sensoren sollen Würzburgs Klima verbessern	Fernsehbeitrag	26.04.2018	TV Main Franken
Pressetermin auf der LGS: Klimaerlebnis Würzburg	Radiobeitrag	25.04.2018	Funkhaus Würzburg
Pressetermin auf der LGS: Klimaerlebnis Würzburg	Artikel	25.04.2018	Main-Post und andere
Würzburg: Zustand der Bäume online abrufbar	Artikel	25.04.2018	Mainfranken
Wie ist das Klima am Hubland?	Artikel	24.04.2018	Stadt Würzburg

Pressetermin zum Start der Homepage von TP6	Pressetermin	23.04.2018	Würzburg
Presseartikel zum Klimamarkt Würzburg	Artikel	23.04.2018	Mainpost
Darstellung des Projekts auf der LGS Eröffnung und Erläuterung Marcel Huber	Aktivität	12.04.2018	LGS Würzburg
Zum Thema „Landesgartenschau“ in „Zeit für Bayern“	Fernsehbeitrag	02.04.2018	Bayern 2
Von Bäumen und Betonwüsten	Artikel	14.03.2018	Lebenslinie-Gesundheitsmagazin für Mainfranken
In der Stadt wachsen die Bäume schneller	Radiointerview	20.12.2017	BR
Baumforschung: Stadtklima unter Beobachtung	Artikel	19.12.2017	TASPO Baumzeitung
Pressetermin zum Start der Messkampagne von TP6	Pressetermin	15.11.2017	Würzburg
Würzburgs Stadtklima unter Beobachtung	Artikel	17.11.2017	Universität Würzburg
Mit neuen Messstationen dem Würzburger Klima auf der Spur	Artikel	07.09.2017	Main-Post
Würzburg: Klimaerlebnis Stadt	Artikel	07.09.2017	Mainfranken24.de
Dem Klima im Würzburger Stadtgebiet auf der Spur. Umwelt: Forschungsprojekt untersucht urbane Wärmeeffekte - Sieben Messpunkte in Tal- und Randlagen	Artikel	04.09.2017	Main-Echo
Offizieller Messbeginn	Artikel	14.07.2017	Regionale und überregionale Medien: Bayerischer Rundfunk, Main-Post, Antenne Bayern, TV Touring, Funkhaus Würzburg + Streuung in diverse fachspezifische Medien

8. Glossar

Allometrie: Beziehungen zwischen Größe, Form, Anatomie und Physiologie

Anisohydrische und isohydrische Arten: Anisohydrische Arten besitzen eine hohe stomatare Leitfähigkeit auch bei geringen Wasserverfügbarkeiten und können bei Wassermangel weiter Photosynthese betreiben. Isohydrische Arten dagegen reagieren auf Trockenstress mit einer Verringerung der stomatären Leitfähigkeit zur Reduzierung von Wasserverlust. Dies kann jedoch bei lang anhaltender Trockenheit zu einem „Verhungern“ der Bäume durch fehlendes CO₂ führen. Nach der Trockenperiode kann aber eine schnelle Wiederaufnahme des normalen Stoffwechsels initiiert werden.

Blattflächenindex LAI: Blattfläche pro Bodenoberfläche m²/m²

Brusthöhendurchmesser BHD: Stammdurchmesser bzw. -umfang gemessen auf Brusthöhe (1,3 m)

Dendrochronologie: Datierungsmethode, bei der die unterschiedlich breiten Jahrringe von Bäumen bestimmten, bekannten Zeitperioden zugeordnet werden

Dendrometer: Messgerät zur hochaufgelösten Erfassung des Wachstums von Baumorganen bzw. des Schwellens und Schrumpfens des Baumstammes

Evapotranspiration: Summe aus Transpiration und Evaporation

Evaporation: Verdunstung von Wasser von unbewachsenen Oberflächen oder Wasserflächen

