



Hochschule für Forstwirtschaft
Rottenburg

Hochschule für Angewandte Wissenschaften

BACHELORARBEIT

Im Studiengang
B. Sc. Forstwirtschaft

Seitliche Multispektralanalyse zur
Bestimmung von Trockenstress an Bäumen
unter Verwendung von Vollspektrumlampen,
Bodenfeuchtesensoren und Xylem-
Widerstandssensoren

Simon Spittel

Allgemeine Angaben

Verfasser: Simon Spittel
Friedrichstraße 15
72072 Tübingen
Studiengang B.Sc. Forstwirtschaft
Matrikelnummer: 201846

Erstprüfer: Prof. Dr. Dirk Wolff
Professur für Waldarbeit und Forsttechnik
Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg

Zweitprüferin: Ruth Morell
Institut für Arboristik
Neckarhalde 84
72108 Rottenburg am Neckar

Hochschule: Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg
Schadenweilerhof
72108 Rottenburg am Neckar

Copyright

© 2024

D-72108 Rottenburg am Neckar

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung, Verbreitung und Übersetzung vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form ohne schriftliche Genehmigung reproduziert oder über elektronische Systeme verbreitet werden. Die Genehmigung ist bei dem Autor einzuholen. Bei gesperrten Arbeiten ist jegliche Art der Weiterverbreitung verboten.

Hinweis zur gendergerechten Sprache

Diese Arbeit verfolgt einen diskriminierungsfreien und geschlechtergerechten Ansatz. Wo möglich, werden geschlechtsneutrale – ansonsten geschlechtssensible – Sprachformen verwendet, um Menschen aller Geschlechter zu inkludieren.

Danksagung

Danken möchte ich im Vorhinein allen die mich beim Schreiben der Arbeit und bei der Versuchsdurchführung unterstützt haben.

Hierzu gehören allen voran meine Bachelorarbeitsbetreuenden Ruth Morell und Prof. Dr. Wolff, welche mich bei jeglicher Frage unterstützten und mir bei allen Problemen zur Seite standen.

Des Weiteren möchte ich mich bei Jakob Ulmer und der Baumschule Ulmer bedanken, welche mir sehr unkompliziert die benötigten Pflanzen bereitstellten und mich bei allen Fragen zu diesen mit Ihrem Wissen unterstützt haben.

Außerdem möchte ich mich bei der Firma Arboa e.K. tree safety und Herrn Dr.-Ing. Lothar Wessolly bedanken, welche mir die TreeSense Sensoren kostenlos zur Verfügung gestellt haben.

Ganz besonderer Dank gilt auch der Firma euroLighting GmbH, welche sofort großes Interesse an dem Forschungsthema zeigte und mir unkompliziert Vollspektrumlampen aus Ihrem Sortiment zur Verfügung stellten. Ohne diese Unterstützung wäre der Versuch nicht umsetzbar gewesen.

Danke sagen möchte ich auch bei Ulrike Märkel aus dem GIS-Labor der Hochschule, welche mich bei allen Fragen rund um die Datenauswertung unterstützte und mich auch zu dieser Bachelorarbeit ermutigt hat.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, welche mich beim Korrekturlesen und während meines gesamten Studiums unterstützt und begleitet hat, allen voran meine Schwester Rebecca Spittel und meine Freundin Michelle Modjesch.

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	VI
TABELLENVERZEICHNIS.....	VII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	VIII
ZUSAMMENFASSUNG	IX
ABSTRACT	X
1 EINLEITUNG.....	1
2 STAND DES WISSENS.....	4
2.1 BIOLOGISCHE HINTERGRÜNDE	4
2.1.1 PHOTOSYNTHESE.....	4
2.1.2 FUNKTIONEN DES WASSERS.....	5
2.1.3 WASSERHAUSHALT.....	5
2.1.4 WASSERAUFNAHME	5
2.1.5 WASSERTRANSPORT	7
2.1.6 TROCKENSTRESS	8
2.2 FEUCHTIGKEITSBESTIMMUNG	10
2.2.1 BODENFEUCHTIGKEIT UND BODENFEUCHTEBESTIMMUNG.....	10
2.2.1.1 BODENFEUCHTEBESTIMMUNG MIT WIDERSTANDSSENSOREN.....	10
2.2.1.2 BODENFEUCHTEBESTIMMUNG MIT TENSIO-METER	11
2.2.2 PFLANZENWASSERGEHALT UND DESSEN MESSUNG MIT IMPEDANZ-SENSOREN	11
2.3 BAUMARTEN.....	12
2.3.1 FELD-AHORN.....	12
2.3.2 SAND-BIRKE.....	12
2.4 FERNERKUNDUNG	13
2.4.1 ELEKTROMAGNETISCHE FERNERKUNDUNG.....	13
2.4.2 FERNERKUNDUNGSSENSOREN	15
2.4.2.1 AKTIVE FERNERKUNDUNG	15
2.4.2.2 PASSIVE FERNERKUNDUNG.....	16
2.4.2.3 MULTISPEKTRALKAMERAS IN DER PASSIVEN FERNERKUNDUNG	17
2.4.3 TRÄGERPLATTFORMEN	18
2.4.3.1 SATELLITENPLATTFORMEN	18
2.4.3.2 FLUGZEUGPLATTFORMEN	19
2.4.3.3 PERSONENLOSE FLUGSYSTEME (UAS).....	19
2.4.3.4 STATISCHE PLATTFORMEN	21
2.4.4 VITALITÄTSBEURTEILUNG IN DER FERNERKUNDUNG	21
2.4.4.1 VEGETATIONSINDIZES	22
3 MATERIAL UND METHODEN.....	24
3.1 ZIEL DES VERSUCHS.....	24
3.2 VERSUCHSPFLANZEN.....	24
3.2.1 VORÜBERLEGUNGEN	24
3.2.2 PFLANZEN	24
3.3 SENSORIK	25
3.3.1 KAMERA-SYSTEM	25
3.3.1.1 KALIBRIERUNG DES KAMERA-SYSTEMS.....	26
3.3.2 TREESENSE PULSE.....	27
3.4 VOLLSPEKTRUMLAMPEN.....	27
3.5 SOFTWARE ZUR DATENVERARBEITUNG.....	28
3.6 VERSUCHSAUFBAU.....	29

3.6.1	DUNKELKAMMER	29
3.6.2	KAMERAMONTAGE	29
3.6.3	GIEßINTERVALL	30
3.7	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	32
3.7.1	SENSOREINBAU	32
3.7.2	DATENAUFNAHME	33
3.8	AUSWERTUNG DER DATEN	34
3.8.1	BILDDATEN.....	34
3.8.2	TREESENSE SENSORDATEN.....	36
3.8.3	STATISTISCHE AUSWERTUNG.....	36
4	ERGEBNISSE	38
4.1	AUGENSCHENLICHE ERGEBNISSE.....	38
4.2	DESKRIPTIVE DATENAUSWERTUNG.....	39
4.3	ANALYTISCHE DATENAUSWERTUNG.....	42
4.3.1	ZWEISEITIGER T-TEST FÜR UNABHÄNGIGE STICHPROBEN	42
4.3.2	KORRELATIONSANALYSE DER GRUPPEN MIT DER BODENFEUCHTE UND DEM TEMPERATURBEREINIGTEN WIDERSTAND.....	48
4.3.3	REGRESSIONSANALYSE.....	50
5	DISKUSSION	55
5.1	DISKUSSION DES VERWENDETEN MATERIALS.....	55
5.1.1	KAMERA-SYSTEM	55
5.1.2	SOFTWARE.....	55
5.1.3	TREESENSE-SENSORIK	56
5.1.4	VOLLSPEKTRUMLAMPEN.....	56
5.1.5	VERSUCHSBÄUME	57
5.2	DISKUSSION DER METHODIK.....	58
5.2.1	ALLGEMEINER VERSUCHSAUFBAU.....	58
5.2.2	IMPEDANZMESSUNG	59
5.2.3	AUSWERTUNG DES NDVI.....	59
5.2.4	STATISTISCHE AUSWERTUNG.....	60
5.3	DISKUSSION DER ERGEBNISSE.....	60
5.3.1	GEMESSENE DATEN.....	60
5.3.2	STATISTISCHE ERGEBNISSE.....	61
6	FAZIT.....	64
	LITERATURVERZEICHNIS.....	66
	ANHANG	73
	EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG.....	86

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Elektromagnetisches Spektrum	15
Abbildung 2: Parrot Sequoia	25
Abbildung 3: Kalibrierungspanel AIRINOV	26
Abbildung 4: Vollspektrumlampen PAR38	28
Abbildung 5: Dunkelkammer	29
Abbildung 6: Abnehmbares Vlies der Dunkelkammer	29
Abbildung 7: GoPro-Schnelladapter	30
Abbildung 8: selbstgedruckte Kamerahaltung	30
Abbildung 9: Nutsystem zur Kamerapositionierung.....	30
Abbildung 10: Kamerabefestigung	30
Abbildung 11: Elektrodenadapter.....	32
Abbildung 12: Bodenfeuchtesensor	32
Abbildung 13: Antenne und LoRaWan-Gateway.....	33
Abbildung 14: Beispiel NDVI - Feld-Ahorn Nr. 3 - 22.04.2024	34
Abbildung 15: Bildbearbeitungsschritte – oberer Kronenbereich.....	35
Abbildung 16: Bildbearbeitungsschritte – unterer Kronenbereich.....	35
Abbildung 17: Läusebefall - Feld-Ahorn Nr. 1	38
Abbildung 18: Bohrlöcher - Birke Nr. 2.....	38
Abbildung 19: Streudiagramm des temperaturbereinigten Widerstands und NDVI-Oben inklusive Regressionsgerade	54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: UAS-Kategorien nach EASA Vorschriften.....	20
Tabelle 2: Ausgangsparameter der genutzten Pflanzen	25
Tabelle 3: Wellenlängenbänder des Parrot Sequoia	26
Tabelle 4: Gießintervall nach TreeSense Baumstatus	31
Tabelle 5: Finalparameter der genutzten Pflanzen	38
Tabelle 6: Aufnahmeblatt - Feld-Ahorn Nr. 1	39
Tabelle 7: Arithmetisches Mittel und prozentuale Unterschiede des Widerstands, temperaturbereinigten Widerstandes und der Bodenfeuchte je Birkenpflanzen in Woche 1 und 5	40
Tabelle 8: Arithmetisches Mittel und prozentuale Unterschiede des Widerstands, temperaturbereinigten Widerstandes und der Bodenfeuchte je Feld- Ahornpflanzen in Woche 1 und 5	41
Tabelle 9: Ergebnisse des t-Test und Levene-Test für Birke Nr. 1 und Nr. 2.....	43
Tabelle 10: Ergebnisse des t-Test und Levene-Test für Birke Nr. 1 und Nr. 3	44
Tabelle 11: Ergebnisse des t-Test und Levene-Test für Birke Nr. 2 und Nr. 3	44
Tabelle 12: Ergebnisse des t-Test und Levene-Test für Feld-Ahorn Nr. 1 und Nr. 2	45
Tabelle 13: Ergebnisse des t-Test und Levene-Test für Feld-Ahorn Nr. 1 und Nr. 3	45
Tabelle 14: Ergebnisse des t-Test und Levene-Test für Feld-Ahorn Nr. 2 und Nr. 3	46
Tabelle 15: Ergebnisse des t-Test und Levene-Test für Gruppe 1 und 3.....	47
Tabelle 16: Ergebnisse des t-Test und Levene-Test für Gruppe 2 und 4.....	47
Tabelle 17: Kreuztabelle der Korrelation zwischen NDVI-Oben, Bodenfeuchte, Widerstand und temp. Widerstand der Gruppe 1	48
Tabelle 18: Korrelation zwischen NDVI-Unten, Bodenfeuchte und temp. Widerstand der Gruppe 2	49
Tabelle 19: Korrelation zwischen NDVI- Unten, Bodenfeuchte und temp. Widerstand der Gruppe 3	49
Tabelle 20: Korrelation zwischen NDVI- Unten, Bodenfeuchte und temp. Widerstand der Gruppe 4	50
Tabelle 21: Korrelation zwischen NDVI- Unten, Bodenfeuchte und temp. Widerstand der Gruppe 5	50
Tabelle 22: Regressionsanalyse - NDVI-Oben und dem temp. Widerstand - Gruppe 1	51
Tabelle 23: Regressionsanalyse - NDVI-Oben und der Bodenfeuchte - Gruppe 1	51
Tabelle 24: Regressionsanalyse - Bodenfeuchte und NDVI-Unten - Gruppe 3.....	52
Tabelle 25: Regressionsanalyse – temp. Widerstand und NDVI-Unten - Gruppe 5	52
Tabelle 26: Regressionsanalyse - Bodenfeuchte und NDVI-Unten - Gruppe 5.....	53

Abkürzungsverzeichnis

μm	<i>Mikrometer</i>
Birke Nr. 1	<i>Bi1</i>
Birke Nr. 2	<i>Bi2</i>
Birke Nr. 3	<i>Bi3</i>
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	<i>Glucose</i>
CO_2	<i>Kohlenstoffdioxid</i>
Feld-Ahorn Nr. 1	<i>FA1</i>
Feld-Ahorn Nr. 2	<i>FA2</i>
Feld-Ahorn Nr. 3	<i>FA3</i>
GIS.....	<i>Geoinformationssystem</i>
H_2O	<i>Wasser</i>
$\text{k}\Omega$	<i>Kiloohm</i>
m. ü. NN.....	<i>Meter über Normalnull</i>
NDVI.....	<i>normalisierter differenzierter Vegetationsindex</i>
nFk.....	<i>nutzbare Feldkapazität</i>
nm.....	<i>Nanometer</i>
pf-Wert.....	<i>Wasserspannung</i>
RENDVI.....	<i>Red Edge normalized difference vegetation Index</i>
Signifikanz.....	<i>Sig.</i>
temperaturbereinigter Widerstand	<i>temp. Widerstand</i>
UAS.....	<i>Unmanned Aerial System, personenloses Flugsystem</i>

Zusammenfassung

Der Klimawandel stellt nicht nur die Forstwirtschaft, sondern auch die Stadtbaumpflege im urbanen Raum vor enorme Herausforderungen. Steigende Trockenheit und zunehmende Temperaturen sind bedeutsame Stressoren für den Stadtbaumbestand. Dabei ist es die Aufgabe der Stadtbaumpflege, den Zustand der Bäume zu erfassen und Schädigungen durch sorgsame Planung, präventiv und akut entgegenzuwirken. Eine in der Forstwirtschaft gängige Methode zur Analyse von Vegetation ist die Befliegung durch Drohnen und die Aufnahme von Multispektraldaten. Da eine Befliegung im urbanen Raum aufgrund rechtlicher Beschränkungen meist nicht möglich ist, bedarf es neuer Untersuchungsansätze, um klimabedingte Auswirkungen und Schäden des Stadtbaumbestandes zukünftig besser zu erfassen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, zu klären, ob seitliche Multispektralaufnahmen einer Baumkrone und die Berechnung des normalisierten differenzierten Vegetationsindex aus diesen Bilddaten eine taugliche Methode für die Erkennung von Trockenstress sind. Um diese Forschungsfrage zu beantworten, wurde ein Laborversuch unter Zuhilfenahme moderner Impedanz-Sensorik, Vollspektrumlampen und einer Dunkelkammer zur Ermittlung des NDVI durchgeführt. In einer Korrelationsanalyse wurde dann überprüft, ob sich der durch die Impedanz-Sensoren gemessene Trockenstress in den Multispektralbildern abbildet. Dunkelkammer und Vollspektrumlampen, sollten dabei mögliche Störfaktoren, wie atmosphärische Einflüsse und Beschattung durch wechselnde Wetterbedingungen bei der Multispektralaufnahme beseitigen. Im Versuch wurden Pflanzen der Baumarten *Betula-Pendula* und *Acer campestre* unter künstlichen Trockenstress gesetzt und täglich mit einer Multispektralkamera fotografiert.

Die Arbeit stellt eine Korrelation zwischen den Parametern temperaturbereinigter Widerstand und Bodenfeuchte, welche den Trockenstress abbilden, und dem NDVI fest. Diese Korrelation ist dabei vor allem bei den Messwerten des oberen Kronenbereichs der Pflanzen des Versuchs gegeben, wobei die Messwerte des unteren Kronenbereich durch Beschattung und mangelnde Strahlungsstärke der Vollspektrumlampen für die Fragestellung keine gleichbleibenden Ergebnisse liefert.

Ausgehend von den Ergebnissen dieser Arbeit könnte sich weiterführende Forschung im Bereich der seitlichen Multispektralanalyse auf die praktische Anwendung der in dieser Arbeit angewendeten Methode sowie auf die Einflüsse der Blattgröße und -ausrichtung auf die erfassten Bilddaten fokussieren.

Abstract

Climate change poses enormous challenges not only for forestry but also for arboriculture in urban areas. Increasing drought and rising temperatures are significant stressors for urban trees. It is the task of arboriculture to assess the condition of the trees and to counteract damage through careful planning, both preventively and acutely. A common method that is used in forestry to analyze vegetation is aerial photography using drones and the recording of multispectral data. As aerial surveys are usually not possible in urban areas due to legal restrictions, new research approaches are needed to better record climate-related effects and damage to urban tree populations in the future.

The aim of the present work is to clarify whether lateral multispectral images of a tree crown and the calculation of the Normalized Differentiated Vegetation Index from these image data are a suitable method for the detection of drought stress. To answer this research question, a laboratory experiment was conducted using modern impedance sensors, full spectrum lamps and a darkroom to determine the NDVI. A correlation analysis was then carried out to check whether the dry stress measured by the impedance sensors was reflected in the multispectral images. Darkroom and full spectrum lamps were used to eliminate possible interfering factors such as atmospheric influences and shading due to changing weather conditions during the multispectral recording. In the experiment, plants of the tree species *Betula pendula* and *Acer campestre* were placed under artificial drought stress and photographed daily with a multispectral camera.

The thesis detects a correlation between the parameters, temperature-adjusted resistance and soil moisture, which represent the drought stress and the NDVI. This correlation of the aforementioned parameters is particularly evident in the measured values of the upper canopy area of the plants, whereby the measured values of the lower canopy area do not provide consistent results for the research question due to shading and insufficient radiation intensity of the full-spectrum lamps.

Based on the results, further research in the field of lateral multispectral analysis could focus on the practical application of the method used in this thesis as well as on the influences of leaf size and orientation on the recorded image data.

1 Einleitung

Die Mehrheit der Menschen weltweit lebt mittlerweile in urbanen Regionen (Nations Unies, 2014, S. 7). Urbane Ballungsräume unterscheiden sich von ihrer ländlichen Umgebung nicht nur durch die gebauten Strukturen und die deutlich höhere Bevölkerungsdichte, sondern vielmehr auch durch klimatisch besondere Bedingungen (Winker et al., 2019, S. 650). Diese sind beispielsweise ein erhöhter Anteil versiegelter Fläche, ein höheres Verkehrsaufkommen und damit einhergehend eine schlechte Luftqualität, ein höheres Feinstaubaufkommen, eine höhere Lärmbelastung, sowie erhöhte Maximaltemperaturen und eine starke Wärmespeicherung, auch „städtischer Wärmeinseleffekt“ genannt (Gong et al., 2012, S. 843; Scalenghe & Marsan, 2009, S. 4; Wilby, 2003, S. 251). Diese Effekte der Urbanisierung bestimmen alle sozialen, ökonomischen und ökologischen Belange der Bevölkerung. Lärmbelastung, hohe Temperaturen und hohes Feinstaubaufkommen sind nachweislich gesundheitsschädigend (Foraster et al., 2011, S. 177–178). Alle genannten Auswirkungen werden durch den Klimawandel verstärkt: So prognostiziert auch das International Panel on Climate Change (IPCC) in ihrem Bericht aus dem Jahre 2014 (2015, S. 10) nach dem Klimaszenario 8.5 eine durchschnittliche globale Erwärmung von 4.5 °C, was den Wärmeinseleffekt drastisch verschärfen wird (Corburn, 2009; Stocker, 2014). Um diesen globalen Entwicklungen entgegenzuwirken, spielt vor allem die regionale städtische Entwicklung durch Anreicherung von städtischem Grün eine entscheidende Rolle. Im stadtgesellschaftlichen Diskurs wird laut Tyrväinen et al. (2005, S. 81) „städtisches Grün“ vor allem mit Stadtbäumen assoziiert, auch wenn darunter ebenso Parks, Grünflächen und kleiner Pflanzen zu zählen sind.

Tyrväinen et al. (2005, S. 81) nennt dabei verschiedenste Funktionen für Stadtbewohner*innen, deren Wohlbefinden und Gesundheit. Hierzu gehören neben physikalischen Funktionen wie der Beschattung und der damit einhergehenden Kühlung, der Feinstaubminimierung durch Filterung, der Verbesserung der Luftqualität und der Minderung von Windgeschwindigkeiten ebenso optische Funktionen wie die grundlegende Gestaltung und Diversifizierung des städtischen Raums. Nicht zu vergessen sind auch die damit verbundenen Lebensräume für Flora und Fauna, welche zum Erhalt seltener Arten beitragen (Moser et al., 2017, S. 99–100). Die vielschichtigen Funktionen von Stadtbäumen zeigen: Ein Erhalt bzw. eine Anreicherung von städtischem Grün im urbanen Raum ist von hoher Priorität.

Im Kontrast zu Waldbäumen sind Stadtbäume jedoch besonderen Belastungen ausgesetzt, unter anderem erhöhten Temperaturen, Streusalzeintrag, Bodenverdichtung und -versiegelung,

Wassermangel und verkehrstechnischen Schnittmaßnahmen (Moser et al., 2017, S. 96). Diese Belastungsfaktoren werden allumfänglich durch den Klimawandel verstärkt. Vor allem der Stress durch sommerliche Trockenheit, ausbleibende Niederschläge und stärkere Hitzeereignisse nehmen massiv zu (Roloff et al., 2013).

Angesichts dieser Herausforderungen und der zentralen Bedeutung von Bäumen für den Lebensraum ‚Stadt‘ müssen Bäume bestmöglich vor schädlichen Einflüssen geschützt werden. Durch die Verschärfung der negativen Einflüsse auf Bäume werden regelmäßige Kontrollen hinsichtlich Sicherheit und Vitalität sowie die Beurteilung von Schäden und Risiken immer wichtiger. Die Stadtbaumkontrollen werden zwar teilweise durch Messinstrumente unterstützt, in den allermeisten Fällen erfolgen die Baumkontrollen aber rein optisch und beziehen sich allein auf die menschliche Interpretation des Wahrgenommenen. Dies ist auch dem Fakt geschuldet, dass sich die Stadtbaumforschung stark von den Vorannahmen der allgemeinen Forstwissenschaften – beispielsweise hinsichtlich Standort, Standorteinflüssen und Nährstoffkreisläufen – unterscheidet und die Forschungsdisziplin noch vergleichsweise jung ist (Moser et al., 2017, S. 95). In der Forstwirtschaft hingegen ist die Beurteilung von Bäumen und Waldflächen anhand von Fernerkundung und Drohnendaten bereits in der Praxis angekommen. Anhand dieser Fernerkundungsdaten ist es möglich auf deren Vitalitätszustand, beispielweise auf Wassermangel oder Krankheiten, zu schließen (Immitzer et al., 2018). Da Drohnenaufnahmen, beziehungsweise der Flug mit diesen, jedoch rechtlichen Beschränkungen unterliegen und in bewohntem Gebiet sogar teilweise untersagt sind, stellt sich die Frage ob und wie solche Daten auch für die Vitalitätsbeurteilung von Stadtbäumen erfasst und ausgewertet werden können.

Eine Möglichkeit, die angesichts der rechtlichen Begebenheiten vor allem im urbanen Raum von Interesse ist, sind seitliche Baumaufnahmen, die vom Boden aus gemacht werden. Während Drohnenaufnahmen der Baumkrone von oben schon sehr gut erforscht sind, gibt es zu seitlichen Baumaufnahmen bisher keine Forschung. Diese Arbeit beschäftigt sich deshalb damit, ob eine seitliche Aufnahme in die Baumkrone aussagekräftige Ergebnisse bezüglich der Vitalität des Baumes liefern kann. Dadurch soll grundlegend erörtert werden, ob diese eine sinnvolle Ergänzung zu bisherigen Stadtbaumkontrollen darstellen.

Leitgebend bei der Konzeption der Arbeit und der Ausarbeitung der Fragestellung waren Erfahrungen während meines Studiums und meines Praxissemesters. In meinem Studium der Forstwirtschaft konnte ich mich eingehend mit der Fernerkundung und deren Einsatzgebieten beschäftigen. Während meines Praxissemesters ist mir dabei jedoch immer wieder die Problematik der fehlenden Digitalisierung und der häufig mangelnde Einsatz von modernen

technischen Messinstrumenten im forstwissenschaftlichen Bereich aufgefallen. Mich beschäftigt dabei auch die Frage, wie technischer Fortschritt Hinweise und Daten liefern kann, um Stress von Bäumen zu erfassen, um daraus fundierte Maßnahmen zur Stressbekämpfung entwickeln und einleiten zu können.

Im Rahmen der Bachelorarbeit wird anhand eines Laborversuchs die Effektivität und Genauigkeit von Seitenaufnahmen durch eine Multispektralkamera zur Ermittlung von Trockenstress an zwei Baumarten untersucht. Unter Verwendung von moderner Sensortechnik, welche den Trockenstress mittels elektrischen Widerstandes misst, wird nachgeprüft, ob es eine statistische Korrelation zu den durch die fotooptischen Aufnahmen ermittelten Werten gibt. Diese Bachelorarbeit ist als Grundlagenarbeit zu verstehen und dient der Klärung dieser Frage. Zu Beginn der Arbeit wird in Kapitel 2 der aktuelle wissenschaftliche Stand zu den biologischen Hintergründen der Pflanzen und die Reaktionen auf Stress, insbesondere der für die Fragestellung relevante Trockenstress und dessen Erfassung, aufgezeigt. Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über die Ansprüche der im Versuch eingesetzten Baumarten Birke und Feld-Ahorn gegeben. Darauf folgen die Grundlagen der Fernerkundung insbesondere die der elektromagnetische Fernerkundung und verschiedene Aspekte dieser. Abgeschlossen wird das Kapitel der Fernerkundung mit gängigen Methodiken zu Analyse von Vegetation unter anderem des im Versuch eingesetzten Index. In Kapitel 3 wird der Versuchsaufbau und die darin eingesetzten Materialien und Methoden erläutert, woraufhin im nachfolgenden Kapitel 4 die Ergebnisse des Versuchs statistisch und deskriptiv ausgewertet werden. Abschließend werden die Ergebnisse interpretiert und eingeordnet sowie mögliche Alternativen diskutiert, gefolgt von einem kurzen Ausblick und einem persönlichen Fazit.

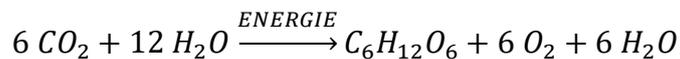
2 Stand des Wissens

2.1 Biologische Hintergründe

2.1.1 Photosynthese

Die Photosynthese (syn. ‚Assimilation‘) ist „nach Menge und Bedeutung der wichtigste biologische Prozess auf der Erde“, weshalb davon auszugehen ist, dass das meiste irdische Leben auf diesen chemischen Prozess zurückzuführen ist (Ruge, 2023). Bei diesem Prozess wird Lichtenergie, unter Nutzung des in der Umgebungsluft vorhandenen Kohlenstoffdioxids (CO₂) und Wasser (H₂O) in energiereichen Kohlenstoffverbindungen gespeichert. Grundvoraussetzung sind dabei günstige Bedingungen, genauer: ausreichend Wasser, Licht, Nährstoffe, Kohlenstoffdioxid und Wärme (Bonn et al., 2023, S. 59).

Formel 1: Reaktionsgleichung der Photosynthese (Quelle: Strasburger & Sitte, 2002, S. 288)



Grüne Pflanzenteile, dazu gehören Blätter, deren Chloroplasten und speziell die dort vorhandenen Chlorophyllkörper, absorbieren das Licht. Diese Energie wird genutzt um CO₂ und H₂O in Glucose (C₆H₁₂O₆) umzuwandeln (Ruge, 2023). Wie der Reaktionsgleichung (vgl. Formel 1) zu entnehmen ist, wird hier vor allem Wasser und Sauerstoff freigesetzt. Bonn et al. (2023, S. 59–60) beschreiben den Reaktionsverlauf in zwei Teilschritten. Im ersten Teilschritt wird die Lichtenergie aufgenommen und in einer energiereicheren Verbindung im Blatt gespeichert. Hierbei wird das Wassermolekül gespalten, wodurch Wasserstoff freigesetzt und Sauerstoff an die Atmosphäre abgegeben wird. Im zweiten Teilschritt, welcher auch ohne Energiezugabe, also lichtunabhängig, ablaufen kann, wird der Wasserstoff und das an den Stomata¹ aufgenommene CO₂ zusammengeführt. Nach mehreren aufeinanderfolgenden chemischen Reaktionen entsteht das Endprodukt der oben abgebildeten Reaktionsgleichung: das energiereiche Zuckermolekül C₆H₁₂O₆, auch Assimilat genannt. Dieses Glucosemolekül wird in der darauffolgenden Nacht an den Verbrauchsort transportiert. Hier kann es als Baustoff bei Wachstumsprozessen neuer Zellstrukturen und der Atmung² eingesetzt oder in Form von Stärke eingelagert werden (Larcher, 2001, S. 74–75; Matyssek et al., 2010; Strasburger & Bresinsky, 2012, S. 288).

¹ Pore in der unteren Epidermis des Blattes, welche den Gasaustausch reguliert (Kutschera, 1995, S. 383).

² Syn. 'Dissimilation'; gegenläufiger Prozess der Photosynthese, bei der die zuvor aufgebauten Zuckermoleküle zerlegt werden um die Energie nutzbar zu machen; kann im Gegensatz zur Photosynthese auch nachts und im Winter stattfinden (Bonn et al., 2023, S. 60).

Für die Photosynthese selbst wird dabei nur wenig Wasser benötigt. Der Hauptwasserverbrauch entsteht durch die Funktion des Wassers als Transportlösung der Assimilate, die ohne Transportmedium nicht zu den verbrauchenden Stellen gelangen können, sowie für die Stoffwechselfvorgänge. Der Wasserhaushalt der Pflanzen wird nachfolgend näher erläutert.

2.1.2 Funktionen des Wassers

Pflanzen benötigen Wasser für die Aufrechterhaltung vieler Funktionen. Die wichtigsten sind dabei die Funktion als Lösungsmittel, Reaktionsstoff, beispielsweise bei der Photosynthese, sowie als Transportmittel für verschiedenste Stoffe. Zudem ist Wasser für das Zellwachstum und den Turgor³ notwendig. Das durch die Wurzeln aufgenommene Wasser wird durch die Atmung und vor allem die Transpiration fast vollständig wieder an die Umgebung abgegeben (Larcher, 2001, S. 200; Strasburger & Sitte, 2002, S. 252–253).

