

Etablierung eines validierten Verfahrens zur Bestimmung der
Effektstärke von Sorten und Aussaatstärke auf die
Blattwinkelverteilung von Weizen

Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)

der

Mathematisch-Naturwissenschaften Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von

Marie Johanna Theiß

aus

Düsseldorf

Bonn 2023

Angefertigt mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Gutachter /Betreuer: Prof. Dr. Uwe Rascher

Gutachter: Prof. Dr. Lukas Schreiber

Tag der Promotion: 02.02.2024

Erscheinungsjahr: 2024

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen besonderen Dank denjenigen Personen entgegenbringen, die mich während der Anfertigung dieser Promotionsschrift unterstützten und begleiteten:

Zunächst möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Uwe Rascher bedanken, der mir die Möglichkeit gegeben hat, diese Arbeit in seiner Arbeitsgruppe anzufertigen. Seine kritischen Nachfragen und der konstruktive Austausch haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Weiterhin ich Lukas Schreiber danken, der mir als Zweitgutachter die Möglichkeit gegeben hat an der naturwissenschaftlichen Fakultät zu promovieren und mich über die Jahre nicht vergessen hat.

Mein besonderer Dank gilt Mark Müller-Linow, weil er mich stets unterstützt hat, nicht müde wurde, nach dem Status der Arbeit zu fragen und zum passenden Zeitpunkt motivierende Worte gefunden hat – ohne ihn wäre diese Arbeit nicht beendet worden.

In diesem Kontext danke ich allen meinen Kollegen am Forschungszentrum Jülich für Anregungen und Unterstützung während der gemeinsamen Zeit.

Ein weiterer Dank geht an meine Familie und Freunde, für willkommene Ablenkungen, moralischen Beistand und ein offenes Ohr. Ein besonderer Danke gilt meinem Großvater, der immer ein großes Vorbild für mich war. Für unsere langjährige Freundschaft und das kritische Lektorat danke ich Amelie Diederich.

Zuletzt danke ich meinem Ehemann und meinen Kindern, sie haben mich in den letzten Monaten begleitet, meine Launen ertragen und standen immer an meiner Seite.

Inhalt

I.	Abkürzungsverzeichnis	1
II.	Abbildungsverzeichnis	3
III.	Tabellenverzeichnis	6
IV.	Zusammenfassung	8
V.	Summary	11
1.	Einleitung	13
1.1.	Getreidepflanzen	13
1.2.	Bedeutung der Blattwinkelverteilung als phänotypisches Merkmal.....	15
1.3.	Virtuelle Pflanzenmodelle zur Phänotypisierung von Getreide-Pflanzen im Feld	19
1.4.	Ziele der Arbeit	24
1.4.1.	Hardware-Aufbau	24
1.4.2.	Software zur Datenverarbeitung.....	25
1.4.3.	Evaluierung	25
1.4.4.	Anwendung im Feld	26
2.	Technische Grundlagen und Kamera-Geometrien	27
2.1.	Monokulare Kamera: Abbildungen und technische Grundlagen.....	27
2.1.1.	Lochkameramodell	27
2.1.2.	Linse-Verzeichnung.....	31
2.1.3.	Kamera-Kalibrierung.....	32
2.2.	Stereosysteme	36
2.2.1.	Epipolargeometrie	36
2.2.2.	Rektifikation.....	40
2.2.3.	Korrespondenzanalyse	41
3.	Implementierung der Hard- und Softwarekomponenten	48
3.1.	Installation des Hardware-Aufbaus: Stereo-System	48
3.2.	Implementierung der Software zur Datenverarbeitung	51
3.2.1.	Stereo-Kalibrierung und 3D-Rekonstruktion	53
3.2.2.	Blattmodellierung.....	56
3.2.3.	Berechnung Phänotypischer Parameter	62
3.2.4.	Beta Funktion.....	63
4.	Konzept und mathematische Grundlagen zur Methodvalidierung	65
4.1.	Mathematische Evaluationsgrößen	65
4.2.	Referenzmodelle für Methodvalidierung	68
4.2.1.	Kugelmodell	69
4.2.2.	Pflanzenmodell	70
4.3.	Experimenteller Aufbau	73
4.3.1.	Fehlerbestimmung: 3D-Rekonstruktion.....	73

4.3.2.	Fehlerberechnung: Pflanzenparameter	77
5.	Design Case Study: Feldexperiment	80
5.1.	Rekonstruktion von Weizenblättern	82
5.2.	Effektstärke von Getreidesorten und Aussaatstärken auf Blattwinkelverteilungen	83
6.	Resultate der Methodvalidierung	85
6.1.	Evaluation der 3D-Rekonstruktion	85
6.2.	Evaluation der berechneten Blattparameter	87
6.2.1.	Blattbreite	88
6.2.2.	Blattsachsenlänge	90
6.2.3.	Blattfläche	91
6.2.4.	Insertionswinkel	93
6.2.5.	Mittlerer Neigungswinkel	96
6.2.6.	Blattwinkelverteilung	98
7.	Resultate Case Study: Feldexperiments	104
7.1.	Rekonstruktion natürlicher Weizenblätter	104
7.2.	Effektstärke von Getreidesorten und Aussaatstärken auf Blattwinkelverteilungen	109
7.2.1.	Sorteneffekt	114
7.2.2.	Effekt durch die Aussaatstärke	118
8.	Diskussion	124
8.1.	3D-Rekonstruktion	126
8.2.	Blattparameter am künstlichen Pflanzenmodell	127
8.2.1.	Blattbreite	128
8.2.2.	Blattachsenlänge	130
8.2.3.	Blattfläche	131
8.2.4.	Insertionswinkel	133
8.2.5.	Mittlerer Neigungswinkel	134
8.2.6.	Blattwinkelverteilung	135
8.3.	Getreidepflanzen	138
8.4.	Effektstärken von Getreidesorten und Aussaatstärken auf Blattwinkelverteilungen im Feld	142
9.	Fazit	147
10.	Literatur	149
11.	Anhang	160
11.1.	Dokumentation der Werte für Richtigkeit und Präzision der rekonstruierten 3D-Punkte	160
11.2.	Analyse des künstlichen Pflanzenmodells	160
11.3.	Resultate ANOVA	163

I. Abkürzungsverzeichnis

A.....	Kameramatrix
A_B	Blattfläche
ANOVA.....	Varianzanalyse
B.....	Basislänge
B_A	Blattachsenfunktion
B_B	Blattbreite
B_K	Blattkanten
B_L	Blatlänge
B_M	Blattmodell
B_{max}	maximale Blattbreite
C.....	Kamerazentrum
CIMMIYT.....	International Maize and Wheat Improvement Center
(c_u, c_v)	Hauptpunkt
d.....	Disparitäten
E.....	essenzielle Matrix
$E(D)$	globale Energiefunktion
e_L, e_R	Epipole
f.....	Brennweite
F.....	fundamental Matrix
F_{B_M}	Funktionen zur Beschreibung des Blattmodells
I_L, I_R	Bildebenen
k_1, k_2, k_3	radiale Verzeichnungen
KS.....	Kreisschichten
l_L, l_R	Epipolarelinien
$L_T(p, d)$	Pfadkosten

LAD(θ)	Blattwinkelverteilung
M	Kamera Matrix
MAE _s	(systematischer) Mittlerer absoluter Fehler
MAE _u	(nicht systematischer) Mittlerer absoluter Fehler
O	projizierte Kugeloberfläche
P _{BM}	Punktewolke Blattmodel
p ₁ , p ₂	tangentiale Verzeichnungen
p _c (u, v)	projizierter Punkt im Kamerakoordinatensystem
QS	Quadratsumme
R	Rotation
r _b	Biegungsradius
s _i	relative Blattachsenposition
S _L , S _R	Sehstrahlen
SGBM	Semi-Global Block Matching
\vec{t}	Translation
α	Insertionswinkel
Γ	Gamma-Funktion
ω^2	Eta-Quadrat
θ	Neigungswinkel, Blattwinkel
θ_B	mittlerer Blattwinkel
π	Epipolarebene
ρ_{KS}	Punktedichte Kreisscheibe
φ	Azimut Winkel

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Morphologische Merkmale von Süßgräsern am Beispiel des Sommerweizens (Triticum aestivum)	14
Abbildung 1-2: Räumliche Orientierung, bzw. Ausrichtung eines Blattes	17
Abbildung 1-3: Blattwinkelverteilungsfunktionen nach de Wit	18
Abbildung 2-1: Funktionsweisen und Abbildungsgeometrie einer Lochkamera	28
Abbildung 2-2: Bildebene zwischen Projektionsfläche und Gegenstand	28
Abbildung 2-3: Projektion der 3D-Koordinaten in die Bildebene	29
Abbildung 2-4: Radiale Verzeichnung von Kameralinsen	31
Abbildung 2-5: Auswirkungen von Linsenverzeichnung auf die Position eines Punktes	32
Abbildung 2-6: Kalibrierungsmuster	34
Abbildung 2-7: Geometrische Darstellung des allgemeinen Stereosystem	37
Abbildung 2-8: Allgemeine Epipolarometrie, Kenngrößen	38
Abbildung 2-9: Geometrische Darstellung des achsenparallelen Stereosystems	40
Abbildung 2-10: Rektifizierte Ansicht des allgemeinen Stereosystems	41
Abbildung 2-11: Bestimmung der Disparitäten mittels geometrischer Zusammenhänge und Kameraparameter	42
Abbildung 2-12: Aufsummierung der Matchingkosten im Disparitäten-Raum	46
Abbildung 3-1: Hardware-Aufbau	49
Abbildung 3-2: Belichtungs- Dreieck	50
Abbildung 3-3: Flussdiagramm der kompletten Software-Pipeline	53
Abbildung 3-4: Bearbeitungsschritte zur Verarbeitung der Stereoaufnahmen	55
Abbildung 3-5: Verarbeitungsschritte für die Blattmodellierung	57
Abbildung 3-6: Blattachsenfit	58
Abbildung 3-7: Ermitteln der Blattbreite	59
Abbildung 3-8: Darstellung des finalen Blattmodells.	61

Abbildung 4-1: Definition für Richtigkeit und Präzision, unter Annahme normalverteilter Messwerte.	67
Abbildung 4-2: Systematischer und nicht-systematischer Fehler	68
Abbildung 4-3: Aufnahme des Kugelmodells.	69
Abbildung 4-4: Pflanzenmodell	71
Abbildung 4-5: Übersicht künstliche Blätter.	72
Abbildung 4-6: Fittingprozess des Kugelmodells	75
Abbildung 4-7: Einteilung der Kugel zur Evaluation des Einflusses von Neigungswinkel auf die Rekonstruktion.	76
Abbildung 5-1: Felddesign Case Study	82
Abbildung 6-1: Resultate der Methodenevaluierung für die rekonstruierte Punktwolke	87
Abbildung 6-2: Boxplot zur rekonstruierten Blattbreite	89
Abbildung 6-3: Boxplot zur rekonstruierten Blattachsenlänge	90
Abbildung 6-4: Boxplot zur rekonstruierten Blattfläche	92
Abbildung 6-5: Darstellung der rekonstruierten Insertionswinkel	93
Abbildung 6-6: Darstellung der rekonstruierten Insertionswinkel bei gebogenen Blättern	95
Abbildung 6-7: Darstellung der rekonstruierten mittleren Blattwinkel bei gebogenen Blättern	97
Abbildung 6-8: Darstellung rekonstruierter Blattwinkel entlang der Blattachse	99
Abbildung 6-9: Darstellung rekonstruierter Blattwinkelverteilungen	100
Abbildung 6-10: Darstellung der winkelspezifischen mittleren Fehler und Standardabweichungen.	101
Abbildung 6-11: Rekonstruierte Neigungswinkel entlang der Blattachse	103
Abbildung 7-1: Beispiele zur Blattrekonstruktion von Weizenblättern aus Aufnahmen unter Feldbedingungen	105
Abbildung 7-2: Beispiele zur Blattrekonstruktion von Weizenblättern aus Aufnahmen unter Feldbedingungen.	106

Abbildung 7-3: Qualitative Betrachtung der Blattwinkelverteilungen und zugehörigen Beta-	
Funktionen	109
Abbildung 7-4: Berechnete Blattwinkelverteilungen und zugehörige Beta-Funktionen	110
Abbildung 7-5: Visualisierung der Hauptkomponentenanalyse nach Sorten	117
Abbildung 7-6: Visualisierung der Hauptkomponentenanalyse nach Aussaatdichte	120
Abbildung 7-7: Auftragung der gemessenen Blattparameter unterschiedlichen Aussaatdichten. .	121
Abbildung 7-8: Visualisierung der Hauptkomponentenanalyse nach minimaler und maximaler	
Aussaatdichte	122

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Merkmale der Verteilungsfunktionen für Blattwinkel nach de Witt	18
Tabelle 1-2: Übersicht zur Rekonstruktion virtueller Pflanzenmodelle mit unterschiedlichen Sensoren	23
Tabelle 3-1: Übersicht zu verwendeten Software-Toolboxen	52
Tabelle 4-1: Blattparameter der künstlichen Blätter	71
Tabelle 4-2: Pflanzenmodelle mit gebogenen Blatt	78
Tabelle 5-1: Sortenübersicht für Sommerweichweizen (<i>Triticum aestivum</i> L.)	81
Tabelle 5-2: Untere Grenzen für die Effektstärke nach Cohen	84
Tabelle 6-1: Resultate der rekonstruierten Blattbreite	89
Tabelle 6-2: Resultate der rekonstruierten Blattachsenlänge	91
Tabelle 6-3: Resultate der rekonstruierten Blattfläche	92
Tabelle 6-4: Resultate der rekonstruierten Neigungswinkel am planaren Blatt	94
Tabelle 6-5: Resultate der berechneten Insertionswinkel am gebogenen Blatt	95
Tabelle 6-6: systematische und nicht-systematische Fehler für Neigungs- und Insertionswinkel am planaren und gebogenen Blattmodell	96
Tabelle 6-7: Resultate der rekonstruierten mittleren Neigungswinkel am gebogenen Blatt	97
Tabelle 6-8: Resultate der rekonstruierten Neigungswinkel für die Blattwinkelverteilung eines gebogenen Blattes	101
Tabelle 7-1: Aus der Blattwinkelverteilung ermittelte Parameter der Beta-Verteilung basierend auf den Stereoaufnahmen	111
Tabelle 7-2: Kritische Werte für die Teststatistik des Shapiro-Wilk-Test bei unterschiedlichen Stichprobengrößen n	112
Tabelle 7-3: Kritische Werte für die Teststatistik Levene-Test bei verschiedenen Freiheitsgraden df	113
Tabelle 7-4: Berechnete mediane Blattbreite und mittlere Neigungswinkel	113

Tabelle 7-5: Resultate des Shapiro-Wilk Test für die Datensätze der einzelnen Weizensorten	114
Tabelle 7-6: Resultate des Levene Test für die Datensätze der einzelnen Weizensorten	115
Tabelle 7-7: Eigenwerte der Hauptkomponentenanalyse für den Sorteneffekt	117
Tabelle 7-8: Resultate des Shapiro-Wilk Test für die Datensätze der verschiedenen Aussaatstärken	118
Tabelle 7-9: Resultate des Levene Test für die Datensätze der verschiedenen Aussaatstärken	118
Tabelle 7-10: Eigenwerte der Hauptkomponentenanalyse für den Effekt durch die Aussaatstärke	123
Tabelle 11-1: Richtigkeit und Präzision der rekonstruierten 3D-Punkte des Kugelmodells	160
Tabelle 11-2: Resultate der modellierten Blattparameter planares künstliches Blatt	160
Tabelle 11-3: Rekonstruierte Blattmerkmale für das gebogene Blattmodell 1	160
Tabelle 11-4: a)-e): Ergebnisse zu den Pflanzenmodellen 2 bis 6	161
Tabelle 11-5: Resultate der einfaktoriellen ANOVA zum Effekt der Sorten für den Parameter μ ...	163
Tabelle 11-6: Resultate der einfaktoriellen ANOVA zum Effekt der Sorten für den Parameter v ...	163
Tabelle 11-7: Resultate der einfaktoriellen ANOVA zum Effekt der Aussaatstärken für den Parameter μ	163
Tabelle 11-8: Resultate der einfaktoriellen ANOVA zum Effekt der Aussaatstärken ($150,450 \frac{\text{Samen}}{\text{m}^2}$) für den Parameter ω	164

IV. Zusammenfassung

Die Blattwinkelverteilung ist ein wichtiger phänotypischer Parameter von Pflanzen, welcher die Lichtabsorption und somit auch das Wachstum und die Ertragsmenge von Nutzpflanzen beeinflusst. Eine Bestimmung der Blattwinkelverteilung ist aufwendig und zeitintensiv. In dieser Arbeit wurde ein stereokamerabasiertes Verfahren etabliert, um die Blattwinkelverteilung von Weizenpflanzen im Feld zu bestimmen. Die Berechnung der Blattwinkelverteilung erfolgte auf Grundlage eines virtuellen Blattmodells. Dieses wurde ausgehend von den Stereoaufnahmen mit Hilfe verschiedener Methoden der Bildverarbeitung und anschließendem Fitting des Blattmodells in rekonstruierte 3D-Punktwolken berechnet.

Einen wesentlichen Aspekt der Arbeit stellte die Evaluierung der Softwareimplementierung dar. Anhand unterschiedlicher Evaluierungsobjekte wurde das Verfahren evaluiert. Die systematischen und nicht-systematischen Fehler wurden für die Parameter des Pflanzenmodells bestimmt. Das Pflanzenmodell wurde für diese Experimente neu entwickelt. Es bildet die spezifischen Blatteigenschaften von Getreide (Blattbiegung, schmaler Blattverlauf, gebogene Oberflächen) ab. Die Evaluations-Experimente zeigten eine sehr hohe Genauigkeit der Rekonstruktion für Neigungswinkel bis 75° . Bei höheren Neigungswinkeln waren aus den Aufnahmen nahezu keine Punkte auf der Kugeloberfläche rekonstruierbar. Die mathematische Modellierung der Blätter beruht auf der funktionalen Beschreibung des Blattachsenverlaufes, der Blattkanten und der Blatttorsion. Diese Beschreibung ermöglichte die Berechnung der Blattbreite, Blattachsenlänge, Blattoberfläche, des Insertionswinkels, des mittleren Neigungswinkels und die Berechnung der Blattwinkelverteilung.

Die Blattbreite wurde mit einem absoluten systematischen Fehler von 0,33 mm und einem nicht-systematischen Fehler von 1,66 mm rekonstruiert. Bei der Blattachsenlänge betrug der systematische Fehler 2,22 mm und der nicht-systematische Fehler 7,4 mm. Für die zugehörige

Blattfläche stieg der systematische Fehler auf 195,8 mm² und war größer als der nicht-systematische Fehler von 107,6 mm². Die rekonstruierten Neigungswinkel planarer Blätter wurden gegen die manuell gemessenen Neigungswinkel aufgetragen. Aus den ermittelten Daten ergab sich ein *Concordance Correlation Coefficient* von 99,6 % (p-Wert = $1,5 * 10^{-29}$). Somit wurden die Neigungswinkel mit einer sehr hohen Richtigkeit bestimmt. Für ein gebogenes Blattmodell konnten der Insertionswinkel und die Blattwinkelverteilung ermittelt werden. Für den Insertionswinkel lag der *Concordance Correlation Coefficient* bei 76,9 % (p-Wert = $5,11 * 10^{-6}$). Der mittlere Neigungswinkel wies einen systematischen Fehler von 1,1 ° und einen nicht-systematischen Fehler von 3,3 ° auf. Die Blattwinkelverteilung konnte mit einem mittleren Fehler von etwa 2° bestimmt werden.

Der Stereo- Aufbau wurde auch im Feld genutzt, um die Besonderheiten von Getreidepflanzen im Bestand zu charakterisieren. Hier zeigte sich, dass die Modellierung die rekonstruierten Punktwolken i.d.R. gut nachbildet. Die besonderen Bedingungen (Verdeckungen, Reflektionen) im Feld erlauben jedoch teilweise keine vollständige Rekonstruktion der 3D-Punktwolke, sodass die Modellierung nicht vollständig ist. Torsionen werden bis zu einem gewissen Grad berücksichtigt, können aber ebenfalls dazu führen, dass einzelne Blattabschnitte kaum sichtbar und damit nicht rekonstruierbar sind.

Das entwickelte Verfahren wurde abschließend in einem Feldexperiment eingesetzt, um die Effektstärke unterschiedlicher Weizensorten und Aussaatstärken auf die Blattwinkelverteilung von Weizen zu ermitteln. Die Blattwinkelverteilungen wurden durch eine Beta-Verteilungsfunktion approximiert, ein gängiges Verfahren zur 2-parametrischen Darstellung, welche wiederum als Grundlage für die Berechnung der Effektstärke dient. Die Analyse der Blattwinkelverteilung und ermittelten Beta-Funktion ergab einen durchschnittlichen *Concordance Correlation Coefficient* von 66%. Der Definition von Cohen

zufolge beschreiben Werte $> 0,5$ eine starke Übereinstimmung zwischen den betrachteten Datensätzen. Basierend auf einer Analyse der Beta-Funktion Parameter konnte gezeigt werden, dass die unterschiedlichen Sorten einen kleinen Effekt auf die Blattwinkelverteilung haben. Die Aussaatstärken zeigten ebenfalls einen kleinen Effekt auf die Blattwinkelverteilung, wobei dieser Effekt größer ist, wenn nur die minimale und maximale Aussaatdichte betrachtet wurden. Eine Hauptkomponentenanalyse zeigt, dass weder die Sorten noch die Aussaatstärken eindeutig clustern. Insgesamt variierten die berechneten Parameter sehr stark über den unterschiedlichen Plots, sodass die Sorten- und Aussaateffekte wahrscheinlich überdeckt wurden.

V. Summary

Leaf angle distribution is an important phenotypic parameter of plants. It influences light absorption, growth, and yield of crop plants. Determining leaf angle distribution is laborious and time-consuming under field conditions. We established a stereo camera-based approach to determine leaf angle distribution of wheat plants. The stereo images were processed by various methods of image processing. Afterwards a leaf model was fitted into the obtained point clouds. This virtual leaf model was used to determine leaf angle distributions.

An essential aspect of this work was the evaluation of the implemented software solution. We used two different evaluation objects (sphere, plant model) to determine accuracy and precision of reconstructed 3 D point clouds and leaf parameter. The plant model was designed for the evaluation experiments and depicts special cereal crop leaf properties (leaf bending, bended surfaces). Our evaluation experiments showed high accuracy for reconstructed inclination angles up to 75°. However, for inclination angles > 75°, the number of reconstructed points decreased sharply and dropped to 0 for 90°. The leaf model composed of three different functions, describing leaf axis, leaf edges and surface twisting. Based on these functions we were able to calculate various leaf parameter, such as leaf width, leaf axis length, leaf area, insertion angle, mean inclination angle and leaf angle distribution.

Leaf width was reconstructed with a systematic error of 0.33 mm and a non-systematic error of 1.66 mm. For the leaf axis length, we found a systematic error of 2.22 mm and a non-systematic error 7.4 mm. The systematic error increased for the reconstructed leaf area to 195.8 mm², while the non-systematic error was 107.6 mm² only. The reconstructed inclination angles of planar artificial leaves were plotted against the manually measured inclination angles. The data analyses showed a concordance correlation coefficient of 99.6% (p-value = $1.5 * 10^{-29}$). Thus, the inclination angles were determined with a very high accuracy. For

the insertion angles of bended leaves, a concordance correlation coefficient of 76.9 % (p-value = $5.11 * 10^{-6}$) was calculated. The mean inclination angle had a systematic error of 1.1° and a non-systematic error of 3.3°. Leaf angle distributions of artificial leaves were reconstructed with a mean error of 2°.

We applied our setup under field conditions and characterized special characteristics of cereal plants in the stand. The reconstructed point cloud was represented accurate by the leaf model, normally. Effects like occlusion and light reflection impact the quality of stereo images, evocating fragmentary reconstructed point clouds and leaf models. Leaf twisting is considered by the leaf model, anyhow leaf parts which are orientated parallel to the imaging axis are not reconstructed by the algorithm.

In addition, a field experiment was conducted to determine the effect strength of different wheat varieties and seeding rates on leaf angle distribution of wheat plants. For this purpose, we calculated leaf angle distributions from field recordings. Afterwards a beta distribution function was fitted into the distributions. The two parameters of the beta function were used to calculate the effect strength of different wheat varieties and sowing densities on leaf angle distribution. The analysis of the leaf angle distribution and the determined beta function resulted in an average concordance correlation coefficient of 66%. According to Cohen's definition, values > 0.5 describe a strong correlation between the data. Based on an analysis of the beta function parameters it was shown that different varieties and seeding densities showed a small effect on leaf angle distribution. A principal component analysis showed, that neither the wheat variety nor the sowing density clustered. The data showed a strong variance among the different plots, thereby, the results were not statistically significant.

1. Einleitung

Bevor die Ziele dieser Arbeit genauer formuliert werden, soll zunächst eine Übersicht zur Morphologie und weltweiten Bedeutung von Getreidepflanzen in den Agrarwissenschaften gegeben werden (Kapitel 1.1). Weiterhin werden besondere phänotypische Merkmale betrachtet und genauer erläutert, welchen Einfluss sie auf den Ertrag der Pflanzen haben (Kapitel 1.2). Die Bestimmung dieser phänotypischen Merkmale ist ein wesentlicher Bestandteil der aktuellen Forschung und wird mit unterschiedlichsten Ansätzen vorgenommen (Kapitel 1.3). Auch virtuelle Ansätze gewinnen an Bedeutung und werden in den letzten Jahren immer populärer. Ziel dieser Arbeit ist die Verwendung eines virtuellen Blattmodells zur Bestimmung der Blattwinkelverteilung von Getreidepflanzen im Feld (Kapitel 0)

1.1. Getreidepflanzen

Getreidepflanzen gehören zu der Pflanzenfamilie der Süßgräser und bestehen aus langen Halmen mit dünnen und flexiblen Blättern. Die Pflanzen bilden im Allgemeinen mehrere Triebe am Stängelgrund aus: Sie bestocken. Die Halme sind nicht verzweigt und werden durch sogenannte Nodien (Knoten) gegliedert, die Zwischensegmente werden als Internodien bezeichnet. Die Blätter setzen mit der Blattscheide an den Nodien an und umschließen das Internodium fast vollständig. Am oberen Ende geht die Blattscheide in die Blattspreite über. Diese Blattspreite stellt den vom Halm abstehenden Teil des Blattes dar und kann je nach Getreidesorte unterschiedlich geformt sein [1,2]. Neben der Morphologie der Blattspreite hinsichtlich Breite, Länge und Form kann auch die Orientierung der Oberfläche variieren. Die Oberflächenorientierung wird durch Eigenschaften der Blattspreite bestimmt. Diese kann in unterschiedlichen Winkeln (Insertionswinkel) vom Halm abstehen und bedingt durch ihre hohe Flexibilität gebogen oder um die eigene Achse gedreht (Torsion) sein. In den folgenden Kapiteln wird die Blattspreite nur noch allgemein als „Blatt“ bezeichnet. Abbildung 1-1 zeigt die morphologischen Merkmale und unterschiedliche Orientierungen der Blattoberfläche am Beispiel des Sommerweizens.

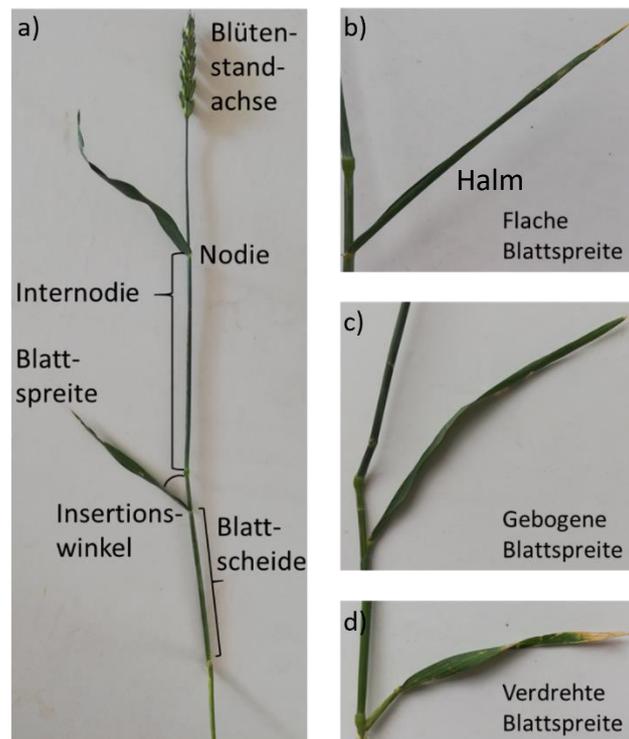


Abbildung 1-1: Morphologische Merkmale von Süßgräsern am Beispiel des Sommerweizens (*Triticum aestivum*)

a) Zeigt einen Sommerweizen mit Halm und Blütenstandachse. Blattspreite, Blattachse, Internodie und Insertionswinkel wurden exemplarisch markiert. Zusätzlich werden in der Abbildung unterschiedliche Blattspreiten-Verläufe dargestellt. In b) ist ein flache Blattspreitenverlauf dargestellt, Der Neigungswinkel der Blattoberfläche ist über die gesamte Länge nahezu konstant. Die Blattspreite in c) ist deutlich gebogen, sodass sich der Neigungswinkel kontinuierlich ändert. In d) ist eine verdrehte Blattspreite zu sehen. Diese Torsion um die Blattachse hat ebenfalls einen Effekt auf den Neigungswinkel.

Die Blüten sind an der Blütenstandachse angeordnet und bestehen aus zahlreichen Teilblütenständen (Ähren, Rispen, Trauben). Die im Zuge der Reifung aus den Blüten entstehenden Früchte (z. B. von Weizen, Roggen, Gerste, Hafer, Reis und Mais) gehören zu den Grundnahrungsmitteln der menschlichen oder tierischen Ernährung. Sie machen knapp 50% der menschlichen Kalorienversorgung aus und ihre Bedeutung hinsichtlich der Energieerzeugung nimmt immer mehr zu [3,4]. Die Züchtung von Getreidepflanzen gehört zu den wesentlichen Forschungsschwerpunkten in den Agrarwissenschaften. Insbesondere im Hinblick auf den Klimawandel und die damit verbundenen Herausforderungen durch veränderte Niederschlagsmengen, Temperaturveränderungen und Extremwetterereignisse ist die schnelle Anpassung von Nutzpflanzen an veränderte Umweltbedingungen ein zentraler Punkt bei Züchtungszielen [5–11]. Für die Züchtung sollen

insbesondere Sorten verwendet werden, die robust gegenüber Krankheiten und Wetterbedingungen wie z.B. Trockenheit sind und hohe Erträge bringen. Zusätzlich müssen die Pflanzen schon heute so gezüchtet werden, dass sie auch in Zukunft noch widerstandsfähig sind und mit den veränderten Umweltbedingungen zurechtkommen. Die Auswahl der Zuchtsorten kann dabei über die Ertragsmenge sowie Robustheit gegen Krankheiten und Schädlingsbefall erfolgen. Zusätzlich können weitaus komplexere Informationen, welche die photosynthetische Aktivität der Pflanze beeinflussen, betrachtet werden. Hierzu zählen phänotypische Merkmale, welche die Entwicklung der Wurzel- und Sprossarchitektur beschreiben. Zu den wichtigen Sprossparametern gehören die Anzahl, Fläche und Orientierung der Blätter. Diese Parameter können zusätzlich Auskunft über Wachstum und Nährstoffversorgung geben und sind deshalb von besonderem Interesse [12,13]. Eine gute Übersicht zum Zusammenhang zwischen Pflanzenphänotypisierung, also der quantitativen Beschreibung von Pflanzenstrukturen und ihren Ausprägungen und Züchtung, bieten Panguluri et al. [14]. Ein genaues Verständnis der Zusammenhänge zwischen pflanzlicher Entwicklung und Umweltbedingungen kann genutzt werden, um Pflanzenzüchtung und Bestandsführung effektiv zu gestalten.

1.2. Bedeutung der Blattwinkelverteilung als phänotypisches Merkmal

Für die Phänotypisierung werden verschiedenste Merkmale der Pflanzenmorphologie untersucht. Die Merkmalsausprägungen können analysiert werden, um herauszufinden, ob und wie bestimmte Eigenschaften mit einer hohen Ertragsmenge assoziiert sind. Hierfür sind beispielweise Parameter wie die Blattfläche oder Blatorientierung von Interesse, weil diese nicht nur die Lichtabsorption (Aufnahme der Lichtenergie durch die Pflanze), den Lichtreflexionsgrad (Anteil des reflektierten Lichtes) und somit die photosynthetische Aktivität der Pflanzen beeinflussen [13], sondern möglicherweise auch Hinweise auf Stressfaktoren geben können. Innerhalb eines Pflanzenbestandes entsteht ein komplexes Zusammenspiel zwischen den Pflanzen und ihren Blättern, welches sich durch äußere Einflüsse, wie z. B. Trockenheit verändern kann [15–17]. In der Konsequenz können diese Veränderungen Auswirkungen auf Lichtabsorption, Lichtreflexionsgrad und die photosynthetische Aktivität der einzelnen Pflanzen haben. Aufgrund dieses Zusammenhangs ist die Blattwinkelverteilung

auch in der aktuellen Forschung ein wichtiges Thema. Durch den Klimawandel kommt es zu längeren Trockenphasen und Dürreperioden. Die Auswirkungen auf die Blattstruktur der Pflanzen und die Effekte auf den Ertrag in der Landwirtschaft sind für die zukünftige Sicherung der Lebensmittelversorgung von großer Bedeutung [18–20]. Die Lichtabsorption, bzw. wie viele Photonen ein einzelnes Blatt absorbieren kann, hängt einerseits von seiner Orientierung bezüglich des Sonnenstandes und andererseits von Effekten innerhalb des Pflanzenbestandes (z.B. Verdeckungen, Abschattungen durch andere Blätter, horizontale Position innerhalb des Kronendaches) ab [21,22]. Je mehr Licht auf die Blattoberfläche trifft, desto größer ist die Photonenausbeute und dementsprechend die photosynthetische Aktivität der Pflanzen [23]. Gleichzeitig ist entscheidend, ob sich die einzelne Pflanze in einem Pflanzenbestand befindet oder nicht. Wird eine einzelne Pflanze betrachtet, absorbieren horizontal ausgerichtete Blätter über den Tag hinweg mehr Photonen als vertikal orientierte Blätter [24]. Bei einem dichten Pflanzenbestand kann das Licht tiefer in das Kronendach eindringen, wenn die Blätter vertikaler angeordnet sind. Dementsprechend ist zwischen Lichtabsorption und Blattwinkel kein monokausaler Zusammenhang gegeben. Vielmehr handelt es sich um ein Wechselspiel zwischen der einzelnen Pflanze und den Umgebungsfaktoren durch benachbarte Pflanzen, welche die Lichtabsorption und den Lichtreflexionsgrad der Blätter beeinflussen. Um die räumliche Orientierung der Blätter geometrisch fassbar zu machen, verwendet man zwei verschiedene Winkel: Einerseits den Azimut Winkel φ , welcher die Blattausrichtung entlang der Himmelsrichtungen beschreibt und andererseits den Neigungswinkel bzw. Blattwinkel θ , welcher zwischen Blatt und einer horizontalen Ebene, i.d.R. dem Boden, liegt (Abbildung 1-2). Der Blattwinkel ist dabei für einen Wertebereich von 0° - 90° definiert, wobei ein Blatt, welches parallel zum Boden ausgerichtet ist, einen Neigungswinkel von 0° hat.

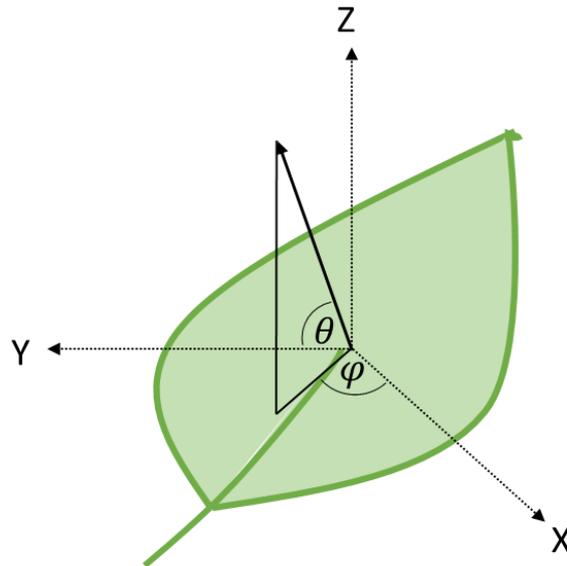


Abbildung 1-2: **Räumliche Orientierung, bzw. Ausrichtung eines Blattes**

Die Ausrichtung der Blattoberfläche kann durch den Azimut-Winkel φ und den Neigungswinkel θ beschrieben werden. Die Winkel werden mit Hilfe der Normalen auf der Blattoberfläche berechnet.

Um die Häufigkeit aller Blattwinkel zu beschreiben, wird die Blattwinkelverteilung berechnet. Diese bestimmt die Anteile der Blattflächen, die einen bestimmten Blattwinkel haben und wird in Form einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ermittelt. Zur Charakterisierung der Blattwinkelverteilung wurden unterschiedliche Modell-Funktionen entwickelt. Diese werden zum Beispiel zur Modellierung der Lichtabsorption innerhalb eines Pflanzenbestandes angewendet [25]. Die erste Art der Klassifizierung in plagiophile, extremophile, sphärische, uniforme, erectophile und planophile Verteilungen (Tabelle 1-1) wurde bereits 1965 von de Wit publiziert [26]. Diese Einteilung wird heute noch verwendet, deshalb soll sie hier kurz erläutert werden. Für jede Ausprägung gibt es eine Dichtefunktion. Diese beschreibt die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Blattwinkels ausschließlich in Abhängigkeit vom Blattwinkel. Hierbei wird eine uniforme Verteilung der Azimut Winkel vorausgesetzt.

Tabelle 1-1: Merkmale der Verteilungsfunktionen für Blattwinkel nach de Witt

De Witt definierte unterschiedliche Blattwinkelverteilungstypen. Bei den unterschiedlichen Verteilungen sind bestimmte Neigungswinkel dominant und der mittlere Neigungswinkel hat einen festen Wert.

Verteilungstyp	Häufigste Blattwinkel	Mittlerer Blattwinkel θ_m [°]
Planophil	Horizontal	26,8
Plagiophil	45° Neigungswinkel	45,0
Extremophil	Horizontal und Vertikal	45,0
Sphärisch	Vertikal	45,0
Erectophil	Vertikal	57,3
Uniform	Gleichmäßig	63,2

Die Verteilungsfunktionen nach de Witt sind in Abbildung 1-3 dargestellt.

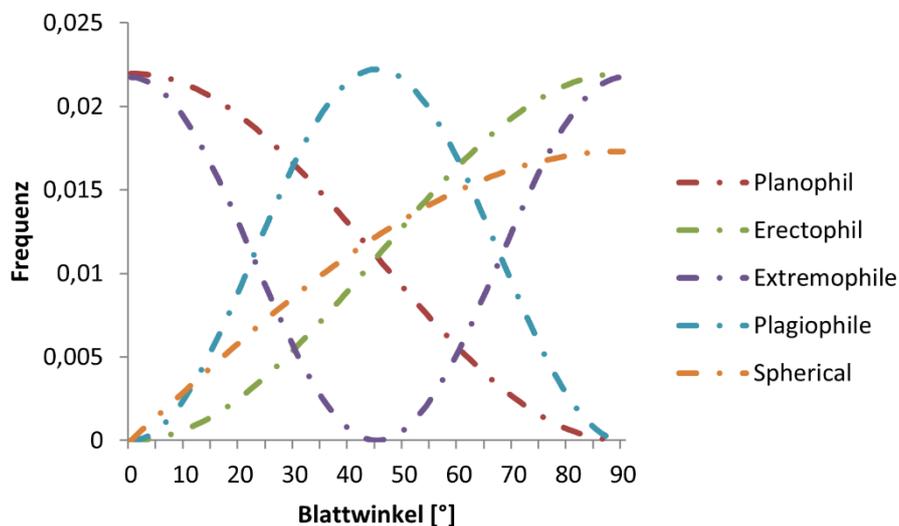


Abbildung 1-3: Blattwinkelverteilungsfunktionen nach de Witt

Die standardisierten Verteilungen zeigen die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Blattwinkels in Abhängigkeit vom Blattwinkel.

In den folgenden Jahren wurden noch weitere Verteilungsfunktionen publiziert, welche zur Beschreibung der Blattwinkel genutzt werden können. Ziel dieser Funktionen ist es, die komplexen

Verteilungen der Blattwinkel durch wenige Parameter einer Modell-Funktion zu beschreiben. Dabei soll das breitere Spektrum von Verteilungsmustern möglichst gut abgedeckt werden. Goel und Strebel veröffentlichten 1984 die zwei-parametrische Beta-Verteilung [27], welche als Modellparameter beispielsweise im PROSAIL Model verwendet wird [28]. PROSAIL ist ein Modell, welches zur Simulation der Lichtabsorption und reflektiver Eigenschaften von Kronendächern dient. Eine genauere Betrachtung der Beta-Funktion folgt in Kapitel 3.2.4..

1.3. Virtuelle Pflanzenmodelle zur Phänotypisierung von Getreide-Pflanzen im Feld

In den letzten Jahren wurden immer mehr Methoden entwickelt, um die Phänotypisierung im Feld zu erleichtern. Insbesondere durch die Vielzahl von Nutzpflanzen und die unterschiedlichen phänotypischen Merkmale müssen die Methoden mit sehr spezifischen Anforderungen zurechtkommen und gegebenenfalls für bestimmte Nutzpflanzen angepasst werden. Da Getreidepflanzen eine zentrale Rolle für die Nahrungsmittelsicherheit der Weltbevölkerung spielen [3], gibt es zahlreiche Studien zur Phänotypisierung von Getreide [12,29–33]. In einer Veröffentlichung des *International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMIYT)* [34] werden diverse Methoden zur Phänotypisierung von Weizenpflanzen vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf manuellen Methoden, welche insbesondere unter Feldbedingungen mit einem enormen Aufwand verbunden sind. Um den Anforderungen der Phänotypisierung unter Feldbedingungen gerecht zu werden, beschäftigt sich die aktuelle Forschung intensiv mit der Frage, welche Methoden sich für die Anwendung im Feld eignen. Neben Biologen und Agrarwissenschaftlern sind auch Ingenieure, Mathematiker und Informatiker in die Entwicklung neuer Verfahren involviert. Die Phänotypisierung an der Pflanze ist zeitaufwendig und personalintensiv. Sie ist außerdem teilweise schwierig durchzuführen, weil die Pflanze bei der Bestimmung einiger Merkmale zerstört wird [34]. Aus diesem Grund werden vermehrt virtuelle Modelle auf der Grundlage realer Daten verwendet, um die pflanzlichen Zielgrößen zu ermitteln. Die Forschung hat dabei zahlreiche digitale Methoden zur Rekonstruktion unterschiedlicher Pflanzen hervorgebracht. Für die Erstellung besonders realistischer Modelle werden 3D-Rekonstruktionen der Pflanze oder des Blätterdachs auf der Basis von 3D-Punktwolken virtuell erstellt. Basierend auf dieser

Punktwolke erfolgt die Berechnung phänotypischer Größen wie Pflanzenhöhe und Blattfläche sowie komplexerer Merkmale durch die Anwendung unterschiedlichster Algorithmen, welche auf Verfahren der Bildverarbeitung und des maschinellen Lernens basieren. In einigen Studien wird auch die Blattwinkelverteilung auf Basis dieser Daten berechnet [32,33,35–37]. Die Punktwolke kann mittels unterschiedlicher Sensoren erzeugt werden. Paturkar et al. [38] und Paulus [30] geben einen detaillierten Überblick zu den Funktionsweisen sowie Vor- und Nachteilen unterschiedlicher Messmethoden. Die Sensoren sind aufgrund ihrer Funktionsweise auf besondere Umgebungsvoraussetzungen angewiesen. So lässt sich die Messung unter kontrollierten Bedingungen (Labor, Gewächshaus) im Allgemeinen einfacher umsetzen als im Feld. Insbesondere die Lichtverhältnisse und die Aufnahmezeit stellen kritische Faktoren dar, welche die Qualität der Messergebnisse maßgeblich beeinflussen. Mit Blick auf diese Arbeit werden im Folgenden nur Studien betrachtet, bei denen Sensoren unter Feldbedingungen angewendet wurden. Hierfür werden zwei wesentliche Aspekte betrachtet:

1) Welche Nutzpflanzen wurden untersucht?

Nutzpflanzen unterscheiden sich sehr deutlich in ihrer Blattmorphologie. Während einige Blätter sehr stabil sind und sich unter Feldbedingungen kaum bewegen, sind andere flexibel und biegsam. Zudem spielen verschiedene Strukturmerkmale der Blätter bei der 3D-Rekonstruktion je nach Verfahren eine entscheidende Rolle. Für bestimmte Verfahren ist z.B. eine ausgeprägte Oberflächenstruktur, wie gut sichtbare Blattkanten und prägnante Muster durch Farbunterschiede oder Blattadern auf den Blättern, entscheidend, um die 3D-Rekonstruktion zu ermöglichen bzw. zu vereinfachen. Getreidepflanzen haben besonders dünne und auch lange Blätter. Diese sind sehr flexibel und werden unter Feldbedingungen schnell bewegt.

2) Wie wurden die Resultate evaluiert?

Bei der Rekonstruktion von Blattparametern ist die Evaluierung der Methodik ein wesentlicher Bestandteil. In dieser Arbeit soll der Fokus auf der Bestimmung der Blattwinkelverteilung liegen, was die Berechnung der Blattfläche und Blattwinkel voraussetzt. Eine etablierte Methode zur Evaluation von Blattwinkelmessungen sind manuelle Referenzmessungen mit einem Inklinometer [34]. Diese Messungen ergeben allerdings häufig nur mittlere Blattwinkel, weil der Blattwinkelverlauf eines Getreideblattes nur schwer mit einem Inklinometer zu erfassen ist. Hier kann nur der berechnete mittlere Blattwinkel mit dem manuell gemessenen mittleren Blattwinkel verglichen werden. Zusätzlich kann die Blattfläche abgeschätzt oder mittels destruktiver Methoden exakt ermittelt werden [34], jedoch wird hierbei kein Zusammenhang zwischen Blattwinkel und zugehöriger Blattfläche hergestellt. Somit ist es nur mit erheblichem Aufwand möglich Referenzmessungen zu erhalten, welche zur Beurteilung einer ermittelten Blattwinkelverteilung genutzt werden können. Als Alternative gibt es Ansätze mit künstlichen Pflanzenmodellen [35] oder fixierten Blättern [32], um Referenzmessungen zu erhalten. Hierbei können verschiedene Referenzparameter wie Fläche und Winkel vorgegeben werden. Die Rekonstruktion des Modells oder Blatts kann anschließend mit den Referenzwerten verglichen werden, um eine Aussage über die Qualität der Daten zu treffen. Im Folgenden wird auf verschiedene methodische Ansätze eingegangen, insbesondere in Hinblick auf die Möglichkeiten, Blattwinkelverteilungen zu berechnen:

Bei den photographischen Methoden können mehrere Ansätze unterschieden werden. Bei Multi-Kamera-Verfahren werden mindestens zwei Kameras mit einem festen räumlichen Bezug zueinander benötigt, um eine 3D-Rekonstruktion erstellen zu können. Müller-Linow et al. haben einen Ansatz mit zwei Kameras in einem Stereoaufbau genutzt, um detaillierte Analysen zur Blattwinkelverteilung in unterschiedlichen Nutzpflanzen unter Feldbedingungen zu erstellen [35]. Der Fokus ihrer Arbeit liegt auf der Zuckerrübe, welche sich in ihrer Blattmorphologie deutlich von Weizenpflanzen unterscheidet. Die Methode wurde mit Hilfe eines Pflanzenmodells evaluiert. Das Modell wurde aus Holz gefertigt und die Blätter durch flache, rechteckig Holzstücke dargestellt, bei denen der Neigungswinkel

angepasst werden konnte. Dandrioso et al. haben ihre Methode ebenfalls unter Feldbedingungen angewendet, um die Blattwinkelverteilung von Weizenpflanzen zu ermitteln [32]. Für die Evaluation wurde ein Weizenblatt flach fixiert und der Neigungswinkel im Verhältnis zum Kameraaufbau zwischen den Aufnahmen variiert.

Beim *Structure from Motion* Verfahren wird die Pflanze aus unterschiedlichen Perspektiven fotografiert [39]. Hierfür reicht eine Kamera aus, weil für das Verfahren keine simultan erstellten Aufnahmen nötig sind. Im Gegensatz zum Multi-Kamera-Verfahren handelt es sich bei diesem Verfahren nicht um ein fest kalibriertes System. Stattdessen kann jede Perspektive frei gewählt werden, solange die entstehende Aufnahme ausreichend Überlappung mit einer der anderen Aufnahmen hat. Die Rekonstruktion des betrachteten Objekts erfolgt aus den überlappenden Aufnahmen. Das Objekt sollte sich zwischen den Aufnahmen nicht bewegen [39]. Die Technik wurde bereits von Jay et al. im Feld eingesetzt, wobei in der entsprechenden Studie keine Getreidepflanzen, sondern Pflanzen mit steifen Blättern untersucht wurden und auch keine Rekonstruktion der Blattwinkelverteilungen vorgenommen wurde [40]. Die Empfindlichkeit gegenüber windinduzierten Bewegungen der Blätter stellt die größte Limitierung dieses Verfahrens für Anwendungen im Feld dar.

Das LiDAR-Verfahren, welches in terrestrischen Laserscannern eingesetzt wird, kann ebenfalls genutzt werden, um 3D-Punktwolken von Nutzpflanzen zu erzeugen. Hosoi et al. nutzen den Sensor in einem Weizenfeld, um die Blattwinkelverteilung für unterschiedliche Wachstumsstadien zu bestimmen [33]. Der Ansatz wurde im Gewächshaus evaluiert. Hierfür wurden manuelle Messungen abschnittsweise an Blättern von Weizenpflanzen durchgeführt und die gemessenen Winkel mit den Rekonstruktionen der entsprechenden Blattsegmente verglichen. Bei terrestrischen Laserscannern stellt die lange Messdauer ein wesentliches Problem bei der Anwendung im Feld dar. Durch Bewegungen der Pflanzen kann es zu verrauschten Punktwolken kommen. Zusätzlich kann der Laserdurchmesser, welcher bei diesen Sensoren relativ groß ist, bei den dünnen Blättern von Getreidepflanzen von Nachteil sein. Die feinen Strukturen werden durch den Laserscanner nicht abgebildet.

Abschließend soll noch kurz auf das Lichtschnitt-Verfahren hingewiesen werden. Dieser Sensor arbeitet mit dem Verfahren des strukturierten Lichts. Während in geschlossenen Systemen i.d.R. projizierte Lichtmuster genutzt werden, wird in der Feldanwendung eine Kombination aus projizierter Laserlinie und Kamera verwendet, wie z.B. in dem kommerziellen System PlantEye der Firma Phenospex. Dieser Sensor dient der Phänotypisierung von Pflanzen und berechnet automatisch morphologische Parameter wie Pflanzengröße, Blattfläche und Blattwinkel. Laut Hersteller ist der Sensor für die Anwendung unter Feldbedingungen und auch für die Phänotypisierung von Getreidepflanzen geeignet [41]. Maphosa et al. haben den Sensor bereits für die Phänotypisierung von Weizenpflanzen angewendet [42]. Die Pflanzen wurden jedoch nicht im Feld angezogen und auch die Aufnahmen erfolgten unter kontrollierten Bedingungen. Zudem wurde in dieser Studie keine Analyse der Blattwinkel vorgenommen. Wir konnten keine publizierten Daten zur Berechnung der Blattwinkelverteilung in Weizen mittels PlantEye oder anderer Lichtschnittsensoren finden. Insgesamt stehen für die Phänotypisierung von Getreidepflanzen im Feld nur wenige evaluierte Methoden zur Verfügung. Tabelle 1-2 gibt eine Zusammenfassung zu den genannten Studien.