Feldkapazität: Wassermenge, die ein Boden gegen die Schwerkraft halten kann

Freiraumtyp: Nicht durch Gebäude bebaute Flächen, z. B. Park, Platz, Straße

Hemisphärische Bilder: Mit einem Fisheye-Objektiv erzeugte Bilder

Interzeption: Auffangen von Niederschlägen durch Äste und Blätter

Klimatologischer Kenntag: Tag, an dem ein klimatologischer Parameter einen definierten Schwellenwert erreicht, beziehungsweise über- oder unterschritten hat. Diese sind

- **Hitzetag:** Tag, an dem die Tageshöchsttemperatur 30 °C oder höher beträgt
- **Sommertag:** Tag, an dem die Tageshöchsttemperatur 25 °C oder höher beträgt
- **Tropennacht:** Tag, an dem die Tagestiefsttemperatur 20 °C oder höher beträgt
- **Frosttag:** Tag, an dem die Tagestiefsttemperatur unter 0 °C liegt
- **Eistag:** Tag, an dem die Tageshöchsttemperatur unter 0 °C liegt
- **Nebeltag:** Tag, an dem die relative Luftfeuchtigkeit 100% beträgt.
- **Schwüler Tag:** Tag, an dem die Taupunkttemperatur 16 °C oder höher beträgt

Konvektion: Vertikaler Aufstieg von Luftmassen. Insbesondere im Sommer Ursache für die Bildung von Quellwolken, aus denen Schauer- und Gewitter entstehen können (konvektive Niederschläge)

Ökosystemleistungen : Vorteile für den Menschen bzw. das Klima durch Ökosysteme

PET: Physiologisch äquivalente Temperatur

Permanenter Welkepunkt: Austrocknungsgrad des Bodens bis zur irreversiblen Welke des Baumes

Schlankheitsgrad: auch h/d-Wert (Höhe/Durchmesser) genannt, bezeichnet die Stabilität eines Einzelbaums im Bestand

Sky View Factor: Verhältnis zwischen der Strahlung auf einer ebenen Fläche und der gesamten hemisphärischen strahlenden Umgebung, berechnet als Anteil sichtbaren Himmels vom Boden aus betrachtet

Strukturdimensionen: Gemessene und berechnete Baumparameter wie Höhe, Durchmesser, Kronengröße

Thermoisoplethendiagramm: Darstellungsart, um einen Temperaturverlauf an einem bestimmten Ort über einen bestimmten Zeitraum (z.B. Jahr) abzubilden. Dabei wird nicht nur der Jahresverlauf, sondern auch der Verlauf der Temperatur in einem definierten Zeitabschnitt (Tag/ Monat) mit dargestellt.

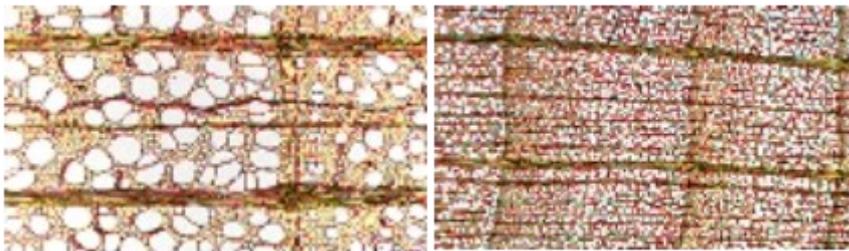
Transpiration: Verdunstung von Wasser lebender Materie (Blattfläche)

Vertex Forestor: Messgerät zur Ermittlung von Gesamthöhe und Kronenansatz von Bäumen

VPD: Dampfdruckdefizit

Wassernutzungseffizienz: Produzierte Biomasse je Einheit Wasser

Zerstreutporiges und ringporiges Holz: Verschiedene Strategien der Holzbildung; je nach Art werden entweder gleichmäßig große Wasserleitbahnen über das Jahr produziert (zerstreutporig) oder im Frühjahr großlumige Zellen und im Sommer kleinere Zellen produziert (ringporig)



Ringporiges Holz (links) und zerstreutporiges Holz (rechts)

Zyklonalität: Drehsinn einer rotierenden Luftbewegung, z.B. Druckgebilde. Tiefdruckgebiete weisen dabei eine zyklonale Strömung auf (gegen den Uhrzeigersinn), Hochdruckgebiete eine antizyklonale Strömung (im Uhrzeigersinn)