2.1.3 Wasserhaushalt

Steffen Rust (2023, S. 66) schreibt, dass der Wassergehalt in den meisten Landpflanzen bei 85 bis 90 Prozent liegt. Landpflanzen sind zudem in der Regel nicht austrocknungsfähig, was dazu führt, dass die Pflanzen ihren Wassergehalt durch Wasseraufnahme der Wurzeln dauerhaft aufrechterhalten müssen. Der hohe Wassergehalt rührt auch daher, dass Wasser, wie im vorherigen Kapitel schon erwähnt, sowohl als universelles Lösungsmittel als auch als Substrat im Stoffwechsel notwendig ist sowie strukturelle Funktionen in lebenden Zellen übernimmt (Kadereit et al., 2021, S. 469). Hauptverlustquelle des Wassers ist dabei die Transpiration⁴. Für die in Kapitel 2.1.1 genannten Vorgänge der Photosynthese muss die Pflanze CO₂ aufnehmen. Da es bei Pflanzen keine Oberfläche gibt, die CO₂ aufnehmen kann, ohne dass gleichzeitig Wasser entweichen kann, muss die Pflanze die Stomata öffnen. Bei diesem Vorgang verbraucht die Pflanze das meiste Wasser (Kadereit et al., 2021, S. 469). Durch die Aufnahme von einem Teil CO₂, welches durch die Blätter aufgenommen wird, gehen dafür etwa 200 Teile Wasser durch Transpiration verloren. Dies zeigt, wie essenziell die Wasseraufnahme durch die Wurzeln ist, da der Wasserverbrauch pro Tag die zu speichernde Wassermenge im Stamm deutlich übersteigt (Nobel, 1983).

2.1.4 Wasseraufnahme

Neben der offensichtlichen Funktion der Verankerung haben die Wurzeln von Pflanzen noch weitere essenzielle Funktionen. Hierzu zählen die Nährstoffaufnahme, deren Reservespeicherung sowie die schon erwähnte Wasseraufnahme. Einflussfaktoren auf die

³ Zellinnendruck, verantwortlich für die Form des nicht verholzten Gewebes.

⁴ Wasserabgabe in Dampfform durch die Oberfläche der Pflanzen.

genannten Funktionen sind hier die Verteilung der Wurzeln in den Bodenschichten und deren Eigenschaften (Dichte und Durchlüftung) sowie die Konkurrenz durch andere Pflanzen. Der Standort bestimmt somit maßgeblich die Wurzel Ausbildung (Strasburger & Sitte, 2002, S. 200, 900–902, 930–931).

Im Regelfall können nur wenige Pflanzen – und diese nur unter bestimmten Voraussetzungen – den Boden bis ans Grundwasser erschließen. Die höchste Wurzelintensität und Wurzel dichte ist deshalb in den oberen Bodenschichten. Dies rührt daher, da dort die Verfügbarkeit von Wasser und Sauerstoff am höchsten ist (Schulze et al., 2002, S. 325–327).

Bei der Charakterisierung von Standorten hinsichtlich ihrer Wasserverfügbarkeit dient die Feldkapazität als wichtige Kenngröße. Diese beschreibt die Menge des Wassers, welches nach einem Wassereintrag, beispielsweise Niederschlägen, durch Haftung im Boden verbleibt. Restliches Wasser fließt zur Seite ab oder versickert ins Grundwasser. Das für eine einzelne Pflanze nutzbare Wasser der Feldkapazität, wird als nutzbare Feldkapazität (nFk) bezeichnet. Die nFk gibt Auskunft über die Menge an Wasser, die tatsächlich von den Wurzeln der Pflanze erschlossen und aufgenommen werden kann. Das restliche Wasser welches nicht nutzbar, also nicht pflanzenverfügbar, vorliegt, wird als Totwasser bezeichnet (Amelung et al., 2018, S. 302, 495; Blum & Schad, 2024, S. 60–65).

Die Haltefähigkeit des Bodens für Wasser sowie dessen Erreichbarkeit und Aufnahmefähigkeit durch Wurzeln ist vor allem von der Korngröße des Substrats und deren Verteilung, der Lagerungsdichte, dem Skelettanteil und dem Anteil organischer Substanz abhängig. Das Zusammenspiel der Faktoren bestimmt die Wasserspannung (pf-Wert⁵), auch Wasserpotential genannt, des Bodens. Diese gibt an wie stark das Wasser im Boden gehalten wird, anders ausgedrückt: wie viel Saugspannung der Baum aufbringen muss, um das Wasser über die Wurzeln aufnehmen zu können. Hier wirken auch die Adsorptions- und Kohäsionskräfte, welche die Wasserspannung beeinflussen. Die Adsorptionskräfte entstehen durch die elektrische Ladung der Bodenteilchen, wodurch eine Oberflächenspannung entsteht, welche das Wasser an die Teilchen bindet. Diese Oberflächenspannung wird mit kleinerem Porendurchmesser größer (Blum et al., 2018, S. 49).

Der Punkt, an dem die Wasserspannung die Fähigkeit der Pflanzen übersteigt, dieses aufzunehmen, wird Welke-Punkt genannt. Dieser Punkt liegt laut Blum (2018, S. 51) bei 15 000 Hektopascal oder umgerechnet einem pf-Wert von 4,2. Pflanzenverfügbar wird Wasser im Boden bei einem pf-Wert von 2,5 und 4,2 gehalten. Hier reicht die Saugspannung der meisten

⁵ Energie, mit der das Wasser entgegen der Schwerkraft im Boden gehalten wird.

Bäume aus, um das Wasser aufzunehmen, gleichzeitig ist die Wasserspannung so hoch, dass das Wasser nicht durch die Gravitation abfließt. Wasser in Böden mit einer Wasserspannung kleiner 2,5 fließt durch die Gravitationskräfte ab (Blum et al., 2018, S. 51).

Des Weiteren hat auch das durchwurzelte Bodenvolumen und die Niederschlagsmenge großen Einfluss auf die nFk (Amelung et al., 2018, S. 275, 495–496).

2.1.5 Wassertransport

Von den Wurzeln aufgenommenes Wasser wird über das Xylem im Stamm transportiert. Dieses System zur Wasserleitung besteht aus langgestreckten, abgestorbenen Zellen im Splintholz, welche durch verstärkte Zellwände, bei dem entstehenden Wasserdruck nicht kollabieren. Sogenannte Tracheiden⁶ sind bei Nadelbäumen zu finden, während bei Laubbäumen zusätzlich Tracheen⁷ zum Einsatz kommen (Ruge, 2023). Limitierender Faktor für die Leitfähigkeit und Durchflussgeschwindigkeit von Wasser in diesen ist der Durchmesser der Zellen und deren Anzahl. Während bei Nadelbäumen der Innendurchmesser der Tracheiden etwa 0,03 mm beträgt und so Fließgeschwindigkeit von bis zu 2 m pro Stunde möglich sind, können ringporige Baumarten mit einem Innendurchmesser von bis zu 0,2 mm Fließgeschwindigkeiten von bis zu 40 Metern je Stunde erreichen (Larcher, 2001, S. 215–219).

Grundlage des Wassertransports von der Wurzel zur Krone ist die genannte Transpiration bei der Aufnahme von CO₂. Diese Feststellung geht auf Hales im Jahr 1727 zurück, welcher herausfand, dass die Verdunstung, auf einen meist geringen Luftfeuchtegehalt außerhalb der Blätter, als in den Stomata zurückgeht. Dieser Wasserdampf in den Stomata wird nachfolgend durch Wasser aus den Zellwänden, welche die Stomata bilden, ersetzt. Die Konzentration an Nährstoff und Salzgehalt in diesen Zellen wird folglich erhöht, was dazu führt, dass diese Wasser aus den wasserleitfähigen Zellen ziehen. Dieser Prozess setzt sich bis in die Feinwurzeln fort. (Dixon & Joly, 1997, S. 563–564)

Wie viel ein Baum transpiriert, hängt davon ab, wie viel Energie der Baum zur Transpiration zur Verfügung hat, wie groß die verdunstende Fläche ist (Summe an Blattmasse), wie viel Wasser an den Wurzeln zur Verfügung steht und aufgenommen kann (Summe der Wurzelmasse) und wie gut die Wasserleitung funktioniert. Einschränkungen können bei diesen Faktoren durch Beschädigung der Wurzeln oder auch durch Beschädigung des Stamms, und damit eine Einschränkung der allgemeinen Wasserleitfähigkeit entstehen (Bonn et al., 2023, S. 69).

⁶ Langgestreckte meist stark verholzte Zellen, die der Wasserleitung und Festigung dienen.

⁷ Zellen mit gleicher Funktion wie Tracheiden, aber deutlich länger; nur bei Laubbäumen.

Während die Energie, die zur Transpiration notwendig ist, nicht direkt vom Baum gesteuert werden kann, da diese in europäischen Breitengraden hauptsächlich aus der Strahlungsenergie der Sonne besteht, kann der Baum durch aktives Schließen der Stomata kurzfristig den Wasserverbrauch regulieren. Forschungen besagen, dass die Rolle der Stomata essenziell sind bei der Verhinderung von Embolien⁸ und Wasserdefiziten, welche zum langfristigen Absterben führen (Sutherland & Jones, 1991, S. 607).

2.1.6 Trockenstress

Eine Belastungssituation, welche in einem Organismus Abweichungen vom Normalverhalten auslöst, wird als Stress bezeichnet. Stress im Allgemeinen kann auch als Zwangslage oder Bedrängnis verstanden werden (Larcher, 2001, S. 282).

Der Stressor ist hierbei der Faktor, welcher die Belastung hervorruft. Über- oder Unterschreitet ein Umweltfaktor, oder auch mehrere⁹, den individuellen Optimal-Bereich der Pflanze, wird dieser zum Stressor. Dazu gehören beispielsweise Sauerstoffmangel, Salz- oder Emissionsbelastung, hohe Temperaturen sowie Trockenstress (Brunold et al., 1996, S. 49, 119, 133, 149). Aufgrund der mangelnden Fähigkeit von Pflanzen, dem Stressor durch Fortbewegung ausweichen zu können, zeigen sie infolge andauernder Belastung Stressreaktionen (Bonn et al., 2023, S. 77).

Trockenstress, für diese Arbeit relevant, ist dabei weltweit einer der häufigsten Stressoren für Bäume. Dieser führt neben der direkten Schädigung auch zu einer erhöhten Gefährdung gegenüber biotischen Schäden wie Pilzen oder Insekten (Bonn et al., 2023, S. 78; Dreßler et al., 2021, S. 66). Die Ausprägung dieser Stressreaktionen kann hier, je nach Pflanze und Stressor, sehr unterschiedlich sein und auch die Reaktionen können von kurz-, mittel- und langfristiger Dauer sein. Larcher (2001, S. 284) beschreibt die Reaktionsabfolge der Pflanze in vier Phasen: Die erste Phase wird als *Alarmphase* bezeichnet, in welcher die normale Lebensfähigkeit destabilisiert wird. Steigt die Intensität des Stressors dabei zu schnell an, kommt es zu irreversiblen Schädigungen – im schlimmsten Fall zum Absterben, noch bevor der Baum Abwehrmaßnahmen einleiten kann.

Ist dies nicht der Fall, beginnt der Baum Schutzmaßnahmen einzuleiten. Im Falle der Trockenheit kommt es in Phase zwei, der *Widerstandsphase*, zu Anpassungsreaktionen des Baumes. Die wichtigsten kurzfristigen Anpassungen sind hier laut Roloff (2022, S. 42) und

⁸ Luftertritt in das Wasserleitende System, der zum Abriss des Wasserfadens und so zum dauerhaften Ausfall der Wasserversorgung führt.

⁹ Einzelne sind meist nicht scharf von anderen abzugrenzen

Mattyssek (2019, S. 321) die Schließung der Stomata, was zu einem geringeren Wasserverbrauch führt. Außerdem kommt es zu einer Absenkung des Blattwasseranteils und dadurch zu einem Absenken des osmotischen Wasserpotentials, wodurch sich der durch Trockenheit erhöhten Wasserspannung im Boden angepasst wird. Dieser Prozess ist reversibel und es werden zu niedrige, schädigende Zellwassergehalte vermieden (Bréda et al., 2006, S. 633; Larcher, 2001, S. 95). Letzteres darf dabei nur bis zu einem ψ -Wert von etwa 4,2 (vgl. Kapitel 2.1.4) abgesenkt werden, da sonst ein Gas in die wasserleitenden Gefäße eintritt (auch Embolie genannt), was zu einem irreversiblen Abriss des Wasserleitfadens führt. (Blum et al., 2018, S. 78–79; Roloff, 2022, S. 42; Sutherland & Jones, 1991; Tyree & Sperry, 1988, S. 574). Eine solche Embolie würde mittel- und langfristig zum Absterben von Kronen- und Wurzelteilen führen. Durch das Schließen der Stomata kann ein Wasserverlust aber nicht komplett verhindert werden. Anhaltender Trockenstress führt deshalb laut Dreßler (2019, S. 10) zu Blattschäden. Diese zeigen sich an der Ausrichtung der Blätter, Blatthängen, Einrollen, Falten oder sogar an einem Blattabwurf. Langfristige Folgen sind unter anderem ein verringertes Längen- und Dickenwachstum, die Entwicklung von Kurztrieben, Absterbeerscheinungen in der Krone und der Wurzel sowie ein geringerer Gefäßdurchmesser neu gebildeter wasserleitender Zellen (Dreßler, 2019, S. 10). Kleiner Zelldurchmesser und Kurztriebe haben im Allgemeinen eine schlechtere Wasserleitfähigkeit (Rust & Hüttl, 1999, S. 40–41), weshalb in Folgejahren das Trockenstressrisiko erhöht ist (Bonn et al., 2023, S. 80).

Nach Larcher (2001, S. 284) folgt darauf die **Erschöpfungsphase**. In dieser ist das Anpassungsvermögen der Pflanze ausgereizt und es kann zum Zusammenbruch des Organismus kommen. Ein Beispiel ist hierfür ist die oben erwähnte Embolie.

Wird der Belastungszustand aufgehoben, ist es aber noch möglich, zur Ausgangslage zurückzukehren. Die Pflanze befindet sich dann in der **Regenerationsphase**.

2.2 Feuchtigkeitsbestimmung

2.2.1 Bodenfeuchtigkeit und Bodenfeuchtebestimmung

Die Bodenfeuchte und Sensoren zu deren Messung spielen in der Landwirtschaft und bei der Verwendung automatisierter Berechnungsanlagen eine wichtige Rolle. Bei der Bestimmung der Bodenfeuchte können unterschiedliche Messmethoden zum Einsatz kommen, welche unterschiedliche Kenngrößen der Bodenfeuchte beschreiben und messen.

Die Bodenfeuchte wird in der Praxis meist mit einer von drei Kenngrößen beschrieben. Hierzu gehören der gravimetrische Bodenwassergehalt, der volumetrische Bodenwassergehalt und das Bodenwasserpotential. Der gravimetrische Bodenwassergehalt beschreibt das Gewicht des Wassers, welches sich im Boden befindet. Bei der Messung wird die Bodenprobe gewogen, nachfolgend getrocknet und dann nochmals gewogen. Der gemessene Gewichtsunterschied entspricht dann dem Wassergehalt der Probe. Nachteil dieser Messmethode ist die unterschiedliche Dichte von Bodenarten, was ein Vergleich der gemessenen Werte nicht zulässt. Um einen Vergleich zu ermöglichen, muss eine volumetrische Messung durchgeführt werden. Diese berechnet sich aus der gravimetrischen Bodenfeuchte, belässt diese aber nicht als absoluten Wert, sondern setzt sie in Relation zur Dichte des Ausgangs Substrats (Charlesworth, 2020, S. 2). Das Bodenwasserpotential als Kenngröße wird in Kapitel 2.1.4 genau erläutert und hier nicht nochmals ausgeführt. Nachfolgend werden die zwei gängigsten Methoden zur Messung der Bodenfeuchte näher ausgeführt.

2.2.1.1 Bodenfeuchtebestimmung mit Widerstandssensoren

Die Bestimmung der Bodenfeuchte über die elektrische Leitfähigkeit, geht auf die Leitfähigkeit der Wassermoleküle zurück. Der Boden stellt hierbei laut Flaschke und Tränkle (1999, S. 146) ein poröses Substrat dar, in welchem die Wassermoleküle gehalten werden. Faktoren für die Wasserhaltefähigkeit sind in Kapitel 2.1.4 näher erläutert. Bei der Impedanzmessung wird sich diese Leitfähigkeit zunutze gemacht, um die Bodenfeuchte zu bestimmen. Dabei wird mittels zweier Elektroden und einem gleichmäßigen elektrischen Signal die Leitfähigkeit gemessen. Die Menge an Wasser korreliert hierbei mit der Leitfähigkeit, wobei zu beachten ist, dass die Leitfähigkeit auch von der Temperatur und gelösten Mineralien im Wasser abhängig ist. Während die gelösten Mineralien nur schlecht erfasst werden können – beziehungsweise regelmäßig durch Proben aufgenommen werden müssten – wird durch Einbeziehen der Temperatur zum Zeitpunkt der Messung die Vergleichbarkeit der Daten erhöht. Von Vorteil sind bei dieser Messmethode die geringen Anschaffungs- und Wartungskosten. Nachteil ist aber die vergleichsweise geringe Genauigkeit der Messdaten im Vergleich zu anderen, meist teureren Messmethoden (Kanoun et al., 2004, S. 476).

2.2.1.2 Bodenfeuchtebestimmung mit Tensiometer

Tensiometer sind hingegen Sensoren, welche das Bodenwasserpotential messen. Laut Goodwin (2020, S. 4) besteht ein Tensiometer aus einem porösen Keramikmantel, einem versiegelten wassergefüllten Kunststoffrohr und einem Vakuummeter. Das Messsystem wird im Boden vergraben, wobei das Bodenwasser und das Wasser im Tensiometer in einem freien Austausch stehen. Trocknet der Boden um das Tensiometer aus, wird das Wasser aus dem Tensiometer nach außen gezogen, bis sich das Wasserpotential des Bodens und das Potential im Inneren des Tensiometers angeglichen haben. Da es sich bei dem Behälter um ein luftdichtes Behältnis handelt, entsteht ein Unterdruck, welcher dem Wasserpotential des Bodens entspricht. Dieser Unterdruck wird durch das Vakuummeter gemessen. Gleiches gilt bei einer Zunahme der Bodenfeuchte. Ist dies der Fall, fließt Bodenwasser in das Tensiometer, wodurch die Saugkraft verringert wird. Die gemessene Wasserspannung entspricht dabei genau dem Energieaufwand, welchen eine Pflanze aufbringen muss, um Bodenwasser aufzunehmen (vgl. Kapitel 2.1.4).

Diese Messmethode erlaubt eine sehr genaue Messung und ist sehr kostengünstig. Nachteil ist die hohe Empfindlichkeit gegenüber sehr luftigen Böden und die notwendige regelmäßigen Wartung aufgrund der Verwitterung des Keramikmaterials (Kanoun et al., 2004, S. 476).

2.2.2 Pflanzenwassergehalt und dessen Messung mit Impedanz-Sensoren

Im Bereich der direkten Messung des Wasserbedarfs und des Wasserverbrauchs von Pflanzen, gibt es aktuell nur wenige reversible Messmethoden. Die in der Praxis meistgebräuchliche Messung mit Impedanz-Sensoren wird nachfolgend erläutert.

Impedanz-Sensoren machen sich ebenfalls die Leitfähigkeit der Wassermoleküle zunutze (vgl. Kapitel 2.2.1.1). Im Unterschied zu den Bodenfeuchtesensoren, werden die Elektroden in die wasserführenden Gefäße, auch Xylem genannt, der Pflanze eingeführt. Mit zunehmendem Wassergehalt der Zellen nimmt die elektrische Leitfähigkeit zu – oder anders gesagt: nimmt der Widerstand ab. Dieser Widerstand bildet als absoluter Wert die Wasserverfügbarkeit der Pflanze ab. Wie bei den Bodensensoren nimmt auch die Temperatur Einfluss auf die Leitfähigkeit und wird deshalb bei dieser Messmethodik mit einbezogen (Martin, 2009, S. 22).

Vorteile dieser Messmethode sind die hohe Genauigkeit und die kostengünstige Anschaffung. Von Nachteil ist die Zerstörung des Pflanzengewebes beim Anbringen der Elektroden. Diese sind aber meist so klein, dass keine irreversiblen Schäden hinterlassen werden (Foderá et al., 2024).

2.3 Baumarten

2.3.1 Feld-Ahorn

Der Feld-Ahorn (*Acer campestre L.*) ist eine in den Tieflagen in Mittel- und Südeuropa beheimatete Laubbaumart (Häberle, 2014, S. 2). In Einzelfällen kommt er in höheren Regionen bis 1400 Meter über Normalnull (m. ü. NN.) (Schweiz) oder 1800 m. ü. NN (Kaukasus) vor (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2019, S. 73).

Es handelt sich um eine Halbschattenbaumart¹⁰, dessen Lichtbedürfnisse im Alter aber zunehmen. Erkennen lässt sich der Feld-Ahorn an den gegenständigen dreigelappten Blättern sowie der graubraunen Borke, welche teils markante Korkleisten bildet (Bartels, 1993; Häberle, 2014, S. 3). Genauer beschreibt Häberle (2014, S. 3) die Färbung der Blätter oberseits als stumpfgrün und kurz nach Austrieb schwach behaart, sowie unterseits hellgrün.

Die Baumart findet sich in submediterranen, subatlantischen und gemäßigt subkontinentalen Bereichen und sticht durch seine hohe Verträglichkeit gegenüber Sommertrockenheit und einer gewissen Winterkälte hervor (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2019, S. 74). Die optimale Sommermitteltemperatur (Juni – August) des Feld-Ahorns liegt zwischen 17 °C – 19 °C.

Er stellt neben den geringen Ansprüchen an die Wasserversorgung, hohe Ansprüche an die Nährstoff- und Basenversorgung und zeigt eine ausgesprochene Empfindlichkeit gegenüber Salz, wobei er im Vergleich zum Berg- und Spitz-Ahorn auch Überflutung von bis zu 100 Tagen gut verträgt (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2019, S. 74; Roloff et al., 2014).

2.3.2 Sand-Birke

Die Sand-Birke (*Betula pendula R.*) ist eine in ganz Europa einschließlich der Britischen Inseln, nördlich bis Nordskandinavien und Russland, der Balkanhalbinsel und südlich bis zum Ätna verbreitete Laubbaumart (Atkinson, 1992, S. 837; Beck et al., 2016, S. 70; Kirchner & Loew, 1908; Roloff & Pietzarka, 2004, S. 2). Vertikal ist die Verbreitung kaum eingeschränkt und geht im südlichen Teil bis auf 2176 m. ü. NN (Ätna), fällt nach Norden hin aber ab und geht in Küstengebieten auch bis auf 0 m. ü. NN (Roloff & Pietzarka, 2004, S. 2).

Typisch für die Baumart ist eine extreme Hitze- und Kältetoleranz und ein geringes Wärmebedürfnis während der Vegetationszeit (Roloff & Pietzarka, 2004, S. 2). Optisch zeichnet sich die Birke durch die oberseits lebhaft grünen, unterseits hellgrünen,

¹⁰ Mittlere Schattentoleranz; „Fähigkeit als Jungwuchs Schatten zu ertragen“ (vgl. Ellenberg & Leuschner, 2010).

rautenförmigen, doppelt gesägten Blättern sowie die hellweiße Rinde aus (Roloff & Pietzarka, 2004, S. 3, 5). Die weiße Farbe wird durch den Farbstoff Betulin erzeugt, welcher die Rinde gleichzeitig wasserundurchlässig macht und durch die Färbung die Oberflächentemperatur stark verringert (Roloff & Pietzarka, 2004, S. 5).

Als Pionierbaumart und Lichtbaumart hat die Birke eine sehr geringe Konkurrenzkraft und wird von anderen Baumarten häufig verdrängt, findet sich aber auf feuchten oder trockenen sauren Böden oder Störflächen, wo sie sich durch ihr schnelles Jugendwachstum, ihre häufige Fruktifikation und ihrer Anspruchslosigkeit bezüglich der Nährstoffverfügbarkeit und der Wasserversorgung behaupten kann (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2019, S. 94; Roloff & Pietzarka, 2004, S. 8).

Im Blick auf die Wasserversorgung ist hervorzuheben, dass die Birke Trockenperioden dann gut verträgt, wenn diese direkt zu Beginn, an wenig Wasser gewöhnt ist. Ist dies nicht der Fall, kommt es auf sonst gut wasserversorgten Standorten sehr schnell zu frühzeitigem Blattabwurf, Absterbeerscheinungen oder dem Baumausfall (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 2019, S. 94; Roloff & Pietzarka, 2004, S. 9).

2.4 Fernerkundung

Unter Fernerkundung versteht man alle Methoden, der Beobachtung oder Erkundung eines Gebietes aus der Ferne (Blotvogel et al., 2018, S. 655). Genauer versteht man darunter die Wissenschaft oder auch die Methodik, Informationen über ein Objekt, ein Gebiet oder ein Phänomen zu erhalten, welche von einem Gerät aus der Ferne ohne direkten Kontakt mit diesem erfasst wurden (Lillesand et al., 2008, S. 1).

Die Fernerkundung kann allgemein unterteilt werden in die Erfassung von Kräften, akustischen Schallwellen oder – wie im Falle des Auges – die Erfassung elektromagnetischer Strahlung (Lillesand et al., 2008, S. 2). Für die Fragestellung dieser Arbeit ist nur die Erfassung elektromagnetischer Strahlung relevant, weshalb sich nachfolgend auf diese beschränkt wird.

2.4.1 Elektromagnetische Fernerkundung

Aufgrund des häufigen und alltäglichen Gebrauchs wird in den meisten Fällen unter Fernerkundung die Erfassung elektromagnetischer Energie, welche von Objekten auf der Erdoberfläche ausgestrahlt oder reflektiert wird, verstanden. Lillesand et al. (2008, S. 1) nennt hierfür ein einfaches Beispiel: die Augen. Diese fungieren in jedem Moment als Sensor, welcher die reflektierte Strahlung von Objekten erfasst. Am Beispiel dieser Sätze erfasst das Auge die unterschiedliche Strahlung ausgehend von den hellen und dunklen Bereichen. Im Gehirn werden diese Informationen analysiert und die dunkleren Bereiche werden als Buchstaben

erkannt. Des Weiteren erlaubt das Gehirn die Interpretation der Buchstaben zu Wörtern und Sätzen.

Diese Art von elektromagnetischer Fernerkundung lässt sich allgemein in zwei Teilprozesse aufteilen. Hierzu gehört in erster Linie der Datenerwerb und nachfolgend die Analyse der aufgenommenen Daten (Lillesand et al., 2008, S. 3). Weiter lassen sich diese in kleinere Bestandteile aufteilen.

Zum Datenerwerb gehört:

- Eine Energiequelle
- Ein Reflektor (Objekt, Erdoberfläche)
- Ein Sensor inklusive Trägerplattform

Zur Analyse gehört:

- Ein Speicherobjekt
- Werkzeuge¹¹ zur Bearbeitung und Analyse, sowie
- eine Visualisierung zur Nutzerverwendung (Lillesand et al., 2008, S. 2–3).

Die bekanntesten, am Beispiel der Augen erfassten Informationen sind das sichtbare Licht. Dabei handelt es sich aber lediglich um einen sehr kleinen Ausschnitt der möglichen elektromagnetischen Energie. Andere bekannte Formen sind Radiowellen, Hitze, ultraviolette Strahlung und radioaktive Strahlung (Lillesand et al., 2008, S. 4). All diese haben die Form der Welle gemein, weshalb sie sich nach der Wellen-Theorie in einer kontinuierlichen Sinus-Kurve fortbewegen. Der Abstand der jeweiligen Wellenhöhenpunkte wird dabei als Wellenlänge und die Anzahl der Höhepunkte an einem Punkt, welchen die Welle in einer bestimmten Zeiteinheit passiert, als Frequenz bezeichnet (Albertz, 2009, S. 10–11; Lillesand et al., 2008, S. 4). Beide Werte können zur Charakterisierung elektromagnetischer Energie herangezogen werden, wobei in der Fernerkundung die Wellenlänge als die am weitesten verbreitete Charakterisierung verwendet wird (Albertz, 2009, S. 11).

Alle vorkommenden Wellenlängen werden im elektromagnetischen Spektrum abgebildet. Dieses bezieht die Art der Entstehung und die Wirkung der Strahlung ein, wobei die Abgrenzungen ineinander übergehen können und es auch Überlappungen gibt (Albertz, 2009, S. 11).

¹¹ Software oder Hardware zur Weiterverarbeitung der erfassten Daten.

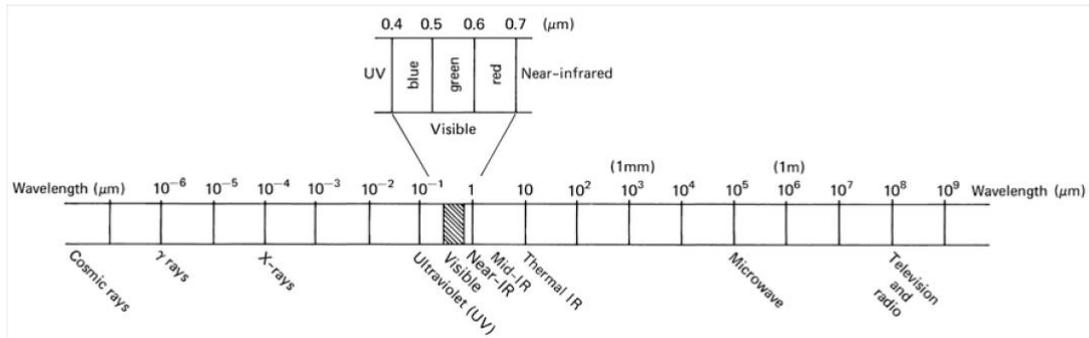


Abbildung 1: Elektromagnetisches Spektrum (Quelle: Lillesand et al., 2015, S. 5)

In Abbildung 1 sind die Unterteilungen mit ihren Wellenlängen in der Einheit Mikrometer (μm) abgebildet. In der Fernerkundung werden von den in Abbildung 1 dargestellten Wellenbereichen nicht alle genutzt. Neben dem für Menschen sichtbaren Spektrum bei einer Wellenlänge zwischen 400 Nanometern (nm) und 700 nm werden das ultraviolette Spektrum zwischen 100 nm und 400 nm, Nahinfrarot zwischen 700 nm bis 1 μm , das mittlere Infrarot zwischen 1 μm und 7 μm , sowie der Mikrowellenbereich zwischen 1 mm und 1 m genutzt (Albertz, 2009, S. 11; Lillesand et al., 2008, S. 5–6).

