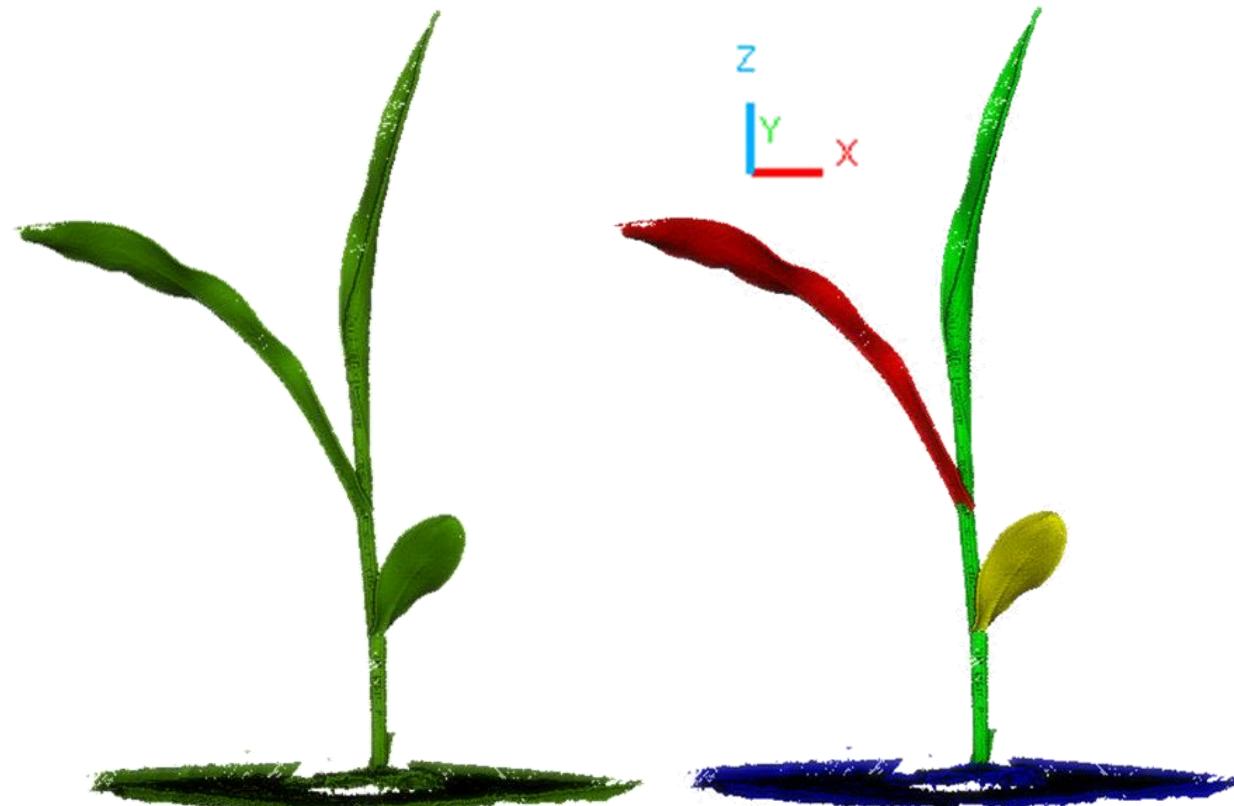


Automatisierte Punktwolkensegmentierung für die Phänotypisierung von Nutzpflanzen

Annika Tobies

Vermessungswesen aktuell

13.11.2025



Anwendungsfelder Punktwolken



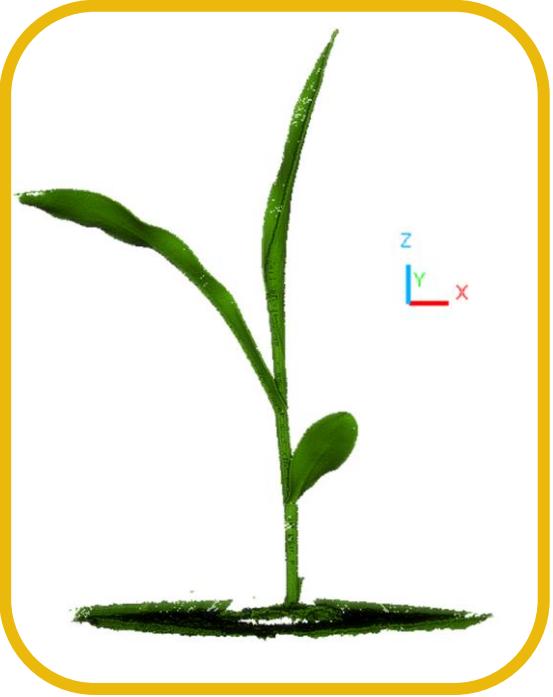
[3]



Anwendungsfeld Agrar- und Umweltwissenschaft



[7]



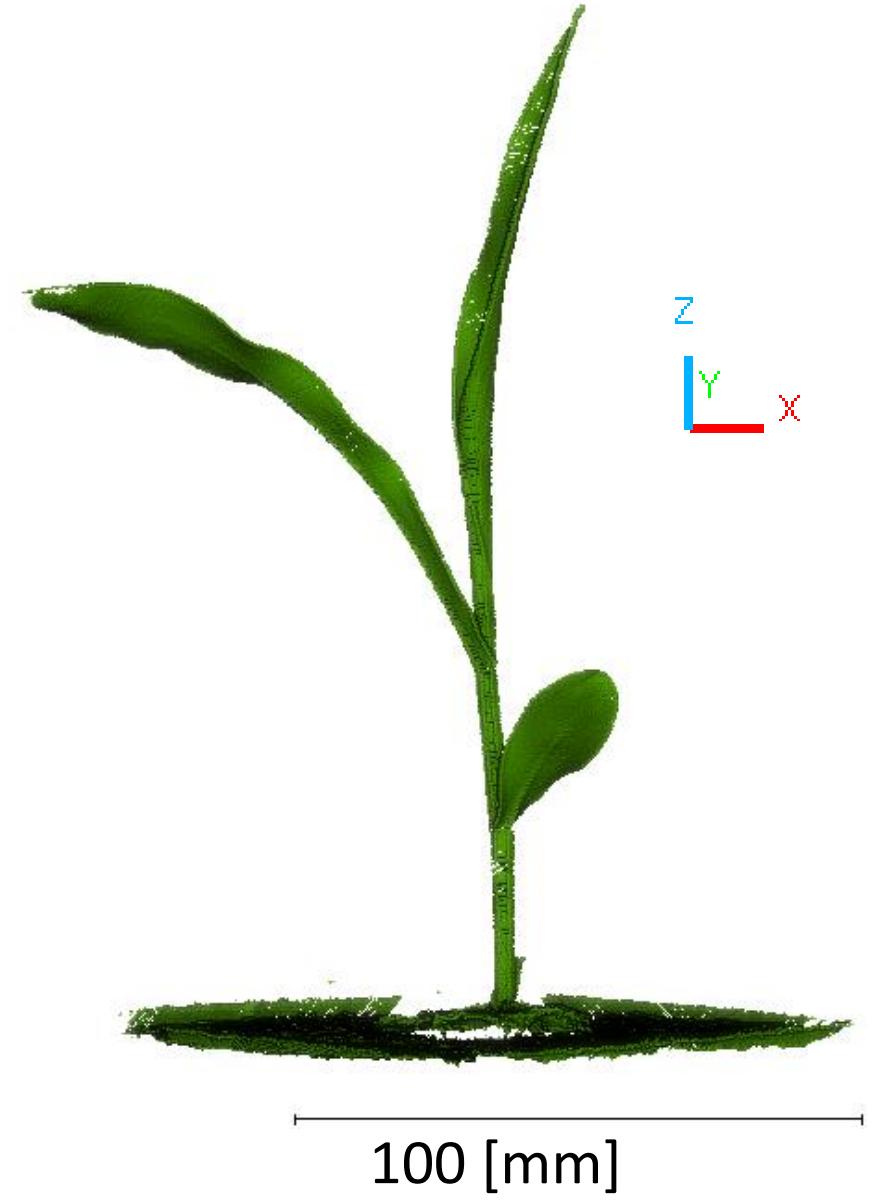
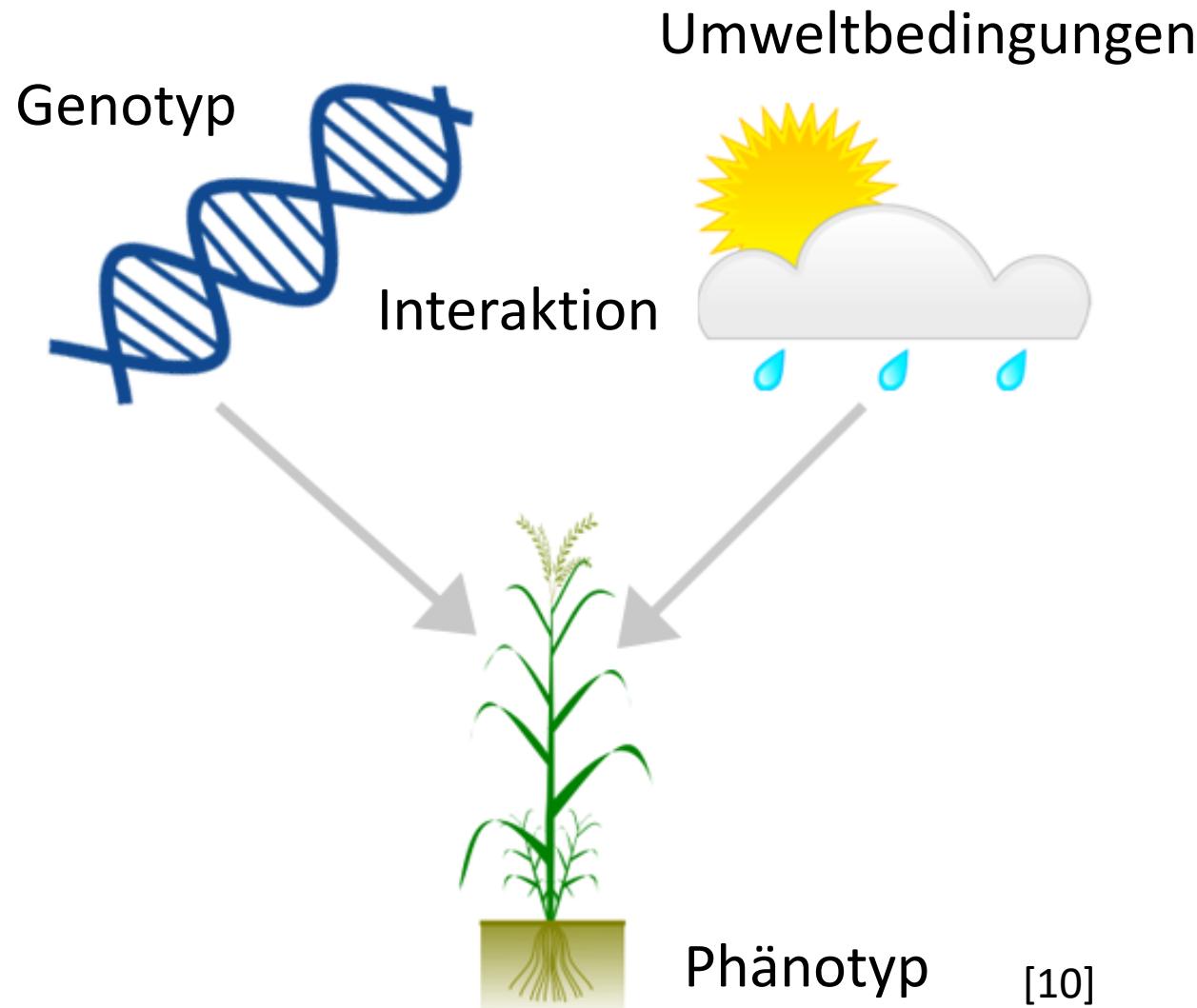
[8]



[9]

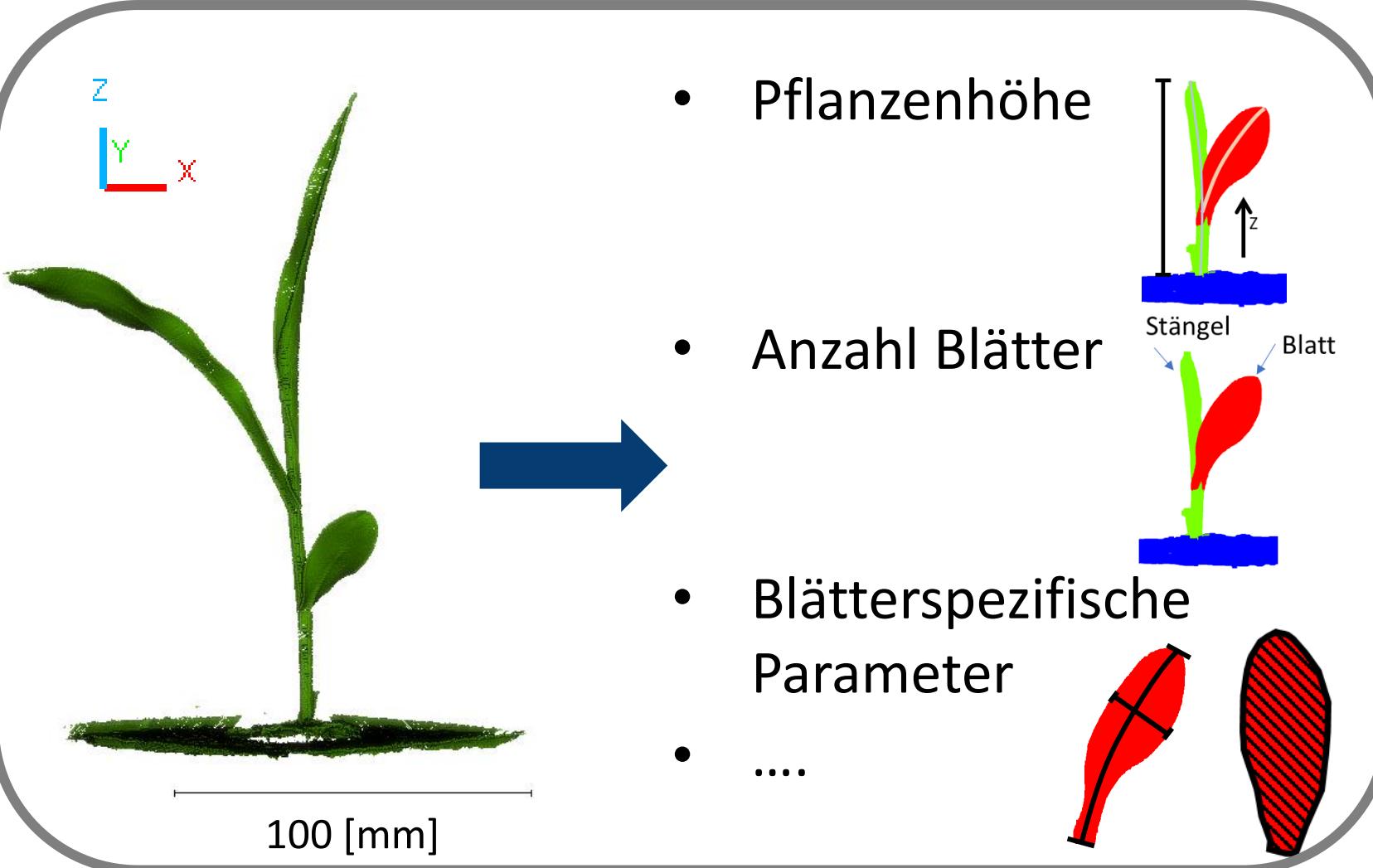


Phänotypisierung

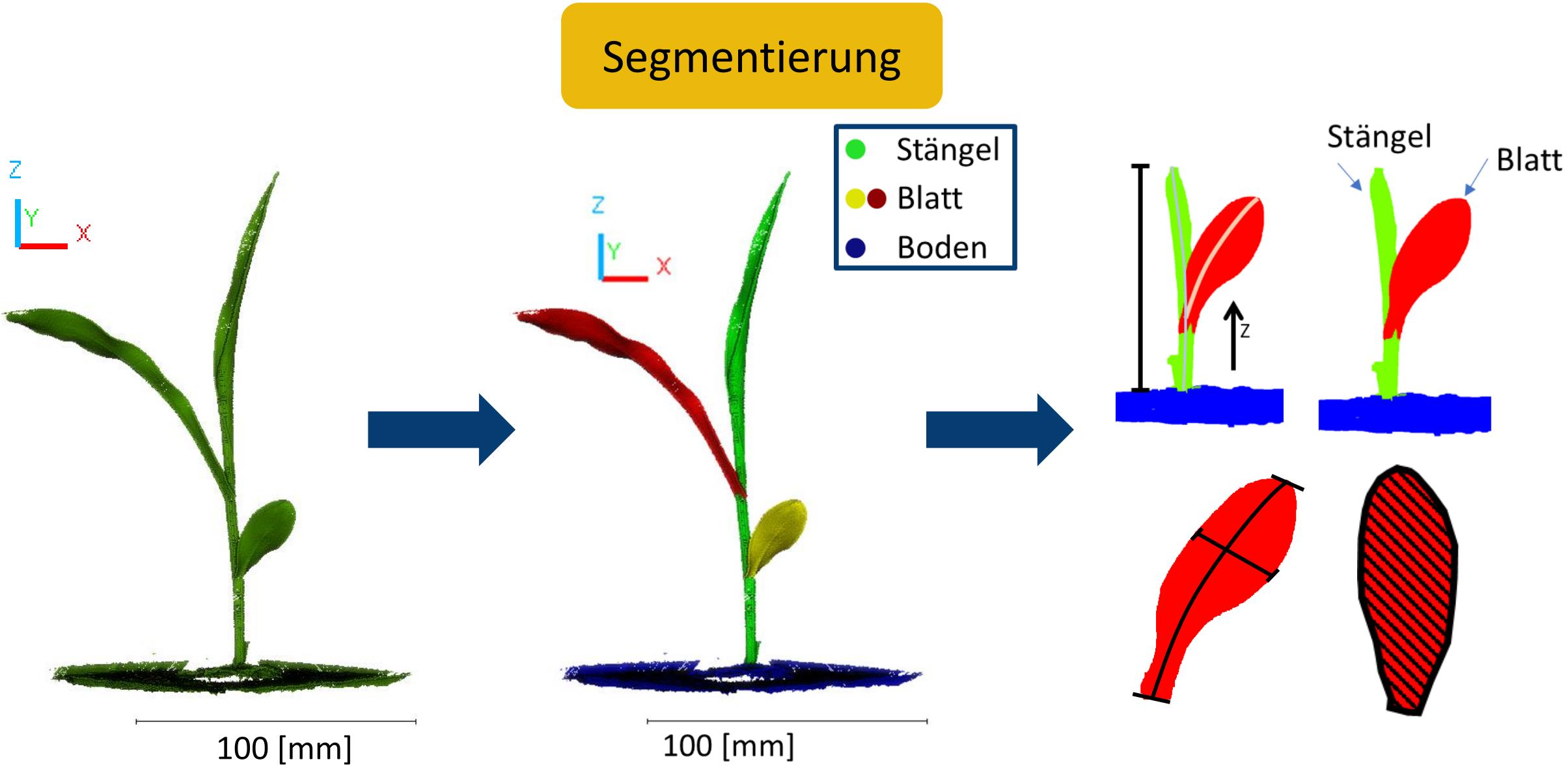


Motivation

→ Automatische Ableitung von phänotypischen Parametern



Motivation



Pflanzenstruktur von Mais und Hirse

Fokus auf monokotyle (einkeimblättrigen) Pflanzenarten mit ausschließlich primären Blättern



[11]



[12]



[13]



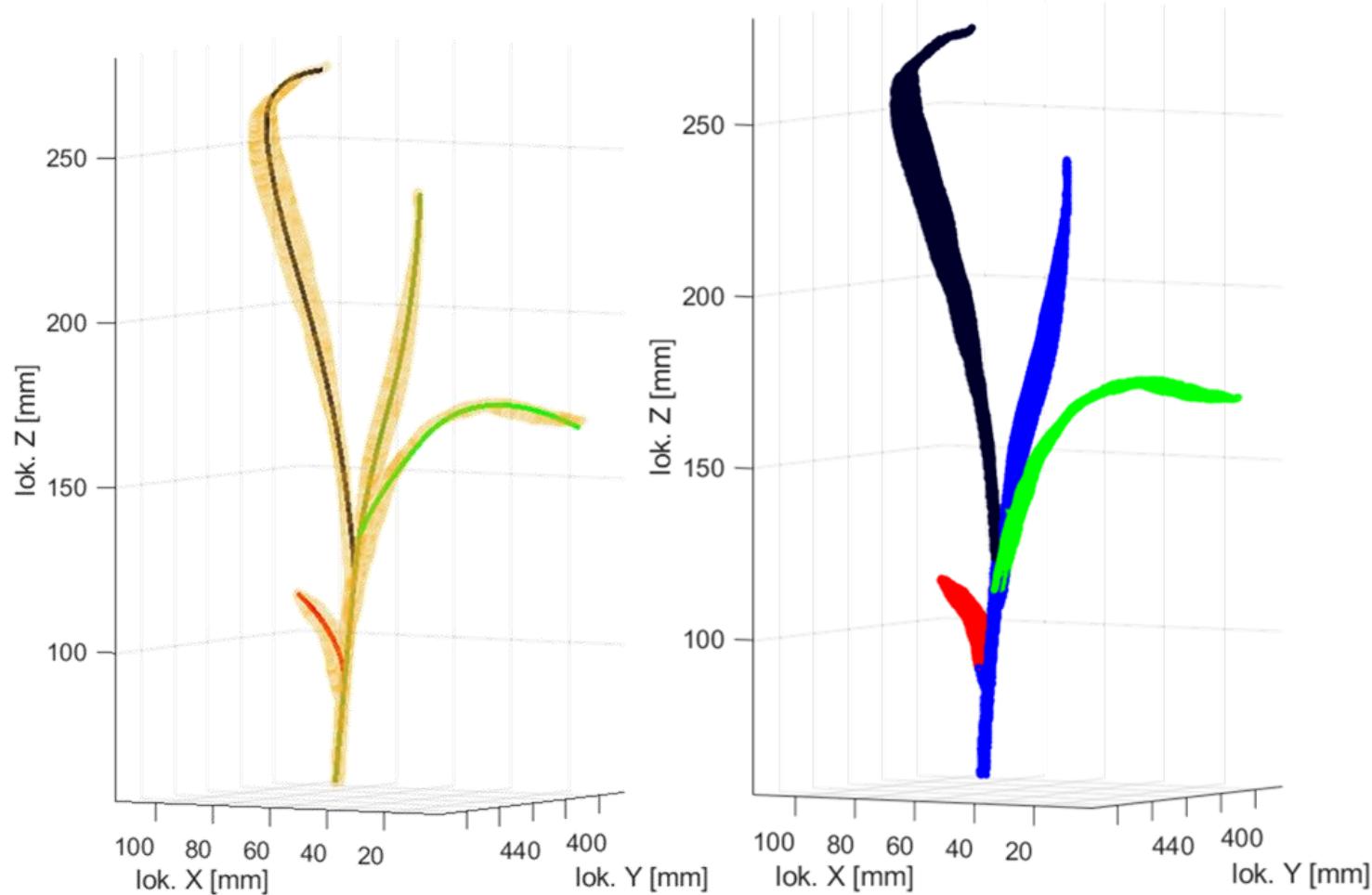
[14]