Tabelle 1-2: Übersicht zur Rekonstruktion virtueller Pflanzenmodelle mit unterschiedlichen Sensoren

Sensor	Autor, Referenz	Pflanze	Evaluierung für Blattwinkelverteilung
Stereo-Kameras	Müller-Linow et al. [35]	Zuckerrübe	Pflanzenmodell
Stereo-Kameras	Dandrifosse et al. [32]	Weizen	Fixiertes Weizenblatt
Structure from Motion	Jay et al. [40]	Sonnenblumen, Blumenkohl, Rosenkohl, Zuckerrübe	-
<i>LiDAR</i> 3D- terrestrische Laser Scanner	Hosoi et al. [33]	Weizen	Manuelle Messung
<i>Plant Eye</i> Lichtschnitt-Verfahren	Maphosa et al. [42]	Weizen	-

1.4. Ziele der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Ansatzes zur Berechnung der Blattwinkelverteilung von Getreidepflanzen unter Feldbedingungen. Da die Blattwinkelverteilung nur dann exakt bestimmt werden kann, wenn die Blattwinkel und zugehörigen Blattflächen an jeder Position des Blattes bekannt sind, müssen diese Parameter durch das Modell möglichst genau abgebildet werden. Eine entsprechende mathematische Darstellung des Blattes kann auch genutzt werden, um zusätzliche Parameter wie Insertionswinkel, Blattbreite und Blattlänge zu berechnen. Für die Realisierung dieser Arbeit wurden unterschiedliche Problemstellungen bearbeitet. Diese beinhalten verschiedene Hardware- und Softwareprobleme sowie die Planung und Durchführung von Evaluierungsexperimenten, bevor das gesamte System in einem konkreten Feldexperiment getestet wurde. Eine detaillierte Beschreibung dieser Teilaspekte wird in den folgenden Abschnitten gegeben.

1.4.1. Hardware-Aufbau

Die Modellierung hängt maßgeblich von der Qualität der 3D-Punktwolke ab, auf der sie basiert. Gefordert ist ein System, das von einer einzelnen Person im Feld bedient werden kann. Dabei soll das Messsystem einfach anzuwenden sein und mit einem geringen Aufwand ins Feld gebracht werden können. Aufgrund der in Kapitel 1.3 beschriebenen Vor- und Nachteile unterschiedlicher Sensoren bei Feldanwendungen und der genannten Anforderungen an das Messsystem wurde für diese Arbeit ein Stereoaufbau verwendet. Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit sind Bau und Konfiguration eines geeigneten Stereokamera-Systems. Bei der Zusammenstellung der Komponenten gibt es zudem zwei wesentliche Aspekte zu beachten. Der erste Aspekt betrifft die Verwendung im Feld: Einerseits müssen die einzelnen Komponenten für die Anwendung unter Feldbedingungen geeignet sein. Dies bedeutet, dass die verwendeten Kameras staub- und spritzwassergeschützt und tolerant gegenüber einem großen Temperaturbereich sein müssen, damit sie im Feld nicht zu stark erhitzen und ausfallen. Zudem müssen die Aufnahmeparameter an die spezifischen Bedingungen im Feld angepasst werden. Hierfür ist es notwendig, eine Belichtungs-Kalibrierung durchzuführen, damit die Stereoaufnahmen unter Feldbedingungen nicht zu stark oder zu gering belichtet sind. Den zweiten wichtigen Aspekt stellt die

Messgeometrie und die Kalibrierung des Stereokamera-Systems (als Voraussetzung für die weitere 3D-Bildverarbeitung) dar. Die Anordnung der Kameras muss so abgestimmt sein, dass eine Rekonstruktion von Weizenblättern möglich ist. Hierbei ist der minimal mögliche Abstand zwischen den Kameras entscheidend. Dieser ist vom Kameragehäuse abhängig, sodass dieses möglichst klein sein sollte.

1.4.2. Software zur Datenverarbeitung

Im nächsten Schritt müssen die notwendigen Software-Module erstellt werden, welche die Verarbeitung der Bild-Daten ermöglichen. Zu den notwendigen Verarbeitungsschritten bis hin zur Rekonstruktion der 3D-Punktwolke zählen: Kalibrierung des Stereosystems, Korrespondenzanalyse und Projektion der Disparitäten-Karte (eine pixelweise Beschreibung der Objektiefe) in den 3D-Raum. Basierend auf der resultierenden 3D-Punktwolke müssen weitere Schritte implementiert werden (Segmentierung der Blätter, Glätten und Filtern der Daten), welche dazu dienen, einzelne Blätter in einer Punktwolke darzustellen. Diese 3-dimensionalen Repräsentationen der Blätter können im letzten Verarbeitungsschritt genutzt werden, um das Blattmodell zu erstellen und die phänotypisch interessanten Parameter zu ermitteln.

1.4.3. Evaluierung

Neben der Erstellung der Software-Pipeline liegt ein Schwerpunkt der Arbeit auf der Evaluierung der Methodik. Hierbei sollen alle Parameter, welche einen Einfluss auf die Berechnung und damit Qualität der Blattwinkelverteilung haben, untersucht werden. Dementsprechend werden Genauigkeit und Richtigkeit für die 3D-Rekonstruktion und die rekonstruierten Parameter Blattbreite, Blattachsenlänge, Blattfläche, Insertionswinkel, mittlerer Neigungswinkel und Blattwinkelverteilung bestimmt. Hierfür werden zwei künstliche physische Modelle eingesetzt: Ein Kugelmodell und ein künstliches Pflanzenmodell. Mit Hilfe eines Kugelmodells können alle Neigungswinkel dargestellt werden. Neben der rekonstruierten Punktwolke, kann somit auch beurteilt werden, welche Winkel zuverlässig rekonstruiert werden. Das Kugelmodell dient somit der Evaluation der rekonstruierten 3D-Punktwolke. Zusätzlich soll ein künstliches Pflanzenmodell entwickelt werden, welches verschiedene blatttypische Merkmale von Getreidepflanzen widerspiegelt. Zu diesen Merkmalen zählen

verschiedene Formparameter, wie zum Beispiel die zur Spitze hin schmal zulaufende Blattform. Zusätzlich sollen die Blätter des Modells die Flexibilität des Blattes und damit unterschiedliche Blattwinkelverteilungen repräsentieren. Hierfür sollen sowohl der Insertionswinkel als auch die Winkel entlang der Blattspreite einen realistischen Winkelbereich abdecken. Das Pflanzenmodell erlaubt es, die Modellierung blattspezifischer Parameter (Blattoberfläche, Blattlänge, Blattbreite, Insertionswinkel) und die final gewünschte Blattwinkelverteilung zu beurteilen. Für eine präzise Evaluierung soll die genaue Blattwinkelverteilung des Pflanzenmodells auf mathematischem Weg bestimmt und mit den rekonstruierten Blattwinkelverteilungen verglichen werden. Das Pflanzenmodell ermöglicht die Evaluation der berechneten Pflanzenparameter.

1.4.4. Anwendung im Feld

Abschließend soll die neu entwickelte Methodik in einem Feldexperiment angewendet werden. In diesem Experiment soll die Effektstärke unterschiedlicher Getreidesorten und Aussaatstärken auf die Blattwinkelverteilung ermittelt werden. Zu diesem Zweck werden Stereoaufnahmen unter Feldbedingungen gemacht und anschließend mit dem zuvor etablierten Verarbeitungsprozess analysiert. Die Blattwinkelverteilung soll durch eine Modellfunktion beschrieben werden. Ausgehend von den Parametern dieser Modellfunktion soll die Effektstärke nach Cohen bestimmt werden. Zu diesem Experiment wurden folgende Hypothesen formuliert [43]:

- Anhand der Parameter der Modellfunktion kann ein Effekt auf die Blattwinkelverteilung nachgewiesen werden.
- Sowohl durch die Sorten als auch durch die unterschiedlichen Aussaatstärken entsteht ein großer Effekt auf die Blattwinkelverteilung.
- Der Sorteneffekt ist größer als der Effekt durch die Aussaatstärken.

2. Technische Grundlagen und Kamera-Geometrien

Für die Rekonstruktion von 3D-Daten aus Stereobildern muss die Aufnahmegeometrie bekannt sein und eine Kalibrierung des Stereo-Systems durchgeführt werden. Hierfür werden zunächst die einzelnen Kameras unabhängig voneinander kalibriert und ihre kameraspezifischen Parameter bestimmt (Kapitel 2.1.3). Zunächst wird die Einzelkamera-Kalibrierung anhand eines einfachen Kameramodells erläutert (Kapitel 2.1.1), welches auch Verzeichnungseffekte in der Bilddarstellung (Kapitel 2.1.2) berücksichtigt. Aufbauend auf der Einzelkamera-Kalibrierung kann die Stereo-Kalibrierung durchgeführt werden, welche zusätzlich den räumlichen Bezug zwischen den Kameras berücksichtigt (Kapitel 2.2.1). Die Berechnung der einzelnen Parameter erfolgt in sogenannten Pixelkoordinaten. Um Blattflächen und andere Pflanzenmerkmale berechnen zu können, müssen Pixelkoordinaten in metrische Koordinaten umgerechnet werden. Für diesen Schritt wird die Projektionsmatrix, welche sich aus extrinsischen und intrinsischen Kameraparametern zusammensetzt, berechnet. Mit Hilfe der Projektionsmatrix werden die Stereoaufnahmen rektifiziert (Kapitel 2.2.2), wodurch die Korrespondenzanalyse, das Verfahren zur Berechnung der Tiefeninformation (Kapitel 2.2.3), ermöglicht oder vereinfacht wird.

2.1. Monokulare Kamera: Abbildungen und technische Grundlagen

2.1.1. Lochkameramodell

Um den geometrischen Zusammenhang zwischen Gegenstand und Abbildung zu beschreiben, kann das Modell der Lochkamera genutzt werden. Das Modell stellt das einfachste Kameramodell dar und zeichnet den Strahlengang im optischen System wie in Abbildung 2-1 gezeigt. Das Modell kommt ohne Linse aus, sodass es keine Verzeichnungseffekte beim Abbild auf der Projektionsfläche gibt.

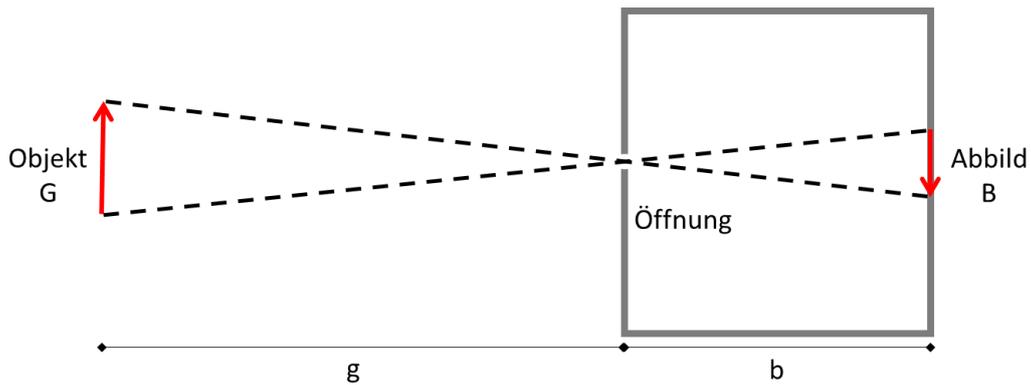


Abbildung 2-1: Funktionsweisen und Abbildungsgeometrie einer Lochkamera

Bei einer Lochkamera fällt das Licht durch eine kleine Öffnung in einen Körper. Auf der Rückseite des Körpers entsteht so ein seitenverkehrtes, auf dem Kopf stehendes Abbild (B) des Objekts (O). Der Abstand zwischen Objekt und Öffnung wird als Gegenstandsweite (g) und der Abstand zwischen Öffnung und Abbild als Bildweite (b) bezeichnet.

Die Bildgröße ergibt sich bei diesem Modell aus dem Strahlensatz der Geometrie:

$$\frac{B}{b} = \frac{G}{g} \quad [1]$$

Das Abbild wird jedoch in negativer Orientierung dargestellt. Dieser Effekt kann aufgehoben werden, wenn die Bildebene zwischen Projektionsfläche und dem Gegenstand angenommen wird (siehe Abbildung 2-2).

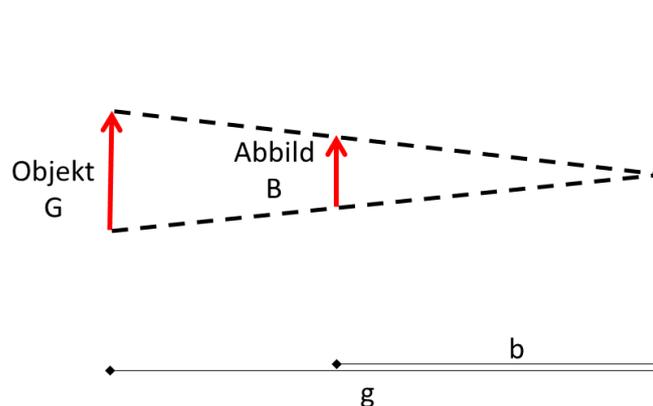


Abbildung 2-2: Bildebene zwischen Projektionsfläche und Gegenstand

Ein aufrechtes Abbild (B) kann erzeugt werden, wenn die Bildebene zwischen Projektionsfläche und dem Gegenstand liegt. Die Bildweite (b) ist in diesem Fall eine Teillänge der Gegenstandsweite (g).

Das Abbild hat nun die gleichen Eigenschaften wie der ursprüngliche Gegenstand. Im Gegensatz zu der Darstellung in Abbildung 2-1 wird das Bild aufrecht dargestellt. Die Distanz zwischen Brennpunkt und Projektionsfläche wird als Brennweite f bezeichnet, während der Brennpunkt das Kamerazentrum C kennzeichnet. Um einen Bezug zwischen Bildkoordinaten und den weltlichen Koordinaten herstellen zu können, müssen zwei Transformationen vorgenommen werden. Die perspektivische Transformation des Welt- ins Kamerakoordinatensystem erfolgt über die sogenannten extrinsischen Kameraparameter, bestehend aus Rotation R und Translation \vec{t} . Im nächsten Schritt werden die 3D-Kamerakoordinaten über die Kameramatrix A auf der Bildebene abgebildet. In Abbildung 2-3 wird die Projektion des Weltkoordinatensystems auf die Bildebene visualisiert [44].

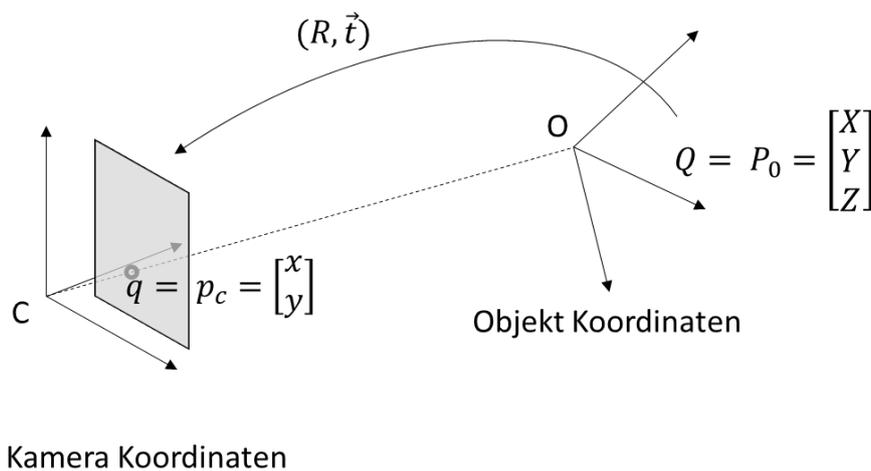


Abbildung 2-3: **Projektion der 3D-Koordinaten in die Bildebene**

Die perspektivische Transformation der Weltkoordinaten (Q) in Kamerakoordinaten (q) erfolgt über eine Rotation R und Translation \vec{t} . Die Objektkoordinaten Q sind dabei zunächst im Weltkoordinatensystem O angegeben und werden durch die Transformation in das Kamerakoordinatensystem C überführt.

Eine mathematische Beschreibung der perspektivischen Transformation, welche die Umwandlung von Weltkoordinaten in Bildkoordinaten beschreibt, wird durch die folgenden Gleichungen beschrieben:

$$p_c = [AR\vec{t}]P_0 \quad [2]$$

$$\begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} \quad [3]$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 \\ 0 & f_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{U}{W} \\ \frac{V}{W} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \end{pmatrix} \quad [4]$$

Dabei bezeichnet P_0 die Koordinaten (x, y, z) im Weltkoordinaten-System und $p_c(u, v)$ die Koordinaten des projizierten Punktes im Kamerakoordinatensystem. $[R\vec{t}]$ beschreibt die extrinsischen Kameraparameter in Form der Rotationsmatrix¹,

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad [5]$$

und des Translationsvektors

$$\vec{t} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix}. \quad [6]$$

Die Kameramatrix

$$A = \begin{bmatrix} f_u & 0 & c_u \\ 0 & f_v & c_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [7]$$

setzt sich aus den intrinsischen Kameraparametern, welche die interne Kamera-Geometrie beschreiben, zusammen. Dabei sind die intrinsischen Brennweiten f_u, f_v und der Hauptpunkt (Prinzipal Point) (c_u, c_v) in Pixeleinheiten angegeben. Der Hauptpunkt beschreibt die Lage der optischen Achse auf dem Sensor.

¹ Die Rotationsmatrix kann auch über die drei Parameter-Darstellung, bzw. die Eulerwinkel beschreiben werden. Dabei beschreiben die Winkel die Drehung um die x-Achse θ_x , die y-Achse θ_y und die z-Achse θ_z .

2.1.2. Linsen-Verzeichnung

Die Lochkamera ist ein einfaches Modell, um die Kamerageometrie zu bestimmen. Üblicherweise verfügen Kameras jedoch über eine Linse, welche Verzeichnungseffekte in radialer oder tangentialer Form auf den Abbildungen verursachen können. Während die tangentiale Verzeichnung nur in seltenen Fällen auftritt, ist die radiale Verzeichnung (Abbildung 2-4) eine häufig auftretende Form, welche in unterschiedlicher Ausprägung auftreten kann. In Abbildung 2-4 sind die kissenförmige und die tonnenförmige radiale Verzeichnung dargestellt.

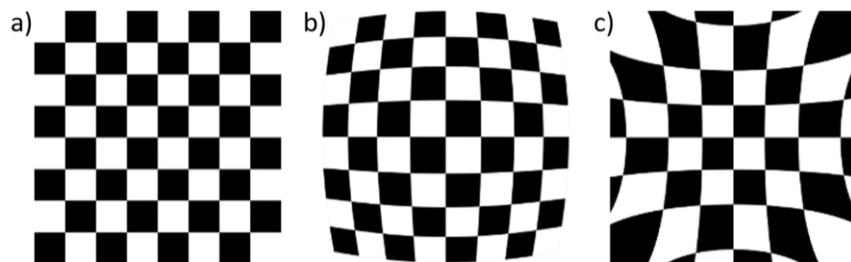


Abbildung 2-4: **Radiale Verzeichnung von Kameralinsen**

a) Abbildung eines Schachbrettmusters ohne Verzeichnung. b) Abbildung des Schachbrettmusters mit positiv-radialer Verzeichnung / Fassverzeichnung, c) Abbildung des Schachbrettmusters mit negativ-radialer Verzeichnung / Kissenverzeichnung.

Radiale Verzeichnungen werden durch die Linsenform verursacht und sind ausgehend vom Mittelpunkt der Linse radiusabhängig (Abbildung 2-5, a). Die Effekte können bereits durch ein Polynom zweiter Ordnung approximiert werden; der Einfluss der Parameter mit höherer Ordnung nimmt immer weiter ab. Hier soll folgende Näherung für die radiale Verzeichnung genutzt werden:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u' \\ v' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \\ 1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad r^2 = u^2 + v^2 \quad [8]$$

Die Verzeichnungsfunktion kann genutzt werden, um die Bildkoordinaten (u', v') zu korrigieren. Im Gegensatz zu der radialen Verzeichnung werden die tangentialen Verzeichnungen durch die Kamerabauart verursacht. Fällt der Hauptsehstrahl nicht senkrecht durch die Kameralinse, kann es zum gleichzeitigen Auftreten von tonnen- und kissenförmigen Verzeichnungen in der Abbildung kommen, weshalb die tangentiale Verzeichnung auch radial asymmetrische Verzeichnung genannt wird. Dieser

Effekt kommt dadurch zustande, dass der abgebildete Punkt nicht nur in Abhängigkeit vom Abstand zum Linsenmittelpunkt radial verschoben wird, sondern entlang der Tangente des angrenzenden Kreises (Abbildung 2-5, b).

Zur mathematischen Beschreibung der tangentialen Verzeichnung müssen die tangentialen Verzeichnungsfaktoren p_1 und p_2 bestimmt werden

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u' \\ v' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2p_1 u' v' + p_2 (r^2 + 2u'^2) \\ 2p_2 u' v' + p_1 (r^2 + 2v'^2) \end{pmatrix}. \quad [9]$$

Wobei $P' = (u', v')$ den verzeichneten abgebildeten Punkt beschreibt. Verzeichnungen in einer Abbildung werden meistens durch eine Kombination aus radialer und tangentialer Verzeichnung verursacht. Abbildung 2-5 stellt die Auswirkungen auf die Position des Punktes noch einmal bildlich dar. $P(u, v)$ beschreibt die ideale Position des Punktes, während $P'(u', v')$ die verzeichnete Position kennzeichnet.

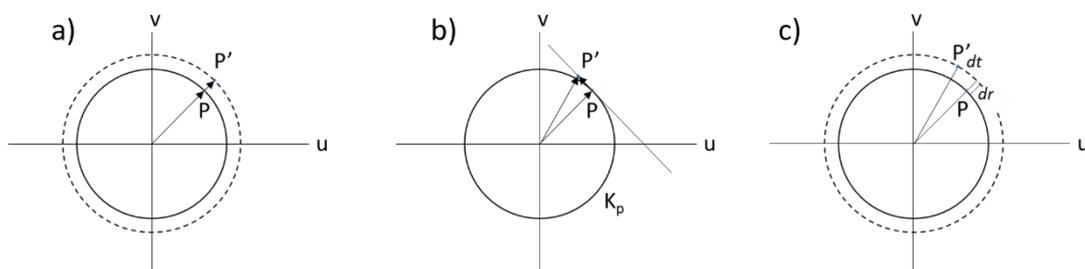


Abbildung 2-5: **Auswirkungen von Linsenverzeichnung auf die Position eines Punktes**

In allen Darstellungen ist $P(u, v)$ die tatsächliche Position des Punktes und $P'(u', v')$ die Position mit Linsenverzeichnung. a) Radiale Verzeichnung: der Punkt wird entlang des Radius vom Linsenmittelpunkt weg verschoben. b) Tangentiale Verzeichnung der Punkt wird entlang der Tangente des angrenzenden Kreises verschoben. c) Kombination aus radialer und tangentialer Verzeichnung.

2.1.3. Kamera-Kalibrierung

Der Abbildungsvorgang einer Kamera wird durch die unterschiedlichen mechanischen und optischen Bauelemente beeinflusst. Zur Beschreibung dieses Vorgangs werden folgende mathematischen Variablen benötigt:

- I. Translationsvektor \vec{t}
- II. Rotationsmatrix R
- III. Kameramatrix A
- IV. Radiale Verzeichnung k_1, k_2, k_3
- V. Tangentiale Verzeichnung p_1, p_2

Die Kamerakalibrierung dient zunächst dazu die Variablen in I. – III. zu bestimmen, um mit deren Hilfe auch die Verzeichnungen in den Abbildungen zu entfernen. Bei den klassischen Kalibrierungsmethoden wird ein Kalibrierungskörper mit bekannten Objektmaßen benötigt, um die gesuchten Parameter zu bestimmen. Andere Methoden nutzen Referenzpunkte in natürlichen Szenen zur Selbstkalibrierung [45]. Ein bekanntes Verfahren zur Kamerakalibrierung wurde im Jahr 2000 von Zhang publiziert [46]. Bei diesem Verfahren wird ein planares schwarz-weißes Kalibrierungsmuster aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen. Das Muster kann unterschiedlich aufgebaut sein: Unter anderem werden Schachbrettmuster oder regelmäßige Kreismuster genutzt (siehe Abbildung 2-6). Beim Schachbrettmuster werden die Eckpunkte der einzelnen Quadrate als Messpunkt genutzt. Starke Linsenverzeichnungseffekte können die Detektion der Eckpunkte jedoch erschweren. Bei den Kreismustern sind meistens deutlich weniger Messpunkte verfügbar, im Gegensatz zu den Eckpunkten können die Kreise jedoch leicht durch einen Segmentierungsschritt detektiert werden. Sofern die Verzeichnung des Kreises mit einbezogen wird, ist die Identifikation des Messpunktes (Kreismittelpunkts) besonders effektiv möglich.

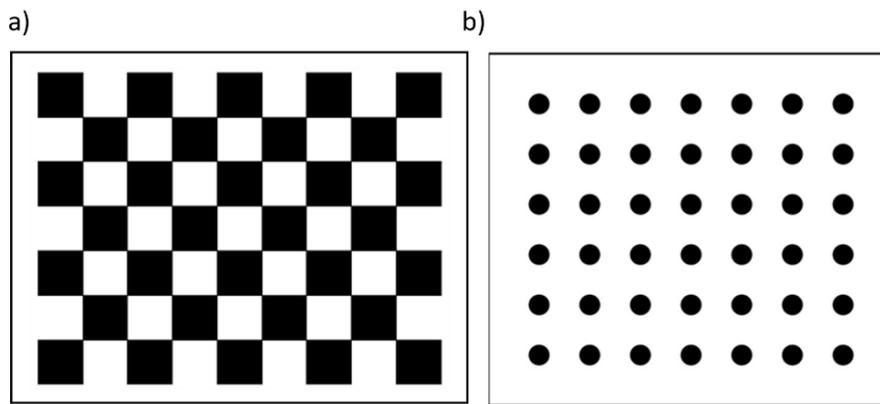


Abbildung 2-6: **Kalibrierungsmuster**

a) Schachbrettmuster. b) regelmäßiges Kreismuster

Bei den Kalibrierungsaufnahmen sollte das Muster einen möglichst großen Bildbereich abdecken. Die Linsenverzeichnungseffekte wirken sich an den Bildrändern stärker aus und können somit nur bestimmt werden, wenn das Muster auch in diesen Bereichen abgebildet wird. Insgesamt müssen für die Variablen I. – III. zehn unbekannte Parameter (drei Translationsparameter, drei Rotationswinkel sowie jeweils zwei Variablen für die intrinsischen Brennweiten und die Koordinaten des Hauptpunkts) ermittelt werden, sodass im Kalibrierungsmuster mindestens zehn Messpunkte für eine numerische Approximation der Parameter abgebildet sein müssen.

Die Kalibrierung nach Zhang verläuft in drei Schritten: 1. Abschätzung der Homographie, 2. Bestimmung der extrinsischen und intrinsischen Kamera-Parameter und 3. Modellierung der Verzeichnungs-Effekte. Die Homographie beschreibt, wie alle Elemente einer ersten Ebene den entsprechenden Elementen auf einer zweiten Ebene zugeordnet werden können [47]. Bei der Verwendung eines planaren Kalibrierungsmusters kann diese Beschreibung genutzt werden, um anschließend die extrinsischen und intrinsischen Kamera-Parameter zu bestimmen. Die im Rahmen des Lochkamera-Modells und der Linsen-Verzeichnungen erläuterten perspektivischen Transformationen können in der Homographiematrix zusammengefasst werden:

$$\begin{aligned}
 H &= ART \\
 &= \begin{bmatrix} f_u & 0 & c_u \\ 0 & f_v & c_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} f_u r_{11} + c_u r_{31} & f_u r_{12} + c_u r_{32} & f_u t_1 + c_u t_3 \\ f_v r_{21} + c_v r_{31} & f_v r_{22} + c_v r_{32} & f_v t_2 + c_v t_3 \\ r_{31} & r_{32} & t_3 \end{pmatrix}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Bei der Betrachtung zweier Ebenen kann angenommen werden, dass diese Ebenen in der $Z = 0$ Ebene liegen, sodass die Rotation in z-Richtung vernachlässigt werden kann. Basierend auf den bekannten Punkten im Kalibrierungsmuster P und den zugeordneten Punkten p' in den Kalibrierungsaufnahmen kann somit ein Gleichungssystem aufgestellt werden.

$$p' = H P \tag{11}$$

Das Gleichungssystem besteht aus $i \times j$ Gleichungen, wobei i die Anzahl der Punkte im Kalibrierungsmuster und j die Anzahl der Aufnahmen beschreibt. Um das Gleichungssystem zu lösen, wird es zunächst reduziert und in geschlossener Form gelöst. Anschließend erfolgt eine Optimierung der berechneten Homographie. Hierfür wird die Funktion

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \|p'_{ij} - p'(H, P_i)\|^2 \tag{12}$$

mittels des Levenberg-Marquardt Algorithmus minimiert. Die Projektion des Punktes P_i in Bild j wird mit $p'(H, P_i)$ gekennzeichnet. Basierend auf der Homographie können die intrinsischen und extrinsischen Parameter in zwei Schritten bestimmt werden. Im ersten Schritt wird die Kamera-Matrix M genutzt, um die intrinsischen Kamera-Parameter zu berechnen. Anschließend können mit Hilfe der intrinsischen Parameter und der Homographie die extrinsischen Parameter geschätzt werden. Die ermittelten Parameter werden optimiert, indem die folgende Fehlerfunktion minimiert wird:

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \|p'_{ij} - p'(A, R_j, \vec{t}, P_i)\|^2 \tag{13}$$

Das Verfahren nach Zhang bestimmt nur die ersten beiden Variablen der radialen Verzeichnung k_1, k_2 und vernachlässigt Einflussgrößen höherer Ordnung. Die Formeln zur Berechnung der radialen Verzeichnungsparameter ergeben sich aus Gleichung [8] und können mittels vier korrespondierender Punkte bestimmt werden. Sämtliche ermittelten Parameter werden mittels des Levenberg-Marquard Algorithmus optimiert, indem die Fehler-Funktion

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \left| |p'_{ij} - p'(A, k_1, k_2, R_j, \vec{t}, P_i)| \right|^2 \quad [14]$$

minimiert wird. Die Startwerte für den Algorithmus ergeben sich aus den vorherigen Optimierungsschritten. Für k_1 und k_2 wird der Startwert hingegen auf 0 gesetzt und im Zuge des Minimierungs-Verfahrens ein Schätzwert ermittelt.

2.2. Stereosysteme

2.2.1. Epipolargeometrie

Die Epipolargeometrie dient der Betrachtung von geometrischen Beziehungen zwischen zwei Kameras, welche mit einem festen räumlichen Bezug zueinander angeordnet sind (Abbildung 2-7). Bei diesem allgemeinen Stereosystem sind die beiden Kameras C_L und C_R horizontal gegeneinander verschoben, wobei die Basislänge B den Abstand zwischen den beiden Kamerazentren beschreibt. Zusätzlich sind die optischen Achsen der Kameras auf einen gemeinsamen Konvergenzpunkt ausgerichtet (siehe Abbildung 2-7 a)).

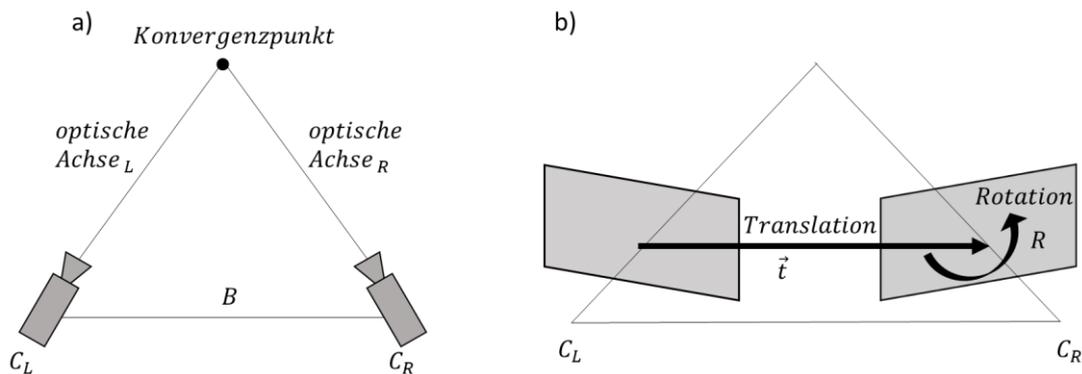


Abbildung 2-7: **Geometrische Darstellung des allgemeinen Stereosystem**

a) Konvergente Anordnung zweier Kameras (C_L und C_R) im Stereosystem. Die Kameras sind auf einen gemeinsamen Konvergenzpunkt ausgerichtet. die Baseline (B), beschreibt den Abstand zwischen den beiden Kameras. b) der Räumliche Bezug zwischen den Kameras kann durch eine Koordinatentransformation (eine Drehmatrix R und einen Verschiebungsvektor \vec{t}) beschrieben werden.

Der räumliche Bezug der Kameras C_L und C_R zueinander kann durch eine orthogonale Drehmatrix R und einen Verschiebungsvektor \vec{t} ausgedrückt werden (Abbildung 2-7 b), es folgt somit

$$M_{C_L} = R M_{C_R} + \vec{t}. \quad [15]$$

Mittels Koordinatentransformation kann das Weltkoordinatensystem für beide Kameras in das optische Zentrum der ersten Kamera M_{C_L} verlegt werden. Eine detaillierte Herleitung der einzelnen Kenngrößen beschreibt Schreer [47]. Hier sollen im Folgenden die in Abbildung 2-8 gezeigten wesentlichen Kenngrößen der Epipolarometrie kurz beschrieben werden.

- I. Basislinie B ist eine Verbindung der Kamerazentren und definiert somit den Abstand zwischen den optischen Zentren.
- II. Kamerazentrum C_L, C_R entspricht dem optischen Zentrum der Kamera.
- III. Epipole e_L, e_R markieren die Schnittpunkte von B mit den Bildebenen. Sie kennzeichnen die Projektion des jeweils anderen optischen Zentrums in die Bildebene.
- IV. 3D-Objektpunkt M
- V. Epipolarebene π ist eine Ebene, welche zwischen dem Objektpunkt M und den Brennpunkten der Kameras aufgespannt wird.

- VI. Abbildungen m_L, m_R des Objektes M in den Bildebenen.
- VII. Epipolarlinien l_L, l_R sind die Schnittgeraden der Epipolarebene mit den Bildebenen.
- VIII. Sehstrahlen S_L, S_R verlaufen vom Kamerazentrum durch die Bildebene zum Objektpunkt.
Der Schnittpunkt mit der Bildebene entspricht der Abbildung des Objektpunktes.
- IX. Bildebene I_L, I_R

Jeder Sehstrahl zu einem definierten Objektpunkt M liefert eine Projektion der zugehörigen Epipolarlinie in der Bildebene der anderen Kamera. Somit gibt es zu jedem Bildpunkt eine korrespondierende Epipolarlinie in der anderen Bildebene. Dies bedeutet: Wird der 3D-Objektpunkt entlang S_L zum Kamerazentrum C_L verschoben (M_1, M_2), verändert sich die Position der Abbildung m_L in der Bildebene nicht. Für den Sehstrahl S_R ergeben sich jedoch neue Verläufe (S_{R1}, S_{R2}), sodass sich die Position m_R entlang der Epipolarlinie e_R verschiebt (m_{R1}, m_{R2}).

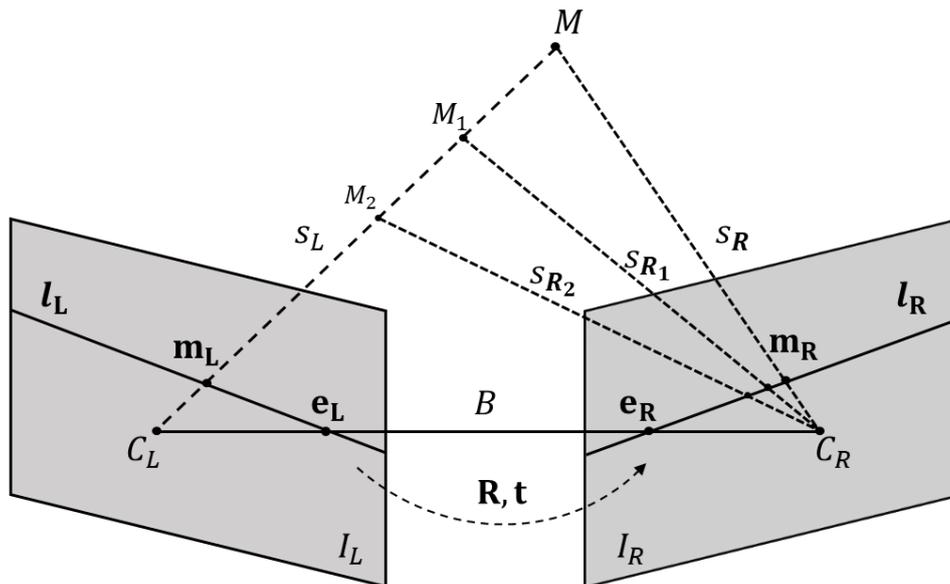


Abbildung 2-8: Allgemeine Epipolargeometrie, Kenngrößen

Die Epipolargeometrie kann durch einige Kenngrößen beschrieben werden. Basislinie B ist eine Verbindung der Kamerazentren. Die Kamerazentren C , entsprechen dem optischen Zentren der Kameras. Die Epipole e kennzeichnen die Projektion des jeweils anderen optischen Zentrums in die Bildebene. M ist ein beliebige 3D-Objektpunkt. Die Abbildungen des Objektes M in den Bildebenen sind mit m markiert. Die Epipolarlinien l sind die Schnittgeraden der Epipolarebene mit den Bildebenen und s sind die Sehstrahlen

Um die Epipolarlinien und die Epipole zu bestimmen, werden die essenzielle Matrix und die Fundamentalmatrix benötigt. Diese beschreiben die geometrische Beziehung zwischen korrespondierenden Punkten in den Aufnahmen aus einem Stereosystem. Die essenzielle Matrix beschreibt diesen Zusammenhang in Sensorkoordinaten und die Fundamentalmatrix in Pixelkoordinaten. Somit enthält die essenzielle Matrix fünf Variablen. Diese Variablen beschreiben die Rotation (drei Parameter) und die Translation (zwei Parameter) zwischen den Kameras.

$$E = \begin{pmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{pmatrix} R \quad [16]$$

Im Gegensatz dazu enthält die Fundamentalmatrix sowohl die extrinsischen Parameter (Rotation und Translation) als auch die intrinsischen Parameter der beiden Kameras. Durch die Fundamentalmatrix wird die komplette Epipolargeometrie in Bildkoordinaten beschrieben. Da für die folgenden Schritte die Angabe in Pixelkoordinaten von Bedeutung ist, wird nun die Fundamentalmatrix genauer betrachtet. Zu einem gegebenen Bildpunkt m_L lässt sich mit Hilfe der Fundamentalmatrix die zugehörige Epipolarlinie l_R bestimmen.

$$\begin{aligned} l_R &= F m_L \\ l_L &= F m_R \end{aligned} \quad [17]$$

Die Bestimmung der Fundamentalmatrix kann über korrespondierende Punkte in den Stereoaufnahmen vorgenommen werden. Hierbei können korrespondierende Punkte in beliebigen Stereoaufnahmen verwendet werden. Auch Stereoaufnahmen eines Kalibrierungsmusters (siehe Abbildung 2-6) sind geeignet. Zur Berechnung der Fundamentalmatrix stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Diese Methoden beinhalten lineare, iterativ-lineare und nichtlineare Verfahren. Je nach Anzahl korrespondierender Punkte, Positionsgenauigkeit der Punkte und Optimierungsprozess können die einzelnen Algorithmen unterschiedlich gute Ergebnisse für die Fundamentalmatrix liefern. Häufig verwendete Ansätze sind der lineare Ansatz, 8-Punkt-Algorithmus, 7-Punkt Algorithmus oder der RANSAC-Algorithmus [47]. Sofern die Kalibrierung der beiden Kameras

bekannt ist, lassen sich Fundamentalmatrix und Epipolargeometrie jedoch auch direkt aus einem Projektionszentrum und den intrinsischen und extrinsischen Parametern der Kameras bestimmen.

$$F = (A_R)^{-t} \vec{t}_x R (A_L)^{-1}$$

$$\text{mit } \vec{t}_x R = \begin{pmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad [18]$$

2.2.2. Rektifikation

Um den korrespondierenden Punkt zu m_L in der Stereoaufnahme zu finden, muss die gesamte Aufnahme durchsucht werden. Je nachdem welche Algorithmen verwendet werden, kann dieser Suchprozess sofort durchgeführt werden (Globale-Suchalgorithmen) oder benötigt eine Vorverarbeitung der Bilder (Lokale-Such-Algorithmien). Die Vorverarbeitung dient dazu, die Suche nach korrespondierenden Punkten zu vereinfachen, und wird Rektifikation genannt. Bei der Rektifikation wird das allgemeine Stereosystem, wie es bisher betrachtet wurde, virtuell in ein achsenparalleles Stereosystem (Abbildung 2-9) umgewandelt. Hierfür werden die Aufnahmen parallel zueinander ausgerichtet, sodass sich korrespondierende Punkte in beiden Aufnahmen in der gleichen Bildzeile befinden.

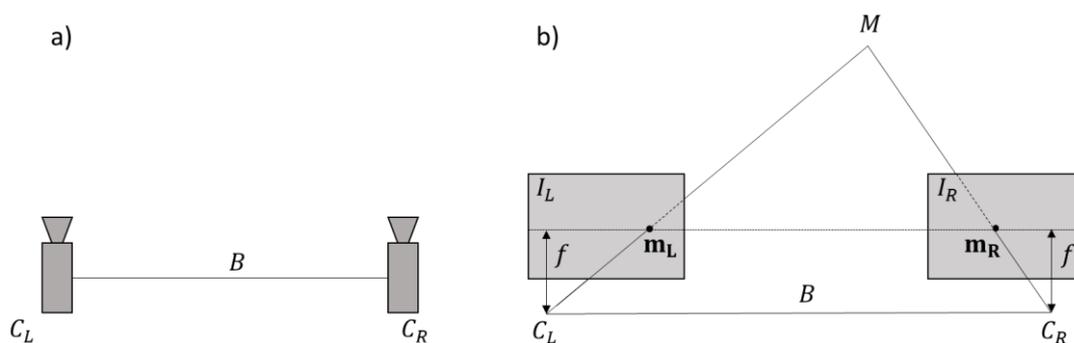


Abbildung 2-9: **Geometrische Darstellung des achsenparallelen Stereosystems.**

a) achsenparallele Anordnung zweier Kameras im Stereosystem. Abbildung b) Räumlichen Bezug zwischen den Kameras und Entstehung der Abbildungen des Objektpunktes in den Bildebenen.

Um diese Rückprojektion vornehmen zu können, wird die Epipolargeometrie verwendet. Basierend auf der Fundamentalmatrix und drei Punktkorrespondenzen kann die Homographiematrix bestimmt

werden. Die Homographie Matrix ist die Transformationsmatrix, mit der die Stereoaufnahmen rektifiziert werden können. Die Rektifikation stellt eine lineare Transformation dar, bei der die Bildpunkte des originalen Bildes in Bildpunkte des rektifizierten Bildes umgewandelt werden. Wie in Abbildung 2-10 zu sehen ist, verlaufen die Epipolarlinien der rektifizierten Aufnahmen (l_{Lr}, l_{Rr}) parallel zueinander. Die originalen Bildpunkte (m_{Lo}, m_{Ro}) werden auf den Schnittpunkt des optischen Strahls mit der rektifizierten Bildebene transformiert (m_{Lr}, m_{Rr}), während die Kamerazentren C_L, C_R in ihrer Position nicht verändert werden.

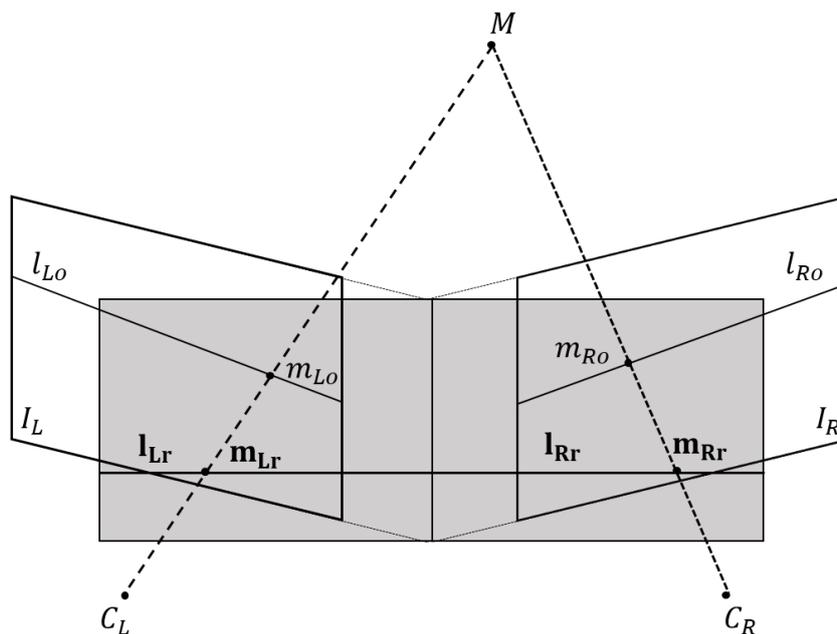


Abbildung 2-10: **Rektifizierte Ansicht des allgemeinen Stereosystems**

Bei einem allgemeinem Stereosystem sind die Kameras nicht parallel zueinander ausgerichtet. Durch die Rektifizierung werden zwei parallel zueinander ausgerichtete Aufnahmen berechnet.

2.2.3. Korrespondenzanalyse

Die Korrespondenzanalyse ist ein wesentlicher Bestandteil der Stereoanalyse und beinhaltet die Suche nach korrespondierenden Punkten (x_L, x_R) in den beiden Stereoaufnahmen. Die laterale Verschiebung (horizontale Distanz, d) der korrespondierenden Punkte bezeichnet die Disparität, welche für die Gewinnung von Tiefeninformationen aus Stereobildern benötigt wird.

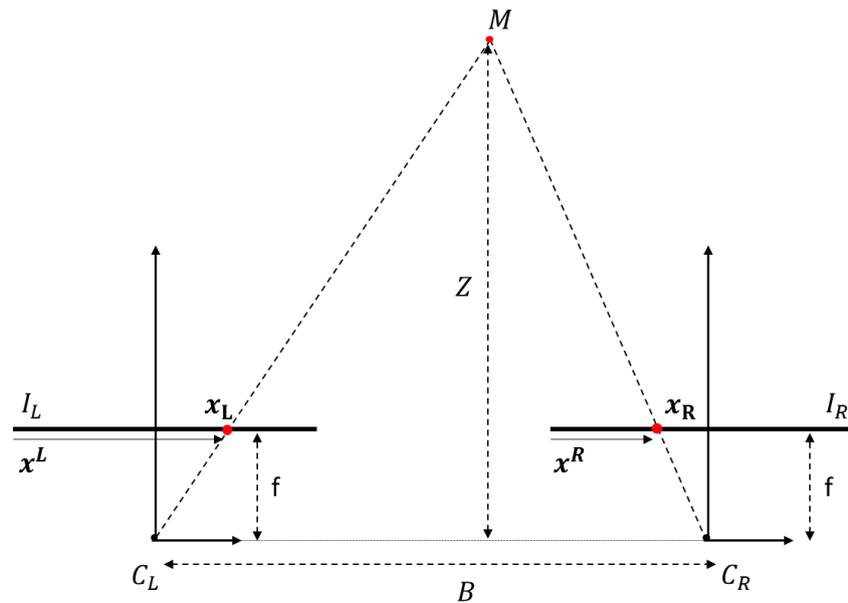


Abbildung 2-11: Bestimmung der Disparitäten mittels geometrischer Zusammenhänge und Kameraparameter

Der Abstand zwischen Kamera und Objekt kann durch die mathematischen Beziehungen (Strahlensatz) bestimmt werden. x_L und x_R beschreiben die x-Koordinaten des Punktes M im linken Bild, bzw. den korrespondierenden Bildpunkt im rechten Bild.

Aus Abbildung 2-11 ergibt sich folgende mathematische Beziehung für die Disparitäten

$$d = x^L - x^R. \quad [19]$$

Für die Suche nach den korrespondierenden Bildpunkten und somit zur Bestimmung der Disparitäten stehen zahlreiche Algorithmen zur Verfügung. Für die meisten Such-Algorithmen ist zunächst eine Rektifikation der Bildaufnahmen notwendig (siehe Kapitel: 2.2.2). Die Korrespondenzanalyse dient theoretisch dazu, jedem Bildbereich einer Aufnahme der ersten Kamera (C_L) einen korrespondierenden Bereich in der Aufnahme der zweiten Kamera (C_R) zuzuordnen, sodass eine sogenannte Disparitäten-Karte entsteht. Hierbei kann es jedoch zu unterschiedlichen Problemen kommen, sodass diese Karte niemals vollständig erstellt werden kann. i) Die beiden Kameras des Stereosystems haben unterschiedliche Perspektiven auf die betrachtete Szene. Somit sind in den Aufnahmen nicht exakt dieselben Bereiche dargestellt. Stattdessen kann es sein, dass einige Bereiche in der einen Aufnahme zu erkennen sind, die in der anderen Aufnahme nicht abgebildet werden. ii) Hinzu kommt die Tatsache, dass durch die Tiefenstruktur in einer Szene einzelne Bereiche verdeckt,

sein können und somit auch nicht in beiden Aufnahmen sichtbar sind. iii) Ein weiteres Problem können sich wiederholende Muster oder schwach texturierte Bereiche darstellen. Diese können bei der Korrespondenzanalyse nicht eindeutig zugeordnet werden. Auch in diesem Fall können keine Disparitätswerte bestimmt werden. Die Such-Algorithmen lassen sich in unterschiedliche Klassen unterteilen: lokale und globale. Lokale Suchalgorithmen ordnen einzelne Pixel aus den beiden Aufnahmen anhand der Intensitätswerte einander zu. Bei diesen Verfahren werden benachbarte Pixel in die Zuordnung miteinbezogen. Ein bekannter lokaler Suchalgorithmus ist der Block Matching Algorithmus [48]. Bei diesem Verfahren werden die Intensitätswerte der einzelnen Bilder zunächst normalisiert und anschließend verglichen. Hierbei werden die Intensitäten zweier gleich großer Pixelblöcke aus den Stereoaufnahmen betrachtet. Ein Pixelblock (m_{Lr}) der ersten Kameraaufnahme wird hinsichtlich seiner Ähnlichkeit zu allen Pixelblöcken der zugehörigen Zeile I_{Rr} in der zweiten Aufnahme untersucht. Die Ähnlichkeit zwischen zwei Pixelblöcken kann mittels unterschiedlicher Fehlermaße (z.B. mittleren quadratischen Fehler (MSE Korrelation, absoluter Fehler, Zensus) quantifiziert werden. Der kleinste Fehler kennzeichnet die korrespondierenden Bildbereiche (x_L, x_R). Im Gegensatz dazu verwenden die globalen Methoden die gesamten Bildinformationen, um korrespondierende Bereiche zu finden. Der in dieser Arbeit verwendete Algorithmus nutzt Aspekte beider Verfahren.

Semi-Global Block Matching (SGBM)

Dieser populäre Such-Algorithmus beruht auf dem *Semi-Global Block Matching* (SGBM) Verfahren nach Hirschmüller [49,50], welches sich der dynamischen Programmierung bedient und auch für nicht-rektifizierte Stereoaufnahmen genutzt werden kann. Allerdings zeigten sich in dieser Arbeit deutlich bessere Ergebnisse, wenn eine Vorverarbeitung der Bilder stattgefunden hat. Das Verfahren kann in vier Stufen unterteilt werden: i) Kostenermittlung, ii) Kostenaggregation, iii) Disparitätsermittlung und iv) Disparitätsverfeinerung.