9. Literaturverzeichnis

- Berdanier, A.B., Miniat, C.F., Clark, J.S., 2016. Predictive models for radial sap flux variation in coniferous, diffuse-porous and ring-porous temperate trees. *Tree Physiol* 36, 932-941.
- Bollmeier, C., Keller, J.D., Ohlwein, C., Wahl, S., Crewell, S., Friederichs, P., Hense, A., Keune, J., Kneifel, S., Pscheidt, I., Redl, S., Steinke, S., 2015. Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 141, 1-15.
- Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M., Pullin, A.S., 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landsc Urban Plan* 97, 147-155.
- Collier, C.G., 2006. The impact of urban areas on weather. *Q J R Meteorol Soc* 132, 1-25.
- DIN EN ISO 25178-2, 2012. Geometrical product specifications (GPS)—surface texture: areal—part 2: terms, definitions and surface texture parameters.
- Drew, D.M., Downes, G.M., 2009. The use of precision dendrometers in research on daily stem size and wood property variation: A review. *Dendrochronologia* 27, 159–172.
- DWD, 2019. Deutscher Wetterdienst.
- DWD, 2021. CDC-Datencenter, abrufbar unter: <https://cdc.dwd.de/portal/> (abgerufen am 30.06.2021).
- DWD, D.W., 2001. Wetterlagen und Großwetterlagen im 20. Jahrhundert. Offenbach
- Dyderski, M.K., Paż, S., Frelich, L.E., Jagodziński, A.M., 2018. How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Glob Chang Biol* 24, 1150–1163.
- Ernst, P., Loeper, E.G., 1976. Temperatureentwicklung und Vegetationsbeginn auf dem Grünland. *Das Wirtschaftseigene Futter* 22, 5-11.
- Giorgi, F., 2019. Thirty years of regional climate modeling: Where are we and where are we going next? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124, 5696– 5723.
- Goldbach, A., Kuttler, W., 2015. Turbulent heat fluxes above a suburban reservoir: a case study from Germany. *Journal of Hydrometeorology* 16, 244-260.
- Granier, A., 1987. Evaluation of transpiration in a douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology* 3, 309-319.
- Hammel, C., 2019. Wachstum und Ökosystemleistungen von Stadtbäumen in Abhängigkeit von Standort und Baumart unter extremer Trockenheit Technical University of Munich, München.
- Hendel, H., Azos-Diaz, K., Tremeac, B., 2017. Behavioral adaptation to heat-related health risks in cities. *Energy and Buildings* 152, 823-829.
- Hübener, H., Bülow, K., Fooker, C., Früh, B., Hoffmann, P., Höpp, S., Keuler, K., Menz, C., Mohr, V., Radtke, K., Ramthun, H., Spekat, A., Steger, C., Toussaint, F., Warrach-Sagi, K., Woldt, M., 2017. ReKliEs-De Ergebnisbericht. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ.
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. IPCC Working Group I Contribution to AR5.
- Jamei, E., Rajogopalan, P., Seyedmahmoudian, M., Jamei, Y., 2016. Review of the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. *Renew Sust Energ Rev* 54, 1002-1017.
- Jendritzky, G., 1990. Methodik zur Räumlichen Bewertung der Thermischen Komponente im Bioklima des Menschen: Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell.
- Jendritzky, G., Nübler, W., 1981. A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms. *Archives for meteorology, geophysics, and bioclimatology, Series B* 29, 313-326.
- Ke, N., 2019. Evaluation of public awareness, perception and attitude on urban green infrastructure and the impact of social-economic factors: A case study of the project "Climate Experience Würzburg". Technische Universität München, Freising.
- Kempkens, V., 2021. Ableitung von Wachstumsparametern und Wasserhaushaltsgrößen von Stadtbäumen aus Dendrometerdaten. Technische Universität München, Freising.