2.4.2 Fernerkundungssensoren

Die Sensorik ist in der Fernerkundung das zentrale Element der Datenerhebung und entscheidet, welche Daten in welcher Form erfasst werden. Alle Sensorsysteme funktionieren dabei grundlegend ähnlich. Der Sensor nimmt dabei die Strahlungsstärke auf, welche von einem Objekt reflektiert wird. Genauer: Die Strahlungen einer Energiequelle treffen auf ein Objekt oder die Erdoberfläche und werden davon zurückgeworfen. Die Oberflächenbeschaffenheit ist dabei verantwortlich dafür, welche Spektralbänder der eintreffenden Energie wieder zurückgeworfen werden. Beispielsweise werden von grünen Blättern der blaue Spektralbereich und der rote Spektralbereich absorbiert, während der grüne Spektralbereich reflektiert wird. Da das grüne Spektrum für das menschliche Auge sichtbar ist, wird die Pflanze als grün wahrgenommen. Diese Rückstrahlungen werden von dem Sensorsystem erfasst, wobei das Auge beispielsweise nur Spektralbänder im für Menschen sichtbaren Bereich erfassen kann. Andere Sensoren können häufig einen weitaus größeren Spektralbereich abdecken. Diese Sensorsysteme werden dabei in aktive und passive Sensorsysteme eingeteilt (Jutzi et al., 2017, S. 66; Toth & Jutzi, 2017, S. 46).

2.4.2.1 Aktive Fernerkundung

Bei der aktiven Fernerkundung ist der Sensor nicht auf eine externe Beleuchtungsquelle angewiesen. Der Sensor selbst sendet elektromagnetische Strahlung aus, welches das zu erfassende Objekt ausleuchtet. Wie bei passiven Sensoren wird aber auch Reflexion genutzt,

um spezifische Eigenschaften des Objekts abzuleiten (Jutzi et al., 2017, S. 66). Jutzi et al. (2017) unterteilt die aktive Sensorik hinsichtlich der eingesetzten Strahlung, genauer: nach deren Wellenlänge.

Beispiele für aktive Systeme sind Elektrooptische Systeme (EOS), auch aktive optische Sensoren genannt, welche im nm- bis μm -Wellenlängenbereich arbeiten und Mikrowellensysteme, auch RADAR-Systeme genannt, welche im nm- bis m-Wellenlängenbereich arbeiten (Bamler & Hartl, 1998, S. 1; Johansen, 1993, S. 118). Die bekanntesten aktiven optischen Sensoren sind dabei Laserscanner, wie beispielsweise das LIDAR-System (Light Detection and Ranging) oder auch Entfernungskameras (Dal Mutto et al., 2012, S. 3; Jutzi et al., 2017, S. 66; Shan & Toth, 2018, S. 159). Vor allem im Nahbereich wird beispielsweise das Synthetische Apertur RADAR (SAR) genutzt, welches in der Fernerkundung zur Auflösungssteigerung eingesetzt wird (Jutzi et al., 2017, S. 66). Da die aktive Sensorik in dieser Arbeit nicht verwendet wird, wird diese nicht weiter vertieft.

2.4.2.2 Passive Fernerkundung

Passive Sensoren sind die älteste Technologie der Fernerkundung. Geläufig bekannt als Kameras bilden sie meist das sichtbare Spektrum ab (vgl. Kapitel 2.4.1). Im Unterschied zu aktiven Sensoren, senden sie selbst keine elektromagnetische Strahlung aus. Sie sind deshalb auf eine externe Beleuchtungsquelle angewiesen. Energiequelle ist dabei meist die solare Einstrahlung. Dies macht passive Systeme anfälliger für Störungen, welche beispielsweise durch die Atmosphäre auftreten können (Richards & Jia, 2006, S. 27).

Der Aufbau eines passiven Kamerasystems besteht dabei meist aus einem Gehäuse, welches den Bildsensor und die Optik umschließt und fest verbindet (Albertz, 2009, S. 33). Die eingesetzten Bildsensoren sind heutzutage in der Regel digital und obwohl diese Technologie in der Fernerkundung schon lange im Einsatz ist, hat sich die Auflösung der passiven Sensoren stark verbessert, weshalb sie in der heutigen Praxis weiterhin von großer Bedeutung sind (Toth & Jutzi, 2017, S. 48). In der Regel erfassen passive Fernerkundungssensoren unterschiedliche Spektralbänder. Gängige Sensoren, welche auch in einfachen Kamerasystemen für Handy oder Digitalkameras verbaut werden, sind CCD¹² oder CMOS¹³-Sensoren. Bei diesen sind meistens Kamera-Sensoren mit unterschiedlicher Filterung auf einem Bauteil aufgebracht (Toth & Jutzi, 2017, S. 49).

¹² Charged-Coupled Device (engl.): Halbleiter-Bauteil das einfallende Licht in elektrische Signale umwandelt.

¹³ Complementary Metal Oxide Semiconductor (engl.): Halbleiter-Bauteil zur Umwandlung von Licht in elektrische Ladungen.

Teure Systeme nutzen in aller Regel getrennte Kameras mit qualitativ hochwertigen Filtern für jedes Spektralband. Hierdurch erzielt man pro Kameralinse ein Bild für einen klar definierten Spektralbereich. Diese können dann in Kombination mit einem hochauflösenden Schwarz-Weiß-Band zu multispektralen Bildern mittels Pansharpening¹⁴ kombiniert werden (Loncan et al., 2015, S. 1). Solche Systeme werden als Multispektralkameras bezeichnet und erzeugen Multispektralbilder in hoher Auflösung mit bis zu 15 unterschiedlichen erfassten Spektralbändern (Alparone et al., 2007, S. 3013; Toth & Jutzi, 2017, S. 50). Die Anzahl der Bänder wird dabei als spektrale Auflösung bezeichnet. Deren Funktionsweise wird nachfolgend näher erläutert.

2.4.2.3 Multispektralkameras in der passiven Fernerkundung

Die Funktionsweise von Multispektralkameras lässt sich anhand der analogen Farbfilmphotographie erklären. Die für Menschen sichtbare Farbe kann auf eine Mischung der drei Grundfarben zurückgeführt werden. Daher besteht dieser Sensor, also der analoge Farbfilm, aus einem dreischichtigen Farbfilm. Die oberste Schicht ist für blaues Licht empfindlich. Da die grüne und die rote Farbschicht für blaues Licht ebenfalls empfindlich ist, muss diesem ein blauabsorbierender Gelbfilter vorgeschaltet werden. Dies basiert auf der Grundlage, dass Gelb die Komplementärfarbe zu Blau ist und nur rotes und grünes Licht hindurchlässt. Bei der Entwicklung und der Erstellung eines für Betrachtende richtig dargestellten Bildes wird dieser dann herausgelöst (Höfler, 2016). Dadurch entsteht ein für Betrachtende farbechtes Bild.

Multispektralkameras hingegen nehmen dabei häufig mehr als drei Spektralbänder auf. Um multispektrale Informationen aufzunehmen, kommen momentan vier Methoden zum Einsatz. Eine Möglichkeit ist es, das Licht durch ein Prisma vor dem Sensor in die unterschiedlichen Spektralebereiche aufzutrennen. Die Qualität der Aufnahmen ist dabei stark abhängig von der Qualität des Prismas und es bedarf einer exakten und kostenintensiven Kalibrierung (*What Is Multispectral Imaging?*, 2018).

Bei der Verwendung von Einlinsen-Kameras¹⁵ besteht die Möglichkeit, ein Filterrad mit unterschiedlichen Filtern vorzuschalten, wodurch je nach Anzahl der unterschiedlichen Filter Bilder in guter Auflösung erzeugt werden (Brauers et al., 2008, S. 1). Diese Art der Datenaufnahme ist nur für statische Plattformen geeignet und die Aufnahmegeschwindigkeit ist sehr gering (*What Is Multispectral Imaging?*, 2018).

¹⁴ Zusammenführen eines hochauflösenden Schwarz-Weiß-Bandes mit geringer aufgelösten multispektralen Bändern eines Sensors (Loncan et al., 2015, S. 1).

¹⁵ Kamerasystem mit einer einzelnen Linse und Objektiv.

Auf personenlosen Flugsystemen, auch Unmanned Aerial System (UAS) genannt, werden meistens Mehrlinsen-Kameras eingesetzt (vgl. Kapitel 2.4.3.3). Jede Linse nimmt dabei ein eigenes Spektrum auf. Alle Kameras werden dann zur selben Zeit ausgelöst. In der Datenverarbeitung können aus den Einzelbildern multispektrale Bilder erzeugt werden (*What Is Multispectral Imaging?*, 2018).

Die letzte Möglichkeit ist die Erzeugung sogenannter Hyperspectral Images, kurz HSI. Bei dieser Art der multispektralen Aufnahme enthält jeder Pixel multispektrale Informationen, was durch die individuelle Filterung vor jedem Pixel erreicht wird (Harsanyi & Chang, 1994, S. 779). Die Informationen werden versetzt zueinander angeordnet und es entsteht ein dreidimensionaler Daten-Würfel, welcher bis zu 100 verschiedene Spektralbändern umfassen kann (Lillesand et al., 2008, S. 381). Zwar bildet hier der Pixel den genauen Verlauf, und nicht nur den Mittelwert, des Spektralbereichs ab, aufgrund der großen Datenmenge und der komplexen Datenstruktur ist die Bearbeitung aber sehr aufwendig.

2.4.3 Trägerplattformen

In aller Regel befindet sich der Sensor, der die Daten erfasst, auf einem Träger. Die eingesetzte Trägerplattform spielt dabei eine entscheidende Rolle für die Qualität und die Effizienz des eingesetzten Sensors (Toth & Jutzi, 2017, S. 35). Es gilt allgemein die Regel: Je gleichmäßiger sich die Trägerplattform mit dem Sensor durch den Beobachtungsraum bewegt, umso genauer sind die aufgenommenen Daten. Dies in der Praxis umzusetzen ist aber meist nicht möglich (Toth & Jutzi, 2017, S. 35). Dennoch bieten unterschiedliche Trägerplattformen, je nach Anwendungsgebiet und Zielsetzung, bei der Datenaufnahme verschiedene Vor- und Nachteile. Allgemein ist in der Fernerkundung ein Trend zu erleben, auf einer Trägerplattform mehrere Sensoren mit unterschiedlicher Funktionsweise und Ausrichtung zu platzieren, um möglichst viele unterschiedliche Daten zur Auswertung zu erhalten. Diese Systeme werden als Multisensorsysteme bezeichnet (Paparoditis et al., 2014, S. 69). Der Trend ist hauptsächlich auf die sinkenden Sensorkosten zurückzuführen (Paparoditis et al., 2014, S. 69; Toth & Jutzi, 2017, S. 35).

Nachfolgend werden unterschiedliche Trägersysteme kurz erläutert.

2.4.3.1 Satellitenplattformen

Mit dem Start des Landsat-1¹⁶ im Jahre 1972 ist erstmals ein ziviler satellitengestützter Sensor ins All befördert worden. Die Historie des Satelliten als Trägerplattform reicht also mehr als 50

¹⁶ Ausgestattet war der Satellit mit einem RBV-Sensor¹⁶ zur Aufnahme der sichtbaren Spektralbänder Blau, Grün und Rot, zusätzlich aber auch mit einem Multispektralsensor mit einer Auflösung von 83 m mal 83 m (Neigh, 2021a, 2021b).

Jahre zurück (Lulla et al., 2012, S. 459; Neigh, 2021a). Weltweit werden, Stand 2017, mehr als 7000 Satellitenträgersysteme eingesetzt, wobei sich diese hinsichtlich der Ausstattung¹⁷ und des Einsatzzwecks unterscheiden (Toth & Jutzi, 2017, S. 36).

Vorteile des Satelliten als Träger sind dabei die große räumliche Abdeckung und die hohe Wiederholungsrate. Nachteile entstehen durch die hohe Flughöhe. Durch diese resultieren geringere Auflösungen und Einflüsse der Atmosphäre auf die Reflektion der Erde. Einflüsse der Atmosphäre können aber durch aktive Sensorsysteme welche nicht im sichtbaren Bereich arbeiten verringert oder vermieden werden (Jutzi et al., 2017, S. 101; Toth & Jutzi, 2017, S. 51).

2.4.3.2 Flugzeugplattformen

Seitdem Fernerkundungssatelliten im Einsatz sind hat die Verwendung von Flugzeugplattformen abgenommen¹⁸ (Mondello et al., 2008; Toth & Jutzi, 2017, S. 40). Unterteilt werden können Flugzeugplattformen in folgende Kategorien: Starrflügler (Propellermaschinen), Starrflügler (Strahltriebmaschinen), Hubschrauber und Tragschrauber (Toth & Jutzi, 2017, S. 41).

Je nach eingesetztem Sensor, dessen Anforderungen und des gewünschten Ergebnisses, werden unterschiedliche Flughöhen und Fluggeschwindigkeiten benötigt und die entsprechende Flugzeugplattform gewählt (Lillesand et al., 2008, S. 47; Toth & Jutzi, 2017, S. 40).

2.4.3.3 Personenlose Flugsysteme (UAS)

Keine andere Trägerplattform ist aktuell so präsent in der Fernerkundung, sowohl in der Forschung als auch in der praktischen Anwendung, wie die UAS. Diese sind allgemein unter der Bezeichnung Drohne bekannt (Lillesand et al., 2008, S. 47; Toth & Jutzi, 2017, S. 42). UAS-Plattformen gibt es in unterschiedlichen Größen wobei in der Fernerkundung überwiegend UAS mit einem Maximalgewicht von 25 kg zum Einsatz kommen. Die geringen Kosten, das einfache Handling sowie die sehr hohe mögliche Auflösung, auch aufgrund der meist geringen Flughöhe, sprechen für den Einsatz von Drohnen. Jedoch sind je nach Land Genehmigungen sowie spezialisiertes Personal Voraussetzung zum Führen eines UAS.

Da die Verwendung von UAS in den letzten Jahren stark zugenommen hat und für deren Verwendung in Deutschland gesetzliche Restriktionen vorliegen, werden diese nachfolgend näher erläutert.

¹⁷ Sensorik und Messinstrumente.

¹⁸ Aufgrund einer gesetzlichen Auflösungsbeschränkung von Sattelitenbildern waren Flugzeugaufnahmen lange Zeit hochauflösender. Mit der Aufhebung dieser Beschränkung wurde der Unterschied immer geringer (Toth & Jutzi, 2017, S. 40).

2.4.3.3.1 Rechtliche Grundlagen

Der Betrieb von UAS wird von der European Union Aviation Safety Agency wie folgt unterteilt:

- offene Kategorie,
- spezielle Kategorie und
- die Zulassungspflichtige Kategorie (AIRCADEMY, 2023).

Die Kriterien sind in nachfolgender Tabelle (vgl. Tabelle 1) dargestellt.

Tabelle 1: UAS-Kategorien nach EASA Vorschriften (In Ahnlehnung an AIRCADEMY, 2023)

Offen	Speziell	Zulassungspflichtig
<u>Alle</u> Kriterien erfüllt	<u>Mindestens ein</u> Kriterium erfüllt:	<u>Mindestens ein</u> Kriterium erfüllt:
<ul style="list-style-type: none"> • < 25 kg • Nicht über Menschenansammlungen • < 120 m Above Ground Level (AGL) • Nur in direkter Sichtlinie • Kein Gefahrgut 	<ul style="list-style-type: none"> • > 25 kg • > 120 m AGL oder spezieller Luftraum • außerhalb der direkten Sichtlinie 	<ul style="list-style-type: none"> • über Menschenansammlungen • Gefahrguttransport • Menschentransport

Die offene Kategorie ist dabei die am weitesten verbreitete, daher wird diese näher ausgeführt. Unterteilt wird diese in vier technische Klassen, welche sich im maximalen Abfluggewicht, der maximalen Geschwindigkeit, der maximalen Flughöhe und der eingebauten Sensorik zur Bestimmung der Höhe, der Fernidentifizierung und der Geosensibilisierung unterscheiden. Allgemein gilt jedoch für den Betrieb aller Drohnen, dass der Flug nur durchgeführt werden darf, wenn das UAS alle technischen Anforderungen erfüllt, die drohnenführende Person die Betriebsregeln erfüllt und die entsprechende Qualifizierung aufweist und die Betreibenden – sofern notwendig – registriert sind (AIRCADEMY, 2023). Diese Regelungen sind im Detail durch verschiedene EU-Verordnungen festgesetzt. Hierzu gehören die Basisregeln der europäischen Luftfahrt ((EU) 2018/1139 Basic Regulation), die Verordnung zur Regelung der technischen Anforderungen ((EU) 2019/945 Delegierte Verordnung) und die Betriebsvorschriften ((EU) 2019/947 UAS Durchführungsverordnung) (AIRCADEMY, 2023; Delegierte Verordnung (EU) 2019/945, 2019; Durchführungsverordnung (EU) 2019/947, 2019; Verordnung (EU) 2018/1139, 2018). Diese Europäischen Rechtsgrundlagen werden in Deutschland durch nationale Verordnungen wie die Luftverkehrs-Ordnung und Gesetze wie das Luftverkehrsgesetz umgesetzt und ergänzt (LuftVG, 1980; LuftVO, 2015).

Die wichtigsten Voraussetzungen zum Führen eines UAS in Deutschland sind die Qualifizierung durch einen Kurs mit anschließender Prüfung, sowie die Registrierung des UAS, falls dieses mehr als 250g wiegt und Sensoren zur Aufzeichnung von persönlichen Daten angebracht sind. Zudem müssen in Deutschland relevante Lufträume wie Flugplätze, Verbotgebiete, Naturschutzgebiete und Militärische Tieffluggebiete gemieden werden (AIRCADEMY, 2023).

2.4.3.4 Statische Plattformen

Statische Aufbauten stellen in der Fernerkundung eher einen Sonderfall dar. Mit zunehmender Leistungsfähigkeit und gleichzeitigem Fall der Kosten werden diese aber immer interessanter. Sie können hohe Auflösungen über längere Zeiträume hinweg ermöglichen. Aufgrund der sehr einfachen Inbetriebnahme, der enormen Flexibilität und der wenigen rechtlichen Restriktionen im Vergleich zu UAS sind diese für statische oder längerfristige Aufnahmen ideal (Toth & Jutzi, 2017, S. 46). Einzelaufnahmen von statischen Plattformen zu Beurteilung von Vegetation anhand von Vegetationsindizes sind aber ebenfalls möglich (Thapa et al., 2021, S. 2).

Diese mobilen Plattformen zeichnen sich dadurch aus, dass die Sensorik auf einem Fahrzeug angebracht wird. Im Forstbereich oder auch bei Vermessungstätigkeiten von Internetkartendiensten wird diese Art der Plattform und Fernerkundung immer interessanter, da sie meist auch im Hintergrund betrieben werden kann. Hierbei ist die genaue Verortung der ermittelten Daten besonders wichtig (Grejner-Brzezinska, 2001b, 2001a; Toth & Jutzi, 2017, S. 45).

2.4.4 Vitalitätsbeurteilung in der Fernerkundung

Wie in Kapitel 2.4 erläutert, basiert die Fernerkundung auf Sensoren, welche Daten über die Reflektanz eines Objekts erfassen können. Will man mit den erfassten Daten Landschaften kategorisieren oder unterschiedliche Oberflächenausprägungen wie beispielsweise Meer, Vegetation, Fels oder Schnee voneinander abgrenzen, kann dies, neben der rein optischen Auswertung von Spektralbändern im für Menschen sichtbaren Bereich, auch durch die Analyse von anderen Spektralbändern erfolgen (Lillesand et al., 2008, S. 466).

Im Falle von Vegetation müssen deren Reflektionseigenschaften genauer betrachtet werden. Grüne Vegetation absorbiert die photosynthetisch aktiven Spektren, mit deren Energie die Stoffwechselprozesse der Pflanze angetrieben werden (Jensen, 2000). Genauer kann die spezifische Absorption und Reflektion in drei Bereiche unterteilt werden (Pettorelli, 2013, S. 18). Dazu gehört das sichtbare (400 – 700 nm), das Nahinfrarote (0,75 – 1,3 μm) und das

mittlere infrarote Spektrum (1,3 – 2,5 µm). Chlorophyll¹⁹ und andere Pigmente im Blatt, absorbieren Licht vor allem im blauen und roten, nicht aber im grünen Bereich des sichtbaren Spektrums (Jensen, 2000). Die Mesophylzellen²⁰ reflektieren hingegen vor allem im nahinfraroten-Spektrum (Knipling, 1970, S. 156). Die Reflektion im mittleren Infrarotbereich steht in Abhängigkeit zum Wassergehalt und wird oft zur Bestimmung von Trockenstress herangezogen (Pettorelli, 2013, S. 19).

2.4.4.1 Vegetationsindizes

Um Vegetation auszuwerten, wird aber meist nicht nur ein spektrales Band betrachtet. Häufiger wird untersucht, in welchem Verhältnis verschiedene Spektralbänder zueinander stehen. Die ermittelten Verhältnisse werden als sogenannte Vegetationsindizes bezeichnet. Je nach untersuchten Spektralbändern werden diese anders bezeichnet und lassen unterschiedliche Schlussfolgerungen zum Zustand der Vegetation zu. Ziel der VegetationsIndizes ist es laut Jackson und Huete (1991, S. 185), die Reflektion der Vegetation zu verstärken und gleichzeitig irrelevante Einflüsse wie Sonneneinstrahlung und Reflektionen des Bodens zu verringern. Indizes werden kategorisiert in die Eigenschaften, welche sie berechnen. Pettoelli (2013, S. 19) kategorisiert diese beispielsweise in Indizes für die Lichtnutzungseffizienz oder den Blattwassergehalt. Nachfolgend werden zwei wichtige Indizes näher erläutert werden.

2.4.4.1.1 Normalisierter differenzierter Vegetationsindex

Der wohl bekannteste Vegetationsindex ist der normalisierte differenzierte Vegetationsindex, kurz NDVI (Jensen, 2000). Der NDVI berechnet sich aus dem roten Spektrum, welches von grüner Vegetation nur schwach reflektiert wird und dem nahinfraroten-Spektrum, welches wiederum stark reflektiert wird (Jackson & Huete, 1991, S. 188) (vgl. Formel 2). Der NDVI ist dabei Indikator für die „Grünheit“ von Pflanzen und gibt Aufschluss über die Pflanzendichte und -produktivität (Tucker & Sellers, 1986, S. 1414).

Formel 2: Berechnung normalisierter differenzierter Vegetationsindex (Quelle: Jackson & Huete, 1991, S. 188)

$$NDVI = (NIR - Rot)/(NIR + Rot)$$

Die mögliche Obergrenze dieses Indexes liegt bei 1, während die Untergrenze bei -1 liegt. Auch wenn die Grenzen unterschiedlicher Vegetation oder Oberflächenabdeckung fließend sind, lässt sich mithilfe des NDVI mit guter Wahrscheinlichkeit die Landabdeckung kategorisieren (GISGeography, 2024). Erreicht der NDVI beispielsweise einen negativen Wert, ist die

¹⁹ Grüner Pflanzenfarbstoff, welcher Lichtenergie absorbiert und damit Stoffwechselvorgänge im Blatt versorgt.

²⁰ Hochdifferenzierte Zellen zwischen der oberen und unteren Epidermis des Blattes.

reflektierte Oberfläche mit hoher Wahrscheinlichkeit Wasser. Bebaute urbane Flächen mit einer geringen vegetativen Abdeckung erreichen Werte um die Null, während Werte nahe +1 für eine hohe Vegetationsdichte sprechen (Ghorbani et al., 2012, S. 5495; Jackson & Huete, 1991, S. 188). Neben dieser Landklassifizierung, wird dieser Index aber vor allem in der Landwirtschaft eingesetzt, um Aussagen über die Pflanzengesundheit zu treffen (Mahajan & Bundel, 2016, S. 41). Dabei dient er zur Bestimmung der Biomasse und zur Identifizierung von Pflanzen oder Ackerbereichen mit Dünge- oder Wasserbedarf (Mahajan & Bundel, 2016, S. 40–41).

Auch in der Forstwirtschaft wird der Index häufig als Indikator für Trockenstress und mangelnde Vitalität herangezogen (Dash et al., 2017, S. 1; Rimkus et al., 2017, S. 627; Wang et al., 2021, S. 2). Allgemein ist der NDVI ein bewährter Index, welcher in einem breiten Spektrum bewachsener Umgebungen Aussagen über Stress, Zustand und photosynthetische Aktivität von Pflanzen zulässt (Dash et al., 2018, S. 6).

2.4.4.1.2 Red Edge normalized difference vegetation Index

Ein in der Vegetationsanalyse ebenfalls weit verbreiteter Index ist der Red Edge normalized difference vegetation index, kurz RENDVI (Deng et al., 2018, S. 128). Im Vergleich zum NDVI nutzt der RENDVI zur Berechnung anstatt des roten Spektrums das Red-Edge-Spektrum (vgl. Formel 3). Das Red-Edge-Spektrum ist empfindlicher gegenüber dem Chlorophyll-Gehalt der Blätter.

Formel 3: Berechnung Red Edge normalized difference vegetation Index (Quelle: Deng et al., 2018, S. 128)

$$RENDVI = (NIR - RedEdge)/(NIR + RedEdge)$$

Fang et al. (2018) verwendet den RENDVI unter anderem erfolgreich in einer Studie zur frühzeitigen Stresserkennung bei Bäumen.

3 Material und Methoden

3.1 Ziel des Versuchs

Ziel dieser Arbeit ist es herauszuarbeiten, ob anhand seitlicher Fotoaufnahmen Aussagen über die Vitalität von Bäumen getroffen werden können. Hierzu werden mittels Multispektralkamera Aufnahmen von Pflanzen gemacht und ausgewertet. Die Pflanzen sind zudem mit Sensoren zur Bestimmung der Wasserversorgung ausgestattet und werden unter Laborbedingungen teils künstlich unter Trockenstress gesetzt, sowie für gleichbleibende Aufnahmen mit Vollspektrallampen bestrahlt. Anhand der Reflektion in unterschiedlichen Spektralbänder wird dann durch Berechnung des NDVI eine mögliche Korrelation zur Wasserverfügbarkeit geprüft. Ein Feldversuch hat sich bereits mit seitlichen Aufnahmen und deren Auswertung befasst. Dieser kam letztlich aber zu dem Schluss, dass die Aussagekräftigkeit der Messdaten aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren, wie Regen, Bewölkung und Temperatur nicht gegeben ist (Göhring, 2023). Aus diesem Grund wurde sich im Vorhinein, in Absprache mit dem betreuenden Professor, für einen Laborversuch entschieden. In diesem Setting wurden möglichst alle äußeren, nicht kontrollierbaren Einflüsse dezimiert und alle Parameter erfasst und steuerbar gemacht.

3.2 Versuchspflanzen

3.2.1 Vorüberlegungen

Um ein möglichst breites Spektrum an Stressreaktionen abdecken zu können, war es wichtig, zwei Baumarten auszuwählen, welche eine unterschiedlich starke und schnelle Reaktion auf Trockenstress aufweisen. Da alle Parameter überwacht werden und die Pflanzen somit Indoor gehalten werden, mussten diese getopft und relativ klein sein. In Rücksprache mit der Baumschule Ulmer, wurde die Sand-Birke als schnellreagierende Baumart und der Feld-Ahorn als trockenresistente Baumart ausgewählt (J. Ulmer, persönliche Kommunikation, 14. März 2024).

3.2.2 Pflanzen

Insgesamt kamen sechs Pflanzen zum Einsatz. Die Pflanzen stammen von den Ulmer Baumschulen mit Sitz in Weilheim unter Teck und wurden von diesen zur Verfügung gestellt. Ursprünglich waren die Pflanzen als Containerware für den Verkauf geplant. Für den Versuch wurden die etwa dreijährigen Pflanzen in 3 Liter Töpfe umgetopft. Das eingesetzte Substrat besteht aus einem faserigen Torfgemisch und versorgt Jungpflanzen optimal mit Wasser und Nährstoffen (J. Ulmer, persönliche Kommunikation, 14. März 2024).

Am Tag des Erhalts konnten folgende Parameter aufgenommen werden:

Tabelle 2: Ausgangsparameter der genutzten Pflanzen

	Baumart	Höhe [cm]	Durchmesser [cm in 10cm Höhe]
Birke Nr. 1	<i>Betula Pendula</i>	98	0,7
Birke Nr. 2	<i>Betula Pendula</i>	82	0,7
Birke Nr. 3	<i>Betula Pendula</i>	78	0,6
Feld-Ahorn Nr. 1	<i>Acer campestre</i>	84	0,5
Feld-Ahorn Nr. 2	<i>Acer campestre</i>	86	0,7
Feld-Ahorn Nr. 3	<i>Acer campestre</i>	83	0,6

3.3 Sensorik

3.3.1 Kamera-System

Das eingesetzte Kamera-System wurde von der Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg und dessen GIS-Labor gestellt. Bei der zur Verfügung gestellten Kamera handelt es sich um die Multispektral-Mehrlinsenkamera „Parrot Sequoia“ der Firma Parrot. (vgl. Abbildung 2). Dieses Kamerasystem gehört aufgrund ihrer geringen Abmessungen, der sehr einfachen Handhabung und der unkomplizierten Nutzung in Kombination mit UAS's zu den weltweit am meisten verbreitetsten System. Haupteinsatzgebiet ist vor allem in der Landwirtschaft im Bereich des Precision Farming²¹ und der Vegetationsanalyse.



Abbildung 2: Parrot Sequoia (Quelle: <https://www.aeromotus.com/product/parrot-sequoia-multispectral-sensor/>, abgerufen am 14.04.2024)

Die „Parrot Sequoia“ verfügt über vier separate Kameralinsen, welche separate Bilder im grünen-, roten-, RED-Edge- und nahinfraroten-Spektrum aufnehmen (Olsson et al., 2021, S. 4) (vgl. Tabelle 3).

²¹ Bewirtschaftungsmethode in der Landwirtschaft bei der notwendige Maßnahmen anhand gemessener Sensorparameter (Düngebedarf, Wasserbedarf, Pflanzengesundheit) nur kleinflächig im benötigten Bereich durchgeführt werden (Finger et al., 2019, S. 5).

Tabelle 3: Wellenlängenbänder des Parrot Sequoia (Quelle: Olsson et al., 2021, S. 4)

Band	Grün	Rot	Red-Edge	Nahinfrarot
Wellenlänge (nm)	480-520	640-680	730-740	770-810

Zusätzlich zu den vier Multispektrallinsen, ist die Kamera mit einer RGB-Kamera ausgestattet (Olsson et al., 2021, S. 4). Mit ihr lassen sich somit alle gängigen Vegetationsindizes berechnen. Die RGB-Kamera ist für Vegetationsindizes zwar eher ungeeignet, dient aber aufgrund ihrer höheren Auflösung gut zur Erstellung regulärer Orthophotos²², sowie der Referenz oder rein optischen Analyse.

Die Kamera wird mittels Mikro-USB mit Strom versorgt. In diesem Fall wird auf eine handelsübliche Power Bank zurückgegriffen. Befestigt wird die Kamera mit einer selbstgedruckten Hülle für die Kamera und einem GoPro-Schnellverschluss.