- i) Die Kostenermittlung beschreibt die blockweise Berechnung der Matchingkosten C_{BT} . Ein Pixelblock p wird von der linken Blockgrenze $minX$ bis zur rechten Blockgrenze $maxX$ definiert. Die Matching-Kosten werden für alle Disparitäten innerhalb eines bestimmten Disparitätenbereichs von $minD$ bis $maxD$ ermittelt. Der Pixel im Block wird mit p repräsentiert und die aktuelle Disparität d , sodass sich folgende Formel für die Matchingkostenfunktion ergibt:

$$C_{BT} = (x - minX) \max(D) - minD + (d - minD) \quad [20]$$

- ii) Für die Kostenaggregation wird eine Funktion verwendet, welche als globale Energiefunktion $E(D)$ bezeichnet wird. Sie dient dazu, auch einen Bezug zwischen benachbarten Pixeln herzustellen. Die Energiefunktion setzt sich aus drei Teiltermen zusammen.

$$E(D) = \sum_p (C_{BT}(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1]) \quad [21]$$

$$\text{mit } P_1 \leq P_2$$

Zunächst wird $\sum_p (C_{BT}(p, D_p))$, die Summe aller Matchingkosten für eine Disparität D , berechnet, um die Energie des Disparitätbildes zu bestimmen. $\sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1]$ beschreibt den Strafterm für kleine Änderungen in der Disparität, z.B. durch geneigte Oberflächen, wobei P_1 ein konstanter Wert ist. Der dritte Teilterm $\sum_{q \in N_p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1]$ dient dazu, Diskontinuitäten in der Disparitäten-Karte, zum Beispiel durch Objektkanten, abzufangen. Er wird auch als Strafterm für starke Änderungen in der Disparität beschrieben und enthält den variablen Parameter P_2 . Die 2D-Energieminimierung stellt ein NP-vollständiges Problem dar, sodass die Lösung durch die Unterteilung in mehrere, weniger komplexe Teilprobleme angenähert wird. Die untersuchten Pixelblöcke werden in mehrere Pfade aufgeteilt. Die Berechnung einzelner Pfadkosten entspricht nun

einer Scanline-Optimierung [51]. Das Besondere am SGBM ist, dass die Scanline-Optimierung aus unterschiedlichen Richtungen vorgenommen wird. Die einzelnen Pfad-Kosten $L_r(p, d)$ werden in horizontaler, vertikaler und diagonaler Richtung (r) aufsummiert, um die Gesamtkosten für den Disparitätswert eines Pixels zu bestimmen (Abbildung 2-12).

$$\begin{aligned}
 L_r(p, d) &= C_{BT}(p, d) + \min (L_r(p - r, d), \\
 &\quad L_r(p - r, d - 1) + P_1, \\
 &\quad L_r(p - r, d + 1) + P_1, \\
 &\quad \min_i L_r(p - r, i) + P_2) - \min_k L_r(p - r, k)
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Die Pfadkosten $L_r(p, d)$ sind sowohl von dem Pixel p als auch vom zugehörigen Disparitätswert d abhängig. Ein Pfad beschreibt dabei die Kosten für einen definierten Pixel p mit einer gegebenen Disparität d . Der Pfad mit den geringsten Kosten wird genutzt, um den Disparitätswert eines Pixels zu bestimmen. Die Matching-Kosten des einzelnen Pfades $L_r(p, d)$ in Richtung r für den Pixel p bei einer Disparität d werden rekursiv berechnet, wobei die Kosten stetig steigen. Damit die berechneten Werte nicht zu groß werden, können die minimalen Pfad-Kosten zum vorherigen Pixel abgezogen werden. Basierend auf den Berechnungen kann ein Pfad bestimmt werden, welcher die optimalen Disparitäten in Abhängigkeit von der Pixelposition beschreibt (Abbildung 2-12). Das Resultat des Optimierungsvorgangs ist ein Pfad durch den Disparitäten-Raum, welcher als gerade Linie auf das Referenz-Bild projiziert werden kann.

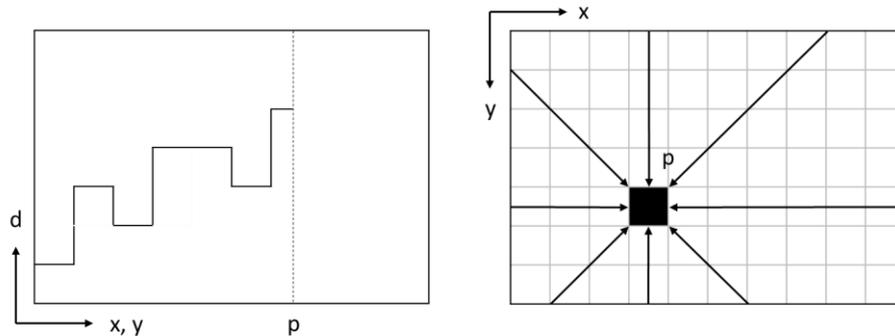


Abbildung 2-12: **Aufsummierung der Matchingkosten im Disparitäten-Raum**

a) Optimaler Kostenpfad $L_r(p, d)$. Der Pfad beschreibt die Disparität p in Abhängigkeit von der Pixelposition (x, y) . b) Für jeden Pixel können 8 unterschiedliche Pfade aus den unterschiedlichen Richtungen r kommen.

- iii) Die Disparitätenermittlung erfolgt mittels der Disparitäten, welche sich aus den minimierten Pfadkosten ergeben. Unter der Voraussetzung, dass beide Kameras die gleiche Brennweite f haben, kann mittels der Disparitäten (d) der Abstand (Z) zwischen *Objektpunkt* (M) und *Kamerazentrum* (C_L) bestimmt (Abbildung 2-11) und somit eine 3D-Punktwolke aus der Disparitäten-Karte berechnet werden. Hierfür wird der Strahlensatz auf die Epipolargeometrie angewendet. B beschreibt wie bereits in den vorigen Kapiteln die Basislänge, also den Abstand zwischen den beiden Kamerazentren C_L, C_R . Die Umformung nach Z und das Einsetzen der mathematischen Beziehung für d ergibt den invers proportionalen Zusammenhang zwischen Disparitäten und dem Abstand eines Bildpunktes zur Kamera. Somit gilt: Je größer die Disparität eines Bildpunktes, desto kleiner ist dessen Abstand zur Kamera.

$$\frac{B - (x_L - x_R)}{Z - f} = \frac{B}{Z} \rightarrow Z = \frac{fB}{d} \quad [23]$$

- iv) Abschließend wird die Disparitätenverfeinerung vorgenommen. Hierbei werden Disparitätswerte, welche nicht plausibel sind, aus der Karte gelöscht. Der Konsistenz-Check dient dazu, Bereiche zu erkennen, in denen aufgrund von

Verdeckungen keine Disparitäten bestimmt werden können [52]. Zusätzlich werden Ausreißer mittels eines Medianfilters korrigiert [53].

In dieser Arbeit wurde die in OpenCV verfügbare Implementierung des SGBM-Algorithmus verwendet, welche die Berechnung der Matching-Kosten basierend auf dem Subpixel-Algorithmus von Birchfield und Tomasi [54] vornimmt.

Das Resultat der Korrespondenzanalyse ist die Disparitäten-Karte, welche jedem Pixel des Referenzbildes, für den ein korrespondierender Pixel in der zugehörigen Stereoaufnahme gefunden wurde, einen Disparitäten-Wert zuordnet. Ausgehend von den Disparitäten und den Kameramatrizes A_0, A_1 kann eine Matrix für die Projektion der Pixelkoordinaten $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}$ in das Weltkoordinatensystem berechnet werden. Für die Berechnung wird das Lochkameramodell zugrunde gelegt.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A_0 * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad [24]$$

$$\begin{bmatrix} u - d \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A_1 * \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Die beiden Formeln können in einem Ausdruck zusammengeführt werden und mittels Äquivalenzumformung kann die Konvertierungsmatrix Q berechnet werden:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_v * t_u & 0 & 0 & -f_v * c_u * t_u \\ 0 & f_u * t_u & 0 & -f_u * c_v * t_u \\ 0 & 0 & 0 & f_u * f_v * t_u \\ 0 & 0 & -t_v & f_v(c_{u0} - c_{u1}) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u \\ v \\ d \\ 1 \end{bmatrix} \quad [25]$$

$$Q = \begin{bmatrix} f_v * t_u & 0 & 0 & -f_v * c_u * t_u \\ 0 & f_u * t_u & 0 & -f_u * c_v * t_u \\ 0 & 0 & 0 & f_u * f_v * t_u \\ 0 & 0 & -t_v & f_v(c_{u0} - c_{u1}) \end{bmatrix}$$

Die Konvertierungsmatrix ist notwendig, um aus den Stereoaufnahmen eine 3D-Punktwolke zu berechnen.

3. Implementierung der Hard- und Softwarekomponenten

Zur Bestimmung von Blattparametern aus Stereoaufnahmen wurden ein Hardware-Setup (siehe: Kapitel 1.4.1) und Algorithmen zur Verarbeitung der Stereoaufnahmen (siehe: Kapitel 1.4.2) entwickelt. Im Folgenden soll zunächst kurz auf den Hardware-Setup (Kapitel 3.1) und die notwendigen Aufnahme-Einstellungen für die Kameras eingegangen werden. Hierbei werden insbesondere die Anforderungen unter Feldbedingungen berücksichtigt. Im Anschluss wird die Softwarelösung (Kapitel 3.2), welche vollständig in Python implementiert wurde, näher erläutert. Hierbei werden die unterschiedlichen Schritte der Datenverarbeitung von der 3D-Rekonstruktion bis hin zur Berechnung einer Modellfunktion für die Blattwinkelverteilung aufgegriffen.

3.1. Installation des Hardware-Aufbaus: Stereo-System

Für den Kameraaufbau wurden zwei automatisierbare GigE Kameras AVProsilica GT3400C (Allied Vision) mit 35 mm Objektiven APO-XENOPLAN 1,8/35-1901 (Schneider Kreuznach) verwendet. Bei diesen Kameras kann die Stromversorgung sowohl über *Power over Ethernet* (PoE) als auch über einen *12 Pin Hirose* Anschluss erfolgen. Die Kameras wurden mit einem möglichst geringen Abstand (72 mm) parallel zueinander auf einem Aluminiumprofil fixiert. In unserem Anwendungsfall vereinfacht ein geringer Abstand zwischen den Kameras die Suche nach korrespondierenden Bereichen in den Stereoaufnahmen, weil der perspektivische Unterschied gering ist. Da die Blätter von Getreidepflanzen sehr dünn sind und sich zudem nur geringfügig und in der Regel nur durch ihre Orientierung voneinander unterscheiden, können bereits kleine perspektivische Unterschiede eine Zuordnung korrespondierender Punkte erschweren. Damit die Bildaufnahmen für beide Kameras zum gleichen Zeitpunkt erfolgen, wird die erste Kamera (Master) über die Allied Vision Software getriggert und das Signal über ein spezielles Trigger-Kabel an die zweite Kamera (Slave) weitergeleitet. In diesem Aufbau erfolgt die Stromversorgung über den PoE-Anschluss, weil der *12 Pin Hirose-Anschluss* für das Trigger-Kabel verwendet wird. Das Kabel für den simultanen Trigger wurde speziell für die AV Prosilica GT3400C entsprechend Abbildung 3-1 erstellt.

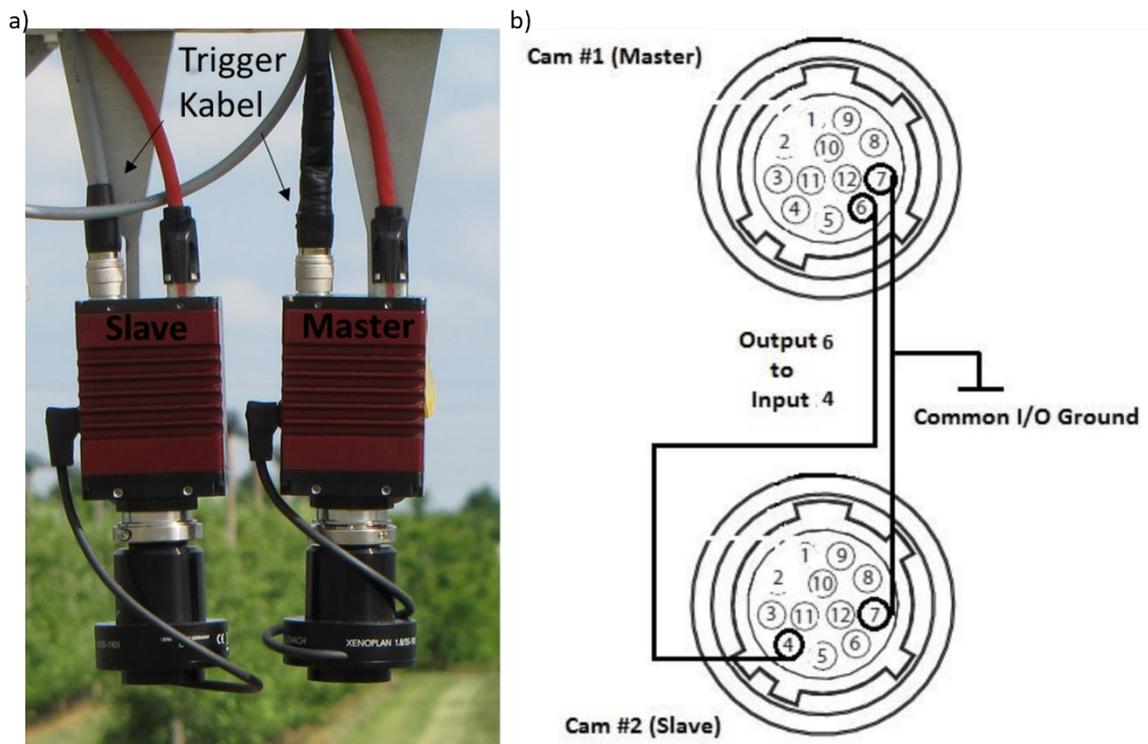


Abbildung 3-1: **Hardware-Aufbau**

a) Stereo-Aufbau mit Trigger-Kabel (grau), die Stromversorgung erfolgt über die Ethernet Verbindung (rot) Die Kameras wurden auf einem Aluminiumprofil mit einem fest definiertem Abstand fixiert. b) Schematische Zeichnung zur Pin-Belegung für das Trigger-Kabel. Der Trigger wird von der Master-Kamera über Pin6 zu der Slave Kamera auf Pin4 geleitet.

Ein wesentlicher Aspekt beim Aufbau des Stereo-Systems sind auch die Aufnahme-Einstellungen bzw. Belichtungs-Parameter. Diese bestimmen den Tiefenschärfebereich (Blendeneinstellung), die Ausleuchtung (Belichtungszeit) und die Sensorempfindlichkeit (ISO-Zahl), welche sich auf die Bildqualität bzw. das Bildrauschen auswirkt. Wie in Abbildung 3-2 exemplarisch dargestellt ist, sind diese drei Parameter voneinander abhängig. Niedrige Werte in der ISO-Zahl verringern zwar das Sensorrauschen, können bei unzureichender Ausleuchtung jedoch Verwacklungseffekte in der Aufnahme zur Folge haben. Eine hohe ISO-Zahl kann hingegen zu Helligkeits- und Farbrauschen führen. Die Kamerablende beschreibt die Linsenöffnung und definiert darüber den Tiefenschärfebereich und die Menge des einfallenden Lichts. Je größer die Tiefenschärfe in der Aufnahme sein soll, desto kleiner muss die Linsenöffnung eingestellt werden. Dies hat zur Folge, dass weniger Licht den Sensor erreicht. Da der Kamerasensor ausreichend Licht braucht, um eine verwertbare Aufnahme erstellen zu können,

wird mit zunehmendem Tiefenschärfebereich eine höhere Belichtungszeit benötigt. Gleichzeitig erhöht die längere Belichtungsdauer die Sensitivität der Aufnahmen gegenüber Bewegungen. Somit kann eine längere Belichtungsdauer zu unscharfen Bereichen in den Bildern führen, wenn sich das fotografierte Objekt bewegt. Abbildung 3-2 zeigt, wie für Aufnahmen ein Kompromiss zwischen den drei Werten angestrebt wird, sodass der benötigte Tiefenschärfebereich mit ausreichender Belichtung und möglichst wenig Rauschen dargestellt werden kann [55].

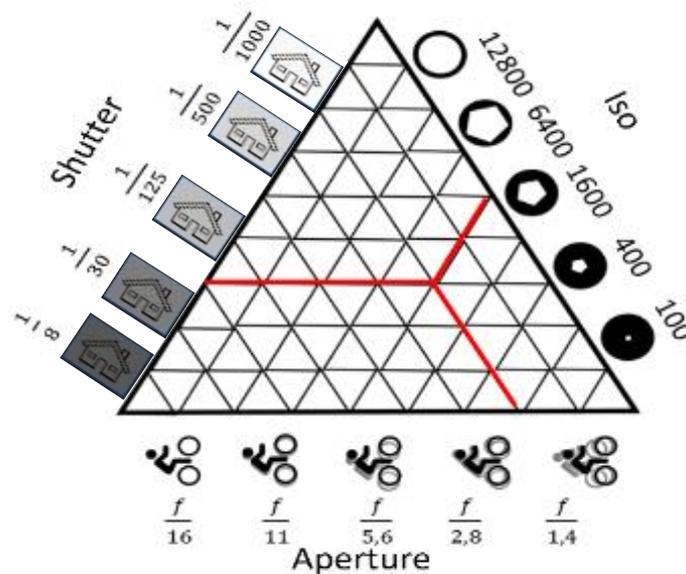


Abbildung 3-2: **Belichtungs-Dreieck**

Das Belichtungs-dreieck beschreibt den Zusammenhang zwischen Blendeinstellung (Aperture), Belichtungszeit (Shutter) und ISO-Zahl (ISO).

Ziel der Kamera-Einstellungen war es, die oberen Schichten des Kronendachs mit einer hohen Bildschärfe darzustellen. Somit wurden die Aufnahme-Einstellungen (Abbildung 3-2) ausgehend von der Blendeinstellung vorgenommen. Bildschärfebereich und Blende wurden so eingestellt, dass der obere Bereich des fotografierten Objektes im Tiefenschärfenbereich der Objektive dargestellt wird. Die Tiefenschärfe wurde nicht immer für das gesamte Objekt eingestellt. Weil bei großen Getreidepflanzen die tiefliegenden Blattschichten von den darüber liegenden Blättern verdeckt werden und somit nicht auf den Fotos sichtbar sind, sollten nur die oberen 25 cm des Kronendaches

im Bildschärfbereich liegen. Sommerweizen wird 70-100 cm, selten bis zu 150 cm groß. Der Bildschärfbereich deckt somit ca. 25-35% der Pflanze ab. Zusätzlich sind im Pflanzenbestand in Bodennähe nur wenige, häufig bereits verwelkte Blätter, welche für die Blattwinkelverteilung nicht entscheidend sind. Unter Feldbedingungen sind die Lichtintensitäten tagsüber hoch, auch wenn die Sonne durch Wolken verdeckt ist. Damit überbelichtete Bereiche in den Aufnahmen verhindert werden, wurde auch die Belichtungszeit auf einen fixen Wert gesetzt. Um diese Einstellung möglichst optimal und reproduzierbar vorzunehmen, wurde eine Graukarten-Kalibrierung etabliert. Hierfür wird eine Graukarte mehrfach hintereinander fotografiert, nachdem Bildschärfbereich und Blende der Kamera festgesetzt wurden. Die Belichtungszeit wird dabei auf kontinuierliche Anpassung gesetzt, sodass sie sich während der Aufnahmen automatisch anpasst. Es ist dabei nicht entscheidend, ob als Ausgangswert eine hohe oder niedrige Belichtungszeit genommen wird. Die Belichtungsdauer passt sich während der Aufnahmeserie an, bis die Belichtungszeit konstant und der Grauwert in der Aufnahme unverändert bleibt. Sofern sich die Lichtbedingungen der Umgebung nicht ändern, kann die Belichtungszeit festgesetzt und für die anschließenden Aufnahmen verwendet werden. Eine Anpassung der Kamera-Einstellungen während der Aufnahmen kann noch über die ISO-Zahl stattfinden. Bei starken Veränderungen der Umgebungsbedingungen wurde eine erneute Graukarten-Kalibrierung durchgeführt, um eine angemessene Belichtung der Aufnahmen zu gewährleisten.

3.2. Implementierung der Software zur Datenverarbeitung

Für die gesamte Daten-Verarbeitung wurden unterschiedliche Software-Toolboxen unter Python 2.7 [56] verwendet (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Übersicht zu verwendeten Software-Toolboxen

Software-Toolbox	Version	Referenz
Open CV	3.2.0	[57]
numpy	1.13.1	[58]
pandas	0.20.3	[59]
scipy	0.19.1	[60]
sklearn	0.19.0	[61]
xlsxwriter	0.9.8	
matplotlib	2.0.2	[62]

Ziel der Datenverarbeitung ist die Berechnung einer 3D-Rekonstruktion und ausgehend von der Blattmodellierung folgende blattspezifischen Parameter:

- i) Blattbreite
- ii) Blattsachsenlänge
- iii) Blattfläche
- iv) Insertionswinkel
- v) Mittlerer Neigungswinkel
- vi) Blattwinkelverteilung

Die Software-Pipeline zur Berechnung der blattspezifischen Parameter setzt sich aus unterschiedlichen Skripten zusammen, die nacheinander über ein Hauptskript aufgerufen werden (Abbildung 3-3). Die Parametrisierung (bezüglich Brennweite der Kameras, Suchdisparitäten des SGBM-Algorithmus, Verarbeitungsschritte) kann in einer graphischen Oberfläche oder in einem separaten Skript erfolgen. Die Rekonstruktion (Abbildung 3-3) des Oberflächenmodells erfolgt ausgehend von den rektifizierten Stereoaufnahmen über die Disparitäten-Karte und die markierten Blätter. Basierend auf dem Modell werden die Ausgabeparameter berechnet und in einer Excel-Datei zusammengefasst. Ein Skript fasst die Funktionen für die Kalibrierung und Verarbeitung der Stereoaufnahmen zusammen. Alle Funktionen, welche zur Verarbeitung der 3D-Punktwolke benötigt werden, sind in einem weiteren

Skript implementiert. Die einzelnen Funktionen können auf 3D-Punktwolken verschiedenster Sensoren angewendet werden. Über die Hilfefunktion können Informationen zu der Funktion sowie den Ein- und Ausgabeparametern angezeigt werden.

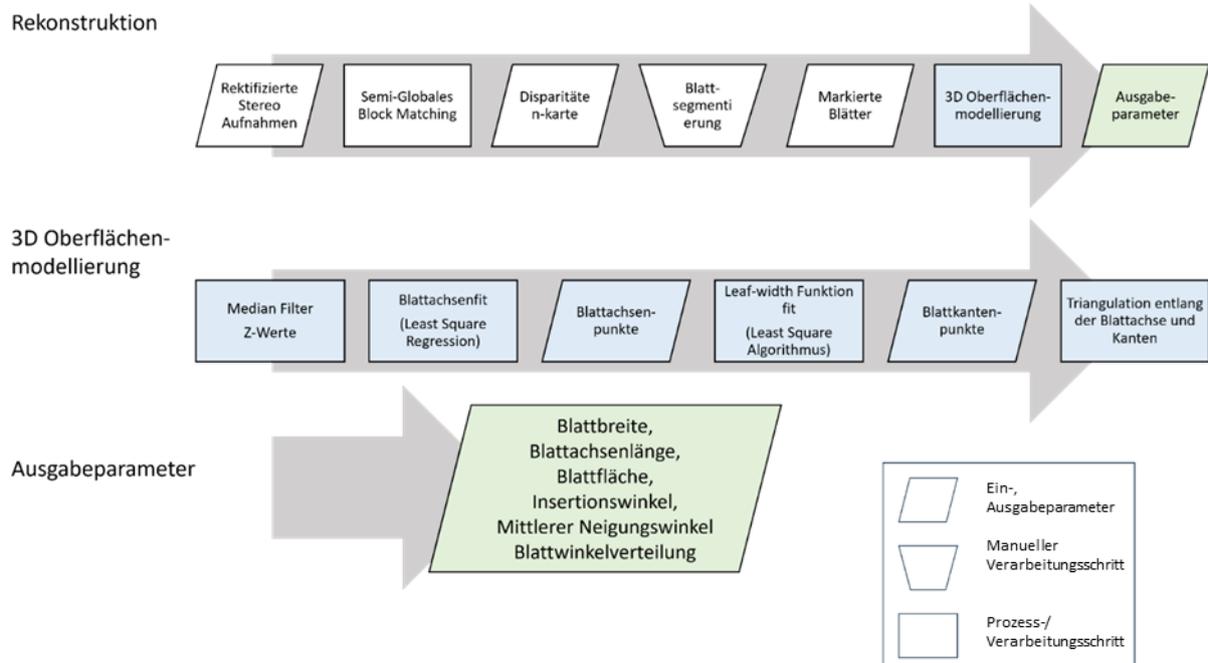


Abbildung 3-3: Flussdiagramm der kompletten Software-Pipeline

Die entwickelten Softwaremodule lassen sich in drei unterschiedliche Funktionsschwerpunkte einteilen: die Rekonstruktion der 3D-Oberfläche als Punktwolke, die Modellierung der 3D-Oberfläche durch das Blattmodell und die Bestimmung der Ausgabeparameter. Das Diagramm gliedert sich in drei Abschnitte. Die Rekonstruktion gibt die gesamten Verarbeitungsschritte wieder. Der letzte Prozessschritt in der Rekonstruktion ist die Oberflächenmodellierung, welche noch einmal detailliert dargestellt wird. Zuletzt werden die resultierenden Ausgabeparameter aufgeführt.

3.2.1. Stereo-Kalibrierung und 3D-Rekonstruktion

Da sämtliche Parameter zur Beschreibung der Bildprojektion nicht Apriori bekannt sind, wurden die einzelnen Kameras (Kapitel 2.1.3) und der Stereo-Aufbau wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben kalibriert. Auf diese Weise konnten die Kameraparameter bestimmt und eine Rektifikation der Aufnahmen durchgeführt werden. Unser Aufbau wurde mittels eines Kalibrierungsmusters mit 6 x 7 rechteckig in einem Raster angeordneten Punkten mit einem Durchmesser von 9 mm und 22 mm Abstand zwischen

den Mittelpunkten kalibriert. Das Muster wurde innerhalb des Bildschärfebereichs der Kameras bewegt und mit unterschiedlichen Neigungswinkeln fotografiert. Das Daten-Set für die Kalibrierung umfasste 15-25 Aufnahmen, auf denen das Muster vollständig dargestellt war und detektiert werden konnte. Die unterschiedlichen Kalibrierungsschritte wurden nach der Methode von Zhang [46] durchgeführt. Die Parametrisierung erfolgte mit einer Anzahl von maximal 1000 Iterationen und die Optimierung wurde bei einer Richtigkeit von $10e^{-8}$ beendet. Die Resultate der Einzelkamera-Kalibrierung wurden als Ausgangspunkt für die Optimierung bei der Stereo-Kalibrierung verwendet. Der nächste Schritt beinhaltete die 3D-Rekonstruktion der aufgenommenen Szene. Für die Suche nach korrespondierenden Bereichen (Korrespondenzanalyse) wurde der *Semi-Global-Block-Matching-Algorithmus* [50] verwendet. Die Wahl fiel auf diesen Algorithmus, da der alternativ verwendete *Block-Matching* Algorithmus bei Aufnahmen von Getreidepflanzen deutlich mehr fehlerhafte Zuordnungen vornimmt [50,63]. Gründe hierfür sind vermutlich die schwach ausgeprägten Oberflächenstrukturen auf den Blättern der Getreidepflanzen. Im Gegensatz zu den zeitintensiven globalen Algorithmen zur Korrespondenzanalyse kann der *Semi-Global-Block Matching* Algorithmus sogar für Echtzeitanalysen genutzt werden [50] und liefert zuverlässige Ergebnisse in den Analysen/Experimenten dieser Arbeit.

Im Anschluss an die Korrespondenzanalyse konnten für korrespondierende Punkte die Disparitäten bestimmt und eine Disparitäten-Karte erstellt werden (Abbildung 3-4). Im Folgenden durchlief die Punktwolke unterschiedliche Verarbeitungsschritte, damit am Ende verschiedene Teil-Punktwolken entstehen, die jeweils ein Objekt (Kugelmodell, Blattmodell, Weizenblatt) repräsentieren. Die Schritte beinhalteten: das Filtern von Ausreißern, Clustern zusammenhängender Bereiche, manuelles Editieren sowie nochmaliges Filtern und Glätten der Teil-Punktwolken. Um all diese Schritte zu durchlaufen, wurde die Disparitätskarte zunächst mit einer zuvor erstellten Hintergrundsegmentierung maskiert. Für die Hintergrundsegmentierung wurden Hintergrundpixel über Schwellenwerte im HSV-Raum von den abgebildeten Objekten getrennt [64], um sie aus der Disparitäten-Karte zu entfernen. Die einzelnen Schwellenwerte wurden manuell gesetzt. Nach der Hintergrund-Segmentierung sollte die Disparitäten-Karte nur noch jene Regionen darstellen, welche zu Objekten (Kugel Blättern) gehören.

Kanten innerhalb der Stereoaufnahmen wurden mittels eines *Canny-Edge* Filters detektiert und die entsprechenden Bereiche in der Disparitäten-Karte gelöscht [65]. Viele Kanten kennzeichneten die Übergangsbereiche zwischen Blattkante und Hintergrund. Diese Übergangsbereiche sind sehr fehleranfällig in der Stereo-Analyse, sodass sie in die weitere Modellierung nicht einbezogen werden sollten. Abschließend sollten nur noch Disparitäten in der Karte verbleiben, welche zu Objekt-Pixeln gehören. Um diese Objektpixel z.B. den einzelnen Blättern zuzuordnen, wurde zunächst mittels eines *Connected Components* Algorithmus [63] nach zusammenhängenden Pixeln innerhalb der gefilterten Disparitäten-Karte gesucht. Der *Connected Components* Algorithmus basiert auf der Graphentheorie und sucht innerhalb der Disparitäten-Karte nach zusammenhängenden Bereichen. Dabei werden benachbarte Pixel mit dem gleichen oder einem sehr ähnlichen Intensitätswert verbunden. Die Gesamtheit aller verbundenen Pixel gilt als Teilgraph und somit als zusammenhängende Region. Es wurde angenommen, dass zusammenhängende Pixel zum selben Objekt gehören. Für die Überprüfung dieser Annahme wurde eine Benutzeroberfläche entwickelt. Hier konnten zusammenhängende Pixel in einer Farbe markiert und über die rektifizierte Aufnahme gelegt werden. Falls einzelne Objekte nicht voneinander getrennt wurden oder ein Objekt in mehreren Einzelteilen erscheint, wurde dies manuell korrigiert.

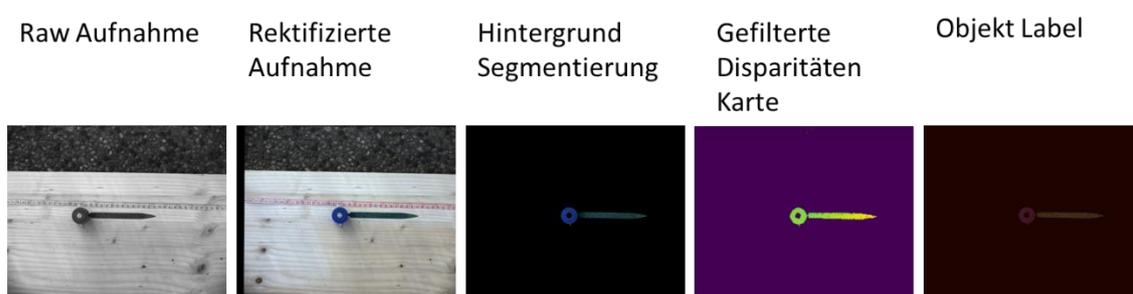


Abbildung 3-4: **Bearbeitungsschritte zur Verarbeitung der Stereoaufnahmen**

Die Verarbeitung der Stereoaufnahmen wird am Beispiel des planaren Blattmodells dargestellt. Ausgehend von der Raw-Datei wird eine rektifizierte Aufnahme erstellt. Nach der Hintergrund-Segmentierung wird die gefilterte Disparitäten-Karte berechnet und das Objektlabeling vorgenommen.

Ausgehend von der gefilterten Disparitäten-Karte wurde eine erste 3D-Punktwolke der einzelnen Objekte gewonnen, welche im Folgenden ebenfalls gefiltert und geglättet wurde. Die weitere Verarbeitung der objektspezifischen Punktwolke umfasste unterschiedliche Schritte. Zunächst wurde die Punktwolke geglättet und Ausreißer entfernt. Hierfür wurde mit Hilfe der Delaunay Triangulation ein 2D-Polygonnetz in Form eines Dreiecksnetzes erstellt [66]. Für die Triangulation wurden nur die x- und y- Koordinaten der einzelnen Punkte betrachtet. Anschließend wurde die Distanz der miteinander verknüpften Punkte im 3D-Raum bestimmt. Über einen benutzerdefinierten Schwellenwert wurden Ausreißer, also Punkte, deren Abstand zu den anderen Punkten den gegebenen Schwellenwert übersteigt, aus der Punktwolke entfernt. Nachdem Ausreißer aus der Punktwolke entfernt wurden, folgte ein Glättungsschritt. Hierfür wurden für jeden einzelnen Punkt des Dreiecksnetzes alle mit ihm verknüpften Punkte P_N definiert. Die korrigierte z-Koordinate $P_{korrr}(z)$ für einen Punkt P ergab sich aus dem Median der z-Koordinaten von P und der mit ihm verknüpften Punkte P_N . Im Folgenden konnte die Punktwolke für Modellierungsschritte genutzt werden, um das Objekt (Kugelmodell, Blattmodell, Weizenblatt) in der Aufnahme möglichst detailliert zu beschreiben. Je nach Objekt wurden unterschiedliche Modellierungsschritte vorgenommen und verschiedene Funktionen verwendet.

3.2.2. Blattmodellierung

Die einzelnen Schritte der Blattmodellierung werden in Abbildung 3-5 dargestellt. Ausgehend von der Stereoaufnahme wird zur Blattmodellierung zunächst die geglättete 3D-Punktwolke verwendet. Diese wird durch die Verarbeitung der Stereoaufnahmen gewonnen (Kapitel 3.2.1), kann aber theoretisch auch durch ein anderes Sensorsystem gewonnen werden (siehe Kapitel 1.3).

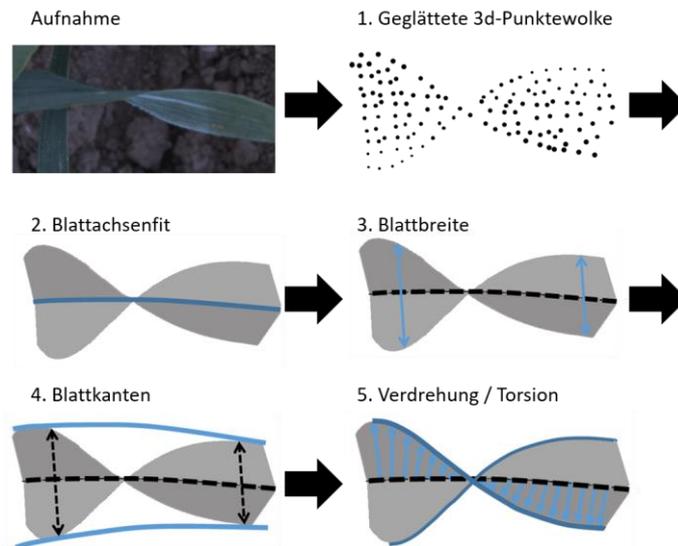


Abbildung 3-5: **Verarbeitungsschritte für die Blattmodellierung**

Die Blattmodellierung erfolgt in 5 Schritten. Ausgehend von den Stereoaufnahmen wird zunächst die 3D-Punktwolke berechnet (1.). Anschließend wird ein Blattachsenfit erstellt (2.) und die Blattbreite an jeder Position entlang der Blattachse ermittelt (3.). Basierend auf der Blattbreite können die Blattkanten modelliert (4.) und die Torsion bestimmt werden (5.).

Ziel der Blattmodellierung ist die Darstellung eines Blattmodell B_M durch mehrere Funktionen

Abbildung 3-8

$$F_{B_M} = \begin{cases} B_A(x) \cup B_A(y) \\ s_i(P_{B_A}) \\ B_K(s) \\ \psi(s) \end{cases} \quad [26]$$

oder eine 3D-Punktwolke $P_{B_M} = \begin{cases} P_{B_A} \\ P_{B_K} \end{cases}$, welche die Blattachse und die Blattkanten genau definieren.

Die wesentlichen Schritte bei der Blattmodellierung sind die Bestimmung der Blattachse, die Berechnung der Blattbreite und die Definition der Blatttorsion. (Abbildung 3-5). Zur Bestimmung der Blattachse wird ein Verfahren gewählt, welches erlaubt in die 3D-Punktwolke eine lineare Funktion in die xy-Ebene und eine nicht-lineare Funktion in die xz- bzw. yz-Ebene zu fitten (Abbildung 3-5, 2.). Aufgrund dieser mathematischen Definition für die Blattachse ist eine korrekte Beschreibung nur bei einem geraden Verlauf der Blattachse in NADIR Perspektive möglich. Zunächst wird eine Gerade in die y-x-Koordinaten der Punktwolke gefittet. Anhand des Ergebnisses wird bestimmt, entlang welcher

beider Achsen sich das Blatt stärker ausdehnt, um den Blattachsenverlauf in Abhängigkeit von dieser Variable als Funktion zu beschreiben (Abbildung 3-6). Anschließend wird ein Polynom 2. Grades zur Beschreibung der z-Koordinaten genutzt. Somit ergibt sich für die mathematische Beschreibung der Blattachse B_A folgende 2 Optionen:

$$B_A(x) = \begin{cases} b_{A1}(x) = a_1x + b_1 \\ b_{A2}(x) = a_2x^2 + b_2x + c_2 \end{cases} \quad (\text{Bsp.: Abbildung 3-6 b))}$$

[27]

$$B_A(y) = \begin{cases} b_{A1}(y) = a_1y + b_1 \\ b_{A2}(y) = a_2y^2 + b_2y + c_2 \end{cases} \quad (\text{Bsp.: Abbildung 3-6 a))}$$

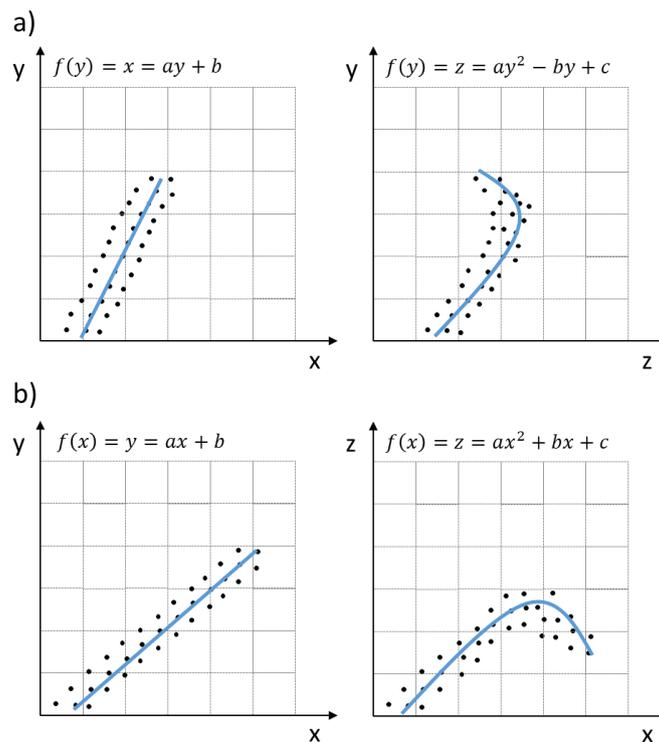


Abbildung 3-6: **Blattachsenfit**

Der Blattachsenfit wird in Abhängigkeit von der längeren Ausdehnungsachse beschrieben. Der Fit erfolgt zunächst in der x-y Ebene und anschließend entlang der unabhängigen Variable und der z-Achse.

Ausgehend von der funktionalen Darstellung der Blattachse wird die Blattbreite entlang der Blattachse bestimmt (Abbildung 3-5, 3.). Basierend auf den Koordinaten der 3D-Punktwolke werden für die beschreibende Variable (x oder y) Werte ausgewählt und in die Blattachsenfunktion B_A eingesetzt. Somit wird die Blattachse durch eine zuvor festgelegte Anzahl n_{B_A} von Punkten P_{B_A} beschrieben (Abbildung 3-7 a)). Dadurch wird zusätzlich zu der Punktwolke ein Datensatz mit den Punkten der

Blattachse erzeugt. Jedem Punkt der Punktwolke wird der nächstgelegene Punkt auf der Blattachse zugeordnet. Jener Punkt P_{BW} mit der größten Distanz zum zugeordneten Blattachsenpunkt P_{BA} definiert die Blattbreite $B_B(P_{BA})$ an der gegebenen Stelle der Blattachse (Abbildung 3-7 b)). Wird hier ein zu großer Abstand zwischen den einzelnen Punkten P_{BA} gewählt, kann es zu einer Überschätzung der Blattbreite kommen. Insgesamt nimmt die Genauigkeit bei der Bestimmung der Blattbreite zu, je niedriger der Abstand zwischen P_{BA} gewählt wird. Allerdings muss bei der Suche für jeden Punkt der Punktwolke der Abstand zu jedem Punkt P_{BA} berechnet werden, sodass sich dieser Vorgang mit zunehmender Anzahl von Blattachsenpunkten negativ auf die Rechenzeit auswirkt und hohe Speicherkapazitäten verbraucht.

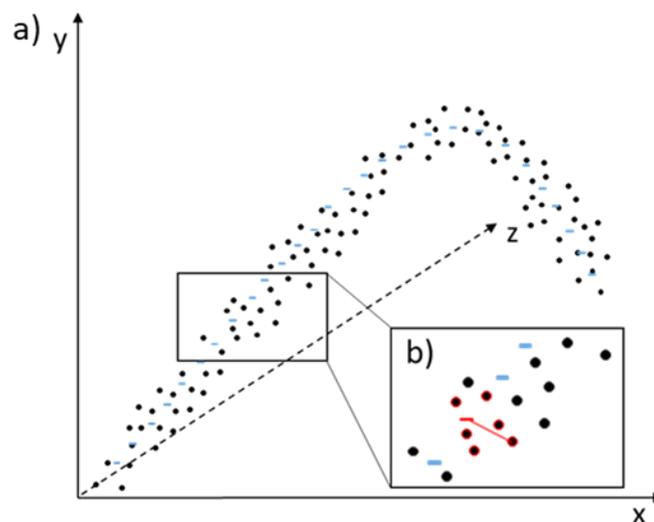


Abbildung 3-7: **Ermitteln der Blattbreite**

Die Bestimmung der Blattbreite wird für einen Blattachsenpunkt (die rote Linie kennzeichnet die Breite) entlang der gefitteten Blattachse (blau) dargestellt. Von allen Punkten, die dem Blattachsenpunkt am nächsten liegen, definiert jener, mit dem größten Abstand die Blattbreite an dieser Achsenposition.

Für die mathematische Beschreibung der Blattkanten (Abbildung 3-5, 4.) wurde auf die von Dornbusch et al. [15,67] publizierte *Leaf-Width-Function* zurückgegriffen. Um diese anwenden zu können, wird zunächst für jeden Blattachsenpunkt P_{BA} seine relative Position

$$s_i = \frac{i-1}{n_{B_A}-1}, \text{ mit } (1 \leq i \leq n_{B_B}) \quad [28]$$

entlang der Blattachse bestimmt. Die Blattbreite B_B kann im Folgenden ebenfalls in Abhängigkeit von s_i definiert werden als $B_B(s_i)$. Basierend auf diesen relativen Blattachsenpositionen s_i und der Blattbreite an diesen Positionen werden anschließend die Blattkanten

$$B_K(s_i) = B_{max} * \frac{c_2 * (c_1 + s_i) * (1 - s_i)^{c_2}}{\left[(1 + c_1) * \left(\frac{c_2}{c_2 + 1} \right) \right]^{c_2 + 1}} \quad [29]$$

$$\text{mit } (0 \leq s_i \leq 1; B_{max}, c_1, c_2 \geq 0; c_1 * c_2 \leq 1)$$

angenähert. Die Eingabewerte s_i und $B_B(s_i)$ dienen dazu, die maximale Blattbreite, B_{max} und c_1, c_2 mittels der in `scipy` implementierten *Least-Squares Trust Region Reflective* Methode [68] zu approximieren. Nach diesem Modellierungsschritt erhält man Werte für die Parameter B_{max} und c_1, c_2 und eine mathematische Beschreibung für die Blattkanten. Allerdings folgen diese Blattkanten noch nicht der Rotationsbewegung, welche in der Aufnahme in Abbildung 3-5 zu erkennen ist. Stattdessen sind die Blattachsen flach wie in (Abbildung 3-5, 4.). Deshalb folgt im letzten Modellierungsschritt (Abbildung 3-5, 5.) die Beschreibung der Blattkanten-Torsion. Hierfür wird ebenfalls eine Funktion von Dornbusch et al. [15,67], die sogenannte *Leaf-Twisting-Funktion*, genutzt:

$$\psi(s) = \psi_0 + \Delta\psi * s \frac{(1 + c_3 * s)}{1 + c_3}, \text{ mit } (0 \leq s \leq 1; c_3 > -1). \quad [30]$$

Diese wird in die Punkte entlang der Blattkanten P_{B_W} und die relativen Achsenpositionen s_i gefittet. Auch hier wird eine *Least-Squares* Methode verwendet, um den Abstand zwischen den ursprünglichen Blattkantenpunkten P_{B_W} und den rotierten Blattkanten P_{B_R} zu minimieren. Dabei werden die Parameter ψ_0 (Beschreibung des Rotationswinkels am Blattansatz in Form des dritten Eulerwinkels²), $\Delta\psi$ (Differenz zwischen Rotationswinkel am Blattansatz und an der Blattspitze) und c_3 bestimmt. Der Parameter dient c_3 zur Beschreibung der Kurvenform bzw. der Rotationsbewegung. Die Rotation kann sich gleichmäßig über die Blattachse erstrecken oder lokal begrenzt definiert sein. Durch Einsetzen dieser Parameter und der relativen Positionen der Blattachsenpunkte s_i in die Formel können die

² Der dritte Euler-Winkel beschreibt den Winkel zwischen einer Geraden N (Knotenlinie) und der X-Achse

Blattkantenpunkte P_{B_K} für B_M berechnet werden. Abschließend wird eine funktionale Beschreibung der Blattachse $B_A(x)$ bzw. $B_A(y)$ und Blattkanten $B_K(s)$ (Abbildung 3-8 a)) sowie eine Punktwolke für Blattachse P_{B_A} und Blattkanten P_{B_R} (Abbildung 3-8 b)) gewonnen. Um ein Oberflächenmodell des Blattes zu erstellen, werden die Punkte systematisch verknüpft. Dafür werden die einzelnen Punkte entlang der Blattachse und Blattkanten trianguliert (Abbildung 3-8 c)). Die entstehenden Dreiecke auf der rekonstruierten Oberfläche überlappen einander nicht und garantieren eine vollständige Beschreibung der rekonstruierten Oberfläche.

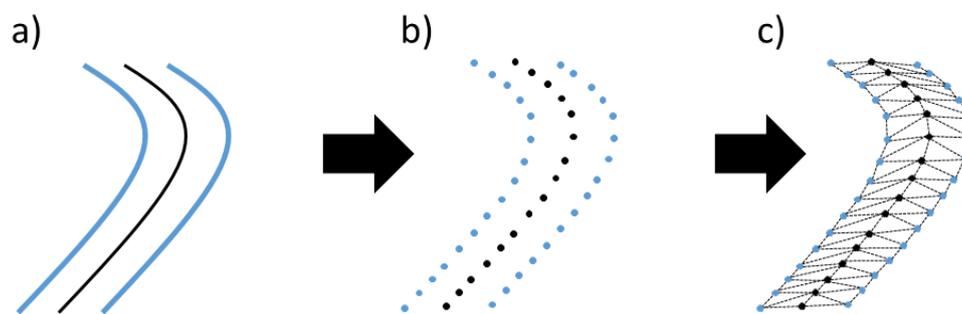


Abbildung 3-8: **Darstellung des finalen Blattmodells.**

Die Blattachse wird in schwarz und die Blattkanten in blau gezeichnet. a) Visualisierung der mathematischen Darstellung F_{B_M} . b) Punktwolke P_{B_M} zum Blattmodell. c) Oberflächenrekonstruktion aus der Punktwolke durch systematische Triangulation der Punktwolke.

Orientierung und Fläche der Dreiecke können auch über den Normalenvektor beschrieben werden [69], welcher rechtwinklig auf der Dreiecksfläche steht:

$$\vec{n} = \vec{u} \times \vec{v} = \begin{pmatrix} u_2 v_3 - u_3 v_2 \\ u_3 v_1 - u_1 v_3 \\ u_1 v_2 - u_2 v_1 \end{pmatrix}. \quad [31]$$

Hierfür wird aus den Vektoren \vec{u} und \vec{v} , welche durch die 3D-Punktkoordinaten von P_{B_A} und P_{B_K} festgelegt sind und den zwei äußeren Kanten der Dreiecksfläche entsprechen, das Kreuzprodukt berechnet. Basierend auf der Triangulation und den zugehörigen Normalenvektoren können im weiteren Verlauf diverse phänotypisch bedeutsame Parameter bestimmt werden.

3.2.3. Berechnung Phänotypischer Parameter

Die Blattmodellierung wird genutzt, um unterschiedliche phänotypische Parameter eines Pflanzenspross zu berechnen. Zu den berechenbaren Größen zählen: i) Blattbreite ii) Blattachsenlänge, iii) Blattfläche, iv) Insertionswinkel, v) mittlere Neigungswinkel. All diese Parameter werden benötigt, um die vi) Blattwinkelverteilung zu bestimmen. Im Folgenden werden die Größen kurz definiert und ihre Berechnung anhand der Blattmodellierung erläutert.