Mais

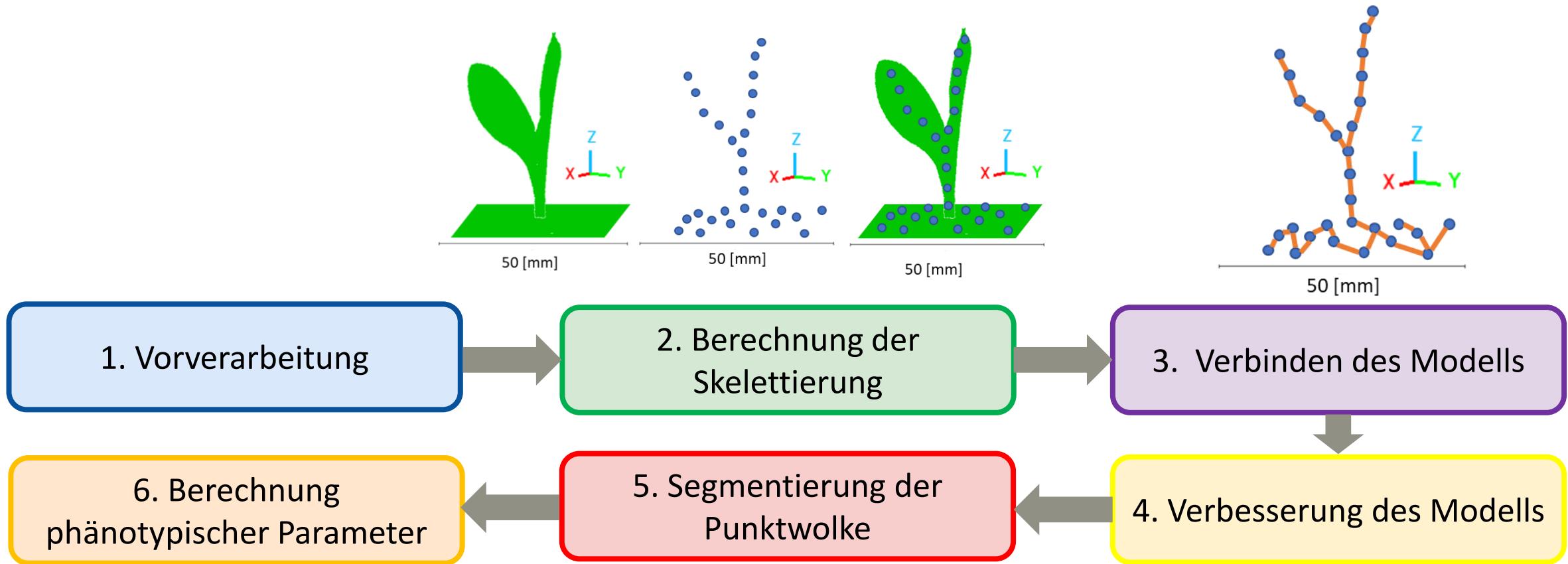
Hirse

Segmentierung der monokotylen Pflanzen

- Geometrischer Ansatz, Modell der Pflanzen entwickeln

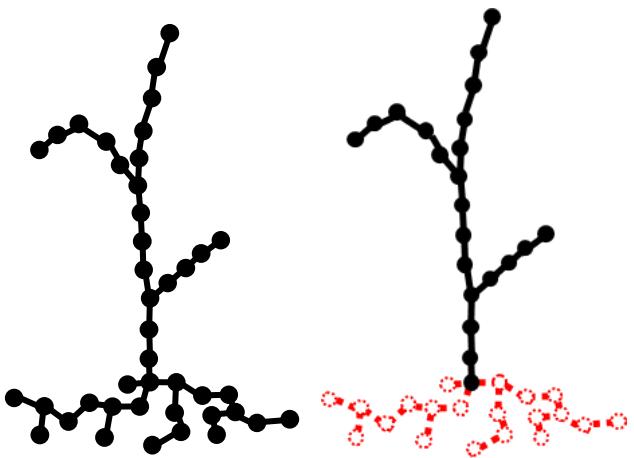


Übersicht über die entwickelte Methode

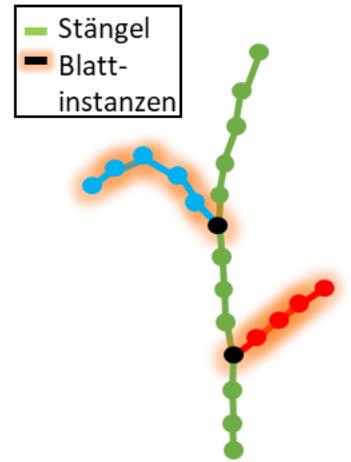


4) Verbesserung des Modells

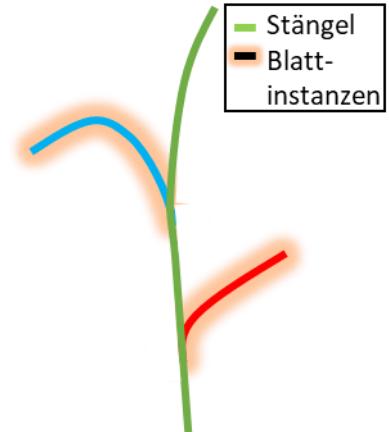
A) Bodenkanten
entfernen



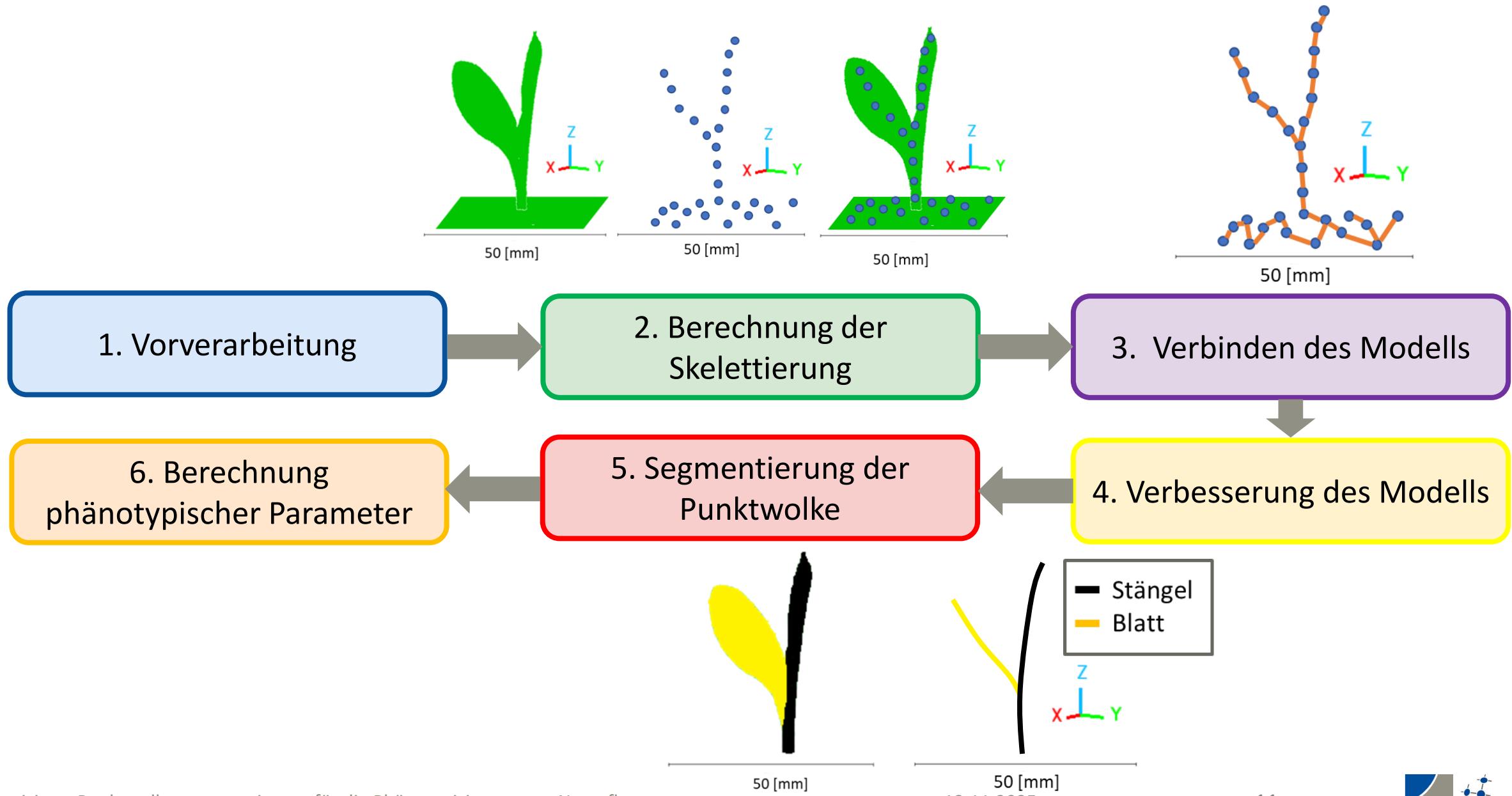
B) Segmen-
tierung



F) Position der
Skelettpunkte
verbessern

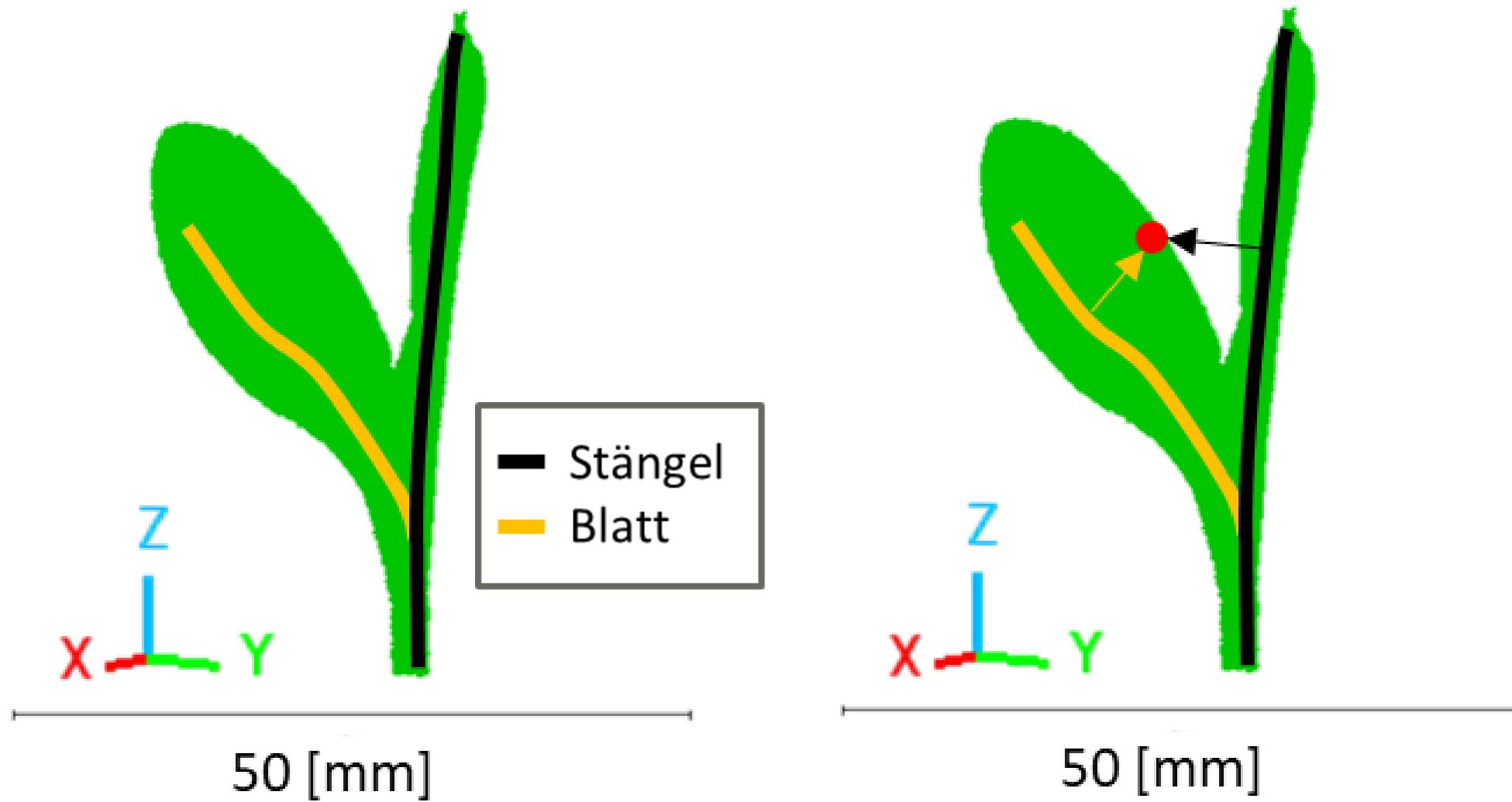


Übersicht über die entwickelte Methode

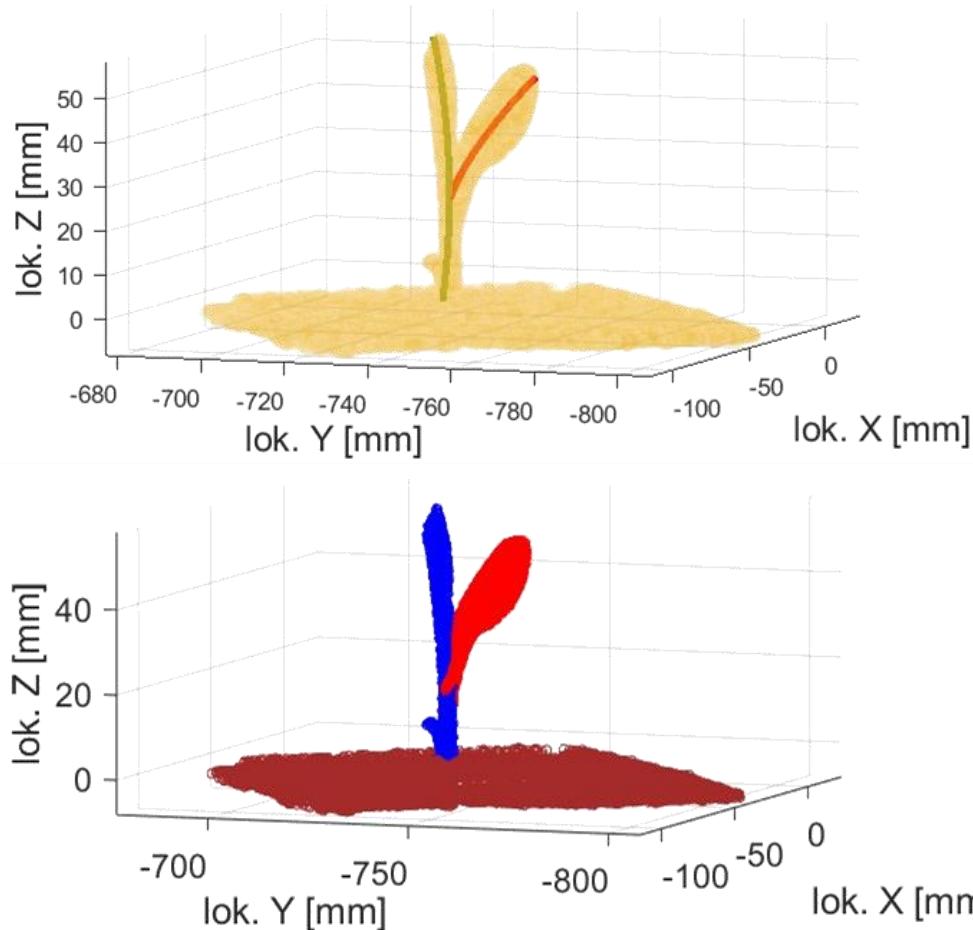


5) Segmentierung der Punktfolge

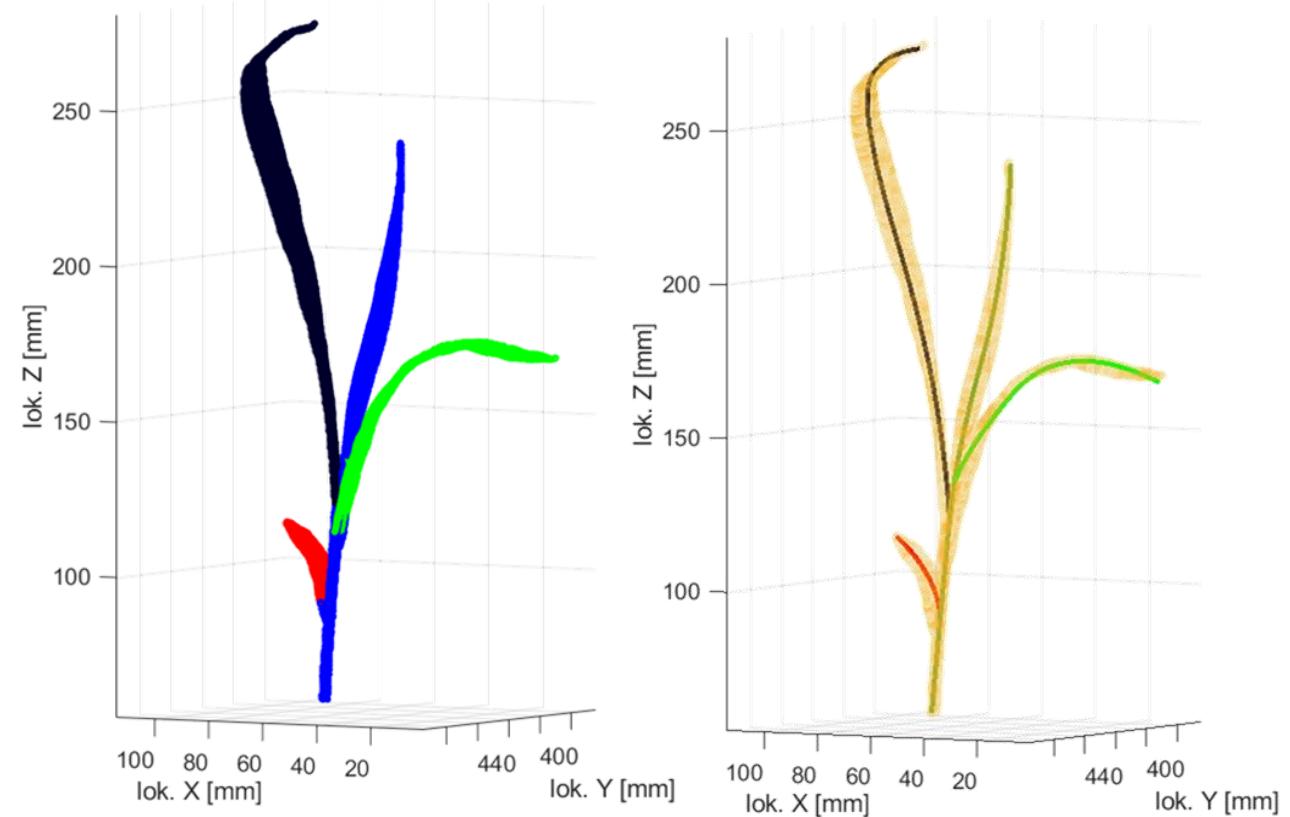
- Segmentierung über euklidischen Abstand



Ergebnisse Segmentierung



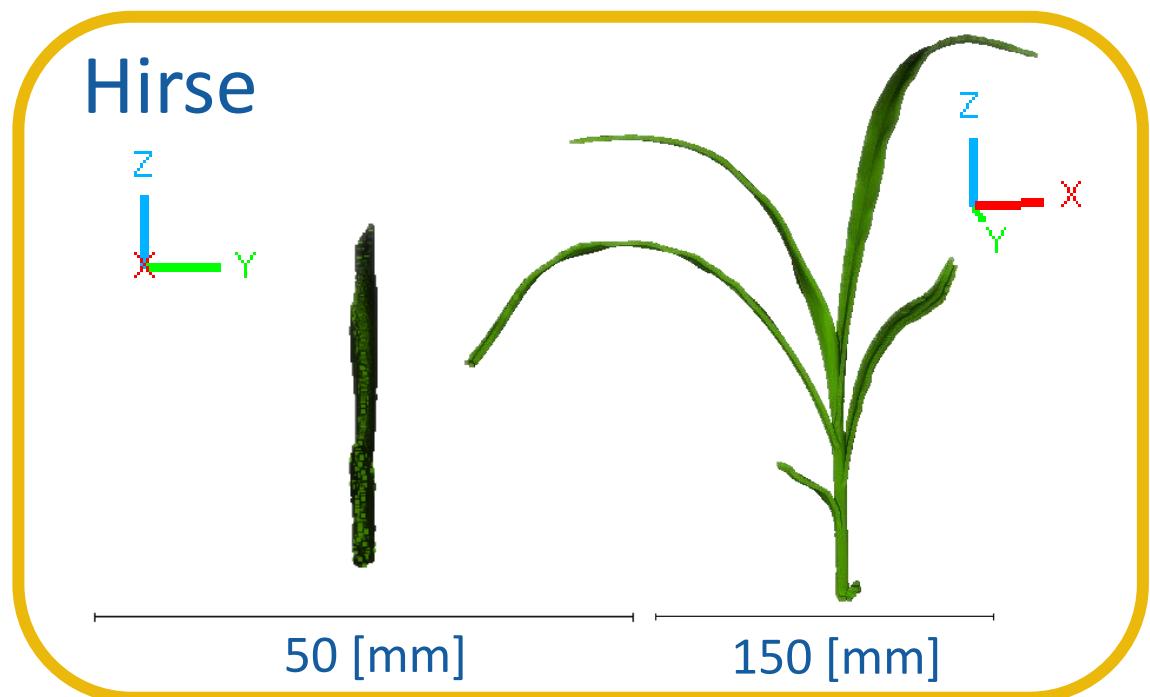
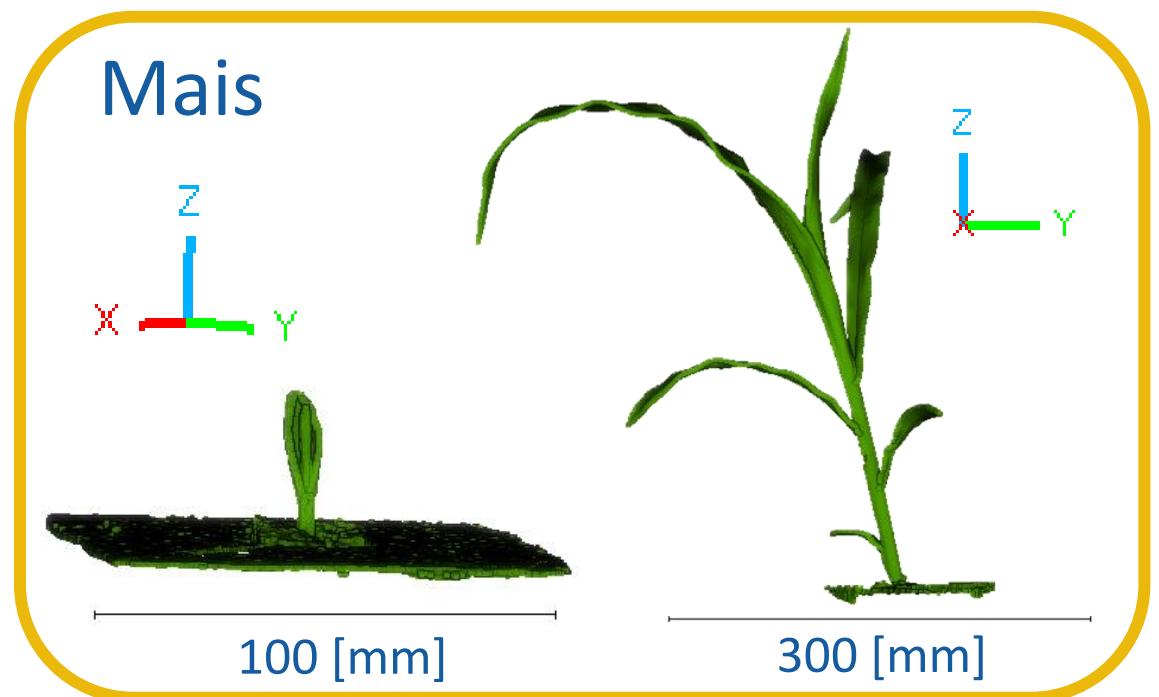
Mais



Hirse

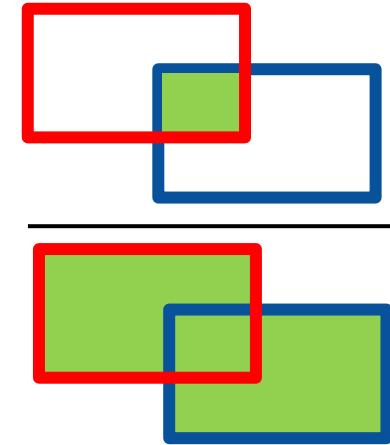
Datengrundlage

	Schunck et al., (2021) „Pheno4D“ (1)	Conn et al., (2017) (2)
Pflanze	Mais	Hirse
# Datensätze	49	30
Boden vorhanden?	Ja	Nein
Wachstumsstadien	V0 – V4	V0 - V3



Ergebnisse Vergleich mit Referenzsegmentierung

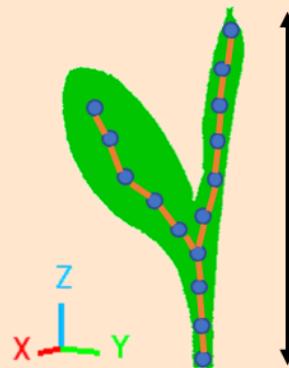
$$\text{Intersection over Union (IoU)} = \frac{\text{Schnittmenge}}{\text{Vereinigungsmenge}}$$



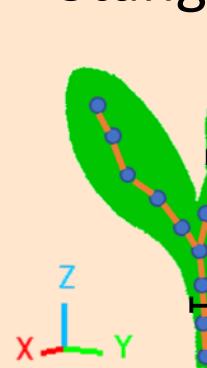
Datensätze	Schnuck et al., (2021) „Pheno4D“, Mais	Conn et al., (2017) Hirse
Segmentierung	\overline{IoU}	\overline{IoU}
	0.961	0.908