- Keresztesi, B., 1988. The black locust, Budapest: Akadémiai Kiadó.
- Kuchling, H., 2014. Taschenbuch der Physik. Mit zahlreichen Tabellen. 21., aktualisierte Aufl., Jub.-Ausg. 50 Jahre. Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., München.
- Kuttler, W., 2004. Stadtklima., Teil 1: Grundzüge und Ursachen. Umweltwissenschaften und Schadstoffforschung. Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie 16, 187–199.
- Lang, W., Pauleit, S., Brasche, J., Hausladen, G., Maderspacher, J., Schelle, R., Zölch, T., 2018. Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern. Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt am Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung. TU München, München.
- Lanza, K., Stone Jr, B., 2016. Climate adaptation in cities: What trees are suitable for urban heat management? *Landsc Urban Plan* 153, 74-82.
- Lasdon, L.S., Fox, R.L., Ratner, M.W., 1974. Nonlinear optimization using the general-ized reduced gradient method. *Revue française d'automatique, informatique, recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle* 8, 73-103.
- Limmer, T., 2018. Stadtbäume in Würzburg: Wie die Öffentlichkeit durch Informationsvisualisierungen sensibilisiert werden kann. HAW München, TU München, München.
- Littell, J.S., Peterson, D.L., Tjoelker, M., 2008. Douglas-fir growth in mountain ecosystems: water limits tree growth from stand to region. *Ecological Monographs* 78, 349-368.
- Liu, J.-C., Häberle, K.-H., Loris, K., 1994. Untersuchungen zum Einfluß des Matrixpotentials im Boden auf Stammstärkenänderungen von Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 158, 231-234.
- MA, 2005. Millennium Ecosystem Assessment, Ecosystems and Human Wellbeing: Synthesis, Washington, DC.
- Maras, I., Schmidt, T., Paas, B., Ziefle, M., Schneider, C., 2016. The impact of human-bio-meteorological factors on perceived thermal comfort in urban public places. *Meteorologische Zeitschrift* 25, 407-420.
- Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H., 2007. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. *Int J Biometeorol* 51, 323–334.
- Moser-Reischl, A., Rahman, M.A., Pauleit, S., Pretzsch, H., Rötzer, T., 2019. Growth patterns and effects of urban micro-climate on two physiologically contrasting urban tree species. *Landscape and Urban Planning* 183, 88-99.
- Moser, A., Rötzer, T., Pauleit, S., Pretzsch, H., 2018. Stadtbäume: Wachstum, Funktionen und Leistungen - Risiken und Forschungsperspektiven. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 188, 94-111.
- Nitschke, C.R., Nichols, S., Allen, K., Dobbs, C., Livesley, S.J., Baker, P.J., Lynch, Y., 2017. The influence of climate and drought on urban tree growth in southeast Australia and the implications for future growth under climate change. *Landsc Urban Plan* 167, 275-287.
- Paeth, H., Pollinger, F., 2019. Changes in mean flow and atmospheric wave activity in the North Atlantic sector. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 145, 3801–3818.
- Paeth, H., Stender, F., Aich, V., Mächel, H., 2012. Regional climate change and implications for tick activity in Germany. *Adv. Sci. Lett.* 5, 149-154.
- Paudel, I., Kanety, T., Cohen, S., 2013. Inactive xylem can explain differences in calibration factors for thermal dissipation probe sap flow measurements. *Tree Physiol* 33, 986-1001.
- Prentice, C., Sykes, M.T., Cramer, W., 1993. A simulation model for the transient effects of climate change on forest landscapes. *Ecological Modelling* 65, 51-70.
- Pretzsch, H., Biber, P., Uhl, E., Dahlhausen, J., Schütze, G., Perkins, D., Rötzer, T., Calden-tey, J., Koike, T., van Con, T., Chavanne, A., du Toit, B., Foster, K., Lefer, B., 2017. Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide. *Scientific Reports* 7, 10.
- Radoglou, K., Dobrowolska, D., Spyroglou, G., Nicolescu, V.-N., 2009. A review on the ecology and silviculture of limes (*Tilia cordata* Mill., *Tilia platyphyllos* Scop. and *Tilia tomentosa* Moench.) in Europe. *Die Bodenkultur* 60, 9-19.