3.3.1.1 Kalibrierung des Kamera-Systems

Aufgenommene Daten mittels Multispektralkamera erfassen die Rückstrahlung der Sonne. Um Vergleiche zwischen unterschiedlichen Aufnahmen und auch Indizes zu ermöglichen, müssen die aufgenommenen Werte radiometrisch korrigiert werden. Sensorbezogen müssen sogenannte Vignettierungseffekte²³ und die automatische Einstellung von Belichtungszeit und Blendengröße angepasst werden. Diese Anpassungen sind sensorspezifisch und werden in aller Regel automatisch durchgeführt (Olsson et al., 2021, S. 2). Es bedarf dazu lediglich eines genormten Kalibrierungspanels. Diese Panels sind mit einer genormten Farbe beschichtet, was es der Kamera ermöglicht, anhand dieser die Rückstrahlungswerte zu korrigieren. (vgl. Abbildung 3)

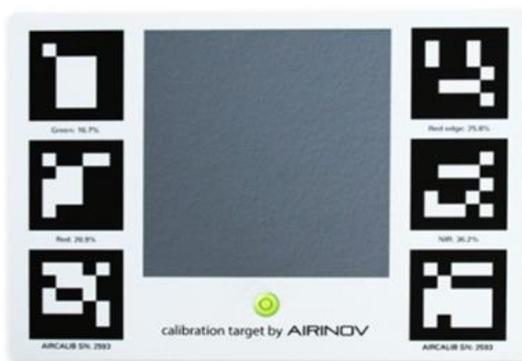


Abbildung 3: Kalibrierungspanel AIRINOV (Quelle: Edwards et al., 2019, S. 223)

²² Luftbilder mit Koordinatensystem, welches die Objekte lagegenau wiedergibt

²³ Phänomen durch das weniger Licht den Rand des Sensors erreicht und so die Werte verfälscht

Eine weitere Möglichkeit ist es, die aktuelle Sonneneinstrahlung kontinuierlich durch einen Sonneneinstrahlungssensor zu erfassen und anhand der ermittelten Werte die aufgenommenen Werte kontinuierlich zu korrigieren (Olsson et al., 2021, S. 2–3). Im Falle der „Parrot Sequoia“ wird eine Kombination aus beiden angewendet. Eine ausführliche Beschreibung sowie die Vorteile und Genauigkeit der eingesetzten Methode findet sich in der Bachelorarbeit von Josua Göhring (2023).

3.3.2 TreeSense Pulse

Der TreeSense Pulse, der Firma Treesense GmbH, ist ein Sensorsystem welches den Wasserhaushalt von Bäumen misst (Foderá et al., 2024). Ziel dieses Sensors ist es, die Bewässerungsstruktur und Bewässerungsabläufe effizienter zu gestalten.

Mittels Impedanzmessung (vgl. Kapitel 2.2.2) überwacht der „TreeSense Pulse“ den Wasserhaushalt des Baumes, wertet die ermittelten Daten in einer eigenen Software aus und empfiehlt daraufhin eine Dringlichkeit zur Bewässerung. Die Firma TreeSense vertreibt die Sensoren für den Einsatz an einzelnen Stadtbäume, um mit diesen einen zielgerichteten und ressourcenschonenden Wassereinsatz für alle Stadtbäume zu ermöglichen (Foderá et al., 2024). Eingebaut wird der Sensor in die Krone des Baums. Zwei Elektroden übernehmen dabei die Messungen im Stamm. Neben der Feuchtigkeit erfasst der Sensor auch die Temperatur, da diese ebenfalls Einfluss auf die Leitfähigkeit hat. Dies ist zurückzuführen auf die zunehmende Bewegung der Ionen im Wasser. Gleiches gilt natürlich auch für abnehmende Temperaturen und somit sinkender Leitfähigkeit trotz gleichem Wassergehalt (Jócsák et al., 2019, S. 371; Yue et al., 2018, S. 12).

In der mitgelieferten Software des Sensors, werden diese Einflüsse automatisch mit einberechnet und eine Bewässerungsdringlichkeit in Ampelabstufung visualisiert.

Genauere Informationen sind in der Bachelorarbeit von Fabian Frank zu finden (2024).

3.4 Vollspektrumlampen

In vielen Laborversuchen ist die Wirksamkeit von Vollspektrumlampen im Kontext der Pflanzenaufzucht nachgewiesen worden. Mit gezielter elektromagnetischer Strahlung können bestimmte Pflanzenfunktionen gefördert und angeregt werden (Paradiso & Proietti, 2022, S. 746). Viele Lampen sind daher keine Vollspektrumlampen, sondern bedienen nur gezielte einzelne Spektren, um bestimmte Pflanzenfunktionen zu fördern. Im Versuch ist die Rückstrahlung der Pflanze aber der relevante Faktor, weshalb die Lampe möglichst ähnliche Strahlungswerte zu natürlichem Sonnenlicht haben sollte. Aus diesem Grund wurde sich für eine Vollspektrumlampe entschieden, welche in den zu erfassenden Werten ähnliche

Strahlungseigenschaften wie Sonnenlicht aufweist. Ziel des Einsatzes einer solchen Lampe ist es, die Strahlung konstant zu halten und so atmosphärische Einflüsse zu umgehen. Die eingesetzten Vollspektrumlampen der Ausführung PAR38, sind von der Firma euroLighting GmbH mit Sitz in Nagold gestellt und bieten ein vergleichbares Spektrum zum Sonnenlicht (vgl. Anhang 1).

Die logische Folge des Einsatzes der Vollspektrumlampen ist zudem die Abschirmung gegenüber anderen Lichtquellen. Entschieden wurde sich daher für den Versuchsaufbau in einer Dunkelkammer (vgl. Kapitel 3.6.1).



Abbildung 4: Vollspektrumlampen PAR38 (Quelle: eigene Aufnahmen 02.04.2024)

3.5 Software zur Datenverarbeitung

Vom Hersteller empfohlene Software zur Bearbeitung von Bilddateien der Parrot Sequoia sind Programme wie „Sense ATLAS“, Pix4Dmapper und AIRINOV (Parrot, 2017, S. 100). Diese Software ist zu empfehlen, wenn es sich um viele Bilder handelt, welche zu Orthophotos oder Geländemodellen²⁴ verarbeitet werden. Daher ist in diesem Fall von dieser Software abzusehen, da ausschließlich mit Einzelbildern gearbeitet wurde. Stattdessen konnte auf das bereits an der Hochschule zur Verfügung stehende Programm ArcGIS Pro zurückgegriffen werden.

Bei ArcGIS Pro handelt es sich um eine professionelle GIS-Anwendung. Die Software ist dabei führend im Bereich der Geoinformationssystemen²⁵ (GIS). Vorteil dieser Software ist die gute digitale Werkzeugbeschreibung und die übersichtliche Bedienoberfläche.

²⁴ Geben durch eine in einem Gitter angeordneten Punktwolke Eigenschaften eines Geländes wieder.

²⁵ Informationssysteme zur Erfassung, Bearbeitung, Organisation, Analyse und Präsentation räumlicher Daten.

3.6 Versuchsaufbau

Für den Versuch wurden die sechs Pflanzen in einer eigens gebauten Dunkelkammer platziert. Aufgrund des fehlenden Sonnenlichts wurden die Pflanzen mittels Zeitschaltuhr für neun Stunden am Tag mit der Vollspektrumlampen bestrahlt. Diese wurden im vorgegebenen Abstand von 30 cm zu jeder Pflanze angebracht. Jeder Baum wurde zusätzlich mit je einem Kronen- und einem Bodenfeuchtsensor ausgestattet und über einen Zeitraum von 5 Wochen (15.04.2024 bis 15.05.2024) täglich mit einer Multispektralkamera aufgenommen. In diesem Zeitraum haben die Sensoren im Intervall von 15 min die Bodenfeuchtigkeit und den Widerstandswert des Xylems erfasst.

3.6.1 Dunkelkammer

Um die Aufnahmen, wie in Kapitel 3.4 erwähnt, vor äußeren Lichteinflüssen abzusichern und somit vergleichbare Aufnahmen zu generieren, wurden die Pflanzen in einer eigens gebauten Dunkelkammer platziert (vgl. Abbildung 5). Diese beinhaltet neben den Pflanzen ebenfalls Halterungen für die Sensorik, die Halterungen für die Kamera und einen BlueScreen²⁶ zur vereinfachten Bearbeitung und Auswertung der Aufnahmen. Um Luftstau, Wärmestau und zu hohe Luftfeuchtigkeit in der Kammer zu verhindern, wurde das obere Vlies abnehmbar gestaltet (vgl. Abbildung 6).



Abbildung 5: Dunkelkammer (Quelle: eigene Aufnahme 23.05.2024)



Abbildung 6: Abnehmbares Vlies der Dunkelkammer (Quelle: eigene Aufnahme 23.05.2024)

3.6.2 Kameramontage

Um vergleichbare Bilder zu erzeugen, wurde mit einem 3D-Drucker und einem erstellten 3D-Modell eine Kamerahalterung für die Multispektralkamera gedruckt (vgl. Abbildung 8). Diese wurde mittels GoPro-Schnelladapter an einer Leiste montiert (vgl. Abbildung 7). Die Leiste

²⁶ Einfarbiger blauer Hintergrund zum vereinfachten Ausschneiden des relevanten Bildobjekts.

konnte in einem gebauten Nutsystem in zwei unterschiedlichen Winkeln und drei unterschiedlichen Abständen zu den Pflanzen angebracht werden (vgl. Abbildung 9). Insgesamt konnten so pro Pflanze sechs unterschiedliche Kamerapositionen erzielt werden.



Abbildung 7: GoPro-Schnelladapter (Quelle: eigene Aufnahme 04.04.2024)



Abbildung 8: selbstgedruckte Kamerahaltung (Quelle: eigene Aufnahme 04.04.2024)

Bei den unterschiedlichen Kamera-Positionen wurde sich an unterschiedlichen Szenarien orientiert. In der oberen Leistenposition ist es möglich mit der Kamera waagrecht zentral in die Krone zu fotografieren. Dies ermöglicht die Simulation einer Fotoaufnahme mittels Hebebühne oder Vergleichbarem. In der unteren Einstellung wird eine seitliche Baumaufnahme in die Baumkrone simuliert unter einem Winkel von unten simuliert (Betrachter schaut zum Baum auf). Da der Kamerawinkel je nach Baumhöhe und Abstand schwankt, wurde ein praktikabler Winkel von 12° gewählt.

In jedem der zwei möglichen Kamerawinkeln, kann in einem Abstand von 30 cm, 40 cm und 50 cm fotografiert werden.



Abbildung 9: Nutsystem zur Kamerapositionierung (Quelle: eigene Aufnahme 02.04.2024)



Abbildung 10: Kamerabefestigung (Quelle: eigene Aufnahme 02.04.2024)

3.6.3 Gießintervall

In der Ulmer Baumschulen werden Jungpflanzen zum Schutz gegen Trockenstress im Gewächshaus täglich beregnet. Ein automatisiertes Beregnungs-System in der Decke steuert

die Gießvorgänge, wobei dieser Zyklus nicht dem Gießintervall von Bäumen nach ihrer Pflanzung in den Städten entspricht (Landschaftsbau eV, 2015). Balder (2017, S. 12) empfiehlt bei größeren Bäumen eine Gabe von 75 bis 100 Liter Wasser, zehn Tage nach ausbleibendem Niederschlag.

Um die Kameraaufnahmen und die Vitalität der Bäume aufgrund von Trockenstress in unterschiedlicher Intensität abzustufen zu können, wurde das Gießintervall der Baumschule und der Literaturempfehlung nicht übernommen. Die Pflanzen wurden wie nachfolgend angegeben gegossen:

Tabelle 4: Gießintervall nach TreeSense Baumstatus

	Gießintervall nach TreeSense Baumstatus „am austrocknen“ [d]	Menge [ml]
Birke Nr. 1	-	-
Birke Nr. 2	10	100
Birke Nr. 3	3	100
Feld-Ahorn Nr. 1	3	100
Feld-Ahorn Nr. 2	10	100
Feld-Ahorn Nr. 3	-	-

Maßgabe für das Zählen der Tage, ist der von den Sensoren angegebene Baumstatus, welcher sich aus der Bodenfeuchtigkeit und dem gemessenen Widerstand herleitet (vgl. Kapitel 3.3.2).

3.7 Versuchsdurchführung

3.7.1 Sensoreinbau

Der Einbau der Kronensensoren und Bodenfeuchtesensoren der Firma TreeSense wurde am 14.04.2024 durchgeführt. Da die Kronensensoren in aller Regel in mittelstarken Ästen eingebaut werden, wurde – nach Absprache mit der Firma *TreeSense* –, aufgrund der geringen Pflanzendurchmesser ein Einbau etwa 5-10 cm oberhalb des Pflanztopfes durchgeführt (G. Foderá, persönliche Kommunikation, 12. April 2024). Mittels Bohrschablone und eines 1mm starken Bohrers wurden zwei Löcher im genauen Abstand von 2,4 cm gebohrt. Hierbei musste ebenfalls aufgrund der geringen Durchmesser darauf geachtet werden nicht zu tief zu bohren, um unnötige Schäden zu vermeiden.



Abbildung 11: Elektrodenadapter (Quelle: eigene Aufnahmen 14.04.2024)



Abbildung 12: Bodenfeuchtesensor (Quelle: eigene Aufnahme 14.04.2024)

Nachfolgend wurden zwei Messingschrauben, als Elektroden dienend, im Durchmesser von 2 mm und einem Adapter in die angebohrten Löcher eingeschraubt (vgl. Abbildung 11). Nach Verbindung der Sensoreinheit mit dem Elektrodenadapter und dem Aktivieren dieser, begann das System direkt mit der Datenaufnahme.

Jede Pflanze wurde zudem mit einem Bodenfeuchtesensor ausgestattet. Da die Wurzelballen der Pflanzen im 3 l Topf von oben gut erreichbar sind, wurden diese lediglich leicht schräg zum Wurzelballen hineingesteckt (vgl. Abbildung 12). Mit diesem wurde das tatsächlich pflanzenverfügbare Wasser, zusätzlich zu dem durch die Kronensensoren ermittelten Wasserverbrauch, überwacht.

Die Sendereinheit bestehend aus einer Antenne und einem LoRaWAN-Gateway wurden an der zuvor gebauten Dunkelkammer befestigt (vgl. Abbildung 13). Dank der SIM-Kompatibilität konnte auf eine Einrichtung im Hochschulnetzwerk verzichtet werden.



Abbildung 13: Antenne und LoRaWAN-Gateway (Quelle: eigene Aufnahme 24.05.2024)

3.7.2 Datenaufnahme

Um eine wissenschaftliche Datengrundlage zu schaffen, in welcher alle Parameter genau erfassbar sind, wurden die Bäume täglich innerhalb eines gleichen Zeitraums fotografiert. Da die Transpirationsleistung und somit der Wasserverbrauch der Pflanzen zur Mittagszeit am höchsten ist, wurde der Zeitraum zwischen 14:00 Uhr und 15:30 Uhr gewählt.

Zu Beginn des Aufnahmezeitraums wurde jeder Baum aus den unterschiedlichen Kamerapositionen aufgenommen. Die ersten zwei Tage wurde der Versuchsaufbau hinsichtlich der Versuchsparameter der Kamerawinkel, der Sensorik und der Ausleuchtung geprüft und validiert. Hier zeigte sich:

1. Die sehr nahen Aufnahmeabstände von 30 cm – 40 cm führten aufgrund der Festbrennweite der Kamera zu sehr unscharfen Bildern.
2. Die Bilder aus den unteren Kamerawinkeln, waren zu dunkel und konnten nicht ausgewertet werden.
3. Der Zeitaufwand für die Datenauswertung pro Bild, ließ eine Auswertung von 36 Bildern pro Tag im Rahmen dieser Arbeit nicht zu.

Folgend wurde sich auf eine Aufnahme seitlich in die Krone aus einem Abstand von 50 cm beschränkt.

Vor der ersten Aufnahme wurde die Kamera kalibriert. Hierzu wurde einmalig das Referenzpanel (vgl. Abbildung 3) verwendet und für jede Aufnahme der Sonnenlichtsensor

eingesetzt. Dieser wurde an einer Halterung im immer gleichen Abstand zur Kamera positioniert.

Aufgrund der fehlenden eigenen Energieversorgung wurde die Kamera mittels Powerbank mit Strom versorgt, welche ebenfalls an der Halterung des Sonnenlichtsensors befestigt wurde. Bei der Powerbank handelt es sich um eine INIU Power Bank mit 20000 mAh und einer maximalen Ausgangsspannung von 22,5 Watt. Gesteuert wurde die Kamera über ein Webportal, welches über das erzeugte Wi-Fi der Parrot Sequoia erreichbar ist. Hier konnten Einstellungen vorgenommen werden und die Parameter des Sonnenlichtsensors sowie die Betriebstemperatur der Kamera abgerufen werden. Aufgenommene Bilder wurden im internen Speicher abgelegt und dann aber über das Webportal heruntergeladen. Der verwendete Sonnenlichtsensor verfügt deshalb über einen SD-Kartenslot. Dieser wurde als präferierter Speicherort ausgewählt und ermöglichte ein Abrufen der Bilder ohne angeschaltete Kamera. Der Sensor wurde deshalb mit einer 64 GB großen SD-Karte bestückt.

3.8 Auswertung der Daten

3.8.1 Bilddaten

Die täglich aufgenommenen Bilddaten wurden in die GIS-Software geladen, um diese dort zu verarbeiten. Da die Kameralinsen zueinander versetzt sind, war der erste Schritt die Einzelbilder passend übereinander zu platzieren. Das Tool „Georeferenzieren“ nutzt Passpunkte, welche auf beiden Bildern oder Datensätzen ausgewählt werden und legt diese so räumlich möglichst genau aufeinander. Mit diesem Werkzeug wurde das Nahinfrarotbild über das rote-Bild gelegt. Anhand dieser beiden Spektralbilder wurde folgend mittels der Funktion „Raster Calculator“ der NDVI als neues Raster berechnet (vgl. Abbildung 14).



Abbildung 14: Beispiel NDVI - Feld-Ahorn Nr. 3 - 22.04.2024 (Quelle: eigene Aufnahme 22.04.2024)

Um nur die Blattmasse anhand ihres NDVI auswerten zu können, wurden diese ausgeschnitten. Hierfür wurde in einem ersten Versuch das RGB-Bild über das NDVI-Raster gelegt. Es fiel auf, dass dies nur mit starken Verzerrungen möglich war. Grund dafür ist die Fischaugenlinse der RGB-Kamera, welche zu starken Verzerrungen am Randbereich des Bildes führt. Ein passgenaues Ausschneiden war so nicht möglich, weshalb die Maske anhand des grünen Spektralbandes erstellt wurde. Dieses wurde erst georeferenziert und dann mit der Funktion „Composite Bands“ mit dem roten-Bild zu einem Einzelraster komprimiert. Nachfolgend konnte das grüne Blattwerk in der Apple-Foto App durch Verstärkung der Sättigung hervorgehoben werden.

Dieses Bild wurde dann in der Fotosoftware GIMP geladen und mit der Funktion „Farbe nach Alpha“ die Blätter anhand der starken grünen Farbe ausgewählt. Die Blattbereiche wurden dann weiß und der Rest des Bildes schwarz eingefärbt. Da auf den Bildern auch immer die Pflanzen rechts und links der relevanten Pflanze abgebildet waren, wurden diese ebenfalls schwarz eingefärbt, sodass ein Schwarz-Weiß-Bild der relevanten Pflanze entsteht. Aufgrund der unterschiedlichen Lichtverhältnisse im oberen und unteren Bereich der Pflanze wurde die Maske für den oberen und unteren Teil der Pflanze getrennt. So war eine detaillierte Auswertung möglich (vgl. Abbildung 15 und Abbildung 16).



Abbildung 15: Bildbearbeitungsschritte – oberer Kronenbereich (Quelle: eigene Aufnahme 22.04.2024)



Abbildung 16: Bildbearbeitungsschritte – unterer Kronenbereich (Quelle: eigene Aufnahme 22.04.2024)

Mit diesen Masken wurde dann das erstellte NDVI-Raster multipliziert. Da Schwarzwerte eines Rasters den Wert Null haben und Weißwerte den Wert 255 wurde durch die Multiplikation ein Raster erstellt, welches die NDVI-Werte der Blätter um den Faktor 255 vergrößert und alle

anderen Werte auf Null setzt. Da Null ebenfalls einen Plausiblen Wert darstellt, wurde nachfolgend mit der Funktion „Set Null“ alle Werte mit Null in NODATA Werte umgewandelt. Dies hat zur Folge, dass diese Werte in der Auswertung nicht mehr als Werte aufgeführt wurden. Vor der Auswertung mussten die Daten dann aber wieder durch 255 geteilt werden, um zu den Ursprungswerten zurückzurechnen.

Für jedes Raster wurde dann der Mittelwert berechnet und so der NDVI über alle Blätter der Pflanze bestimmt. Diese Werte wurden zur weiteren Auswertung in Excel übertragen.

3.8.2 TreeSense Sensordaten

Die Daten der Sensoren der Firma TreeSense wurden über das firmeneigene Webportal, getrennt nach Sensor und Baum, als Excel-Tabelle heruntergeladen. In den bereitgestellten Datensätzen wurde dann, jeweils zum Aufnahmezeitpunkt des Bildes der Widerstandswert, der temperaturbereinigte Widerstand (temp. Widerstand) und die Bodenfeuchte abgelesen und in einem separaten Excel-Sheet notiert (vgl. Anhang 2).

3.8.3 Statistische Auswertung

Die nachfolgende statistische Auswertung wurde ausschließlich mithilfe des Programms SPSS durchgeführt. Zur Untersuchung der Fragestellung der Bachelorarbeit wurde je Tag und Pflanze, jeweils für den oberen und unteren Teil der Pflanze getrennt, das arithmetische Mittel des NDVI ermittelt. Hierdurch konnten mögliche kurzfristige Abweichungen durch die manuelle Bildbearbeitung und kleine Schwankungen durch ungleiche Belichtung ausgeglichen werden.

Auf dieser Grundlage war es möglich, statistische Untersuchungen in Bezug auf die Fragestellung der Bachelorarbeit entsprechend durchzuführen.

Zur weiteren Analyse wurden die Mittelwerte mittels t-Test für unabhängige Stichproben der einzelnen Pflanzen auf Signifikanz geprüft. Dabei handelt es sich um einen Hypothesentest, welcher auf einen statistisch signifikanten Unterschied der Grundgesamtheit der Pflanzen prüft. Vorausgehend muss hierfür ein Levene-Test durchgeführt werden, welcher die beiden Stichproben auf Varianzen-Gleichheit prüft (Eckle-Kohler & Kohler, 2017, S. 232). Dieser Schritt wurde für jede Baumart durchgeführt, um mögliche Datensätze für weitere Schritte zusammenzufassen.

Darauf aufbauend wurden die Datensätze mittels der Korrelationsanalyse nach Pearson auf Korrelation zwischen den NDVI-Mittelwerten, der Bodenfeuchte und dem temp. Widerstand analysiert. Voraussetzung ist die Normalverteilung, welche mittels Shapiro-Wilk Test vorher geprüft wurde. Bei vorliegender Korrelation wurde diese dann noch auf Signifikanz geprüft um

ein Erklärung durch Zufall auszuschließen (Krickhahn, 2017, S. 268; Rumsey, 2020, S. 76, 300).

Abschließend wurde bei den Datensätzen mit vorliegender Korrelation und Signifikanz eine einfache lineare Regression gebildet, in welcher als Voraussetzung Linearität als gegeben angenommen wurde. Dies hatte zum Ziel, die Art des Zusammenhangs zu beschreiben und visuell darzustellen (Eckle-Kohler & Kohler, 2017, S. 46–47; Krickhahn, 2017, S. 131–136; Rumsey, 2020, S. 304–305).

4 Ergebnisse

4.1 Augenscheinliche Ergebnisse

Die unter Trockenstress gesetzten Bäume hatten optisch erkennbare Anzeichen, wie hängende Blätter und Blattverfärbungen. Durch Bewässern nach Versuchsende haben sich alle Pflanzen aber augenscheinlich wieder von dem Trockenstress erholt. Lediglich Feld-Ahorn Nr. 3 (FA3) (vgl. Tabelle 2) zeigte starke Trockenzeichen und reagiert teilweise mit Blattabwurf.

Neben Trockenstressanzeichen hatten alle Pflanzen während des Versuches und auch bei Versuchsende Läusebefall (vgl. Abbildung 17). Diese waren vor allem an den jungen Trieben vorhanden und einige Blätter waren durch einen feinen Zuckerfilm belegt. Aus diesem Grund wurden alle Pflanzen während und nach dem Versuchszeitraum mit einer verdünnten Gallseifenlösung besprüht. Einige Blätter wurden dennoch über den Versuchszeitraum angefressen.



Abbildung 17: Läusebefall - Feld-Ahorn Nr. 1
(Quelle: eigene Aufnahmen 14.04.2024)



Abbildung 18: Bohrlöcher - Birke Nr. 2 (Quelle: eigene Aufnahme 24.05.2024)

Mit der letzten Datenaufnahme wurden aufgrund des Wachstums, wieder die Pflanzenabmessungen aufgenommen (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5: Finalparameter der genutzten Pflanzen

	Baumart	Höhe [cm]	Durchmesser [cm in 10cm Höhe]
Birke Nr. 1	<i>Betula Pendula</i>	113	1,8
Birke Nr. 2	<i>Betula Pendula</i>	111	0,7
Birke Nr. 3	<i>Betula Pendula</i>	98	0,6
Feld-Ahorn Nr. 1	<i>Acer campestre</i>	119	0,5
Feld-Ahorn Nr. 2	<i>Acer campestre</i>	102	0,7
Feld-Ahorn Nr. 3	<i>Acer campestre</i>	89	0,6

Nach Abbau der Sensorik konnten an den dünnen Pflanzen kleinere Rückstände wahrgenommen werden. Diese stammen vor allem von den Bohrungen und den eingedrehten Kupferschrauben (vgl. Abbildung 18).

4.2 Deskriptive Datenauswertung

Die über die Kamera aufgenommenen NDVI-Werte lagen für den gesamten Versuchszeitraum vor. Die Daten der TreeSense Bodenfeuchtesensoren lagen ebenfalls für den gesamten Zeitraum vor, lediglich der 30.04.24 und 01.05.2024 fehlt. Bei den TreeSense Impedanz-Sensoren fehlten Daten innerhalb des Zeitraums des 29.04.24 bis 03.05.24. Ursache hierfür war, ein Update bei der Firma TreeSense, der zu einem Serverabsturz geführt hat, auf dem den die gesendeten Daten hätten gespeichert werden sollen. Die Daten ließen sich leider aufgrund fehlender Serverbackups nicht mehr für die Arbeit wiedererlangen (G. Foderá & M. Spielvogel, persönliche Kommunikation, 5. Mai 2024). Abgesehen von diesen Lücken lagen aber alle Daten als absolute Werte vor.

Nachfolgende Tabelle zeigt getrennt nach Pflanze alle erfassten NDVI-Werte, den Aufnahmezeitpunkt, die Bodenfeuchte in Prozent, den Widerstand in Kiloohm (kurz: k Ω) und den temp. Widerstand ebenfalls in k Ω . Der NDVI wird dabei getrennt nach oberem und unterem Kronenbereich angegeben. Aufgrund der Datenmenge ist beispielhaft nur die Aufnahmetabelle des Feldhorn Nr. 1 abgebildet (vgl. Tabelle 6). Die Aufnahmeblätter der anderen Baumarten sind in Anhang 2 beigefügt.

Tabelle 6: Aufnahmeblatt - Feld-Ahorn Nr. 1

Aufnahme datum	Uhrzeit	NDVI- oben-Mittelwert	NDVI- unten-Mittelwert	Bodenfeuchte [%]	Widerstand [k Ω]	temperaturbereinigter Widerstand [k Ω]
15.04.2024	15:51	-0,17149019	-0,077960784	33,08	42,204	47,89690514
16.04.2024	13:40	-0,19607843	-0,101294118	30,53	46,004	39,76770614
17.04.2024	10:02	-0,25145098	-0,070705882	30,935	47,048	41,51906541
18.04.2024	14:58	-0,10552941	-0,058352941	29,855	51,442	43,8907058
19.04.2024	12:37	-0,25878431	-0,054313725	28,85	53,248	41,62425156
22.04.2024	15:00	-0,24356862	-0,047764706	28,405	54,203	37,70314999
23.04.2024	15:15	-0,33164705	-0,051764706	27,33	58,288	31,15474071
24.04.2024	15:10	-0,35121568	-0,068313725	26,21	51,972	33,84871859
25.04.2024	15:15	-0,27752941	-0,04772549	25,15	50,728	30,64293339
26.04.2024	15:20	-0,19490196	-0,02254902	36,295	48,555	31,60935429
29.04.2024	15:20	-0,25145098	-0,176117647	22,48		
30.04.2024	14:00	-0,19878431	-0,128941176			
01.05.2024	13:45	-0,15207843	-0,106823529			
02.05.2024	15:15	-0,26498039	-0,18627451	16,92		
03.05.2024	14:30	-0,23050980	-0,146156863	14,82		
06.05.2024	14:25	-0,19447058	-0,118509804	9,595	84,919	117,688116
07.05.2024	15:05	-0,17807843	-0,15172549	8,335	89,876	109,7288558

Aufnahme datum	Uhrzeit	NDVI- oben-Mittelwert	NDVI- unten-Mittelwert	Bodenfeuchte [%]	Widerstand [kΩ]	temperaturbereinigter Widerstand [kΩ]
08.05.2024	15:10	-0,22443137	-0,174156863	7,35	96,267	121,3067966
09.05.2024	15:05	-0,19149019	-0,130117647	6,535	100,574	125,6643878
10.05.2024	15:10	-0,18372549	-0,05054902	5,86	107,031	155,8547002
13.05.2024	14:55	-0,09733333	-0,011764706	4,16	133,54	276,8499707
14.05.2024	15:10	-0,16509803	-0,029019608	3,64	142,277	422,5413289
15.05.2024	15:10	-0,09392156	-0,010745098	3,16	155,376	350,2527066
16.05.2024	15:10	-0,14749019	-0,018352941	2,83	158,291	514,1279936
17.05.2024	14:10	-0,11498039	-0,019490196	2,49	162,819	382,2618164

Allgemein ist auffällig, dass der NDVI sowohl für den oberen als auch den unteren Pflanzenbereich durchweg negativ war. Dies war bei beiden Baumarten und allen Pflanzen konsistent.

In Tabelle 7 sind die Mittelwerte des NDVI für den oberen und unteren Pflanzenbereich, die Bodenfeuchte, der Widerstand und der temp. Widerstand der drei Birken dargestellt. Diese Mittelwerte wurden nachfolgend in einen relativen Zusammenhang gesetzt. Dadurch wurde jeweils für die einzelnen Parameter die prozentuale Zu- oder Abnahme über den Versuchszeitraum dargestellt.