6) Berechnung phänotypischer Parameter

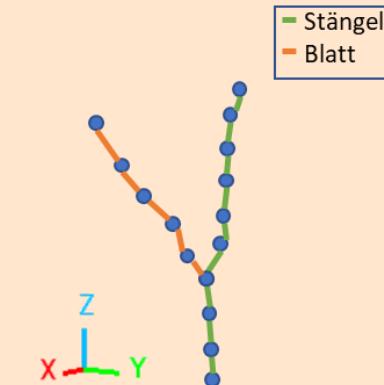
A) Pflanzenhöhe



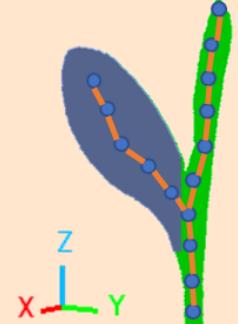
B) Durchmesser des Stängels



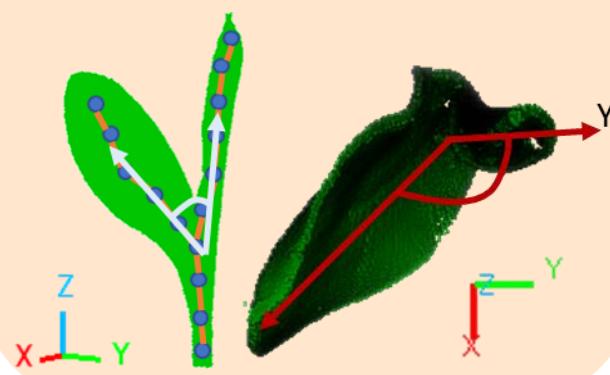
C) Anzahl Blätter



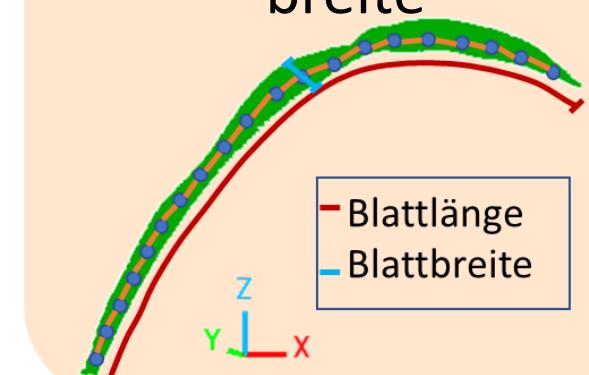
D) Blattfläche



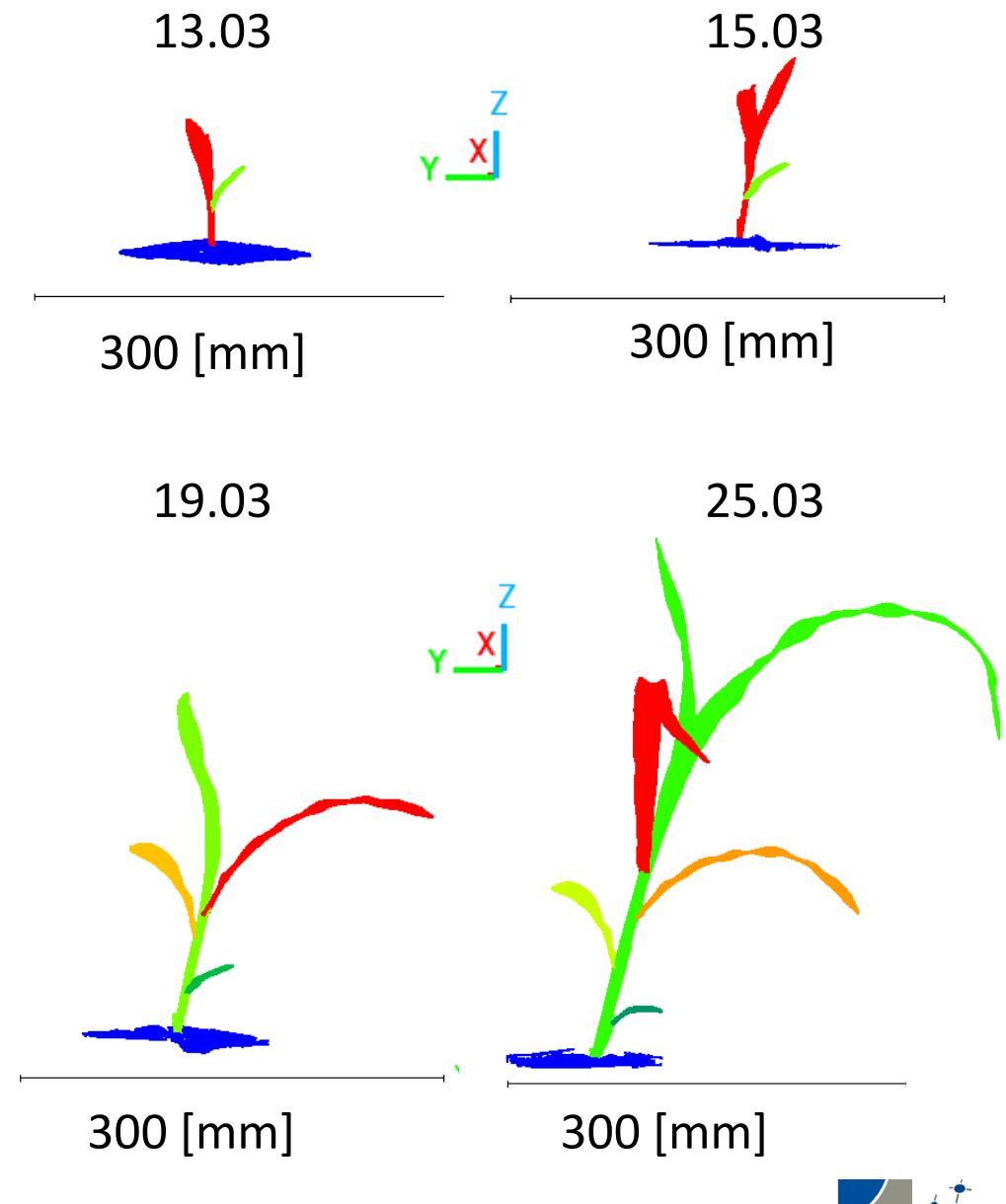
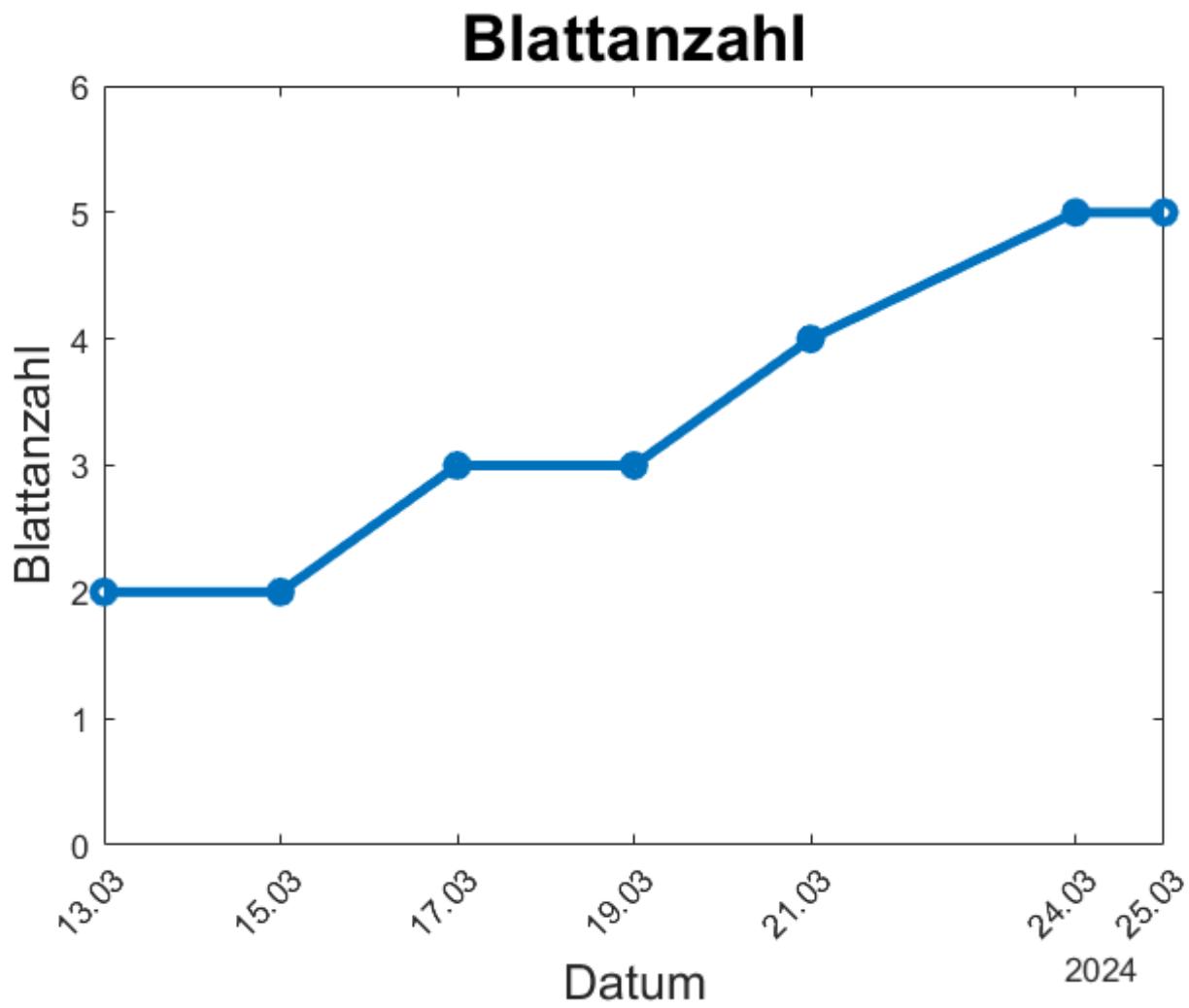
E) Blattwinkel



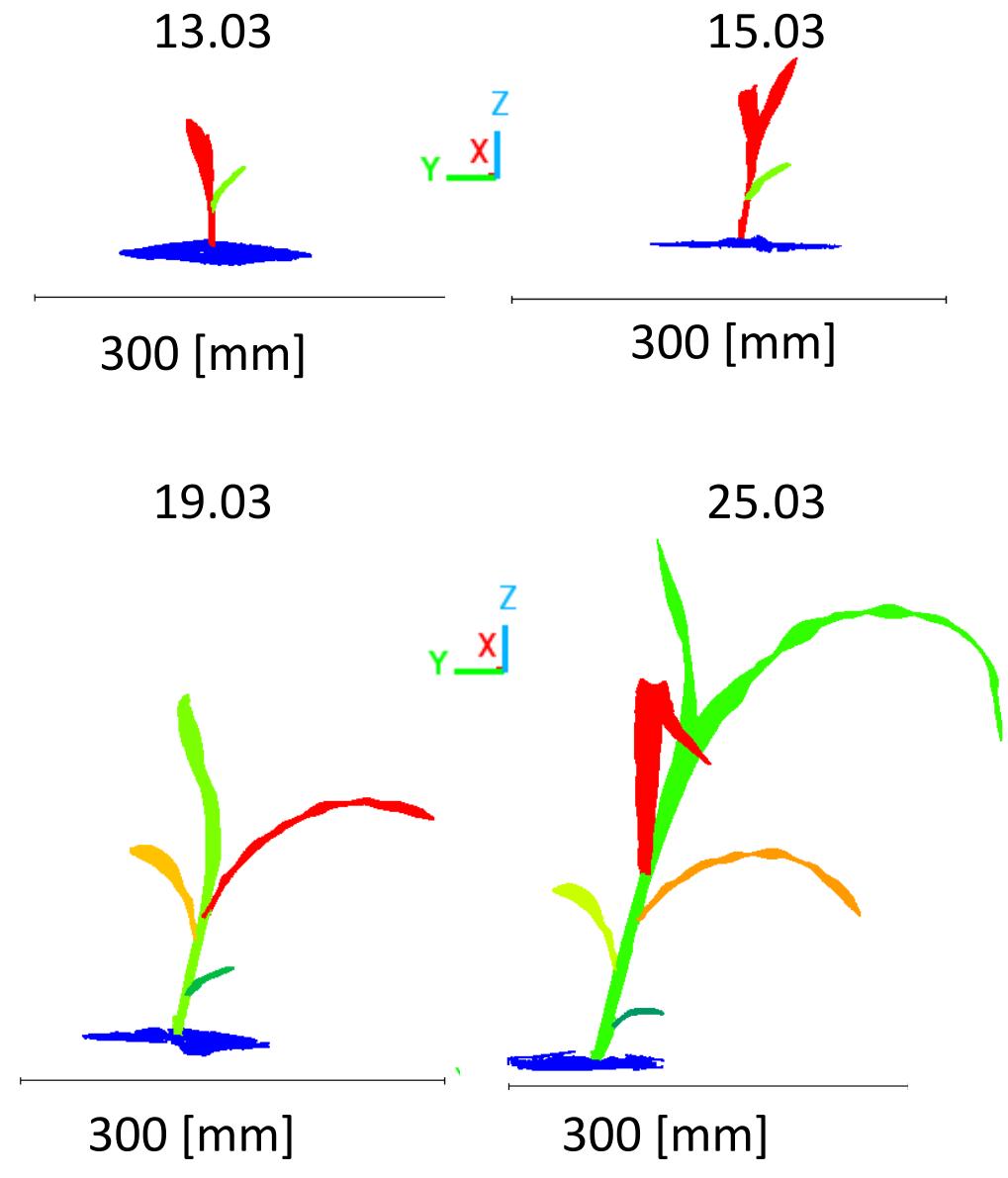
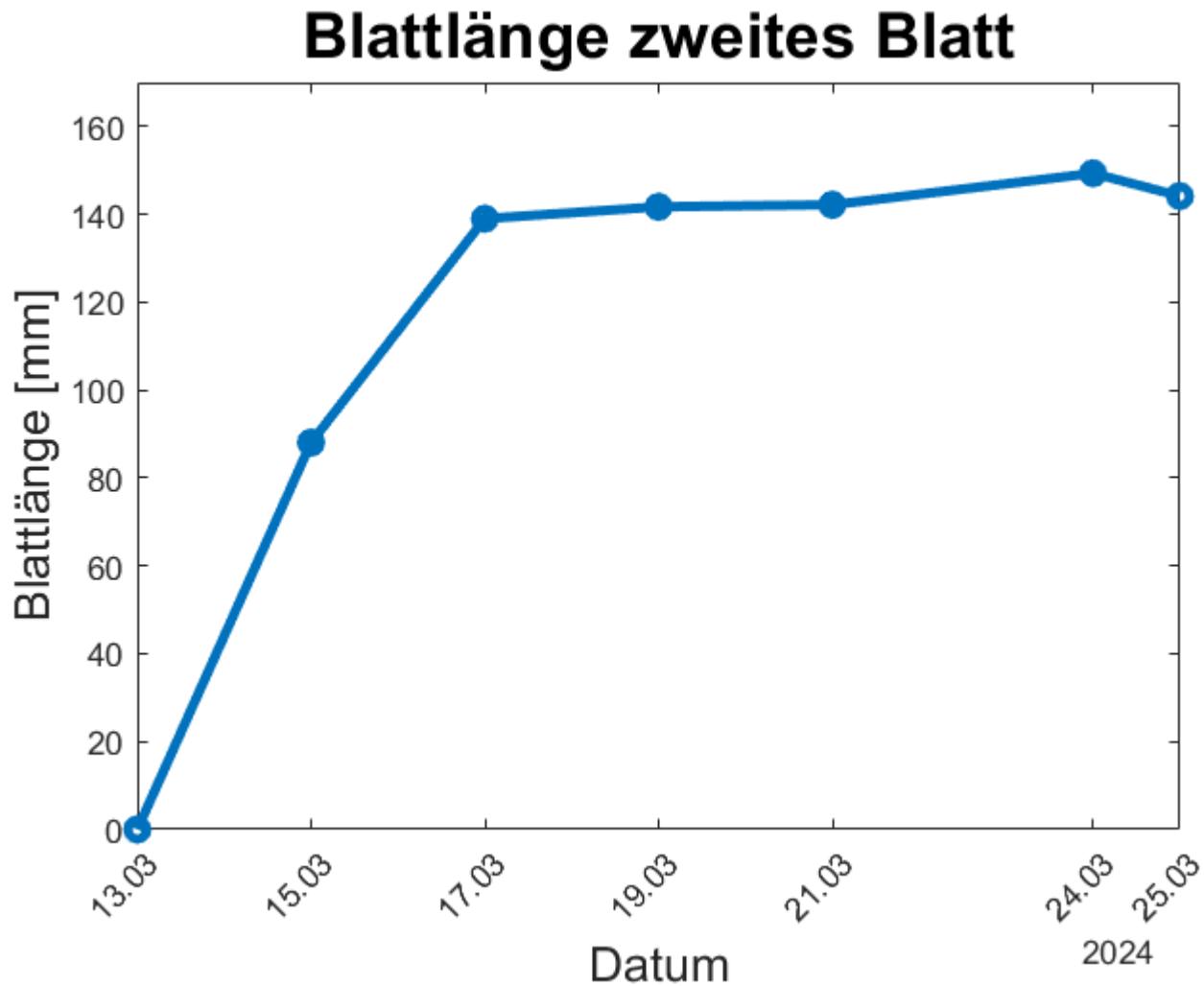
F) Blattlänge- und breite



Phänotypische Parameter Ergebnisse

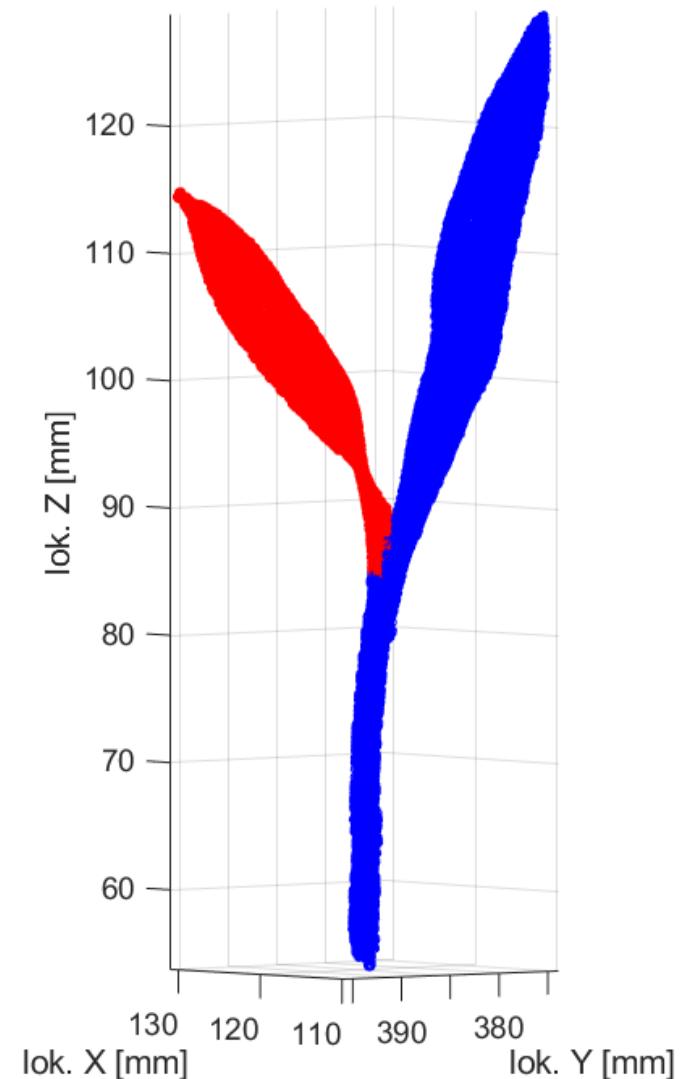


Phänotypische Parameter Ergebnisse



Fazit und Ausblick

- Nutzung von Punktwolken zur Automatisierung der Phänotypisierung
- Geometrische Vorkenntnisse in Methode integrieren
- Erweiterung auf Felddaten
- Erweiterung auf weitere Pflanzenarten

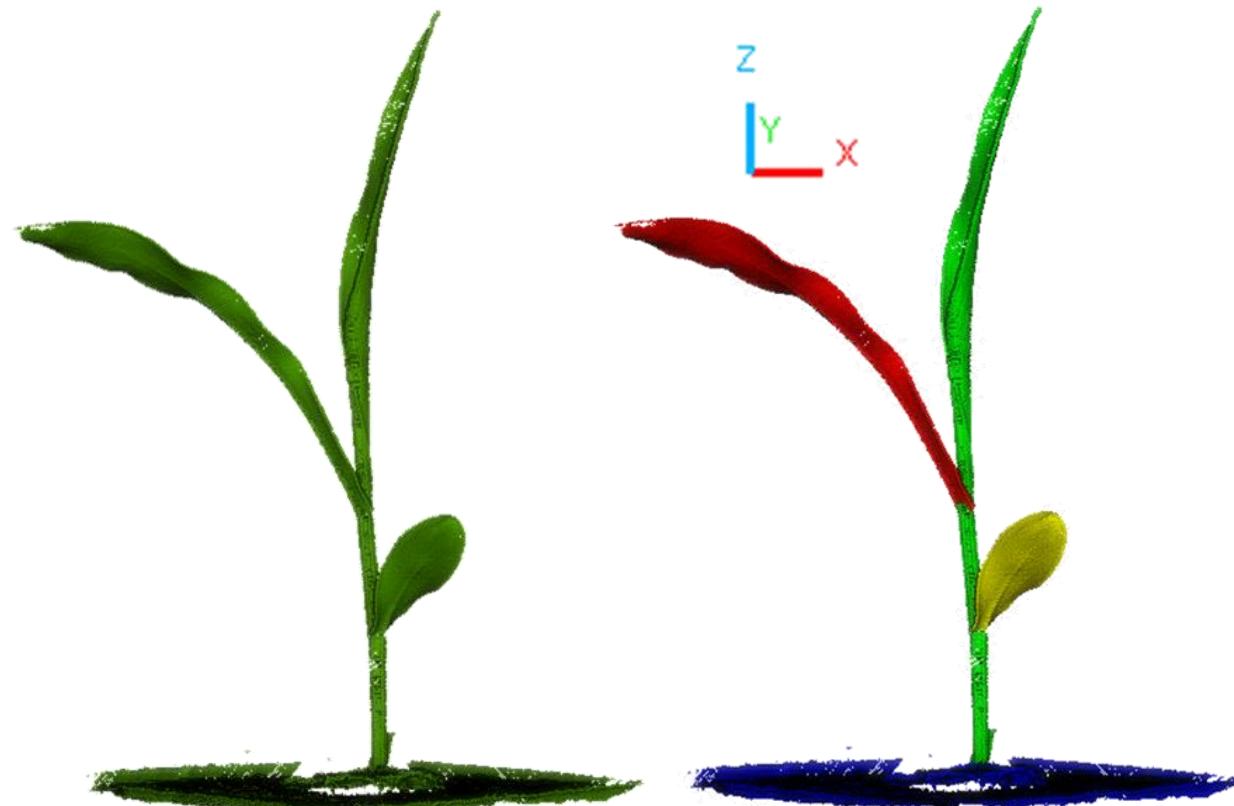


Automatisierte Punktwolkensegmentierung für die Phänotypisierung von Nutzpflanzen

Annika Tobies

Vermessungswesen aktuell

13.11.2025



Bildquellen

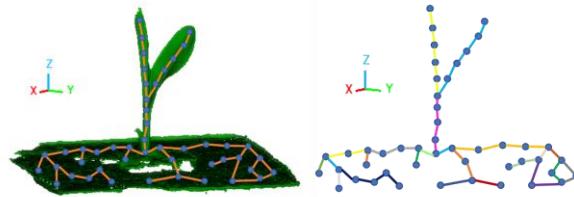
- [1] Laserscanning Europe, „Laserscanning und Modellierung in Bauwesen und Architektur“, URL: <https://www.laserscanning-europe.com>, Zugriff am 12.11.2025
- [2] Laserscanning Bayern, „Denkmalpflege“, URL: <https://laserscanning.bayern>, Zugriff am 12.11.2025
- [3] Laserscanning Europe, „Fassafenaufmaß & Vermessung mittels 3D-Laserscanning“, URL: <https://www.laserscanning-europe.com>, Zugriff am 12.11.2025
- [4] Alibaba, „SHINING 3D-Scanner“, URL: <https://german.alibaba.com/>, Zugriff am 12.11.2025
- [5] Quicksurface, „3D Reverse Engineering“, URL: <https://www.quicksurface.com/>, Zugriff am 12.11.2025
- [6] Leica Geosystem, „BIM Model Creation“, URL: <https://leica-geosystems.com/>, Zugriff am 12.11.2025
- [7] Bioökonomie, „KI macht Wachstum von Ackerpflanzen sichtbar“, 2024, URL: <https://biooeconomie.de/>, Zugriff am 07.11.2024
- [8] H&P Railservice, „3D Scanner – ROMER Hexagon Metrology INFINITE“, 2024. URL: <https://www.hp-rail.com>, Zugriff am 12.11.2024
- [9] Leica Geosystems, „Leica ScanStation P50 – Terrestrischer 3D-Laserscanner mit großer Reichweite“, 2024. URL: <https://leica-geosystems.com/>, Zugriff am 12.11.2024
- [10] I. Janusch, W. G. Kropatsch and W. Busch, "Topological Image Analysis and (Normalised) Representations for Plant Phenotyping," 2014 16th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing, Timisoara, Romania, 2014, pp. 579-586, doi: 10.1109/SYNASC.2014.83.
- [11] Farmsaat, „Eine gute Saat ist das A und O im Maisanbau“, 2020, URL: <https://www.farmsaat.de/>, Zugriff am 12.11.2024
- [12] Paleontological Research Institution, “The Teacher-Friendly Guide to the Evolution of Maize”, 2011, URL: <https://maize.teacherfriendlyguide.org/>, Zugriff am 03.11.2024
- [13] Bonnie A. Coblenz, „State’s sorghum acreage needs warm, dry conditions“ 2015, URL: <http://extension.msstate.edu/>,
- [14] Zunel van Eeden, „Why sorghum is seeing a downward trend“, 2024, URL: <https://www.cropscience.bayer.africa/>, Zugriff am 03.11.2024

Literaturquellen

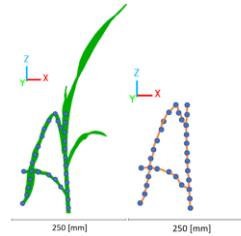
- (1) Schunck, David, et al. "Pheno4D: A spatio-temporal dataset of maize and tomato plant point clouds for phenotyping and advanced plant analysis." *Plos one* 16.8 (2021): e0256340.
- (2) Conn, Adam, et al. "A statistical description of plant shoot architecture." *Current biology* 27.14 (2017): 2078-2088.
- (3) Miao, Yanlong, et al. "Measurement method of maize morphological parameters based on point cloud image conversion." *Computers and Electronics in Agriculture* 199 (2022): 107174.
- (4) Miao, Teng, et al. "Label3DMAize: toolkit for 3D point cloud data annotation of maize shoots." *GigaScience* 10.5 (2021): giab031.
- (5) Jin, Shichao, et al. "Stem–leaf segmentation and phenotypic trait extraction of individual maize using terrestrial LiDAR data." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 57.3 (2018): 1336-1346.
- (6) Gélard, William, et al. "Leaves segmentation in 3d point cloud." *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems: 18th International Conference, ACIVS 2017, Antwerp, Belgium, September 18-21, 2017, Proceedings* 18. Springer International Publishing, 2017.
- (7) Das Choudhury, Sruti, et al. "Leveraging image analysis to compute 3D plant phenotypes based on voxel-grid plant reconstruction." *Frontiers in plant science* 11 (2020): 521431.
- (8) Li, Yinglun, et al. "Automatic organ-level point cloud segmentation of maize shoots by integrating high-throughput data acquisition and deep learning." *Computers and Electronics in Agriculture* 193 (2022): 106702.
- (9) Li, Dawei, et al. "PSegNet: Simultaneous semantic and instance segmentation for point clouds of plants." *Plant Phenomics* (2022).
- (10) Wu, Sheng, et al. "An accurate skeleton extraction approach from 3D point clouds of maize plants." *Frontiers in plant science* 10 (2019): 248.
- (11) Zhu, Chao, et al. "Stem-leaf segmentation and phenotypic trait extraction of maize shoots from three-dimensional point cloud." *arXiv preprint arXiv:2009.03108* (2020).
- (12) Bao, Yin, et al. "Field-based architectural traits characterisation of maize plant using time-of-flight 3D imaging." *Biosystems Engineering* 178 (2019): 86-101.
- (13) Cao, Junjie, et al. "Point cloud skeletons via laplacian based contraction." *2010 Shape Modeling International Conference*. IEEE, 2010.