- i) Die Blattbreite B_{max} gibt die maximale Breite des Blattes an und ergibt sich aus der mathematischen Formulierung des Blattmodells.
- ii) Die Blattachsenlänge B_L wird in dieser Arbeit als die Länge der modellierten Blattachse definiert und kann aus den Blattachsenpunkten $P_{B_{Ai}}$ errechnet werden. Diese entspricht der Summe der Abstände benachbarter Punkte:

$$B_L = \sum_{i=0}^{n_{B_{A-1}}} d(P_{B_{Ai}}, P_{B_{Ai+1}}) \quad , \text{ mit} \quad [32]$$

$$d(P_{B_{Ai}}, P_{B_{Ai+1}}) = |P_{B_{Ai}}, P_{B_{Ai+1}}| = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}$$

- iii) Für die Blattfläche A_B wird der Flächeninhalt aller Dreiecke n_F der Triangulation aufsummiert. Der Flächeninhalt kann über den Betrag des Normalenvektors berechnet werden (die Berechnung des Normalenvektors ist in Formel (29) aufgeführt):

$$A_B = \sum_{i=0}^{n_F} \frac{1}{2} |u_i \times v_i| = \sum_{i=0}^{n_F} \frac{1}{2} |n_i| = \sum_{i=0}^{n_F} \frac{1}{2} \sqrt{n_{x_i}^2 + n_{y_i}^2 + n_{z_i}^2} \quad [33]$$

- iv) Aus dem Winkel zwischen Normalenvektor der Erdoberfläche (z.B.: $\vec{n}_0 (0, 0, 1)$) und den Normalenvektoren \vec{n} der Dreiecke können die Neigungswinkel einzelner Dreiecke berechnet werden. Somit kann der Neigungswinkel an jeder einzelnen Position entlang der Blattachse bestimmt werden, wobei sich an der Blattbasis der Insertionswinkel α befindet.
- v) Der gewichtete Mittelwert aller Winkel entlang der Blattachse ergibt den mittleren Neigungs-/Blattwinkel θ_B . Die Gewichtung erfolgt über die Flächeninhalte der einzelnen Dreiecke.

$$\theta_B = \frac{1}{n_F} \sum_{i=0}^{n_F} \frac{1}{2} |n_i| \theta_i \quad , \text{ mit } \theta_i = \arccos\left(\frac{\bar{n}_o \bar{n}_i}{|\bar{n}_o| |\bar{n}_i|}\right) \quad [34]$$

- vi) Für die Blattfläche $a_r(\theta)$ mit einem definierten Neigungswinkel θ wird somit die Fläche aller einzelnen Dreiecke mit diesem Winkel aufsummiert. Die Blattwinkelverteilung $LAD(\theta)$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit für das Vorkommen eines bestimmten Neigungswinkels. Die Wahrscheinlichkeit für das Vorkommen eines Neigungswinkels berechnet sich aus dem Anteil der Blattfläche mit diesem Winkel.

$$LAD(\theta) = \frac{\sum_{\theta=0}^{\theta_0} (F(i)=\theta)}{A_B} \quad , \text{ mit} \quad [35]$$

$$F(i) = \frac{1}{2} |n_i|$$

3.2.4. Beta Funktion

Eine allgemein übliche Darstellungsform der Blattwinkelverteilung ist die Beta-Funktion, welche in die rekonstruierten Blattwinkelverteilungen gefittet wird [25,27,70]. Die Beta-Verteilung ist eine zwei-parametrische Verteilung, welche eine gute Approximation der Blattwinkelverteilungen zulässt. Ausgehend von den gefitteten Parametern der Beta-Verteilung ist ein Vergleich unterschiedlicher Blattwinkelverteilungen möglich. Nach dem Fit können die Parameter der Beta-Verteilung genutzt werden, um die Blattwinkelverteilungen unterschiedlicher Sorten einander gegenüberzustellen und auch den Einfluss der Aussaatstärken zu ermitteln. Die entscheidenden Parameter der Beta-Verteilung μ und ν sind funktional abhängig von den Blattwinkeln und dessen maximaler Standardabweichung und Varianz [27].

Im Folgenden soll die Beta-Verteilung $f(t)$

$$f(t) = \frac{1}{B(\mu, \nu)} (1-t)^{\mu-1} t^{\nu-1} \quad [36]$$

als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion sowie die benötigten Abhängigkeiten zur Darstellung der Blattwinkelverteilung genauer erläutert werden.

Die Variable t ergibt sich aus den Blattwinkeln und ist in folgender Weise definiert:

$$t = \frac{2\theta_L}{\pi}. \quad [37]$$

Die Beta-Verteilung beschreibt somit den funktionalen Zusammenhang zwischen Blattwinkelverteilung und Blattwinkel. Die Parameter μ, ν sind dabei abhängig von t :

$$\nu = \bar{t} \left(\frac{\sigma_0^2}{\sigma_t^2} - 1 \right) \quad [38]$$

$$\mu = (1 - \bar{t}) \left(\frac{\sigma_0^2}{\sigma_t^2} - 1 \right). \quad [39]$$

Wobei σ_0^2 und σ_t^2 die maximale Standardabweichung bzw. Varianz von t sind:

$$\sigma_0^2 = \bar{t}(1 - \bar{t}) \quad [40]$$

$$\sigma_t^2 = \text{var}(t) \quad [41]$$

Zuletzt wird nun noch die Gamma-Funktion Γ [58] als Bestandteil der Beta-Funktion benötigt:

$$B(\mu, \nu) = \int_0^1 (1-x)^{\mu-1} x^{\nu-1} dx = \frac{\Gamma(\mu)\Gamma(\nu)}{\Gamma(\mu+\nu)}. \quad [42]$$

4. Konzept und mathematische Grundlagen zur Methodvalidierung

Die Methodvalidierung stellte einen wesentlichen Aspekt dieser Arbeit dar (siehe Kapitel 1.4.3). Sie diente dazu, die Eignung der Methode hinsichtlich des Kameraaufbaus als auch der Algorithmik zu überprüfen. Ziel war es, Fehlerquellen zu erkennen und deren Einfluss anhand der Richtigkeit und Präzision rekonstruierter Objekt-Geometrien zu quantifizieren. Die Validierung schloss unterschiedliche Aspekte der Rekonstruktion und Modellierung mit ein. Damit sowohl die Genauigkeit der Rekonstruktion im Hinblick auf die Lage der rekonstruierten Punkte als auch die Eignung der Blattmodellierung beurteilt werden konnten, wurden zwei unterschiedliche Validierungsansätze unter Verwendung verschiedener Validierungskörper gewählt. Der erste Ansatz betrachtete die Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion bei der Nutzung von Stereo-Rekonstruktions-Algorithmen [71]. Dafür wurde die Präzision der Rekonstruktion geneigter Oberflächen mit Hilfe eines Kugelmodells, welches in Kapitel 4.2.1. näher beschrieben wird, bestimmt. Die Richtigkeit wurde mittels des Abstandsfehlers zwischen Rekonstruktion und Referenz bestimmt. Zusätzlich wurde die Punktedichte in Abhängigkeit zur Oberflächenneigung ermittelt (Kapitel 4.3.1). Der zweite Validierungsansatz mit Hilfe eines Pflanzenmodells (Kapitel 4.2.2.) zielte auf die Beurteilung des Modellierungsverfahrens ab. Das Pflanzenmodell erlaubte die Berechnung von Referenzwerten der blattspezifischen Parameter und somit auch einen Rückschluss auf die Präzision und Richtigkeit der Modellierung (Kapitel 4.1). Alle Experimente wurden unter natürlichen Lichtbedingungen durchgeführt. Dabei wurde zunächst der Stereosetup, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, kalibriert. Die Daten-Verarbeitung erfolgte, sofern im Folgenden nicht anders angegeben, nach dem in Kapitel 3.2 erläuterten Schema. Die notwendigen Schritte zur Verarbeitung der Bilddaten und Berechnung der Blattparameter sowie weitere Details zu den einzelnen Experimenten werden in Kapitel 4.2.2. beschrieben.

4.1. Mathematische Evaluationsgrößen

Die Genauigkeit der implementierten Methode wird anhand der Richtigkeit und Präzision für die betrachteten Parameter (z.B. 3D-Punktwolke, Blattbreite, Blattfläche) beschrieben. Eine allgemeingültige Definition dieser Begriffe ist in der ISO 5725-1 gegeben. In dieser Arbeit wird die

Definition angelehnt an die Publikation von Povey und Grainger und soll im Folgenden erklärt werden (Abbildung 4-1)[72,73]. Grundlage für diese Definitionen ist die Annahme normalverteilter Messwerte. Die Richtigkeit beschreibt die Differenz zwischen dem gemessenen Mittelwert (μ_e) und dem Referenzwert/optimalen Wert (μ) für einen Parameter. Bei unterschiedlichen Referenzwerten wird R als Mittelwert für die Differenz zwischen Messwert und Referenzwert berechnet. Bei einem einheitlichen Referenzwert wird R[%] als relativer Wert angegeben.

$$R = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \mu_i - \mu_{i_e} \right| \quad [43]$$

$$R[\%] = \left| \frac{\mu - \mu_e}{\mu} \right| * 100$$

Je kleiner die Differenz zwischen μ_e und μ , desto höher ist die Richtigkeit. Bei einer geringen Richtigkeit, also einer großen Differenz zwischen μ_e und μ liegt ein Bias vor, die Messwerte sind wahrscheinlich durch einen systematischen Fehler verzerrt. Die Präzision P ist ein Maß für Messungenauigkeiten, sie beschreibt die Streuung (σ) um den gemessenen Mittelwert als absoluten Wert. Auch P [%] kann als relativer Wert angegeben werden.

$$P = \sigma \quad [44]$$

$$P[\%] = \frac{\sigma}{\mu} * 100$$

Die Präzision wird durch zufällige Fehler während der Messungen beeinflusst und ist besonders hoch, wenn σ sehr klein ist. Eine hohe Präzision beschreibt eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, während eine geringe Präzision mit größeren Unsicherheiten einher geht.

Die Genauigkeit kann abschließend aus den zuvor berechneten Werten für Richtigkeit und Präzision ermittelt werden, es gilt:

$$G = R + P \quad [45]$$

$$G[\%] = R[\%] + P[\%]$$

Eine Definition für eine hohe Genauigkeit, Präzision und Richtigkeit soll hier nicht gegeben werden, die erreichten Ergebnisse werden mit den Resultaten anderer Forschungen verglichen.

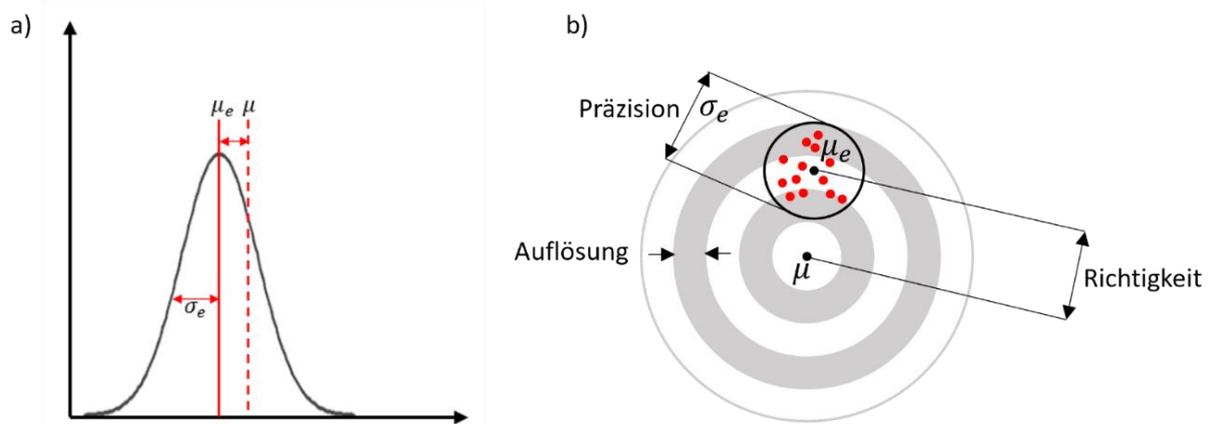


Abbildung 4-1: **Definition für Richtigkeit und Präzision, unter Annahme normalverteilter Messwerte.**

a) Genauigkeit und Präzision werden in einer Normalverteilung dargestellt. Der gemessene Mittelwert wird durch μ_e gekennzeichnet und μ beschreibt den theoretischen Mittelwert / erwarteten Messwert. Je geringer die Differenz zwischen μ_e und μ , desto höher die Richtigkeit. Messungengenauigkeiten werden durch die Streuung (σ) beschrieben und durch zufällige Fehler verursacht. In b) werden Richtigkeit und Präzision in einer Zielscheibengrafik dargestellt. Die Ringe der Zielscheibe kennzeichnen die Auflösung.

Zusätzlich wird die Größe des systematischen (MAE_s) und nicht-systematischen Fehlers (MAE_u) bestimmt. Für die Berechnung werden die Referenzwerte (P_i) und die gemessenen Werte (O_i) sowie ein lineares Regressionsmodell genutzt.

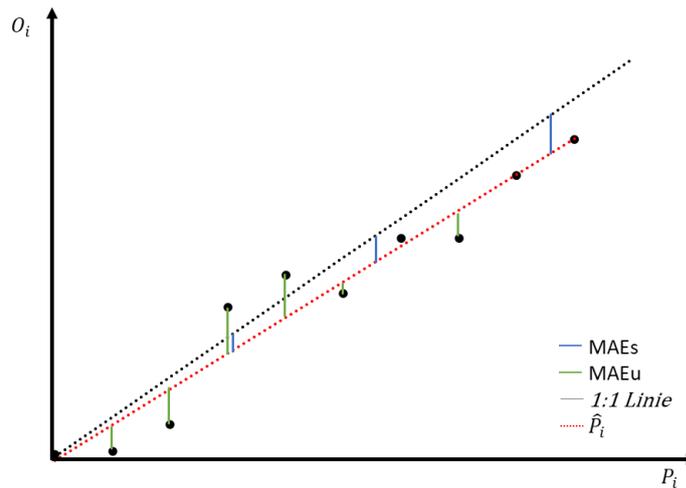


Abbildung 4-2: **Systematischer und nicht-systematischer Fehler**

Der systematische Fehler (MAE_s) und nicht-systematische Fehler (MAE_u) definieren sich aus den Referenzwerten (P_i), den gemessenen Werten (schwarz) (O_i) sowie einem linearen Regressionsmodell (rot). Der Abstand zwischen Messwerten und Regressionsmodell definiert den nicht-systematischen Fehler (grün) und der Abstand zwischen 1:1 Linie (schwarz) und dem Regressionsmodell definiert den systematischen Fehler (blau).

Während $R[\%]$ zunächst als mittlerer Fehler mit Vorzeichen berechnet wird, werden beim systematischen Fehler die absoluten Abweichungen gemittelt. Die Definition nach Robeson und Willmott [74] lautet für den absoluten systematischen Fehler:

$$MAE_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{P}_i - O_i| \quad [46]$$

$$\text{mit } \hat{P}_i = a + b * O_i$$

und für den nicht-systematischen Fehler:

$$MAE_u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - \hat{P}_i|. \quad [47]$$

Der systematische Fehler beschreibt die Abweichung des Regressionsmodells von der 1:1 Linie und der nicht-systematische Fehler die Abweichung der Messpunkte vom Regressionsmodell.

4.2. Referenzmodelle für Methodenvvalidierung

Für die Evaluation der 3D-Rekonstruktion und der berechneten Blattparameter wurden unterschiedliche Referenzmodelle verwendet. Die Modelle ermöglichten die Bestimmung der

Genauigkeit und Präzision für die 3D-Rekonstruktion in Abhängigkeit zum Neigungswinkel (Kugel) sowie der ermittelten Blattparameter (künstliches Pflanzenmodell). Die Referenzmodelle dienen dazu, einen Referenzwert/optimalen Wert (μ) für die quantitative Beurteilung der Genauigkeit des Verfahrens zu bestimmen.

4.2.1. Kugelmodell

Die Kugelgeometrie ist über den Durchmesser (Radius r_m) vollständig definiert, sodass die Referenzpositionen der rekonstruierten Punkte auf der Kugeloberfläche mittels des Abstandes zum Kugelzentrum dargestellt werden können. Die Kugel bildet alle möglichen Neigungswinkel ab, sodass sie geeignet ist, um den Einfluss des Neigungswinkels auf die Rekonstruierbarkeit der Fläche zu analysieren.

Das verwendete Kugelmodell (Abbildung 4-3) war ein Holzkörper mit einem Durchmesser von 81 mm (gemessen mit Vernier caliper set screw DIN 862, MIB Messzeuge Deutschland). Die Oberfläche wurde mit Acrylfarben eingefärbt. Dabei wurde ein unregelmäßiges Muster auf der Kugel erzeugt, welches die Stereorekonstruktion erleichtert. Der Acryllack weist ähnliche reflektierende und glänzende Eigenschaften auf wie eine Blattoberfläche von Weizenpflanzen. So zeigten sich unter natürlichen Lichtverhältnissen, ähnlich wie bei Weizenblättern, in den Aufnahmen überbelichtete Stellen.



Abbildung 4-3: **Aufnahme des Kugelmodells.**

Auf der Oberfläche ist die Färbung mit dem Acryllack sichtbar.

Für alle Referenzpunkte auf der Kugeloberfläche gilt:

$$p_r(x, y, z) = \sqrt{p_{r_x} - c_{fx}^2 + p_{r_y} - c_{fy}^2 + p_{r_z} - c_{fz}^2} = r_m \quad [48]$$

4.2.2. Pflanzenmodell

Für die Evaluation der berechneten Blattparameter (Blattwinkel, Blattflächen und Blattwinkelverteilungen) wurde ein künstliches Pflanzenmodell verwendet. Das Modell setzt sich aus unterschiedlichen Modulen (Design mit Autodesk® Inventor® 2018, Build 220112000, 112) zusammen. Diese können zusammengefügt werden, um eine komplette Pflanze oder ein kleineres Referenzobjekt zu erstellen. So ist theoretisch nicht nur die Betrachtung einzelner Blattparameter, sondern auch weitreichenderer Effekte innerhalb von Kronendachstrukturen (Verdeckungen, Überlappungen...) möglich. Die Module lassen sich in zwei Klassen einteilen: einerseits Module, welche den Halm der Pflanze repräsentieren, und andererseits unterschiedliche Blattmodule. Abbildung 4-4 a) zeigt die unterschiedlichen Halmmodule. Diese wurden mit einem 3D-Drucker (Felix Pro2, FELIXprinters, Technology FDM, plane-thickness 0.05 mm) aus blauen Polylactide (PLA) Filamenten gefertigt. Das Blattansatzmodul ermöglicht die Fixierung eines künstlichen Blattes in einem Blatthalter. Über eine Schraube kann der Neigungswinkel des Blattes angepasst werden. Stängelmodule dienen dazu, die Abstände zwischen Blättern zu variieren, falls Pflanzen in unterschiedlichen Wachstumsstadien dargestellt werden sollen. Diese Module haben keinen Blatthalter und waren in verschiedenen Höhen (20 mm, 40 mm, 50 mm) verfügbar.

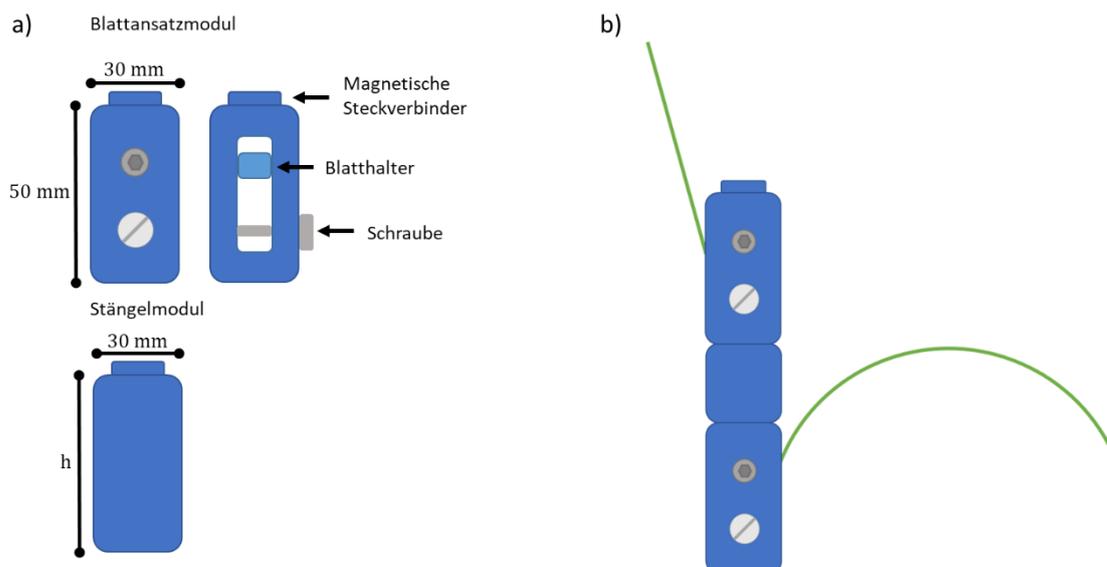


Abbildung 4-4: Pflanzenmodell

a) Schematische Darstellung des Pflanzenmodells. Es gibt unterschiedliche Module, welche zu einer Pflanze zusammengesetzt werden können. b) Zusammengesetzte künstliche Pflanzen aus Blattansatzmodul und Stängelmodul mit zwei Blättern.

Die künstlichen Blätter wurden in zwei unterschiedlichen Größen mit einem Lasercutter aus 1 mm starken Aluminiumblechen hergestellt (Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Blattparameter der künstlichen Blätter

Blatt-Typ	Abkürzung	Einheit	Klein	Groß
Blattachsenlänge	L_B	[mm]	150	200
Maximale Breite	B_{max}	[mm]	11	11
Blattfläche	A_B	[mm ²]	1528	1962

An der Basis des Blattes befindet sich ein 15 mm langer Steckverbinder, welcher dazu dient, das Blatt am Blatthalter zu fixieren. Dieser wird bei der Bestimmung der Blattlänge nicht einbezogen. Die Blattbreite variiert über die gesamte Länge und ist so konzipiert, dass der sichtbare Teil jeden Blattes in drei Abschnitte ($f(x_1), f(x_2), f(x_3)$) untergliedert werden kann. Diese Abschnitte werden durch unterschiedliche Verläufe der Blattkanten charakterisiert. Eine genaue Bemaßung für das kleine Blatt

ist in Abbildung 4-5 a) dargestellt. Die flexiblen Aluminiumblätter erlauben Verformungen und sind somit gut geeignet, Biegungen entlang der Blattachse zu realisieren. Somit können sowohl flache (Abbildung 4-5 b)) als auch gebogene Blätter hergestellt werden. Für die Evaluierungsexperimente wurde die Biegung entlang eines Kreisradius vorgenommen (Abbildung 4-5 c)). Die künstlichen Blätter wurden mit Acrylfarbe gefärbt (Abbildung 4-5 d)), um die reflektierende Eigenschaft von Blattoberflächen bei die natürlichen Lichtverhältnissen zu imitieren. Zusätzlich wurde mit den Farben auf der Oberfläche ein unregelmäßiges Muster erzeugt, damit die Korrespondenzanalyse vereinfacht wird.

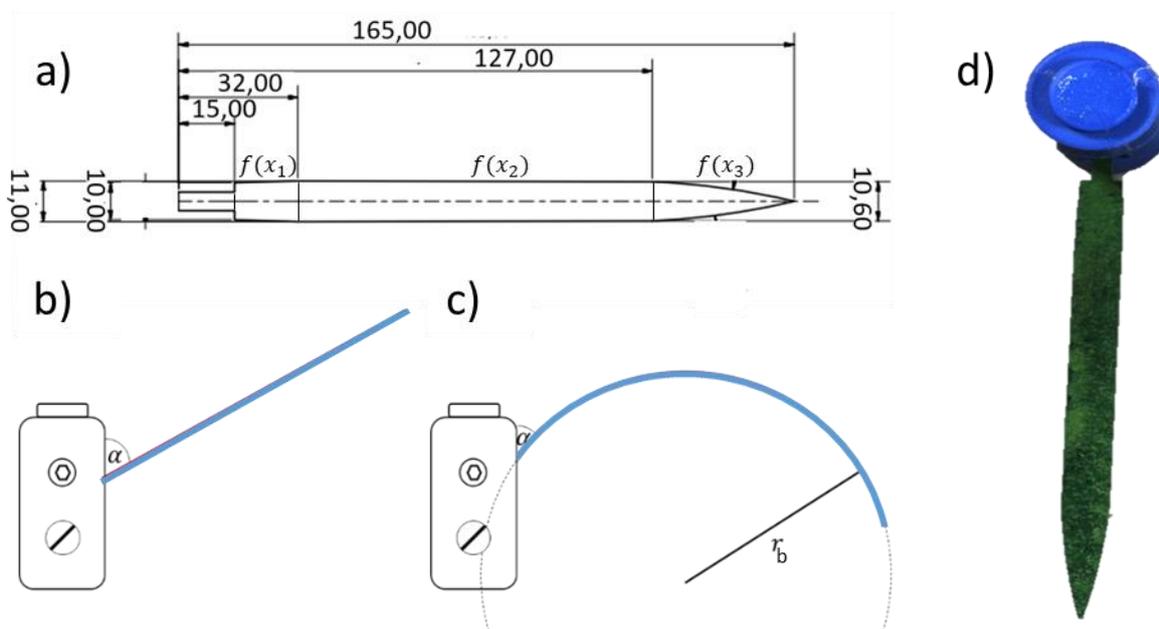


Abbildung 4-5: **Übersicht künstliche Blätter.**

a) technische Zeichnung des kleinen Blattes. $f(x_1)$, $f(x_2)$, $f(x_3)$ beschreiben den Verlauf der Blattkanten. b) zeigt ein flaches Blatt mit einem Neigungswinkel α . c) Zeigt ein gebogenes Blatt mit einem Insertionswinkel α und einem Beugungsradius r . d) Aufnahme eines Blatthalters mit fixiertem künstlichem Blatt.

Während der Neigungswinkel des flachen Blattes (Abbildung 4-5 b)) konstant bleibt und somit dem Insertionswinkel α entspricht, kann für das gebogene Blatt (Abbildung 4-5 c)) der Winkelverlauf entlang der Blattachse mittels der Kreisfunktion berechnet werden. Aus den bekannten Gleichungen $f(x_1)$, $f(x_2)$, $f(x_3)$ und Parametern (L_B, B_{max}) kann die Blattfläche approximiert werden (siehe auch

Abbildung 4-5 a)). Hierfür wird eine definierte Schrittweite von 0,1 mm entlang der Blattachse gewählt, um sowohl den Neigungswinkel als auch die Blattfläche für ein betreffendes Intervall zu berechnen. In Abhängigkeit vom Insertionswinkel α (Neigungswinkel am Stängelansatz) und der Position x_i entlang der Blattachse ergibt sich für den Neigungswinkel:

$$\theta_c(x_i) = \left| \left(2 + a \operatorname{crsin} \frac{x_i}{2 * r_b} \right) - \alpha \right| \quad \text{mit } (0 \leq x_i \leq L_B). \quad [49]$$

Für die Blattfläche werden zunächst Geradengleichungen für die einzelnen Abschnitte ($f(x_1), f(x_2), f(x_3)$) aufgestellt und anschließend das Integral über dem Intervall gelöst.

$$[A]_{x_i}^{x_{i+1}} = \begin{cases} 2 * \int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x_1) dx \\ 2 * \int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x_2) dx \\ 2 * \int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x_3) dx \end{cases} \quad [50]$$

4.3. Experimenteller Aufbau

Zur Berechnung der Genauigkeit wurde zunächst ein Maß für den Fehler zwischen Rekonstruktion oder ermittelten Blattparameter und den Referenzwerten benötigt. Die folgenden Kapitel geben einen Überblick, wie dieser Fehler bestimmt wurde. Zunächst wird der experimentelle Aufbau beschrieben und anschließend der Datenanalyse bis zur Fehlerermittlung dargestellt. Der Fehler wurde gemittelt (μ_e) (Abbildung 4-1) und für die Berechnung von Richtigkeit und Präzision eingesetzt

4.3.1. Fehlerbestimmung: 3D-Rekonstruktion

Das Kugelmodell diente der Evaluierung der Stereoanalyse und 3D-Rekonstruktion [71]. Hierfür wurden zwei Größen berechnet, welche Präzision und Richtigkeit der Rekonstruktion widerspiegeln. Der Abstand zwischen Referenz-Kugeloberfläche und rekonstruierten Punkten stellte dabei ein Maß für die Richtigkeit der Rekonstruktion dar (Formel (46)). Weiterhin wurde angenommen, dass die Streuung der Abstände aller einem definierten Kugelsegment zugeordneten Punkte als Kenngröße für die Präzision der Rekonstruktion dienen kann. Als zusätzlicher Parameter wurde die Punktedichte für

einzelne Kugelsegmente bestimmt und für die Beurteilung der Rekonstruktion geneigter Flächen genutzt. Eine höhere Punktedichte (Formel (50)) wirkt sich positiv auf die Erstellung eines Fit mittels statistischer Methoden aus, weil hierdurch eine geringe Anfälligkeit für Ausreißer zu erwarten ist.

Die Referenz-Kugel wurde insgesamt neun Mal fotografiert. Hierbei wurde in fünf Aufnahmen der Abstand zwischen Modell und Kamera-Setup in einem Bereich von 115 cm und 90 cm variiert. Der abgedeckte Tiefenschärfebereich von 25 cm entsprach dabei dem angestrebten Bildschärfebereich unter Feldbedingungen (siehe Kapitel 3.1). In den übrigen vier Aufnahmen blieb der Abstand zwischen Kugelmodell und Kamera-Setup konstant, allerdings wurde die Belichtungszeit in diesem Experimentteil nicht festgesetzt, sodass die Aufnahmen auch unterschiedliche Belichtungszustände beinhalteten. Ausgehend von einer sehr geringen Belichtungszeit passte sich diese im automatischen Modus an die Umgebungsbedingungen an. Statt eines Blattmodells, wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, wurde ein Kugelmodell in die rekonstruierte 3D-Punktwolke gefittet. Das Kugelmodell wurde durch vier Parameter definiert: einerseits die drei Ortskoordinaten des Kugelmittelpunkts $c(x_0, y_0, z_0)$ und andererseits der Kugelradius r_K . Die Lagebeziehung zwischen Kamera und Kugelkörper war nicht bekannt, sodass nur der reale Kugelradius als Referenzwert vorlag. Ziel war somit ein Kugelmodell, bei dem der gefittete Radius dem Referenzradius r_K entsprach. Um dies zu erreichen, sollte im Fitting-Prozess zunächst ein räumlicher Zusammenhang zwischen der realen Kugel und dem gefitteten Modell hergestellt werden. Hierfür wurden Kugelmittelpunkt und Radius approximiert. Mittels Least-Squares Regression wurde ein erstes Kugelmodell K_g in die 3D-Punktwolke $p(x, y, z)$ gefittet. Die resultierenden Parameter für $c_g(x, y, z)$ dienten als Startwerte für die anschließende Optimierung. Bei dieser zweiten Optimierung wurde der Radiusparameter r_m auf den realen Radius $r = 40,475 \text{ mm}$ gesetzt und somit der Kugelmittelpunkt $c_f(x, y, z)$ gesucht (Abbildung 4-6). Durch das schrittweise Approximieren des Kugelmittelpunktes sollte der Abstand zwischen gefittetem und realem Kugelmittelpunkt minimal werden, sodass im Folgenden die Richtigkeit der Rekonstruktion auf Basis dieses Mittelpunktes bestimmt werden konnte.

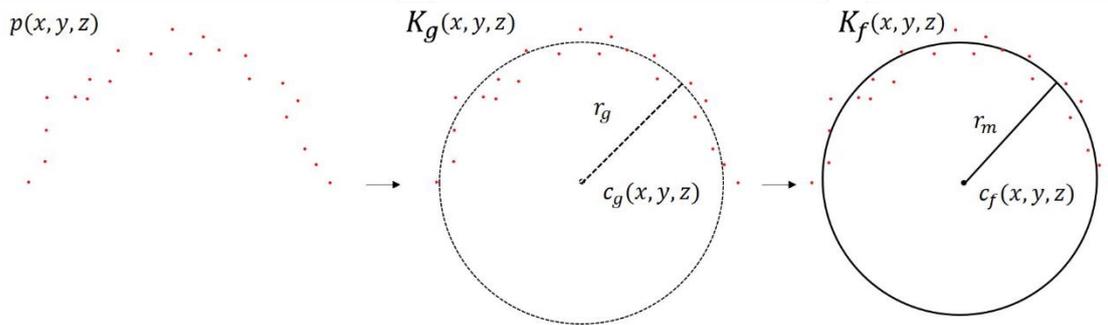


Abbildung 4-6: **Fittingprozess des Kugelmodells**

Zunächst wird ein Kugelmodell K_g mit einem beliebigen Radius r_g in die 3D-Punktwolke gefittet. Ausgehend von dem Mittelpunkt $c_g(x, y, z)$ wird anschließend ein Kugelmodell mit dem realen Radius r_m in die Daten gefittet um das finale Kugelmodell K_f

Für die Datenauswertung wurde angenommen, dass $c(x_0, y_0, z_0)$ durch $c_f(x, y, z)$ optimal beschrieben wird. Der kürzeste Abstand

$$\begin{aligned}
 d(p, K_f) &= |p(x, y, z) - c_f(x, y, z)| - r_m \\
 &= \sqrt{p_x - c_{fx}^2 + p_y - c_{fy}^2 + p_z - c_{fz}^2} - r_m
 \end{aligned}
 \tag{51}$$

zwischen der Kugeloberfläche $K_f(x, y, z)$ und den Punkten aus $p(x, y, z)$ beschreibt somit den Fehler bzw. die Richtigkeit in der 3D-Rekonstruktion. Um Präzision und Richtigkeit der Rekonstruktion in Abhängigkeit vom Zenit-Winkel zu beurteilen, wurde die Oberfläche in 18 gleich große Kugelschichten KS aufgeteilt (Abbildung 4-7 a). Eine Kugelschicht ist dabei eindeutig über zwei parallele Kreisflächen mit den Radien a_1 und a_2 sowie die Schichthöhe h definiert. Die Radien a_1 und a_2 wurden so gewählt, dass Segmente immer einen Winkelbereich von 5° umfassten.

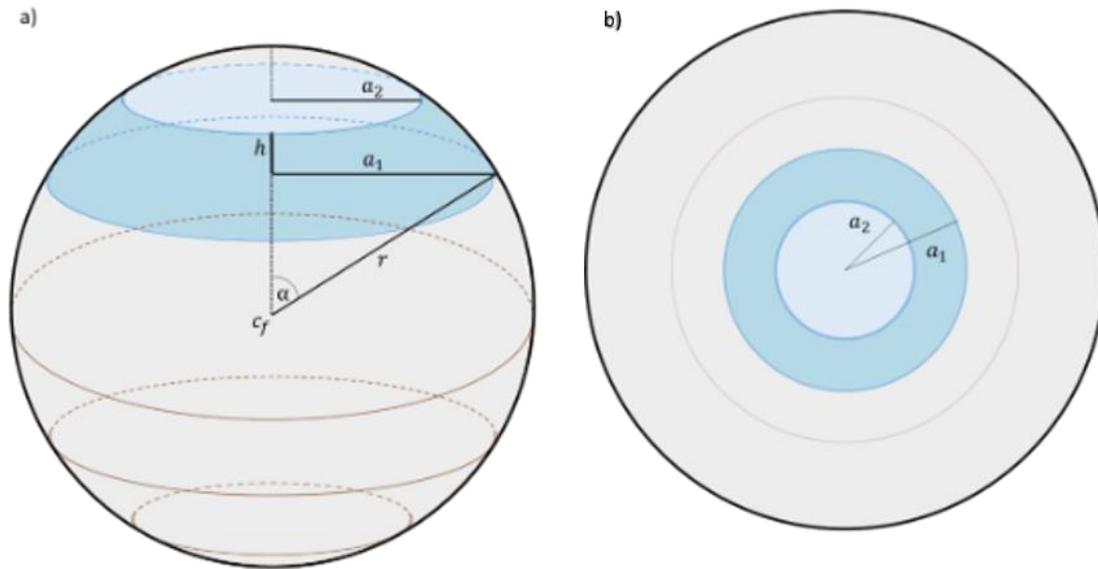


Abbildung 4-7: Einteilung der Kugel zur Evaluation des Einflusses von Neigungswinkel auf die Rekonstruktion.

a) Der blaue Körper kennzeichnet ein Kugelsegment mit der Höhe h und einem Radius a für den Basiskreis mit der Höhe h und einem Radius a für den Basiskreis. b) Sichtbare Flächen in der Aufnahme.

Für die Kugelschichten gilt

$$M_{KS} = 2 \pi r h \quad [52]$$

zur Berechnung der Manteloberfläche (blaue Flächen in Abbildung 4-7). In den Aufnahmen sind nur die projizierten Kugeloberflächen sichtbar. Je steiler der Neigungswinkel, desto kleiner ist die sichtbare Fläche im Verhältnis zur realen Oberfläche. Aus diesem Grund wird die Punktedichte basierend auf der projizierten Kugeloberfläche O (Abbildung 4-7 b) und d)) bestimmt. Diese kann aus den gegebenen Informationen für die Kugelschicht

$$O_{KS} = \pi * r_m^2 * (\sin(t_H)^2 - \sin(t_L)^2) \quad , \text{ mit } (0 \leq t_L \leq 85), (t_H = t_L + 5) \quad [53]$$

berechnet werden.

Zusätzlich können die rekonstruierten Punkte auf Basis des berechneten Neigungswinkels

$$\theta_r = 180 - \arccos \left(\frac{p_z - c_{fz}}{r_m} \right) \quad [54]$$

einem Kugelsegment zugeordnet werden. Ausgehend von der projizierten Fläche (Abbildung 4-7 b)) und der Anzahl der zugehörigen Punkte n_{KS} kann für jeden Neigungs-Winkel eine Punktedichte berechnet werden:

$$\rho_{KS} = \frac{O_{KS}}{n_{KS}} \quad [55]$$

Ob die Rekonstruktion aller Neigungswinkel möglich ist, hängt von der Richtigkeit und Präzision der Punktwolke für die entsprechenden Winkel ab. Bei einer sehr hohen Richtigkeit und Präzision ist es möglich, einen Neigungswinkel auch mit einer geringen Punktedichte zu bestimmen. Je geringer die Präzision ist, desto größer sollte die Punktedichte ρ_{KS} sein, um eine statistische Sicherheit zu bekommen.

4.3.2.Fehlerberechnung: Pflanzenparameter

Es wurden zwei Experimente mit dem künstlichen Pflanzenmodell mit unterschiedlichen Blatt-Geometrien durchgeführt. Ziel des Experiments war die Evaluation der berechneten Blattmodellierung bzw. der Blattparameter. Im ersten Schritt sollte nachvollzogen werden, ob mit dem Modell die Blattbreite und Blattachsenlänge (B_{max}, L_B), die Blattfläche A_B , der mittlere Neigungswinkel und Insertionswinkel α eines planaren Blattes berechnet werden können. Anschließend wurde durch die Rekonstruktion eines gebogenen Blattmodells die Berechnung der Blattwinkelverteilung $LAD(\theta)$ und des Insertionswinkels α evaluiert. Hierbei war entscheidend, ob die Bestimmung der relativen Flächenanteile mit einem definierten Neigungswinkel möglich ist.

Für das erste Experiment wurde das Modell mit einem kleinen flachen Blatt versehen und der Insertionswinkel α mit Hilfe eines Geodreieckes (Leitz) manuell eingestellt (Abbildung 4-5 b)). Der Insertionswinkel α wurde so eingestellt, dass ein Neigungswinkel-Bereich von 0° - 60° in 10° -Schritten abgedeckt wurde. Der Datensatz in diesem Experiment umfasste 28 Aufnahmen, welche insgesamt 7 verschiedene Neigungswinkel und pro Neigungswinkel 4 verschiedene Azimut-Winkel abbildeten. Für

die Auswertung wurde der rekonstruierte Neigungswinkel θ_B mit dem Insertionswinkel α sowie die rekonstruierte Blattfläche A_R mit dem errechneten Referenzwert verglichen.

Für das zweite Experiment wurden kleine Blätter (150 mm Blattachse) entlang eines Kreises mit unterschiedlichen Radien $r_b = 82 \text{ mm}, 115 \text{ mm}, 125 \text{ mm}, 155 \text{ mm}$ gebogen und am Stängelmodul fixiert. Für die Auswertung wurden bei unterschiedlichen Insertionswinkeln ($\alpha = 26,0^\circ, 35,0^\circ, 36,0^\circ, 44,0^\circ, 50,0^\circ$) jeweils 4 Aufnahmen des Modells erstellt (Tabelle 4-2). Für die Erstellung der Aufnahmen wurde das Modell unter dem Stereo-Aufbau gedreht, wodurch die Ausleuchtung in den Aufnahmen trotz diffuser Lichtbedingungen unterschiedlich sein konnte. Insgesamt wurden 6 unterschiedliche Pflanzenmodelle (Tabelle 4-2) verwendet, sodass der Datensatz in diesem Experiment 24 Aufnahmen umfasst.

Tabelle 4-2: Pflanzenmodelle mit gebogenen Blatt

Konstellationen von Biegunsradien r_b und Insertionswinkeln α für das künstliche Pflanzenmodell.

Modell	r_b [mm]	α [°]
1	82	35
2	155	26
3	125	36
4	125	44
5	155	50
6	115	50

Zahlreiche Referenzparameter waren bereits durch das Design des Pflanzenmodells bekannt und sind in Kapitel 4.2.2. angegeben. Basierend auf den bekannten Parametern konnte zunächst der Verlauf des Neigungswinkels θ_c und die anteilige Blattfläche $[a]_{x_i}^{x_{i+1}}$ für die jeweiligen Intervalle des Neigungswinkels approximiert werden. Hierfür wurde eine Schrittweite von $0,1 \text{ mm}$ entlang der Blattachse gewählt, sodass für den Winkel im entsprechenden Intervall eine Fläche definiert war.

Die gesamte Fläche mit einem definierten Neigungswinkel θ ergibt sich aus der Summe aller Einzelflächen mit diesem Winkel:

$$a(\theta) = \sum_{x_i=0}^X [a]_{x_i}^{x_{i+1}} \text{ für } \theta_c(x_i) = \theta \quad [56]$$

Durch die Berechnung der Flächenanteile kann sowohl der mittlere Blattwinkel in Form des gewichteten Mittelwertes der Neigungswinkel

$$\theta_m = \frac{\sum_{\theta=0}^{60} a(\theta) * \theta}{\sum_{\theta=0}^{60} a(\theta)} \quad [57]$$

als auch die theoretische Blattwinkelverteilung

$$LAD_c(\theta) = \frac{\sum_{\theta=0}^{90} a(\theta)}{A_R} \quad [58]$$

berechnet und mit der rekonstruierten Verteilung $LAD(\theta)$ verglichen werden. Da jedes Dreieck der Triangulation einen Punkt auf der Blattachse enthält (Abbildung 3-8 c)), kann auch die Rekonstruktion als eine Abfolge von Intervallen entlang der Blattachse betrachtet werden. Der Fehler des rekonstruierten Winkels kann somit in Abhängigkeit von der Blattachsenposition

$$e_r(x_i) = (\theta_c(x_i) - \theta_i(x_i)) \quad (0 \leq x_i \leq 150) \quad [59]$$

berechnet werden. Weiterhin kann der Fehler für jeden Winkel über alle Achsenpositionen gemittelt werden, um das arithmetische Mittel für einen rekonstruierten Winkel zu berechnen

$$\mu(\theta) = \mu(e_r(x_i)) \text{ , für } e_r(x_i) = \theta. \quad [60]$$

5. Design Case Study: Feldexperiment

Abschließend sollte die Rekonstruktionen von Weizenblättern betrachtet werden. Hierfür wurde ein Feldexperiment design, um unterschiedliche wissenschaftliche Fragen zu beantworten (siehe Kapitel 1.4.4). Zunächst wird die Modellierung der Weizenblätter anhand einzelner Blätter betrachtet und Besonderheiten bei der Anwendung im Feld diskutiert. Anschließend wird auf das Feldexperiment eingegangen. In diesem Experiment wird nicht mehr die Qualität der Rekonstruktion betrachtet. Stattdessen soll die biologische Fragestellung beantwortet werden, welche Effektstärke unterschiedliche Aussaatstärken und Weizensorten auf die Kronendachstruktur aufweisen. Voraussetzung für die Bearbeitung dieser Frage war der Einsatz des zuvor validierten Hardware-Aufbaus und der zugehörigen Softwareimplementierung.

Für Experimente mit Weizenpflanzen unter Feldbedingungen wurden drei unterschiedliche Sorten angepflanzt. Die Aussaat fand am 27. März 2020 am Campus Kleinaltdorf in Deutschland (50° 37' 29" N and 6° 59' 06" E) statt. Für das Experiment wurden unterschiedliche Aussaatdichten (bzw. Aussaatstärken) von 150; 250; 350 und 450 $\frac{\text{keimfähige Körner}}{\text{m}^2}$ gewählt.

Die von der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein empfohlene Aussaatdichte für die Spätsaat von Ende März bis Ende April beträgt 350 – 400 $\frac{\text{keimfähige Körner}}{\text{m}^2}$, wobei die Berechnung der nötigen Saatgutmenge mittels folgender Formel berechnet wird [75,76].

$$\text{Saatmenge} \left[\frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right] = \frac{\text{keimfähige Körner}}{\text{m}^2} \times \text{Tausendkorngewicht} [\text{g}] \times 100 \quad [61]$$

Die Pflanzen wurden am 17. April 2020 mit 80 $\frac{\text{kg N}}{\text{ha}}$ gedüngt und zusätzlich am 30. April 2020 mit Herbiziden und 14. Mai 2020 mit Fungiziden behandelt.

Eine Übersicht der Sorteneigenschaften ist in Tabelle 5-1 dargestellt und wurde der Sortenliste des Bundessortenamts entnommen. Damit die Sorten sich an den einzelnen Messtagen in ähnlichen Entwicklungsstadien befanden, wurde bei der Sortenauswahl darauf geachtet, dass sich die Pflanzen

insbesondere in den grün markierten Eigenschaften (Tabelle 5-1) ähnelten. Die Entwicklungsstadien wurden vor jeder Messung visuell bestimmt, sodass diese Voraussetzung überprüft und bestätigt werden konnte. Auf diese Weise sollte ein zu großer Einfluss der unterschiedlichen Entwicklungsstadien auf die gemessene Blattwinkelverteilung vermieden werden. Ein wesentlicher Parameter bei der Sortenwahl war zudem die Bestandsdichte (orange in Tabelle 5-1). Während Granus und Matthus mit 5 (mittel) bewertet sind, ist die Sorte KWS Chamsin hier mit 3 (niedrig) bewertet. Bei der Auswertung dieses Experiments soll nachvollzogen werden, ob die Bewertung der Bestandsdichte einen Einfluss auf die Blattwinkelverteilung bei unterschiedlichen Aussaatstärken haben könnte. Hierbei könnte eine geringe Aussaatdichte sich bei einer Sorte mit mittlerer Bestandsdichte anders auswirken als bei den Sorten mit niedriger Bestandsdichte. Unterschiede zeigen die Sorten in ihrer Neigung zum Lager. Diese Eigenschaft war für das Experiment nicht entscheidend und während der Experimente wurde kein Lager beobachtet.

Tabelle 5-1: *Sortenübersicht für Sommerweichweizen (Triticum aestivum L.)*

Die Ausprägung einer Eigenschaft wird durch einen Wert zwischen 1 und 9 angegeben. Dabei bedeuten niedriger Wert eine geringe und ein hoher Wert eine starke Ausprägung des entsprechenden Merkmals.

Sortenbezeichnung	Anfälligkeit für											Ertrageigenschaften				
	Ährenschieben	Reife	Pflanzenlänge	Neigung zu Lager	Mehltau	Blattseptoria	Drechslera tritici-repentis	Gelbrost	Braunrost	Ährenfusarium	Spelzenbräune	Bestandsdichte	Kornzahl/Ähre	Tausendkornmasse	Kornertrag Stufe 1	Kornertrag Stufe 2
Granus	5	6	3	3	6	5	-	6	3	6	-	5	5	7	5	5
KWS Chamsin	4	5	3	2	5	6	6	6	6	5	5	3	6	7	5	6
Matthus	5	5	3	5	4	5	-	2	2	5	-	5	5	7	6	5

Die Aussaat erfolgte in randomisierten Plots von $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ Größe mit unterschiedlichen Aussaatstärken (Abbildung 5-1).

Nr.	Sorte	$\frac{K}{m^2}$															
1	Matthias	150	2	4													
2		250	12	7													
3		350															
4		450															
5	Chamsin	150	1	10													
6		250															
7		350	8	5	4	7	5	8	10	12	6	4	6	11	5	10	
8	450																
9	Granus	150	6	9	3	2	1	12	3	11	7	1	4	3	2	1	
10		250															
11		350	3	11	11	9	10	6	2	5	8	9	8	12	9	7	
12		450															

Abbildung 5-1: Felddesign Case Study

Codierung der einzelnen Weizensorten und Aussaatdichten und Aussaatschema für das Feldexperiment.

5.1. Rekonstruktion von Weizenblättern

Die Beurteilung der Rekonstruktion von Getreidepflanzen konnte nicht auf Basis einer statistischen Analyse anhand von Referenzmessungen - wie für die künstlichen Validierobjekte gezeigt - erfolgen, sondern basierte auf einer visuellen Beurteilung. Hier sollte insbesondere der Einfluss verschiedener blatt- und kronendachspezifischer Eigenschaften auf die Rekonstruktion beschrieben werden. Dazu gehörten auch Eigenschaften, die nicht durch das künstliche Modell abgebildet werden konnten. In die erste Kategorie fällt zum Beispiel die Torsion des Blattes um die eigene Blattachse – das Blatt ist in sich verdrillt. Die Torsion kann gleichmäßig entlang der Blattachse verlaufen oder lokal begrenzt kombiniert mit anderen Effekten auftreten. Kommt es zu einer Überlagerung unterschiedlicher geometrischer Eigenschaften, wie die Verdrehung um die Blattachse in Kombination mit der Biegung der Blattachse, treten besondere Effekte auf, wie z.B. das scheinbare seitliche Abknicken der Blätter. Zur zweiten Kategorie gehören Effekte wie gegenseitige Abschattung bzw. Verdeckung, die durch die komplexe Anordnung zahlreicher Blätter im Kronendach begünstigt werden. Diese Effekte führen u. a. dazu, dass

die Blätter aufgrund zu starker Unterschiede in der Blattausleuchtung nicht rekonstruiert werden können. Durch eine sehr geringe Höhendifferenz ist es zusätzlich möglich, dass sich Blätter gegenseitig verdecken. In diesen Fällen ist das untere Blatt auch durch einen Perspektivwechsel nicht in den Stereoaufnahmen darstellbar [45,77]. Zusätzlich ist es möglich, dass Ablagerungen auf der Blattoberfläche eine optimale Darstellung der Blätter in den Stereoaufnahmen verhindern. In der Konsequenz ist auch eine Rekonstruktion entsprechender Blattbereiche nicht möglich. Unter Berücksichtigung all dieser Aspekte wurde insbesondere die Eignung der in dieser Arbeit entwickelten Blattmodellierung zur Repräsentation von Getreideblättern betrachtet. Das Felddesign mit vier unterschiedlichen Aussaatdichten erlaubte eine Analyse der Aufnahmen hinsichtlich des Einflusses der Aussaatstärke auf die Kronendachstruktur von Getreidepflanzen.

5.2. Effektstärke von Getreidesorten und Aussaatstärken auf Blattwinkelverteilungen

Für dieses Experiment wurden Aufnahmen in den einzelnen Getreide-Plots mit dem Stereoaufbau erstellt. Die Pflanzen befanden sich am Aufnahmetag, 21. März 2020 im 32. EC-Stadium. In diesem Experiment wurden zwei Faktoren untersucht: Zum einen wurde ein Sortenvergleich auf der Grundlage der Blattwinkelverteilung durchgeführt. Zum anderen wurde für jede Sorte auch der Effekt der Aussaatdichte auf die Blattwinkelverteilung analysiert. Die zentralen Hypothesen zu diesem Experiment wurden in Kapitel 0 (Anwendung im Feld) formuliert. Die Daten wurden entsprechend der in Kapitel 3.2 beschriebenen Schritte verarbeitet. In die ermittelte Blattwinkelverteilung wurde eine Beta-Funktion $B(\mu, \nu)$ gefittet (Kapitel 3.2.4.). Ziel war es, die Parameter (μ, ν) (Kapitel 3.2.4., Formel (35), (36)) der Beta-Funktion zu bestimmen und zu analysieren. Die Analyse erfolgte mittels einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA). Hierbei wurden unterschiedliche Faktoren untersucht: i) Sorte, ii) Aussaatdichte. Anhand der Quadratsummen QS , Mittel der Quadrate MS und Freiheitsgrade df (zwischen, innerhalb oder über die gesamten Gruppen) der ANOVA Analyse konnte Omega-Quadrat ω^2 als Maß für die Effektstärke bestimmt werden. Im Gegensatz zu Cohen's d , welches ebenfalls für die Beschreibung von Effektstärken verwendet wird, kann mit ω^2 die Effektstärke für mehrere Gruppen gleichzeitig und nicht nur paarweise berechnet werden. Bei kleinen Gruppen

überschätzt Eta-Quadrat η^2 , ein Maß für die Effektstärke bei mehreren Gruppen, systematisch die aufgeklärte Varianz [78]. Aus diesen Gründen wurde in dieser Arbeit ω^2 verwendet, um die Effektstärke zu ermitteln:

$$\omega^2 = \frac{QS_{Zwischen} - df_{zwischen} * MS_{Innerhalb}}{QS_{Gesamt} + MS_{Innerhalb}}. \quad [62]$$

Die Effektstärke ω^2 wird ohne Signifikanz angegeben und quantifiziert das Ausmaß eines empirischen Effekts. Dadurch kann sie herangezogen werden, um zu beschreiben, welche Relevanz ein Effekt in der Praxis hat [43]. Die Grenzen für die Effektstärke werden für ω^2 folgendermaßen definiert:

Tabelle 5-2: Untere Grenzen für die Effektstärke nach Cohen

$\geq 0,01$	Kleiner Effekt
$\geq 0,06$	Mittlerer Effekt
$\geq 0,14$	Großer Effekt

6. Resultate der Methodvalidierung

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Experimente dargestellt. In jedem Experiment werden andere Qualitätsparameter der Rekonstruktion betrachtet. Das Kugelmodell lässt auf einer abstrakten Ebene eine Beurteilung hinsichtlich des Einflusses des Neigungswinkels einer Oberfläche auf die Güte der Rekonstruktion zu (Kapitel 6.1). Dagegen sind im Pflanzenmodell bereits spezifische Parameter eines Weizenblattes, genauer der Blattspreite, repräsentiert, sodass dieses Referenzmodell vorwiegend die Qualität der rekonstruierten Blattparameter in den Vordergrund stellt (Kapitel 6.2). Hierbei werden alle phänotypischen Merkmale betrachtet, welche für das künstliche Blatt eindeutig definiert werden konnten. Zu diesen Merkmalen zählen: Blattbreite, Blattachsenlänge, Blattfläche und Insertionswinkel für das ebene Blatt und zusätzlich der mittlere Neigungswinkel, Insertionswinkel und die Blattwinkelverteilung für das gebogene Blatt.