Tabelle 7: Arithmetisches Mittel und prozentuale Unterschiede des Widerstands, temperaturbereinigten Widerstandes und der Bodenfeuchte je Birkenpflanzen in Woche 1 und 5

Birke	Bi1	Bi2	Bi3
Mittelwert NDVI-Oben (15.-19.04.2024)	-0,17854902	-0,238619608	-0,264054902
Mittelwert NDVI-Oben (13.-17.05.2024)	-0,24547451	-0,10214902	-0,200980392
prozentualer Unterschied [%]	-37,48%	57,19%	23,89%
Mittelwert NDVI-Unten (15.-19.04.2024)	-0,118486275	-0,097921569	-0,158839216
Mittelwert NDVI-Unten (13.-17.05.2024)	-0,10427451	-0,023403922	-0,067011765
prozentualer Unterschied [%]	11,99%	76,10%	57,81%
Mittelwert Bodenfeuchte (15.-19.04.2024)	45,414	41,064	23,348
Mittelwert Bodenfeuchte (13.-17.05.2024)	1,011	4,42	4,358
prozentualer Unterschied [%]	-97,77%	-89,24%	-81,33%
Mittelwert Widerstand (15.-19.04.2024)	50,8672	54,116	42,8289
Mittelwert Widerstand (13.-17.05.2024)	74,8454	67,5912	74,8454
prozentualer Unterschied [%]	47,14%	24,90%	74,75%

Birke	Bi1	Bi2	Bi3
Mittelwert temperaturbereinigter Widerstand (15.-19.04.2024)	48,23989434	50,34808144	41,06180985
Mittelwert temperaturbereinigter Widerstand (13.-17.05.2024)	124,9923339	109,2706902	70,30380445
prozentualer Unterschied [%]	159,11%	117,03%	71,21%

Zu sehen ist, dass sich bei Birke Nr. 1 (Bi1), welche am wenigsten gegossen wurde, die Bodenfeuchte und der temperaturbereinigte Widerstand am stärksten prozentual verändert (vgl. Kapitel 3.6.3). Der absolute Widerstand fällt aus dieser Beobachtung heraus und liegt mit einer prozentualen Zunahme von 47,14 % zwischen Birke Nr. 2 (Bi2) mit 24,90 % und Birke Nr. 3 (Bi3) mit 74,75 %. Bei Bi2 und Bi3 ist bei den Mittelwerten des NDVI für den oberen und unteren Pflanzenbereich ebenfalls eine positive prozentuale Zunahme zu erkennen. Dieser beträgt für den oberen Bereich bei Bi2 57,19 % und bei Bi3 23,89 %. Im unteren Pflanzenbereich nimmt der NDVI bei Bi2 um 76,10 % und bei Bi3 um 57,18 % zu. Bei Bi1 ist für den oberen Pflanzenbereich eine prozentuale Abnahme von -37,48 % des NDVI zu verzeichnen. Für den unteren Pflanzenbereich veränderte sich der Mittelwert des NDVI von der ersten zur 5. Woche um 11,99 %.

Tabelle 8: Arithmetisches Mittel und prozentuale Unterschiede des Widerstands, temperaturbereinigten Widerstandes und der Bodenfeuchte je Feld-Ahornpflanzen in Woche 1 und 5

Feld-Ahorn	FA1	FA2	FA3
Mittelwert NDVI-Oben (15.-19.04.2024)	-0,196666667	-0,255568627	-0,249058824
Mittelwert NDVI-Oben (13.-17.05.2024)	-0,100235294	-0,140156863	-0,123764706
prozentualer Unterschied [%]	49,03%	45,16%	50,31%
Mittelwert NDVI-Unten (15.-19.04.2024)	-0,07252549	-0,071113725	-0,132
Mittelwert NDVI-Unten (13.-17.05.2024)	-0,054603922	-0,054603922	-0,01787451
prozentualer Unterschied [%]	24,71%	23,22%	86,46%
Mittelwert Bodenfeuchte (15.- 19.04.2024)	30,65	36,833	47,937
Mittelwert Bodenfeuchte (13.- 17.05.2024)	22,428	22,428	3,256
prozentualer Unterschied [%]	-26,83%	-39,11%	-93,21%
Mittelwert Widerstand (15.-19.04.2024)	47,9892	33,6838	64,6793
	63,0304	63,0304	150,4606

Feld-Ahorn	FA1	FA2	FA3
Mittelwert Widerstand (13.-17.05.2024)			
prozentualer Unterschied [%]	31,34%	87,12%	132,63%
Mittelwert temperaturbereinigter Widerstand (15.-19.04.2024)	42,93972681	31,48566971	60,23579543
Mittelwert temperaturbereinigter Widerstand (13.-17.05.2024)	87,77055319	87,77055319	389,2067632
prozentualer Unterschied [%]	104,40%	178,76%	546,14%

In Tabelle 8 sind die gleichen Berechnungen abgebildet für die drei Feld-Ahorn-Pflanzen. Diese zeigen ein ähnliches Muster wie die Birken: So fand die stärkste prozentuale Veränderung bei dem nicht gegossenen FA3 statt. Sowohl bei der Bodenfeuchte mit einer prozentualen Veränderung von -93,21 %, dem Widerstand mit 132,63 % und dem temp. Widerstand mit 546,14 % sind die Veränderungen am größten. Feld-Ahorn Nr. 2 (FA2) und Feld-Ahorn Nr. 1 (FA1) stufen sich dann nach der Gießmenge in diesen Parametern ab. Der NDVI für den oberen Pflanzenbereich ist im Vergleich zu den Birkenpflanzen näher beieinander. So liegt der größte Unterschied in den prozentualen Veränderungen der drei Pflanzen bei einer Differenz von 5,15 % mit Werten bei FA1 von 49,03 %, bei FA2 von 45,16 % und FA3 mit 50,31 %. Im unteren Pflanzenbereich ist die größte Differenz mit 63,02 % ebenfalls zwischen FA2 mit 23,44 % und FA3 mit 86,46 % zu sehen.

4.3 Analytische Datenauswertung

Im Folgenden wurden der temperaturbereinigte Widerstand, die Bodenfeuchte, sowie der NDVI im oberen und unteren Pflanzenbereich näher betrachtet. Hierbei wurde auf den absoluten Widerstand verzichtet, da auf diesen weitere Einflussgrößen wirken, welche automatisch durch die Sensorik im temp. Widerstand erfasst und berücksichtigt wurden.

4.3.1 Zweiseitiger t-test für unabhängige Stichproben

Um für die weiteren Analysen Gruppierungen bilden zu können, mussten die vorhandenen Daten auf eine gemeinsame Grundgesamtheit überprüft werden. Genauer wurde mittels t-test geprüft, ob die erfassten NDVI-Werte der einzelnen Pflanzen aus der gleichen Grundgesamtheit stammen. Bei einem t-Test handelt es sich um einen Hypothesentest mit folgenden Hypothesen:

Null-Hypothese H0: Die beiden NDVI Datensätze stammen aus der gleichen Grundgesamtheit und können nachfolgend gemeinsam betrachtet werden.

Alternativhypothese H1: Die beiden NDVI Datensätze stammen nicht aus der gleichen Grundgesamtheit und können nicht gemeinsam betrachtet werden.

Die **Null-Hypothese H0** ist dabei anzunehmen, wenn $(p=)$ Signifikanz (Sig.) $> \alpha$. In der Forst- und Umweltwissenschaft beträgt die Irrtumswahrscheinlichkeit meist $\alpha = 0,05$ (5 %). Diese wurde in allen nachfolgenden Berechnungen verwendet.

Die t-Tests wurden erst getrennt nach Baumart, sowie nach oberen und unterem Pflanzenbereich durchgeführt. Bei vorliegender gemeinsamer Grundgesamtheit wurden die Daten nachfolgend zusammen betrachtet. Mittels Levene-Test wird vorausgehend auf Varianzen Gleichheit geprüft. Hier gelten die Hypothesen:

Null-Hypothese H0: Die Varianzen sind gleich.

Alternativhypothese H1: Die Varianzen sind nicht gleich.

H0 ist dabei abzulehnen, wenn Sig. $< \alpha$.

Tabelle 9: Ergebnisse des t-Test und Levene-Test für Birke Nr. 1 und Nr. 2

		Levene-Test der Varianzgleichheit		t-Test für die Mittelwertgleichheit
		F	Sig.	Signifikanz Zweiseitiges p
NDVI- oben- Mittelwert	Varianzen sind gleich	9,864	0,003	0,117
	Varianzen sind nicht gleich			0,118
NDVI- unten- Mittelwert	Varianzen sind gleich	0,429	0,516	<0,001
	Varianzen sind nicht gleich			<0,001

Unter Annahme ungleicher Varianzen des NDVI-Oben der Bi1 und der Bi2 und $p > 0,05$ kann H0 nicht abgelehnt werden.

Die beiden Datensätze **entstammen der gleichen Grundgesamtheit** und können für folgende Auswertungen gruppiert werden.

Unter Annahme gleicher Varianzen des NDVI-Unten der Bi1 und der Bi2 und $p < 0,05$ kann H0 abgelehnt werden.

Die beiden Datensätze **entstammen nicht der gleichen Grundgesamtheit** und können für folgende Auswertungen nicht gruppiert werden.

Tabelle 10: Ergebnisse des t-Test und Levene-Test für Birke Nr. 1 und Nr. 3

		Levene-Test der Varianzgleichheit		t-Test für die Mittelwertgleichheit
		F	Sig.	Signifikanz Zweiseitiges p
NDVI- oben-	Varianzen sind gleich	0,045	0,833	0,720
Mittelwert	Varianzen sind nicht gleich			0,720
NDVI- unten-	Varianzen sind gleich	3,481	0,068	0,490
Mittelwert	Varianzen sind nicht gleich			0,490

Unter Annahme gleicher Varianzen des NDVI-Oben der Bi1 und der Bi3 und $p > 0,05$ kann H_0 nicht abgelehnt werden.

Die beiden Datensätze **entstammen der gleichen Grundgesamtheit** und können für folgende Auswertungen gruppiert werden.

Unter Annahme gleicher Varianzen des NDVI-Unten der Bi1 und der Bi3 und $p > 0,05$ kann H_0 nicht abgelehnt werden.

Die beiden Datensätze **entstammen der gleichen Grundgesamtheit** und können für folgende Auswertungen gruppiert werden.

Tabelle 11: Ergebnisse des t-Test und Levene-Test für Birke Nr. 2 und Nr. 3

		Levene-Test der Varianzgleichheit		t-Test für die Mittelwertgleichheit
		F	Sig.	Signifikanz Zweiseitiges p
NDVI- oben-	Varianzen sind gleich	6,928	0,011	0,076
Mittelwert	Varianzen sind nicht gleich			0,077
NDVI- unten-	Varianzen sind gleich	1,908	0,174	<0,001
Mittelwert	Varianzen sind nicht gleich			<0,001

Unter Annahme ungleicher Varianzen des NDVI-Oben der Bi2 und der Bi3 und $p > 0,05$ kann H_0 nicht abgelehnt werden.

Die beiden Datensätze **entstammen der gleichen Grundgesamtheit** und können für folgende Auswertungen gruppiert werden.

Unter Annahme gleicher Varianzen des NDVI-Unten der Bi2 und der Bi3 und $p < 0,05$ kann H_0 abgelehnt werden.

Die beiden Datensätze **entstammen nicht der gleichen Grundgesamtheit** und können für folgende Auswertungen nicht gruppiert werden.

Tabelle 12: Ergebnisse des t-Test und Levene-Test für Feld-Ahorn Nr. 1 und Nr. 2

		Levene-Test der Varianzgleichheit		t-Test für die Mittelwertgleichheit
		F	Sig.	Signifikanz Zweiseitiges p
NDVI- oben-	Varianzen sind gleich	3,110	0,084	0,778
Mittelwert	Varianzen sind nicht gleich			0,778
NDVI- unten-	Varianzen sind gleich	4,531	0,038	0,084
Mittelwert	Varianzen sind nicht gleich			0,085

Unter Annahme gleicher Varianzen des NDVI-Oben des FA1 und des FA2 und $p > 0,05$ kann H_0 nicht abgelehnt werden.

Die beiden Datensätze **entstammen der gleichen Grundgesamtheit** und können für folgende Auswertungen gruppiert werden.

Unter Annahme ungleicher Varianzen des NDVI-Unten des FA1 und des FA2 sowie $p > 0,05$ kann H_0 nicht abgelehnt werden.

Die beiden Datensätze **entstammen der gleichen Grundgesamtheit** und können für folgende Auswertungen gruppiert werden.

Tabelle 13: Ergebnisse des t-Test und Levene-Test für Feld-Ahorn Nr. 1 und Nr. 3

		Levene-Test der Varianzgleichheit		t-Test für die Mittelwertgleichheit
		F	Sig.	Signifikanz Zweiseitiges p
NDVI- oben-	Varianzen sind gleich	0,821	0,369	0,170
Mittelwert	Varianzen sind nicht gleich			0,170
NDVI- unten-	Varianzen sind gleich	19,822	<0,001	<0,001
Mittelwert	Varianzen sind nicht gleich			<0,001

Unter Annahme gleicher Varianzen des NDVI-Oben des FA1 und des FA3 und $p > 0,05$ kann H_0 nicht abgelehnt werden.

Die beiden Datensätze **entstammen der gleichen Grundgesamtheit** und können für folgende Auswertungen gruppiert werden.

Unter Annahme ungleicher Varianzen des NDVI-Unten des FA1 und des FA3 und $p < 0,05$ kann H_0 abgelehnt werden.

Die beiden Datensätze **entstammen nicht der gleichen Grundgesamtheit** und können für folgende Auswertungen nicht gruppiert werden.

Tabelle 14: Ergebnisse des t-Test und Levene-Test für Feld-Ahorn Nr. 2 und Nr. 3

		Levene-Test der Varianzgleichheit		t-Test für die Mittelwertgleichheit
		F	Sig.	Signifikanz Zweiseitiges p
NDVI- oben- Mittelwert	Varianzen sind gleich	0,894	0,349	0,192
	Varianzen sind nicht gleich			0,192
NDVI- unten- Mittelwert	Varianzen sind gleich	10,737	0,002	<0,001
	Varianzen sind nicht gleich			<0,001

Unter Annahme gleicher Varianzen des NDVI-Oben des FA2 und des FA3 sowie $p > 0,05$ kann H_0 nicht abgelehnt werden.

Die beiden Datensätze **entstammen der gleichen Grundgesamtheit** und können für folgende Auswertungen gruppiert werden.

Unter Annahme ungleicher Varianzen des NDVI-Unten des FA2 und des FA3 und $p < 0,05$ kann H_0 abgelehnt werden.

Die beiden Datensätze **entstammen nicht der gleichen Grundgesamtheit** und können für folgende Auswertungen nicht gruppiert werden.

Aus diesen Ergebnissen ergaben sich folgende vorläufige Gruppierungen zur weiteren Analyse:

Gruppe 1 NDVI-oben: FA1, FA2 und FA3

Gruppe 2 NDVI-unten: FA1 und FA2

Gruppe 3 NDVI-oben: Bi1, Bi2 und Bi3

Gruppe 4 NDVI unten: Bi1 und Bi3

Diese wurden nachfolgend noch weiter untersucht. Die größten Gruppen wurden noch auf eine gemeinsame Grundgesamtheit zwischen den beiden Baumarten geprüft In diesem Fall zwischen Gruppe 1 und Gruppe 3 sowie zwischen Gruppe 2 und Gruppe 4.

Tabelle 15: Ergebnisse des t-Test und Levene-Test für Gruppe 1 und 3

		Levene-Test der Varianzgleichheit		t-Test für die Mittelwertgleichheit
		F	Sig.	Signifikanz Zweiseitiges p
NDVI- oben -	Varianzen sind gleich	0,011	0,916	0,331
Mittelwert	Varianzen sind nicht gleich			0,331

Unter Annahme gleicher Varianzen des NDVI-Oben der Gruppe 1 und Gruppe 3 und $p > 0,05$ kann H_0 nicht abgelehnt werden.

Die beiden Datensätze **entstammen der gleichen Grundgesamtheit** und können für folgende Auswertungen gruppiert werden.

Tabelle 16: Ergebnisse des t-Test und Levene-Test für Gruppe 2 und 4

		Levene-Test der Varianzgleichheit		t-Test für die Mittelwertgleichheit
		F	Sig.	Signifikanz Zweiseitiges p
NDVI- unten -	Varianzen sind gleich	11,731	<0,001	<0,001
Mittelwert	Varianzen sind nicht gleich			<0,001

Unter Annahme ungleicher Varianzen des NDVI-Oben der Gruppe 2 und Gruppe 4 sowie $p < 0,05$ kann H_0 abgelehnt werden.

Die beiden Datensätze **entstammen nicht der gleichen Grundgesamtheit** und können für folgende Auswertungen nicht gruppiert werden.

Abschließend wurde noch geprüft, ob die NDVI-Werte von oben aus der gleichen Grundgesamtheit stammen wie die NDVI-Werte von unten.

Hier ergaben alle Tests ein Ergebnis von $p < 0,05$, weshalb H_0 abzulehnen ist. Obere und Untere NDVI-Werte entstammen somit nicht der gleichen Grundgesamtheit und sind nicht zu gruppieren.

Final ergeben sich für nachfolgende Analysen folgende Aufteilungen:

Gruppe 1: NDVI-Oben alle Pflanzen

Gruppe 2: NDVI-Unten Bi1 und Bi3

Gruppe 3: NDVI-Unten FA1 und FA2

Gruppe 4: NDVI-Unten FA3

Gruppe 5: NDVI-Unten Bi2

4.3.2 Korrelationsanalyse der Gruppen mit der Bodenfeuchte und dem temperaturbereinigten Widerstand

Diese Gruppen wurden weiterhin auf Ihre Korrelation mit den aufgenommenen Sensordaten überprüft. Diese Untersuchung wurde mit dem Pearson'schen Korrelationskoeffizienten durchgeführt, welcher die Stärke zweier Variablen angibt. Um auszuschließen, dass es sich bei dieser Korrelation um Zufall handelt, muss dieser Wert noch auf Signifikanz geprüft werden. Dabei handelt es sich ebenfalls um einen Hypothesentest mit folgenden Hypothesen:

Null-Hypothese H0: Der Korrelationskoeffizient der Grundgesamtheit ist 0.

Alternativhypothese H1: Der Korrelationskoeffizient unterscheidet sich signifikant von Null.

H0 ist dabei abzulehnen, wenn $\text{Sig.} < 0,05$.

Nachfolgend wurden die signifikanten Korrelationskoeffizienten nach dem Prinzip von Cohen eingeordnet. Dieser spricht von einer starken Korrelation ab einem Koeffizienten von 0,5, einer mittelstarken Korrelation ab 0,3 und einer schwachen Korrelation ab 0,1 (Cohen, 2013).

Tabelle 17: Kreuztabelle der Korrelation zwischen NDVI-Oben, Bodenfeuchte, Widerstand und temp. Widerstand der Gruppe 1

		NDVI- oben- Mittelwert	Bodenfeuchte [%]	temperaturbereinigter Widerstand [kΩ]
NDVI- oben- Mittelwert	Pearson-Korrelation	1	-0,270**	0,304**
	Sig. (2-seitig)		0,001	<0,001
	N	150	138	120
Bodenfeuchte [%]	Pearson-Korrelation	-0,270**	1	-0,400**
	Sig. (2-seitig)	0,001		<0,001
	N	138	138	120
Widerstand [kΩ]	Pearson-Korrelation	0,209*	-0,274**	0,909**
	Sig. (2-seitig)	0,022	0,002	<0,001
	N	120	120	120
temperaturberei- nigter Widerstand [kΩ]	Pearson-Korrelation	0,304**	-0,400**	1
	Sig. (2-seitig)	<0,001	<0,001	
	N	120	120	120

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,05 (2-seitig) signifikant.

In der oben abgebildeten Tabelle 17 ist zu erkennen, dass die **H0** für alle Korrelationen des NDVI-Oben mit den Sensordaten abgelehnt werden kann und sich diese signifikant von Null unterscheiden. Die Korrelation zwischen NDVI-Oben und Bodenfeuchte kann dabei mit -0,270 als schwach und zwischen dem NDVI-Oben und dem temp. Widerstand mit -0,4 als mittelstark angenommen werden.

Die anderen Korrelationskoeffizienten, beispielsweise die zwischen der Bodenfeuchte und dem temp. Widerstand, sind zwar interessant, für die Arbeit aber nicht relevant. Deshalb werden diese nachfolgend nicht näher betrachtet.

Tabelle 18: Korrelation zwischen NDVI-Unten, Bodenfeuchte und temp. Widerstand der Gruppe 2

		NDVI- unten - Mittelwert	Bodenfeuchte [%]	temperaturbereinigter Widerstand [kΩ]
NDVI- unten - Mittelwert	Pearson-Korrelation	1	-0.442	0.177
	Sig. (2-seitig)		0.002	0.274
	N	50	46	40

Für Gruppe 2 kann **H0 nur für die Korrelation zwischen NDVI-Unten und der Bodenfeuchte abgelehnt** werden, da Sig. < 0,05. Der Korrelationskoeffizient unterscheidet sich somit signifikant von 0. Für diesen Fall beträgt der Korrelationskoeffizient -0,442 und kann somit als mittlere Korrelation eingeordnet werden.

Tabelle 19: Korrelation zwischen NDVI- Unten, Bodenfeuchte und temp. Widerstand der Gruppe 3

		NDVI- unten - Mittelwert	Bodenfeuchte [%]	temperaturbereinigter Widerstand [kΩ]
NDVI- unten - Mittelwert	Pearson-Korrelation	1	-0.427	0.042
	Sig. (2-seitig)		0.003	0.795
	N	50	46	40

Für Gruppe 3 kann **H0 ebenfalls nur für die Korrelation zwischen NDVI-Unten und der Bodenfeuchte abgelehnt** werden, da Sig. < 0,05. Der Korrelationskoeffizient unterscheidet sich somit signifikant von 0. Für diesen Fall beträgt der Korrelationskoeffizient -0,427 kann somit als mittlere Korrelation eingeordnet werden.

Tabelle 20: Korrelation zwischen NDVI- Unten, Bodenfeuchte und temp. Widerstand der Gruppe 4

		NDVI- unten - Mittelwert	Bodenfeuchte [%]	temperaturbereinigter Widerstand [kΩ]
NDVI- unten - Mittelwert	Pearson-Korrelation	1	-0.398	0.675
	Sig. (2-seitig)		0.060	0.001
	N	25	23	20

Für Gruppe 4 kann **H0 für die Korrelation zwischen NDVI-Unten und dem temp. Widerstand abgelehnt** werden, da Sig. < 0,05. Der Korrelationskoeffizient unterscheidet sich somit signifikant von 0. Für diesen Fall beträgt der Korrelationskoeffizient 0,675 mit einer starken Korrelation zwischen NDVI-Unten und dem temp. Widerstand.

Tabelle 21: Korrelation zwischen NDVI- Unten, Bodenfeuchte und temp. Widerstand der Gruppe 5

		NDVI- unten - Mittelwert	Bodenfeuchte [%]	temperaturbereinigter Widerstand [kΩ]
NDVI- unten - Mittelwert	Pearson-Korrelation	1	-0.778**	0.691**
	Sig. (2-seitig)		<0.001	<0.001
	N	25	23	20

Für Gruppe 5 kann **H0 für die Korrelation zwischen NDVI-Unten und der Bodenfeuchte und dem temp. Widerstand abgelehnt** werden, da Sig. < 0,05. Der Korrelationskoeffizient unterscheidet sich somit signifikant von 0. Die Korrelationskoeffizienten zwischen NDVI-Unten und der Bodenfeuchte beträgt -0,778 und zwischen dem NDVI-Unten und dem temp. Widerstand 0,691 und korrelieren somit beide stark.

4.3.3 Regressionsanalyse

Um die Art des Zusammenhangs der vorher bestimmten korrelierenden Variablen zu ermitteln, wird nachfolgend eine Regressionsrechnung durchgeführt. Für jede ermittelte Gruppe und Korrelation wird hierbei eine einzelne Regression berechnet. Als unabhängige Variante wurde immer die jeweilige NDVI-Variable genommen, da mit dieser auf eventuelle Trockenstressindikatoren geschlossen werden soll.

Nachgelagert wird die gefundene Regressionsgleichung mittels Varianzanalyse untersucht, um eine Erklärung durch den Zufall auszuschließen. Hier lauten die Hypothesen:

Null-Hypothese H0: Die Beziehung der beiden Variablen ist durch Zufall allein erklärbar.

Alternativhypothese H1: Die Beziehung ist nicht durch Zufall allein erklärbar,

H0 ist dabei anzunehmen, wenn Sig. > 0,05.

Mit dem Bestimmtheitsmaß r wird schlussendlich noch bestimmt wie viele Prozent der Varianz der abhängigen Variable durch die Regression zwischen beiden Variablen erklärbar ist.

Tabelle 22: Regressionsanalyse - NDVI-Oben und dem temp. Widerstand - Gruppe 1

Modell	Nicht standardisierte Koeffizienten		Sig.	95,0% Konfidenzintervalle für B	
	Regressionskoeffizient B	Std.-Fehler		Untergrenze	Obergrenze
(Konstante)	135,600	19,233	<0,001	97,514	173,686
NDVI- oben-Mittelwert	320,332	92,428	<0,001	137,299	503,366

a. Abhängige Variable: temperaturbereinigter Widerstand [kΩ]

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich folgende Regressionsgerade:

Formel 4: Regressionsgleichung – temp. Widerstand und NDVI-Oben - Gruppe 1

$$y = 135,6 + 320,332 x$$

Die Varianzanalyse ergibt für diese Regression eine Signifikanz von <0,01. Somit ist die Nullhypothese abzulehnen.

Das Bestimmtheitsmaß liegt zudem bei 0,092. Somit sind 9,2 % der Varianz des temp. Widerstands in der Gruppe 1 durch die oben ermittelte Regressionsgleichung erklärbar.

Tabelle 23: Regressionsanalyse - NDVI-Oben und der Bodenfeuchte - Gruppe 1

Modell	Nicht standardisierte Koeffizienten		Sig.	95,0% Konfidenzintervalle für B	
	Regressionskoeffizient B	Std.-Fehler		Untergrenze	Obergrenze
(Konstante)	8,918	3,535	0,013	1,927	15,909
NDVI- oben-Mittelwert	-55,582	16,966	0,001	-89,132	-22,031

a. Abhängige Variable: Bodenfeuchte [%]

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich folgende Regressionsgerade:

Formel 5: Regressionsgleichung - Bodenfeuchte und NDVI-Oben - Gruppe 1

$$y = 8,918 - 55,582 x$$

Die Varianzanalyse ergibt für diese Regression eine Signifikanz von 0,01. Somit ist die Nullhypothese abzulehnen.

Das Bestimmtheitsmaß liegt zudem bei 0,073. Somit sind 7,3 % der Varianz der Bodenfeuchte in der Gruppe 1 durch die oben ermittelte Regressionsgleichung erklärbar.

Tabelle 24: Regressionsanalyse - Bodenfeuchte und NDVI-Unten - Gruppe 3

Modell	Nicht standardisierte Koeffizienten		Sig.	95,0% Konfidenzintervalle für B	
	Regressionskoeffizient B	Std.-Fehler		Untergrenze	Obergrenze
(Konstante)	11,583	3,816	0,004	3,892	19,274
NDVI- unten-Mittelwert	-221,185	70,578	0,003	-363,425	-78,944

a. Abhängige Variable: Bodenfeuchte [%]

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich folgende Regressionsgerade:

Formel 6: Regressionsgleichung - Bodenfeuchte und NDVI-Unten - Gruppe 3

$$y = 11,583 - 221,185 x$$

Die Varianzanalyse ergibt für diese Regression eine Signifikanz von 0,03. Somit ist die Nullhypothese abzulehnen.

Das Bestimmtheitsmaß liegt zudem bei 0,182. Somit sind 18,2 % der Varianz der Bodenfeuchte in der Gruppe 3 durch die oben ermittelte Regressionsgleichung erklärbar.

Tabelle 25: Regressionsanalyse – temp. Widerstand und NDVI-Unten - Gruppe 5

Modell	Nicht standardisierte Koeffizienten		Sig.	95,0% Konfidenzintervalle für B	
	Regressionskoeffizient B	Std.-Fehler		Untergrenze	Obergrenze
(Konstante)	96,773	9,034	<0,001	77,792	115,753
NDVI- unten-Mittelwert	538,565	132,664	<0,001	259,848	817,282

a. Abhängige Variable: temperaturbereinigter Widerstand [kΩ]

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich folgende Regressionsgerade:

Formel 7: Regressionsgleichung - temperaturbereinigten Widerstand und NDVI-Unten - Gruppe 5

$$y = 96,773 + 538,565 x$$

Die Varianzanalyse ergibt für diese Regression eine Signifikanz von 0,01. Somit ist die Nullhypothese abzulehnen.

Das Bestimmtheitsmaß liegt zudem bei 0,478. Somit sind 47,8 % der Varianz des temp. Widerstandes in der Gruppe 5 durch die oben ermittelte Regressionsgleichung erklärbar.

Tabelle 26: Regressionsanalyse - Bodenfeuchte und NDVI-Unten - Gruppe 5

Modell	Nicht standardisierte Koeffizienten		Sig.	95,0% Konfidenzintervalle für B	
	Regressionskoeffizient B	Std.- Fehler		Untergrenze	Obergrenze
(Konstante)	1,676	3,810	0,665	-6,247	9,598
NDVI- unten- Mittelwert	-319,778	56,377	<0,001	-437,020	-202,536

a. Abhängige Variable: Bodenfeuchte [%]

Aus der Regressionsanalyse ergibt sich folgende Regressionsgerade:

Formel 8: Regressionsgleichung - Bodenfeuchte und NDVI-Unten - Gruppe 5

$$y = 1,676 \pm 319,778 x$$

Die Varianzanalyse ergibt für diese Regression eine Signifikanz von < 0,01. Somit ist die Nullhypothese abzulehnen.

Das Bestimmtheitsmaß liegt zudem bei 0,605. Somit sind 60,5 % der Varianz der Bodenfeuchte in der Gruppe 5 durch die oben ermittelte Regressionsgleichung erklärbar.

Beispielhaft ist in Abbildung 19 das Streudiagramm der Gruppe 1 dargestellt. Integriert im Schaubild ist die Regressionsgleichung und die Wertepaare aus dem temp. Widerstand auf der Y-Achse und dem NDVI-Oben auf der X-Achse. Diese Darstellung dient der graphischen Darstellung der errechneten Werte, ist für die Analyse aber nicht zwingend notwendig. Die restlichen Streudiagramme der anderen Korrelationen sind im Anhang beigefügt (vgl. Anhang 4).