4) Verbesserung des abgeleiteten Graphenmodells

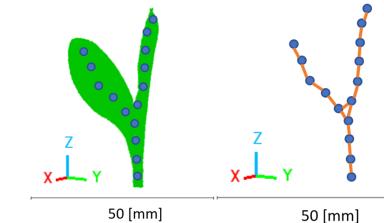
A) Bodenkanten
entfernen



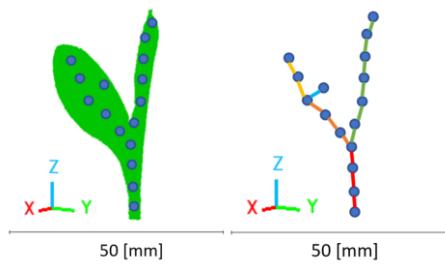
B) Überlappendende
Blätter



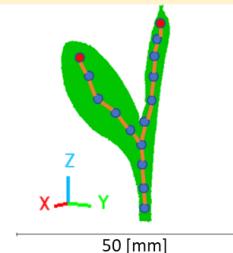
C) Ungewollte
Zyklen entfernen



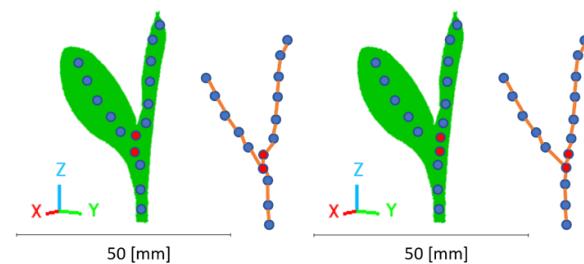
D) Ausreißer
entfernen



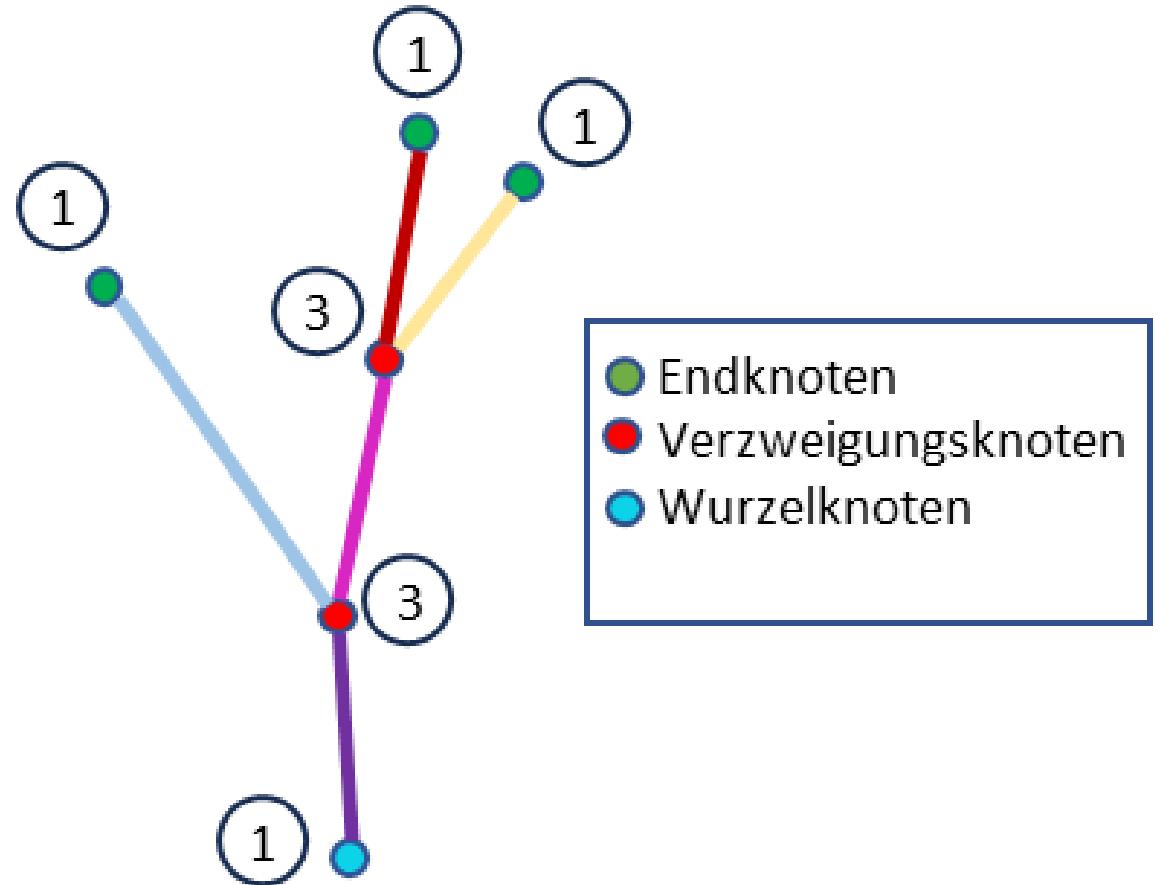
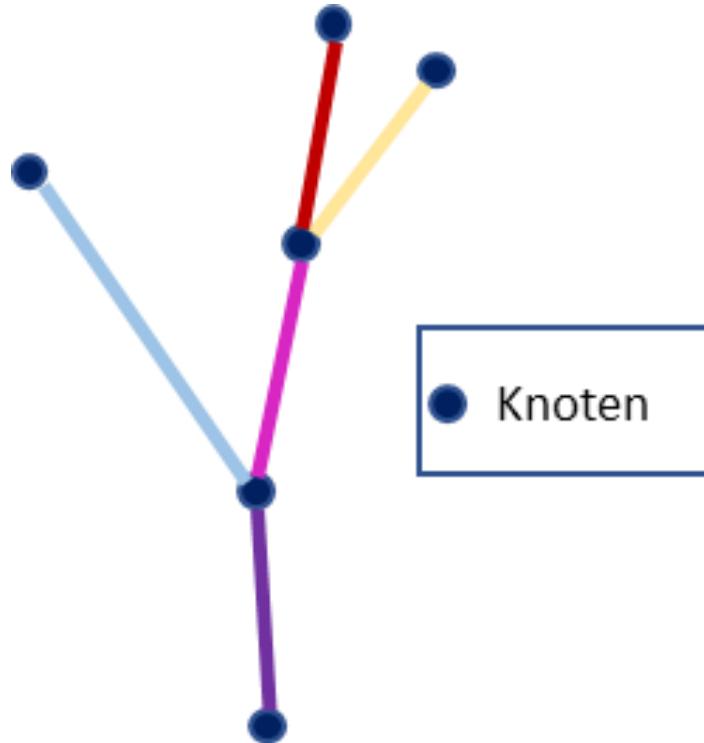
E) Endpunkte der
Skelettierung
verbessern



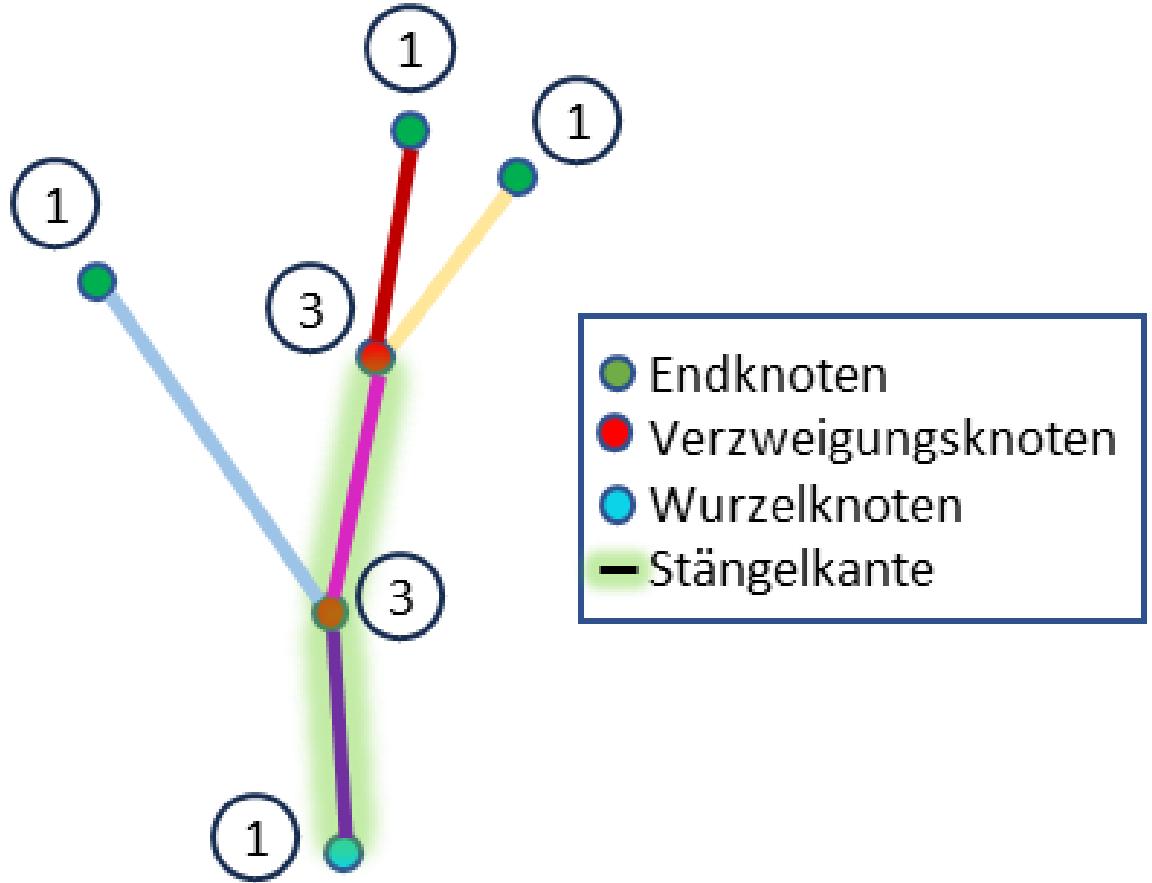
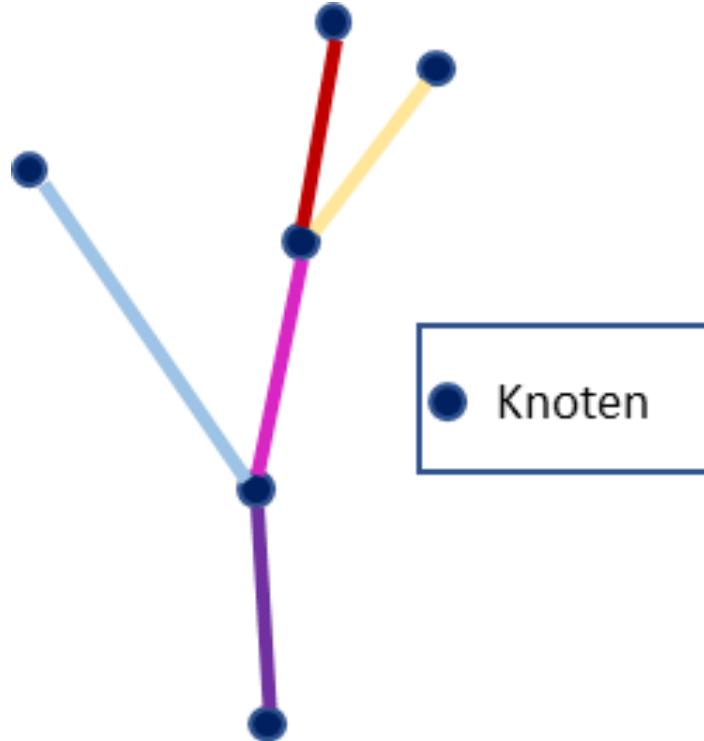
F) Position der
Skelettpunkte
verbessern



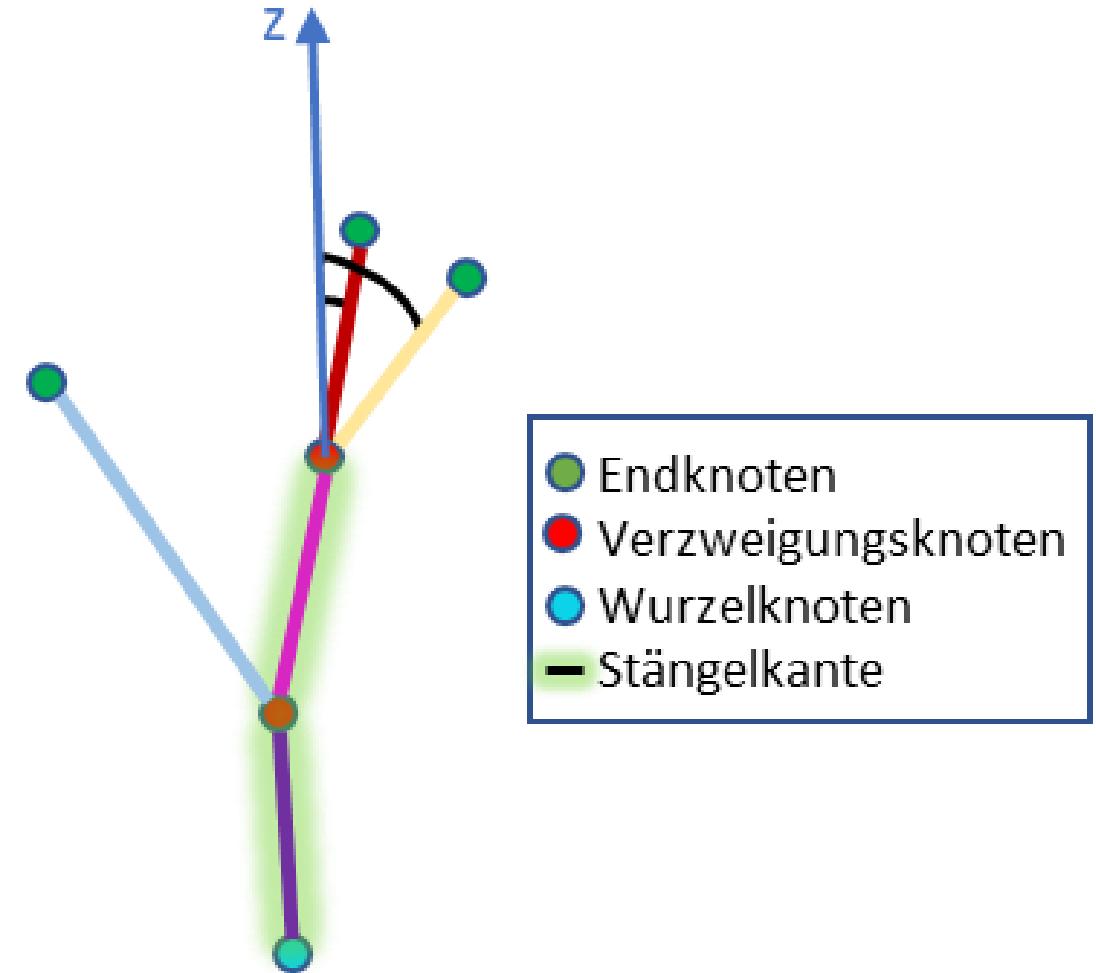
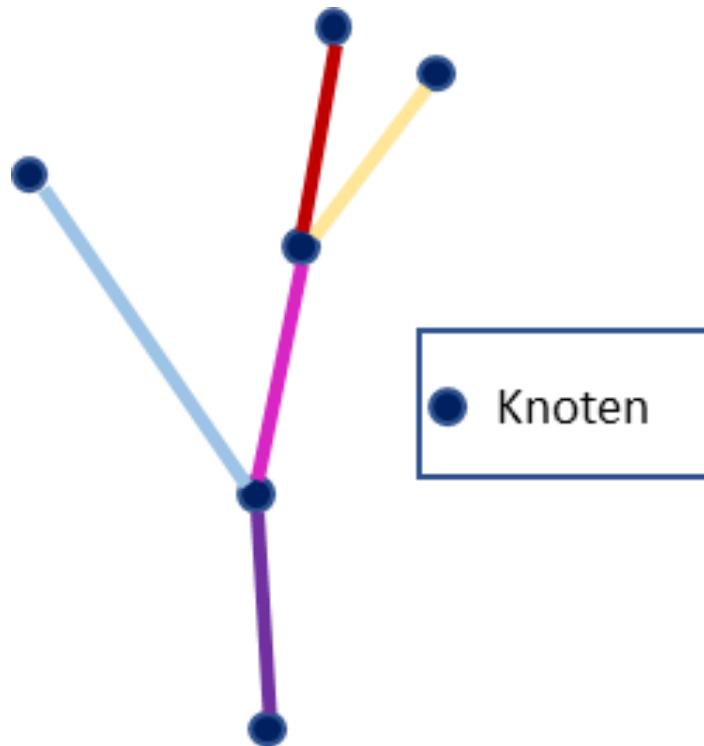
5) Graph segmentieren



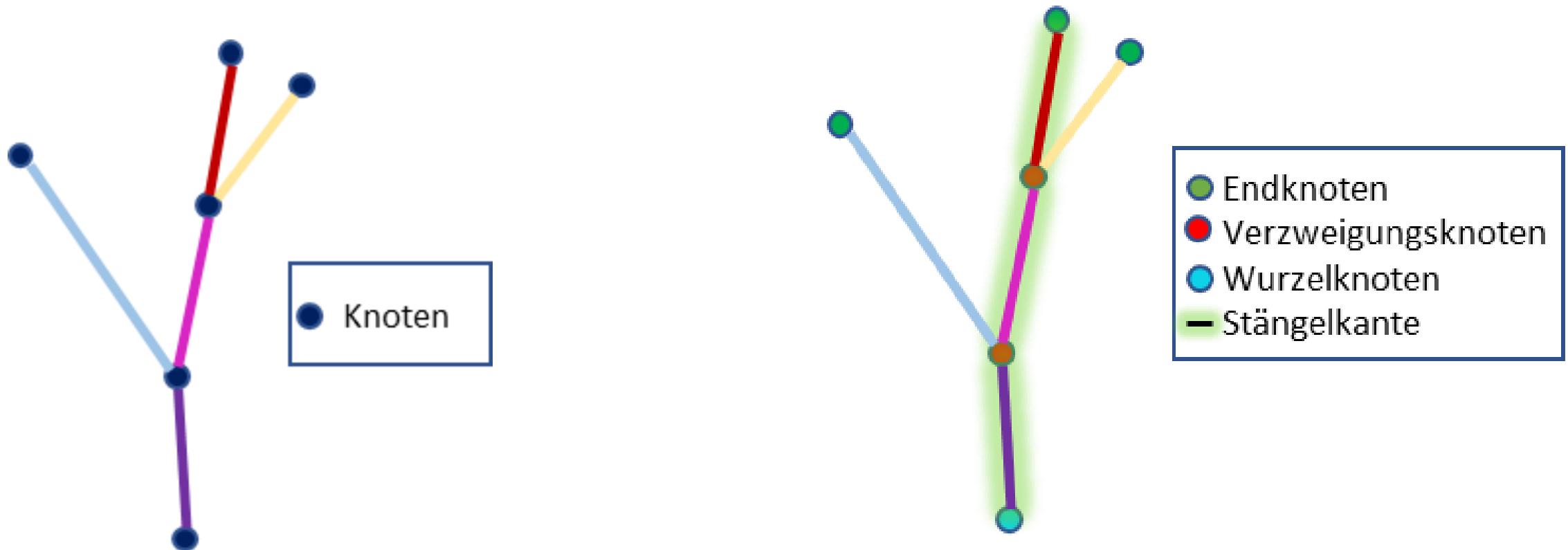
5) Graph segmentieren



5) Graph segmentieren



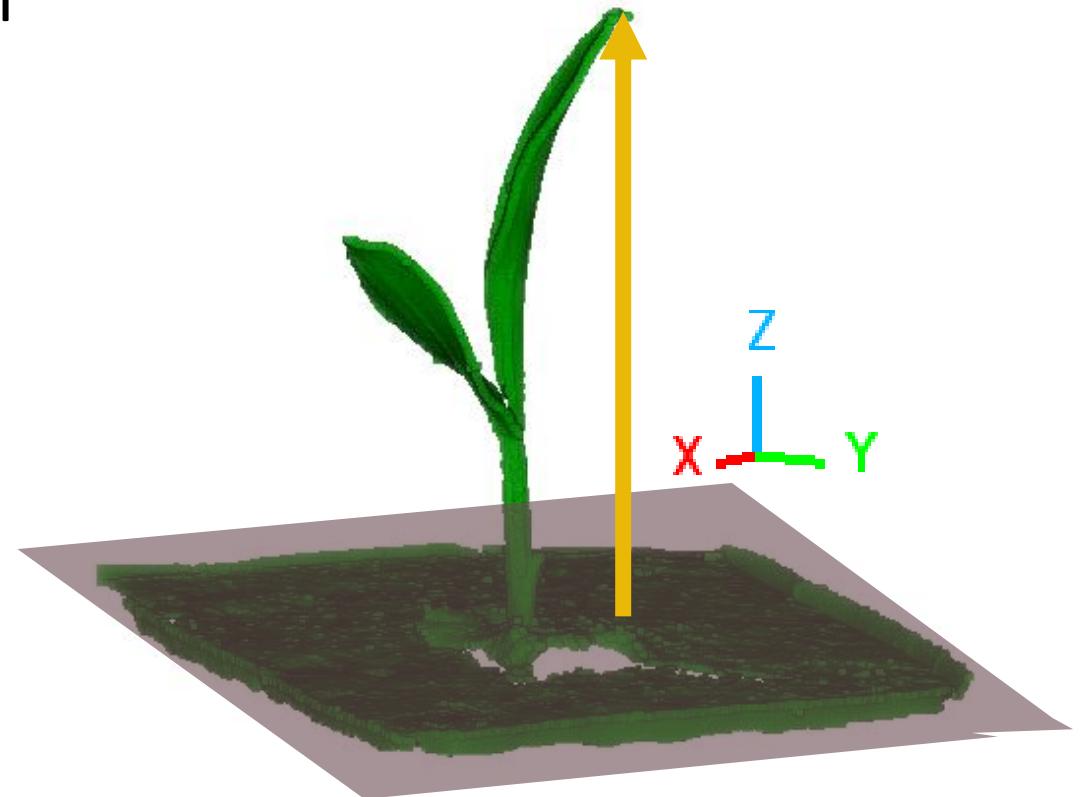
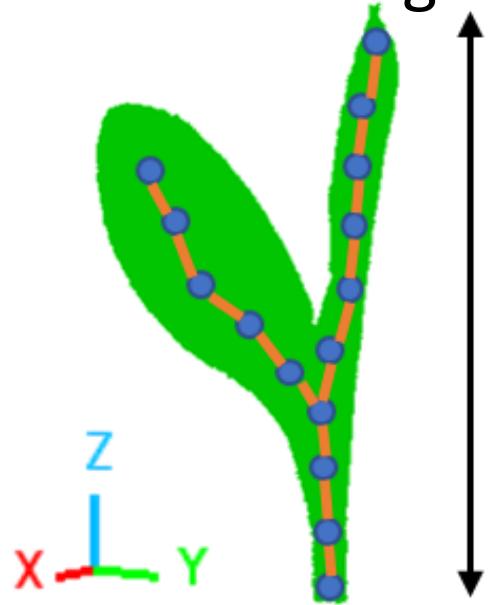
5) Graph segmentieren



6) Berechnung phänotypischer Parameter

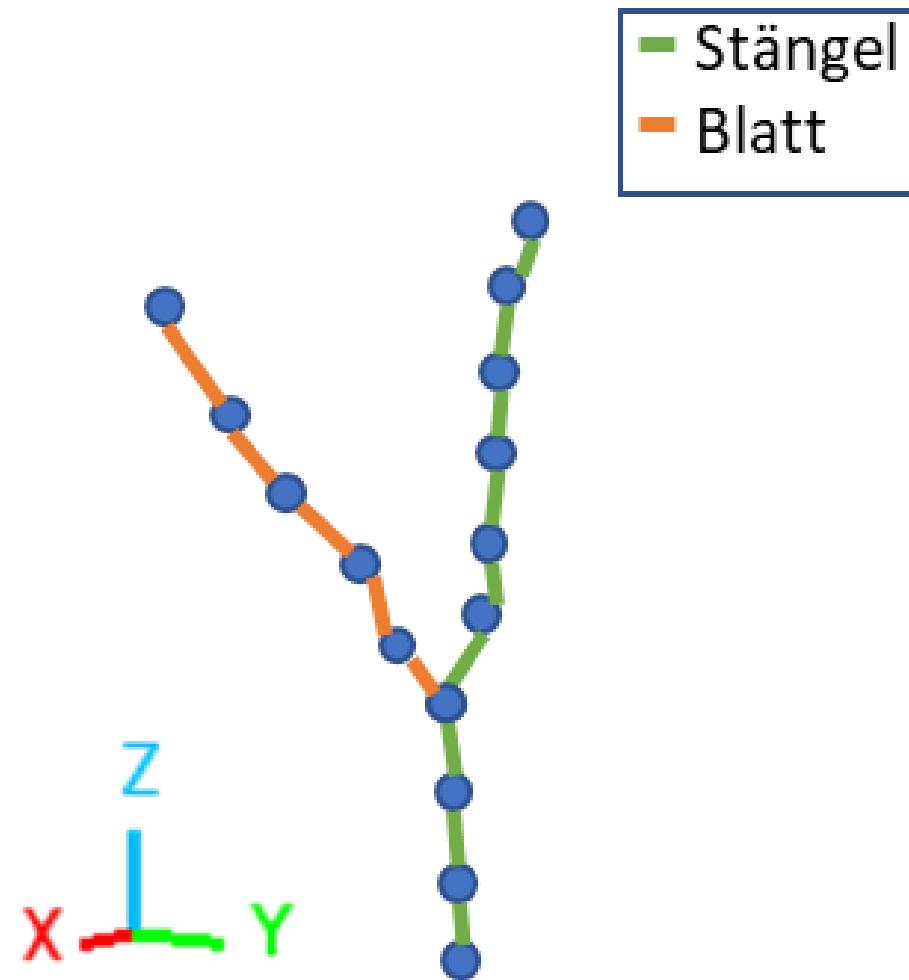
A) Pflanzenhöhe

- a) Ebene in Boden über RANSAC schätzen
- b) Orthogonale Abstand zu höchsten Punkt der Skelettierung der Pflanze

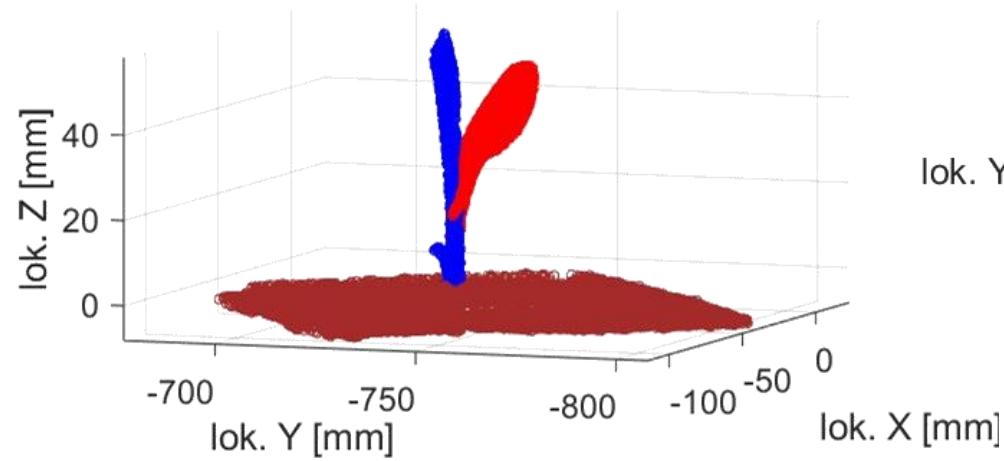
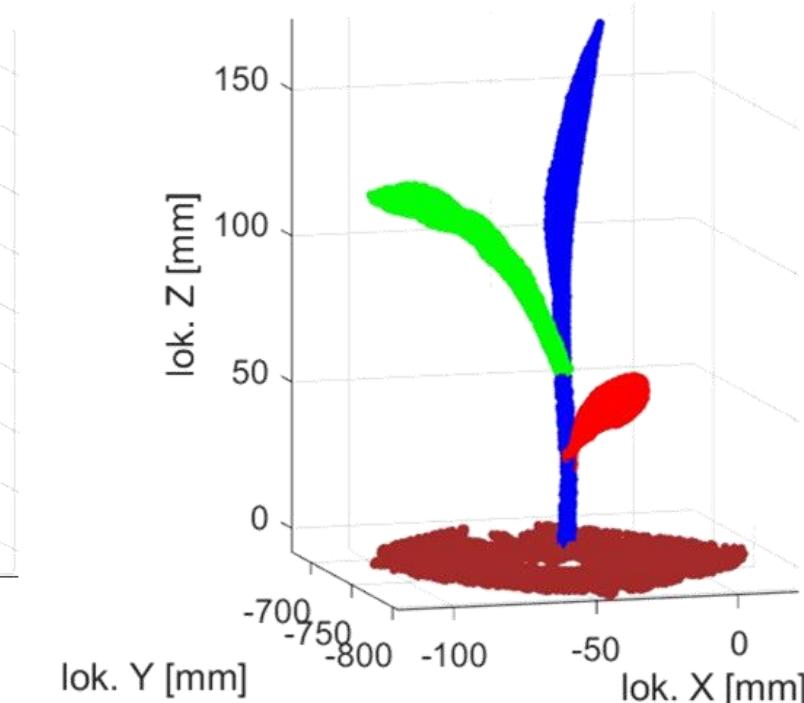
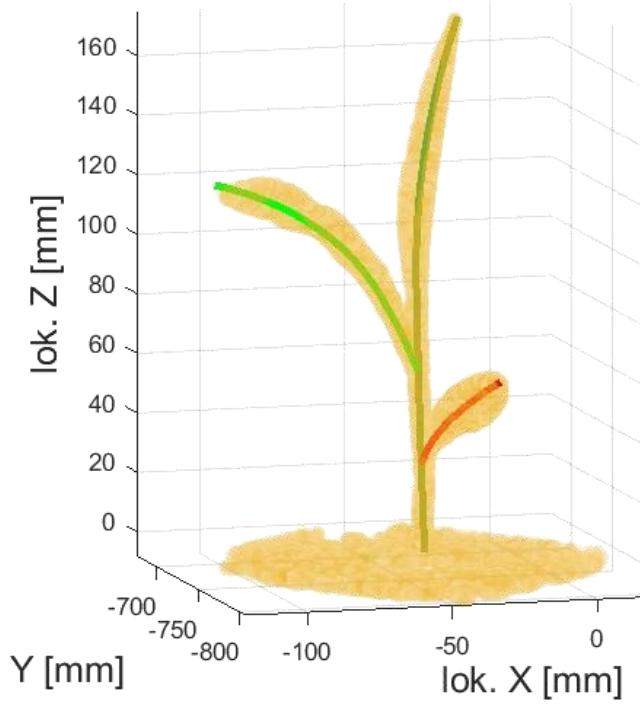
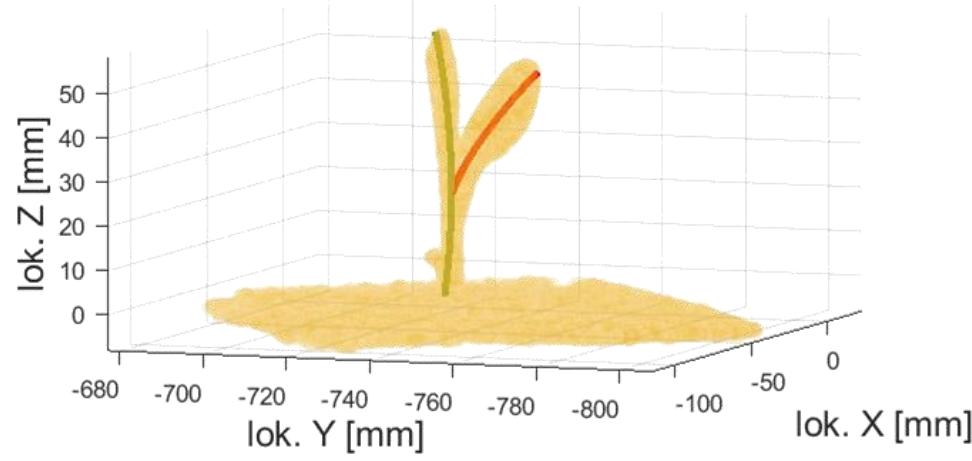