- Rahman, M.A., Hartmann, C., Moser-Reischl, A., Strachwitz, M., Paeth, H., Pretzsch, H., Pauleit, S., Rötzer, T., 2020. Tree cooling effects and human thermal comfort under contrasting species and sites. *Agric For Meteorol* 287, 13.
- 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.
- Rauh, J., Paeth, H., 2011. Anthropogener Klimawandel und Weinwirtschaft: Wahrnehmung und Anpassungsmaßnahmen fränkischer Winzer auf den Wandel klimatischer Bedingungen. *Berichte zur deutschen Landeskunde* 85, 151-177.
- Rötzer, T., Rahman, M.A., Moser-Reischl, A., Pauleit, S., Pretzsch, H., 2019. Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions. *Science of the Total Environment* 676, 651-664.
- Scherer, D., Endlicher, W., 2013. Urban climate and heat stress-Part 1. *DIE ERDE—Journal of the Geographical Society of Berlin* 144, 175-180.
- Schwab, N., Kaczka, R.J., Janecka, K., Böhner, J., Chaudhary, R.P., Scholten, T., Schickhoff, U., 2018. Climate Change-Induced Shift of Tree Growth Sensitivity at a Central Himalayan Treeline Ecotone. *Forests* 9, 267.
- Seidel, J., Ketzler, G., Bechtel, B., Thies, B., Philipp, A., Böhner, J., Egli, S., Eisele, M., Herma, F., Langkamp, T., Petersen, E., Sachsen, T., Schlabling, D., Schneider, C., 2016. Mobile measurement techniques for local and micro-scale studies in urban and topoclimatology. *Die Erde* 147, 15-39.
- Spittlehouse, D., Stewart, R.B., 2003. Adaptation to climate change in forest management. *BC Journal of Ecosystems and Management* 4, 1-11.
- StMUV, B.S.f.U.u.V., 2021. Klima-Report Bayern 2021. Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten. 196.
- Stratopoulos, L.M.F., Zhang, C., Duthweiler, S., Häberle, K.H., Rötzer, T., Xu, C., Pauleit, S., 2018. Tree species from two contrasting habitats for use in harsh urban environments respond differently to extreme drought. *Int J Biometeor* 63, 197-208.
- Zölch, T., Maderspacher, J., Wamsler, C., Pauleit, S., 2016. Using green infrastructure for urban climate-proofing: An evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale. *Urban Forestry & Urban Greening* 20, 305-316.

10. Anlage

DWD Niederschlagsintensitäten

Regen: (auch zusammen mit Sprühregen, inkl. Gefrierender Regen/ unterkühlter Regen)

leicht: Niederschlagshöhe in 60 Minuten < 2,5 mm, in 10 Minuten < 0,5 mm

mäßig: Niederschlagshöhe in 60 Minuten \geq 2,5 mm bis < 10,0 mm, in 10 Minuten \geq 0,5 mm bis < 1,7 mm

stark: Niederschlagshöhe in 60 Minuten \geq 10,0 mm, in 10 Minuten \geq 1,7 mm

sehr stark: Niederschlagshöhe in 60 Minuten \geq 50,0 mm, in 10 Minuten \geq 8,3

Sprühregen/ Nieselregen: (inkl. Gefrierender/ unterkühlter Sprühregen)

leicht: Niederschlagshöhe < 0,1 mm in 60 Minuten

mäßig: Niederschlagshöhe \geq 0,1 mm bis < 0,5 mm in 60 Minuten

stark: Niederschlagshöhe \geq 0,5 mm in 60 Minuten

Regenschauer: (inkl. Graupel/ Hagel)

leicht: Niederschlagshöhe in 10 Minuten < 0,5 mm

mäßig: Niederschlagshöhe in 10 Minuten: \geq 0,5 mm bis < 1,7 mm

stark: Niederschlagshöhe in 10 Minuten \geq 1,7 mm

sehr stark: Niederschlagshöhe in 10 Minuten \geq 8,3 mm

Quelle: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101812&lv3=101906>