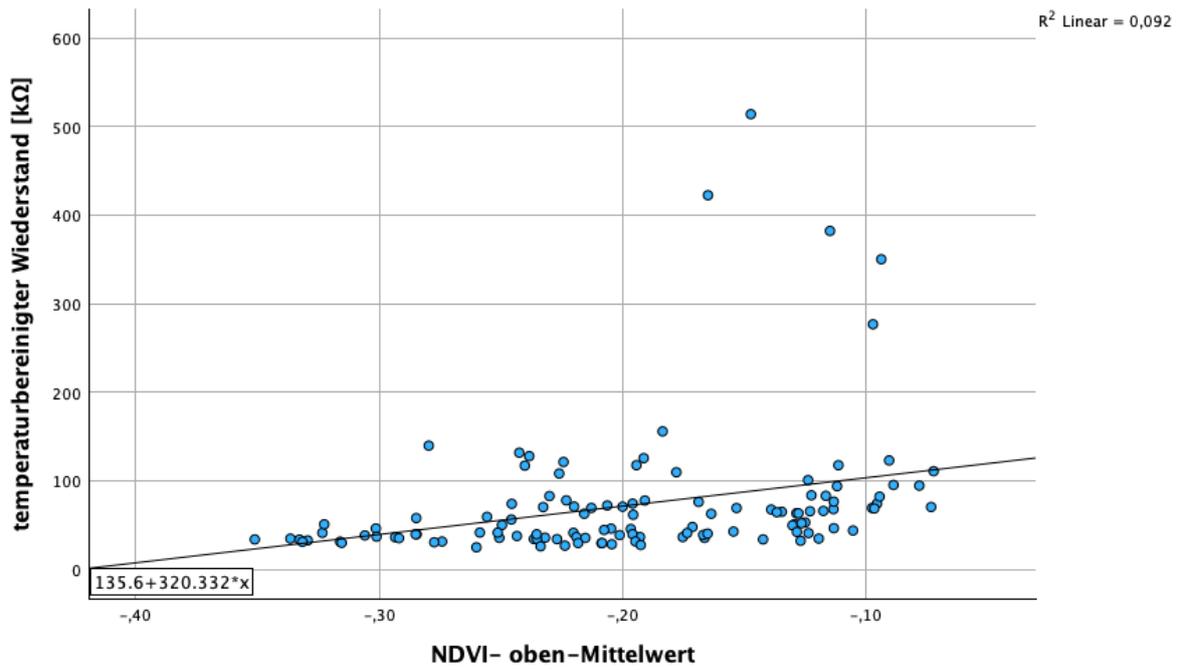


Abbildung 19: Streudiagramm des temperaturbereinigten Widerstands und NDVI-Oben inklusive Regressionsgerade

Die Diskussion und Interpretation der statistischen Auswertung erfolgt in Kapitel 5.3.2.

5 Diskussion

5.1 Diskussion des verwendeten Materials

5.1.1 Kamera-System

Obwohl die Parrot Sequoia zu den meisteingesetzten Kamerasystemen zählt, ist das Multilinsensystem für diesen Einsatzzweck nur bedingt geeignet und erfordert im Gegenzug einen erhöhten Aufwand bei der Auswertung. Dies hat sich bei der manuellen Referenzierung der einzelnen leicht versetzten Bilder der einzelnen Linsen und dem passgenauen Ausschneiden der reinen Blattmasse gezeigt.

In den aufgenommenen Bildern fiel vor allem auf, dass ein richtiges Referenzieren für den mittleren Bildbereich und den Randbereich nicht möglich war. Dieses Problem entsteht durch die stärkere Verzerrung im Randbereich der Bilder als in der Mitte, sowie die leicht versetzte Perspektive und lässt sich bei einem Mehrlinsensystem nicht vermeiden. Ebenfalls ist durch den bauartbedingten Linsenunterschied der RGB-Linse und der restlichen Linsen ein Referenzieren dieses Bildes nicht möglich. Das eigene Webportal und die Steuerung der Kamera funktionierten immer zuverlässig.

Für die entstandenen Daten stellte der Einsatz der Parrot Sequoia zwar keinen Nachteil dar, die erschwerte Auswertung könnte aber in Folgeversuchen durch andere Kameratechnik vereinfacht werden.

Eine mögliche Alternative wäre für diesen Versuchsaufbau der Einsatz einer Multispektral-Einlinsenkamera. Mit einer solchen Kamera wäre die Problematik, die durch den Bildversatz der einzelnen Linsen entsteht, behoben. Eine weitere Alternative wäre das Kamerasystem MSDC-AGRI-1-A der Firma *Spectral Devices INC (Spectral Devices Inc., 2024)*. Mit dem Einsatz eines solchen Systems ist der aufwendige und teils ungenaue Prozess der Georeferenzierung nicht mehr notwendig.

5.1.2 Software

Für die Auswertungen der Bilddaten kam die Software ArcGis Pro zum Einsatz. Diese zeichnet sich durch ihre sehr umfangreichen Möglichkeiten und die ausführliche Enzyklopädie zu den enthaltenen Werkzeugen aus. Neben ArcGIS Pro wurde auch das Programm Excel und die Statistik Software SPSS eingesetzt. SPSS vereinfachte die statistische Auswertung der großen Datenmenge und vereinfachte den Auswertungsprozess, da keine statistischen Formeln händisch eingepflegt werden mussten. Eine reine Auswertung mit Excel hätte zwar zu einem gleichen Ergebnis geführt und auf die schlussendlichen Erkenntnisse keine Auswirkungen

gehabt. SPSS hat in Bezug auf die Abläufe, aber notwendige Zwischenschritte automatisch übernommen und so zu einer fehlerfreien Auswertung beigetragen.

5.1.3 TreeSense-Sensorik

Das eigentliche Verwendungsgebiet der Sensorik der Firma TreeSense liegt im Bereich der Digitalisierung von Städten. Für wissenschaftliche Datenerhebungen kommt die Sensorik in erster Linie nicht zum Einsatz. Für diese Arbeit wurde sich die Funktionalität zunutze gemacht, um ortsunabhängig und kontinuierlich Daten über den Status der Pflanzen zu erheben. Ebenso die einfache Bedienung über das Online-Portal und die einfache Installation ermöglichten ein genaues und schnelles Arbeiten. Nachteilig am System ist die notwendige Installation durch Bohrungen. Diese hatten zwar in diesem Versuch keine Auswirkungen auf die Ergebnisse, sollten in Folgeversuchen beziehungsweise Praxistests berücksichtigt werden, da diese möglicherweise zu langfristigen Beeinträchtigungen führen können. Der Datenverlust führte zu einer Lücke in der Datenerhebung, auch wenn der Versuch in seiner Gesamtheit dadurch nur minimal beeinträchtigt wurde. Diese externen Faktoren können nur bedingt vorhergesehen werden, sind aber wo möglich einzukalkulieren und bei Kooperationen zu beachten.

Zu den Impedanz-Sensoren gibt es nach aktuellen Recherchen keine verfügbaren Alternativen, die zu diesem Preis eine, wie oben beschriebene Genauigkeit bietet. Eine andere Methodik hätte aber den Einsatz anderer Messinstrumente ermöglicht.

Bei den Bodenfeuchtesensoren wäre eine mögliche Alternative der Einsatz von Tensiometern. Diese ermitteln die Saugspannung des Bodens und können unabhängig von Störfaktoren wie beispielsweise dem Salzeintrag arbeiten (Roth-Kleyer, 2016; Stannard, 1992). Diese Sensorik findet vor allem Anwendung in Langzeit-Bewässerungssystemen und liefert genauere Daten als die im Versuch eingesetzten Sensoren. Eine solche Sensorik könnte in praktischen Folgeversuchen eingesetzt werden, sollte aber in das bestehende Netzwerk der anderen Sensoren integrierbar sein. Aufgrund des kleinen Wurzelwerkes und Pflanztopfes, sowie keinerlei Störeinflüsse durch Straßenbetrieb und damit verbundenem Störeintrag, waren die eingesetzten Bodenfeuchtesensoren für die Datenerhebung ausreichend und ließen eine Auswertung hinsichtlich der Zielsetzung zu.

5.1.4 Vollspektrumlampen

Die in diesem Versuch eingesetzten Vollspektrumlampen wurden ausgewählt, da deren Spektrum, dem der Sonne sehr ähnlich ist. Ebenso die einfache Installation aufgrund der E27-Fassung, der geringe Stromverbrauch und die geringe Wärmeentwicklung bei Dauerbetrieb sprechen für die Lampen. Aus dem geringen Stromverbrauch resultiert aber auch eine geringe

Leistung, was zur Folge hat, dass von der relevanten nahinfraroten Strahlung bei weiterem Abstand nicht mehr viel auf dem Objekt ankommt. Auch der geringe Abstrahlungswinkel sorgt für eine ungleichmäßige Ausleuchtung.

Mögliche Alternativen wären LED-Panels mit einer wesentlich höheren Leistung gewesen. Hierzu gehört beispielsweise die Lampe GQ6-07S1-211 der Firma DEL-KO GmbH (DEL-KO GmbH, 2022). Diese zeichnet sich durch eine Leistung von 360 Watt aus und kann mit mehreren der gleichen Modellreihe zu einer flächigen Beleuchtung ausgebaut werden. Somit wäre die ungleiche Ausleuchtung und die mangelnde Leistung behoben. Nachteil dieser Lampen ist der sehr hohe Preis, der hohe Stromverbrauch sowie die hohe Wärmeentwicklung, weshalb diese Lampen mit einem aktiven Kühlsystem ausgestattet sind.

Für diese Arbeit war eine Kooperation mit der Uni Hohenheim nicht möglich, sollte im Falle weiterer Untersuchungen aber angestrebt werden, da die Uni Hohenheim über derartiges Equipment verfügt.

5.1.5 Versuchsbäume

Begrenzende Faktoren für die Auswahl der Pflanzen war der verfügbare Raum, die Größe der gebauten Dunkelkammer und die Notwendigkeit, dass die Pflanzen getopft sein müssen, um alle Einflüsse messen und kontrollieren zu können. Die Größe der Dunkelkammer hing dabei von der Leistung der zur Verfügung gestellten Lampen sowie von der Stellfläche, welche durch die Hochschule zur Verfügung gestellt wurde, ab. Zudem musste eine Baumschule gefunden werden, welche bereit war, passende Pflanzen zu stellen. Dies führte zu der Entscheidung den Versuch mit 1 m hohen getopften Pflanzen durchzuführen. Die recht kleinen Pflanzen hatten den Nachteil, dass diese noch wenig Blattmasse aufweisen. Aufgrund der filigranen Strukturen wurde die Bearbeitung der davon aufgenommenen Bilder erschwert. Ebenso war das Anbringen der Sensoren schwierig, da die Pflanzen teilweise nur 0,5 cm dick waren. Erschwerte Bearbeitung und komplizierterer Sensoreinbau, verlängerten lediglich die Versuchsauswertung und den Versuchsaufbau, hatten aber keinerlei Auswirkung auf die erhobenen Daten.

Optimalerweise sollten getopfte Bäume, mit einer Stammstärke von etwa 2-3 cm zum Einsatz. Dadurch wäre die Sensorproblematik und die geringe Blattmasse behoben. Es konnte aber keine Baumschule gefunden werden, die solche Pflanzen kostenlos und mit dem Risiko dass die Bäume danach geschädigt sind, zur Verfügung gestellt hätte.

Die beiden Baumarten wurden in Abstimmung mit der Baumschule anhand des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstands zu Trockenresistenz ausgewählt. Die Auswahl einer

trockenresistenten und einer wasserbedürftigen Baumart in dieser Größe, stellte für die Baumschule auch in der Beschaffung kein Problem dar.

5.2 Diskussion der Methodik

5.2.1 Allgemeiner Versuchsaufbau

Ein Laborversuch zur Untersuchung des Trockenstress durch seitliche Baumkronenaufnahmen mittels Multispektralkamera hat es nach eigenen Recherchen noch nicht gegeben. Daher konnte nicht auf einen bestehenden Versuchsaufbau zurückgegriffen werden. Laborversuche zur Untersuchung des NDVI, gibt es aber vor allem im Kontext Landwirtschaftlicher Nutzpflanzen, welche in Dunkelkammern und Vollspektrallampen mit einer Multispektralkamera analysiert wurden. (Fertu et al., 2021).

Der hier durchgeführte Versuch baut dabei auf der Arbeit von Josua Göhring (2023) auf, welcher ebenfalls seitliche Multispektralanalysen zur Bestimmung von Trockenstress in einem Praxisversuch untersuchte. In diesem Feldversuch konnten keine aussagekräftigen Ergebnisse erzielt werden, da zu viele unbekannte Einflussfaktoren vorhanden waren. Grundlegend galt es in diesem Versuchsaufbau somit diese Faktoren zu dezimieren, zu erfassen und in die Bewertung mit einfließen zu lassen.

Um grundlegende Forschungsergebnisse zu erzielen, wurde sich für einen Laborversuch entschieden, welcher folglich in dieser Ausprägung keine Handlungsanweisungen für die Praxis ausspricht. Dies ist vor allem der aufwendigen Abschirmung gegenüber Atmosphärischen Einflüssen und künstlichen Beleuchtung geschuldet. Diese Tatsache hat für die Auswertung des hier gewählten Versuchsaufbaus aber keine Auswirkung. Ziel dieses Versuchsaufbaus war es die Möglichkeit seitlicher Baumaufnahmen zu Trockenstressbestimmung unter kontrollierbaren Bedingungen zu prüfen.

Eine Untersuchung über einen längeren Zeitraum und einem größeren Stichprobenumfang wäre angesichts der statistischen Auswertung von großem Interesse um mögliche Störfaktoren und Einflüsse auf die Rückstrahlung bei seitlichen Aufnahmen besser isolieren und untersuchen zu können.

Für die Datenaufnahme ist bei dem gewählten Versuchsaufbau aber die wetterunabhängige Aufnahme und die sehr gute Vergleichbarkeit der generierten Daten untereinander zu nennen. Hier haben viele Versuchsaufbauten in der Fernerkundung, vor allem was das Wetter angeht, Schwierigkeiten.

5.2.2 Impedanzmessung

Allgemein stellt die Messung von Wassermangel und den damit einhergehenden Trockenstress im Baum, eine gewisse Herausforderung dar. Eine andere Methode wäre die Erfassung mittels Transpirationmessungen (von Swantje Duthweiler et al., 2017, S. 145). Für die Auswertungen wären beide Messmethoden möglich gewesen, die einfachere Montage und die direkte Anbindung der Sensorik an das Webportal der Firma TreeSense war für die Auswertung aber vorteilhaft.

5.2.3 Auswertung des NDVI

Allgemein ist die Ermittlung des NDVI eine sehr gute und weltweit vielseitig eingesetzte Methodik zur Vegetationsanalyse. Zu nennen ist, dass die Bilddaten für diese Methodik bisher meist nur großflächig und immer durch Drohnen, Satelliten oder Flugzeuge von oben aufgenommen wurden.

Aufgrund des Einsatzes dieser Methodik für die seitliche Aufnahme des Baumes, gibt es in diesem Fall aber noch durchaus Verbesserungspotential. Da der NDVI sich aus den erfassten Bilddaten berechnet, sind Verbesserungen meist durch den Einsatz anderer Materials, zur Verbesserung der Bilddaten, möglich. So führen kleine Pflanzen und zu schwache Vollspektrumlampen, neben den schon zuvor genannten Problem, zu Werten, die zu einem Vergleich mit sonst üblichen zu erwartenden NDVI-Werten, nicht unmittelbar herangezogen werden können (vgl. Kapitel 5.1). Ebenso sind konnten die oberen und unteren Bildbereiche eines Bildes nicht miteinander verglichen werden können. V

Ein weiterer Einflussfaktor könnte die Blattstellung sein. Bei seitlichen Aufnahmen werden viele Blätter nur von unten oder der Seite aufgenommen, was ebenfalls zu einer Abweichung des NDVI im Vergleich zu herkömmlichen Aufnahmen führen könnte. Vor allem der Aufnahmewinkel von unten führte zu sehr dunklen Bildern, wobei die Ursache nicht von der Beschattung, und den Vollspektrumlampen zu trennen war.

Bis auf die fehlende Vergleichbarkeit zu bisherigen praktischen NDVI-Messungen, ist die Vergleichbarkeit innerhalb des Versuchsaufbaus aber nicht beeinträchtigt, weshalb eine Analyse mittels diesem möglich war.

Die Auswertung der Bilddaten basiert zudem auf einem manuellen Verfahren, welches immer auch Möglichkeit zu manuellen Fehlern eröffnet. Dies kann zukünftig eventuell durch eine automatische Auswertung unter Zuhilfenahme von KI-Modellen vereinfacht werden. So kommen solche KI-Modelle auch schon im medizinischen Bereich zum Einsatz (König et al., 2024). Es wurde versucht die Methodik und die vorhergehende manuelle Bildbearbeitung durch Zuhilfenahme eines BlueScreen zu vereinfachen. Hier wäre eine kontrastreichere Farbe zu den

Grünen Blätter beispielsweise ein RedScreen vorteilhafter gewesen. Dies hätte zwar die Auswertung vereinfacht, hat auf die generierten Daten aber keine Auswirkung und stellt somit eine reine Arbeitserleichternde Maßnahme dar.

Ziel dieser Arbeit war es aber allgemein zu ermitteln, ob diese Methode im zu untersuchenden Anwendungsbereich eingesetzt werden kann und statistisch abgesicherte Daten liefert. Die Methode zur Trockenstressbestimmung mittels NDVI, stellt somit die zu prüfende Grundmethodik dieser Arbeit dar und wurde deshalb im Kern nicht abgeändert.

5.2.4 Statistische Auswertung

Aufgrund der großen Datenmenge diente der t-test als Grundlage um die Daten auf ihre gemeinsame Grundgesamtheit zu überprüfen und somit mögliche Daten der einzelnen Bäume zusammenzufassen. Dies ist nach aktuellen Recherchen eine gängige Methodik, um Daten vorzusortieren.

Anhand dieser Datengruppen wurden dann die eigentliche Korrelations- und Regressionsanalyse durchgeführt. Hier berechnet SPSS alle wichtigen Kennwerte und Zwischenschritte automatisch. Die graphische Darstellung wurde nur exemplarisch an einer Regression in der Arbeit genauer aufgeführt. Dies dient der besseren Lesbarkeit.

5.3 Diskussion der Ergebnisse

5.3.1 Gemessene Daten

Bei allen Pflanzen ist über den Versuchszeitraum durch den sukzessiven Wassermangel eine Zunahme der Widerstandswerte, sowie eine Abnahme der Bodenfeuchte zu verzeichnen. Die Bodenfeuchte schwankt hierbei je nach angewendetem Gießintervall, nimmt aber dennoch in Summe bei allen Pflanzen ab. Dies war im Versuchsaufbau bewusst angelegt und daher erwartbar. Die Stärke der Zu- bzw. Abnahme der Messwerte fällt dabei innerhalb der Baumarten abgestuft aus. Die beiden häufig gegossenen Pflanzen FA1 und Bi3 (vgl. Tabelle 4) zeigen insgesamt die geringste prozentuale Veränderung über den Versuchszeitraum. Im Kontrast stehen hierzu die nicht gegossenen Pflanzen Bi1 und FA3 mit der stärksten prozentualen Veränderung. Mit einer prozentualen Abnahme zwischen den beiden anderen Pflanzen stehen, wie zu erwarten, Bi2 und FA2. Die Bewässerung der Pflanzen wirkt sich somit positiv auf die jeweilige Pflanze aus, auch wenn die Gießmenge in Summe nicht ausgereicht hat, um ein sukzessives Austrocknen zu verhindern.

Bei den prozentualen Veränderungen der NDVI-Werten ist ein solches Muster nicht zu erkennen. Die durchweg negativen NDVI-Werte sowohl für den oberen als auch den unteren Pflanzenbereich sind dabei aber auffällig und entsprechen nicht den Erwartungen nach einer

positiven Ausprägung der Werte zwischen Null und Eins. Interpretiert man diese NDVI-Werte nach klassischen Mustern würde man bei einer negativen Ausprägung auf Flächen aus Wasser, Schnee oder Wolken schließen. Aufgrund des Versuchsaufbaus ist dies logischerweise auszuschließen.

Die hier entstandene Ausprägung ist auf die geringe Emissionsleistung beziehungsweise die mangelnde Stärke der Strahlung der Vollspektrumlampen zurückzuführen. Betrachtet man die Formel zur Berechnung des NDVI wird deutlich, dass ein negativer Wert nur im Zähler durch eine zu geringe nahinfrarote Strahlung entstehen kann (vgl. Formel 2). Wichtig sind für die Betrachtung und den Vergleich der Daten und somit für die Arbeit die gleichbleibenden Aufnahmebedingungen, welche durch den gewählten Versuchsaufbau gegeben sind.

Auffällig sind auch die allgemein niedrigeren Werte des NDVI in den unteren Pflanzenbereichen. Dies lässt sich auf die geringere Ausleuchtung, die Beschattung durch oberhalb liegende Blätter und die zunehmende Entfernung zu den Lampen zurückführen.

Insgesamt ist aber sowohl bei den NDVI-Werten im oberen als auch dem unteren Bereich eine prozentuale Steigerung über den Versuchszeitraum zu verzeichnen. Lediglich der NDVI für den oberen Pflanzenbereich der Bi1 fällt aus diesem Muster. Die allgemeine positive Veränderung ist dabei gegenläufig zur erwarteten Abnahme des NDVI, welcher üblicherweise auf einen Vitalitätsverlust der Pflanze schließen lässt. Ursache hierfür liegt vermutlich an dem frischen Austrieb der Blätter zu Beginn des Versuchs, die Abnahme der Rückstrahlung im roten Spektrum oder auch der andere Aufnahmewinkel der Blätter.

Da es bisher keinen ähnlichen Versuch bzw. eine ähnliche Datenerhebung durch seitliche Aufnahmen unter Vollspektrumlampen gegeben hat, ist es schwierig die prozentualen Veränderungen des NDVI einzuschätzen.

5.3.2 Statistische Ergebnisse

Da die Bodenfeuchte und der temp. Widerstand die vorliegende Wasserverfügbarkeit und den Trockenstress am besten abbilden, wurden in der statistischen Auswertung nur diese herangezogen. Der Widerstand wurde aufgrund der Einflussgröße, Temperatur, welche im temp. Widerstand einbezogen ist, nicht weiter betrachtet.

Vorhergehend hat die Analyse mittels t-test eine Gruppierung ermöglicht. Den Erwartungen entsprechend konnten alle oberen NDVI-Werte der gleichen Grundgesamtheit zugeordnet und diese somit nachfolgend zusammen analysiert werden. Dies ist auf die gleichmäßige und ausreichend starke Ausleuchtung zurückzuführen. Anders ist es im unteren. Bereich der Pflanzen. Hier konnten die Bi1 und Bi3 einer Grundgesamtheit zugeordnet werden. BI2

unterschied sich dabei signifikant von den beiden anderen Birken und es kann so angenommen werden, dass diese nicht zur gleichen Grundgesamtheit gehört. Dieses Bild zeichnet sich ebenso bei den Feld-Ahorn-Pflanzen ab. FA1 und FA2 unterscheiden sich nicht signifikant voneinander, während FA3 sich von diesen Signifikant unterscheidet. Die signifikanten Unterschiede von BI2 und FA3 lassen sich auf die unterschiedlichen Kronenaufbauten zurückführen. Während FA3 im Vergleich zu FA1 und FA2 eine recht schwache und schmale Belaubung im oberen Kronenbereich aufweist und somit im unteren Bereich stärker ausgeleuchtet ist, ist es bei den Birken genau gegensätzlich. Wie zu erwarten, unterschieden sich auch die gemessenen oberen und unteren NDVI-Werte signifikant voneinander. Dies lässt sich ebenfalls auf die unterschiedliche Ausleuchtung und Beleuchtungsstärke zurückführen. Vorausgehend wurde immer auf Varianzgleichheit geprüft. Dies war in SPSS direkt mit ersichtlich - somit bedarf es hier keinem weiteren Zwischenschritt. Allgemein formuliert erlaubt der t-test zur Überprüfung einer gemeinsamen Grundgesamtheit, die Daten nach gleichen Versuchsbedingungen was Ausleuchtung und somit NDVI-Werte betrifft, vorzusortieren.

Auf Basis dieser Gruppen konnte dann eine Korrelationsanalyse durchgeführt werden.

Gruppe 1 korrelierte dabei sowohl schwach negativ mit der Bodenfeuchte und mittelstark positiv mit dem temp. Widerstand. Die Korrelation des NDVI im oberen Pflanzenbereich und der Bodenfeuchte ermöglicht den Schluss, dass wenn im Versuchsaufbau der NDVI zunimmt, die Bodenfeuchte sinkt. Gleiches gilt für die positive mittelstarke Korrelation zwischen NDVI-Ober und dem temp. Widerstand. Eine Zunahme des NDVI resultiert somit in einer Zunahme des temp. Widerstandes. Dies deckt sich mit den Erwartungen nach einer bestehenden Korrelation zwischen diesen Parametern, wobei die Steigung und die negative Ausprägung der NDVI-Werte allgemein nicht erwartet wurde. Eine Abnahme der Vitalität, hat eine Abnahme der nahinfraroten Rückstrahlung zur Folge, was in praktischen Anwendungen der NDVI zu einem sinken der Werte führt. Gründe hierfür lassen sich durch den Versuchsaufbau erklären und beeinträchtigen die Aussagekräftigkeit nicht, schränken lediglich die Vergleichbarkeit mit Feldmessungen ein (vgl. 5.3.1).

Gruppe 4 und Gruppe 5 weisen ebenfalls eine positive signifikante Korrelation zwischen dem NDVI im unteren Pflanzenbereich und dem temp. Widerstand auf. Auch dies deckt sich mit den Erwartungen. Diese beiden Gruppen weisen allerdings keine signifikante Korrelation des NDVI-Unten mit der Bodenfeuchte auf. Im Gegensatz hierzu stehen Gruppe 2 und Gruppe 3. Diese weisen wiederum eine negative Korrelation mit der Bodenfeuchte auf, allerdings keine Korrelation mit dem temp. Widerstand. Diese teils fehlende Korrelation lässt sich

möglicherweise auf die ungleichen Versuchsbedingungen durch mangelnde Ausleuchtung oder Blattveränderungen durch den Läusebefall zurückführen.

Zwar lässt sich eine vorliegende Korrelation nicht automatisch auf eine Kausalität zurückführen, durch den Versuchsaufbau und den Ausschluss anderer Störfaktoren lässt sich aber eine Kausalität annehmen.

Es ist also davon auszugehen, dass die Bestimmung des Trockenstresses mittels NDVI, welcher aus seitlichen Bildaufnahmen errechnet wurde, möglich ist.

Die auf der Korrelation aufbauende Regressionsanalyse dient der Erstellung einer Regressionsgleichung. Diese ergibt ein Annäherungsmodell oder Vorhersagemodell zur Bestimmung der Bodenfeuchte bzw. des temp. Widerstandes bei vorliegendem gemessenen NDVI. Das ebenfalls ermittelte Bestimmtheitsmaß, welches bei allen Gruppen niedrig ausfiel, ist auf die geringe Datenlage zurückzuführen. Ein größerer Stichprobenumfang und ein längerer Versuchsaufbau, erhöhen die Aussagekraft der Regression und der Korrelation. Zudem sind die erstellten Regressionsgleichungen aufgrund des Versuchsaufbau und der damit verbundenen fehlenden Vergleichbarkeit zur Praxis wenig aussagekräftig.

Es wurde sich dennoch dazu entschieden auch eine Regressionsanalyse durchzuführen, um die mögliche Umsetzung für aufbauende praxisnahe Versuche darzustellen. Durch die nachgewiesene Korrelation des NDVI, zumindest im gut ausgeleuchteten oberen Pflanzenbereich, ist ein Folgeversuch zur Erstellung eines aussagekräftigen Regressionsmodells für die Praxis möglich. Wichtig für die Fragestellung der Arbeit ist vor allem die Frage nach der Korrelation, die diese Arbeit beantwortet und damit statistisch den Anspruch erfüllt.

6 Fazit

Die Auswertung der Messdaten lassen eine Beantwortung der eingangs gestellten Frage, ob eine Trockenstressbestimmung durch seitliche Multispektralanalysen mittels des NDVI möglich ist, zu. So konnte statistisch eine signifikante Korrelation zwischen den ermittelten NDVI-Daten und den Sensordaten, welche als Kennwert für den Trockenstress herangezogen werden konnten, festgestellt werden. Starken Einfluss auf die Ausprägung des NDVI haben dabei vor allem die Vollspektrumlampen und deren Emissionsstärke, sowie die Beschattung durch oberhalb liegende Blätter.

Aufnahmen vom Boden könnten demnach eine Alternative zu bisherigen Drohnen- und Satellitenaufnahmen sein. Dennoch ist der Einsatz einer Multispektralkamera und deren Ergebnisse keineswegs gleichzusetzen mit bisherigen Aufnahmen von oben. Grund hierfür sind vor allem die veränderten Aufnahmebedingungen hinsichtlich der Blattstellung und der Beschattung unterer Kronenbereiche. Es bedarf also weiterer Untersuchungen.

Da ein Baum zudem vielfältigen Stressfaktoren ausgesetzt ist, stellt die Ermittlung des Trockenstress nur einen dieser Stressfaktoren dar. Allgemein ist zu erwarten, dass die sensorgestützte Analyse von Bäumen zunehmen wird, um bei der Pflege und Einschätzung der Baumgesundheit eine Datengrundlage liefern zu können. Ein mögliches Modell stellen hier sogenannte Smart Cities dar, in denen der Ist-Zustand der Stadt, also auch der Vegetation, in Echtzeit abgerufen werden kann (Portmann & Finger, 2015). Sensorsysteme wie die der Firma TreeSense können ein Baustein solcher Smart Cities sein.

In einem solchen Konzept könnte auch die regelmäßige Aufnahme von Stadtbäumen zur fotooptischen Analyse einen denkbaren Baustein darstellen. Diese könnten beispielsweise durch Müllfahrzeuge oder andere Stadtfahrzeuge und mobile Sensorträgerplattformen automatisiert aufgenommen werden (vgl. Kapitel 2.4.3.4). Herausfordernd ist hier aktuell aber noch die aufwendige manuelle Bildbearbeitung, welche in einem solchen Szenario automatisiert, eventuell KI-gestützt, ablaufen müsste.

Es gilt sich dennoch bewusst zu machen, dass es sich bei diesen Systemen immer nur um einzelne Bausteine handelt, welche in einem Gesamtkontext betrachtet werden müssen. So ist die Bestimmung von Trockenstress zwar angesichts von Klimawandel und zunehmender Wasserproblematik ein sehr wichtiger Baustein, allerdings gilt es Bäume im städtischen Raum im Allgemeinen klimastabil aufzubauen. Hierzu gehören neben der richtigen Baumartenwahl auch die Aufbereitung der Baumstandorte und eine baumfreundliche Bauorganisation und

Baukonzeption. Hilfestellung können hier Entwicklungskonzepte bieten wie sie beispielsweise für die Stadt Hamburg entwickelt wurden (Dickhaut & Eschenbach, 2019).