6.1. Evaluation der 3D-Rekonstruktion

Das Kugelmodell wurde genutzt, um den Einfluss des Neigungswinkels der Oberfläche auf die Rekonstruktionsgenauigkeit zu überprüfen. Die folgenden Ergebnisse fassen die Rekonstruktionen aus den Stereoaufnahmen zusammen. Die Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion wurde dabei über den Abstand der rekonstruierten Punkte zur gefitteten Kugeloberfläche ($d(p, K_f)$) und die Anzahl der rekonstruierten Punkte pro sichtbare Fläche der Punktedichte in den Kreisschichten ρ_{KS} bewertet. Zur Bestimmung von ρ_{KS} wurde über die Resultate aus allen Aufnahmen gemittelt. Die Abbildungen zur Darstellung von $d(p, K_f)$ wurden basierend auf allen Datenpunkten aus allen Aufnahmen erstellt. Zusammenfassend wurden die Richtigkeit und Präzision der rekonstruierten Punkte im Verhältnis zur Kugeloberfläche bestimmt.

Unter der Annahme, dass jeder Pixel der Aufnahmen in einen 3D-Punkt umgewandelt wird, sollte 1 mm^2 Fläche durch ungefähr 80 Punkte repräsentiert werden. Maßgeblich für diese Überlegung ist die Größe des Bildausschnittes bzw. die abgebildete Grundfläche/Boden (ungefähr $37 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$) und die Bildauflösung ($3384 \times 2704 \text{ Pixel}$). In Abbildung 6-1 a) ist zu erkennen, dass die

Rekonstruktionsdichte ρ_{KS} über einen großen Winkelbereich von 0-60° nahezu konstant bei $80 \frac{\text{Punkte}}{\text{mm}^2}$ blieb. Für Neigungswinkel über 60° nahm ρ_{KS} kontinuierlich ab und für Neigungswinkel größer 75° wurden durchschnittlich weniger als $20 \frac{\text{Punkte}}{\text{mm}^2}$ rekonstruiert. Zur Beurteilung der Rekonstruktionsgenauigkeit wurden basierend auf dem Abstand $d(p, K_f)$ Richtigkeit und Präzision der rekonstruierten Punkte (Kapitel 4.1) in Abhängigkeit vom Neigungswinkel auf der Kugeloberfläche dargestellt (Abbildung 6-1 b). Maßgeblich für die Berechnung des Abstandes zwischen der Kugeloberfläche und dem rekonstruierten Punkt war der Kugelradius (Formel (48)). Es wurde deutlich, dass Richtigkeit und Präzision mit zunehmendem Neigungswinkel abnehmen. Zusätzlich ist R[%] für Neigungswinkel >10° immer positiv und lag bis zu einem Neigungswinkel von 75° bei maximal 0,73%, dies entsprach in absoluten Zahlen einer Abweichung von 0,3 mm. Für größere Neigungswinkel zeigte sich ein R[%] von 1,13-2,45%. R[%] lag in diesen Bereichen 2-3 Mal höher als für Winkel zwischen 10° und 75°. Die Präzision gab Aufschluss darüber, wie groß die zufälligen Fehler bei den Messungen waren. Hieraus ließen sich auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ableiten. Es war zu erkennen, dass die Reproduzierbarkeit bis zu einem Neigungswinkel von 45° nur geringfügig schwankt (Abbildung 6-1 b). Für größere Neigungswinkel nahm sie kontinuierlich ab. Insgesamt lag P[%] auf einem niedrigen Niveau zwischen 0,65 % und 1,88 %. Die Rekonstruktion der Kugel erfolgte bis zu einem Neigungswinkel von 75° mit einer sehr hohen Genauigkeit von 2,61 %. Über diesen Winkelbereich hinaus nahmen sowohl die Richtigkeit und Präzision als auch die Punktedichte ab. Hierdurch wurde die Rekonstruierbarkeit der Oberfläche negativ beeinflusst.

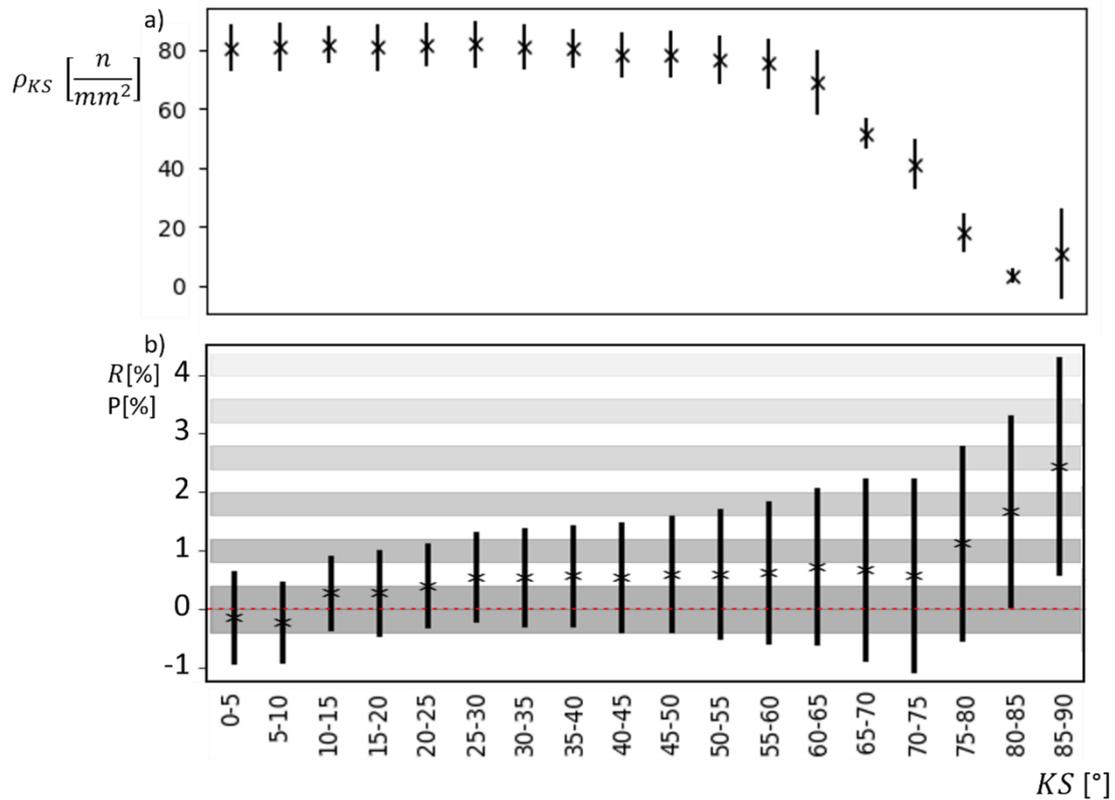


Abbildung 6-1: **Resultate der Methodenevaluierung für die rekonstruierte Punktwolke**

a) Durchschnittlich rekonstruierte Punktedichte für die unterschiedlichen Neigungswinkel auf der Kugeloberfläche. Die Resultate wurden über alle Punkte und Aufnahmen gemittelt. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung dar. Ab einem Neigungswinkel $>65^\circ$ nimmt die Dichte der rekonstruierten $\frac{\text{Punkte}}{mm^2}$ deutlich ab. b) Zeigt die Analyse der Genauigkeit für die rekonstruierten 3D-Punkte. Die grauen Bereiche stellen die Auflösungsgrenzen dar und der Referenzwert liegt bei 0 (rote Linie). Das x Kennzeichnet den Wert für R[%] und die Fehlerbalken zeigen den zugehörigen P[%] Wert an. Ab einem Neigungswinkel $>75^\circ$ befinden sich die Werte für R[%] außerhalb der zweiten Auflösungsgrenze (=2% Abweichung vom Referenzwert), hier zeigt sich eine systematische Abweichung der Messwerte vom Referenzwert.

6.2. Evaluation der berechneten Blattparameter

Das künstliche Pflanzenmodell wurde genutzt, um die Modellierung der Blätter hinsichtlich der geometrischen Parameter i) Blattbreite, ii) Blattsachsenlänge, iii) Blattfläche, iv) Insertionswinkel, v) Mittlerer Neigungswinkel und die daraus resultierende vi) Blattwinkelverteilung zu evaluieren. Die ermittelten Parameter wurden mit den Referenzwerten (Kapitel 4.2.2. und 4.3.2) verglichen, bzw.

Richtigkeit und Präzision berechnet (Kapitel 4.1). Insgesamt bestand der analysierte Datensatz aus ursprünglich 28 Aufnahmen für das planare Blattmodell und 24 Aufnahmen für das gebogene Blattmodell. Drei Rekonstruktionen des planaren Blattmodells wurden nicht in die Analyse mit einbezogen, weil diese hinsichtlich der Blattbreite bzw. Achsenlänge stark von den anderen Messdaten abwichen. Diese Abweichungen kamen durch eine ungünstige Färbung der Blattoberfläche zustande, welche zu nicht rekonstruierbaren Bereichen an der Blattbasis führten. Somit stützte sich die Analyse der Blattparameter insgesamt auf 49 Modellierungen. In dem Datensatz aus 49 Modellierungen wurden Ausreißer für die einzelnen Parameter mittels der von John Wilder Tukey aufgestellten $1.5 * IQR - Regel$ definiert [79]. Die Resultate für alle Blattparameter sind im Anhang aufgeführt.

6.2.1. Blattbreite

Als Referenzwert für die Blattbreite diente die maximale Blattbreite des künstlichen Blattes (11 mm). Für die Richtigkeit wurde der prozentuale Fehler zwischen rekonstruierter und Referenzbreite bestimmt. Die Berechnung erfolgte basierend auf 27 Aufnahmen (alle des planaren Blattmodells und für Modell 1 des gebogenen Blattes). 15 % der Messungen wurden somit als Ausreißer definiert.

Die Ergebnisse lagen zwischen 9,07 mm und 19,39 mm, mit einem Mittelwert bei 11,3 mm und einer Standardabweichung von 2,3 mm. Unter Beachtung aller Daten wurde die Blattbreite im Durchschnitt leicht überschätzt. Die $1.5 * IQR - Regel$ beschrieb für die Blattbreite 4 Ausreißer (Abbildung 6-2). Nachdem diese Ausreißer aus dem Datensatz entfernt wurden, betrug der Mittelwert der rekonstruierten Blattbreiten $\mu = 10,58$ mm und die Standardabweichung lag bei $\mu = 1,1$ mm. Die bereinigten Daten zeigten im Mittel eine leichte Unterschätzung der Blattbreite.

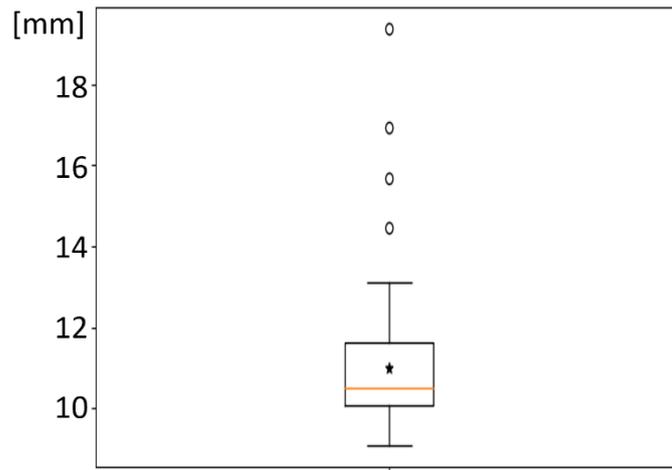


Abbildung 6-2: **Boxplot zur rekonstruierten Blattbreite**

Der Boxplot zeigt die rekonstruierten Blattbreiten. In der Abbildung sind 3 Ausreißer zu erkennen, bei denen die rekonstruierte Blattbreite deutlich über dem Referenzwert von 11 mm liegt. Der Referenzwert ist mit einem schwarzen Stern markiert und die rote Linie markiert den Median (11,5 mm), der eine Unterschätzung von 4,5% aufweist.

Aus den berechneten Mittelwerten und Standardabweichungen ergaben sich für die in Kapitel 4.1 definierten Genauigkeitsparameter ein R[%]=3% und ein P[%]=21% (Tabelle 6-1). Nach Ausschluss der Ausreißer ergaben die korrigierten Werte ein R[%]=3,8% und ein P[%]=10%. Die Ausreißer verschoben den Mittelwert zum Referenzwert. Das bedeutet: Die Ausreißer korrigierten den systematischen Fehler, sodass R[%] unter Einbezug der Ausreißer kleiner war als ohne die Ausreißer.

Tabelle 6-1: **Resultate der rekonstruierten Blattbreite**

Die Blattbreite des künstlichen Blattmodells war bekannt, sodass Richtigkeit und Präzision sowie systematischer und nicht-systematischer Fehler berechnet werden konnten.

Maximale Breite	Referenz [mm]	μ [mm]	σ [mm]	R[%]	P[%]	MAE _s [mm]	MAE _u [mm]
Vollständige Daten	11	11,33	2,32	3	21	0,33	1,66
Ohne Ausreißer		10,58	1,1	3,8	10		

Für die Berechnung der Blattbreite wurde eine Genauigkeit von 24% bzw. 13,8% ermittelt. Der systematische Fehler MAE_s war mit 0,33 mm sehr gering und um ein Vielfaches kleiner als der nicht-systematische Fehler (1,66 mm).

6.2.2. Blattsachsenlänge

Das Vorgehen für die Bestimmung der Genauigkeit der Blattbreite wurde auch für die Evaluation der rekonstruierten Blattsachsenlängen verwendet. Der Referenzwert betrug in diesem Fall 150 mm und für die Berechnung wurden ebenfalls 27 Aufnahmen verwendet. Die ermittelten Blattsachsenlängen lagen zwischen 114,4 mm und 164,2 mm, mit einem Mittelwert von 152,2 mm und einer Standardabweichung von 10,62 mm. Der Boxplot zeigt deutlich, dass auch bei diesem Parameter 2 deutliche Ausreißer (7,4% der Daten) zu finden sind (Abbildung 6-3). Die Auswertung der bereinigten Daten zeigte einen Mittelwert von 158,4 mm und eine Standardabweichung von 6,5 mm. Sowohl mit als auch ohne Ausreißer wurde die Länge der Blattsache leicht überschätzt.

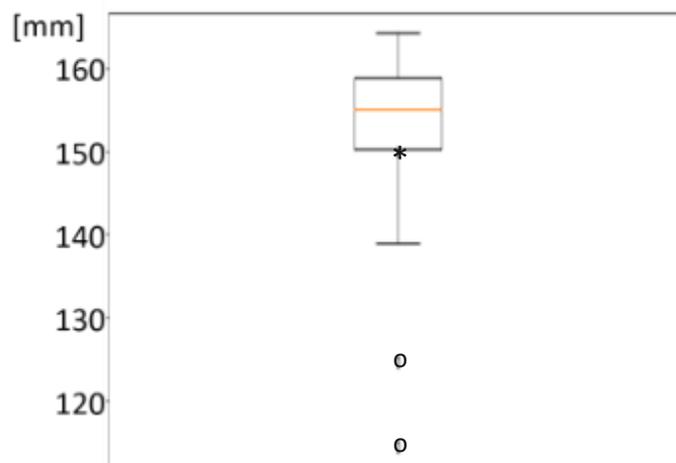


Abbildung 6-3: **Boxplot zur rekonstruierten Blattsachsenlänge**

Der Boxplot zeigt die rekonstruierte Blattsachsenlänge aus 27 Stereoaufnahmen. In der Abbildung sind 2 Ausreißer zu erkennen, bei denen die Blattsachsenlänge deutlich unter dem Referenzwert von 150 mm liegt. Der Referenzwert ist mit einem schwarzen Stern markiert und die rote Linie markiert den Median (155 mm), der eine Überschätzung von 3,3% aufweist.

Für die Richtigkeit R[%] wurde ein Wert von 1,5% und für die Präzision P[%] ein Wert von 7,1% ermittelt, wenn alle Daten ausgewertet wurden (Tabelle 6-2). Nachdem die Ausreißer aus dem

Datensatz entfernt wurden, stieg R[%] auf 2,9% und P[%] fiel auf 4%. Ähnlich wie bei der Blattbreite korrigierten die Ausreißer bei der Berechnung der Blattachsenlänge den systematischen Fehler.

Tabelle 6-2: Resultate der rekonstruierten Blattachsenlänge

Basierend auf den rekonstruierten Blattachsenlängen und dem Referenzwert wurden Richtigkeit und Präzision sowie systematischer und nicht-systematischer Fehler berechnet.

Blattachsenlänge	Referenz [mm]	μ [mm]	σ [mm]	R[%]	P[%]	MAE _s [mm]	MAE _u [mm]
Vollständige Daten	150	152,2	10,62	1,5	7,1	2,22	7,4
Ohne Ausreißer		158,4	6,5	2,9	4		

Für die Berechnung der Blattachsenlänge wurde eine Genauigkeit von 8,6% bzw. 6,9% berechnet. Auch in diesem Fall wurde R[%] ohne Ausreißer größer. Das bedeutet: Die Richtigkeit war höher, wenn die Ausreißer in der Berechnung eingeschlossen waren. Der systematische Fehler lag bei 2,22 mm und der nicht-systematische Fehler bei 7,4 mm. Insgesamt lag der systematische Fehler auch hier im unteren einstelligen Millimeterbereich und war deutlich kleiner als der nicht-systematische Fehler.

6.2.3. Blattfläche

Für die Berechnung der Blattfläche wurden Werte zwischen 727 mm² und 1469 mm² berechnet und der Boxplot zeigt 3 Ausreißer (11 %) mit Blattflächen kleiner 1100 mm² (Abbildung 6-4). Für den kompletten Datensatz lagen Mittelwert und Standardabweichung bei $\mu=1332$ mm² und $\sigma=157,7$ mm². Mit den bereinigten Daten wurde im Mittel eine Blattfläche von 1375 mm² rekonstruiert. Die Standardabweichung betrug in diesem Fall 74,3 mm².

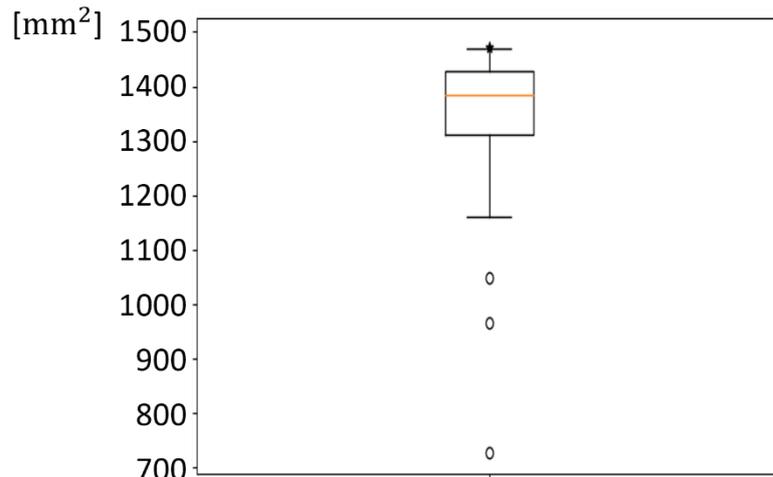


Abbildung 6-4: **Boxplot zur rekonstruierten Blattfläche**

Der Boxplot zeigt die rekonstruierte Blattflächen. Es sind 3 Ausreißer zu erkennen, bei denen die Blattfläche deutlich unter dem Referenzwert von 1528 mm² liegt. Der Referenzwert ist mit einem schwarzen Stern markiert und die rote Linie markiert den Median (1384,5 mm²) der eine Unterschätzung von 9,4% aufweist.

Die Blattfläche wurde mit einem R[%]=12,8% und einem P[%] =10,3% berechnet, wenn alle Daten mit einbezogen wurden. Ohne die Ausreißer verbesserten sich diese Werte und lagen bei R[%]=10,% und P[%]=4,8% (Tabelle 6-3). Bei den Ausreißern wurde die Blattfläche deutlich unterschätzt, sodass ohne Ausreißer eine höhere Richtigkeit und Präzision berechnet wurde.

Tabelle 6-3: **Resultate der rekonstruierten Blattfläche**

Mit Hilfe der rekonstruierten Blattflächen und dem Referenzwert wurden Richtigkeit und Präzision sowie systematischer und nicht-systematischer Fehler berechnet für die Blattflächenrekonstruktion berechnet.

Blattfläche	Referenz [mm ²]	μ [mm ²]	σ [mm ²]	R[%]	P[%]	MAE _s [mm]	MAE _u [mm]
Vollständige Daten	1528	1332	157,7	12,8	10,3	195,8	107,6
Ohne Ausreißer		1375	74,3	10,0	4,8		

Im Gegensatz zu den anderen Parametern zeigt sich bei der Blattfläche eine größerer systematischer Fehler, als nicht-systematischer Fehler und auch R[%] ist deutlich größer, als P[%]. Dies bedeutet, dass

bei der Berechnung der Blattfläche systematische Fehler zu erwarten sind, dies muss jedoch nicht zu einer schlechteren Rekonstruktion der Blattwinkelverteilung führen.

6.2.4. Insertionswinkel

Die Evaluation der rekonstruierten Insertionswinkel wurde auf Basis der mittleren Fehler und Standardabweichung vorgenommen. Zusätzlich wurde der *Concordance-Correlation-Coefficient* nach Lin [80] für die Referenzwerte und rekonstruierten Werte bestimmt. Die Berechnung von Richtigkeit und Präzision erfolgte für den Insertionswinkel mit Hilfe der absoluten Werte.

Bei dem planaren Blattmodell bleibt der Neigungswinkel über die gesamte Blattlänge konstant. Aus diesem Grund entspricht der Insertionswinkel in diesem Fall dem Neigungswinkel über die gesamte Blattlänge. Bei dem gebogenen Blattmodell muss der Insertionswinkel separat berechnet werden.

Die rekonstruierten Neigungswinkel für das planare Blattmodell wurden in Abhängigkeit zum tatsächlichen Neigungswinkel aufgetragen (Abbildung 6-5) und mit Hilfe des *Concordance-Correlation-Coefficient* nach Lin [80] bewertet. Mit einem Korrelations-Koeffizienten von 99,6 % ($p\text{-Wert} = 1,5 * 10^{-29}$) war eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen rekonstruiertem und tatsächlichem Neigungswinkel gegeben.

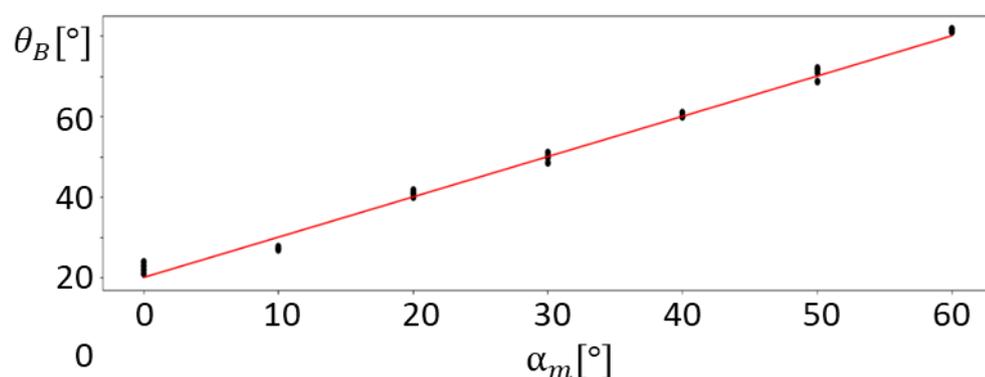


Abbildung 6-5: **Darstellung der rekonstruierten Insertionswinkel**

Rekonstruierte Neigungswinkel θ_B für eine flaches künstliches Blatt im Vergleich zu den tatsächlichen Neigungswinkeln α_m .

Die Auswertung ergab einen Korrelations-Koeffizienten von 99,6 % ($p\text{-Wert} = 1,5 * 10^{-29}$). Die rote Linie kennzeichnet die 1:1

Linie.

Der mittlere Fehler zwischen rekonstruiertem und tatsächlichem Neigungswinkel betrug $R=-0,5^\circ$, mit einer Standardabweichung von $P=1,72^\circ$ (Tabelle 6-4). Bei diesem Experiment konnten keine Ausreißer gefunden werden.

Tabelle 6-4: Resultate der rekonstruierten Neigungswinkel am planaren Blatt

Der Neigungswinkel am planaren Blatt ist konstant und entspricht dem Insertionswinkel. Basierend auf den rekonstruierten Neigungswinkel und dem gemessenen Insertionswinkel wurden Richtigkeit und Präzision sowie systematischer und nicht-systematischer Fehler berechnet.

Neigungswinkel (planar)	R [°]	P [°]
Vollständige Daten	0,5	1,72

Die Berechnung des Neigungswinkels für ein planares Blatt erfolgte mit einer Genauigkeit von $2,22^\circ$.

Die Berechnung der Neigungswinkel konnte mit einer sehr hohen Genauigkeit erfolgen. Dies zeigt sowohl der *Concordance-Correlation-Coefficient* als auch die hohe Richtigkeit und Präzision.

Im nächsten Schritt wurde der rekonstruierte Insertionswinkel für das gebogene Blatt analysiert. Der verwendete Datensatz umfasste 24 Rekonstruktionen (6 Modelle mit unterschiedlichen Insertionswinkeln und Biegungsradien, Tabelle 4-2), wobei 4 (17%) als Ausreißer definiert wurden. Für die Auswertung wurde die mittlere Abweichung zwischen rekonstruierten Insertionswinkel und dem eingestellten Insertionswinkel berechnet. Zunächst wurde der berechnete Insertionswinkel gegen den Referenzwert aufgetragen und der *Concordance-Correlation-Coefficient* von 76,9 % ($p\text{-Wert} = 5,11 \cdot 10^{-6}$) ermittelt (Abbildung 6-6).

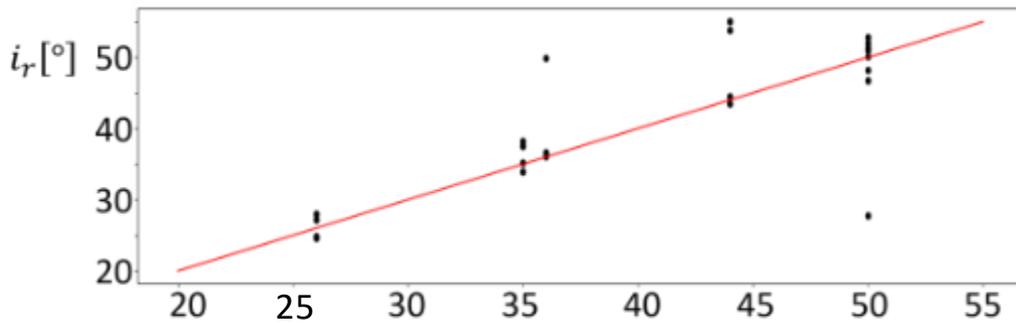


Abbildung 6-6: **Darstellung der rekonstruierten Insertionswinkel bei gebogenen Blättern**

Rekonstruierte Insertionswinkel θ_B für eingebogenes künstliches Blatt im Vergleich zu den tatsächlichen Insertionswinkeln α_m .

Der rekonstruierte Insertionswinkel ist gegen den zugehörigen Referenzwert aufgetragen. Die Auswertung ergab einen Korrelations-Koeffizienten von 76,9 % (p -Wert = $5,11 \cdot 10^{-6}$). Die rote Linie kennzeichnet die 1:1 Linie. 4 Messwerte weichen deutlich von der 1:1 Linie ab.

Der mittlere Fehler für die Berechnung des Insertionswinkels betrug $R = -0,9^\circ$ mit $P = 6,3^\circ$ (Tabelle 6-5).

Die Berechnung des Insertionswinkels für gebogene Blätter erforderte die Identifizierung der Blattbasis und der Blattspitze und ist aus diesem Grund besonders fehleranfällig. Eine starke Abweichung zwischen rekonstruierten und tatsächlichem Insertionswinkel kann durch zwei Effekte begründet sein.

1.) Die Blattbasis wurde nicht vollständig rekonstruiert, oder 2.) Blattspitze und Blattbasis wurden vertauscht. Derartige Effekte zeigten sich bei 4 rekonstruierten Winkeln. Nachdem diese aus dem Datensatz entfernt wurden, lag R bei $-0,4^\circ$ und die P bei $1,5^\circ$.

Tabelle 6-5: **Resultate der berechneten Insertionswinkel am gebogenen Blatt**

Richtigkeit und Präzision sowie systematischer und nicht-systematischer Fehler wurden für den Insertionswinkel am gebogenen Blattmodell berechnet.

Insertionswinkel	R [°]	P [°]
Vollständige Daten	0,9	6,3
Ohne Ausreißer	0,4	1,5

Insgesamt lag die Genauigkeit für die Berechnung des Insertionswinkels bei einem gebogenen Blatt bei 7,2° bzw. 1,9°. Unter der Voraussetzung, dass die Blattbasis vollständig rekonstruiert wurde und die Blattspitze richtig zugeordnet wurde, konnte der Insertionswinkel mit einer ähnlichen Genauigkeit bestimmt werden wie für das planare Blattmodell.

Die Berechnung des Insertionswinkels war mit einer sehr hohen Genauigkeit möglich. Ein geringer *Concordance-Correlation-Coefficient* von 76,9 % und eine schlechtere Reproduzierbarkeit der Daten ($P[\text{°}] = 6,3$) wurde durch unvollständige Rekonstruktionen der Blattbasis oder falsche Zuordnungen der Blattspitze hervorgerufen.

Abschließend wurde der systematische und nicht-systematische Fehler für den Insertions- bzw. Neigungswinkel berechnet (Tabelle 6-6).

Tabelle 6-6: systematische und nicht-systematische Fehler für Neigungs- und Insertionswinkel am planaren und gebogenen Blattmodell

Der Neigungswinkel am planaren Blatt und der Insertionswinkel am gebogenen Blattmodell wurden gemeinsam betrachtet und mit Hilfe der Referenzwerte wurden Richtigkeit und Präzision sowie systematischer und nicht-systematischer Fehler berechnet.

Neigungswinkel-/Insertionswinkel	MAE _s [mm]	MAE _u [mm]
	0,5	1,3

Kombiniert lag der systematische Fehler für die Berechnung des Neigungs- bzw. Insertionswinkel bei 0,5° und der nicht-systematische Fehler bei 1,3°.

6.2.5. Mittlerer Neigungswinkel

Die Auswertung des rekonstruierten mittleren Neigungswinkels erfolgte nach dem gleichen Schema wie für den Insertionswinkel mittels der absoluten Werte für R und P. Der Datensatz umfasste 24 Rekonstruktionen des gebogenen Blattmodells. Die Analyse mittels *Concordance-Correlation-*

Coefficient ergab eine Übereinstimmung von 95,1% (p -Wert= $5,34 \cdot 10^{-16}$) zwischen berechnetem und tatsächlichem mittlerem Neigungswinkel für die künstlichen Blätter (Abbildung 6-7).

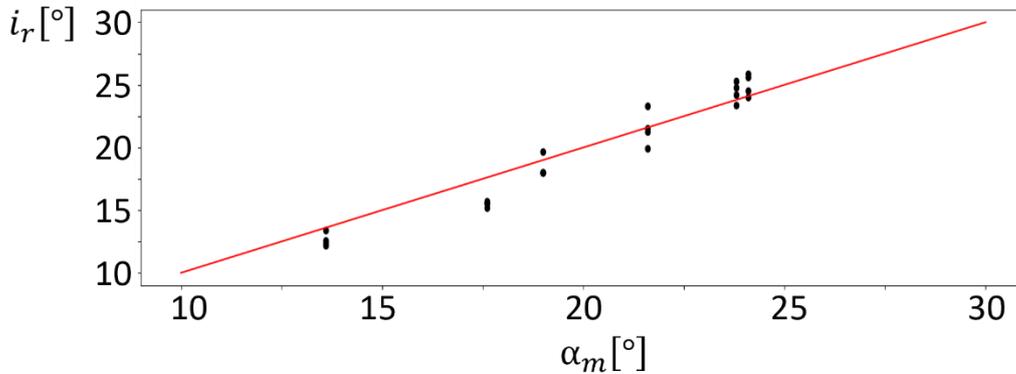


Abbildung 6-7: **Darstellung der rekonstruierten mittleren Blattwinkel bei gebogenen Blättern**

Rekonstruierte mittlere Blattwinkel θ_B für eingebogenes künstliches Blatt im Vergleich zu den tatsächlichen mittleren Blattwinkeln α_m . Die Auswertung ergab einen Korrelations-Koeffizienten von 95,1% (p -Wert = $5,34 \cdot 10^{-16}$). Die rote Linie kennzeichnet die 1:1 Linie.

Für den rekonstruierten mittleren Neigungswinkel und den zugehörigem Referenzwert konnten für die Richtigkeit und Präzision Werte von R [°]=0,4 und P [°]=1,3 berechnet werden (Tabelle 6-7). Für diesen Datensatz wurden keine Ausreißer gefunden. Die Werte zeigen ebenfalls eine hohe Übereinstimmung mit den zuvor ermittelten Werten für den Insertionswinkel.

Tabelle 6-7: **Resultate der rekonstruierten mittleren Neigungswinkel am gebogenen Blatt**

Der mittlere Neigungswinkel am gebogenen Blatt kann mit Hilfe der Blattwinkelverteilung ermittelt werden. Richtigkeit und Präzision sowie systematischer und nicht-systematischer Fehler für den mittleren Neigungswinkel wurden mit Hilfe der Referenzwerte ermittelt.

Mittlere Neigungswinkel	R [°]	P [°]	MAE_s [mm]	MAE_u [mm]
Vollständige Daten	0,4	1,3	1,1	3,3

Der mittlere Neigungswinkel konnte mit einer Genauigkeit von $1,7^\circ$ bestimmt werden, die hohe Genauigkeit wurde durch den hohen *Concordance-Correlation-Coefficient* und den geringen systematischen Fehler von $1,1^\circ$ gestützt. Der nicht-systematische Fehler lag für den mittleren Neigungswinkel bei $3,3^\circ$.

6.2.6. Blattwinkelverteilung

Die Analyse der rekonstruierten Blattwinkelverteilung erfolgt exemplarisch für Modell 1. Zu den anderen Modellen wird eine kurze Zusammenfassung gegeben. Alle Daten zu diesen Modellen befinden sich in diesem Kapitel und im Anhang.

Für die Berechnung der Blattwinkelverteilung wurde in einem ersten Schritt analysiert, ob die Zuordnung der Neigungswinkel entlang der Blattachse auch den Referenzwerten entsprach. Die Gegenüberstellung von berechneten und rekonstruierten Neigungswinkeln zeigte, dass die Winkelverläufe sehr ähnlich waren (Abbildung 6-8 a)). Als einziger offensichtlicher Unterschied fielen die nicht rekonstruierten Blattspitzen auf. Die Differenz zwischen rekonstruierten und berechneten Winkeln wurde ebenfalls für jede Position entlang der Blattachse berechnet und lag in einem Fehlerbereich von $-2^\circ - +2^\circ$ (Abbildung 6-8 b)). Ausreißer stellten die starken Abweichungen für Rek_3, Rek_4 in den Übergangsbereichen zur (nicht rekonstruierten) Blattspitze dar. Durch die fehlende Blattspitze könnte es hier zu Artefakten in der Modellierung gekommen sein.

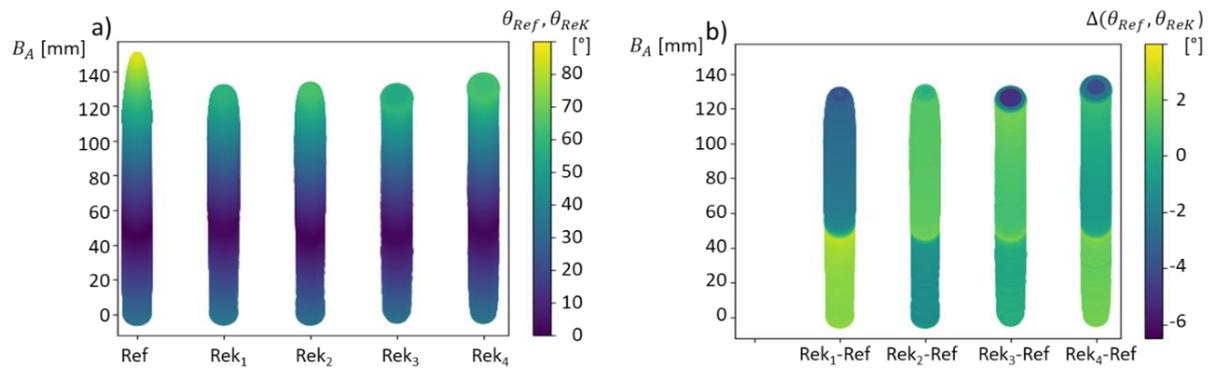


Abbildung 6-8: **Darstellung rekonstruierter Blattwinkel entlang der Blattachse**

a) Rekonstruierte Neigungswinkel projiziert auf die rekonstruierte Blattscheide entlang der Blattachse. Die Blattscheide wird durch Kreise repräsentiert, deren Durchmesser der ermittelten Blattbreite an der entsprechenden Blattachsenposition entspricht. b) Unterschied zwischen rekonstruiertem Neigungswinkel und Referenzwert für die einzelnen Positionen entlang der Blattachse.

Aufbauend auf dieser Analyse wurde im nächsten Schritt die Blattwinkelverteilung betrachtet. Die Blattwinkelverteilungen konnten nur korrekt berechnet werden, wenn der Neigungswinkel für jede Achsenposition und auch die Blattfläche an der entsprechenden Position korrekt rekonstruiert wurde. Bei einer konstanten, systematischen Über- oder Unterschätzung der Blattfläche entlang der Blattachse kann die Rekonstruktion der Blattwinkelverteilung mit einer hohen Genauigkeit erfolgen. Die Referenzverteilung für Modell 1 (Tabelle 4-2) zeigte einen markanten Abfall der Auftretswahrscheinlichkeit für Winkel $> 35^{\circ}$ (Abbildung 6-9 (rot)). Dieser charakteristische Verlauf lag in der gekrümmten Blattform und dem Insertionswinkel von 35° begründet. Neigungswinkel zwischen 0° und 35° fanden sich zweimal entlang der Blattachse, sodass ihre Auftretswahrscheinlichkeit etwa doppelt so groß war wie für Winkel $> 35^{\circ}$. Eine Ausnahme war in diesem Zusammenhang der Neigungswinkel von 0° , welcher den Scheitelpunkt für die Neigungswinkel darstellte und somit auch nur einfach entlang der Blattachse vorkam. Die Wahrscheinlichkeit für einen Neigungswinkel von 0° war somit ungefähr halb so groß wie die Wahrscheinlichkeit für größere Winkel bis 35° . Insgesamt wurde das Blatt zur Spitze hin immer schmaler. Aufgrund dieser Tatsache nahm auch die Blattfläche

entlang der Blattachse immer weiter ab, was zu einer abnehmenden Auftrittswahrscheinlichkeit für immer größere Winkel führte (die Verteilungsfunktion fällt leicht ab).

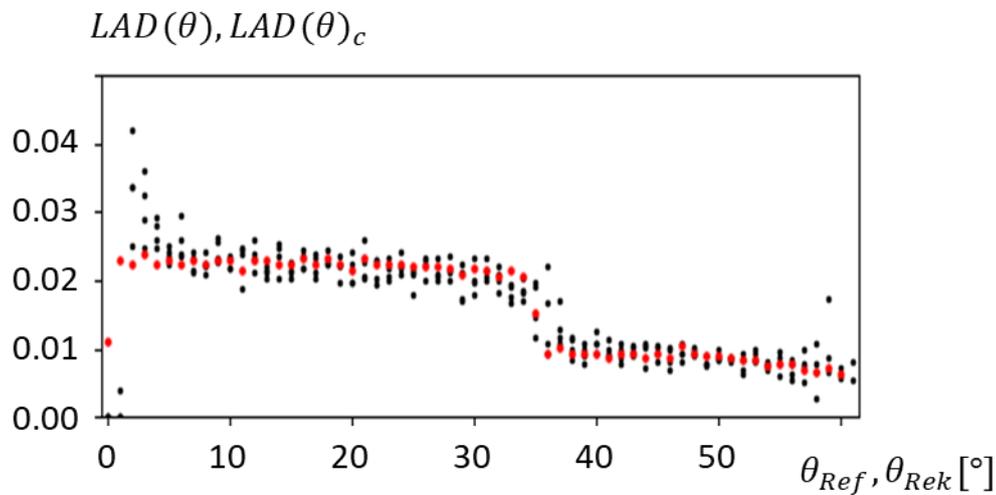


Abbildung 6-9: **Darstellung rekonstruierter Blattwinkelverteilungen**

Blattwinkelverteilungen für die Referenzrechnung (rot) und die Aufnahmen des Pflanzenmodells (schwarz). Der markante Verlauf der Referenzverteilung (rot) wird durch die gekrümmten Blattachse und den Insertionswinkel von 35° erzeugt. Die Auftrittswahrscheinlichkeit für Neigungswinkel zwischen 0° und 35° ist etwa doppelt so groß ist, wie für Winkel $> 35^\circ$.

Die Verteilungsfunktion des zuvor rekonstruierten Blattmodells zeigte einen ähnlichen Verlauf wie die Referenzkurve. Dies bedeutete, dass die Fläche, die einem bestimmten Winkel zugeordnet wurde, im Wesentlichen mit der tatsächlichen Fläche übereinstimmte. Es waren einzelne teilweise etwas stärkere Abweichungen für Neigungswinkel $< 6^\circ$ und Neigungswinkel $> 57^\circ$ sowie geringfügige Abweichungen für den Umschlagpunkt bei 35° zu erkennen. Dieser Bereich kennzeichnet α und gibt somit Hinweise auf die Rekonstruktion der Blattbasis. Eine genaue Betrachtung der kleinen Winkelbereiche zeigte, dass nahezu keine Fläche mit einem Neigungswinkel zwischen 0° und 2° rekonstruiert wurde. Stattdessen wurde zu viel Fläche mit Neigungswinkeln zwischen 3° und 6° rekonstruiert. Für die einzelnen Winkel konnte zudem bestimmt werden, wie groß der Fehler bei ihrer Berechnung unabhängig von der Achsenposition war (Abbildung 6-10).

Die Abbildung zeigt ebenfalls, dass die Winkel mit einer Abweichung von $\pm 2^\circ$ bestimmt werden konnten. Wie in Abbildung 6-9 ist zu erkennen, dass Winkel $< 3^\circ$ einen höheren Fehler aufwiesen als größere Winkel.

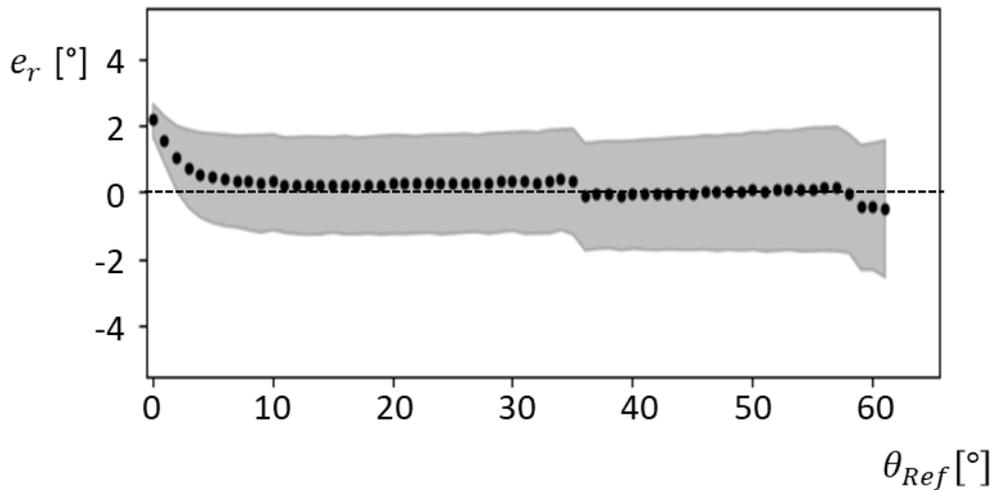


Abbildung 6-10: **Darstellung der winkelspezifischen mittleren Fehler und Standardabweichungen.**

Der mittlere Fehler und die zugehörige Standardabweichung (grau) in Abhängigkeit vom rekonstruierten Winkel bewegen sich in einem Bereich von $\pm 2^\circ$. Für alle Neigungswinkel $> 1^\circ$ ist der mittlere Fehler deutlich unter 1° . Die Standardabweichung ist bei kleinen Neigungswinkeln sehr gering und nimmt mit steigendem Neigungswinkel leicht zu.

Zur quantitativen Beurteilung der rekonstruierten Neigungswinkel innerhalb der Blattwinkelverteilung wurden $R[^\circ]$ und $P[^\circ]$ über alle Winkel berechnet (Tabelle 6-8). Die ermittelten Werte bewegen sich in einer ähnlichen Größenordnung, wird die Ergebnisse für das planare Blattmodell (Tabelle 6-4).

Tabelle 6-8: **Resultate der rekonstruierten Neigungswinkel für die Blattwinkelverteilung eines gebogenen Blattes**

Für die rekonstruierten Neigungswinkel am gebogenen Blatt wurden Richtigkeit und Präzision berechnet.

Blattwinkel	$R [^\circ]$	$P [^\circ]$
	0,21	1,55

Die Neigungswinkel konnten mit einer Richtigkeit von $R[^\circ]=0,21$ und einer Präzision von $P[^\circ]=1,55$ bestimmt werden. Daraus ergab sich, dass die Neigungswinkel innerhalb der Blattwinkelverteilung für Modell 1 mit einer Genauigkeit von $1,76^\circ$ bestimmt werden konnten. Für die Blattwinkelverteilung wurden der systematische und nicht-systematische Fehler nicht berechnet.

In Abbildung 6-11 sind für die Modelle 2-6 äquivalente zu Abbildung 6-8 (Abbildung 6-11 A), Abbildung 6-9 (Abbildung 6-11 B) und Abbildung 6-10 (Abbildung 6-11 C) dargestellt. Auch hier zeigt die Gegenüberstellung von berechneten und rekonstruierten Neigungswinkeln, dass die Winkelverläufe sehr ähnlich waren. In Abbildung 6-11 e) ist zu erkennen, dass für Modell 6 zu kurze Blattachsen rekonstruiert wurden (Referenz 150 mm). Insbesondere die 3. Rekonstruktion repräsentierte mit ca. 100 mm nur etwa $\frac{2}{3}$ der gesamten Blattlänge. Die Darstellung der winkelspezifischen mittleren Fehler und Standardabweichungen zeigte für alle Modelle bis zu einem Winkel von 3° einen höheren Fehler als für die anderen Winkel. Dieser Effekt fand sich in allen Rekonstruktionen. Die Auftragung der Blattwinkelverteilungen für die Referenzrechnung und die Aufnahmen des Pflanzenmodells zeigten, dass der Umschlagpunkt bei den Modellen 3, 4 und 6 in den Rekonstruktionen sehr ausgeprägt zu erkennen ist. Bei Modell 3 (Abbildung 6-11 b)) war in den Referenzdaten ein Umschlagpunkt bei 36° zu erkennen. In den Rekonstruktionen nahmen die Flächenanteile bereits ab einem Winkel von 28° stärker ab als in der Referenz. Bei den Modellen 3 und 6 (Abbildung 6-11 c) und e)) zeigten die Referenzdaten keinen Umschlagpunkt, sondern einen kontinuierlichen Abfall der Blattflächenanteile. Zusätzlich wurde bei fast allen Modellen der Anteil der Flächen mit einem geringen Neigungswinkel überschätzt. Dies zeigte sich daran, dass die Punkte der rekonstruierten Flächenanteile sich oberhalb der Punkte für die Referenz befanden. Die einzige Ausnahme stellte Modell 5 dar. Bei Modell 5 wurden die Flächenanteile für Winkel zwischen 0° und 8° unterschätzt. Richtigkeit und Präzision wurden bei den Modellen 2-6 für jede einzelne Rekonstruktion berechnet. Die Resultate stimmen mit denen für Modell 1 überein und sind im Anhang zu finden.