6) Berechnung phänotypischer Parameter

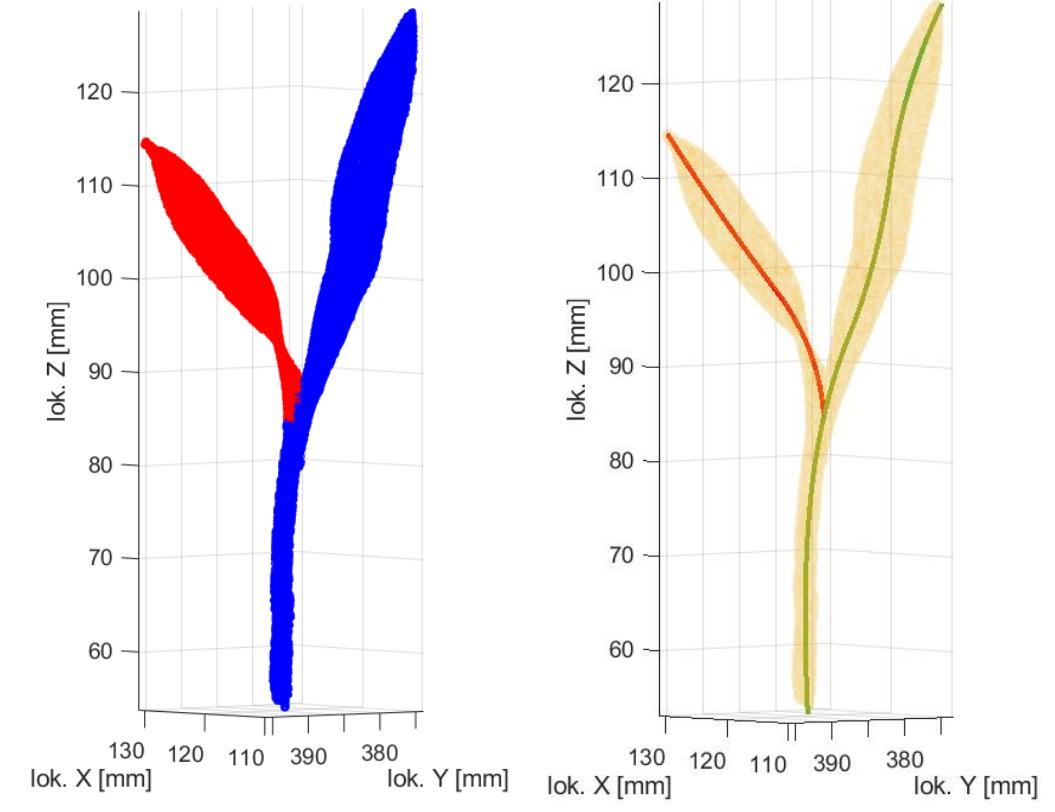
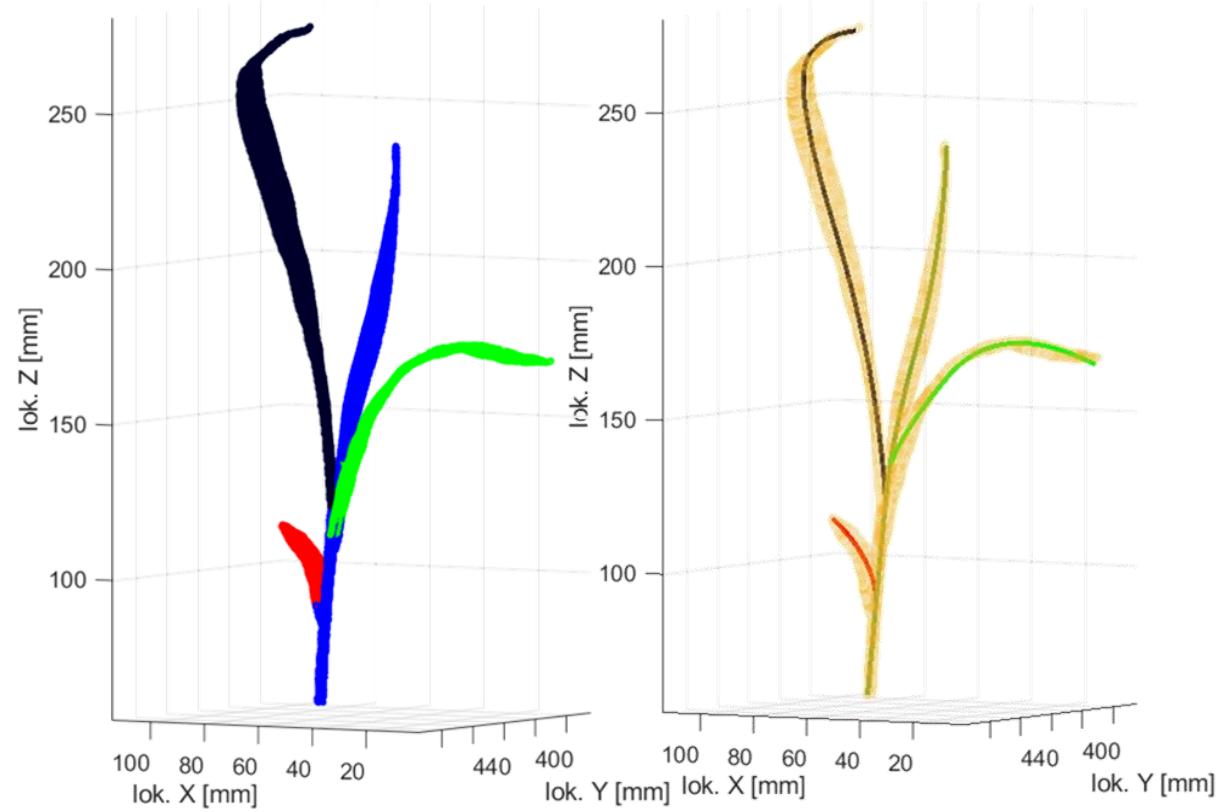
C) Anzahl Blätter



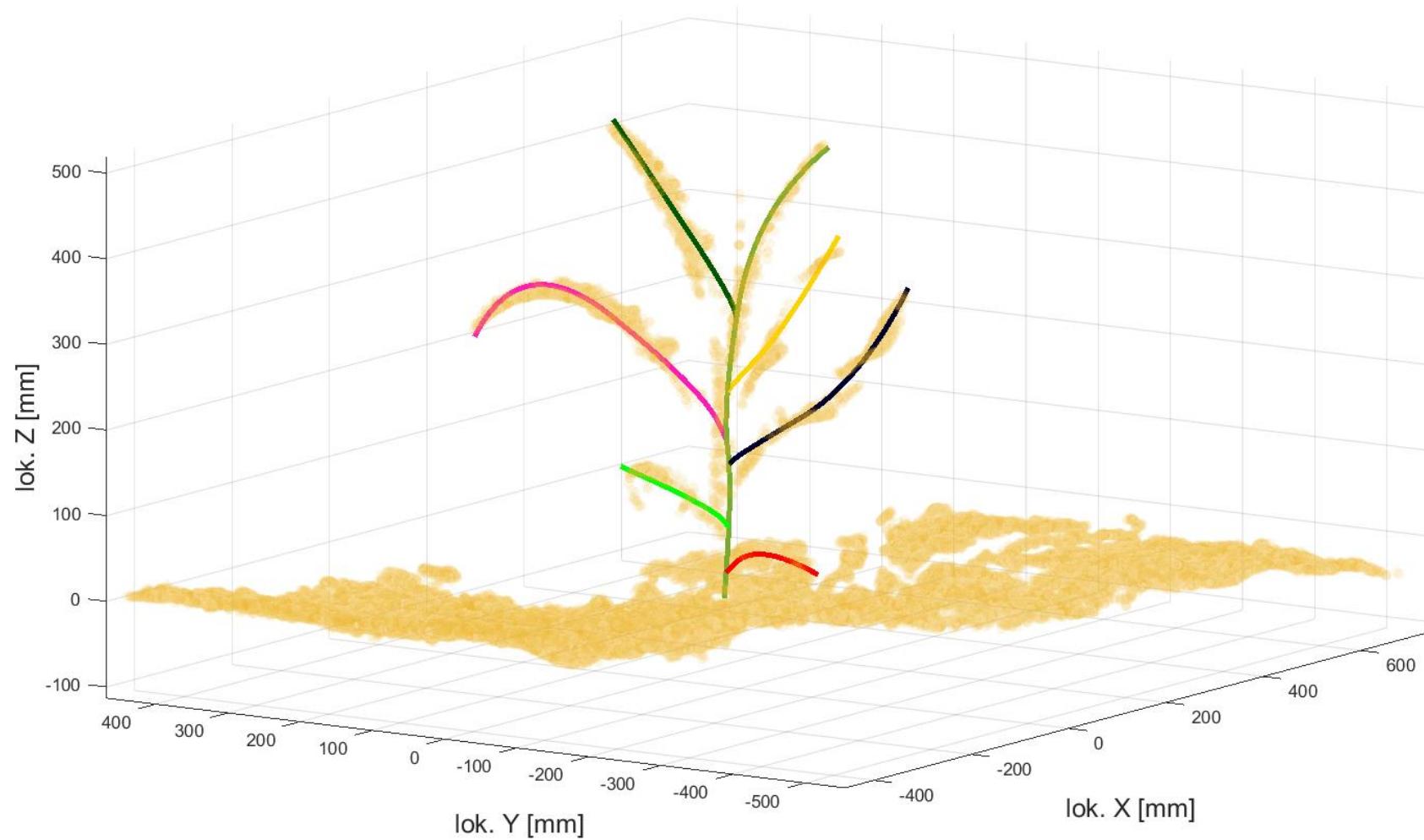
Ergebnisse (Beispiele Mais)



Ergebnisse (Beispiele Hirse)



LMI Ergebnis

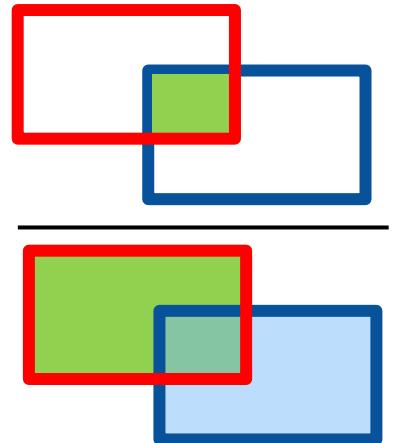


Vergleich zu anderen Segmentierungsmethoden Pheno4D

Methode	SBD (Symmetric Dice Coefficient)
PointNet	69.7
PointNet ++	74.8
LatticeNet	80.6
Eigene Methodik	97.3

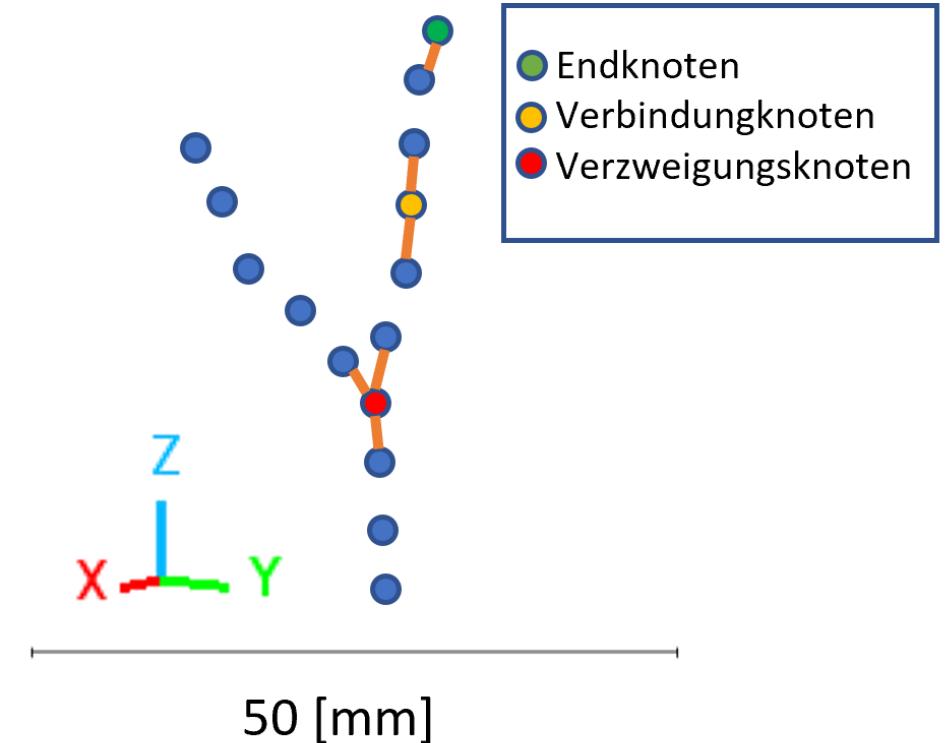
$$Dice\ Coeffizient\ (DC) = \frac{2 * Fläche\ der\ Schnittmenge}{Fläche_1 + Fläche_2}$$

$$Symmetric\ Dice\ Coeffizient\ (SBD) = \min\{DC_{GT,A}, DC_{A,GT}\}$$



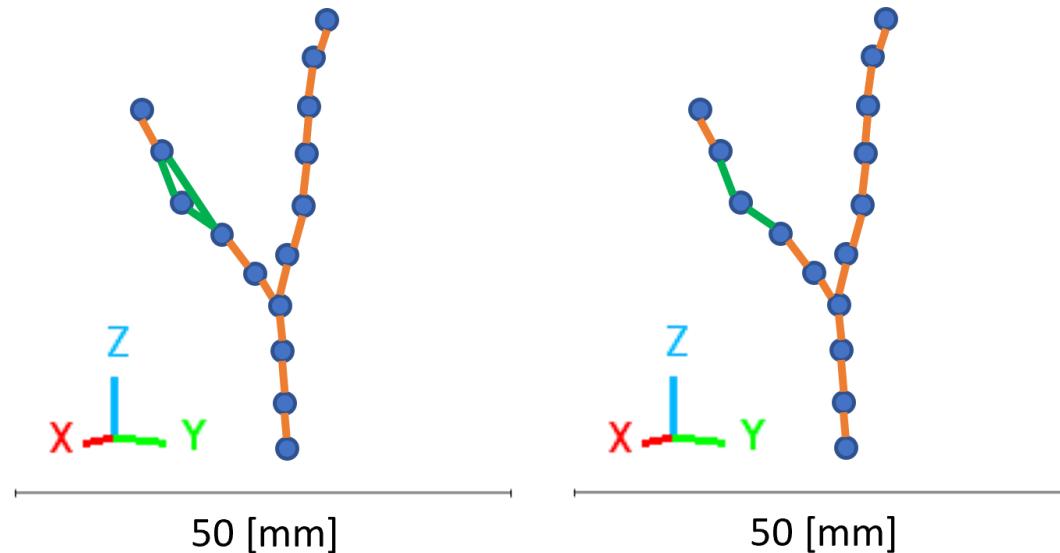
3) Berechnung des Graphens

- Skeletpunkte \triangleq Knoten
- 1) Alle Knoten werden mit drei nächsten Nachbarn verbunden



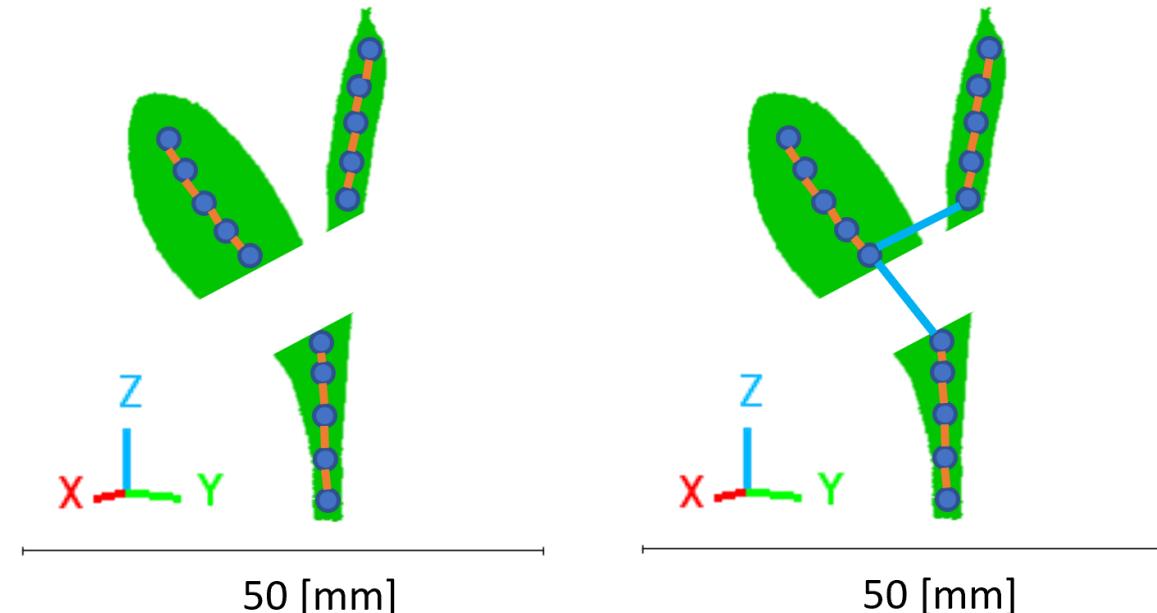
3) Berechnung des Graphens

- Skeletpunkte \triangleq Knoten
- 1) Alle Knoten werden mit drei nächsten Nachbarn verbunden
 - 2) Dreiecke werden aufgelöst



3) Berechnung des Graphens

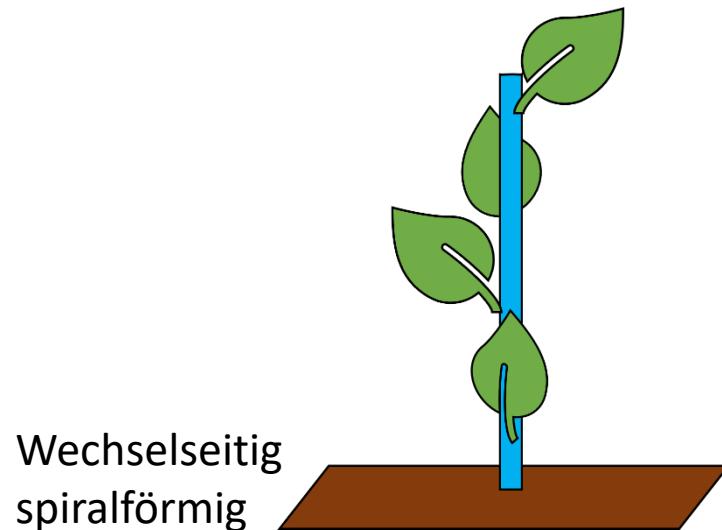
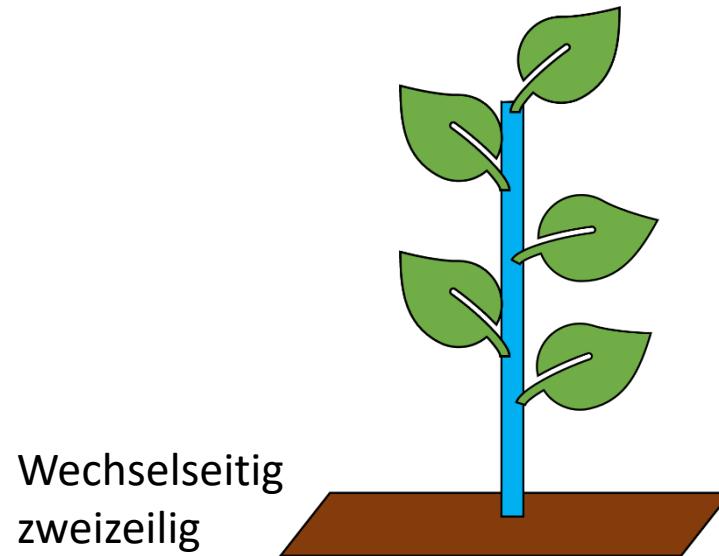
- Skelettpunkte \triangleq Knoten
- 1) Alle Knoten werden mit drei nächsten Nachbarn verbunden
 - 2) Dreiecke werden aufgelöst
 - 3) Lücken werden geschlossen



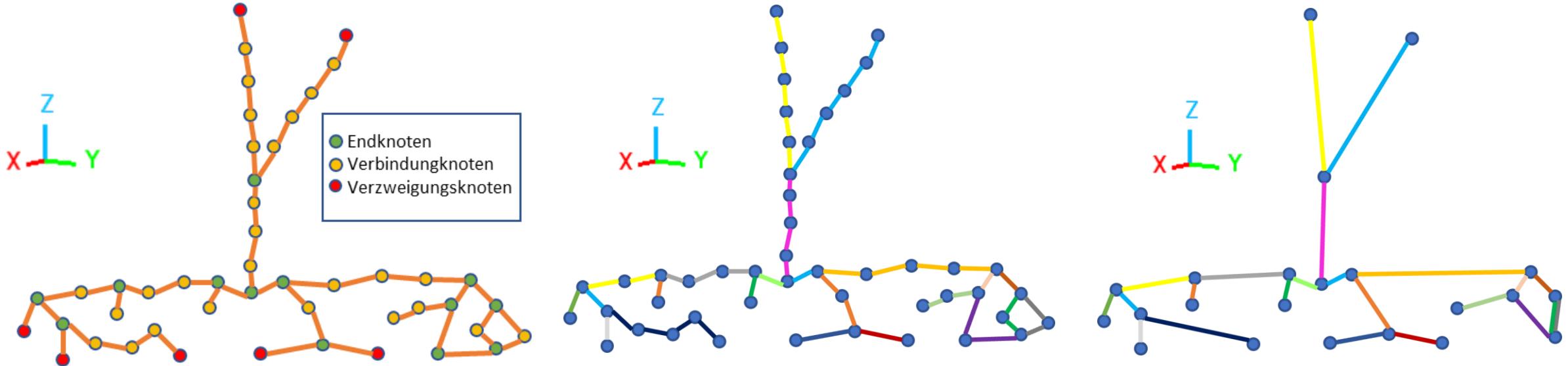
4A) Bodenkanten entfernen

Verwendetes Vorwissen über die Pflanzen:

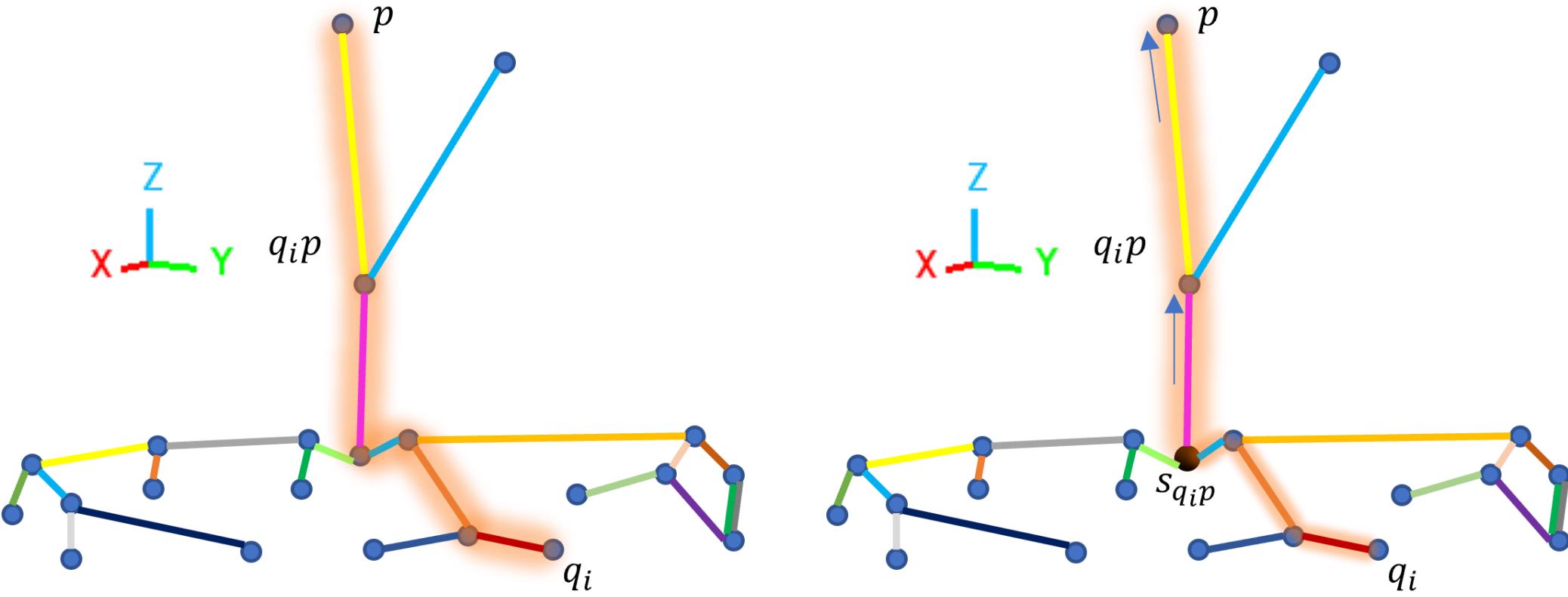
- Vertikales Wachstum der Pflanzen
- Wechselseitige Phyllotaxis der Pflanzen
- Im Vergleich zu den Bestandteilen der Pflanzen, horizontaler Boden