Die leitende Forschungsfrage des Versuchs, ob Trockenstress von Bäumen durch seitliche Analyse mit Multispektralkameras abbildbar ist, konnte positiv beantwortet werden. Der Umfang des durchgeführten Laborversuchs ist durch den zeitlichen und finanziellen Rahmen der vorliegenden Arbeit begrenzt. Zwar kann die leitende Forschungsfrage, ob Trockenstress von Bäumen durch seitliche Analyse mit Multispektralkameras abbildbar ist, positiv beantwortet werden, die ermittelten Werte bieten an sich jedoch keine Orientierung für die Praxis.

Der Versuch zeigt großes Potential für künftige Forschungen. So sollte der Versuch wiederholt und standardisiert werden, indem die Ausleuchtung verbessert und die Pflanzengröße und -zahl erhöht wird. Dadurch wäre eine Annäherung an die Praxis möglich.

Auch die Verwendung einer Einlinsenkamera würde die Genauigkeit der Daten verbessern und so die Aussagekraft der Wertereihen weiter zu erhöhen.

Anschließend an diese Arbeit wären weitere Praxisversuche denkbar. Dabei wäre es wichtig möglichst viele Einflussfaktoren durch Sensortechnik zu messen, um diese einordnen zu können. Interessant könnten zudem auch Untersuchungen unterschiedlicher Baumarten hinsichtlich des NDVI bei seitlichen Aufnahmen sein. Hier könnte die Blattstellung und andere einflussnehmende Faktoren auf die Messungen untersucht werden. Solche Untersuchungen würden die Datenlage in diesem Bereich verbessern und explizitere Schlüsse zulassen.

Durch diese Bachelorarbeit konnte die grundlegende Frage beantwortet werden. Sie leistet damit Grundlagenarbeit im Bereich der Multispektralanalyse anhand von Bodenaufnahmen und liefert die Basis und erste Erkenntnisse hinsichtlich der Methode und dem Untersuchungsfeld, an welcher weiterführende Forschungen anknüpfen können. Die sich daraus ergebenden Erkenntnisse können einen wichtigen Beitrag zur Stadtbaumforschung leisten und somit zu einem langfristigen Erhalt von Vegetation im urbanen Raum beitragen.

Literaturverzeichnis

- AIRCADEMY. (2023). *UAS-Klassifizierungen*. <https://lba-openuav.de/onlinekurs/lehrmaterial/luftrecht-und-sicherheit/uas-klassifizierungen/>
- Albertz, J. (2009). *Einführung in die Fernerkundung: Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern* (4., aktualisierte Aufl.). WBG (Wissenschaftliche Buchgesellschaft).
- Alparone, L., Wald, L., Chanussot, J., Thomas, C., Gamba, P., & Bruce, L. M. (2007). Comparison of pansharpening algorithms: Outcome of the 2006 GRS-S data-fusion contest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(10), 3012–3021.
- Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., & Wilke, B.-M. (2018). *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde* (F. Scheffer & P. Schachtschabel, Hrsg.; 17., überarbeitete und ergänzte Auflage). Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3>
- Atkinson, M. (1992). *Betula pendula* Roth (B. verrucosa Ehrh.) and *B. pubescens* Ehrh. *Journal of Ecology*, 80(4), 837–870.
- Balder, L. (2017). Jungbäume bedarfsgerecht gießen: Wie die richtige Menge ermitteln? *ProBaum*, 02, 11–16.
- Bamler, R., & Hartl, P. (1998). Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 14(4), R1–R54. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/14/4/001>
- Bartels, H. (1993). *Gehölkunde*, Ulmer.
- Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hrsg.). (2019). *Praxishilfe-Klima-Boden Baumartenwahl* (1200. Aufl., Bd. 1). https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/praxishilfe_baumarten_bf.pdf
- Beck, P., Caudullo, G., de Rigo, D., & Tinner, W. (2016). *Betula pendula, Betula pubescens and other birches in Europe: Distribution, habitat, usage and threats*.
- Blotevogel, H. H., Döring, T., Grotefels, S., Helbrecht, I., Jessen, J., Schmidt, C., & Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hrsg.). (2018). *Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung*. Akademie für Raumforschung und Landesplanung.
- Blum, W. E. H., & Schad, P. (2024). *Bodenkunde in Stichworten* (8., neu bearbeitete Auflage). Gebr. Borntraeger.
- Blum, W. E. H., Schad, P., & Nortcliff, S. (2018). *Essentials of soil science: Soil formation, functions, use and classification (World reference Base, WRB)*. Borntraeger Science Publishers.
- Bonn, S., Bues, C.-T., Krabel, D., Pietzarka, U., Rust, S., Stetzka, K. M., & Weiß, H. (2023). *Baumpflege: Baumbiologische Grundlagen und ihre Anwendung für Baumkontrolle, Baumbeurteilung, Baumuntersuchung, Baumschnitt, Naturschutz, Verkehrssicherungspflicht und -maßnahmen* (A. Roloff, Hrsg.; 4., aktualisierte Auflage). Verlag Eugen Ulmer.
- Brauers, J., Schulte, N., & Aach, T. (2008). Multispectral filter-wheel cameras: Geometric distortion model and compensation algorithms. *IEEE transactions on image processing*, 17(12), 2368–2380.
- Bréda, N., Huc, R., Granier, A., & Dreyer, E. (2006). Temperate forest trees and stands under severe drought: A review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63(6), 625–644. <https://doi.org/10.1051/forest:2006042>
- Brunold, C., Rügeseegger, A., & Brändle, R. (Hrsg.). (1996). *Stress bei Pflanzen: Ökologie, Physiologie, Biochemie, Molekularbiologie*. Haupt.

- Charlesworth, P. (2020). *Irrigation Insights No. 1: Soil Water Monitoring*. <https://www.insidecotton.com/sites/default/files/article-files/pr000236.pdf>
- Cohen, J. (2013). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (0 Aufl.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Corburn, J. (2009). Cities, Climate Change and Urban Heat Island Mitigation: Localising Global Environmental Science. *Urban Studies*, 46(2), 413–427. <https://doi.org/10.1177/0042098008099361>
- Dal Mutto, C., Zanuttigh, P., & Cortelazzo, G. M. (2012). *Time-of-flight cameras and Microsoft Kinect™*. Springer Science & Business Media.
- Dash, J. P., Pearse, G. D., & Watt, M. S. (2018). UAV Multispectral Imagery Can Complement Satellite Data for Monitoring Forest Health. *Remote Sensing*, 10(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/rs10081216>
- Dash, J. P., Watt, M. S., Pearse, G. D., Heaphy, M., & Dungey, H. S. (2017). Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 131, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.007>
- Delegierte Verordnung (EU) 2019/945 der Kommission vom 12. März 2019 über unbemannte Luftfahrzeugsysteme und Drittlandbetreiber unbemannter Luftfahrzeugsysteme, 152 OJ L (2019). http://data.europa.eu/eli/reg_del/2019/945/oj/deu
- DEL-KO GmbH. (2022). GoLeaf Q LED Pflanzenlampe: Q1, Q2, Q3, Q4, Q6. *GoLeaf*. <https://www.goleaf.de/goleaf-q>
- Deng, L., Mao, Z., Li, X., Hu, Z., Duan, F., & Yan, Y. (2018). UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 124–136. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.09.008>
- Dickhaut, W., & Eschenbach, A. (Hrsg.). (2019). *Entwicklungskonzept Stadtbäume: Anpassungsstrategien an sich verändernde urbane und klimatische Rahmenbedingungen*. HafenCity Universität Hamburg.
- Dixon, H. H., & Joly, J. (1997). XII. On the ascent of sap. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. (B.)*, 186, 563–576. <https://doi.org/10.1098/rstb.1895.0012>
- Dreßler, A. (2019). *Anpassung an Trockenheit–Einfluss unterschiedlicher Bewässerungsstrategien auf die Trockenheitstoleranz junger Gehölze*. <https://core.ac.uk/download/pdf/287335088.pdf>
- Dreßler, A., Roloff, A., Kniesel, B., Krabel, D., Ming, L., Pietzarka, U., & Schrader, L. (2021). *Trockenstress bei Bäumen: Ursachen, Strategien, Praxis*. Quelle & Meyer Verlag.
- Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge (Text von Bedeutung für den EWR.), 152 OJ L (2019). http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2019/947/oj/deu
- Eckle-Kohler, J., & Kohler, M. (2017). *Eine Einführung in die Statistik und ihre Anwendungen* (3., überarbeitete und ergänzte Auflage). Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54094-7>
- Edwards, J., Anderson, J., Shuart, W., & Woolard, J. (2019). An evaluation of reflectance calibration methods for UAV spectral imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 85(3), 221–230.
- Ellenberg, H., & Leuschner, C. (2010). *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen: In ökologischer, dynamischer und historischer Sicht* (Bd. 8104). Utb.

- Endrich, W. (2021). *EuroLighting GmbH*. Eurolighting. https://euro-lighting-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/04/Flyer_PAR38_Vollspektrum-Pflanzen-Lampe_4S.pdf
- Fang, F., McNeil, B. E., & Dahle, G. (2018). *Urban tree stress symptom detection using satellite images in Washington DC. 2018*, GC33C-03.
- Fertu, C., Dobrota, L. M., Balasan, D. L., & Stanciu, S. (2021). *Monitoring the vegetation of agricultural crops using drones and remote sensing—Comparative presentation*. 21(2).
- Finger, R., Swinton, S. M., El Benni, N., & Walter, A. (2019). *Precision Farming at the Nexus of Agricultural Production and the Environment* [Application/pdf]. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000341059>
- Flaschke, T., & Tränkler, H.-R. (1999). Potential der Impedanz-Sensorik am Beispiel der Bodenfeuchtemessung. *Teme*, 66(4), 146–150. <https://doi.org/10.1524/teme.1999.66.4.146>
- Foderá, G. (2024, April 12). *Einbau der Sensorik* [Persönliche Kommunikation].
- Foderá, G., Kübler, J., Babajić, S., & Spielvogel, M. (2024, Februar 29). *TreeSense*. <https://www.treesense.net>
- Foderá, G., & Spielvogel, M. (2024, Mai 5). *Datenverlust—TreeSense* [Persönliche Kommunikation].
- Foraster, M., Deltell, A., Basagaña, X., Medina-Ramón, M., Aguilera, I., Bouso, L., Grau, M., Phuleria, H. C., Rivera, M., Slama, R., Sunyer, J., Targa, J., & Künzli, N. (2011). Local determinants of road traffic noise levels versus determinants of air pollution levels in a Mediterranean city. *Environmental Research*, 111(1), 177–183. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2010.10.013>
- Frank, F. (2024). *Ein Vergleich der Effektivität von Gießsäcken und Gießbrändern als Bewässerungssysteme für Berg-Ahorn-Jungbäume ('Acer pseudoplatanus') in der Tübinger Steinlachallee unter Zuhilfenahme digitaler Messdaten* [Bachelor-Arbeit]. Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg.
- Ghorbani, A., Mossivand, A. M., & Ouri, A. E. (2012). Utility of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for land/canopy cover mapping in Khalkhal County (Iran). *Annals of Biological Research*, 3(12), 5494–5503.
- GISGeography. (2024, März 6). *What is NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)?* GIS Geography. <https://gisgeography.com/ndvi-normalized-difference-vegetation-index/>
- Göhring, J. (2023). *Vitalitätsindexe zur Vitalitätsbeurteilung von Stadtbäumen* [Bachelor-Arbeit]. Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg.
- Gong, P., Liang, S., Carlton, E. J., Jiang, Q., Wu, J., Wang, L., & Remais, J. V. (2012). Urbanisation and health in China. *The Lancet*, 379(9818), 843–852. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)61878-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)61878-3)
- Grejner-Brzezinska, D. A. (2001a). Mobile mapping technology: Ten years later (Part One). *Surveying and Land Information Systems*, 61(2), 75–91.
- Grejner-Brzezinska, D. A. (2001b). Mobile mapping technology: Ten years later (Part two). *Surveying and Land Information Science*, 61(3), 137–151.
- Häberle, K.-H. (2014). *Acer campestre*. In *Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie* (S. 1–12). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9783527678518.ehg2011011>
- Harsanyi, J. C., & Chang, C.-I. (1994). Hyperspectral image classification and dimensionality reduction: An orthogonal subspace projection approach. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 32(4), 779–785.

- Höfler, V. (2016, November 11). *Modul 5—Fotografische Aufnahmesysteme—Der Fotografische Prozess—Farbfotografie* [Document]. TU Dresden. https://tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/ipf/fern/studium/tutorial/tutorial-fernerkundung/tutorial-527?set_language=de
- Immitzer, M., Einzmann, K., Pinnel, N., Seitz, R., & Atzberger, C. (2018). Vitalitätserfassung von Fichten mittels Fernerkundung. *AFZ-Der Wald*, 17, 20–23.
- Jackson, R. D., & Huete, A. R. (1991). Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11(3–4), 185–200. [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(05\)80004-2](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(05)80004-2)
- Jensen, J. R. (2000). *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective*. Prentice Hall.
- Jócsák, I., Végvári, G., & Vozáry, E. (2019). Electrical impedance measurement on plants: A review with some insights to other fields. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 31(3), 359–375. <https://doi.org/10.1007/s40626-019-00152-y>
- Johansen, E. L. (1993). Millimeter-wave radar. *Active Electro-Optical Systems*, 5.
- Jutzi, B., Meyer, F. J., & Hinz, S. (2017). Aktive Fernerkundungssensorik – Technologische Grundlagen und Abbildungsgeometrie. In C. Heipke (Hrsg.), *Photogrammetrie und Fernerkundung* (S. 65–103). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-47094-7_40
- Kadereit, J. W., Körner, C., Nick, P., & Sonnewald, U. (2021). *Strasburger—Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften* (E. Strasburger, F. Noll, H. Schenck, & A. F. W. Schimper, Hrsg.; 38. Auflage). Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61943-8>
- Kanoun, O., Tetyuev, A., & Tränkler, H.-R. (2004). Bodenfeuchtemessung mittels Impedanzspektroskopie (Soil Moisture Measurement with Impedance Spectroscopy). *tm-Technisches Messen*, 71(9), 475–485.
- Kirchner, O., & Loew, E. (1908). *Lebensgeschichte der Blütenpflanzen Mitteleuropas: Spezielle Ökologie der Blütenpflanzen Deutschlands, Österreichs und der Schweiz* (Bd. 1). E. Ulmer.
- Knipling, E. B. (1970). Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1(3), 155–159. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(70\)80021-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(70)80021-9)
- König, D., Conrad, A.-M., Gaudin, R., Vinayahalingam, S., Wolf, N., Smeets, R., & Gosau, M. (2024). Künstliche Intelligenz in der medizinischen Bildauswertung. *Die junge Zahnmedizin*, 15(3), 16–18.
- Krickhahn, T. (2017). *Statistik für Naturwissenschaftler für Dummies* (1. Auflage). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Kutschera, U. (1995). *Kurzes Lehrbuch der Pflanzenphysiologie*.
- Landschaftsbau eV, F. L. (2015). Empfehlungen für Baumpflanzungen-Teil 1: Planung, Pflanzarbeiten. *Pflege*, 2.
- Larcher, W. (2001). *Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leistung und Streßbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt ; 77 Tabellen, 8 Boxen* (6., neubearb. Aufl). Ulmer.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2008). *Remote sensing and image interpretation* (6. ed). Wiley.
- Loncan, L., De Almeida, L. B., Bioucas-Dias, J. M., Briottet, X., Chanussot, J., Dobigeon, N., Fabre, S., Liao, W., Licciardi, G. A., & Simoes, M. (2015). Hyperspectral pansharpening: A review. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, 3(3), 27–46.
- Luftverkehrsgesetz (LuftVG), 65 (1980). <https://www.gesetze-im-internet.de/luftvg/LuftVG.pdf>

- Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO), 42 (2015). https://www.gesetze-im-internet.de/luftvo_2015/LuftVO.pdf
- Lulla, K., Nellis, M. D., & Rundquist, B. (2012). Celebrating 40 years of Landsat program's Earth observation accomplishments. *Geocarto International*, 27(6), 459–459. <https://doi.org/10.1080/10106049.2012.727604>
- Mahajan, U., & Bundel, B. R. (2016). *Drones for normalized difference vegetation index (NDVI), to estimate crop health for precision agriculture: A cheaper alternative for spatial satellite sensors*. 22, 31.
- Martin, T. (2009). *Anwendung des komplexen elektrischen Widerstandsverfahrens an Eichen (Quercus spp.)*. Citeseer.
- Matyssek, R., Fromm, J., Rennenberg, H., & Roloff, A. (2010). *Biologie der Bäume: Von der Zelle zur globalen Ebene*. Verlag Eugen Ulmer.
- Matyssek, R., & Herppich, W. B. (2019). *Experimentelle Pflanzenökologie: Grundlagen und Anwendungen* (2., stark überarbeitete und erweiterte Auflage). Springer Spektrum.
- Mondello, C., Hepner, G., & Medina, R. (2008). ASPRS Ten-Years Remote Sensing Industry Forecast: Phase V. *ASPRS TEN-YEAR REMOTE SENSING INDUSTRY FORECAST: PHASE V*, 74(11), 1297–1305.
- Moser, A., Rötzer, T., Pauleit, S., & Pretzsch, H. (2017). Stadtbäume: Wachstum, Funktionen und Leistungen–Risiken und Forschungsperspektiven. *Allgemeine Forst-und Jagdzeitung*, 188(5/6).
- Nations Unies (Hrsg.). (2014). *World urbanization prospects, the 2014 revision: Highlights*. United Nations.
- Neigh, C. (2021a, November 30). *Landsat 1 | Landsat Science*. Landsat Science. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-1/>
- Neigh, C. (2021b, November 30). *Multispectral Scanner (MSS) | Landsat Science*. Landsat Science. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/multispectral-scanner/>
- Nobel, P. S. (1983). *Biophysical plant physiology and ecology*. W.H. Freeman.
- Olsson, P.-O., Vivekar, A., Adler, K., Garcia Millan, V. E., Koc, A., Alamrani, M., & Eklundh, L. (2021). Radiometric Correction of Multispectral UAS Images: Evaluating the Accuracy of the Parrot Sequoia Camera and Sunshine Sensor. *Remote Sensing*, 13(4), 577. <https://doi.org/10.3390/rs13040577>
- Pachauri, R. K., Mayer, L., & Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.). (2015). *Climate change 2014: Synthesis report*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Paparoditis, N., Papelard, J.-P., Cannelle, B., Devaux, A., Soheilian, B., David, N., & Houzay, E. (2014). Stereopolis II: A multi-purpose and multi-sensor 3D mobile mapping system for street visualisation and 3D metrology. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 200, 69–79. <https://doi.org/10.52638/rfpt.2012.63>
- Paradiso, R., & Proietti, S. (2022). Light-Quality Manipulation to Control Plant Growth and Photomorphogenesis in Greenhouse Horticulture: The State of the Art and the Opportunities of Modern LED Systems. *Journal of Plant Growth Regulation*, 41(2), 742–780. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10337-y>
- Parrot. (2017). *Sequoia—User Guide*. https://www.parrot.com/assets/s3fs-public/2021-09/sequoia-userguide-en-fr-es-de-it-pt-ar-zn-zh-jp-ko_0.pdf
- Pettorelli, N. (2013). *The normalized difference vegetation index* (First edition). Oxford University Press.
- Portmann, E., & Finger, M. (2015). Smart Cities – Ein Überblick! *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, 52(4), 470–481. <https://doi.org/10.1365/s40702-015-0150-4>

- Richards, J. A., & Jia, X. (2006). *Remote sensing digital image analysis: An introduction* (4. ed). Springer.
- Rimkus, E., Stonevicius, E., Kilpys, J., Maciulyte, V., & Valiukas, D. (2017). Drought identification in the eastern Baltic region using NDVI. *Earth System Dynamics*, 8(3), 627–637. <https://doi.org/10.5194/esd-8-627-2017>
- Roloff, A. (2022). Wie erfolgt eine Anpassung an Trockenstress bei Bäumen? Einflussfaktoren, Kriterien, Mechanismen, Bewertung. *Nassauischer Verein für Naturkunde*, 35.
- Roloff, A., Bärtels, A., & Schulz, B. (2014). *Flora der Gehölze: Bestimmung, Eigenschaften und Verwendung; mit einem Winterschlüssel von Bernd Schulz* (4., komplett aktualisierte und erweiterte Auflage). Eugen Ulmer KG.
- Roloff, A., Grundmann, B., & Korn, S. (2013). Trockenstress-Toleranz bei Stadtbäumen—Anpassungs- und Schutzstrategien/Arteneignung. *Jahrbuch der Baumpflege*, 173–185.
- Roloff, A., & Pietzarka, U. (2004). *Betula pendula*. *Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie*, 1–16.
- Roth-Kleyer, S. (2016). *Bewässerung im Garten- und Landschaftsbau*. Verlag Eugen Ulmer.
- Ruge, S. (2023). *Botanik und Einführung in die Ökologie. Skript*. Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg.
- Rumsey, D. (2020). *Statistik für Dummies* (B. Majetschak & R. Engel, Übers.; 4. Auflage). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Rust, S., & Hüttl, R. F. (1999). The effect of shoot architecture on hydraulic conductance in beech (*Fagus sylvatica* L.). *Trees*, 14(1), 39–42. <https://doi.org/10.1007/s004680050005>
- Scalenghe, R., & Marsan, F. A. (2009). The anthropogenic sealing of soils in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 90(1–2), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.10.011>
- Schulze, E.-D., Beck, E., & Müller-Hohenstein, K. (2002). *Pflanzenökologie*. Spektrum Akad. Verl.
- Shan, J., & Toth, C. K. (2018). *Topographic laser ranging and scanning: Principles and processing*. CRC press.
- Spectral Devices Inc. (2024). *Specification Multispectral Drone Camera for Agriculture MSDC-AGRI-1-A*. Spectral Devices Inc. <http://www.spectraldevices.com/>
- Stannard, D. (1992). Tensiometers—Theory, Construction, and Use. *Geotechnical Testing Journal*, 15(1), 48–58. <https://doi.org/10.1520/GTJ10224J>
- Stocker, T. (2014). *Climate change 2013: The physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge university press.
- Strasburger, E., & Bresinsky, A. (Hrsg.). (2012). *Lehrbuch der Botanik* (36. Aufl., neu bearb.; Nachdr). Spektrum, Akad. Verl.
- Strasburger, E., & Sitte, P. (Hrsg.). (2002). *Lehrbuch der Botanik für Hochschulen* (35. Aufl). Spektrum, Akad. Verl.
- Sutherland, R. A., & Jones, H. G. (1991). Stomatal control of xylem embolism. *Plant, Cell & Environment*, 14(6), 607–612. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1991.tb01532.x>
- Thapa, S., Garcia Millan, V. E., & Eklundh, L. (2021). Assessing Forest Phenology: A Multi-Scale Comparison of Near-Surface (UAV, Spectral Reflectance Sensor, PhenoCam) and Satellite (MODIS, Sentinel-2) Remote Sensing. *Remote Sensing*, 13(8), 1597. <https://doi.org/10.3390/rs13081597>
- Toth, C., & Jutzi, B. (2017). Plattformen und Sensoren für die Fernerkundung und deren Geopositionierung. In C. Heipke (Hrsg.), *Photogrammetrie und Fernerkundung:*

- Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel* (S. 29–64). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-47094-7_38
- Tucker, C. J., & Sellers, P. J. (1986). Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1395–1416. <https://doi.org/10.1080/01431168608948944>
- Tyree, M. T., & Sperry, J. S. (1988). Do Woody Plants Operate Near the Point of Catastrophic Xylem Dysfunction Caused by Dynamic Water Stress? 1: Answers from a Model. *Plant Physiology*, 88(3), 574–580. <https://doi.org/10.1104/pp.88.3.574>
- Tyrväinen, L., Pauleit, S., Seeland, K., & De Vries, S. (2005). Benefits and Uses of Urban Forests and Trees. In C. Konijnendijk, K. Nilsson, T. Randrup, & J. Schipperijn (Hrsg.), *Urban Forests and Trees* (S. 81–114). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-27684-X_5
- Ulmer, J. (2024, März 14). *Anfrage—Bachelor-Arbeit Forsthochschule Rottenburg* [Persönliche Kommunikation].
- Verordnung (EU) 2018/1139 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2018 zur Festlegung gemeinsamer Vorschriften für die Zivilluftfahrt und zur Errichtung einer Agentur der Europäischen Union für Flugsicherheit sowie zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 2111/2005, (EG) Nr. 1008/2008, (EU) Nr. 996/2010, (EU) Nr. 376/2014 und der Richtlinien 2014/30/EU und 2014/53/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 552/2004 und (EG) Nr. 216/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates und der Verordnung (EWG) Nr. 3922/91 des Rates (Text von Bedeutung für den EWR.), 212 OJ L (2018). <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/1139/oj/deu>
- von Swantje Duthweiler, S. P., Rötzer, T., Moser, A., Rahman, M., Stratopoulos, L., & Zölch, T. (2017). *Untersuchungen zur Trockenheitsverträglichkeit von Stadtbäumen*.
- Wang, H., Li, Z., Cao, L., Feng, R., & Pan, Y. (2021). Response of NDVI of Natural Vegetation to Climate Changes and Drought in China. *Land*, 10(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/land10090966>
- What is Multispectral Imaging? - Vision Campus*. (2018, Juni 13). <https://www.baslerweb.com/de-de/learning/multispektrale-bildgebung/>
- Wilby, R. L. (2003). Past and projected trends in London's urban heat island. *Weather*, 58(7), 251–260.
- Winker, M., Frick-Trzebitzky, F., Matzinger, A., Schramm, E., & Stieß, I. (2019). Abschwächung von Klimafolgen bei erhöhter Lebensqualität in der Stadt—das Potenzial von gekoppelten blau-grün-grauen Infrastrukturen. *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 12(11), 650–655.
- Yue, X., Wang, L., Shi, X., Xu, M., & Zhu, Z. (2018). Investigations on the Effects of Seasonal Temperature Changes on the Electrical Resistance of Living Trees. *Forests*, 9(9), 550. <https://doi.org/10.3390/f9090550>

Anhang

Anhang 1: Datenblatt Vollspektrallampen PAR38 Full Spektrum Grow Light	74
Anhang 2: Aufnahmetabellen Versuchszeitraum	76
Anhang 3: Versuchsbegleitende Tabelle mit TreeSense Baumstatus, Gießeingriffe und optischer Einschätzung	81
Anhang 4: Streudiagramme der Regressionsanalyse	83

Anhang 1 Datenblatt Vollspektrallampen PAR38 Full Spektrum Grow Light (Endrich, 2021)

euroLighting
power of sun

Leistungsübersicht

Leistungsstarke, gleichmäßige Beleuchtung für schnelles Pflanzenwachstum

- Deutliche Steigerung des Wachstums und des Fruchtertrages
- Alle Pflanzen werden gleichmäßig mit dem besten Lichtspektrum versorgt
- 18 W LED-Birne ersetzt 100 W Glühbirne – über 80 % Ersparnis an Stromkosten

Universell einsetzbares Vollspektrumlicht nach dem Vorbild der Sonne

- Keine Anpassung des Lichts auf verschiedene Blüh- & Wachstumsphasen nötig
- Universell für jede Pflanze einsetzbar & erspart pflanzenspezifische Beleuchtung

Inklusive effektivem UV-Anteil

- Unterstützt die Bildung der Wirkstoffe insbesondere bei Heilpflanzen
- Fördert Aroma, Farbintensität und Resistenz gegen Pilzkrankheiten & Schädlinge

Weißes Licht statt violetterm Wachstumslicht

- Leichtes Überprüfen von Pflanzengesundheit und Schädlingsbefall
- Angenehmes Arbeiten und bestes Farbsehen

Anwendungsbereiche

- Gewächshauspflanzen jeglicher Art
- Zucht von Blumen, Sträucher, Bäumen etc.
- Anbau von Salat, Kräuter und Gemüse
- Zimmerpflanzen im Büro und Haushalt



← Klassische Pflanzenbeleuchtung



Neue Vollspektrum-Pflanzen-Lampe →



Deutliche Ertrags- und Wachstumssteigerung jetzt mit weißem statt violetterm Licht



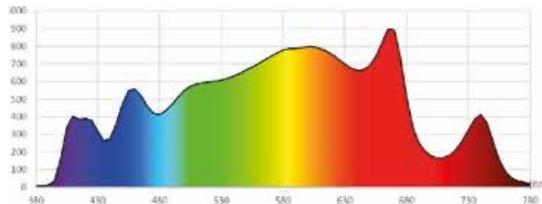
Technische Daten

Artikel Nr.	P7026ROY00002
Produkt	PAR38 Full Spectrum Grow Light GW-Series
Nennleistung	18 W
Abmessung	Ø 120 x 130 mm, PAR38
Fassung	E26/E27
Farbtemperatur	4000 K, neutralweiß
Farbwiedergabeindex	Ra 95
Nennlichtstrom	720 lm
PPFD	330 µmol/m ² *s im Abstand von 30 cm
Lebensdauer	15.000 Std.
Betriebsspannung	AC 85 - 265 V @ 50 / 60 Hz
IP-Schutzart	IP65 an der Frontseite
Dimmbar	Nein
UV-Licht	Ja
Zertifizierung	UL CE ROHS
Garantie	3 Jahre

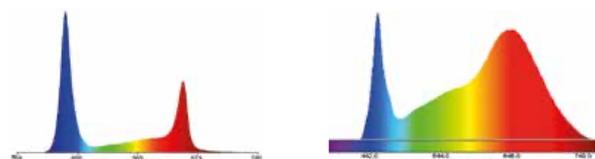
Produktbild



Ein Lichtspektrum für alle Pflanzen



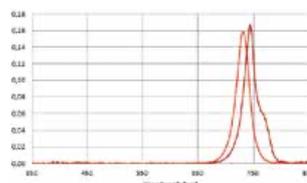
Das Vollspektrum ersetzt alle anderen Pflanzen-Lampen wie z. B.:



Klassisches Wachstumsspektrum z.B. für Sojabohnen und Grünpflanzen

Lichtspektrum für Tomaten und Gurken

Abmessungen (mm)



Lichtspektrum für Blumen

Weitere Modelle sind auf Anfrage möglich.