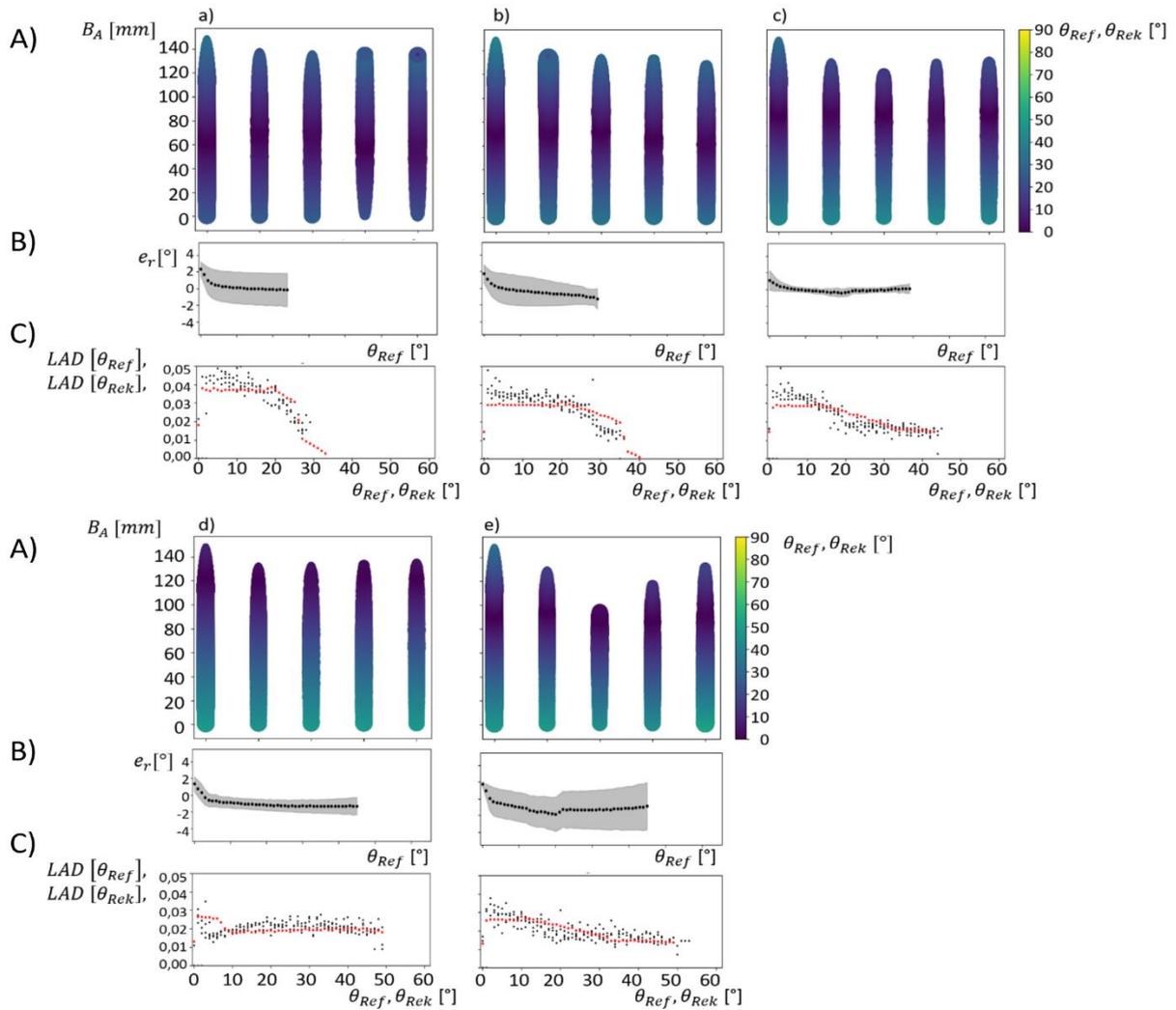


Abbildung 6-11: Rekonstruierte Neigungswinkel entlang der Blattachse

A) Rekonstruierte Neigungswinkel projiziert auf die rekonstruierte Blattscheide entlang der Blattachse. Die Blattscheide wird durch Kreise repräsentiert, deren Durchmesser der ermittelten Blattbreite an der entsprechenden Blattachsenposition entspricht. B) Der mittlere Fehler und Standardabweichung (grau) in Abhängigkeit vom rekonstruierten Winkel. C) Die Blattwinkelverteilungen für die Referenzrechnung (rot) und die Aufnahmen des Pflanzenmodells (schwarz) für unterschiedliche Kombinationen aus Biegungsradius und Insertionswinkel. a) $r_b = 155 \text{ mm}, \alpha = 26,0^\circ$, b) $r_b = 125 \text{ mm}, \alpha = 36,0^\circ$, c) $125 \text{ mm}, \alpha = 44,0^\circ$, d) $r_b = 155 \text{ mm}, \alpha = 50,0^\circ$, e) $r_b = 115 \text{ mm}, \alpha = 50,0^\circ$.

7. Resultate Case Study: Feldexperiments

Für die Rekonstruktion realer Weizenpflanzen sind als weitere geometrische Eigenschaften auch die Blatttorsion sowie Verdeckungen zu berücksichtigen. Diese Eigenschaften wurden nicht spezifisch mit dem Pflanzenmodell analysiert. Aus diesem Grund werden im Folgenden exemplarisch einige Rekonstruktionen von Blättern aus Feldaufnahmen diskutiert (Kapitel 7.1.). Die Rekonstruktionen wurden nicht mathematisch, sondern visuell beurteilt. Abschließend wird eine Auswertung des Feldexperimentes vorgenommen. Hierbei wird sowohl auf die Eigenschaften der verschiedenen Getreidesorten als auch auf den Einfluss der Aussaatstärke auf die Kronendachstruktur eingegangen. Beide Phänomene werden in den folgenden Kapiteln entsprechend der mathematisch/statistischen Betrachtung als „Effekt“ beschrieben

7.1. Rekonstruktion natürlicher Weizenblätter

Die rekonstruierten Blätter aus Abbildung 7-1 zeigen beispielhaft, dass Blattmodell und Fitting-Verfahren geeignet sind, um Weizenblätter zu repräsentieren. In den Beispielen werden die Blattkanten durch die Funktionen abgebildet und der Blattverlauf über die Blattachse modelliert. In Abbildung 7-1 a) ist zu erkennen, wie durch die 3D-Rekonstruktion auch die Lagebeziehung zwischen den beiden Blättern nachvollzogen wird. Das Blatt in Abbildung 7-1 b) wird in einem kurzen Abschnitt durch ein anderes Blatt verdeckt. An dieser Stelle konnten keine Punkte rekonstruiert werden. Das Blattmodell interpoliert die Blattkanten und Blattachse in diesem Bereich.

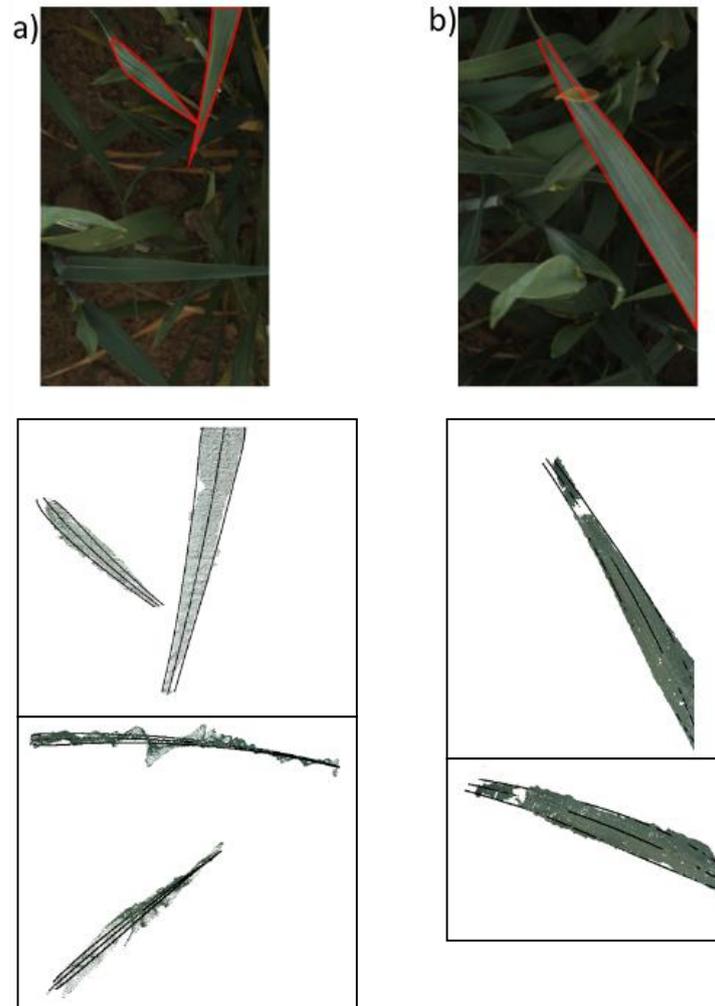


Abbildung 7-1: Beispiele zur Blattrekonstruktion von Weizenblättern aus Aufnahmen unter Feldbedingungen

In der Feldaufnahme wurden die rekonstruierten Blätter rot umrandet. Die Aufnahmen sind Ausschnitte aus den Stereoaufnahmen, aus denen die Rekonstruktion der 3D-Punktwolken erfolgte. Die rekonstruierten 3D-Punktwolken sind gemeinsam mit den Blattkanten (schwarz) und der Blattachse (schwarz) für jedes Blatt aus zwei unterschiedlichen Perspektiven dargestellt.

Die Rekonstruktion von Weizenblättern im Bestand aus Stereoaufnahmen zeigte neben den bereits untersuchten Eigenschaften wesentliche Merkmale, welche durch die Interaktion der Pflanzen entstehen. Bei der Analyse dieser Feldaufnahme wurde der Einfluss von Blatttorsionen auf die Blattrekonstruktion betrachtet (Abbildung 7-2 a)). Diese Verdrehungen sind ein häufig auftretendes Phänomen bei Weizenpflanzen und werden in dem virtuellen Pflanzenmodell durch die *Leaf-Twisting-Function* berücksichtigt. Durch extreme Formen der Torsion (auch im Zusammenspiel mit der Blattbiegung) kann es dazu kommen, dass Teile der Blattflächen nahezu parallel zur optischen Achse

der Kameras ausgerichtet sind. Ein solches Phänomen wird ebenfalls in den Beispielen abgebildet (Abbildung 7-2 b)).

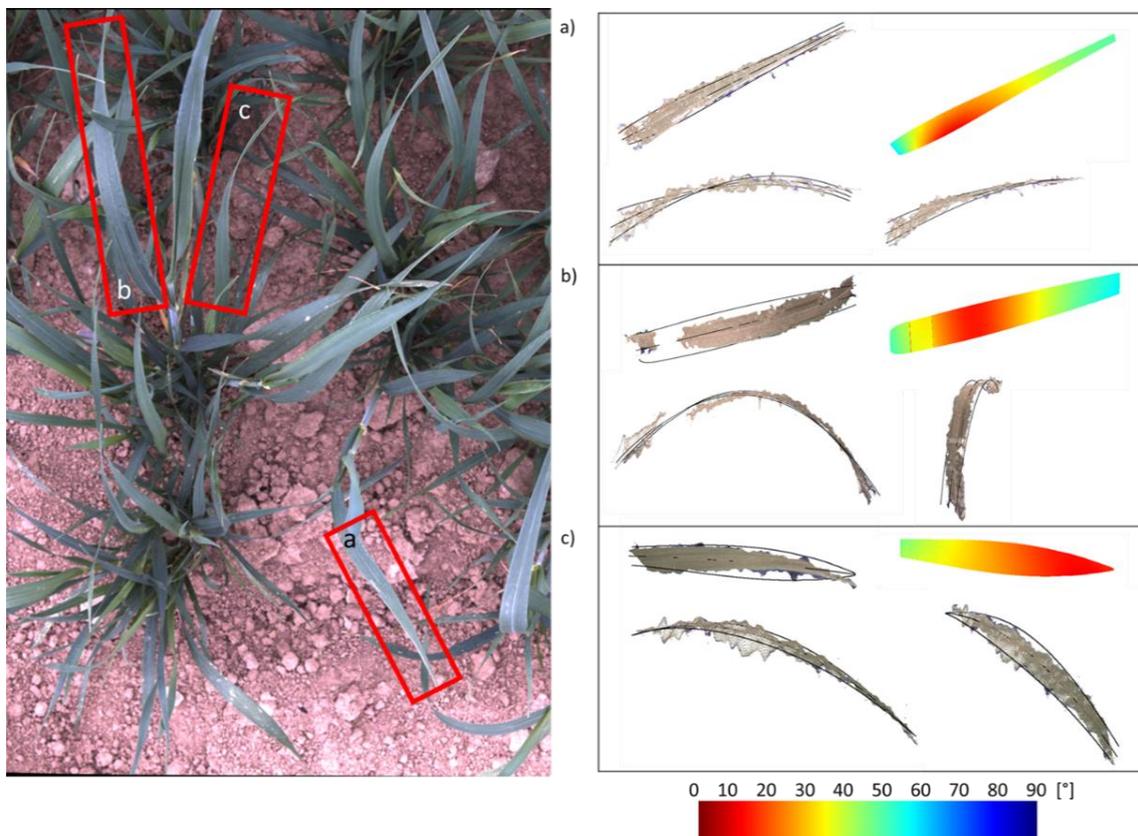


Abbildung 7-2: Beispiele zur Blattrekonstruktion von Weizenblättern aus Aufnahmen unter Feldbedingungen.

In den Feldaufnahmen wurden drei Blätter exemplarisch rekonstruiert (rote Rechtecke). Zu den einzelnen Blättern ist die rekonstruierte 3D-Punktwolke mit den Blattkanten und Blattachse sowie den berechneten Neigungswinkeln auf der Blattoberfläche dargestellt. Blatt a) zeigt eine leichte Torsion der Blattachse. Bei Blatt b) ist die Torsion deutlich ausgeprägter, sodass die Blattfläche nahezu parallel zur optischen Achse der Kameras ausgerichtet ist. Bei Blatt c) zeigt sich eine extreme Form der Blatttorsion, durch die größere Bereiche der Blattoberfläche nicht in der Aufnahme sichtbar sind.

Im Folgenden werden unterschiedlich starke Ausprägungen der Torsion in Hinblick auf die Rekonstruierbarkeit durch das virtuelle Pflanzenmodell betrachtet. Hierfür wurden zwei Fälle ausgewählt, die typischerweise zu beobachten sind und die Stärken, aber auch die Limitierung des Ansatzes gut darstellen. Der erste Fall zeigt ein Blatt mit einer schwachen Torsion (Abbildung 7-2 a)). Die Blattscheide ist hier größtenteils sichtbar und verschwindet perspektivisch nur im Bereich der Blattspitze. Die Rekonstruktion zeigte, dass leichte Torsionen entlang der Blattachse mit Hilfe des

Blattmodells gut repräsentiert wurden. Die Torsion wurde durch das Modell berücksichtigt und spiegelte sich auch in der Blattwinkelverteilung wider. Kurz hinter der Blattbasis ist sichtbar, dass die Blattwinkelverteilung an den Blattkanten nicht symmetrisch war. Dieser Effekt entstand durch die Blatttorsion. Die Blattkanten wurden entlang der Punktwolke gefittet und somit wurde die Blattform trotz Torsion realistisch dargestellt. Der andere Fall sind die extremen Formen der Blatttorsionen, welche dazu führten, dass auch Blattverläufe zustande kommen, bei denen größere Bereiche der Blattoberfläche in der Aufnahme kaum sichtbar sind (Abbildung 7-2 c)). In dem gezeigten Beispiel verlief die Oberfläche des oberen Blattbereichs inklusive Blattspitze nahezu parallel zur Aufnahmeachse, sodass auch keine Punkte in diesem Bereich rekonstruiert werden konnten. Somit ging ein Teil der Blattrekonstruktion verloren, was sich auf die Modellierung wie folgt auswirkte: Die Torsion wurde nicht durch das Modell wiedergegeben, stattdessen wurde das Blatt kürzer modelliert, als es tatsächlich war. In der Abbildung ist jedoch zu erkennen, dass die rekonstruierten Punkte durch das Modell gut repräsentiert werden. Das bedeutet, dass die Diskrepanz zwischen Blattverlauf und Modell in diesem Fall durch die fehlerbehaftete Punktwolke und nicht durch den Modellierungsprozess zustande kam.

Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Effekten, welche unter Feldbedingungen zu beobachten sind, gehören Schlagschatten und starke Kontraste (Kapitel 5.1). In den Rekonstruktionen können kontrastreiche Regionen Lücken in den Punktwolken zur Folge haben. Die Aufnahmen wurden unter diffusen Lichtbedingungen aufgenommen, um diese Problematik zu umgehen. Ähnliche Effekte können durch Verdeckungen zwischen einzelnen Blättern erzeugt und in der rekonstruierten Punktwolke (Abbildung 7-2 b)) sichtbar werden. Trotz Ungenauigkeiten in den Übergangsregionen zwischen sichtbaren und approximierten Blattbereichen wurden diese Bereiche durch das Blattmodell angenähert. Aufgrund der Perspektive auf das Blatt zeigt die Blattachse einen leicht seitlich gebogenen Verlauf. Die gefittete Blattachse lag nicht mittig auf der Blattoberfläche, sodass auch die Blattkanten nicht entlang der Punktwolke gefittet wurden.

Basierend auf den rekonstruierten Blattmodellen wurde für jede Aufnahme die Blattwinkelverteilung bestimmt. In der Praxis wird die Blattwinkelverteilung häufig in Form einer Beta-Funktion beschrieben. Die Beta-Funktion konnte den globalen Verlauf der Blattwinkelverteilung gut abbilden (Abbildung 7-3 a), d), e), f)). Stark repräsentierte Neigungswinkel wurden durch das Maximum der Beta-Funktion repräsentiert. Manche Phänomene konnten nicht durch die Beta-Funktion modelliert werden. Die Neigungswinkel $<10^\circ$ wurden in der Beta-Funktion teilweise mit negativen Häufigkeiten modelliert (Abbildung 7-3 a), b), c), e)). In Abbildung 7-3 d) ist das gleiche Verhalten für Winkel $>80^\circ$ zu erkennen. In Abbildung 7-3 b) wird der zweite Anstieg in der Verteilung (ab ca. 52°) nicht durch die Beta-Funktion modelliert. Ein anderer Fall, bei dem die Beta-Funktion den Verlauf nicht abbilden kann, liegt vor, wenn in der Verteilung mehrere kleine Peaks aufzufinden sind (Abbildung 7-3 c)). Die Blattwinkelverteilungen zeigen deutlich, dass die Neigungswinkel nicht homogen vorkommen. In allen Verteilungen sind Peaks zu erkennen, wobei deren Lage variiert. Die Neigungswinkel $<15^\circ$ und $>75^\circ$ kommen in den meisten Fällen seltener vor als die Neigungswinkel zwischen 20° und 75° . Der mittlere Neigungswinkel (i_m) für die Blattwinkelverteilungen in Abbildung 7-3 liegt zwischen 42° und 56° . Für die Blattwinkelverteilungen wurde eine Aufnahme pro Plot ausgewertet. Es ist anzunehmen, dass die Verteilung weniger Peaks aufweist, wenn die Blattwinkelverteilung mit Hilfe mehrerer Aufnahmen aus einem Plot bestimmt wird. In diesem Fall würde die Blattwinkelverteilung mit Hilfe einer größeren Datenbasis bestimmt und der Einfluss lokaler Effekte reduziert.

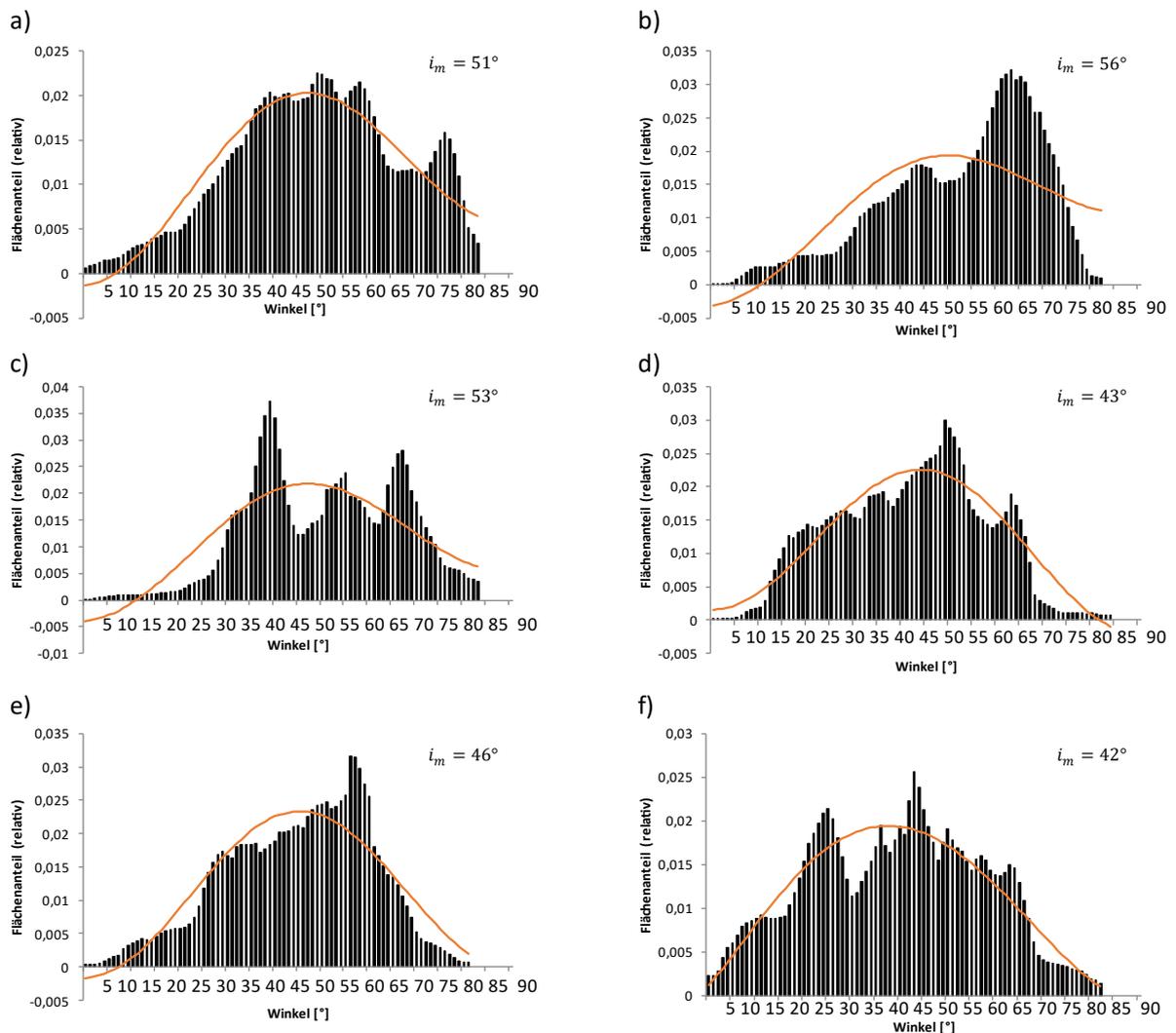


Abbildung 7-3: Qualitative Betrachtung der Blattwinkelverteilungen und zugehörigen Beta-Funktionen

Jede Blattwinkelverteilung wurde mit einer Beta-Funktion modelliert. Die rekonstruierten Verteilungen (schwarz) zeigen teilweise markante Peaks für einzelne Neigungswinkel. Diese Peaks können nicht durch die Beta-Funktion (rot) abgebildet werden. Der globale Verlauf der Blattwinkelverteilung wird durch die Beta-Funktion abgebildet. Der Parameter i_m gibt den mittleren Neigungswinkel der Verteilung an.

7.2. Effektstärke von Getreidesorten und Aussaatstärken auf Blattwinkelverteilungen

Aufbauend auf dem Feldexperiment sollten die Effektstärken unterschiedlicher Getreidesorten und Aussaatstärken auf die Blattwinkelverteilungen bestimmt werden.

Die Aufnahmen der einzelnen Plots wurden verarbeitet und die zugehörigen Betafunktionen bestimmt, sodass für jeden Plot die Parameter μ, ν der Betafunktion ermittelt werden konnten.

Abbildung 7-4 zeigt exemplarisch die Modellierung zweier Blattwinkelverteilungen (schwarz) mittels Beta-Funktion (rot). Die Übereinstimmung zwischen rekonstruierter Blattwinkelverteilung und modellierter Blattwinkelverteilung durch die Beta-Funktion wurde für alle Daten auf Basis des *Concordance-Correlation-Coefficient* (CCC) [80] beschrieben. Die Grenzen für die Interpretation des CCC sind nicht einheitlich festgelegt und orientieren sich i. d. R. an den Grenzen für den Pearson Korrelationskoeffizienten. Altman definierte 1991 die Grenzen ähnlich dem Pearson Koeffizient: i) $ccc < 0,2$ keine Übereinstimmung und ii) $> 0,8$ starke Übereinstimmung [81]. Cohen hingegen definierte die Grenzen wie folgt: i) 0,1-0,29 geringe Übereinstimmung, ii) 0,3-0,49 mittlere Übereinstimmung, iii) 0,5-1,0 starke Übereinstimmung [43]. In 91 % der Fälle lag der ermittelte CCC zwischen Beta-Funktion und rekonstruierter Blattwinkelverteilung über einem Wert von 0,5 und zeigt nach Cohen somit eine starke Übereinstimmung an. In 22 % der Fälle lag der CCC sogar über 0,8 und zeigt nach Altman eine sehr starke Übereinstimmung. Der durchschnittliche CCC lag bei 0,66 und der mediane CCC bei 0,68. Die in Abbildung 7-4 dargestellten Rekonstruktionen zeigen sehr unterschiedliche Blattwinkelverläufe. Eine Gemeinsamkeit in den Blattwinkelverteilungen ist ein deutlicher Peak bei 60-65°. Dieser Peak wird durch die Beta-Funktion für die Blattwinkelverteilung in Abbildung 7-4 b) nicht abgebildet. Wie bereits für Abbildung 7-3 erläutert, beschreibt die Beta Funktion zwar den globalen Verlauf der Blattwinkelverteilung, jedoch nicht das Auftreten unterschiedlicher Peaks.

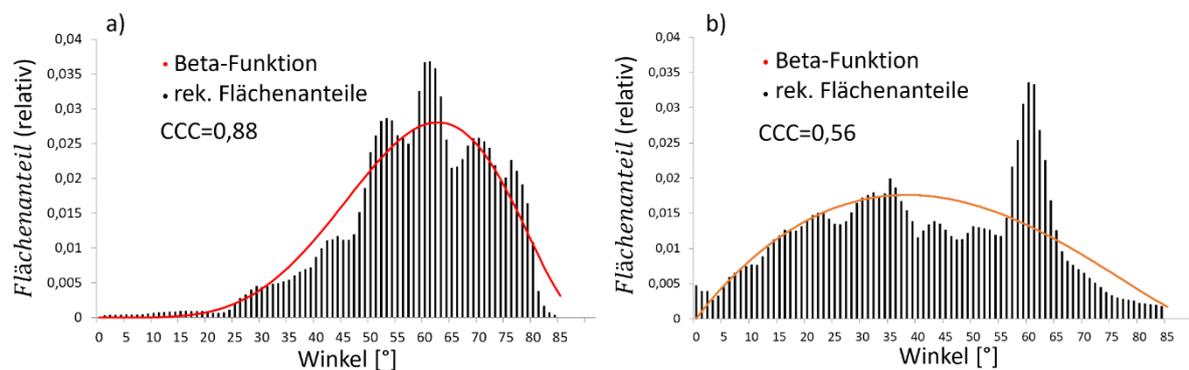


Abbildung 7-4: **Berechnete Blattwinkelverteilungen und zugehörige Beta-Funktionen**

Darstellung der rekonstruierten Flächenanteile für die Neigungswinkel zwischen 0° und 90° in 1° Schritten (schwarzes Balkendiagramm) mit zugehöriger Beta-Funktion (rot). a) Für einen hohen CCC = 0,88, und b) für einen niedrigen CCC = 0,56 bei Matthus mit einer Aussaatstärke von $250 \frac{\text{Samen}}{\text{m}^2}$.

Im Folgenden sollen zunächst die berechneten Parameter der Beta-Verteilung genauer betrachtet werden (Tabelle 7-1).

Tabelle 7-1: Aus der Blattwinkelverteilung ermittelte Parameter der Beta-Verteilung basierend auf den Stereoaufnahmen

Die Werte wurden nach Sorten und Aussaatstärke sortiert. a) Zeigt die berechneten Werte für den Parameter μ und b) die Werte für v .

a) μ				b) v			
Aussaat	Sorten	Sorten	Sorten	Aussaat	Sorten	Sorten	Sorten
	Matthus	Chamsin	Granus		Matthus	Chamsin	Granus
150	3,17	1,90	3,26	150	5,91	2,71	6,46
	3,23	1,91	2,87		5,71	1,98	3,36
	2,03	1,68	2,21		3,15	2,84	3,60
	3,69	2,57	2,68		6,53	4,02	3,11
250	2,33	2,28	1,74	250	1,98	4,64	3,24
	2,78	1,03	3,17		4,58	2,23	5,50
	2,95	2,42	2,41		4,27	4,95	4,19
	2,84	1,9	2,52		4,79	2,33	5,03
350	2,38	2,11	2,25	350	5,74	3,95	3,4
	3,03	2,00	2,55		5,97	3,24	3,75
	1,74	2,91	3,44		3,29	4,97	5,12
	1,67	4,03	2,94		2,66	7,58	6,01
450	2,63	2,71	1,58	450	5,19	5,46	3,38
	2,17	2,81	2,32		4,60	5,42	4,47
	1,47	1,45	2,13		2,68	1,77	3,79
	2,42	2,37	3,25		5,17	5,04	5,43

Die Werte für den Parameter μ bewegen sich in einem Bereich zwischen 1,45 und 4,03 und für v zwischen 1,77 und 6,53. Ausgehend von diesen Werten soll die Effektstärke der Sorten und Aussaatdichten auf die Blattwinkelverteilung bestimmt werden. Als statistische Methode für die Berechnung der Effektstärken dient in diesem Fall eine Varianzanalyse mittels ANOVA. Zuvor wurde geprüft, ob die Daten die Voraussetzungen für die Durchführung einer einfaktoriellen ANOVA erfüllen [82]. Nachfolgend werden die verschiedenen Test-Verfahren kurz erläutert und die kritischen Werte für verschiedene Replikanzahlen n bzw. Freiheitsgrade df gegeben, welche anschließend zur Beurteilung der Sorten- und Aussaatstärkeeffekte herangezogen werden. Für die Durchführung einer einfaktoriellen ANOVA müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- i.) Unabhängigkeit der Messungen: Die Messungen wurden in den randomisierten Plots des Feldexperimente durchgeführt, somit ist diese Bedingung erfüllt.
- ii.) Normalverteilung der abhängigen Variable in jeder Gruppe: Um die Normalverteilung der Messwerte für die unterschiedlichen Gruppen zu überprüfen wurde der Shapiro-Wilk-Test durchgeführt [83]. Dieser Test eignet sich für kleine Stichproben (mit $n < 50$). Die Nullhypothese H_0 nimmt an, dass eine Normalverteilung der Daten vorliegt. Liegt der Wert der Teststatistik (W) über einem kritischen Wert (W_{krit}), wird H_0 beibehalten, die Daten sind mit einer hohen Wahrscheinlichkeit normalverteilt. Tabelle 7-2 zeigt die kritischen Werte für W ; bei einem Wert $> W_{0,05}$ wird H_0 angenommen.

Tabelle 7-2: Kritische Werte für die Teststatistik des Shapiro-Wilk-Test bei unterschiedlichen Stichprobengrößen n .

Liegt die Teststatistik über $w_{0,05}$ gibt es nicht genug Anhaltspunkte dafür, dass die Werte nicht normalverteilt sind.

N	4	12	16
$W_{0,05}$	0,748	0,859	0,887

- iii.) Homogenität der Varianzen / Homoskedastizität: Die Homogenität der Varianzen wurde mit Hilfe des Levene-Test überprüft [82]. Die Nullhypothese H_0 nimmt an, dass die Varianzen aller Gruppen gleich sind. Liegt der Wert der Teststatistik (L) unter einem kritischen Wert (L_{krit}), wird H_0 beibehalten, die Varianzen sind mit einer hohen Wahrscheinlichkeit homogen. Tabelle 7-3 zeigt die kritischen Werte für L bei unterschiedlichen Freiheitsgraden df . Die Homogenität der Varianzen wurde auf Basis der maximalen und minimalen Varianz aus den Gruppen geprüft. Wenn diese beiden Varianzen mit dem Test als homogen anzunehmen sind, gehören auch die übrigen Varianzen zur gleichen Grundgesamtheit³.

³ $F_{\sigma_{min}^2} = \frac{\sigma_{max}^2}{\sigma_{min}^2} > F_x = \frac{\sigma_{max}^2}{\sigma^2}$; somit ist $F_{\sigma^2} < F_{krit}$, wenn $F_{\sigma_{min}^2} < F_{krit}$

Tabelle 7-3: Kritische Werte für die Teststatistik Levene-Test bei verschiedenen Freiheitsgraden df.

Liegt die Teststatistik über $L_{0,05}$ wird H_0 angenommen.

Df	3	11	15
$L_{0,05}$	9,277	2,818	2,403

Ausgehend von den Resultaten der ANOVA kann auf Basis der Quadratsummen mit Formel (60) die Effektstärke ω^2 bestimmt werden. Sie kann unabhängig von der Stichprobengröße ermittelt werden und wird ohne p-Wert angegeben [43].

Zusätzlich wurde mit den Daten jeweils eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt, um den Einfluss von Faktoren (bzw. der Linearkombination von Faktoren) anhand möglicher Clusterbildungen zu überprüfen und zu visualisieren. Für diese Analyse wurden neben den Parametern der Beta-Funktion auch die ermittelte mediane Blattbreite und der mittlere Neigungswinkel innerhalb der Plots berücksichtigt. Tabelle 7-4 zeigt die berechneten medianen Blattbreiten pro Plot und die zugehörigen mittleren Blattwinkelverteilungen. Die mediane Blattbreite wurde gewählt, um Effekte durch Ausreißer in der Blattmodellierung zu verringern.

Tabelle 7-4: Berechnete mediane Blattbreite und mittlere Neigungswinkel

Für Jede Aufnahme wurde die mediane Blattbreite und der mittlere Neigungswinkel berechnet. Die Werte sind nach Sorte und Aussaatdichte in der Tabelle aufgetragen.

a)	Blattbreite [mm]			b)	mittlerer Neigungs-winkel [°]		
	Sorten				Sorten		
Aussaat	Matthus	Chamsin	Granus	Aussaat	Matthus	Chamsin	Granus
150	8,7	7,29	7,44	150	54,77	52,9	59,79
	7,71	8,73	6,97		58,59	45,1	48,54
	6,26	6,86	7,22		57,46	56,53	55,74
	5,47	8,56	7,05		57,49	54,86	48,39
250	5,94	7,87	9,41	250	41,26	60,3	58,55
	7,37	7,9	7,48		55,98	61,5	57,09
	8,44	8,23	8,79		53,26	60,39	57,11
	7,41	8,96	9,06		63,68	49,51	59,96

	7,41	7,85	6,91		63,68	58,68	54,01
350	8,91	7,11	8,51	350	59,69	55,64	53,54
	9,49	8,46	8,3		58,81	56,68	53,85
	9,25	9,64	8,61		55,25	58,78	56,34
	8,07	8,04	7,29		59,75	60,11	61,26
450	7,78	7,35	7,5	450	61,11	59,3	59,28
	8,04	7,76	8,52		58,17	49,41	57,59
	7,51	9,74	6,85		61,33	61,21	56,29

Die Blattbreite lag zwischen 5,47 mm und 9,74 mm, diese Werte sind für das frühe

Entwicklungsstadium der Pflanzen in einem realistischen Bereich. Der mittlere Neigungswinkel

schwankte zwischen 41,26° und 63,68°. Die meisten Messwerte waren in einem Bereich zwischen 48° und 63,68° zu finden, nur zwei mittlere Neigungswinkel wurden mit einem Wert < 46° rekonstruiert.

7.2.1. Sorteneffekt

Im ersten Schritt wurde der sortenspezifische Effekt auf die Blattwinkelverteilung untersucht. Zunächst wurde überprüft, ob eine ANOVA durchgeführt werden kann, um die Effektstärke der unterschiedlichen Weizensorten auf die Blattwinkelverteilung zu bestimmen. Die folgenden Tabellen (Tabelle 7-5 und Tabelle 7-6) zeigen die Resultate des Shapiro-Wilk-Test und Levene-Test für die beiden Parameter (μ, v) der Betafunktion.

Tabelle 7-5: Resultate des Shapiro-Wilk Test für die Datensätze der einzelnen Weizensorten.

Die Nullhypothese H_0 des Shapiro-Wilk-Test nimmt an, dass eine Normalverteilung der Daten vorliegt. Sie wird verworfen, wenn $W < W_{krit}$ ist.

W	μ	v
Matthus	0,982	0,694
Chamsin	0,952	0,938
Granus	0,956	0,903

Tabelle 7-6: Resultate des Levene Test für die Datensätze der einzelnen Weizensorten

Die Nullhypothese H_0 des Levene-Tests nimmt an, dass in den Daten eine Varianzhomogenität vorliegt. Sie wird verworfen, wenn $L < L_{krit}$ ist.

L	μ	v
	1,374	2,248

Die Werte in Tabelle 7-5 zeigen, dass die ermittelten Werte für μ bei allen drei Sorten normalverteilt waren. Für jede Sorte lagen 16 Messwerte vor und die Teststatistik W lag immer über dem kritischen Wert $W_{0,05}$ für $n=16$. Bei v ließ der Shapiro-Wilk-Test darauf schließen, dass die Daten für Matthus nicht normalverteilt waren. $v_{Matthus}$ war mit 0,694 kleiner als $W_{krit} = 0,887$. Die Varianzhomogenität war für beide Parameter gegeben, weil L in beiden Fällen kleiner war als $L_{krit} = 2,403$ (siehe Tabelle 7-6). Für die beiden Parameter der Beta-Funktion wurde jeweils eine ANOVA durchgeführt. Jede Sorte stellte dabei eine Gruppe dar und es wurden alle Daten, unabhängig von der Aussaatstärke, genutzt. Die Resultate sind im Anhang zu finden. Aus den Quadratsummen der ANOVA wurde ω^2 berechnet.

$$\omega_{\mu}^2 = 0,02$$

$$\omega_v^2 = -0,01$$

Aufgrund der Tatsache, dass die Daten für v bei Matthus nicht normalverteilt waren, wird hier ω_v^2 nur der Vollständigkeit halber angegeben. Die absoluten Werte für ω_{μ}^2 und ω_v^2 waren $\geq 0,01$, sodass die Sorten über alle Aussaatstärken hinweg einen kleinen Effekt auf die Blattwinkelverteilung hatten. Der Parameter μ erfüllte alle Voraussetzungen für die ANOVA und zeigte zudem mit einem Wert von $\omega_{\mu}^2 = 0,02$ einen größeren Effekt als v an. Aufgrund der geringen Anzahl von Wiederholungen war bei einem kleinen Effekt kein signifikantes Ergebnis für die ANOVA zu erwarten. Dies spiegelte sich auch in den hohen p-Werten für beide ANOVAs wider.

Auf Basis der Parameter μ , v, mediane Blattbreite und mittlerer Neigungswinkel wurde eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt. Blattachsenlänge und Insertionswinkel sind unter Feldbedingungen nur schwer zu bestimmen und wurden bei dieser Analyse nicht mit einbezogen. Die

Bestimmung der Blattachsenlänge und Insertionswinkel ist innerhalb der Kronendachstruktur fehlerbehaftet. Insbesondere in Halmnähe ist die Blattdichte sehr hoch. Es kommt zu Verdeckungen, wodurch der Insertionswinkel und die Blattachse nicht oder nicht vollständig in den Aufnahmen abgebildet werden. Die absolute rekonstruierte Blattfläche ist abhängig von den Lichtbedingungen und dem Feldausschnitt in der Aufnahme. Aus diesem Grund ist die absolute rekonstruierte Fläche sehr abhängig von dem Bildausschnitt und wurde nicht in der Hauptkomponentenanalyse verwendet. Die Blattfläche wird für die Berechnung der Blattwinkelverteilung genutzt, welche in die Analyse mit einbezogen wurde.

Abbildung 7-5 visualisiert die Ergebnisse der Analyse für die ersten beiden Hauptkomponenten. Dabei beinhaltet die 1. Komponente 51,2% der gesamten Varianz und die zweite Komponente 29,7% der Varianz. Dementsprechend sind durch die Reduktion auf die zwei Hauptkomponenten 19,1 % der Varianz verloren gegangen. Es wird deutlich, dass mittels der verwendeten Parameter keine klare Trennung der einzelnen Sorten möglich ist. Es sind jedoch Tendenzen zu erkennen, dass Granus nahe dem Nullpunkt der 1. Komponente clustert. Die PCA (Abbildung 7-5) zeigt zusätzlich, dass Chamsin insbesondere entlang der 1. Komponente streut und nur geringfügig entlang der 2. Hauptkomponente. Matthus streut entlang beider Hauptkomponenten, die Datenpunkte befinden sich dabei (abgesehen von einem Punkt) überwiegend unterhalb bzw. in unmittelbarer Nähe zur Winkelhalbierenden. Granus streut gleichmäßig entlang beider Komponenten und zeigt die stärkste Clusterung der Sorten.

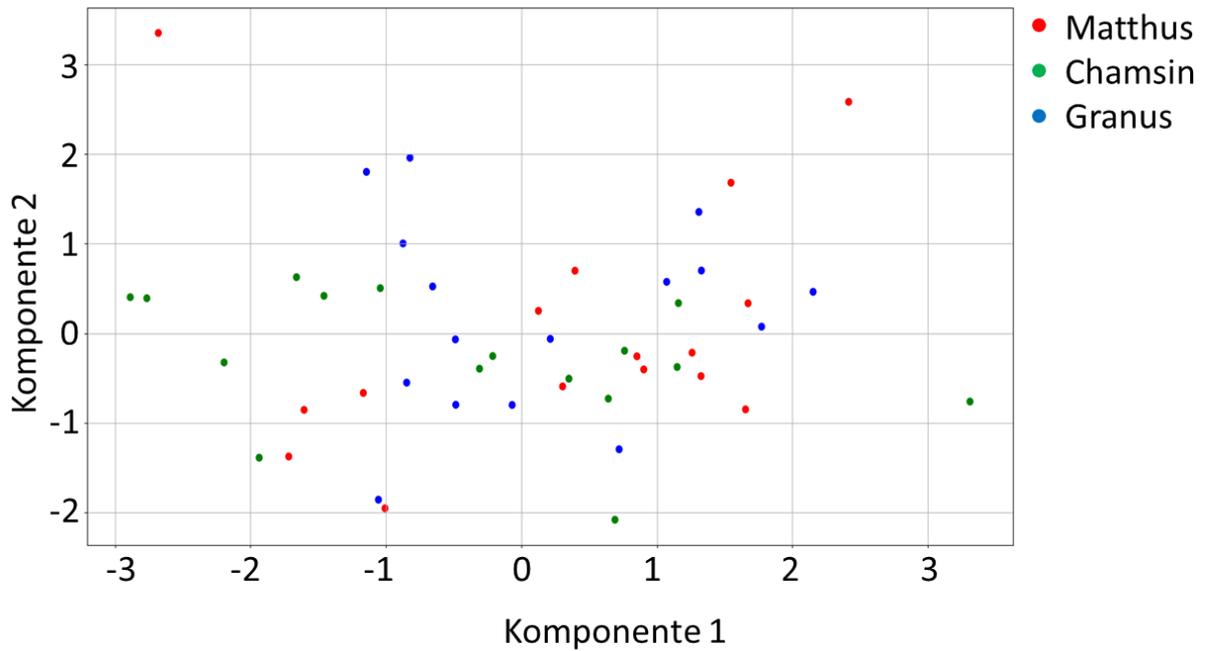


Abbildung 7-5: Visualisierung der Hauptkomponentenanalyse nach Sorten

Abgebildet werden die ersten beiden Hauptkomponenten. Die 1. Komponente (horizontale Achse) spiegelt 51,2% der gesamten Varianz und die zweite Komponente (vertikale Achse) 29,7% der Varianz. Die Farben kodieren die unterschiedlichen Sorten: rot: Matthus, grün: Chamsin und blau: Granus. Es sind keine Cluster entsprechend der unterschiedlichen Sorten zu erkennen.

Mit Hilfe der Eigenwerte der Hauptkomponentenanalyse kann bestimmt werden, welche Parameter am stärksten zur Varianz innerhalb des Datensatzes beitragen. Die ermittelten Eigenwerte zeigten, dass v den größten Anteil der Varianz erklärt (Tabelle 7-7). In absteigender Reihenfolge kamen mittlerer Neigungswinkel, mediane Blattbreite und μ . Die Hauptkomponentenanalyse ergab somit, dass μ die geringste Varianz aufweist.

Tabelle 7-7: Eigenwerte der Hauptkomponentenanalyse für den Sorteneffekt

Die Eigenwerte der Hauptkomponentenanalyse geben an, welchen Anteil der Gesamtvarianz die einzelnen Faktoren aufklären. Für die Sorten beinhaltet v den größten Anteil der Varianz und μ den geringsten.

	v	μ	Mediane Blattbreite	Mittlerer Neigungswinkel
Eigenwerte	2,09	0,02	0,76	1,21

Abbildung 7-5

7.2.2. Effekt durch die Aussaatstärke

Im nächsten Schritt wurde der Effekt der Aussaatstärke auf die Blattwinkelverteilung untersucht. Auch hier wurden jeweils die Voraussetzungen der Normalverteilung und Varianzhomogenität geprüft (Tabelle 7-8 und Tabelle 7-9). Die Ergebnisse zeigten, dass für μ die Datenwerte bei allen Aussaatstärken normalverteilt waren. Im Gegensatz dazu lag die Teststatistik W für v bei zwei Aussaatstärken unterhalb des kritischen Wertes von 0,859. Aufgrund dieser Tatsache konnte bei den Aussaatstärken mit 350 und 450 $\frac{\text{Samen}}{\text{m}^2}$ keine Normalverteilung angenommen werden. Die Varianzhomogenität war für beide Parameter μ und v erfüllt. Ausgehend von den Ergebnissen der Shapiro-Wilk Test wurde nur für μ eine ANOVA durchgeführt.

Tabelle 7-8: Resultate des Shapiro-Wilk Test für die Datensätze der verschiedenen Aussaatstärken

Die Nullhypothese H_0 des Shapiro-Wilk-Test nimmt an, dass eine Normalverteilung der Daten vorliegt. Sie wird verworfen, wenn $W < W_{krit}$ ist.

W	μ	v
150	0,939	0,874
250	0,935	0,871
350	0,946	0,818
450	0,943	0,850

Tabelle 7-9: Resultate des Levene Test für die Datensätze der verschiedenen Aussaatstärken

Die Nullhypothese H_0 des Levene-Test nimmt an, dass in den Daten eine Varianzhomogenität vorliegt. Sie wird verworfen, wenn $L < L_{krit}$ ist.

L	μ	v
	1,818	1,734

Eine Übersicht zu den Ergebnissen der ANOVA ist im Anhang (Tabelle 11-7) dargestellt. Mit den Daten konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Aussaatdichten (p -Wert = 0,448) ermittelt werden. Basierend auf den Quadratsummen wurde ω^2 berechnet.

$$\omega_{\mu}^2 = -0,01$$

Betrachtete man die Effektstärke der Aussaatstärken, wie hier angegeben über alle Sorten, war zu erkennen, dass sich für ω_{μ}^2 ein kleiner Effekt zeigte. Um diesen signifikant nachweisen zu können, braucht es eine höhere Wiederholungszahl im Feldexperiment.

Für die Hauptkomponentenanalyse wurden die gleichen Daten verwendet, wie in Kapitel 7.2.1. (Siehe dort die Ergebnisse zu Faktorladung und Varianzen). Abbildung 7-6 schlüsselt die Ergebnisse jedoch entsprechend der Aussaatdichte auf. Bei visueller Überprüfung ergeben sich nur schwache Unterschiede zwischen den Aussaatstärken bezüglich Clusterung oder Streuung. Für die niedrigste und die höchste Aussaatstärke sind schwache Clusterbildungen zu erkennen. Die Messpunkte für die geringste Aussaatstärke sind zum großen Teil oberhalb der Winkelhalbierenden zu finden. Die Messpunkte zur höchsten Aussaatstärke befinden sich im Gegensatz dazu überwiegend unterhalb der Winkelhalbierenden. Die anderen Punkte streuen hauptsächlich entlang der 1. Komponenten zwischen -2 und 2 und entlang der 2. Komponente von -1 bis 1.

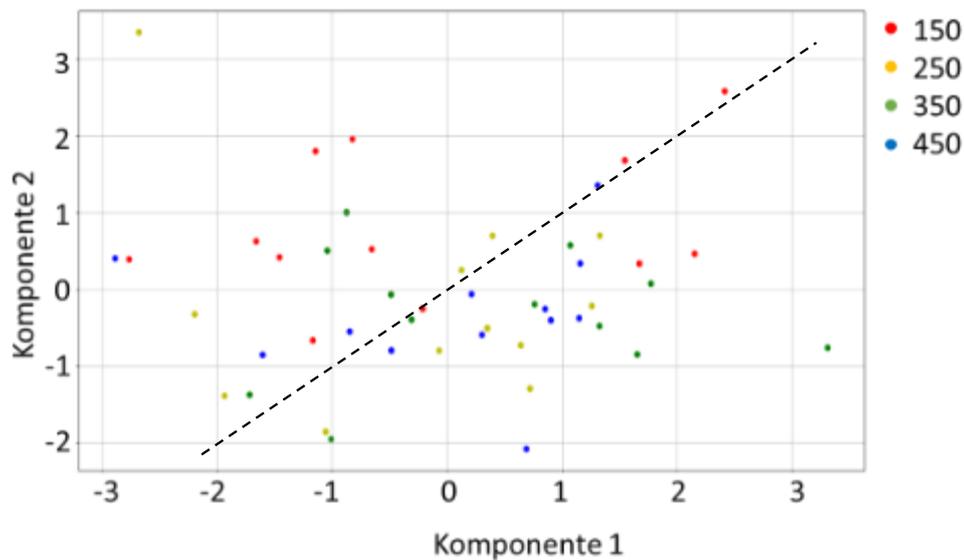


Abbildung 7-6: Visualisierung der Hauptkomponentenanalyse nach Aussaatdichte

Die horizontale Achse repräsentiert die erste Komponente und die vertikale Achse die zweite Komponente. Die Farben kodieren die Aussaatdichten von $150 \frac{\text{Samen}}{\text{m}^2}$, gelb $250 \frac{\text{Samen}}{\text{m}^2}$, grün $350 \frac{\text{Samen}}{\text{m}^2}$ und blau $450 \frac{\text{Samen}}{\text{m}^2}$. Die gestrichelte Linie kennzeichnet die Winkelhalbierende. Die Daten zeigen keine Clusterung gemäß der unterschiedlichen Aussaatdichten. Die Datenpunkte zur geringen Aussaatdichte $150 \frac{\text{Samen}}{\text{m}^2}$ befinden sich größtenteils oberhalb der Winkelhalbierenden, während die Daten zur hohen Aussaatdichte $450 \frac{\text{Samen}}{\text{m}^2}$ vermehrt unterhalb der Winkelhalbierenden liegen.

Unter der Annahme, dass ein größerer Effekt nachweisbar ist, wenn der Unterschied zwischen den Aussaatstärken besonders hoch ist, wurde eine weitere Analyse durchgeführt. In diesem Schritt wurden nur die ermittelten Werte für μ bei der geringsten und höchsten Aussaatstärke ($150, 450 \left[\frac{\text{Samen}}{\text{m}^2} \right]$) in die ANOVA mit einbezogen. Bei dieser ANOVA war der p-Wert mit 0,206 zwar kleiner als bei den vorherigen Analysen, aber auch hier konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Aussaatstärken ermittelt werden. Der Wert für ω_{μ}^2 zeigte mit

$$\omega_{\mu}^2 = 0,03$$

wieder einen kleinen Effekt an.

Unter der Annahme, dass sich dieser leichte Effekt in den Messwerten erkennen lässt, wurden zwei Auftragungen gemacht. Einerseits wurden die Parameter μ und v und andererseits die Blattbreite

gegen den mittleren Neigungswinkel aufgetragen. In beiden Abbildung 7-7 a) und b) wurden Trennlinien angedeutet. Für die Parameter der Betafunktion befinden sich die Messpunkte zur hohen Aussaatstärke größtenteils über dieser Linie, während sich die Messwerte zur geringen Aussaatdichte unterhalb dieser Linie befinden. Abbildung 7-7 b) zeigt, dass die Messwerte bei einer höheren Aussaatdichte bei mittleren Neigungswinkeln $>58^\circ$ und einer Blattbreite <7 mm clustern. Für die geringe Aussaatdichte finden sich mehr Neigungswinkel $<58^\circ$ und die Blattbreite weist eine größere Variabilität auf.