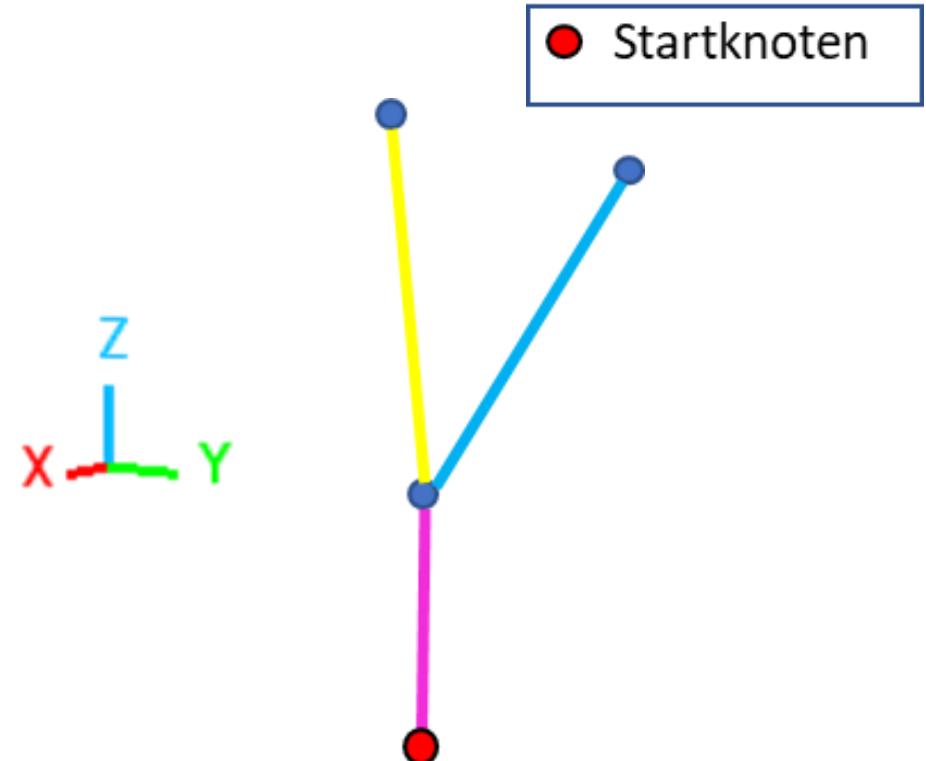
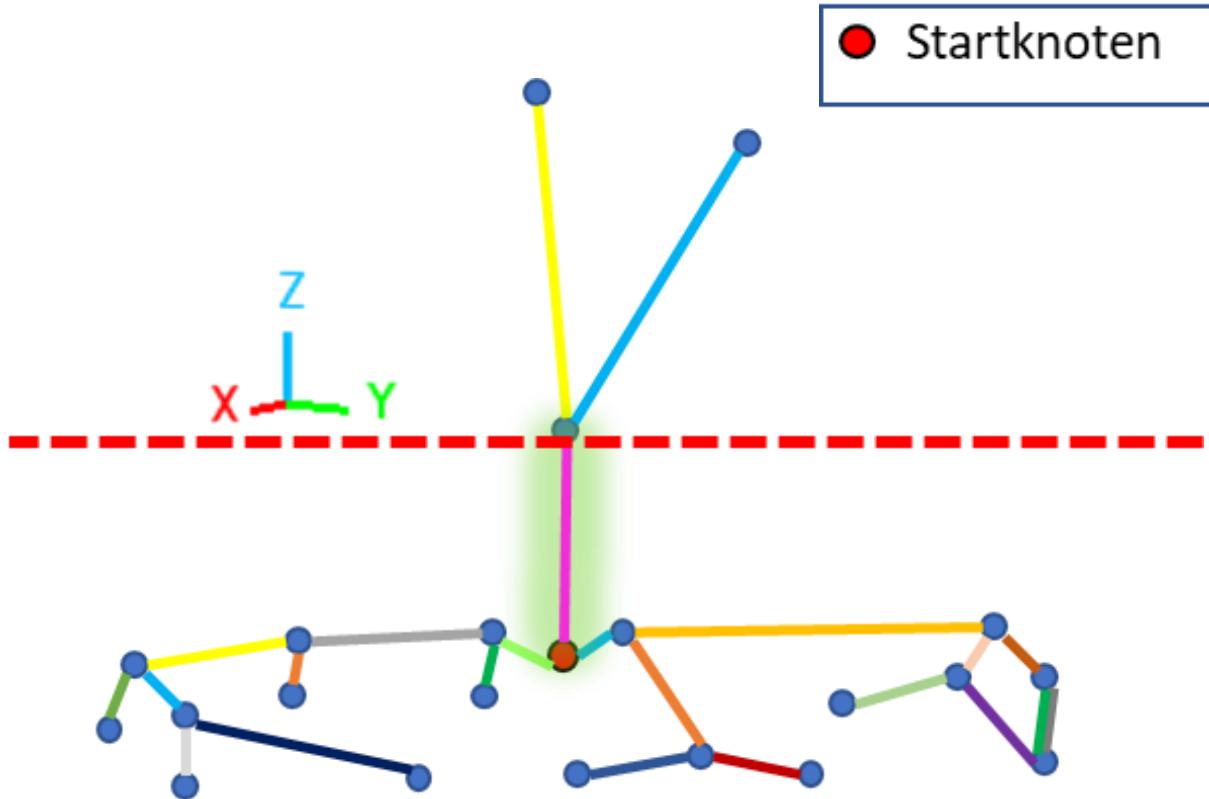
4A) Bodenkanten entfernen



4A) Bodenkanten entfernen



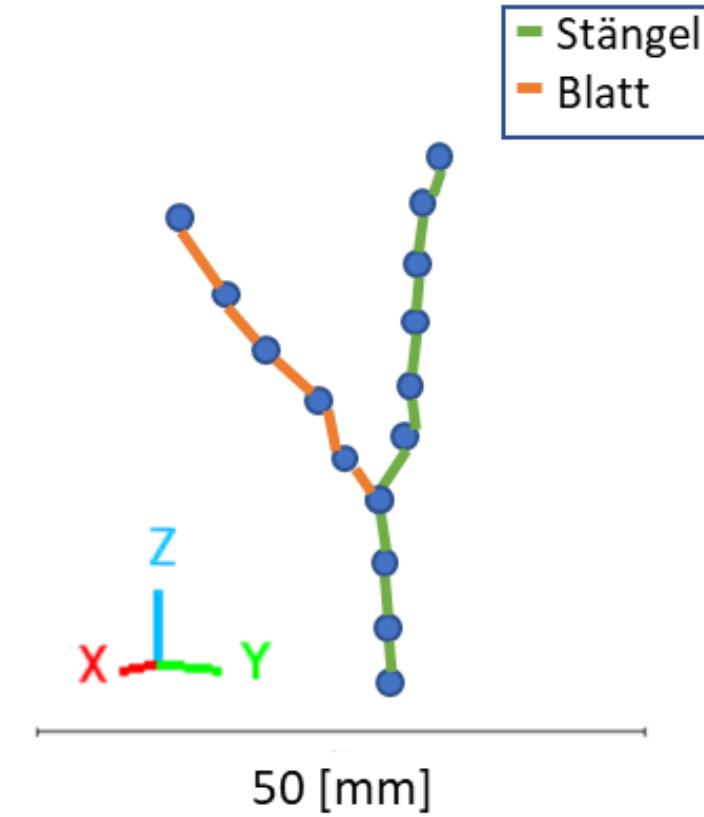
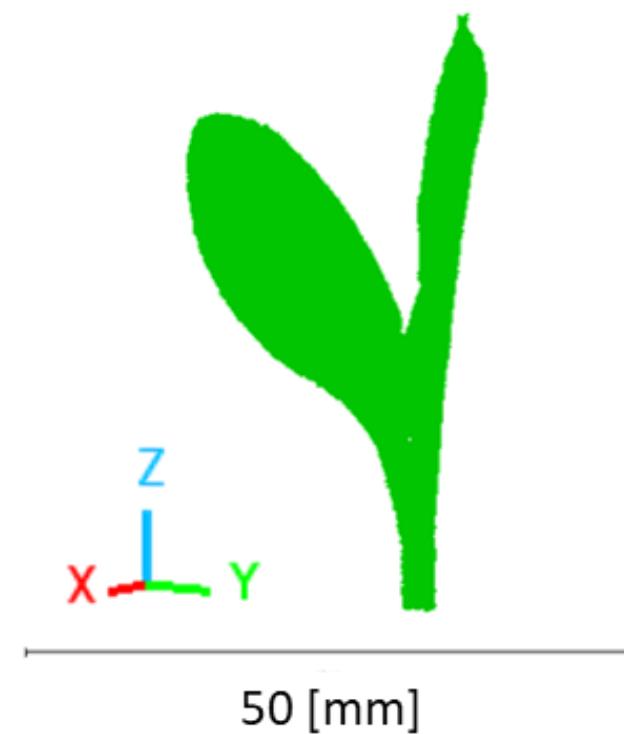
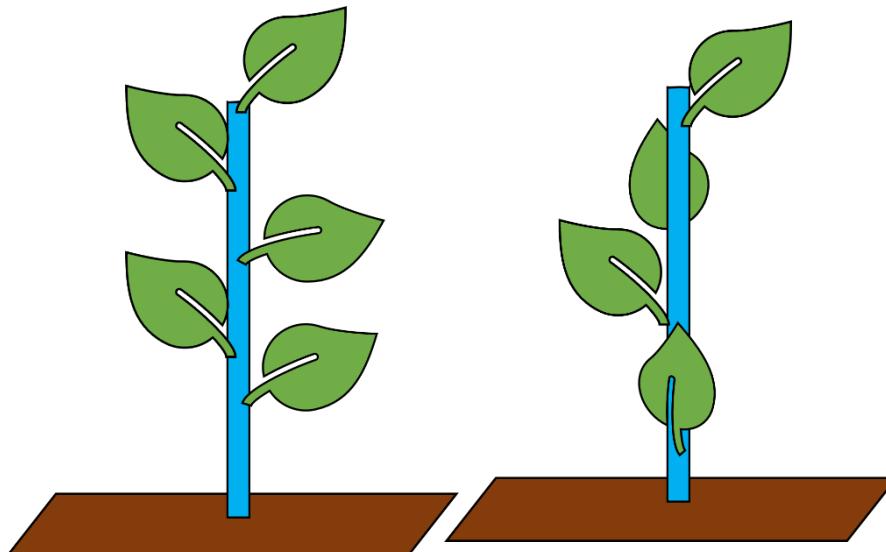
4A) Bodenkanten entfernen



4F) Position der Knoten verbessern

Vorwissen über Pflanze:

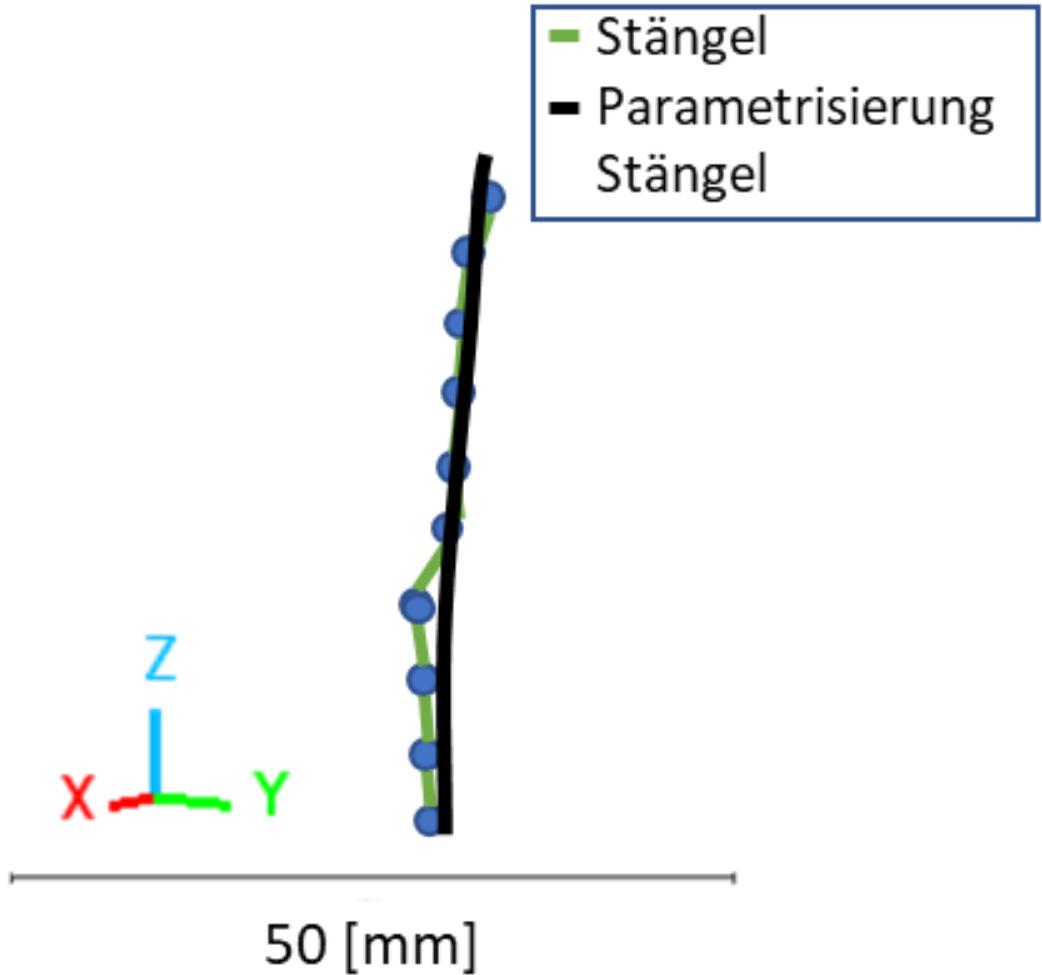
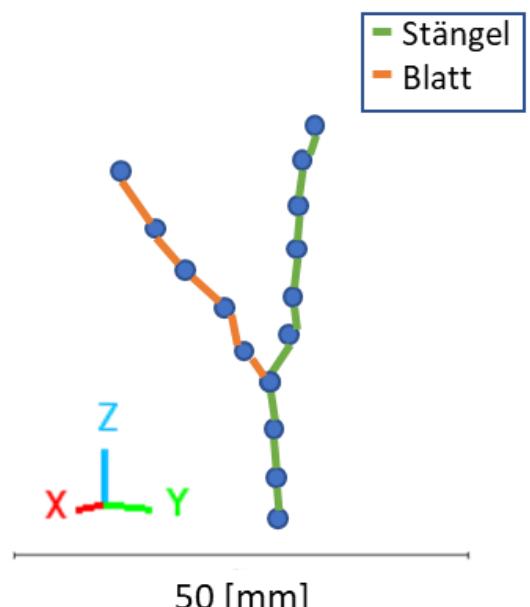
- Wechselseitige Phyllotaxis der Pflanzen
- Monopodiales Wachstum



4F) Position der Knoten verbessern

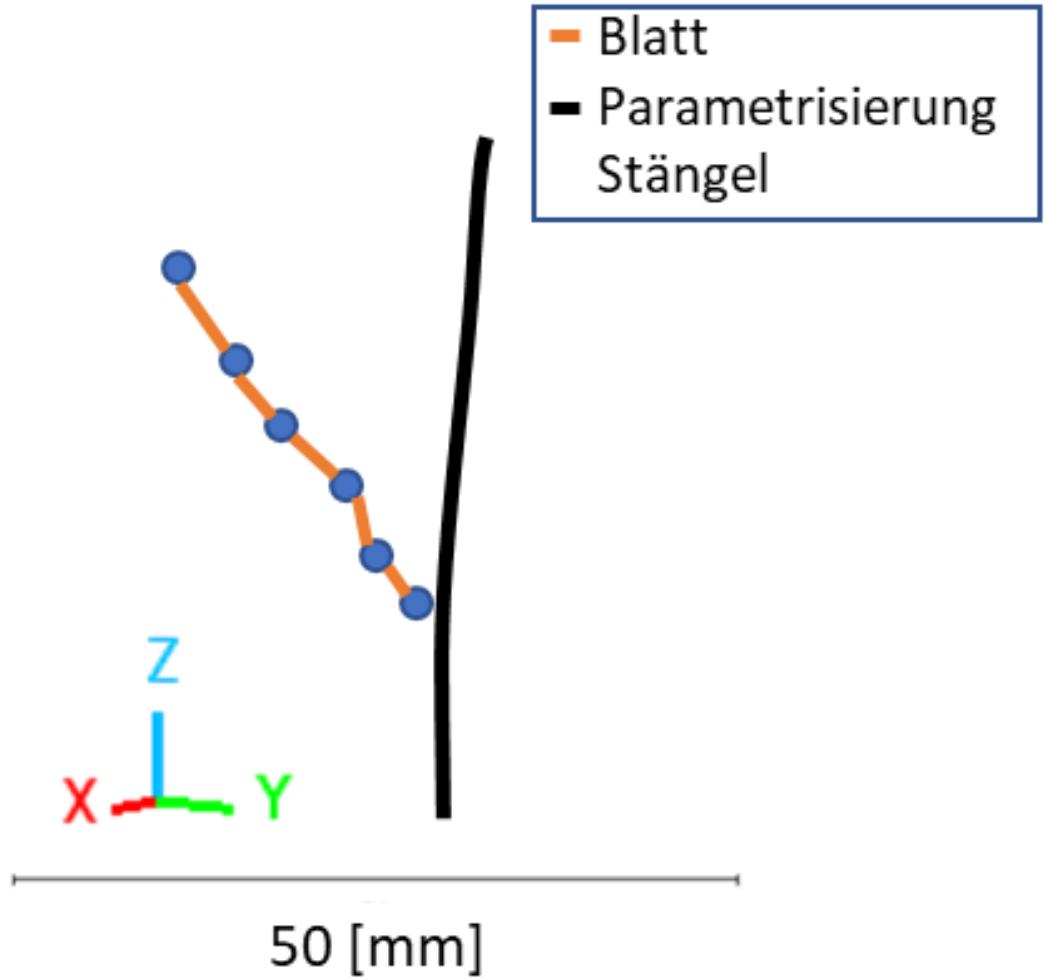
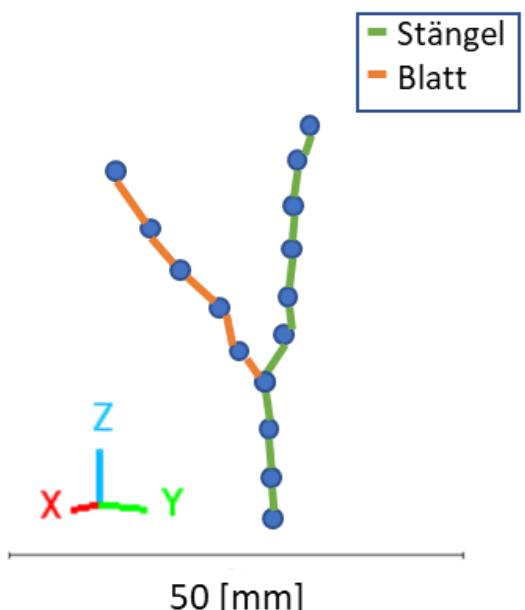
1. Parametrisierung des Stängels

→ Stückweise definierte C₁ stetige quadratische Beziér-Kurven



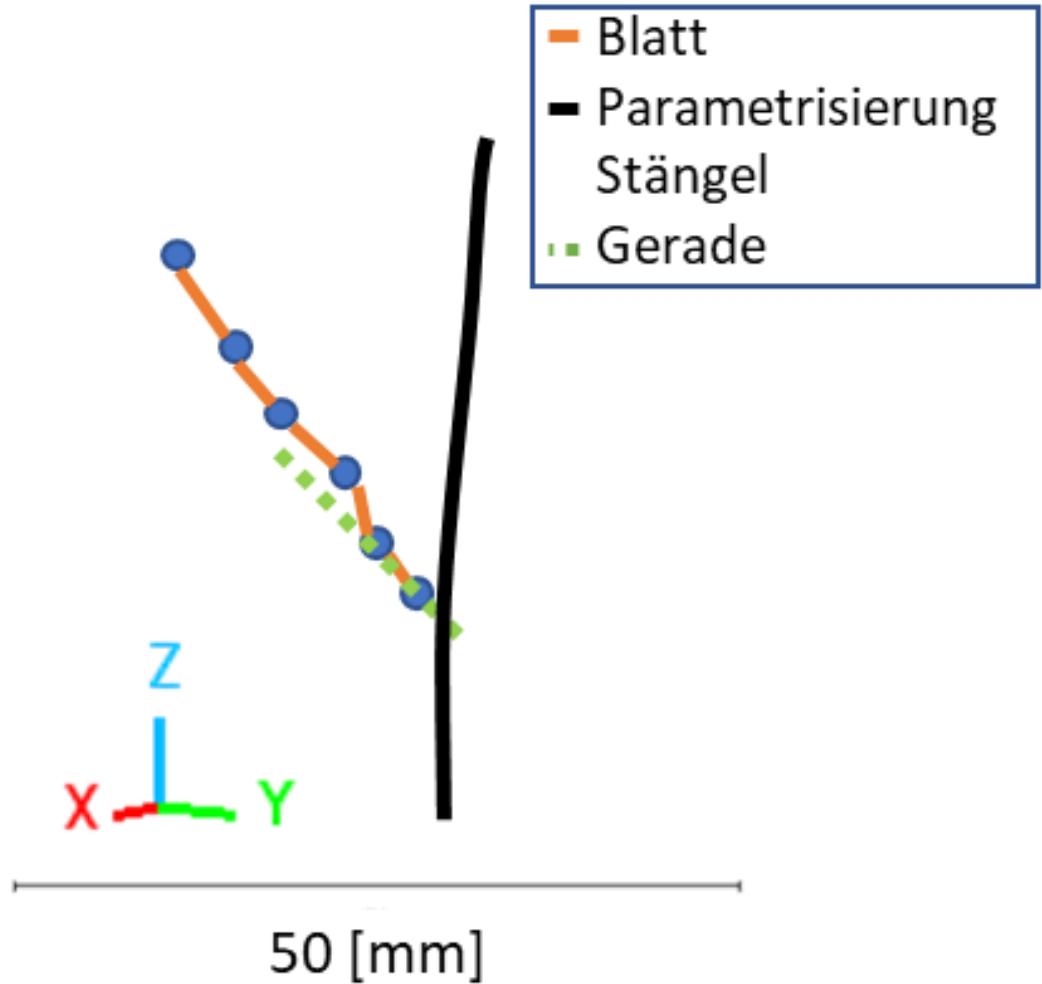
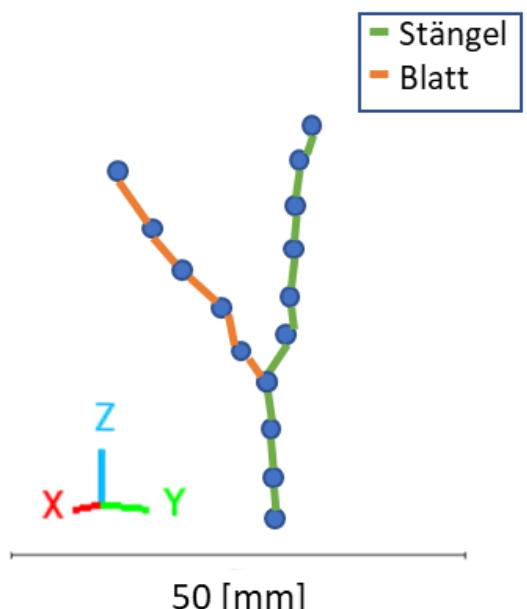
4F) Position der Knoten verbessern

1. Parametrisierung des Stängels
2. Parametrisierung der Blätter



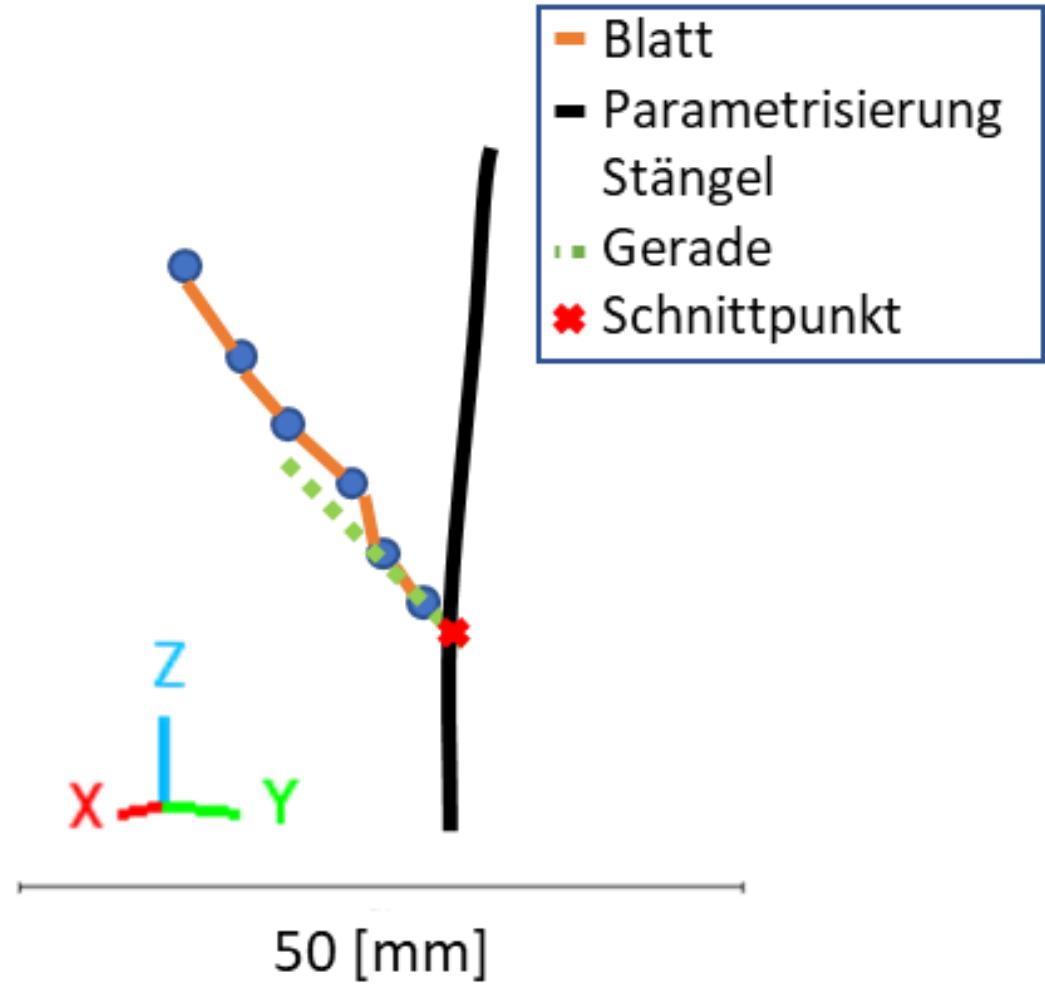
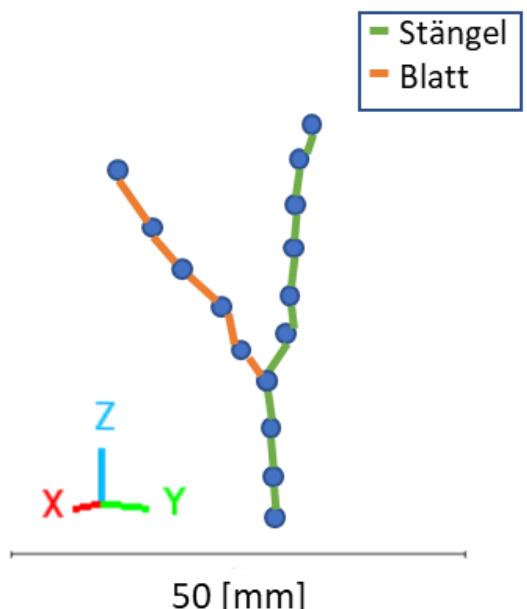
4F) Position der Knoten verbessern