Anhang 2 Aufnahme Tabellen Versuchszeitraum

Birke Nr. 1

Aufnahmedatum	Uhrzeit	NDVI- oben-Mittelwert	NDVI- unten-Mittelwert	Bodenfeuchte [%]	Wiederstand [kΩ]	temperaturbereinigter Wiederstand [kΩ]
15.04.24	15:53:00	-0,191019608	-0,2141156863	51,25	61,982	77,79950496
16.04.24	13:42:00	-0,1251176471	-0,079647059	48,56	63,959	53,0106431
17.04.24	10:04:00	-0,220352941	-0,105215686	45,57	45,803	41,29564536
18.04.24	15:00:00	-0,119607843	-0,080235294	41,98	40,13	34,79023574
19.04.24	12:38:00	-0,236588235	-0,113176471	39,71	42,462	34,30344255
22.04.24	15:00:00	-0,201372549	-0,149960784	31,53	55,8705	38,73170435
23.04.24	15:15:00	-0,127058824	-0,123019608	29,09	59,861	32,31039418
24.04.24	15:10:00	-0,17545098	-0,167294118	26,635	56,066	36,50219232
25.04.24	15:15:00	-0,142470588	-0,138352941	24,28	57,287	33,88094295
26.04.24	15:20:00	-0,166509804	-0,132784314	22,13	53,742	35,55266394
29.04.24	15:20:00	-0,148980392	-0,094	14,87		
30.04.24	14:00:00	-0,22827451	-0,093882353			
01.05.24	13:45:00	-0,244117647	-0,085058824			
02.05.24	15:15:00	-0,272235294	-0,062705882	9,66		
03.05.24	14:30:00	-0,314470588	-0,10972549	8,46		
06.05.24	14:25:00	-0,200156863	-0,065803922	5,63	56,49	70,84447026
07.05.24	15:05:00	-0,212980392	-0,130941176	4,85	59,69	69,42179691
08.05.24	15:10:00	-0,232784314	-0,122470588	4,185	61,926	70,38610833
09.05.24	15:05:00	-0,245886275	-0,105921569	3,59	63,206	74,05925334
10.05.24	15:10:00	-0,230196078	-0,085764706	3,015	64,56	82,83957321
13.05.24	14:55:00	-0,226196078	-0,111294118	1,67	70,267	108,2790666
14.05.24	15:10:00	-0,242588235	-0,106509804	1,295	71,691	131,7881547
15.05.24	15:10:00	-0,240313725	-0,104470588	0,97	75,677	117,204741
16.05.24	15:10:00	-0,2719764706	-0,123529412	0,7	75,764	139,7568634
17.05.24	14:10:00	-0,238509804	-0,075568627	0,42	80,828	127,9328436

Birke Nr. 2

Aufnahmedatum	Uhrzeit	NDVI- oben-Mittelwert	NDVI- unten-Mittelwert	Bodenfeuchte [%]	Widerstand [kΩ]	temperaturbereinigter Widerstand [kΩ]
15.04.24	15:52:00	-0,113568627	-0,08827451	44,36	55,85	68,00648715
16.04.24	13:41:00	-0,2249686275	-0,063411765	42,56	58,956	50,13336431
17.04.24	10:03:00	-0,301490196	-0,078313725	41,16	51,312	46,25
18.04.24	14:59:00	-0,204901961	-0,14254902	38,62	52,869	46,08101615
19.04.24	12:38:00	-0,32345098	-0,117058824	38,62	51,593	41,26953958
22.04.24	15:00:00	-0,306	-0,101764706	30,77	54,688	38,3994333
23.04.24	15:15:00	-0,274313725	-0,075882353	28,685	57,843	31,4517953
24.04.24	15:10:00	-0,215490196	-0,044588235	26,58	54,357	35,54087049
25.04.24	15:15:00	-0,332901961	-0,107882353	24,44	56,214	33,70047679
26.04.24	15:20:00	-0,232	-0,051843137	22,47	53,553	35,806162
29.04.24	15:20:00	-0,224901961	-0,050196078	33,29		
30.04.24	14:00:00	-0,176666667	-0,069098039			
01.05.24	13:45:00	-0,202156863	-0,079176471			
02.05.24	15:15:00	-0,165411765	-0,074196078	17,17		
03.05.24	14:30:00	-0,144196078	-0,065176471	14,68		
06.05.24	14:25:00	-0,09772549	-0,023529412	9,07	54,823	69,38987947
07.05.24	15:05:00	-0,123176471	-0,046666667	7,91	56,783	65,6390011
08.05.24	15:10:00	-0,11772549	-0,038862745	6,95	58,473	66,03140041
09.05.24	15:05:00	-0,07345098	-0,018941176	6,13	60,491	70,47224565
10.05.24	15:10:00	-0,095647059	-0,028117647	9,65	59,672	74,43236073
13.05.24	14:55:00	-0,112078431	-0,029529412	5,54	62,103	93,95505292
14.05.24	15:10:00	-0,072431373	-0,015137255	4,9	63,337	110,8896534
15.05.24	15:10:00	-0,124	-0,029019608	4,29	67,373	100,8023407
16.05.24	15:10:00	-0,090705882	-0,015411765	3,91	69,241	123,0421593
17.05.24	14:10:00	-0,111529412	-0,027921569	3,46	75,902	117,6642445

Birke Nr. 3

Aufnahmedatum	Uhrzeit	NDVI- oben-Mittelwert	NDVI- unten-Mittelwert	Bodenfeuchte [%]	Widerstand [kΩ]	temperaturbereinigter Widerstand [kΩ]
15.04.24	15:52:00	-0,255843137	-0,194156863	26	48,6595	59,32716861
16.04.24	13:40:00	-0,2284745098	-0,161058824	23,6	44,955	39,69380291
17.04.24	10:03:00	-0,2353333333	-0,12972549	23,83	36,986	34,37874756
18.04.24	14:59:00	-0,2250784314	-0,13854902	22,22	39,858	35,60040046
19.04.24	12:37:00	-0,2935668627	-0,170705882	21,09	43,686	36,30892972
22.04.24	15:00:00	-0,193019608	-0,085960784	20,46	49,987	36,51692928
23.04.24	15:15:00	-0,208823529	-0,095960784	19,53	52,301	29,62031633
24.04.24	15:10:00	-0,227098039	-0,097803922	18,19	50,207	34,17971496
25.04.24	15:15:00	-0,329490196	-0,16372549	16,92	52,995	32,73882371
26.04.24	15:20:00	-0,336588235	-0,179568627	15,45	50,572	34,74294532
29.04.24	15:20:00	-0,198	-0,125843137	13,76		
30.04.24	14:00:00	-0,221843137	-0,105647059			
01.05.24	13:45:00	-0,171294118	-0,082705882			
02.05.24	15:15:00	-0,246470588	-0,120823529	14,51		
03.05.24	14:30:00	-0,165411765	-0,079764706	11,77		
06.05.24	14:25:00	-0,129490196	-0,06627451	7,3	41,431	51,05507537
07.05.24	15:05:00	-0,207764706	-0,080196078	12,305	40,315	44,53592701
08.05.24	15:10:00	-0,196784314	-0,084352941	10,08	41,673	45,62948985
09.05.24	15:05:00	-0,113411765	-0,048078431	8,81	41,542	46,53373495
10.05.24	15:10:00	-0,130392157	-0,044117647	7,63	40,926	49,74335978
13.05.24	14:55:00	-0,215921569	-0,075607843	5,35	44,262	62,85562082
14.05.24	15:10:00	-0,220078431	-0,077254902	4,86	44,956	70,94034303
15.05.24	15:10:00	-0,139137255	-0,046745098	4,3	47,591	67,60732193
16.05.24	15:10:00	-0,223294118	-0,069098039	3,85	48,457	77,97093652
17.05.24	14:10:00	-0,206470588	-0,066352941	3,43	51,446	72,14479993

Feld-Ahorn Nr. 2

Aufnahmedatum	Uhrzeit	NDVI- oben-Mittelwert	NDVI- unten-Mittelwert	Bodenfeuchte [%]	Widerstand [kΩ]	temperaturbereinigter Widerstand [kΩ]
15.04.24	15:51:00	-0,219137255	-0,098156863	41,77	31,272	36,56291612
16.04.24	13:38:00	-0,208588235	-0,073803922	39,64	32,996	29,8045903
17.04.24	10:02:00	-0,218431373	-0,050117647	37,245	32,658	29,77734613
18.04.24	14:57:00	-0,316156863	-0,083882353	33,83	35,332	31,29794934
19.04.24	12:36:00	-0,315523412	-0,049607843	31,68	36,161	29,98554668
22.04.24	15:00:00	-0,204588235	-0,026352941	23,745	37,554	28,3636988
23.04.24	15:15:00	-0,260196078	-0,07832157	21,89	40,109	24,93244479
24.04.24	15:10:00	-0,192705882	-0,020078431	19,85	38,562	27,53169924
25.04.24	15:15:00	-0,233843137	-0,042431373	17,99	39,762	26,10378466
26.04.24	15:20:00	-0,223843137	-0,020509804	16,2	38,218	26,82766732
29.04.24	15:20:00	-0,13345098	-0,01945098	14,405		
30.04.24	14:00:00	-0,165215686	-0,029607843			
01.05.24	13:45:00	-0,181372549	-0,030588235			
02.05.24	15:15:00	-0,182980392	-0,041764706	12,09		
03.05.24	14:30:00	-0,130666667	-0,01854902	10,78		
06.05.24	14:25:00	-0,123803922	-0,022470588	6,86	34,019	40,99296449
07.05.24	15:05:00	-0,167058824	-0,039647059	5,81	35,226	38,96671012
08.05.24	15:10:00	-0,173647059	-0,042588235	4,86	36,632	41,07824286
09.05.24	15:05:00	-0,128588235	-0,025254902	10,33	37,682	42,35091155
10.05.24	15:10:00	-0,165254902	-0,065254902	6,87	34,276	40,4087008
13.05.24	14:55:00	-0,126666667	-0,033490196	3,44	38,182	52,10189651
14.05.24	15:10:00	-0,127960784	-0,018039216	2,82	40,538	63,33544434
15.05.24	15:10:00	-0,163764706	-0,021019608	2,25	45,285	62,8175471
16.05.24	15:10:00	-0,11345098	-0,015607843	1,66	47,737	76,50422441
17.05.24	14:10:00	-0,168941176	-0,085764706	1,13	53,161	76,19558911

Feld-Ahorn Nr. 3

Aufnahmedatum	Uhrzeit	NDVI- oben-Mittelwert	NDVI- unten-Mittelwert	Bodenfeuchte [%]	Widerstand [kΩ]	temperaturbereinigter Widerstand [kΩ]
15.04.24	15:50:00	-0,196039216	-0,232666667	51,77	60,32	74,30003622
16.04.24	13:37:00	-0,195803922	-0,075921569	50,48	69,236	61,69008344
17.04.24	10:01:00	-0,284901961	-0,125843137	48,115	64,282	57,97553396
18.04.24	14:56:00	-0,2245843137	-0,100941176	45,77	65,1965	56,33149971
19.04.24	12:36:00	-0,322705882	-0,124627451	43,55	64,362	50,88182383
22.04.24	15:00:00	-0,154627451	-0,063686275	36,18	61,671	42,73579618
23.04.24	15:15:00	-0,292	-0,113098039	34,01	64,33	35,29661242
24.04.24	15:10:00	-0,285137255	-0,102941176	31,7	60,914	39,61849059
25.04.24	15:15:00	-0,301215686	-0,111647059	29,72	63,015	37,02035861
26.04.24	15:20:00	-0,23545098	-0,087490196	27,91	61,778	39,6720773
29.04.24	15:20:00	-0,25145098	-0,176117647	22,48		
30.04.24	14:00:00	-0,198784314	-0,128941176			
01.05.24	13:45:00	-0,152078431	-0,106823529			
02.05.24	15:15:00	-0,264980392	-0,186627451	16,92		
03.05.24	14:30:00	-0,230509804	-0,146156863	14,82		
06.05.24	14:25:00	-0,194470588	-0,118509804	9,595	84,919	117,688116
07.05.24	15:05:00	-0,178078431	-0,15172549	8,335	89,876	109,7288558
08.05.24	15:10:00	-0,224431373	-0,174156863	7,35	96,267	121,3067966
09.05.24	15:05:00	-0,191490196	-0,130117647	6,535	100,574	125,6643878
10.05.24	15:10:00	-0,18372549	-0,05054902	5,86	107,031	155,8547002
13.05.24	14:55:00	-0,097333333	-0,011764706	4,16	133,54	276,8499707
14.05.24	15:10:00	-0,165098039	-0,029019608	3,64	142,277	422,5413289
15.05.24	15:10:00	-0,093921569	-0,010745098	3,16	155,376	350,2527066
16.05.24	15:10:00	-0,147490196	-0,018352941	2,83	158,291	514,1279936
17.05.24	14:10:00	-0,114980392	-0,019490196	2,49	162,819	382,2618164

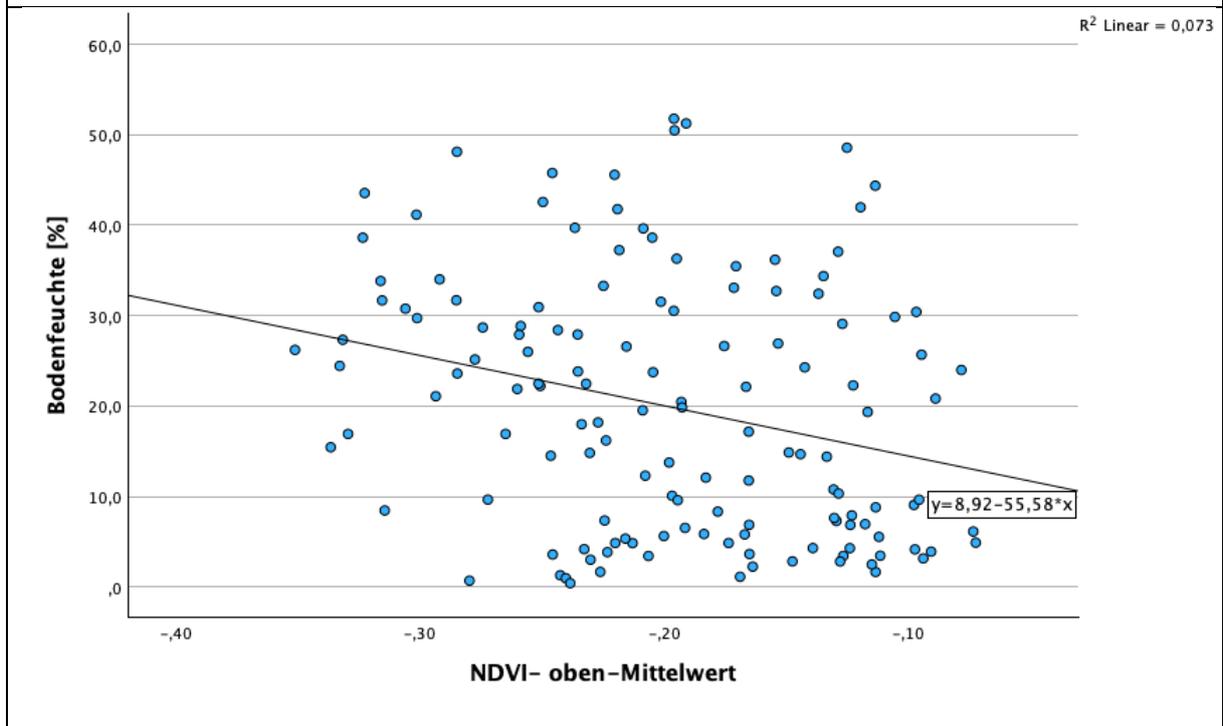
Anhang 3 Versuchsbegleitende Tabelle mit TreeSense Baumstatus, Gießeingriffe und optischer Einschätzung

Aufnahmedatum	Baum-Nr. Kronensensor	Status	Gegossen?	Optische Bemerkungen
15.04.24	Bi-1	Gesund	Nein	
	Bi-2	Gesund	Nein	
	Bi-3	Gesund	Nein	
	Fa-1	Gesund	Nein	
	Fa-2	Gesund	Nein	
	Fa-3	Gesund	Nein	
16.04.24	Bi-1	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-3	Am Austrocknen	Nein	
17.04.24	Bi-1	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-3	Am Austrocknen	Nein	
18.04.24	Bi-1	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-3	Am Austrocknen	Nein	
19.04.24	Bi-1	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Ja (100ml)	
	Fa-1	Am Austrocknen	Ja (100ml)	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-3	Am Austrocknen	Nein	
22.04.24	Bi-1	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-3	Am Austrocknen	Nein	
23.04.24	Bi-1	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-3	Am Austrocknen	Nein	
24.04.24	Bi-1	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-3	Am Austrocknen	Nein	
25.04.24	Bi-1	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Ja (100ml)	
	Fa-1	Am Austrocknen	Ja (100ml)	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-3	Am Austrocknen	Nein	
26.04.24	Bi-1	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Ja (100ml)	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Ja (100ml)	
	Fa-3	Am Austrocknen	Nein	
29.04.24	Bi-1	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-3	Am Austrocknen	Nein	
30.04.24	Bi-1	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Ja (100ml)	
	Fa-1	Am Austrocknen	Ja (100ml)	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-3	Am Austrocknen	Nein	
01.05.24	Bi-1	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-3	Am Austrocknen	Nein	
02.05.24	Bi-1	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-3	Am Austrocknen	Nein	

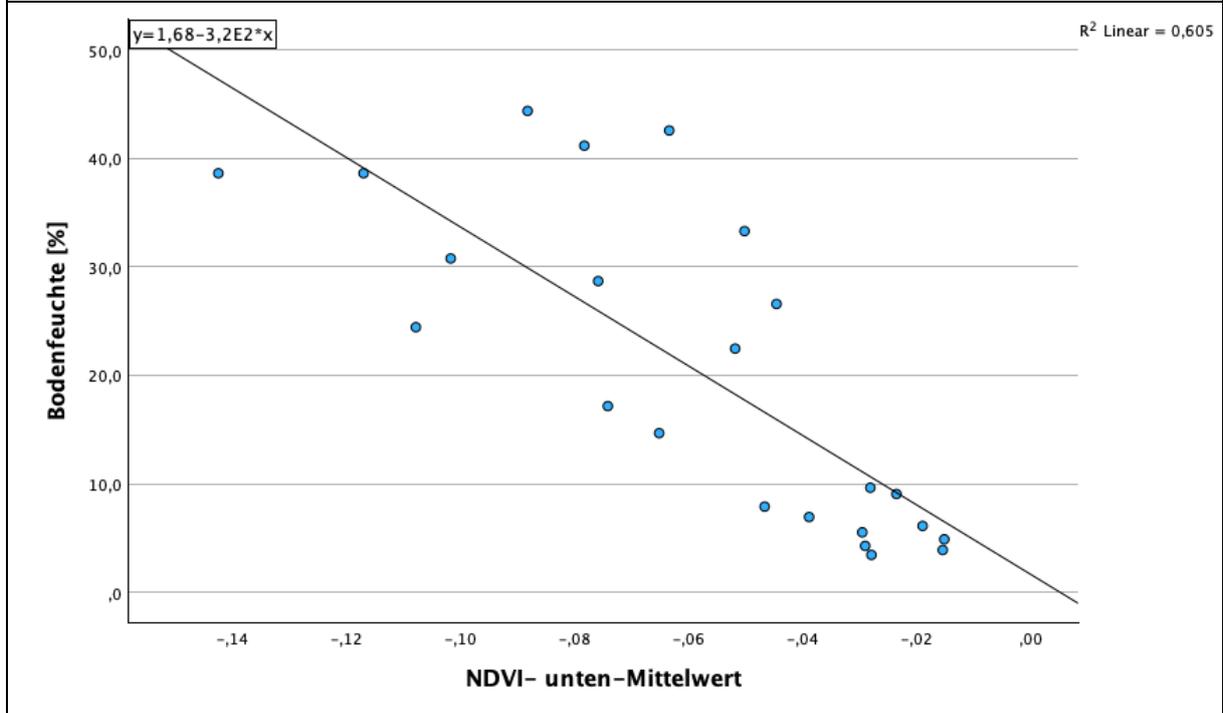
03.05.24	Bi-1	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-3	Am Austrocknen	Nein	
06.05.24	Bi-1	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Ja (100ml)	
	Fa-1	Am Austrocknen	Ja (100ml)	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-3	Trocken	Nein	Blattfarbe Dunkler als andere Ahoerne
07.05.24	Bi-1	Trocken	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-3	Trocken	Nein	Blattfarbe Dunkler als andere Ahoerne
08.05.24	Bi-1	Trocken	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-3	Trocken	Nein	Blattfarbe Dunkler als andere Ahoerne
09.05.24	Bi-1	Trocken	Nein	
	Bi-2	Am Austrocknen	Ja (100ml)	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Ja (100ml)	Untere Blätter teilweise am absterben.
	Fa-3	Trocken	Nein	Blattfarbe Dunkler als andere Ahoerne
10.05.24	Bi-1	Trocken	Nein	
	Bi-2	Trocken	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Trocken	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	Untere Blätter teilweise am absterben.
	Fa-3	Trocken	Nein	Blattfarbe Dunkler als andere Ahoerne
13.05.24	Bi-1	Trocken	Nein	
	Bi-2	Trocken	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Trocken	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	Untere Blätter teilweise am absterben.
	Fa-3	Trocken	Nein	Blattfarbe Dunkler als andere Ahoerne
14.05.24	Bi-1	Trocken	Nein	
	Bi-2	Trocken	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Trocken	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	Untere Blätter teilweise am absterben.
	Fa-3	Trocken	Nein	Blattfarbe Dunkler als andere Ahoerne
15.05.24	Bi-1	Trocken	Nein	
	Bi-2	Trocken	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Trocken	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	Untere Blätter teilweise am absterben.
	Fa-3	Trocken	Nein	Blattfarbe Dunkler als andere Ahoerne
16.05.24	Bi-1	Trocken	Nein	
	Bi-2	Trocken	Nein	
	Bi-3	Am Austrocknen	Nein	
	Fa-1	Trocken	Nein	
	Fa-2	Am Austrocknen	Nein	Untere Blätter teilweise am absterben.
	Fa-3	Trocken	Nein	Blattfarbe Dunkler als andere Ahoerne
17.05.24	Bi-1	Trocken	Nein	
	Bi-2	Trocken	Nein	
	Bi-3	Trocken	Nein	
	Fa-1	Trocken	Nein	
	Fa-2	Trocken	Nein	Untere Blätter teilweise am absterben.
	Fa-3	Trocken	Nein	Blattfarbe Dunkler als andere Ahoerne

Anhang 4 Streudiagramme der Regressionsanalyse

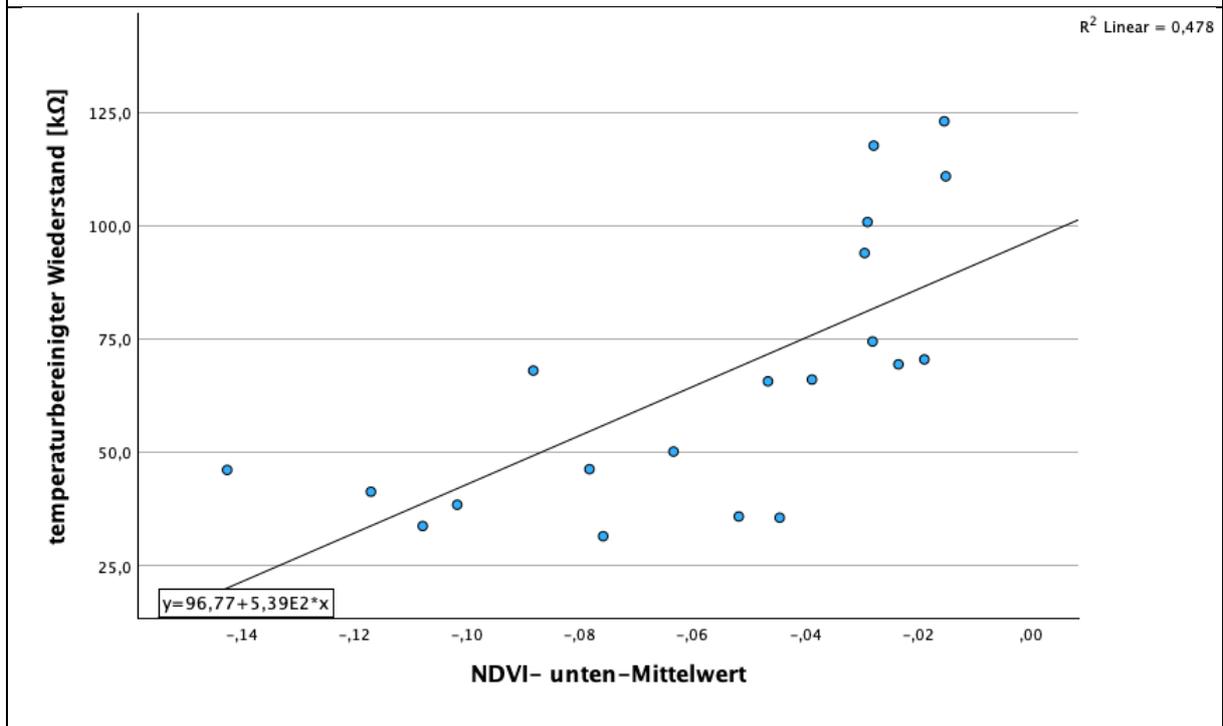
Streudiagramm Gruppe 1 – NDVI-Oben / Bodenfeuchte



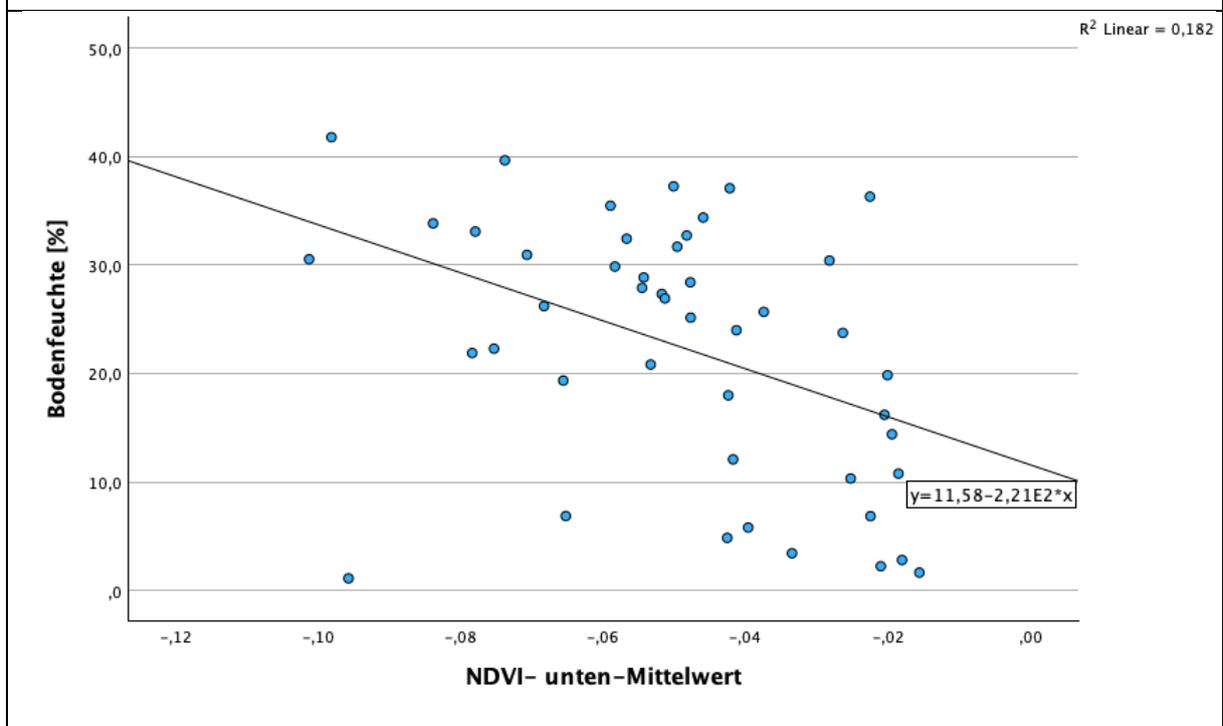
Streudiagramm Gruppe 5 – NDVI-Unten / Bodenfeuchte



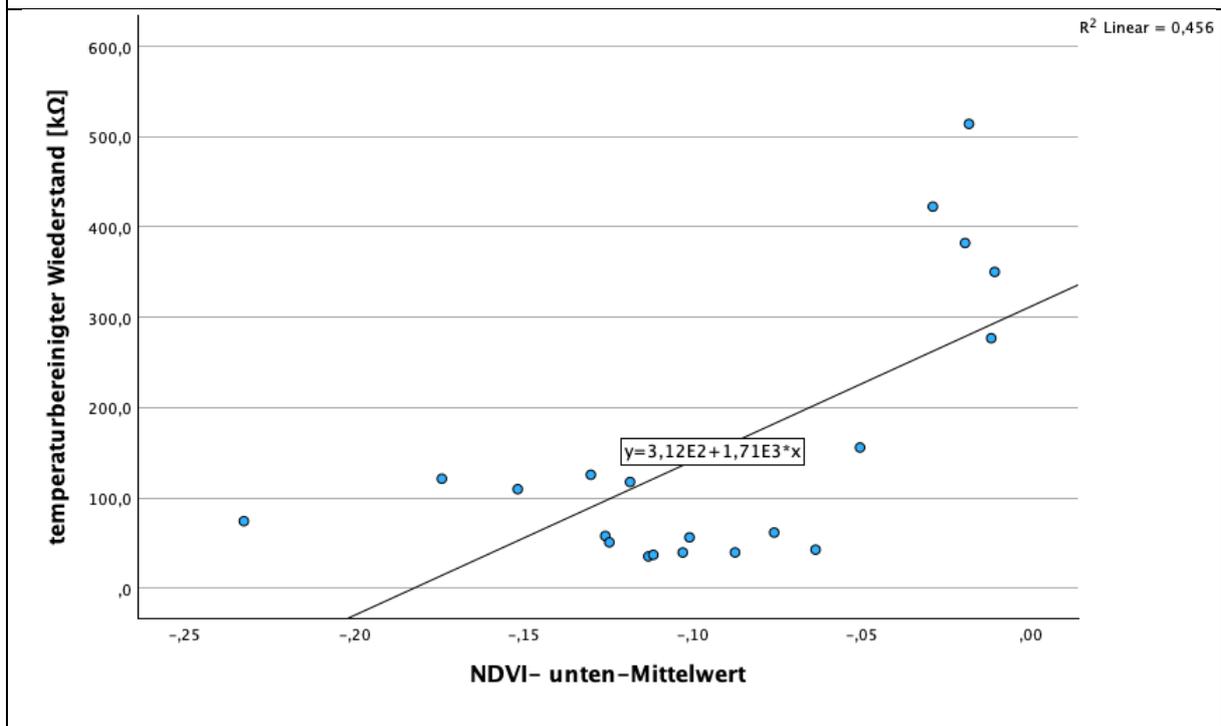
Streudiagramm Gruppe 5 – NDVI-Unten / temperaturbereinigter Widerstand



Streudiagramm Gruppe 3 – NDVI-Unten / Bodenfeuchte



Streudiagramm Gruppe 4 – NDVI-Unten / temperaturbereinigter Widerstand



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Vorname, Nachname und Adresse:

Simon Spittel

Friedrichstraße 15

72072 Tübingen

Ort, Datum:

Tübingen, den

.....

(Unterschrift)