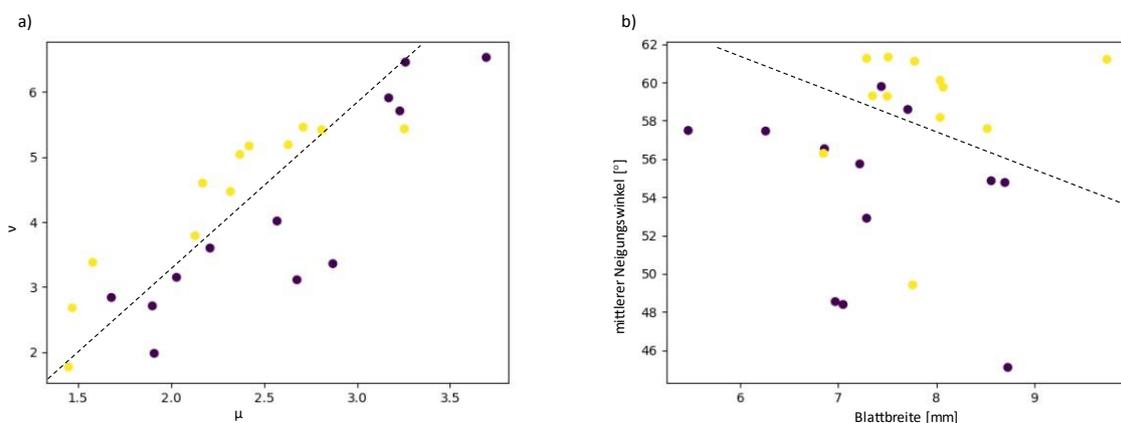


Abbildung 7-7: **Auftragung der gemessenen Blattparameter unterschiedlichen Aussaatdichten.**

Die Farben codieren die unterschiedlichen Aussaatdichten von $150 \left[\frac{\text{Samen}}{\text{m}^2} \right]$ (violett) und $450 \left[\frac{\text{Samen}}{\text{m}^2} \right]$ (gelb). a) zeigt die Auftragung der Parameter der Beta-Funktion μ auf der horizontalen Achse und v auf der vertikalen Achse. Es wurde eine gestrichelte Trennlinie eingezeichnet. Die Messdaten zur geringen Aussaatdichte befinden sich größtenteils unterhalb der Trennlinie, während die Messdaten zur hohen Aussaatdichte vermehrt oberhalb der Trennlinie liegen. b) Visualisiert den Zusammenhang zwischen Blattbreite, mittleren Neigungswinkel und Aussaatdichte. Es wurde eine gestrichelte Trennlinie eingezeichnet. Bei einer hohen Aussaatdichte wurden steilere mittlere Neigungswinkel mit medianen Blattbreiten zwischen 7-9 mm rekonstruiert. Die Messdaten zur geringen Aussaatdichte zeigen geringer mittlere Neigungswinkel und die Blattbreite schwankt über einen größeren Bereich unterhalb der Trennlinie.

Zuletzt wurde eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt, bei der die Komponenten v , μ , mediane Blattbreite und mittlerer Neigungswinkel nur für die minimale und maximale Aussaatstärke (150,450

$\left[\frac{\text{Samen}}{\text{m}^2}\right]$) einbezogen wurden. Wie in Abbildung 7-8 zu sehen ist, variieren die Messwerte für beide Aussaatstärken über einen großen Bereich der 1. Komponente. Entlang der 2. Komponente ist die Varianz deutlich geringer. Während sich die Datenpunkte zur geringen Aussaatstärke überwiegend bei Werten $< 0,75$ befinden, nehmen die Messwerte der höheren Aussaatdichte vermehrt Werte $> 0,5$ an. Eine eindeutige Trennung der beiden Aussaatstärken ist allerdings auch bei diesen Daten nicht möglich.

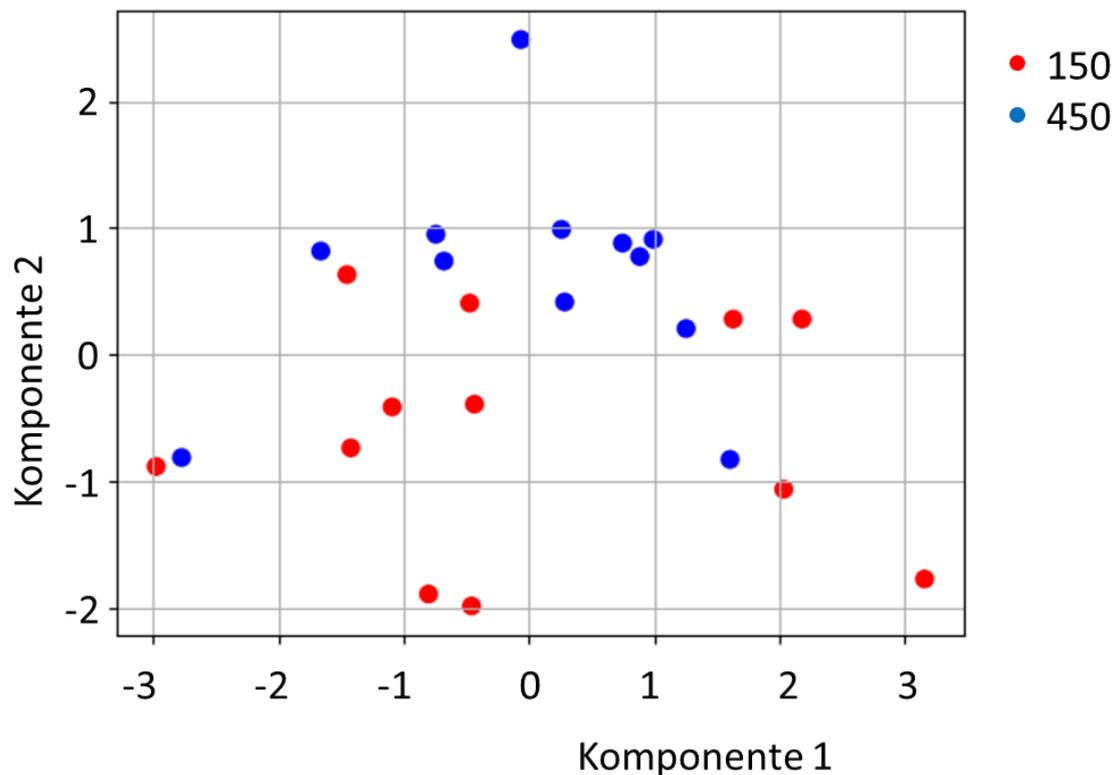


Abbildung 7-8: Visualisierung der Hauptkomponentenanalyse nach minimaler und maximaler Aussaatdichte

Die roten Punkte markieren eine Aussaatdichte von $150 \frac{\text{Samen}}{\text{m}^2}$ und blau $450 \frac{\text{Samen}}{\text{m}^2}$. Für die Messdaten bei hohen Aussaatdichten ist eine stärkere Clusterung der Punkte zu erkennen, während die Messdaten für die geringe Aussaatdichte insbesondere über die 1. Komponente stark streuen. Eine eindeutige Trennung der Messpunkte ist nicht möglich.

Eine Betrachtung der erklärten Varianz zeigte, dass die erste Komponente 57,4 % der ursprünglichen Varianz beinhaltet und die 2. Komponente 28,4% der Varianz widerspiegelt. Somit geht bei dieser Analyse ein Anteil von 14,2% der Varianz verloren. Auch hier geben die Eigenwerte der einzelnen

Komponenten Aufschluss darüber, wie entscheidend sie für die Beschreibung der Varianz sind (Tabelle 7-10). Wie in Tabelle 7-7 zeigte auch diese Analyse, dass v der Parameter mit dem größten und μ der Parameter mit dem geringsten Einfluss war. Für die beiden anderen Parameter änderte sich das Verhältnis. Somit war in dieser Hauptkomponentenanalyse die Bedeutung durch die mediane Blattbreite größer als der mittlere Neigungswinkel.

Tabelle 7-10: Eigenwerte der Hauptkomponentenanalyse für den Effekt durch die Aussaatstärke

Die Eigenwerte der Hauptkomponentenanalyse geben an, welchen Anteil der Gesamtvarianz die einzelnen Faktoren aufklären. Für die Aussaatstärke beinhaltet v den größten Anteil der Varianz und μ den geringsten.

	v	μ	Mediane Blattbreite	Mittlerer Neigungswinkel
Eigenwerte	2,4	0,01	1,18	0,58

8. Diskussion

Es gibt zahlreiche Faktoren, welche die Berechnung blattspezifischer Parameter und insbesondere die Bestimmung von Blattwinkelverteilungen aus Bilddaten beeinflussen. Zunächst gibt es einige Eigenschaften des Aufnahme-Settings, zu denen sowohl die Spezifikationen des Kameraaufbaus (gewählte Hardwarekomponenten und Stereokamera-Geometrie) als auch die Umweltbedingungen (Sonneneinstrahlung, Schattenwurf und Wind) zählen. Außerdem existieren unter Feldbedingungen Störfaktoren, wie Ablagerungen und Verdeckungen im Kronendach, welche dazu führen, dass nicht alle Pflanzenteile in den Aufnahmen sichtbar sind und rekonstruiert werden können. Die Verarbeitung der Daten und die Modellierung der einzelnen Pflanzenteile bzw. der unterschiedlichen Blattparameter ist essenziell für die Bestimmung der Blattwinkelverteilung, sodass sich systematische Fehler aufsummieren können. Der Stereo-Aufbau wurde gewählt, um möglichst genaue Rekonstruktionen der Weizenblätter unter Feldbedingungen zu ermöglichen. Eine genauere Betrachtung des Stereo-Aufbaus im Vergleich zu anderen Sensoren befindet sich in Kapitel 1.3. Der experimentelle Aufbau wurde genutzt, um folgende Aspekte zu evaluieren: i) Eignung des Stereoaufbaus zur Rekonstruktion unterschiedlich geneigter Flächen, ii) Qualität der Blattmodellierung und der berechneten Blattparameter am künstlichen Modell und iii) Anwendbarkeit unter Feldbedingungen im natürlichen Pflanzenbestand.

Inklinometer werden verwendet, um Blattwinkel zu bestimmen und einfache Klassifikationen der Blattwinkelverteilungen (wie in Kapitel 1.3 beschrieben) vorzunehmen. Diese Methode erfordert den Einsatz zahlreicher Arbeitsstunden [84] und die Bestimmung der Blattwinkelverteilung ist mit diesem Verfahren bei Getreidepflanzen aufwendig bzw. kaum möglich. Der Blattwinkel ändert sich bei Getreideblättern entlang der Blattachse in geometrisch komplexer Weise, weil diese nicht nur gebogen, sondern auch verdrillt sein können. Der Neigungswinkel muss somit als eine veränderbare Größe entlang der Blattachse betrachtet werden. Eine Beschreibung des Blattwinkels ist somit in Form einer Funktion, welche über die Blattachse definiert ist, möglich. Eine derartige Funktion wurde bereits von Dornbusch et al. eingeführt und für die Modellierung virtueller Getreidepflanzen genutzt [1,15,67].

Allerdings wurde diese funktionale Beschreibung von Getreideblättern bisher nicht für Feldaufnahmen angepasst, anhand eines realen Modells evaluiert oder für die Modellierung von Feldpflanzen verwendet. Müller-Linow et al. und Dandrifosse et al. verwendeten bereits reale Modelle zur Evaluation ihrer Ansätze [32,35]. Hierbei konnten sie die Genauigkeit und Richtigkeit ihrer Daten beschreiben. Müller-Linow et al. nutzte ein Holzmodell zur Beschreibung durchschnittlicher Blattwinkel, bei dem die Blätter durch planare Rechtecke repräsentiert waren [35]. Ein solches Modell ist allerdings nicht geeignet, um die spezifischen Eigenschaften der Weizenblätter (Torsion, Biegung, Form) abzubilden. Dandrifosse et al. fixierten Weizenblätter auf einem planaren Untergrund, um ihr Verfahren zu evaluieren [32]. Bei diesem Vorgehen wird die äußere Form der Blätter perfekt abgebildet. Das spezielle Verhalten des Neigungswinkels entlang der Blattachse wird durch die Fixierung jedoch unterbunden, sodass auch dieses Modell nicht geeignet ist, um eine funktionale Beschreibung der Blattwinkel zu evaluieren. Aus diesem Grund wurde bei der Evaluierung der Fokus auf die Verwendung von Modellen mit gekrümmten Oberflächen gelegt, die verschiedene Eigenschaften realer Getreideblätter widerspiegeln. Zusätzlich wurden die Abweichungen zwischen Rekonstruktion und Referenz hinsichtlich Richtigkeit, Präzision, systematischer und nicht-systematischer Fehler analysiert.

Die Ergebnisse der Validierung werden in den folgenden Kapiteln im Einzelnen diskutiert und auch objektübergreifend betrachtet. Die Rekonstruktion der 3D-Punktwolke wird in Kapitel 8.1 betrachtet. In Kapitel 8.2 werden die Erkenntnisse zu den rekonstruierten Pflanzenparametern, welche mit Hilfe des Pflanzenmodells (Kapitel 6.2) gewonnen wurden, analysiert. Aufbauend auf der Rekonstruktion der Weizenblätter werden in Kapitel 8.3 die Stärken und Schwächen der Methodik in Bezug auf natürliche Weizenpflanzen (Kapitel 7.1) analysiert. Abschließend wird in Kapitel 8.4 auf die Ergebnisse aus dem Feldexperiment hinsichtlich der Sorten- (Kapitel 7.2.1) und Aussaatstärkeeffekte (Kapitel 7.2.2) eingegangen.

8.1. 3D-Rekonstruktion

Zunächst sollte eine umfassende und detaillierte Analyse der Eignung des Stereo-Aufbaus durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wurde mit dem Kugelmodell überprüft, ob der Neigungswinkel bereits einen Einfluss auf die Rekonstruierbarkeit einer Fläche hat. Im Hinblick auf die Rekonstruktion und Modellierung von Oberflächen ist es besonders wichtig, dass der Abstand zwischen den rekonstruierten Punkten und dem Kugelmodell gering ist. Hierfür müssen entweder wenige Punkte mit hoher Genauigkeit oder bei einer geringen Präzision viele Punkte rekonstruiert werden. Eine geringe Richtigkeit oder systematische Fehler können auch durch eine hohe Anzahl von Punkten nicht korrigiert werden. Bis zu einem Neigungswinkel von 75° konnte die Kugel mit einer Genauigkeit von 2,61% rekonstruiert werden. Für Winkel $<10^\circ$ zeigten die negativen Distanzen, dass sich die Punkte im Inneren des Kugelmodells befinden. Für Winkel $>10^\circ$ waren die Punkte außerhalb der Kugel lokalisiert. Diese Verteilung der Punkte könnte durch die besonderen Eigenschaften fronto-paralleler Flächen⁴ verursacht worden sein. Unter dem Schlagwort *fronto-parallel smoothness assumption* wurde bereits diskutiert, dass der SGBM-Algorithmus Objekte mit einer geringen Oberflächenstruktur als fronto-parallele-Flächen rekonstruiert [85]. Einecke und Eggert publizierten 2014 eine neue Version des SGBM-Algorithmus, welche diesen Effekt vermindern sollte [86]. Diese modifizierte Version des SGBM-Algorithmus stand in der verwendeten Implementierung nicht zur Verfügung und wurde für diese Arbeit auch nicht nachimplementiert. Für zukünftige Implementierungen sollte überprüft werden, ob diese Variante des Algorithmus für die Anwendung bei Getreidepflanzen sinnvoll ist. Die mittlere Distanz zwischen Kugeloberfläche und den Punkten in den einzelnen Winkelbereichen lässt vermuten, dass die Kugelform in der Rekonstruktion nicht exakt wiedergegeben wird. Stattdessen entsteht ein leicht ellipsoider Körper. Ob es sich um ein Rotationsellipsoid (die Rotationsachse entspricht der optischen Achse) oder einen triaxiales Ellipsoid aus der Blickrichtung seitlich abgeflachtes Ellipsoid) handelt, lässt sich jedoch nur durch eine Analyse der azimuthalen Abweichungen bestimmen. Da die Abweichungen in den Neigungswinkeln nur sehr gering waren und die Berechnung der azimuthalen

⁴ Flächen orthogonal zur optischen Achse

Winkel kein Bestandteil dieser Arbeit war, erfolgte keine weitere Analyse des rekonstruierten Kugelkörpers. Für Winkel zwischen 60° und 75° bleibt $R[\%]$ stabil (Abbildung 6-1 b)), jedoch ist für die Punktedichte eine Abnahme zu beobachten (Abbildung 6-1 a).

Für Winkel $>75^\circ$ lag die Anzahl der Punkte pro mm^2 unter 25 % des theoretischen Wertes. In diesem Intervall hätten die Punkte mit einer sehr hohen Genauigkeit rekonstruiert werden müssen, damit eine Modellierung möglich gewesen wäre. Aus Abbildung 6-1 b) geht hervor, dass die Genauigkeit in diesem Winkelbereich deutlich abnimmt. Sowohl die Richtigkeit, also auch die Präzision sind für diese hohen Winkelbereiche deutlich schlechter als für die kleineren Neigungswinkel. Dieser Effekt könnte durch die Kameraperspektive verursacht worden sein. Möglicherweise waren die entsprechenden Kugelbereiche nicht in beiden Aufnahmen sichtbar, weil sie sich nahezu parallel zur Aufnahmeachse befanden. Eine Ebene kann bereits durch drei Punkte eindeutig beschrieben werden. Dementsprechend kann eine Rekonstruktion auch bei einer geringen Punktedichte erfolgen [87,88]. Für eine Modellierung werden nur wenige Punkte auf der Objektoberfläche gebraucht, solange die Genauigkeit der rekonstruierten Punkte sehr hoch ist. In Abbildung 6-1 ist erkennbar, dass nahezu keine Flächenanteile für Winkel über 80° rekonstruiert wurden. Aufgrund der geringeren Punktedichte und der schlechteren Genauigkeit ist für Neigungswinkel $>75^\circ$ keine zuverlässige Rekonstruktion zu erwarten. Weitere Experimente könnten Aufschluss darüber geben, welchen Einfluss die abnehmende Punktedichte und die Anzahl der Ausreißer auf die Qualität der Rekonstruktion haben.

8.2. Blattparameter am künstlichen Pflanzenmodell

Zur Evaluierung der berechneten Blattparameter wurde ein künstliches Pflanzenmodell mit planaren und gebogenen Blättern verwendet. Die unterschiedlichen Blattmodelle sollen die natürlichen Blattverläufe von Getreidepflanzen exemplarisch abbilden. Zur Berechnung der Blattwinkelverteilung müssen sowohl die Blattfläche als auch die Blattwinkel rekonstruiert werden. Weiterhin müssen die Blattfläche und Neigungswinkel miteinander assoziiert werden, damit die Blattwinkelverteilung berechnet werden kann. Das bedeutet, dass für jeden Neigungswinkel der richtige Flächenanteil bestimmt werden muss. Im Folgenden sollen die unterschiedlichen Aspekte, welche mit dem

Pflanzenmodell untersucht wurden, systematisch betrachtet werden. Hierfür werden die berechneten Parameter i) Blattbreite, ii) Blattachsenlänge, iii) Blattfläche, iv) Insertionswinkel, v) mittlerer Neigungswinkel und die final berechnete vi) Blattwinkelverteilung beleuchtet.

8.2.1. Blattbreite

Die maximale Blattbreite wurde mit Ausreißern durchschnittlich auf 11,33 mm geschätzt. Hier zeigt sich ein systematischer Fehler von 0,33 mm (3%) und ein nicht-systematischer Fehler von 1,66 mm. Die vergrößerte maximale Blattbreite könnte durch fehlerhafte Disparitäten entlang der Blattkante verursacht worden sein. Fehlerhafte Disparitäten können nur erkannt werden, wenn ein Schwellenwert überschritten wird. Wenn kleine Fehler in der Rekonstruktion nicht gefiltert werden können, ist es möglich, dass die Blätter etwas breiter werden. Ein zu strenges Filtern kann zu einer Unterschätzung der Blattbreite führen, weil Punkte an den Blattkanten weg gefiltert werden. Weitere Ursachen für eine überschätzte Blattbreite könnten Verzerrungen in den Aufnahmen sein oder kleine Fehler in der Kalibrierung, welche zu einer systematischen Vergrößerung der Rekonstruktion führen. Dornbusch et al. publizierten nicht nur die Funktion für die Blattmodellierung, sondern zeigten auch, welche systematischen und nicht-systematischen Fehler theoretisch erreicht werden können [15]. In ihrer Veröffentlichung nutzten sie virtuelle Punktwolken von selbstmodellierten Blättern und versuchten diese anschließend durch einen Fit der Blattfunktion wieder darzustellen. Die Blattbreite wurde in diesem Fall mit einem systematischen Fehler von 0,1 mm und einem nicht-systematischen Fehler von 0,24 mm bestimmt. Ob es sich um eine Über- oder Unterschätzung der Blattbreite handelte, wurde in der Veröffentlichung nicht näher erläutert. Die ermittelten Fehler sind etwas geringer als bei dem von uns verwendeten Aufbau. Im Folgenden sollen kurz mögliche Ursachen benannt werden. Anschließend wird die von uns verwendete Methode mit anderen Methoden zur Blattbreitenbestimmung verglichen.

Die Modellierung der Blattkanten ist für die Berechnung der maximalen Blattbreite entscheidend. Die Darstellung der Blattkanten erfolgt über die Blattkantenfunktion, welche in die Punktwolke gefittet wird. Hierbei können unterschiedliche Faktoren die Güte der Modellierung beeinflussen: i) Blattkanten

werden durch den SGBM-Algorithmus nicht perfekt dargestellt. Dadurch können fehlerhafte Disparitäten entlang der Blattkanten ermittelt werden, welche im Verlauf der Datenverarbeitung rausgefiltert werden. Zusätzlich gibt es Fälle, in denen keine Disparitäten für die Blattkanten bestimmt werden [89]. Oder ii) das verwendete mathematische Modell kann die reale Blattform nicht optimal wiedergeben. Die Modellfunktion für die Blattkanten kann nur einen begrenzten Verlauf abbilden, sodass möglicherweise der reale Blattverlauf durch die Funktion nicht abbildbar ist. Hierfür gibt es unterschiedliche Ursachen. Es ist möglich, dass das Modell den Blattkantenverlauf nicht mit den verfügbaren Parametern abbilden kann. Außerdem können leichte Abweichungen der Disparitäten entlang der Blattkanten möglicherweise nicht aus der Punktwolke herausgefiltert werden. Diese führen dazu, dass die Blattform im Fit verzerrt wird und das Modell somit schmaler oder breiter ist als das Blatt.

Wang et al. beschreiben die Bestimmung von Blattparametern mit Hilfe von 2D-Aufnahmen und vergleichen ihre photogrammetrische Methode mit manuellen Messungen [90]. In der Studie bestimmen sie die Blattbreite unterschiedlicher Sorten der Kiwi-Pflanzen mit einem mittleren absoluten Fehler (MAE) von 2,48 – 2,81 mm. R[%] wird mit einem Wert von 1,17 % angegeben. Eine genauere Analyse bezüglich Präzision oder systematischer und nicht-systematischer Fehler wird in der Publikation nicht gegeben. Hinsichtlich des MAE für die geschätzten Blattbreite und eingesetzten Sensoren sind die beiden Methoden vergleichbar. Beide zeigen einen geringen Fehler und können die Blattbreite mit Hilfe einfacher Kameras bestimmen. Der geringere Wert für R[%] bei Wang et al. ist vermutlich auf die unterschiedlichen Umgebungsbedingungen für die Aufnahmen und die Datengrundlage für die Bildverarbeitung zurückzuführen. Das Verfahren nach Wang et al. dient nicht der Rekonstruktion von 3-dimensionalen Strukturen. Die Blätter der Kiwi-Pflanze wurden gepflückt und für die Aufnahmen in den Kamerafokus gelegt. Dieses Vorgehen ermöglicht Aufnahmen unter kontrollierten Bedingungen. Da für die Bild-Verarbeitung die RGB-Aufnahmen genutzt werden, werden keine zusätzlichen Störfaktoren in das System einbezogen. Für den von uns präsentierten Ansatz

wurden die Aufnahmen unter natürlichen Lichtbedingungen gemacht, weil er für die Feldanwendung entwickelt wurde und dementsprechend auch unter Feldbedingungen evaluiert werden sollte.

Li et al. präsentieren in ihrer Veröffentlichung Daten zu geschätzten Blattbreiten für die Blätter von Birnenbäumen. Die Daten wurden mittels eines LiDAR Scanners gewonnen und hatten aufgrund eines *multi scanning* Ansatzes eine sehr hohe Auflösung [91]. Referenzmessungen wurden manuell vorgenommen. Die Blätter des Birnenbaumes sind weniger flexibel und im Gegensatz zu Weizenblättern spindelförmig. In der Publikation wird nur der *root mean square error* (RMSE) als Fehlermaß angegeben. Dieser lag für die ermittelte Blattbreite bei 3,9 mm (3,5-5,5 %), wobei die Blätter zwischen 60 und 110 mm breit waren. Aufgrund der unterschiedlichen Fehlermaße ist ein direkter Vergleich zwischen den Verfahren schwierig. Der RMSE gewichtet größere Ausreißer stärker und kann dadurch größer ausfallen als der MAE. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass der MAE für die berechnete Blattbreite etwas kleiner ist als der RMSE, und das Verfahren nach Li et al. eine ähnliche oder höhere Genauigkeit hat als das präsentierte Stereo-Verfahren. Diese Tatsache könnte auch darin begründet sein, dass die Auflösung der Punktwolke durch den *multi scanning* Ansatz höher ist als bei einem Stereo-Verfahren. Das Stereo-Verfahren macht nur aus einer Perspektive Aufnahmen und ist nicht so hochauflösend. Allerdings ist das LiDAR-System in einem *multi scanning* Ansatz in einem Getreidefeld mit sehr beweglichen Blättern aufgrund der Wittereinflüsse nicht praktikabel.

8.2.2. Blattachsenlänge

Die Blattachse kann nur vollständig modelliert werden, wenn Insertionsstelle und Blattspitze in den Stereoaufnahmen zu erkennen sind. Die Blattachse wurde im Durchschnitt etwa 2,2 mm (+3,6 %) länger geschätzt als die tatsächliche Länge. Wir konnten einen systematischen Fehler von 2,22 mm und einen nicht-systematischen Fehler von 7,4 mm nachweisen. R[%] lag bei 1,5 und P[%] bei 7,1. Ursächlich für die Abweichungen in der Blattachsenlänge können Ausreißer im Bereich der Insertionsstelle und der Blattspitze sein. Für die Berechnung der Blattachsenlänge ist in diesem Verfahren die Qualität der 3D-Punktwolke entscheidend. Dementsprechend ist auch die Kalibrierung von Bedeutung. Kleine Fehler in der Kalibrierung können bereits systematische Fehler in der 3D-

Punktwolke verursachen. Wenn bei einem gebogenen Blatt die 3D-Rekonstruktion nicht gelingt, kann die Biegung nicht modelliert werden, sodass auch die Blattachsenlänge nicht abgeschätzt werden kann. Die Qualität der rekonstruierten Punktwolke ist im Evaluationsexperiment sehr hoch. Unter Feldbedingungen ist damit zu rechnen, dass R[%] größer wird, weil die Blätter teilweise verdeckt werden können, sodass die Blattachse nicht vollständig in den Aufnahmen abgebildet wird. Zusätzlich kann es durch verrauschte Daten zu fehlerhaften Abschätzungen der Blattachsenlänge kommen.

Wang et al. bestimmten mit ihrem Verfahren ebenfalls die Blattachsenlänge (siehe Kapitel 8.2.1) und berechneten einen absoluten mittleren Fehler von 1,65-2,24 mm [90]. Dies entsprach einem R[%] von 1,12. Die Werte für R[%] unterscheiden sich bei den Verfahren nur geringfügig. Unser Verfahren kann die Blattachse somit mit einer ähnlichen Richtigkeit bestimmen wie ein Verfahren, bei dem die Blätter flach hingelegt werden. Dies deutet darauf hin, dass Rekonstruktion der Biegung bei einem gebogenen Blatt mit einer sehr hohen Genauigkeit gelingen kann.

Auch Li et al. berichteten über die Berechnung der Blattachsenlänge. Sie ermittelten einen RMSE von 4,3 mm [91]. Da die rekonstruierten Blätter eine ähnliche Länge hatten wie die künstlichen Weizenblätter, liegen die Fehlerspannen auch hier in einem ähnlichen Bereich wie bei unserem Stereo-Verfahren. Unser Verfahren liefert in den Evaluationsexperimenten für die Blattachsenlänge eine ähnliche Genauigkeit wie die Verfahren, bei denen das Blatt fixiert und unter kontrollierten Bedingungen fotografiert wird oder die Daten mittels eines hochauflösenden *multi scanning* Verfahrens gewonnen werden.

8.2.3. Blattfläche

Die Analyse der Blattfläche zeigte, dass die Fläche durch die Modellierung unterschätzt wird. Die berechnete Blattfläche entspricht beim planaren Blatt durchschnittlich 87,1 % (R[%] = 12,9) der realen Fläche des künstlichen Blattes. Dieser Wert bildet die Genauigkeit der Rekonstruktion jedoch nicht optimal ab. Der systematische Fehler bei der Blattflächenrekonstruktion liegt bei 195,8 mm² (14,4%) und der nicht-systematischen Fehler bei 107,6 mm² (7,9%).

Die Berechnung der Blattfläche hängt in unserem Verfahren im Wesentlichen davon ab, wie genau die Modellierung der Blattachse und der Blattkanten möglich ist. Ungenauigkeiten in der Blattfläche entstehen bereits durch die Abweichungen der maximalen Blattbreite und Blattachsenlänge zu den Referenzwerten und können durch eine fehlerhafte Beschreibung der Blattkanten durch das Modell noch verstärkt werden. Ein wichtiger Aspekt ist in diesem Kontext, wie genau die Modellfunktion die reale Blattform beschreiben kann. Wenn keine geeigneten Parameter gefunden werden können, um die reale Blattform zu modellieren, weicht auch die rekonstruierte Blattfläche von der realen Oberfläche ab.

Ein anderes Verfahren zur Berechnung der Blattfläche und Blattwinkelverteilungen von Weizen wurde von Dandriofosse et al. publiziert. Sie verwendeten ebenfalls einen Stereoaufbau und evaluierten die Rekonstruktion der Blattfläche nicht gebogener Blätter unter Laborbedingungen. In ihrem Verfahren konnten sie eine deutliche Überschätzung der Blattfläche feststellen. Bei Ansätzen die auf der Delaunay Triangulation basieren, zeigte sich der sogenannte Treppenstufen-Effekt. Dieser führt zu einer Überschätzung der Blattfläche. Bei Dandriofosse et al. bewirkt dieser Effekt eine systematische Überschätzung der Blattfläche von bis zu 50%. Die nicht-systematische Fehler lag bei 4,34-7,4% [32,92]. Die Berechnung der Blattfläche mit Hilfe von 3D-Daten und der Delaunay-Triangulation hat einen deutlich größeren systematischen Fehler als das von uns vorgeschlagene Verfahren mit Hilfe einer funktionalen Beschreibung der Blattgeometrie. Die Funktionen minimieren den Treppenstufen-Effekt, sodass die Blattfläche weniger stark überschätzt wird als bei Dandriofosse et al..

Neben der Blattbreite und Blattachsenlänge bestimmten Li et al. auch die Blattfläche mit ihrem Ansatz [91]. Die Berechnungen ergaben bei einer Blattfläche von bis zu 1000 mm² einen RMSE von -521 mm². Aufgrund der unterschiedlichen Fehlermaße ist ein direkter Vergleich zwischen dem Verfahren nach Li et al. und unserem Stereo-Verfahren kaum möglich. Li et al. geben in ihrer Veröffentlichung auch das lineare Regressionsmodell an. Dieses zeigt, dass in ihrer Methode ebenfalls ein systematischer Fehler vorliegt. Wie groß dieser systematische Fehler ist, lässt sich nicht aus den veröffentlichten Daten entnehmen.

8.2.4. Insertionswinkel

Für das planare Blatt wurde der Neigungswinkel mit einer sehr hohen Genauigkeit bestimmt. Auch frühere Studien zeigten ähnlich hohe Genauigkeiten für die Rekonstruktion von Neigungswinkeln bei planaren Blättern. Müller-Linow et al. ermittelten in ihren Experimenten mit einem künstlichen Pflanzenmodell einen NRMSE von 2,5 %. Die Referenzmessungen wurde mit einem Inclinometer vorgenommen. Auch in anderen Studien wurden hohe Genauigkeiten berichtet [32,33,35].

Im Vergleich zum Neigungswinkel eines planaren Blattes kann der Insertionswinkel eines gebogenen Blattes nur bei ausreichender Ausleuchtung des Pflanzenmodells rekonstruiert werden. Teilweise werden die Insertionsstellen und Blattspitzen nicht vollständig rekonstruiert, sodass in diesen Bereichen Informationen fehlen und in diesen Bereichen keine Modellierung des Blattes möglich ist.

Die Rekonstruktion des Insertionswinkels zeigt für alle Modelle des gebogenen Blattmodells einen Wert von $0,9^\circ$ für $R[^\circ]$ und $6,3$ für $P[^\circ]$. Diese Werte wurden unter Einbezug von Ausreißern ermittelt. Für die Modelle 3, 4 und 6 zeigt sich jeweils bei der 3. Aufnahme eine größere Abweichung, welche durch eine schlechtere Ausleuchtung im Bereich der Blattbasis entstehen kann. Für die Erstellung der 4 Ansichten wurde die Pflanze unter dem Kameraaufbau gedreht, so dass sich die Ausleuchtung trotz diffuser Lichtbedingungen jedes Mal änderte. Der Insertionswinkel α wird basierend auf dem Winkel zwischen der Vertikalen (optischen Achse) und der Linie zwischen den ersten beiden Punkten entlang der Blattachse berechnet. Wenn das Blatt im Bereich des Insertionswinkels nicht ausreichend ausgeleuchtet ist, kann dieser Bereich nicht optimal rekonstruiert werden und es entstehen vermehrt Ausreißer, die herausgefiltert werden. Für diesen Bereich fehlen dann entsprechend rekonstruierte Daten. Zusätzlich ist es möglich, dass Blattbasis und Blattspitze bei der Modellierung vertauscht wurden. Der Algorithmus definiert das schmal zulaufende Ende des Blattmodelles als Blattspitze und das andere Ende als Blattbasis. Somit kann eine falsche Zuordnung von Blattspitze ebenfalls durch eine fehlerhafte oder unvollständige Rekonstruktion der Insertionsstelle oder der Blattspitze entstehen. In diesem Fall würde nicht der Insertionswinkel, sondern der Winkel an der Blattspitze durch den berechneten Wert beschrieben. Während eine falsche Zuordnung keinen Einfluss auf die Qualität der

berechneten Blattwinkelverteilung hat, kann die unvollständige Rekonstruktion an der Blattbasis, welche zu einem falschen Insertionswinkel führt, sehr geringfügig auch die Blattwinkelverteilung beeinflussen. Unter Feldbedingungen ist die Ausleuchtung des Pflanzenbestandes nur bedingt kontrollierbar. Durch i) Messungen unter diffusen Lichtbedingungen, ii) Abschattung der Pflanzen und iii) zusätzliche Beleuchtung kann die Ausleuchtung im Feld künstlich homogenisiert werden. Trotzdem ist anzunehmen, dass die Blattbasis nicht immer erkennbar und die Berechnung des tatsächlichen Insertionswinkels nicht in jedem Fall möglich ist. Die Berechnung der Blattwinkelverteilung ist von diesem Effekt nur in einem geringen Maße betroffen. Nachdem die Ausreißer für die Modelle 3, 4 und 6 aus dem Datensatz entfernt wurden, betrug $R[^\circ]$ 0,4 und $P[^\circ]$ 1,5.

Der systematische und nicht-systematische Fehler wurde für den Neigungswinkel des planaren Blattes und den Insertionswinkel berechnet. Die Werte spiegeln die zuvor ermittelten Werte wider. Der systematische Fehler lag bei $0,5^\circ$ und der nicht-systematische Fehler bei $1,3^\circ$. Insgesamt kann der Neigungswinkel für die Insertionsstelle oder ein planares Blatt mit einem sehr geringen Fehler bestimmt werden. In der Literatur konnten wir keine weiteren Evaluierungen zur Berechnung des Insertionswinkels finden.

8.2.5. Mittlerer Neigungswinkel

Der mittlere Neigungswinkel wurde für die gebogenen Blätter des künstlichen Pflanzenmodells bestimmt. Er kann erste Hinweise darauf geben, ob die Blattwinkelverteilung realistisch rekonstruiert wird. Die ermittelten Fehlerwerte lagen in einer ähnlichen Größenordnung wie für den Neigungswinkel beim planaren Blatt und beim Insertionswinkel ohne Ausreißer. $R[^\circ]$ lag bei 0,4 und $P[^\circ]$ bei $1,3^\circ$, während der systematische Fehler $1,1^\circ$ und der nicht systematische Fehler $3,3^\circ$ beträgt.

Qu et al. nutzten ebenfalls RGB-Kameras, um den mittleren Neigungswinkel von Maispflanzen im Feld zu bestimmen. Die Aufnahmen wurden bei unterschiedlichen Sonnenwinkeln aufgenommen und basierend auf den sonnenbeschienenen und schattierten Bereichen im Bild der Neigungswinkel bestimmt [93]. Bei ihren Messungen konnten sie den mittleren Neigungswinkel mit einem MAE von $5,9^\circ$

bestimmen. Referenzmessungen wurden manuell vorgenommen und fanden ebenfalls im Feld statt. Die Referenzmessungen wurden mit Hilfe eines LAI-2200C durchgeführt. Der Sensor nutzt eine *Fisheye* Linse und ein optisches System zur Datengewinnung. Die Messungen werden in ein *radiative transfer model* gefittet, um Parameter wie den mittleren Neigungswinkel zu bestimmen [94]. Vor diesem Hintergrund gibt es keine Angaben zu der Genauigkeit der Referenzmessungen. Das Verfahren hat einen etwas größeren Fehler als das Stereo-Verfahren. Dandri-fosse et al. berechnen den mittleren Neigungswinkel für Weizenpflanzen unter Laborbedingungen [32]. Es wurden zwei unterschiedliche Methoden für die Oberflächenmodellierung genutzt und die Auswirkungen auf den ermittelten mittleren Neigungswinkel miteinander verglichen. Beide Methoden zeigen aufgrund des Treppenstufen-Effektes systematische Fehler für Neigungswinkel $<15^\circ$. Für größere Neigungswinkel wurde den Autoren zufolge kein systematischer Fehler gefunden, allerdings wird in den veröffentlichten Daten nicht zwischen systematischen und nicht-systematischen Fehlern unterschieden. Stattdessen werden mittlere absolute Fehler angegeben. Diese schwanken bei den beiden Methoden zwischen $6,16^\circ$ und $11,65^\circ$ bzw. $4,41^\circ$ und $7,3^\circ$ und lagen somit auf einem höheren Niveau als bei unserem Stereo-Verfahren.

8.2.6. Blattwinkelverteilung

Die rekonstruierten Blattwinkelverteilungen für die unterschiedlichen Blattmodelle zeigten, dass der mittlere Fehler für den rekonstruierten Neigungswinkel bei maximal 1° und die Standardabweichung bei 2° liegen. Diese Werte sind in einem ähnlichen Bereich wie bei der Berechnung des Neigungswinkels am planaren Blatt, des Insertionswinkels und des mittleren Neigungswinkels. Dies zeigt einerseits, dass die Modellierung grundsätzlich für die Rekonstruktion gebogener Blätter geeignet ist, und andererseits, dass die Blattwinkelverteilungen für gebogene Blätter mit einer hohen Genauigkeit ermittelt werden kann. Die rekonstruierte Blattwinkelverteilung hängt von unterschiedlichen Parametern ab. Die Blattfläche hat Auswirkungen auf die Flächenanteile bestimmter Blattwinkel und wirkt sich somit auf den Verlauf der Blattwinkelverteilung aus. Zusätzlich gibt es den eingestellten Insertionswinkel α und den Biege-radius r_b . Beide Parameter bestimmen, an welcher

Achsenposition das Blatt horizontal ausgerichtet ist, also einen Neigungswinkel von 0° hat. Sofern die Blattfläche über die Blattachse hinweg gleichmäßig über- oder unterschätzt wird, verändern sich die Flächenanteile der einzelnen Blattwinkel nicht, sodass der systematische Fehler bei der Bestimmung der Blattfläche sich nicht negativ auf die berechnete Blattwinkelverteilung auswirken muss.

Bei Blattwinkeln zwischen 0° und 10° ist ein besonderes Phänomen erkennbar. Die Rekonstruktionen der gebogenen Blätter zeigen, dass insbesondere der Anteil der Blattfläche mit einem Neigungswinkel $< 10^\circ$ überschätzt wird (Abbildung 6-11 a-e)). Dieses Phänomen wurde bereits in anderen Arbeiten beschrieben [32,92]. Die rekonstruierten Blattwinkelverteilungen für diesen Winkelbereich liegen anteilig über der Referenz (siehe Abbildung 6-9 und Abbildung 6-11 A) a-c), e). Diese Beobachtung kann durch zwei Effekte erklärt werden: i) die Blattkanten in diesem Bereich wurden zu breit gefittet oder ii) der Bieungsgrad wurde nicht optimal erfasst. Das würde bedeuten, dass der gefittete Bieungsradius größer ist als der tatsächliche Bieungsradius. Die erste Vermutung erscheint aufgrund der Tatsache, dass die maximale Blattbreite für das planare Blatt und Modell 1 des gebogenen Blatt mit einem sehr geringen Fehler wurde, weniger wahrscheinlich. Die zweite Hypothese bezieht sich auf den rekonstruierten Bieungsradius. Bereits im Kugelexperiment wurde beobachtet, dass die rekonstruierten Punkte im Bereich der Neigungswinkel $< 10^\circ$ vermehrt im Kugellinneren lokalisiert waren. Diese Beobachtung führte zu der These, dass es sich bei der Rekonstruktion nicht um eine Kugel, sondern ein Rotationsellipsoid handelte. Ein ähnlicher Effekt könnte die überschätzten Flächenanteile für geringe Neigungswinkel beim gebogenen Blatt hervorrufen. Das Blatt wird mit einem fest definiertem Bieungsradius rekonstruiert, welcher größer ist als der tatsächliche Bieungsradius r_b . Dadurch ist die Krümmung insgesamt flacher als im Pflanzenmodell der Referenz. Die Neigungswinkel zwischen 0° und 10° machen dadurch einen größeren Flächenanteil an der Gesamtfläche aus. In Abbildung 6-11 A) d) zeigt sich in der Blattwinkelverteilung ein gegenteiliger Effekt und die rekonstruierte Verteilung liegt unterhalb der Referenz. Auffällig ist, dass sich die geringen Neigungswinkel in diesem einen Fall im Bereich der Blattspitze befinden. Hier könnte der Verlauf der Blattkanten an der Blattspitze ursächlich sein. Möglicherweise erstellt die

Modellierungsfunktion eine zu schmal zulaufende Blattspitze, welche die Form des Blattes nicht optimal darstellt und diese dadurch in ihrer Fläche unterschätzt. Eine weiterführende Studie, in der unterschiedliche Modellierungsfunktionen für die Blattkanten miteinander verglichen werden, könnte hilfreich sein, um eine genauere Rekonstruktion der tatsächlichen Blattoberfläche zu erhalten. Eine eingehende Analyse, hinsichtlich der Ursachen für die Unterschätzung der Blattfläche könnte zudem die Bestimmung eines Korrektur-Terms ermöglichen.

Ein weiteres charakteristisches Merkmal der Blattwinkelverteilung ist der Umschlagpunkt. An dieser Stelle nimmt der Flächenanteil für die Neigungswinkel plötzlich deutlich ab. In Abbildung 6-9 liegt dieser Punkt ungefähr bei 35° . Die positive Definition der Neigungswinkel⁵ führt dazu, dass der Winkelbereich zwischen Insertionswinkel und 0° zweimal entlang der Blattachse vorkommt. Für Modell 1 wurde erwartet, dass der Flächenanteil für jeden Neigungswinkel zwischen 0° und 35° jeweils ungefähr doppelt so groß ist wie für größere Winkel. Zusätzlich nimmt die rekonstruierte Fläche für größere Winkel immer weiter ab, weil die hohen Neigungswinkel sich an der Spitze befinden, wo sich das Blatt verjüngt. Ähnliche Umschlagpunkte⁶ sind auch in den Referenzverteilungen für die anderen Modelle zu erkennen, die Position des Umschlagpunktes ist dabei vom Insertionswinkel α abhängig (Tabelle 4-2). In Abbildung 6-11 a-e) ist zu erkennen, dass dieser Umschlagpunkt in der Rekonstruktion teilweise stärker ausgeprägt (Abbildung 6-11 c), e)) ist oder gar nicht rekonstruiert wurde (Abbildung 6-11 d)). Die Ursachen für derartige Abweichungen könnten in der Rekonstruktion von α liegen. Mögliche Gründe für eine fehlerhafte Berechnung von α wurden in Kapitel 8.2.4 betrachtet. Während bei einem planaren Blatt der Neigungswinkel konstant bleibt, verändert sich bei einem gebogenen Blatt der Winkel entlang der Blattachse. Somit entspricht der berechnete Winkel α nicht mehr dem eingestellten Insertionswinkel, wenn bei einem gebogenen Blatt die Blattbasis nicht in der

⁵ Eine ab der Insertionsstelle erst aufsteigende dann abfallende Blattscheide hat immer Neigungswinkel von $0^\circ - 90^\circ$.

⁶ Positionen in der Blattwinkelverteilung, an denen der Flächenanteil mit einem definierten Neigungswinkel sich plötzlich verändert.

Rekonstruktion abgebildet ist. In der Folge verschiebt sich auch der Umschlagpunkt in der Rekonstruktion, weil dessen Position von α abhängt.

In der Literatur sind unterschiedliche Studien zur Berechnung der Blattwinkelverteilung zu finden. Müller-Linow et al. entwickelten eine Matlab-Toolbox zur Berechnung der Blattwinkelverteilung im Feld [35]. Eine Evaluation fand am künstlichen Pflanzenmodell mit planaren Blättern statt, sodass die Besonderheiten einer Verteilungsfunktion nicht berücksichtigt wurden. Dandrifosse et al. nutzten ein Blatt, welches auf einer planaren Fläche fixiert war, für die Evaluation ihres Stereo-Verfahrens. Auch hier wurden keine Verteilungsfunktionen für die Evaluation genutzt [32]. In der Literatur konnten keine Studien gefunden werden, welche ein Referenzmodell mit gebogenen Blättern nutzen, dementsprechend können die quantitativen Ergebnisse an dieser Stelle nicht mit denen andere Studien verglichen werden.

8.3. Getreidepflanzen

Die Rekonstruktion und Modellierung der Kronendächer von Weizenpflanzen im Feld ist in dieser Arbeit die Grundlage für die Evaluierung der Effekte unterschiedlicher Aussaatstärken sowie des Einflusses unterschiedlicher Weizensorten. Der hier entwickelte Modellierungsansatz kann dabei unabhängig vom Aufnahme-System / Sensor (z.B. Stereokameras, Multi-Kamera-Verfahren, LiDAR, *Structured-Light*) auf jegliche 3D-Punktwolken angewendet werden. Es gilt aber zu beachten, dass nicht alle Verfahren die dazu erforderliche Qualität liefern können. Sensoren, welche auf aktive Methoden wie LiDAR oder *Structured-Light* (hier in erster Linie das PlantEye, Phenospex, NL) setzen, sind prinzipiell in der Lage, hoch aufgelöste 3D-Daten zu liefern. Jedoch hängt die Qualität der Aufnahmen von der Aufnahmedauer ab und bisher sind noch keine Studien verfügbar, welche den Einsatz dieser Sensoren unter Feldbedingungen evaluieren. Maphosa et al. nutzten das PlantEye zur Phänotypisierung von Weizenpflanzen unter kontrollierten Bedingungen und nicht für die Berechnung von Blattwinkelverteilungen [42]. Hosoi et al. nutzten einen mobilen LiDAR Scanner, um hoch aufgelöste 3D-Punktwolken zu generieren [33]. Die Methode wurde unter windstillen Bedingungen evaluiert. Die Blätter der Getreidepflanzen bewegen sich unter Feldbedingungen nahezu

kontinuierlich, sodass die langen Scanzeiten des LiDAR zu verrauschten Punktwolken führen können. Das Stereo-System bietet an dieser Stelle den Vorteil, dass es im Vergleich zu den anderen Systemen eine sehr kurze Aufnahmezeit hat. Als Nachteil gegenüber den zuvor genannten Verfahren wird die Anfälligkeit gegenüber wechselnden Lichtbedingungen und der Mehraufwand bei der Prozessierung der Rohdaten bis hin zur 3D-Punktwolke genannt. In dieser Arbeit wurden die Bildverarbeitungsschritte weitestgehend automatisiert. Der manuelle Aufwand beschränkt sich auf die Nachbearbeitung der Punktwolke, ein Schritt, der auch bei anderen Methoden anfallen würde. Für die manuelle Blattsegmentierung und das Zusammenfügen einzelner Blattteile benötigt man 1- 5 Minuten pro Bild, sodass sie den limitierenden Faktor bei der Datenverarbeitung darstellen. Da bei Feldexperimenten sehr große Datenmengen produziert werden, wäre eine Automatisierung dieses Schrittes zum Beispiel durch Instanz-Segmentierung mittels Deep Learning Verfahren ein wichtiger Aspekt für weiterführende Arbeiten [95].

Im Feldbestand kommen weitere Effekte zum Tragen, wie z.B. Verdeckungen oder (bei direkter Sonneneinstrahlung) überbelichtete Regionen, welche die Rekonstruktion beeinflussen. Um einen Eindruck von der Qualität der Blattmodelle zu bekommen, wurden die Modellierungen der Weizenblätter mit den zugrunde liegenden Aufnahmen verglichen. Die Qualität der Modellierung insbesondere stark gebogener Blattachsen und verdrillter Blätter ist von der Punktedichte der Rekonstruktion abhängig (Abbildung 7-2 a). Durch Verdeckungen und überbelichtete Regionen in den Aufnahmen können große Lücken in den Punktwolken entstehen, sodass die Modellierung der Blattoberfläche deutlich erschwert wird (Abbildung 7-2 b)). An dem Beispiel in Abbildung 7-2 b) zeigt sich auch ein Nachteil der verwendeten Blattachsenmodellierung. Die mittlere Blattachse ist in der Aufnahme deutlich zu erkennen. Der Blattachsenverlauf kann durch die Blattachsenmodellierung nicht abgebildet werden und der Achsen-Fit liegt nicht mittig zwischen den Blattkanten. Die implementierte Funktion für die Berechnung der Blattkanten setzt voraus, dass diese achsensymmetrisch entlang der mittleren Blattachse verlaufen [1,1,15,67]. In dieser Konstellation führt das dazu, dass die Blattkanten nicht passend modelliert werden können und Blattform und Blattbreite nicht exakt bestimmt werden.

In weiterführenden Arbeiten sollte eine Blattkantenfunktion berücksichtigt werden, welche flexibel ist und asymmetrische Blattkantenmodelle einbezieht. Im Zuge der manuellen Nachverarbeitung können getrennte Blattstücke manuell miteinander verknüpft werden. In diesen Fällen interpoliert die Software während des Modellierungsprozess (Abbildung 7-2 b)). Sobald an den Blattenden (Blattbasis oder Blattspitze) Punkte fehlen, kommt es zu einer fehlerhaften Modellierung des Blattes (verkürzte Blätter), dieser Effekt ist in Abbildung 7-2 c) sichtbar. Die ermittelte, wenn auch nicht ganz vollständige Punktwolke wird durch das Modell dennoch mit einer hohen Genauigkeit beschrieben.

Die Modellierung der Blattwinkelverteilung mittels Beta-Funktion ist ein gängiges Verfahren in der Praxis. Die Parameter μ und ν werden zum Beispiel in mathematischen Modellen zur Berechnung der Blattreflexion und Lichtabsorption in Kronendächern verwendet [28]. Die zwei-parametrische Funktion bietet eine bessere Beschreibung der Blattwinkelverteilungen als ein-parametrische Funktionen [27,96]. Eine alternative Modellfunktion stellt die ellipsoide Funktion dar [98]. Wang et al. beschreibt, dass die Beta-Funktion der ellipsoiden Funktion in Gräsern überlegen ist [25]. In unseren Beispielen kann die Beta-Funktion den globalen Verlauf der Verteilung darstellen, allerdings werden die Peaks einzelner Häufigkeiten nicht modelliert. Weiterführende Studien sollten die Blattwinkelverteilung für die Weizenpflanzen mit Hilfe zahlreicher Aufnahmen berechnen. Es ist anzunehmen, dass die Präzision auf diese Weise größer wird, sodass die Blattwinkelverteilung nicht mehr von einzelnen Peaks dominiert wird und einheitlicheres Bild der Verteilungsfunktion entsteht.