1. Parametrisierung des Stängels
2. Parametrisierung der Blätter
- a) Übergang zu Stängel approximieren



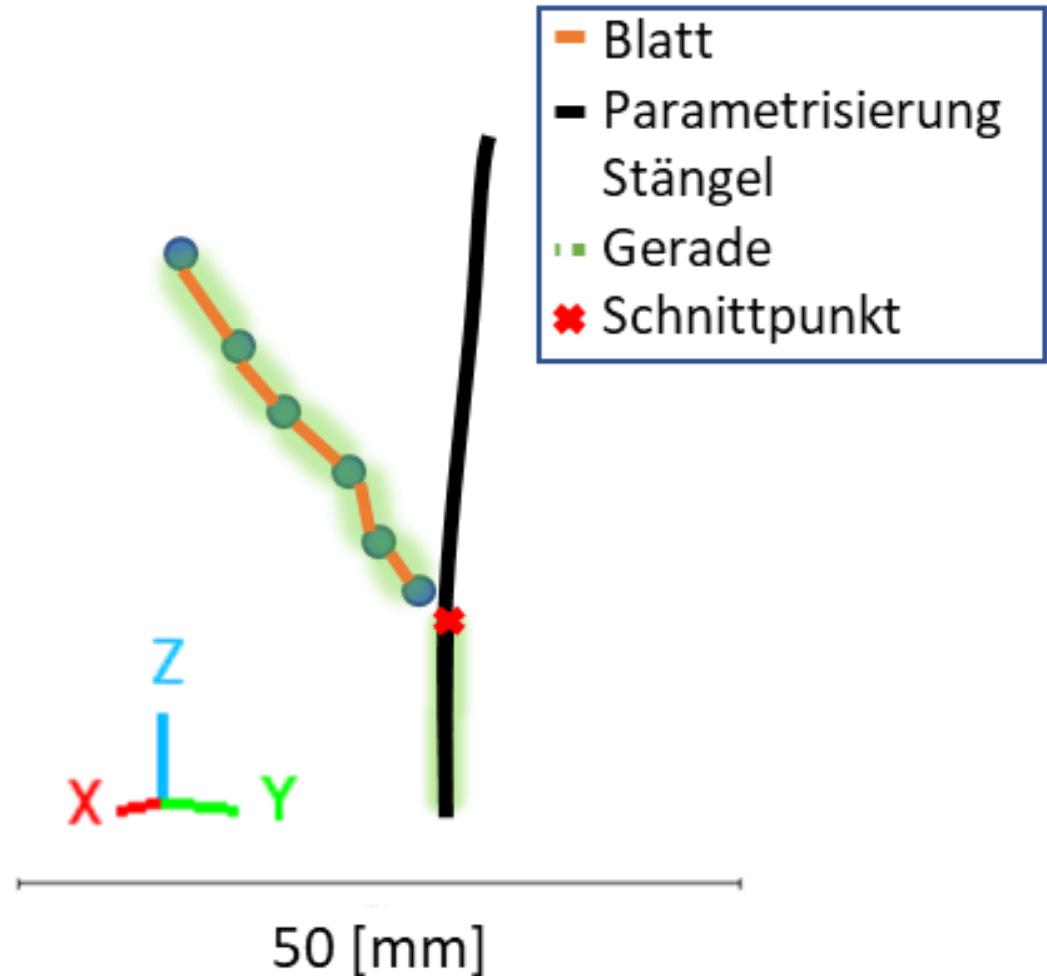
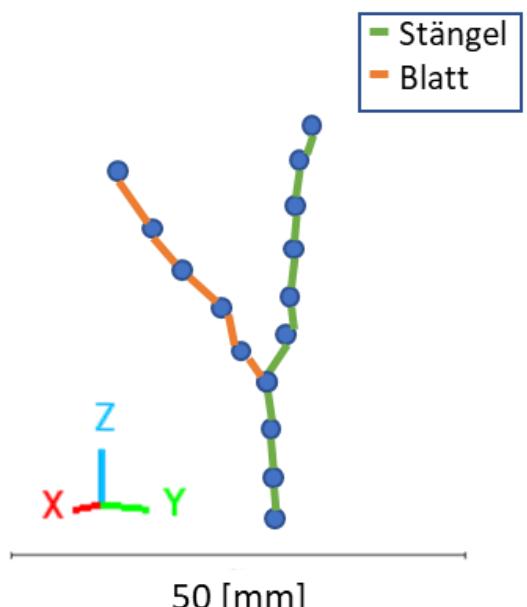
4F) Position der Knoten verbessern

1. Parametrisierung des Stängels
2. Parametrisierung der Blätter
- a) Übergang zu Stängel approximieren



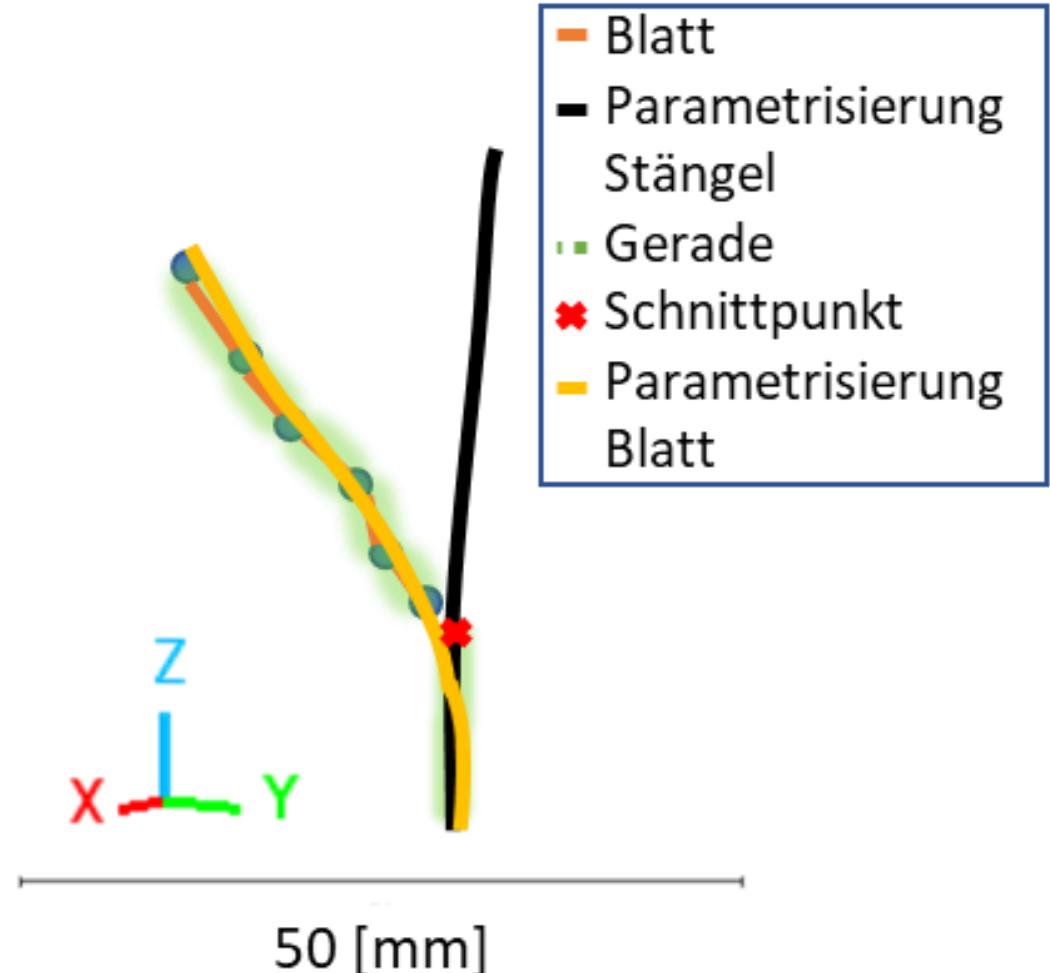
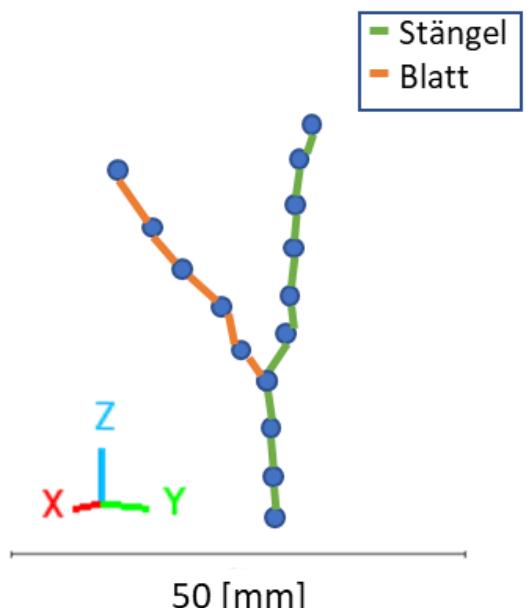
4F) Position der Knoten verbessern

1. Parametrisierung des Stängels
2. Parametrisierung der Blätter
 - a) Übergang zu Stängel approximieren
 - b) Blatt parametrisieren



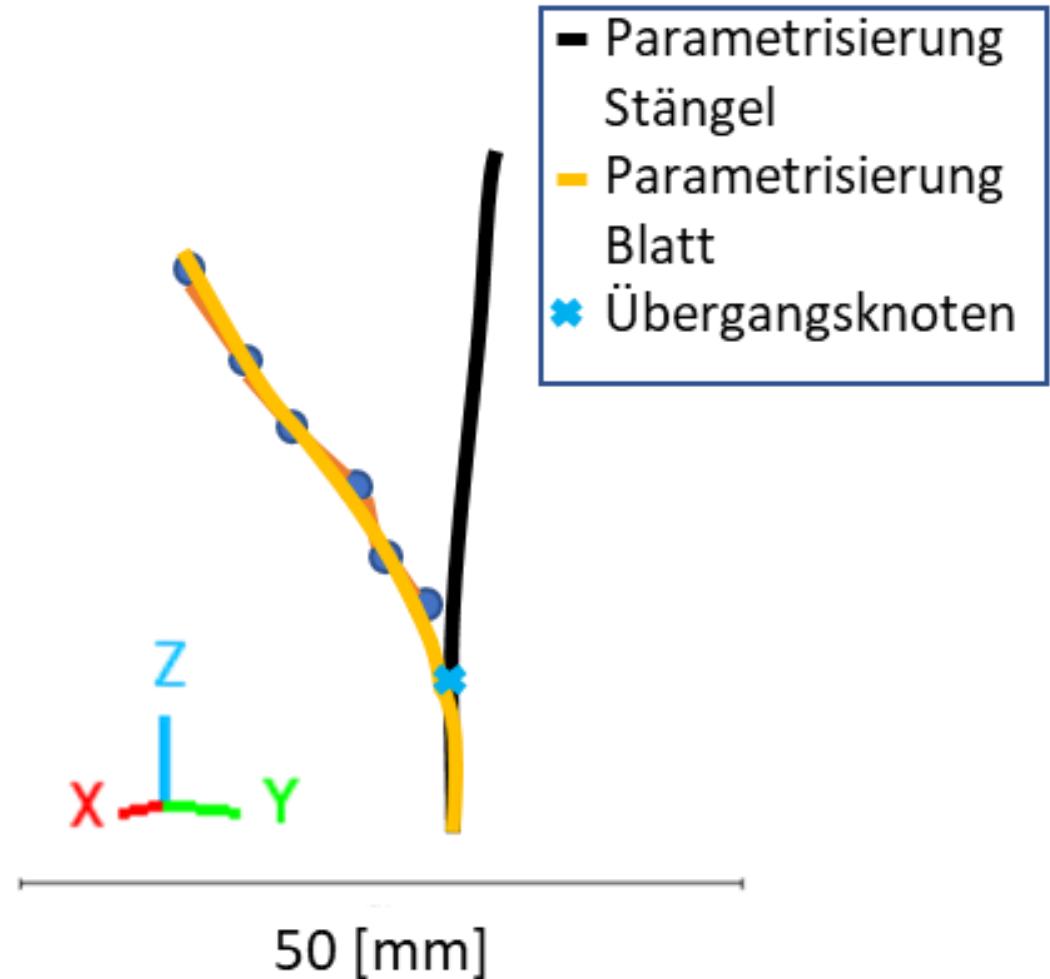
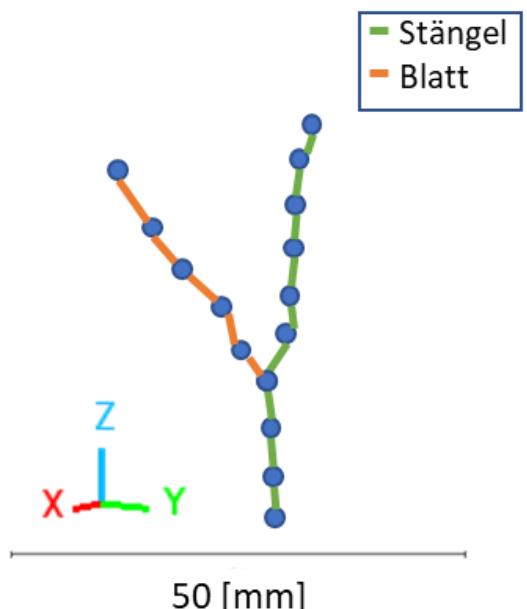
4F) Position der Knoten verbessern

1. Parametrisierung des Stängels
2. Parametrisierung der Blätter
- a) Übergang zu Stängel approximieren
- b) Blatt parametrisieren



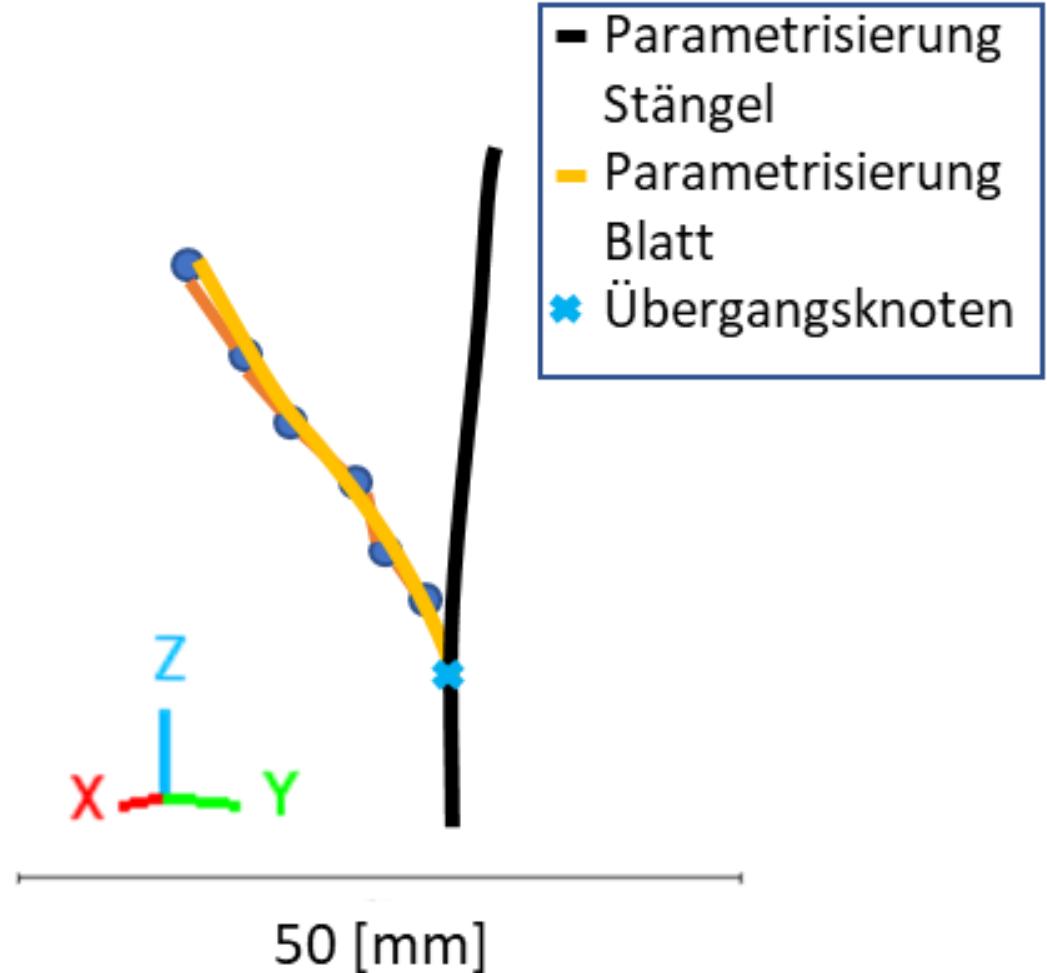
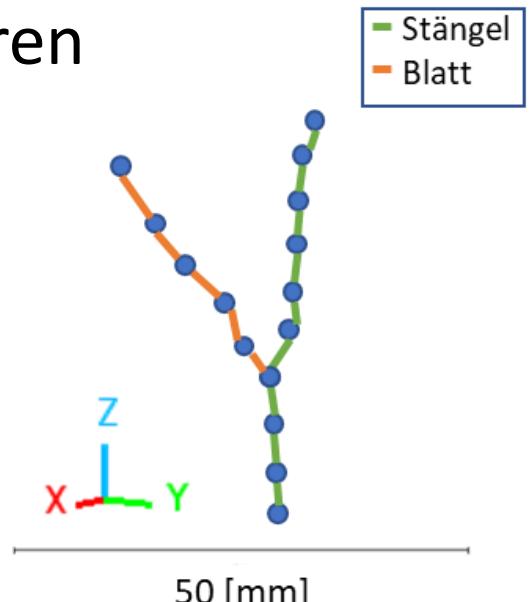
4F) Position der Knoten verbessern

1. Parametrisierung des Stängels
2. Parametrisierung der Blätter
 - a) Übergang zu Stängel approximieren
 - b) Blatt parametrisieren



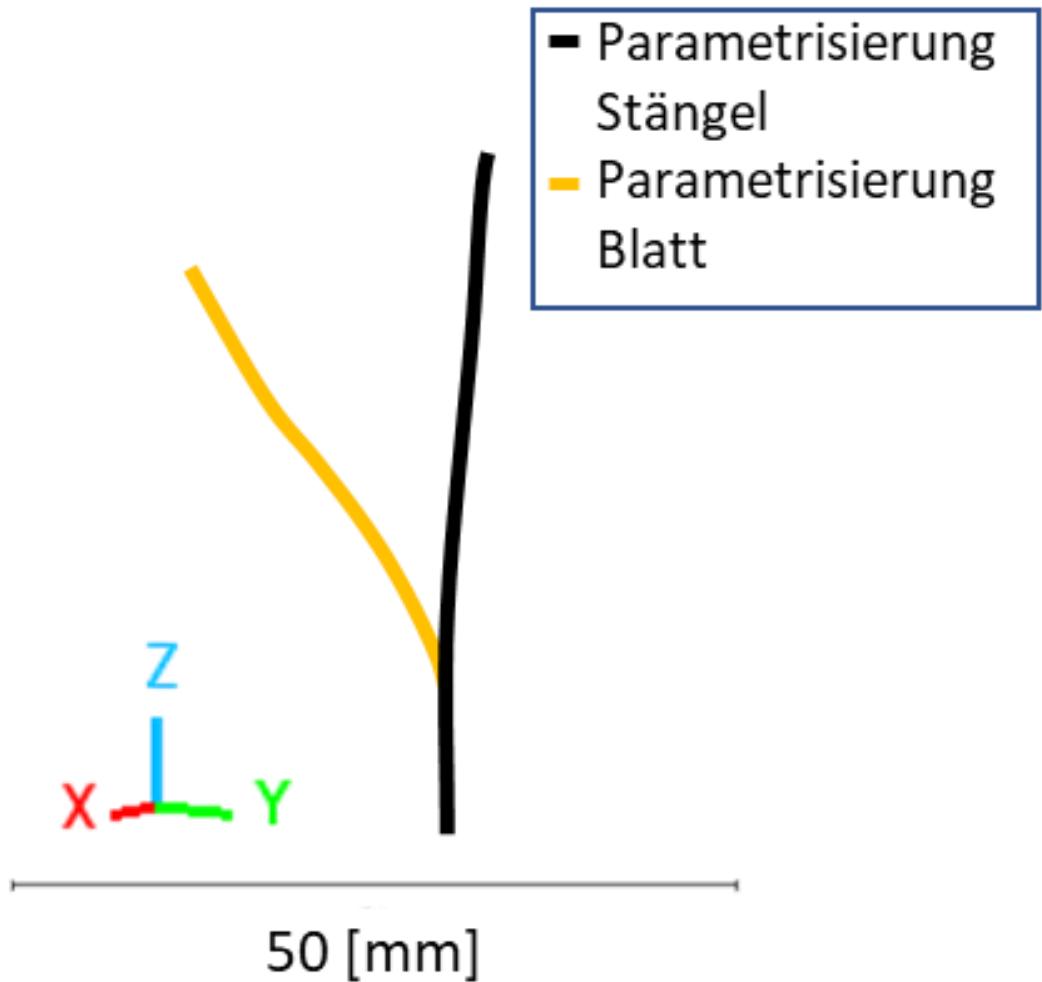
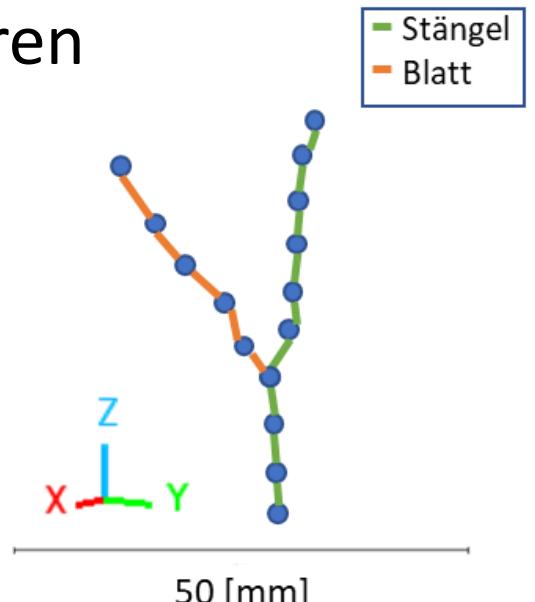
4F) Position der Knoten verbessern

1. Parametrisierung des Stängels
2. Parametrisierung der Blätter
- a) Übergang zu Stängel approximieren
- b) Blatt parametrisieren
- c) Übergang zwischen Stängel und Blatt modellieren



4F) Position der Knoten verbessern

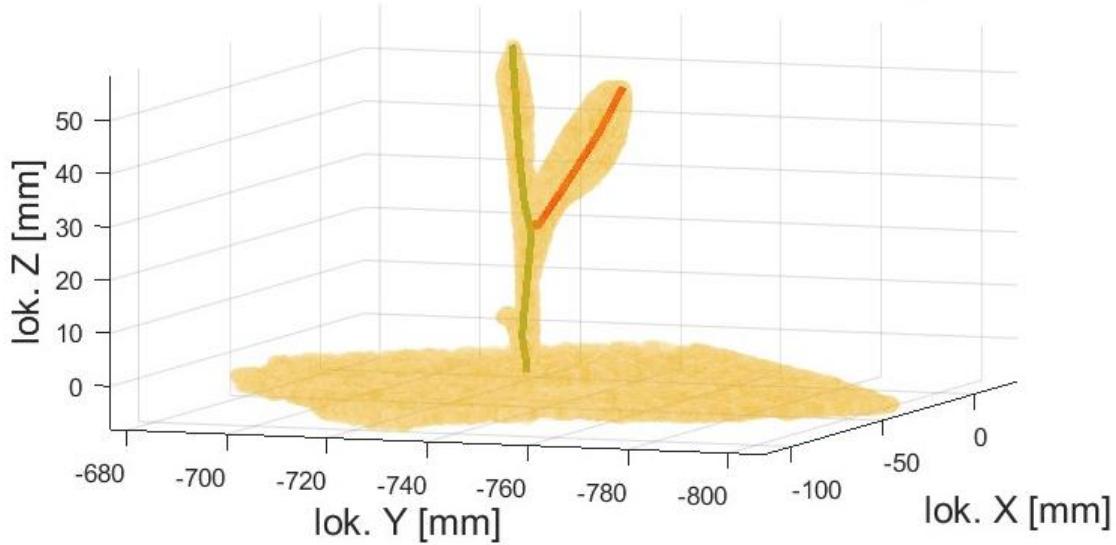
1. Parametrisierung des Stängels
2. Parametrisierung der Blätter
- a) Übergang zu Stängel approximieren
- b) Blatt parametrisieren
- c) Übergang zwischen Stängel und Blatt modellieren



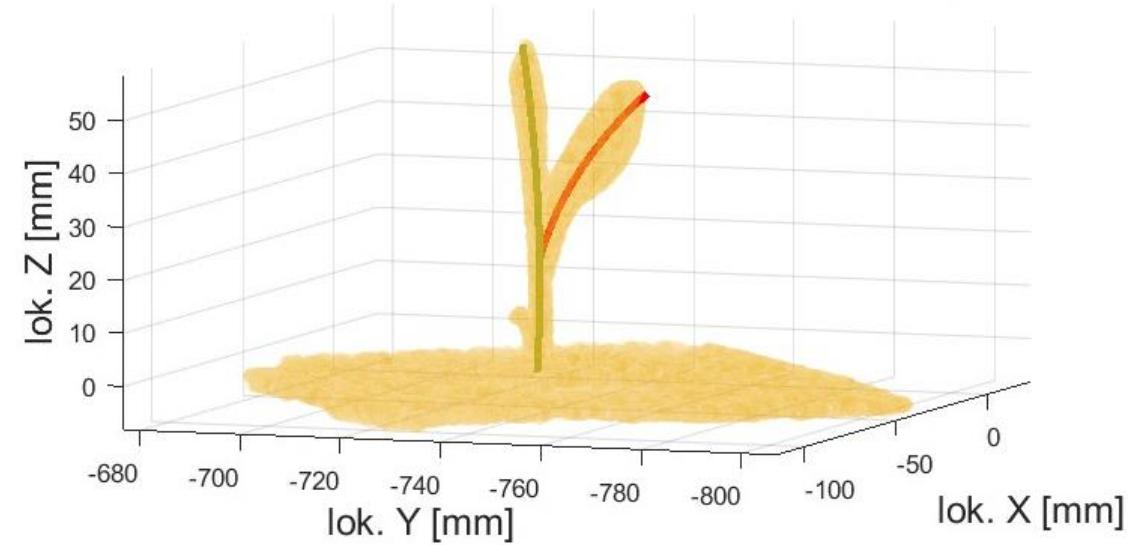
4F) Position der Skelettpunkte verbessern