Die rekonstruierten Blattwinkelverteilungen und Beta-Funktionen (Abbildung 7-4) zeigen eine plagiophile bis erektophile Charakteristik. Dies zeigt sich auch in den rekonstruierten mittleren Blattwinkeln. Die plagiophile Verteilung nach De Wit hat einen mittleren Neigungswinkel von 45° , wobei die Neigungswinkel um 40° - 50° dominant vertreten sind [26]. Bei der erektophilen Verteilung treten vermehrt hohe Neigungswinkel auf und der mittlere Neigungswinkel liegt bei $57,5^\circ$. Dieses Muster zeigt sich deutlich in Abbildung 7-4 b). In der gesamten Studie zum Effekt der Sorten und Aussaatstärken auf die Blattwinkelverteilung schwankten die mittleren Neigungswinkel zwischen 41° und 64° (Tabelle 7-4). Die berechneten mittleren Neigungswinkel sind konsistent zu den Angaben für

den mittleren Blattwinkeln bei plagiophil und erektophil nach De Wit [26]. Ähnliche Verteilungsmuster für Weizen wurden bereits von Dandriofosse et al. [32] und Huang et al. [99] beschrieben. Der mittlere Neigungswinkel für Weizenpflanzen wurde bereits in mehreren Studien betrachtet. Hosoi et al. ermittelten mit einem LiDAR Sensor einen mittleren Neigungswinkel von 44°-56°, allerdings hatten sie eine sehr hohe Varianz in den Messwerten [33]. Dandriofosse et al. führten die Aufnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Vegetationsperiode durch. Dabei ermittelten sie mittlere Neigungswinkel zwischen 52° und 63° und ein plagiophiles Verteilungsmuster[32]. Diese Ergebnisse decken sich mit den Resultaten aus unserer Studie. Auch Shibayama und Watanabe rekonstruierten den mittleren Neigungswinkel für zwei verschiedene Weizensorten mittels polarisierten Licht und einem LAI-2000 Sensor [100]. Bei ihnen schwankte der Neigungswinkel zwischen 55° und 65°.

Das Stereo-Verfahren in dieser Arbeit besteht aus zwei Kameras und kann im Feld von einer einzelnen Person bedient werden. Die Materialkosten sind überschaubar, sodass es sich um einen *low cost* Ansatz handelt. Im Gegensatz zu anderen Sensoren ist es hinsichtlich der 3D-Rekonstruktion eingeschränkt. Der Einsatz mehrerer Kameras erhöht die Genauigkeit und die Punktedichte der 3D-Punktewolke und somit auch potenziell die Genauigkeit der rekonstruierten Blattparameter sowie der Blattwinkelverteilung. Im Excellzcluster *PhenoRob*⁷ wird an einem aufwendigen roboterbasierten System gearbeitet, welches mit 14 Kameras ausgestattet ist und gleichzeitig Aufnahmen aus verschiedenen Blickwinkeln liefern soll [101,102]. Dieser Aufbau hätte das Potential, sehr hoch aufgelöste Felddaten zu liefern. Während diese Arbeit erstellt wurde, gab es noch keine publizierten Daten zu Weizenpflanzen aus den *Phenorob* Experimenten. Zukünftige Studien sollten deshalb die Frage, welchen Mehrwert der Aufbau mit 14 Kameras für die Rekonstruktion von Weizenpflanzen und zugehöriger Parameter liefert, betrachten. In welchem Verhältnis die Verbesserung in der Berechnung der Blattparameter und die erhöhten Kosten bei einem roboterbasierten System stehen, sollte in diesem Kontext ebenfalls kritisch hinterfragt werden.

⁷ https://www.aussenlabore.uni-bonn.de/wiesengut/de/forschung-1/phenorob_cp4

8.4. Effektstärken von Getreidesorten und Aussaatstärken auf Blattwinkelverteilungen im Feld

Bislang findet sich nur wenig Literatur, welche die Bestimmung von Blattwinkelverteilungen für Getreidepflanzen im Allgemeinen und insbesondere im Feld thematisiert. Der Einfluss verschiedener Faktoren wie Saatkichte oder Sorteneffekte auf die Blattwinkelverteilung im Feldexperiment wurde ebenfalls kaum untersucht [32,33,103,104]. Yanli et al. nutzen bereits 2007 die Blattwinkelverteilung, um Weizensorten voneinander zu unterscheiden [104]. Sie verwendeten NDVI-Messungen, um Blattwinkelverteilungen als planophil oder erektophil zu klassifizieren. Bei dieser Klassifikation werden zwei extreme Formen der Blattwinkelverteilung differenziert. Somit unterscheidet sich dieser Ansatz deutlich von dem hier dargestellten, welcher die Blattwinkelverteilung in Form einer Beta-Verteilung modelliert. Der Effekt der Aussaatdichte auf den erwartbaren Ertrag ist ein wichtiger Aspekt in der Forschungslandschaft. Eine Übersicht zu diesem Thema publizierten Bastos et al. [105]. Die Blattwinkelverteilung spielt eine wichtige Rolle bei der photosynthetischen Aktivität der Blätter, sodass sie auch für die Ertragsmenge entscheidend sein kann [23]. Für Maispflanzen zeigten Winter und Ohlrogge im Jahr 1973, dass das Zusammenspiel zwischen Aussaatdichte und Blattwinkel für die Ertragsmenge eine wichtige Rolle spielt [106]. In den folgenden Jahren war die Frage, ob Manipulationen der Kronendachstruktur zu einem höheren Ertrag bei Feldfrüchten führen können, von wissenschaftlichen Interesse [13,107,108]. Abichou et al. untersuchten den Effekt unterschiedlicher Reihenabstände auf den mittleren Neigungswinkel und den Insertionswinkel der Blätter von Weizenpflanzen [109]. Die Aussaatdichte blieb in der Studie allerdings konstant bei $170 \frac{\text{Samen}}{\text{m}^2}$. Es fehlen Studien, die sich intensiv mit der Frage auseinandersetzen, welchen Effekt die Aussaatdichte tatsächlich auf die Blattwinkelverteilung unterschiedlicher Weizensorten hat. Derartige Studien sind notwendig, um Effektstärken zu bestimmen und Experimente mit einer ausreichenden Wiederholungszahl zu planen, sodass statistisch signifikante Ergebnisse erzielt werden. Aus diesem Grund soll im Folgenden vor allen Dingen eine Diskussion der Effekte im Vordergrund stehen. Anhand der Blattmodelle, die mit den Stereoaufnahmen aus dem Feldexperiment berechnet wurden, wurde

untersucht, mit welchen Effektstärken die unterschiedlichen Weizensorten und Aussaatdichten die Blattwinkelverteilungen beeinflussen. In einer Hauptkomponentenanalyse (PCA) wurden zusätzlich die Blattbreite und der mittlere Neigungswinkel für die einzelnen Plots miteinbezogen.

Wang et al. zeigten 2007, dass die Beta-Funktion für die Beschreibung von Blattwinkelverteilungen im Vergleich zu anderen populären Funktionen besonders geeignet ist [25]. In dieser Studie konnte die Blattwinkelverteilung mittels Beta-Funktion ebenfalls realistisch beschrieben werden. Die Analyse der Übereinstimmung zwischen Beta-Verteilung und rekonstruierter Blattwinkelverteilung zeigte in 91 % der Fälle einen CCC über 0,5, was nach Cohen als eine starke Übereinstimmung gilt [43]. Für 22 % der Rekonstruktionen konnte ein CCC > 0,8 bestimmt werden. Dieser Wert kennzeichnet nach Altman eine sehr starke Übereinstimmung [81]. Abbildung 7-4 zeigt, dass die Blattflächenanteile durch die Beta-Funktion gut beschrieben werden. In Abbildung 7-4 b) ist zu sehen, dass auch bei einem CCC von 0,56 die Verteilung der Blattwinkel in weiten Teilen realistisch wiedergegeben wird. Der deutliche Peak bei den rekonstruierten Blattwinkeln im Bereich von 58°-65° kann durch die Beta-Funktion nicht abgebildet werden, deshalb ist der CCC vergleichsweise gering. In Abbildung 7-3 sind ebenfalls Peaks bei unterschiedlichen Neigungswinkeln zu erkennen. In den Beispielen sind sie vorrangig in Winkelbereichen zwischen 55° und 65° vertreten. Blattwinkelverteilungen unterschiedlicher Pflanzenarten zeigen derartige Peaks in den Blattwinkelverteilungen [110,111]. Ob diese Neigungswinkel in der Kronendachstruktur des Weizens eine besondere Bedeutung haben, sollte in weiterführenden Studien geklärt werden.

Im Falle der Sorten zeigt ω^2 mit einem Wert von 0,02 einen kleinen Effekt an. Dieser Effekt zeigte sich über alle Aussaatstärken hinweg, sodass in einem experimentellen Ansatz mit höheren Wiederholungszahlen signifikante Ergebnisse erzielt werden könnten. Yanli et al. beschrieben, dass der mittlere Neigungswinkel zwischen verschiedenen Weizensorten deutlich voneinander abweicht [104]. Vor diesem Hintergrund wäre ein größerer Effekt zwischen den Sorten zu erwarten gewesen. Trotzdem zeigen die Eigenwerte der Hauptkomponentenanalyse, dass der mittlere Neigungswinkel einen wesentlichen Faktor bei der Varianz in den Daten spielt (Tabelle 7-7). Der mittlere Neigungswinkel hat

in dieser Analyse zum Beispiel einen größeren Einfluss auf die gesamte Varianz als die mediane Blattbreite. Yanli et al. verwendeten in ihrer Studie Sorten mit planophilen und erectophilen Blattwinkelverteilungsmustern. In diesem Fall ist eine stärkere Differenz zwischen den mittleren Neigungswinkeln der einzelnen Sorten zu erwarten als in unserer Studie. Wir konnten primär plagiophile und erectophile Verteilungsmuster rekonstruieren und diese Verteilungen weisen sehr ähnliche mittlere Neigungswinkel auf. Um größere Effekte nachweisen zu können, müsste eine andere Sortenauswahl getroffen werden. Diese könnte zum Beispiel mit Hilfe der Sortenangaben in der Publikation von Yanli et al. erfolgen.

Die Analyse der Effektstärke durch die Aussaatstärken wurde in zwei Schritten durchgeführt. Wenn die Daten aller Sorten in die Analyse mit einbezogen wurden, konnte nur ein kleiner Effekt $\omega = -0,01$ durch die Aussaatdichten auf die Blattwinkelverteilung nachgewiesen werden. Zunächst scheint der durch die Aussaatstärken verursachte Effekt geringer zu sein als der Effekt durch die verschiedenen Sorten. Auch die PCA (Abbildung 7-5) zeigt für die unterschiedlichen Sorten keine eindeutigen Cluster. Bei genauer Betrachtung ist erkennbar dass die einzelnen Sorten unterschiedlich stark entlang der beiden Komponenten streuen. Während Granus (blau) im Vergleich zu den anderen Sorten nur wenig streut, variieren die Messwerte der Sorte Matthus stärker. Bei dieser Sorte befindet sich jedoch ein großer Teil der Messpunkte im positiven Bereich der ersten Komponente. Für Chamsin streuen die Messpunkte über den gesamten Wertebereich der ersten Komponente. Dafür streuen die Werte, im Vergleich zu den Messpunkten der anderen beiden Sorten, weniger entlang der zweiten Komponente. Die ausgewählten Getreidesorten unterschieden sich in ihrer Bestandsdichte (Tabelle 5-1). In den Daten zeigt sich kein eindeutiger Effekt, der einen Hinweis darauf gegeben hätte, dass die Sorten unterschiedlich auf die Aussaatstärken reagieren. Für einen derartigen Effekt müsste wahrscheinlich eine Sortenauswahl mit größeren unterschieden in der Bestandsdichte getroffen werden.

In Abbildung 7-6 sind die Ergebnisse der PCA bezüglich der unterschiedlichen Aussaatstärken gezeigt. Die Messpunkte lassen hierbei keine Cluster oder unterschiedlichen Streuungsverhalten erkennen. Betrachtet man nur die minimale und maximale Aussaatstärke zeigt sich für ω^2 zwar weiterhin ein

kleiner Effekt (0,03), die Ergebnisse der PCA (Abbildung 7-8) lassen im Vergleich zu den vorherigen Ergebnissen jedoch Clusterbildungen erkennen. Insbesondere die geringe Aussaatstärke streut stark entlang der 1. Komponente. Entlang der 2. Komponente zeigt sich für beide Aussaatdichten eine geringe Streuung, jedoch zeigt sich hier eine Trennung der Datenpunkte. Auch die Auftragung der beiden Beta-Funktion Parameter zeigte, dass die unterschiedlichen Aussaatstärken sich auf die Blattwinkelverteilung auswirken (Abbildung 7-7 a). Die Analyse der Blattbreite in Abhängigkeit vom mittleren Neigungswinkel zeigte ebenfalls, dass die verschiedenen Aussaatstärken unterschiedliche Verhalten zeigen (Abbildung 7-7 b). In allen Auftragungen clustern die Messwerte für die hohe Aussaatdichte von $450 \frac{\text{Samen}}{\text{m}^2}$ stärker als jene für die geringe Aussaatdichte von $150 \frac{\text{Samen}}{\text{m}^2}$. Basierend auf diesen Ergebnissen kann die Hypothese aufgestellt werden, dass die geringere Aussaatdichte mit einer größeren Varianz in den Daten assoziiert ist als die größere Aussaatdichte. Diese Beobachtung könnte ein Hinweis darauf sein, dass sich die Pflanzen bei hohen Aussaatstärken homogener entwickeln. Bei Maispflanzen wurde beispielweise bei einer höheren Aussaatstärke eine Tendenz zu steileren Blattwinkeln beobachtet [103]. In Abbildung 7-7 a) ist ein höherer mittlerer Neigungswinkel ebenfalls mit der Aussaatdichte von $450 \frac{\text{Samen}}{\text{m}^2}$. Wie bei Maispflanzen könnte bei Weizenpflanzen ein hohe Aussaatdichte zu einer Blattwinkelverteilungen mit steileren Blattwinkeln führen. Zusätzlich lassen die Varianzen innerhalb der Daten vermuten, dass die Kronendachstruktur der Weizenpflanzen bei hohen Aussaatdichten insgesamt homogener wird. Eine Hypothese wäre, dass die einzelnen Pflanzen bei geringen Aussaatstärken mehr Platz innerhalb des Pflanzenbestands haben, sodass die Blätter in unterschiedlichen Formationen ausreichend Sonneneinstrahlung bekommen [112,113]. Bei einer hohen Aussaatstärke ist der Bestand so dicht, dass unabhängig von der Weizensorte die einzelnen Pflanzen eine ähnliche Blattstruktur und Blattwinkelverteilung entwickeln, weil diese eine bestmögliche Photonenabsorption innerhalb des Kronendaches ermöglicht. Diese Vermutung müsste durch weitere Studien gestützt werden. Abichou et al. untersuchten den Effekt unterschiedlicher Reihenabstände auf die Architektur von Weizenpflanzen [109]. In ihrer Analyse betrachteten sie den mittleren Neigungswinkel und den Insertionswinkel der oberen Blätter im Kronendach. Der Effekt auf

den mittleren Neigungswinkel war insgesamt nur gering und nahm mit zunehmendem Entwicklungsstadium immer weiter zu. Unsere Daten wurden im 32. EC-Stadium aufgenommen. In diesem Stadium sind die Pflanzen noch klein und es sind erst 2 Knoten an den Pflanzen sichtbar. Möglicherweise müsste für eine weitere Studie Daten aus späteren EC-Stadien ausgewertet werden, um die Effekte auf die Kronendachstruktur umfangreicher beschreiben zu können. Auch die geringen Werte für die rekonstruierte Blattbreite (Tabelle 7-4) sind auf das früher EC-Stadium zurückzuführen.

Abschließend soll noch auf die in Kapitel 0 aufgestellten Hypothesen eingegangen werden. Die erste Hypothese lautete, dass anhand der Parameter der Beta-Funktion ein Effekt auf die Blattwinkelverteilung nachgewiesen werden kann. Die Hypothese konnte bestätigt werden. Die Auswertung des Feldexperiment zeigte Effekte auf die Parameter der Beta-Funktion. Die zweite Hypothese besagte, dass sowohl durch die Sorten als auch durch die unterschiedlichen Aussaatstärken ein großer Effekt auf die Blattwinkelverteilung entsteht. Diese Hypothese konnte nicht bestätigt werden. Für die unterschiedlichen Sorten konnten aufgrund der ermittelten Werte für ω^2 kleine Effekte ermittelt werden. Bei der Aussaatstärke war dieses Phänomen nicht so eindeutig nachweisbar. Zwischen der stärksten und geringsten Aussaatdichte konnte ein geringer Effekt nachgewiesen werden. Die dritte Hypothese, der Sorteneffekt ist größer als der Effekt durch die Aussaatstärken, wurde bestätigt, wenn alle Aussaatstärken gebündelt betrachtet wurden. Für die höchste und geringste Aussaatstärke war der ermittelte Effekt durch die Aussaatdichte größer als der Effekt durch die Sorten. Es ist jedoch anzumerken, dass es sich bei allen Effekten um kleine Effekte handelt, welche in einem Experiment nur mit einer hohen Wiederholungszahl statistisch signifikant nachgewiesen werden können.

9. Fazit

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem es möglich ist, realistische Blattoberflächen-Modelle von Weizenpflanzen im natürlichen Bestand zu erzeugen. Die Daten wurden mit einem Stereokamera-Aufbau erfasst und ein Blattmodell entwickelt, um diverse Blattparameter und insbesondere die Blattwinkelverteilungen abzuleiten. Die wesentlichen Vorteile dieses Ansatzes gegenüber anderen Verfahren sind seine hohe Flexibilität und das kostengünstige Setup. Der Aufbau ist so konzipiert, dass er problemlos von einer einzelnen Person im Feld angewendet werden kann. Die einzelnen Komponenten des Setups können sehr kostengünstig erworben werden, wobei leistungsfähigere Kameras auch die Qualität der Aufnahmen positiv beeinflussen. Die errechneten Blattparameter haben nur geringe Fehler und können die Kronendachstruktur beschreiben.

Im Gegensatz zu anderen Verfahren wurde in dieser Arbeit ein großer Fokus auf die Evaluation der Methode gelegt. Hierfür wurden unterschiedliche Referenzkörper verwendet und auch unterschiedliche Schritte im Rekonstruktionsprozess betrachtet. Die Evaluation in dieser Arbeit zeigte, dass unterschiedliche Blattparameter gleichzeitig berechnet werden können ohne, destruktive Verfahren anwenden zu müssen. Die Genauigkeit ist für die meisten Parameter sehr hoch und nur durch geringe systematische Fehler beeinflusst. Die Fehler sind ähnlich zu denen bereits publizierter Verfahren. Allerdings gibt es bei den meisten publizierten Verfahren keine Angaben zu systematischen und nicht-systematischen Fehlern. In dieser Arbeit zeigte ausschließlich die Blattfläche eine höhere systematische Abweichung zwischen Referenz und rekonstruierter Fläche. Es ist anzumerken, dass Verfahren mit einer sehr hohen Genauigkeit bei der Blattflächenbestimmung destruktiv sind und dementsprechend ein angepasstes experimentelles Design und einen erhöhten Personalaufwand erfordern. Die Berechnung der Blattachsenlänge und Insertionswinkel gestaltet sich mit dem Ansatz unter Feldbedingungen schwierig, weil durch Verdeckungen nicht alle Blätter vollständig abgebildet werden und insbesondere der Bereich in Halbnähe häufig nicht in den Aufnahmen erkennbar ist. In der Literatur konnten keine Verfahren gefunden werden, die unter Feldbedingungen für

Getreidepflanzen angewendet wurden und den Insertionswinkel oder die Blattachsenlänge berechnen.

In der Züchtung kann das Verfahren genutzt werden, um neue Sorten zu charakterisieren und ihre blattspezifischen Parameter zu beschreiben. Die globale Erwärmung stellt die Landwirtschaft vor neue Herausforderungen. Die Feldfrüchte müssen an veränderte Umweltbedingungen, wie längere Trockenperioden oder Starkregen angepasst werden. Um herauszufinden, welche spezifischen Eigenschaften der Pflanzen in diesem Zusammenhang besonders entscheidend sind, ist es wichtig, möglichst viele Parameter der Pflanze im Feld bestimmen zu können. Unser Ansatz kann mit einem geringen Kostenaufwand etabliert werden und liefert Ausgabeparameter, welche auch für weitere Modellierungen genutzt werden können.

Um die Feldplanung effektiver zu gestalten, kann der Grundgedanke aus der Case Study weiterentwickelt werden. Eine entscheidende Frage wäre, ob die Kronendachstruktur von Weizen durch äußere Faktoren oder gezielte Züchtung so beeinflusst werden kann, dass die photosynthetische Aktivität der Pflanze erhöht wird und auch die Ertragsmenge steigt. Äußere Faktoren können das Pflanzenmanagement in Form der Aussaatdichte, der Reihenabstand oder auch die Anwendung von Dünger oder Fungiziden sein. In diesem Zusammenhang wäre auch die Frage interessant, ob die Anwendung der Fungizide oder Dünger einen dauerhaften oder temporären Effekt auf die Blattwinkelverteilung oder andere Blattparameter haben kann.

10. Literatur

- [1] T. Dornbusch, J. Watt, R. Baccar, C. Fournier, B. Andrieu, A comparative analysis of leaf shape of wheat, barley and maize using an empirical shape model, *Annals of botany* 107 (5) (2011) 865–873.
- [2] S. Shaaf, G. Bretani, A. Biswas, I.M. Fontana, L. Rossini, Genetics of barley tiller and leaf development, *Journal of integrative plant biology* 61 (3) (2019) 226–256.
- [3] The State of Food Security and Nutrition in the World 2020, FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO, 2020.
- [4] Crop Prospects and Food Situation #2, July 2021, FAO, 2021.
- [5] C. Zhao, B. Liu, S. Piao, X. Wang, D.B. Lobell, Y. Huang, M. Huang, Y. Yao, S. Bassu, P. Ciais, J.-L. Durand, J. Elliott, F. Ewert, I.A. Janssens, T. Li, E. Lin, Q. Liu, P. Martre, C. Müller, S. Peng, J. Peñuelas, A.C. Ruane, D. Wallach, T. Wang, D. Wu, Z. Liu, Y. Zhu, Z. Zhu, S. Asseng, Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114 (35) (2017) 9326–9331.
- [6] M. Pourkheirandish, A.A. Golicz, P.L. Bhalla, M.B. Singh, Global Role of Crop Genomics in the Face of Climate Change, *Frontiers in plant science* 11 (2020) 922.
- [7] R.J. Snowdon, B. Wittkop, T.-W. Chen, A. Stahl, Crop adaptation to climate change as a consequence of long-term breeding, *TAG. Theoretical and applied genetics. Theoretische und angewandte Genetik* 134 (6) (2021) 1613–1623.
- [8] H. Singh Bakala, G. Singh, P. Srivastava, Smart Breeding for Climate Resilient Agriculture, in: I. Y. Abdurakhmonov (Ed.), *Plant Breeding - Current and Future Views*, IntechOpen, 2021.
- [9] M.F. Dreccer, D. Bonnett, T. Lafarge, Plant Breeding plant breeding Under a Changing Climate plant breeding under a changing climate, in: P. Christou, R. Savin, B.A. Costa-Pierce, I. Misztal, C.B.A. Whitelaw (Eds.), *Sustainable Food Production*, Springer New York, New York, NY, 2013, pp. 1296–1307.

-
- [10] S. Ceccarelli, S. Grando, Evolutionary Plant Breeding as a Response to the Complexity of Climate Change, *iScience* 23 (12) (2020) 101815.
- [11] M. Acevedo, K. Pixley, N. Zinyengere, S. Meng, H. Tufan, K. Cichy, L. Bizikova, K. Isaacs, K. Ghezzi-Kopel, J. Porciello, A scoping review of adoption of climate-resilient crops by small-scale producers in low- and middle-income countries, *Nature plants* 6 (10) (2020) 1231–1241.
- [12] R. Pieruschka, U. Schurr, Plant Phenotyping: Past, Present, and Future, *Plant phenomics* (Washington, D.C.) 2019 (2019) 7507131.
- [13] X.-G. Zhu, S.P. Long, D.R. Ort, Improving photosynthetic efficiency for greater yield, *Annu. Rev. Plant Biol.* 61 (1) (2010) 235–261.
- [14] S.K. Panguluri, A.A. Kumar (Eds.), *Phenotyping for plant breeding: Applications of phenotyping methods for crop improvement*, Springer, New York, 2013.
- [15] T. Dornbusch, P. Wernecke, W. Diepenbrock, A method to extract morphological traits of plant organs from 3D-point clouds as a database for an architectural plant model, *Ecological Modelling* 200 (1-2) (2007) 119–129.
- [16] K. OMASA, F. HOSOI, A. Konishi, 3D-lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure, *Journal of experimental botany* 58 (4) (2007) 881–898.
- [17] K.F. Huemrich, Simulations of Seasonal and Latitudinal Variations in Leaf Inclination Angle Distribution: Implications for Remote Sensing, *ARS* 02 (02) (2013) 93–101.
- [18] A. Ghatak, P. Chaturvedi, W. Weckwerth, Cereal Crop Proteomics: Systemic Analysis of Crop Drought Stress Responses Towards Marker-Assisted Selection Breeding, *Frontiers in plant science* 8 (2017) 757.
- [19] M. Havrlentová, J. Kraic, V. Gregusová, B. Kováčsová, Drought Stress in Cereals – A Review, *Agriculture (Pol'nohospodárstvo)* 67 (2) (2021) 47–60.
- [20] J.M. Toulotte, C.K. Pantazopoulou, M.A. Sanclemente, Voeselek, Laurentius A. C. J., R. Sasidharan, Water stress resilient cereal crops: Lessons from wild relatives, *Journal of integrative plant biology* 64 (2) (2022) 412–430.

-
- [21] J.W. Kadereit, C. Körner, P. Nick, U. Sonnewald (Eds.), *Strasburger – Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2021.
- [22] Kronendach, available at <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/kronendach/6704> (accessed on August 31, 2022).
- [23] M.B. Mantilla-Perez, M.G. Salas Fernandez, Differential manipulation of leaf angle throughout the canopy: current status and prospects, *Journal of experimental botany* 68 (21-22) (2017) 5699–5717.
- [24] D.S. Falster, M. Westoby, Leaf size and angle vary widely across species: what consequences for light interception? *New Phytologist* 158 (3) (2003) 509–525.
- [25] W.-M. Wang, Z.-L. Li, H.-B. Su, Comparison of leaf angle distribution functions: Effects on extinction coefficient and fraction of sunlit foliage, *Agricultural and Forest Meteorology* 143 (1-2) (2007) 106–122.
- [26] C.T. de Wit, *Photosynthesis of leaf canopies*, Wageningen, 1965.
- [27] N.S. Goel, D.E. Strebel, Simple Beta Distribution Representation of Leaf Orientation in Vegetation Canopies 1, *Agron.j.* 76 (5) (1984) 800–802.
- [28] S. Jacquemoud, W. Verhoef, F. Baret, C. Bacour, P.J. Zarco-Tejada, G.P. Asner, C. François, S.L. Ustin, PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization, *Remote Sensing of Environment* 113 (2009) S56-S66.
- [29] W. Yang, H. Feng, X. Zhang, J. Zhang, J.H. Doonan, W.D. Batchelor, L. Xiong, J. Yan, Crop Phenomics and High-Throughput Phenotyping: Past Decades, Current Challenges, and Future Perspectives, *Molecular plant* 13 (2) (2020) 187–214.
- [30] S. Paulus, Measuring crops in 3D: using geometry for plant phenotyping, *Plant methods* 15 (2019) 103.
- [31] R.T. Furbank, J.A. Jimenez-Berni, B. George-Jaeggli, A.B. Potgieter, D.M. Deery, Field crop phenomics: enabling breeding for radiation use efficiency and biomass in cereal crops, *New Phytologist* 223 (4) (2019) 1714–1727.

- [32] S. Dandrifosse, A. Bouvry, V. Leemans, B. Dumont, B. Mercatoris, Imaging Wheat Canopy Through Stereo Vision: Overcoming the Challenges of the Laboratory to Field Transition for Morphological Features Extraction, *Frontiers in plant science* 11 (2020) 96.
- [33] F. HOSOI, Y. NAKAI, K. OMASA, Estimating the leaf inclination angle distribution of the wheat canopy using a portable scanning lidar, *J. Agric. Meteorol.* 65 (3) (2009) 297–302.
- [34] A. Pask, J. Pietragalla, D. Mullan, M.P. Reynolds, *Physiological breeding II: a field guide to wheat phenotyping*, CIMMYT, 2012.
- [35] M. Müller-Linow, F. Pinto-Espinosa, H. Scharr, U. Rascher, The leaf angle distribution of natural plant populations: assessing the canopy with a novel software tool, *Plant methods* 11 (2015) 11.
- [36] Proceedings IEEE Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision (SMBV 2001), IEEE Comput. Soc, 2001.
- [37] M.B. Vicari, J. Pisek, M. Disney, New estimates of leaf angle distribution from terrestrial LiDAR: Comparison with measured and modelled estimates from nine broadleaf tree species, *Agricultural and Forest Meteorology* 264 (2019) 322–333.
- [38] A. Paturkar, G. Sen Gupta, D. Bailey, Making Use of 3D-Models for Plant Physiognomic Analysis: A Review, *Remote Sensing* 13 (11) (2021) 2232.
- [39] A. Eltner, G. Sofia, Structure from motion photogrammetric technique, in: *Remote Sensing of Geomorphology, Developments in Earth Surface Processes*, Elsevier, 2020, pp. 1–24.
- [40] S. Jay, G. Rabatel, X. Hadoux, D. Moura, N. Gorretta, In-field crop row phenotyping from 3D-modeling performed using Structure from Motion, *Computers and Electronics in Agriculture* 110 (2015) 70–77.
- [41] PHENOSPEX, PlantEye F500 - Multispectral 3D-laser scanner for plant phenotyping, available at <https://phenospex.com/products/plant-phenotyping/planteye-f500-multispectral-3d-laser-scanner/> (accessed on August 31, 2022).

- [42] L. Maphosa, E. Thoday-Kennedy, J. Vakani, A. Phelan, P. Badenhorst, A. Slater, G. Spangenberg, S. Kant, Phenotyping wheat under salt stress conditions using a 3D-laser scanner, *Israel Journal of Plant Sciences* (2016) 1–8.
- [43] J. Cohen, *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, Taylor and Francis, Hoboken, 2013.
- [44] J. Weng, P. Cohen, M. Herniou, Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* 14 (10) (1992) 965–980.
- [45] H. Süße, E. Rodner, *Bildverarbeitung und Objekterkennung: Computer Vision in Industrie und Medizin*, Aufl. 2014 ed., Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014.
- [46] Z. Zhang, A flexible new technique for camera calibration, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* 22 (11) (2000) 1330–1334.
- [47] O. Schreer, *Stereoanalyse und Bildsynthese*, 1. Aufl. ed., Springer, Berlin, 2005.
- [48] K. Konolige, M. Agrawal, Frame-Frame Matching for Realtime Consistent Visual Mapping, in: *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference, Rome, Italy, I E E E*, [Place of publication not identified], 2006, pp. 2803–2810.
- [49] H. Hirschmüller, M. Buder, I. Ernst, MEMORY EFFICIENT SEMI-GLOBAL MATCHING, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 1-3 (2012) 371–376.
- [50] H. Hirschmuller, Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information, in: *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, San Diego, CA, USA, IEEE, 20-26 June 2005, pp. 807–814.
- [51] D. Scharstein, R. Szeliski, R. Zabih, A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms, in: *Proceedings IEEE Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision (SMBV 2001)*, Kauai, HI, USA, IEEE Comput. Soc, 9-10 Dec. 2001, pp. 131–140.
- [52] Z. Jie, P. Wang, Y. Ling, B. Zhao, Y. Wei, J. Feng, W. Liu, Left-Right Comparative Recurrent Model for Stereo Matching, in: *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*

- (CVPR 2018): Salt Lake City, Utah, USA, 18-22 June 2018, Salt Lake City, UT, IEEE, Piscataway, NJ, 2018, pp. 3838–3846.
- [53] W. Burger, M. Burge, *Digitale Bildverarbeitung: Eine algorithmische Einführung mit Java*, X.media.press, 3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage ed., Springer Vieweg, Berlin, 2015.
- [54] S. Birchfield, C. Tomasi, A pixel dissimilarity measure that is insensitive to image sampling, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* 20 (4) (1998) 401–406.
- [55] Manual Mode: The Exposure Triangle – 3Raven Studios, available at <http://www.3ravenstudios.com/2019/05/16/manual-mode-the-exposure-triangle/> (accessed on April 9, 2021).
- [56] D.F. van Rossum G JR, *Python reference manual*, Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, 1995.
- [57] G. Bradski, *The OpenCV Library*, Dr. Dobb’s Journal of Software Tools, 2000.
- [58] C.R. Harris, K.J. Millman, S.J. van der Walt, R. Gommers, P. Virtanen, D. Cournapeau, E. Wieser, J. Taylor, S. Berg, N.J. Smith, R. Kern, M. Picus, S. Hoyer, M.H. van Kerkwijk, M. Brett, A. Haldane, J.F. Del Río, M. Wiebe, P. Peterson, P. Gérard-Marchant, K. Sheppard, T. Reddy, W. Weckesser, H. Abbasi, C. Gohlke, T.E. Oliphant, *Array programming with NumPy*, *Nature* 585 (7825) (2020) 357–362.
- [59] W. McKinney, *Data Structures for Statistical Computing in Python*, Proceedings of the 9th Python in Science Conference, 2010.
- [60] P.e.a. Virtanen, *SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python*, *Nature Methods*, 2020.
- [61] Pedregosa et al., *Scikit-learn: Machine Learning in Python*, *Journal of Machine Learning Research*, 2011.
- [62] J.D. Hunter, *Matplotlib: A 2D Graphics Environment*, *Comput. Sci. Eng.* 9 (3) (2007) 90–95.

- [63] C. Grana, D. Borghesani, R. Cucchiara, Optimized block-based connected components labeling with decision trees, *IEEE transactions on image processing a publication of the IEEE Signal Processing Society* 19 (6) (2010) 1596–1609.
- [64] R.C. Gonzalez, R.E. Woods, *Digital image processing, Global edition ed.*, Pearson, New York, NY, 2018.
- [65] J. Canny, A Computational Approach to Edge Detection, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* PAMI-8 (6) (1986) 679–698.
- [66] R. Klein, *Algorithmische Geometrie: Grundlagen, Methoden, Anwendungen*, eXamen.press, 2., vollst. überarb. Aufl. ed., Springer, Berlin, 2005.
- [67] T. Dornbusch, P. Wernecke, W. Diepenbrock, Description and visualization of graminaceous plants with an organ-based 3D-architectural model, exemplified for spring barley (*Hordeum vulgare* L.), *Visual Comput* 23 (8) (2007) 569–581.
- [68] M.A. Branch, T.F. Coleman, Y. Li, A Subspace, Interior, and Conjugate Gradient Method for Large-Scale Bound-Constrained Minimization Problems, *SIAM J. Sci. Comput.* 21 (1) (1999) 1–23.
- [69] J. O'Rourke, *Computational geometry in C, 2nd ed. ed.*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
- [70] B.E. McNeil, J. Pisek, H. Lepisk, E.A. Flamenco, Measuring leaf angle distribution in broadleaf canopies using UAVs, *Agricultural and Forest Meteorology* 218-219 (2016) 204–208.
- [71] A.S. Ogale, Y. Aloimonos, Stereo correspondence with slanted surfaces:critical implications of horizontal slant, in: *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society conference on computer vision and pattern recognition: CVPR, Washington, DC, USA, IEEE, 2004*, pp. 568–573.
- [72] A.C. Povey, R.G. Grainger, Known and unknown unknowns: uncertainty estimation in satellite remote sensing, *Atmos. Meas. Tech.* 8 (11) (2015) 4699–4718.
- [73] 2013 International Conference on 3D-Imaging, IEEE, 2013 - 2013.
- [74] S.M. Robeson, C.J. Willmott, Decomposition of the mean absolute error (MAE) into systematic and unsystematic components, *PloS one* 18 (2) (2023) e0279774.

- [75] Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, Sommerweizen - Anbautechnik 2022, available at https://www.lksh.de/fileadmin/PDFs/Landwirtschaft/Ackerkulturen/Getreide/Sommerweizen/Anbautechnik_Sommerweizen_2022.pdf.
- [76] agrarheute, Ratgeber: 9 Tipps zur Aussaat von Sommerweizen, available at <https://www.agrarheute.com/pflanze/getreide/ratgeber-9-tipps-aussaat-sommerweizen-443103> (accessed on August 31, 2022).
- [77] R. Klette, A. Koschan, K. Schlüns (Eds.), *Computer Vision*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1996.
- [78] K. Okada, Is Omega Squared Less Biased? a Comparison of Three Major Effect Size Indices in One-Way Anova, *Behaviormetrika* 40 (2) (2013) 129–147.
- [79] J.W. Tukey, *Exploratory data analysis*, Addison-Wesley series in behavioral science, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1977.
- [80] L.I.-K. Lin, A Concordance Correlation Coefficient to Evaluate Reproducibility, *Biometrics* 45 (1) (1989) 255.
- [81] D.G. Altman, *Practical statistics for medical research*, Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, Fla., 1999.
- [82] M. Rudolf, W. Kuhlisch, *Biostatistik: Eine Einführung für Biowissenschaftler*, Bio Biologie, Pearson Studium, München, 2008.
- [83] S.S. Shapiro, M.B. Wilk, An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples), *Biometrika* 52 (3/4) (1965) 591.
- [84] D.M. Gates, *Biophysical ecology*, Springer advanced texts in life sciences, Springer, New York, Heidelberg, Berlin, 1980.
- [85] D. Scharstein, T. Tanaii, S.N. Sinha, *Semi-Global Stereo Matching with Surface Orientation Priors*, 2017.
- [86] N. Einecke, J. Eggert, Block-matching stereo with relaxed fronto-parallel assumption, in: 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, MI, USA, IEEE, 2014, pp. 700–705.

- [87] L. Papula, *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Grundstudium; mit zahlreichen Beispielen aus Natur und Technik*, Studium, 11., verb. und erw. Aufl., unveränd. Nachdr ed., Vieweg, Braunschweig [u.a.], 2008.
- [88] T. Westermann, *Mathematik für Ingenieure: Ein anwendungsorientiertes Lehrbuch ; [jetzt komplett in 1 Band ; Bachelor-geeignet]*, Springer-Lehrbuch, 5., neu bearb. Aufl. ed., Springer, Berlin, 2008.
- [89] M. Gelautz, D. Markovic, *Recognition of object contours from stereo images: an edge combination approach*, in: *Proceedings. 2nd International Symposium on 3D-Data Processing, Visualization and Transmission, 2004. 3DPVT 2004*, IEEE, null.
- [90] J. Wang, Y. Zhang, R. Gu, *Research Status and Prospects on Plant Canopy Structure Measurement Using Visual Sensors Based on Three-Dimensional Reconstruction*, *Agriculture* 10 (10) (2020) 462.
- [91] H. Li, G. Wu, S. Tao, H. Yin, K. Qi, S. Zhang, W. Guo, S. Ninomiya, Y. Mu, *Automatic Branch–Leaf Segmentation and Leaf Phenotypic Parameter Estimation of Pear Trees Based on Three-Dimensional Point Clouds*, *Sensors* 23 (9) (2023) 4572.
- [92] V. Leemans, B. Dumont, M.-F. Destain, *Assessment of plant leaf area measurement by using stereo-vision*, in: *2013 International Conference on 3D-Imaging, Liège, Belgium, IEEE, 03.12.2013 - 05.12.2013*, pp. 1–5.
- [93] Y. Qu, Z. Gao, J. Shang, J. Liu, R. Casa, *Simultaneous measurements of corn leaf area index and mean tilt angle from multi-directional sunlit and shaded fractions using downward-looking photography*, *Computers and Electronics in Agriculture* 180 (2021) 105881.
- [94] 2200C_Brochure_Plant_Canopy_Analyzer_14515.
- [95] R. Sharma, M. Saqib, C.T. Lin, M. Blumenstein, *A Survey on Object Instance Segmentation*, *SN COMPUT. SCI.* 3 (6) (2022).
- [96] C.A. Unigarro M., Á. Jaramillo R., C.P. Flórez R., *Evaluation of six leaf angle distribution functions in the Castillo® coffee variety*, *Agron. colomb.* 35 (1) (2017) 23–28.

- [97] L. Chen, Z. Xu, X. Fan, Q. Zhou, Q. Yu, X. Liu, S. Liao, C. Jiang, D. Lin, F. Ma, B. Feng, T. Wang, Genetic dissection of quantitative trait loci for flag leaf size in bread wheat (*Triticum aestivum* L.), *Frontiers in plant science* 13 (2022) 1047899.
- [98] S.C. Thomas, W.E. Winner, A rotated ellipsoidal angle density function improves estimation of foliage inclination distributions in forest canopies, *Agricultural and Forest Meteorology* 100 (1) (2000) 19–24.
- [99] W. Huang, Z. Niu, J. Wang, L. Liu, C. Zhao, Q. Liu, Identifying Crop Leaf Angle Distribution Based on Two-Temporal and Bidirectional Canopy Reflectance, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 44 (12) (2006) 3601–3609.
- [100] M. Shibayama, Y. Watanabe, Estimating the Mean Leaf Inclination Angle of Wheat Canopies Using Reflected Polarized Light, *Plant Production Science* 10 (3) (2007) 329–342.
- [101] D. Schunck, F. Magistri, R.A. Rosu, A. Cornelißen, N. Chebrolov, S. Paulus, J. Léon, S. Behnke, C. Stachniss, H. Kuhlmann, L. Klingbeil, Pheno4D: A spatio-temporal dataset of maize and tomato plant point clouds for phenotyping and advanced plant analysis, *PloS one* 16 (8) (2021) e0256340.
- [102] R.A. Rosu, P. Schütt, J. Quenzel, S. Behnke, *LatticeNet: Fast Spatio-Temporal Point Cloud Segmentation Using Permutohedral Lattices*, 2021.
- [103] Pioneer (23 April 2019).
- [104] L. Yanli, L. Shaokun, W. Jihua, J. Carol L, X. Ruizhi, W. Zhijie, Differentiating wheat varieties with different leaf angle distributions using NDVI and canopy cover, *New Zealand Journal of Agricultural Research* 50 (5) (2007) 1149–1156.
- [105] L.M. Bastos, W. Carciochi, R.P. Lollato, B.R. Jaenisch, C.R. Rezende, R. Schwalbert, P.V. Vara Prasad, G. Zhang, A.K. Fritz, C. Foster, Y. Wright, S. Young, P. Bradley, I.A. Ciampitti, Winter Wheat Yield Response to Plant Density as a Function of Yield Environment and Tillering Potential: A Review and Field Studies, *Frontiers in plant science* 11 (2020) 54.

- [106] S.R. Winter, A.J. Ohlrogge, Leaf Angle, Leaf Area, and Corn (*Zea mays* L.) Yield 1, *Agron.j.* 65 (3) (1973) 395–397.
- [107] S.P. Long, X.-G. Zhu, S.L. Naidu, D.R. Ort, Can improvement in photosynthesis increase crop yields? *Plant, cell & environment* 29 (3) (2006) 315–330.
- [108] D.R. Ort, S.S. Merchant, J. Alric, A. Barkan, R.E. Blankenship, R. Bock, R. Croce, M.R. Hanson, J.M. Hibberd, S.P. Long, T.A. Moore, J. Moroney, K.K. Niyogi, M.A.J. Parry, P.P. Peralta-Yahya, R.C. Prince, K.E. Redding, M.H. Spalding, K.J. van Wijk, W.F.J. Vermaas, S. von Caemmerer, A.P.M. Weber, T.O. Yeates, J.S. Yuan, X.G. Zhu, Redesigning photosynthesis to sustainably meet global food and bioenergy demand, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112 (28) (2015) 8529–8536.
- [109] M. Abichou, B. de Solan, B. Andrieu, Architectural Response of Wheat Cultivars to Row Spacing Reveals Altered Perception of Plant Density, *Frontiers in plant science* 10 (2019) 999.
- [110] Y. Li, Y. Su, T. Hu, G. Xu, Q. Guo, Retrieving 2-D Leaf Angle Distributions for Deciduous Trees From Terrestrial Laser Scanner Data, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 56 (8) (2018) 4945–4955.
- [111] E.A. de Mattos, F.R. Scarano, P.O. Cavalin, G.W. Fernandes, H. Rennenberg, U. Lüttge, Ecophysiological performance of four species of Clusiaceae with different modes of photosynthesis in a mosaic of riverine, rupestrian grasslands, and cerrado vegetation in SE-Brazil, *Trees* 33 (3) (2019) 641–652.
- [112] S.K. Truong, R.F. McCormick, W.L. Rooney, J.E. Mullet, Harnessing Genetic Variation in Leaf Angle to Increase Productivity of *Sorghum bicolor*, *Genetics* 201 (3) (2015) 1229–1238.
- [113] S.L. Fioreze, J.D. Rodrigues, Tillering affected by sowing density and growth regulators in wheat, *Sem. Ci. Agr.* 35 (2) (2014) 589.

11. Anhang

11.1. Dokumentation der Werte für Richtigkeit und Präzision der rekonstruierten 3D-Punkte

Tabelle 11-1: *Richtigkeit und Präzision der rekonstruierten 3D-Punkte des Kugelmodells*

Die Parameter wurden in Abhängigkeit der Oberflächenneigung berechnet.

Winkelbereich	R [%]	P [%]	Winkelbereich	R [%]	P [%]
0°- 5°	-0,15	0,8	30°-35°	0,55	0,85
5°-10°	-0,23	0,7	35°-40°	0,58	0,88
10°-15°	0,28	0,65	40°-45°	0,55	0,95
15°-20°	0,28	0,75	45°-50°	0,6	1,0
20°-25°	0,4	0,73	50°-55°	0,6	1,13
25°-30°	0,55	0,78	55°-60°	0,63	1,23

Winkelbereich	R [%]	P [%]
60°-65°	0,73	1,35
65°-70°	0,68	1,58
70°-75°	0,58	1,68
75°-80°	1,13	1,68
80°-85°	1,68	1,65
85°-90°	2,45	1,875

11.2. Analyse des künstlichen Pflanzenmodells

Tabelle 11-2: *Resultate der modellierten Blattparameter planares künstliches Blatt*

	Referenz	\bar{x}	σ
Blattachsenlänge [mm]	150	155,42	6,34
Maximale Breite [mm]	11	10,74	1,32
Blattfläche [mm ²]	1528	1371,23	78,54

Tabelle 11-3: *Rekonstruierte Blattmerkmale für das gebogene Blattmodell 1*

Referenz mit jeweils 4 Rekonstruktionsansichten (Rekonstruktion 1-4) und den Durchschnittswerten für Blattfläche,

Insertionswinkel, mittleren Blattwinkel und Blattbreite aus den Rekonstruktionen (Durchschnitt).

Modell 1	Blattfläche [mm ²]	α [°]	θ_m [°]	Blattbreite [mm]
----------	-----------------------------------	--------------	----------------	------------------

Rekonstruktion 1	1150,8	38,2	23,4	11,2
Rekonstruktion 2	1318,9	34,0	24,8	10,5
Rekonstruktion 3	1379,4	35,3	24,2	10,6
Rekonstruktion 4	1420,8	37,5	25,3	10,76
Durchschnitt	1317,5 ± 103,8	36,3 ± 1,6	24,4 ± 0,7	10,7 ± 0,3
Referenz	1528	35	23,8	11,00

Tabelle 11-4: a)-e): **Ergebnisse zu den Pflanzenmodellen 2 bis 6**

Dargestellt werden die Referenzwerte für den Insertionswinkel und den mittleren Blattwinkel sowie die zugehörigen rekonstruierten Werte und $R[^\circ]$ und $P[^\circ]$ für die Blattwinkelverteilungen.

a)

Modell 2	$\alpha [^\circ]$	$\theta_m [^\circ]$	$R [^\circ]$	$P [^\circ]$
Rekonstruktion 1	27,2	12,2	-0,5	2,2
Rekonstruktion 2	28,0	12,6	0,5	1,7
Rekonstruktion 3	24,9	12,4	-0,04	1,6
Rekonstruktion 4	24,6	13,4	0,6	2,1
Durchschnitt	26,2	12,7		
Referenz	26	13,6		
Fehler [%]	0,7	6,6		

b)

Modell 3	$\alpha [^\circ]$	$\theta_m [^\circ]$	$R [^\circ]$	$P [^\circ]$
Rekonstruktion 1	36,5	15,5	-0,6	0,8
Rekonstruktion 2	36,6	15,7	-0,2	1,0
Rekonstruktion 3	49,9	15,6	-0,3	1,2
Rekonstruktion 4	36,1	15,2	-0,5	2,6
Durchschnitt	39,8	15,5		
Referenz	36	17,6		
Fehler [%]	10,5	11,9		

c)

Modell 4	α [°]	θ_m [°]	R [°]	P [°]
Rekonstruktion 1	43,5	18,0	-0,1	0,4
Rekonstruktion 2	54,5	18,0	0,2	0,3
Rekonstruktion 3	55,1	19,7	0,1	0,9
Rekonstruktion 4	43,8	18,0	-0,1	0,2
Durchschnitt	46,7	18,4		
Referenz	44	19		
Fehler [%]	6,1	3,1		

d)

Modell 5	α [°]	θ_m [°]	R [°]	$P \theta_\sigma$ [°]
Rekonstruktion 1	48,2	24,0	-2,2	1,0
Rekonstruktion 2	51,0	25,9	-0,6	0,9
Rekonstruktion 3	50,1	25,6	-0,7	0,4
Rekonstruktion 4	51,4	24,5	0,4	0,5
Durchschnitt	50,2	25,0		
Referenz	50	24,1		
Fehler [%]	0,4	3,7		

e)

Modell 6	α [°]	θ_m [°]	R [°]	P [°]
Rekonstruktion 1	52,0	21,5	0,2	1,6
Rekonstruktion 2	46,7	21,3	-2,7	0,9
Rekonstruktion 3	27,8	19,9	-2,7	2,1
Rekonstruktion 4	52,8	23,3	0,5	1,7
Durchschnitt	44,8	21,5		
Referenz	50	21,6		
Fehler [%]	10,4	4,6		

11.3. Resultate ANOVA

Tabelle 11-5: Resultate der einfaktoriellen ANOVA zum Effekt der Sorten für den Parameter μ

μ	Varianz	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	P-Wert	F krit
Zwischen den Gruppen		1,159	2	0,579	1,434	0,249	3,204
Innerhalb der Gruppen		18,179	45	0,404			
Gesamt		19,338	47				

Tabelle 11-6: Resultate der einfaktoriellen ANOVA zum Effekt der Sorten für den Parameter ν

ν	Varianz	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	P-Wert	F krit
Zwischen den Gruppen		2,762	2	1,381	0,733	0,486	3,204
Innerhalb der Gruppen		84,779	45	1,884			
Gesamt		87,541	47				

Tabelle 11-7: Resultate der einfaktoriellen ANOVA zum Effekt der Aussaatstärken für den Parameter μ

μ	Varianz	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	P-Wert	F krit
Zwischen den Gruppen		1,119	3	0,373	0,901	0,448	2,816
Innerhalb der Gruppen		18,219	44	0,414			
Gesamt		19,338	47				

Tabelle 11-8: Resultate der einfaktoriellen ANOVA zum Effekt der Aussaatstärken ($150,450 \left[\frac{\text{Samen}}{\text{m}^2} \right]$) für den Parameter ω

μ	Varianz	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	P-Wert	F krit
Zwischen den Gruppen		0,629	1	0,629	1,697	0,206	4,301
Innerhalb der Gruppen		8,159	22	0,371			
Gesamt		8,789	23				