- Punktwolkenbeispiel

Vor der Parametrisierung

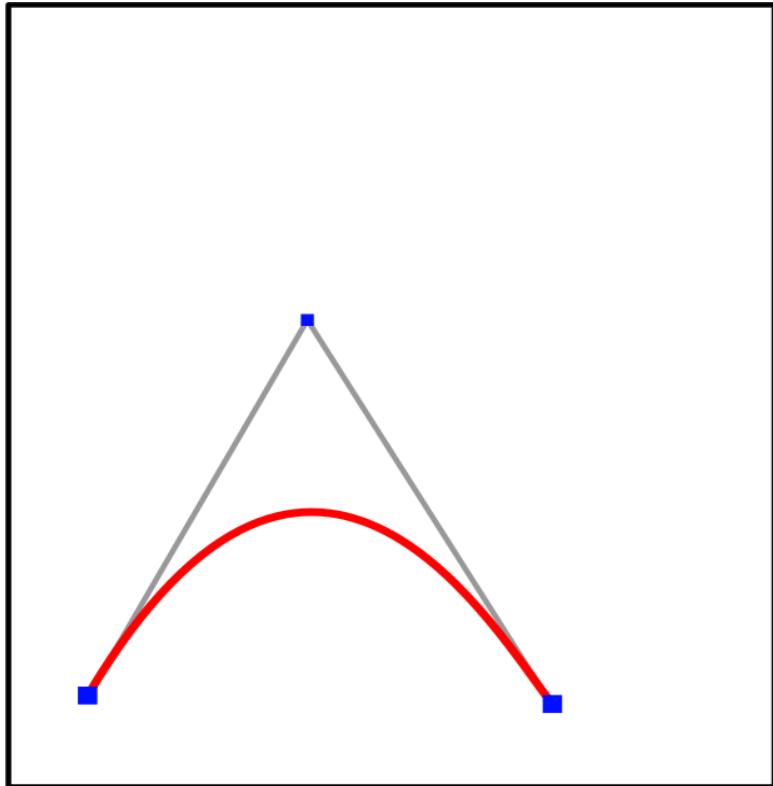


Nach der Parametrisierung



4F) Positionen der Skelettpunkte verbessern

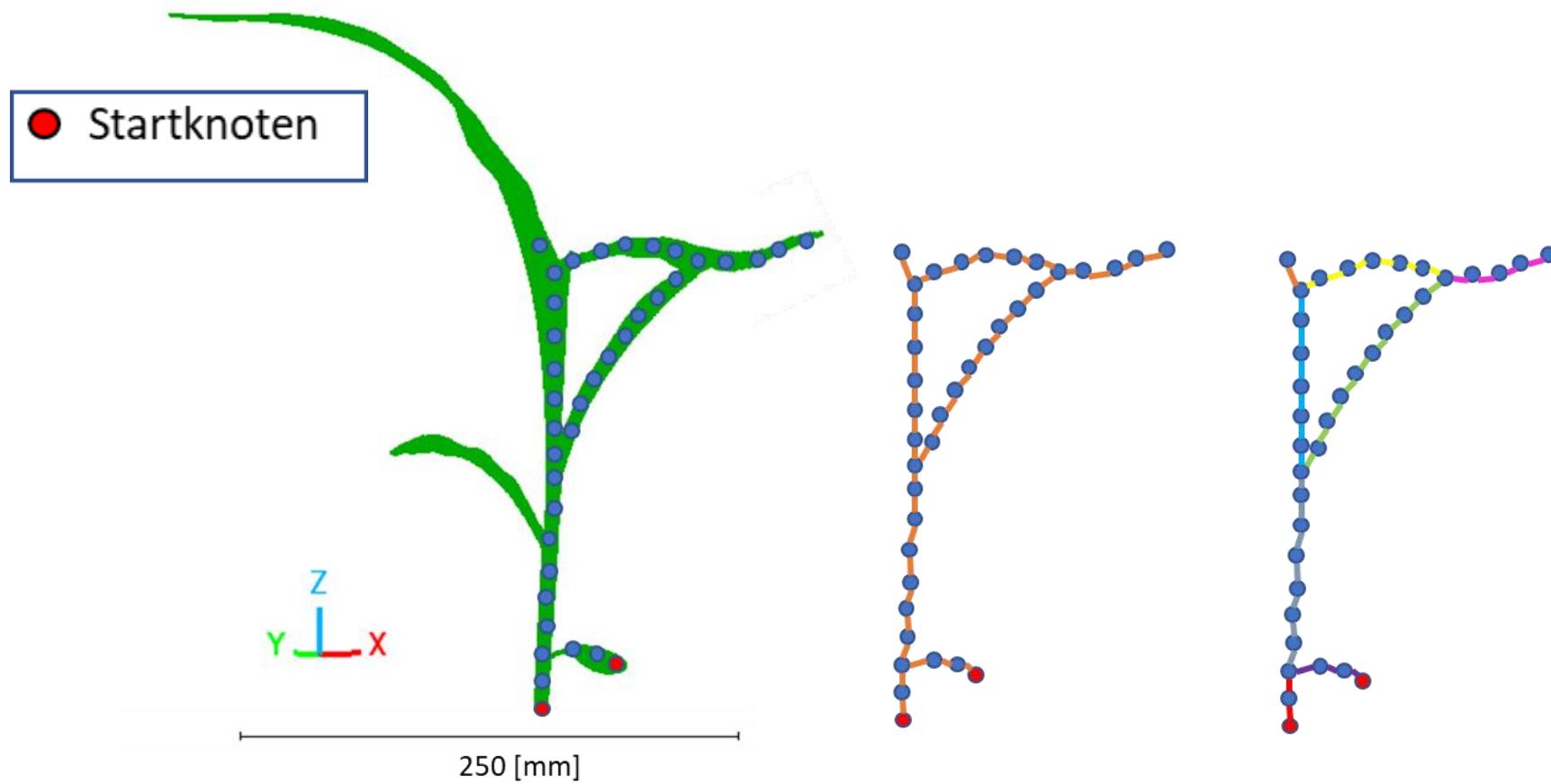
- Bezierkurven



[Von Chris828 - Eigenes Werk, Gemeinfrei,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6897694>]

4B) Überlappendende Blätter

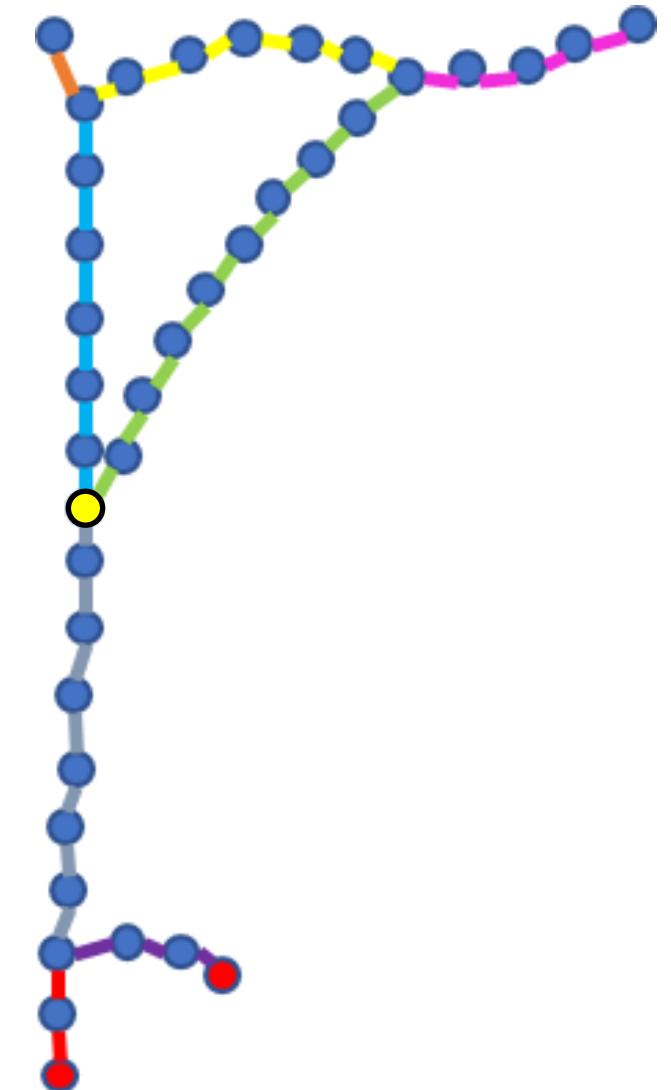
- Überlappendenden Blätter als Zyklen in Graph detektiert
- Zyklen größer als 10 Zentimeter



4B) Überlappendende Blätter

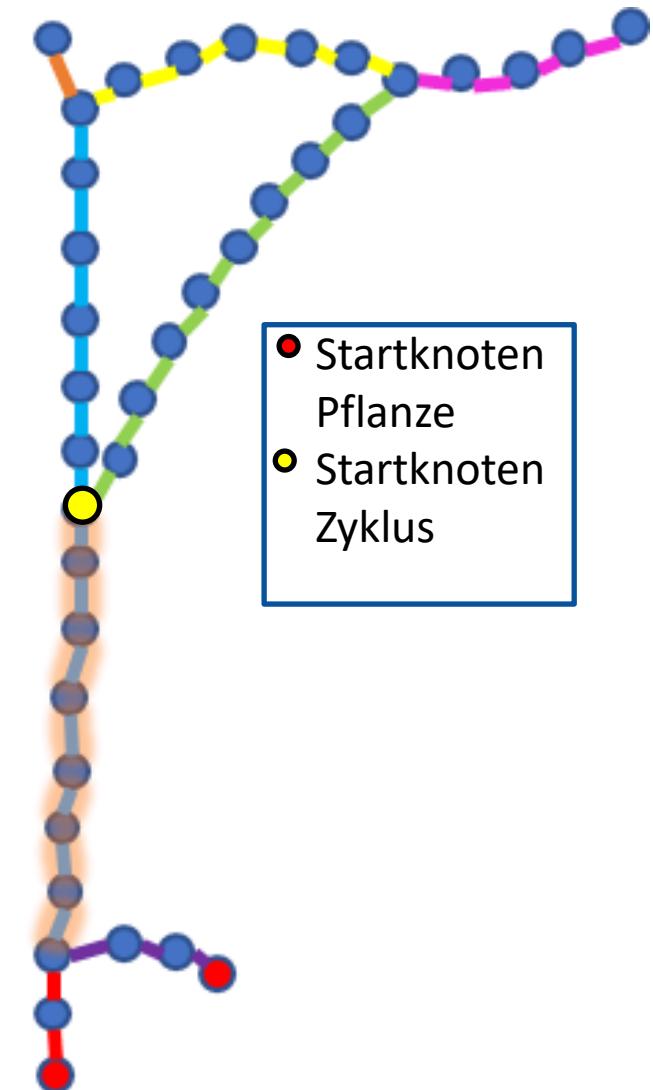
1) Startknoten des Zyklus definieren

- Startknoten Pflanze
- Startknoten Zyklus



4B) Überlappendende Blätter

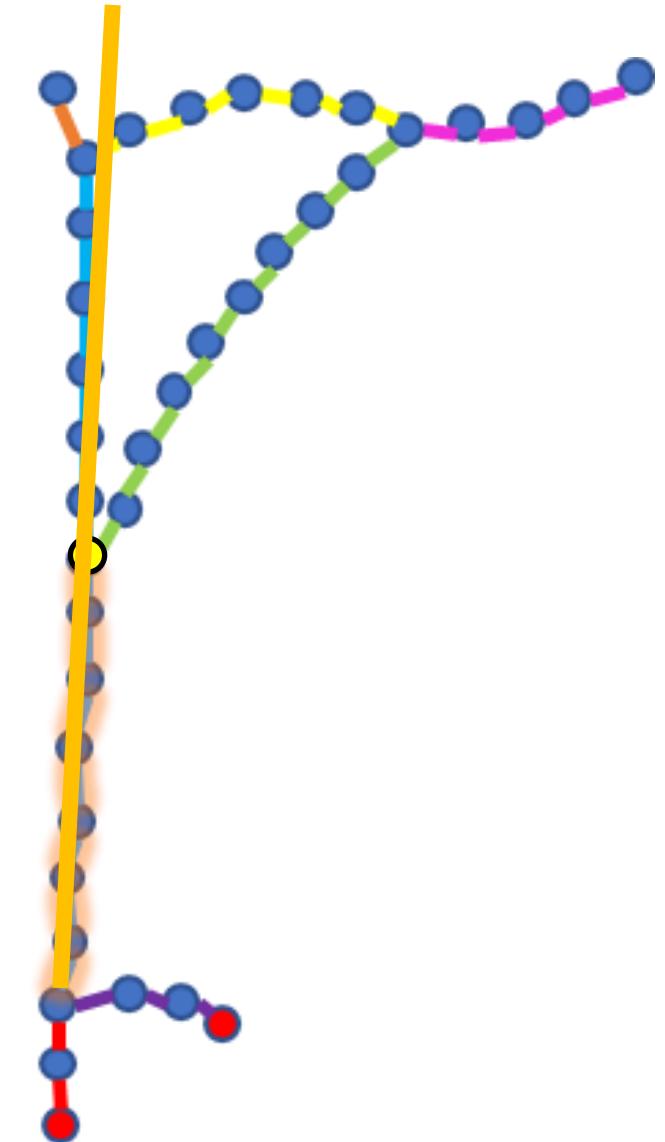
- 1) Startknoten des Zyklus definieren
- 2) Zentrale Kante definieren



4B) Überlappendende Blätter

- 1) Startknoten des Zyklus definieren
- 2) Zentrale Kante definieren

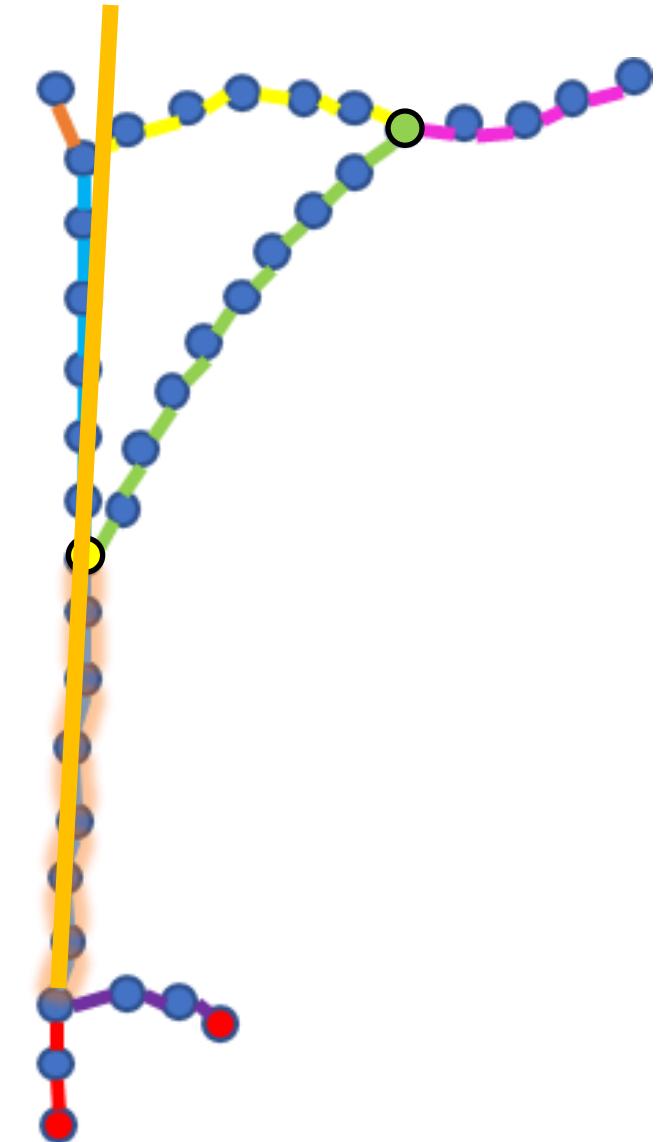
- Startknoten Pflanze
- Startknoten Zyklus
- Zentrale Kante



4B) Überlappendende Blätter

- 1) Startknoten des Zyklus definieren
- 2) Zentrale Kante definieren
- 3) Trennknoten definieren

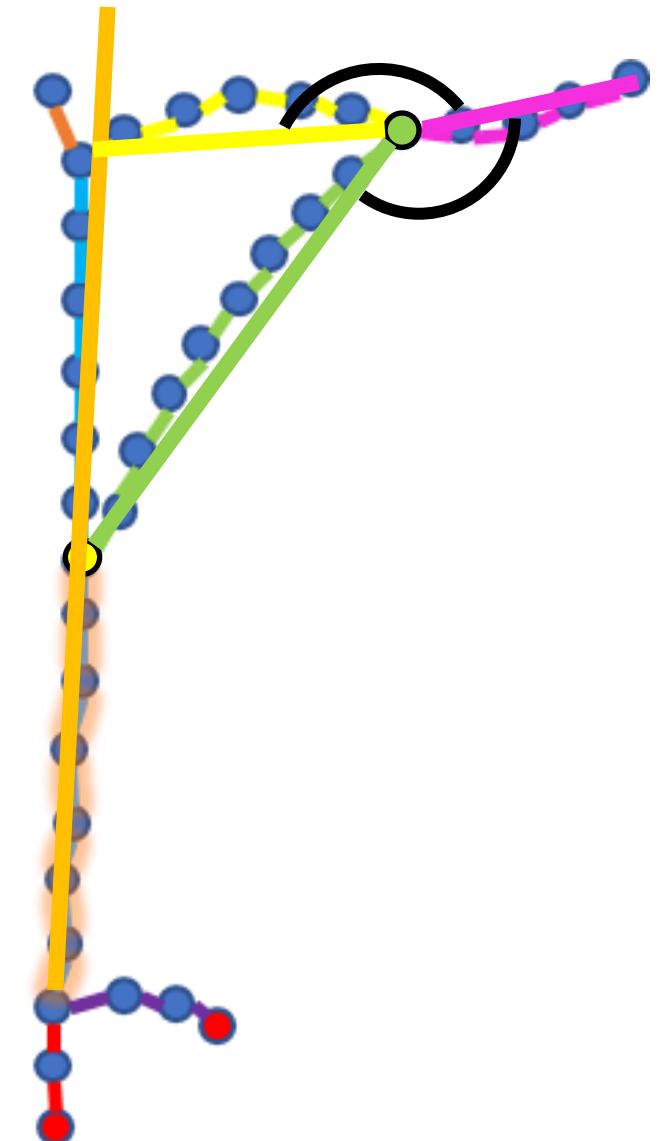
- Startknoten Pflanze
- Startknoten Zyklus
- Zentrale Kante
- Trennknoten



4B) Überlappendende Blätter

- 1) Startknoten des Zyklus definieren
- 2) Zentrale Kante definieren
- 3) Trennknoten definieren
- 4) Über Winkel anhängende Instanzen zu einem der beiden den getrennten Teilgraphen sortieren

- Startknoten Pflanze
- Startknoten Zyklus
- Zentrale Kante
- Trennknoten

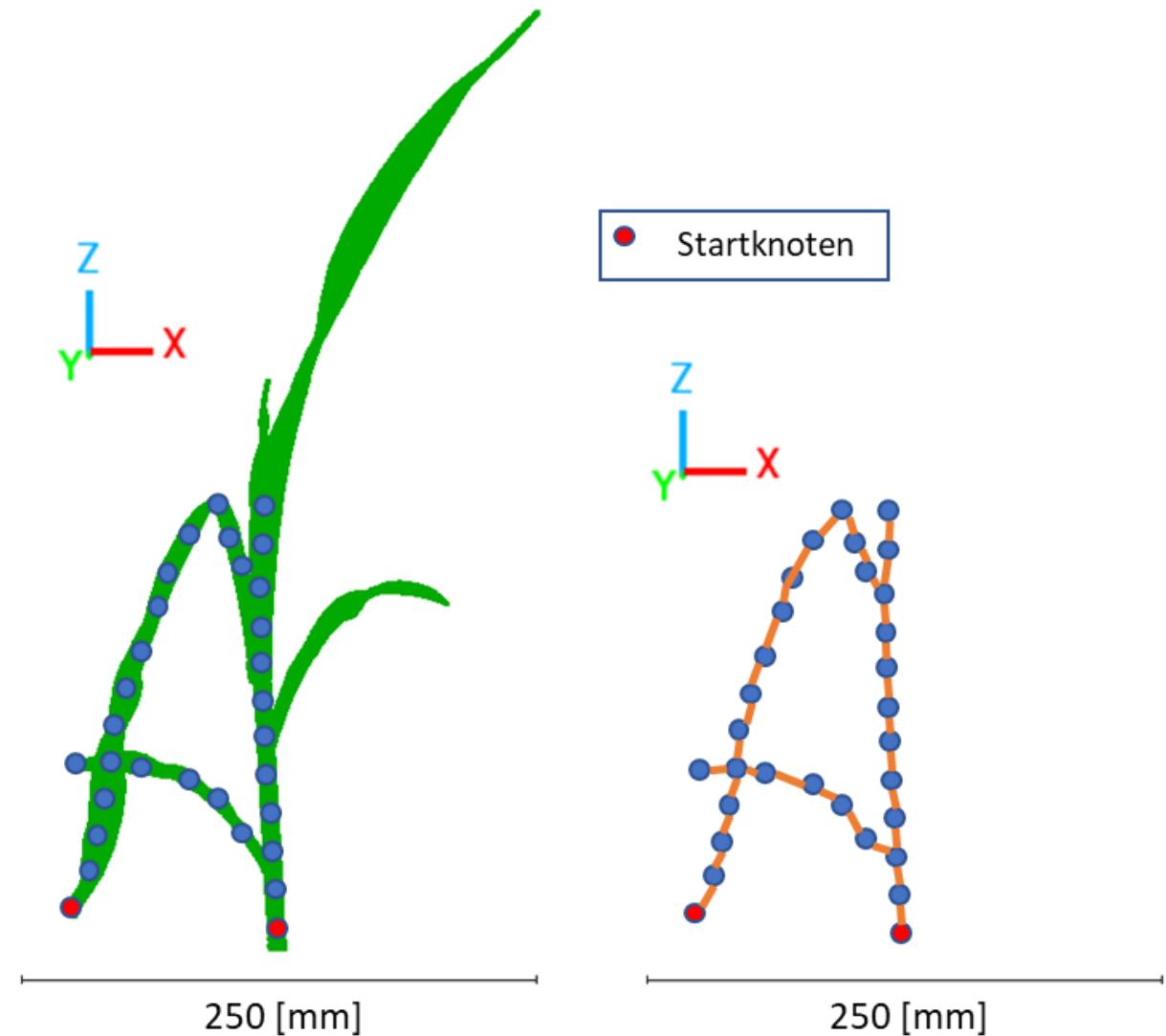


4B) Überlappendende Blätter

- Sonderfall

→ Startknoten des Graphens detektieren unterschiedliche Startknoten des Zyklus

- 1) Zentrale Kante wird über vertikale Ausrichtung definiert
- 2) Anderer Knoten entspricht dem Trennknoten
- 3) Zuordnung der anhängenden Kanten über Winkel

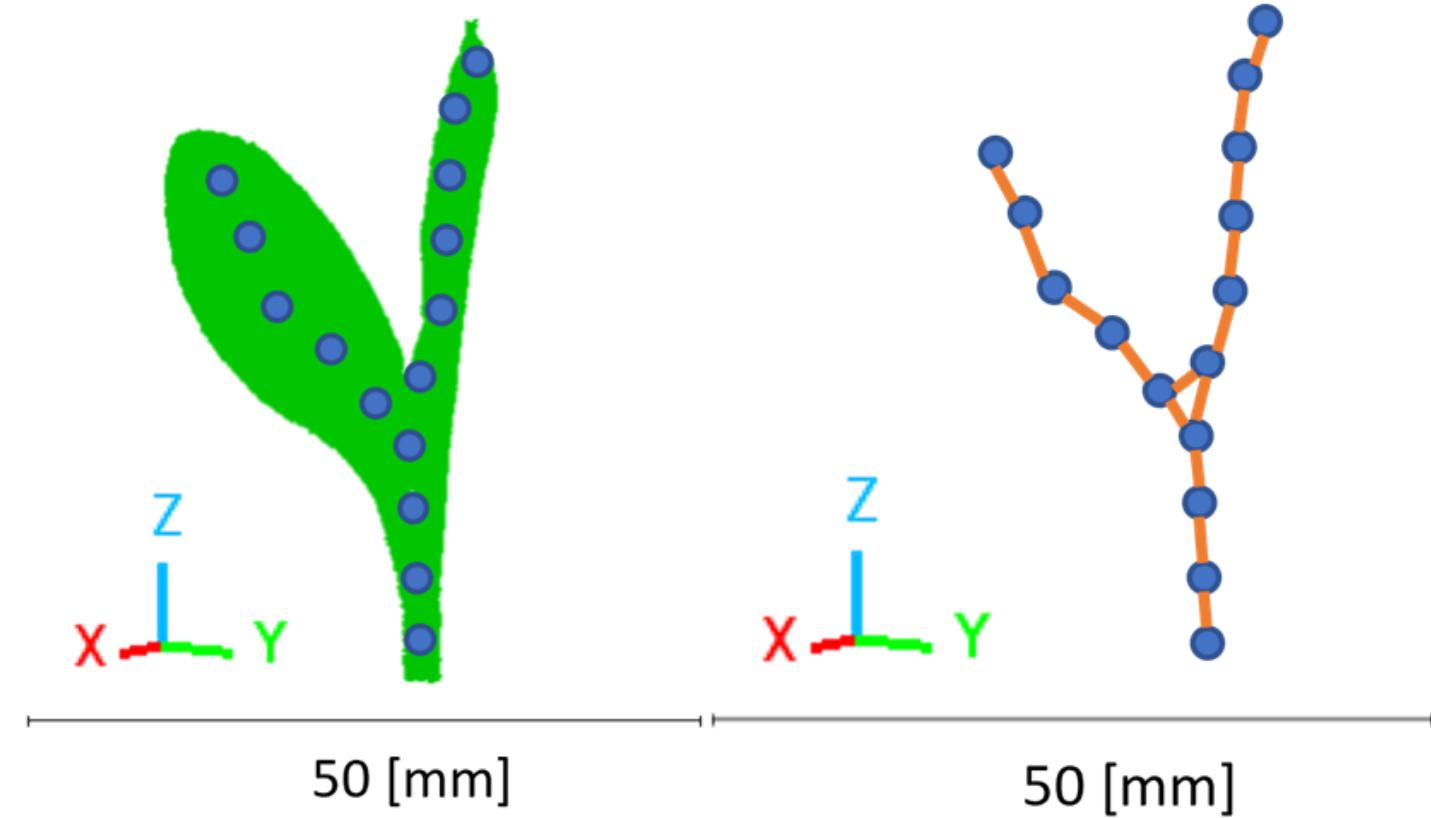


4C) Ungewollte Zyklen entfernen

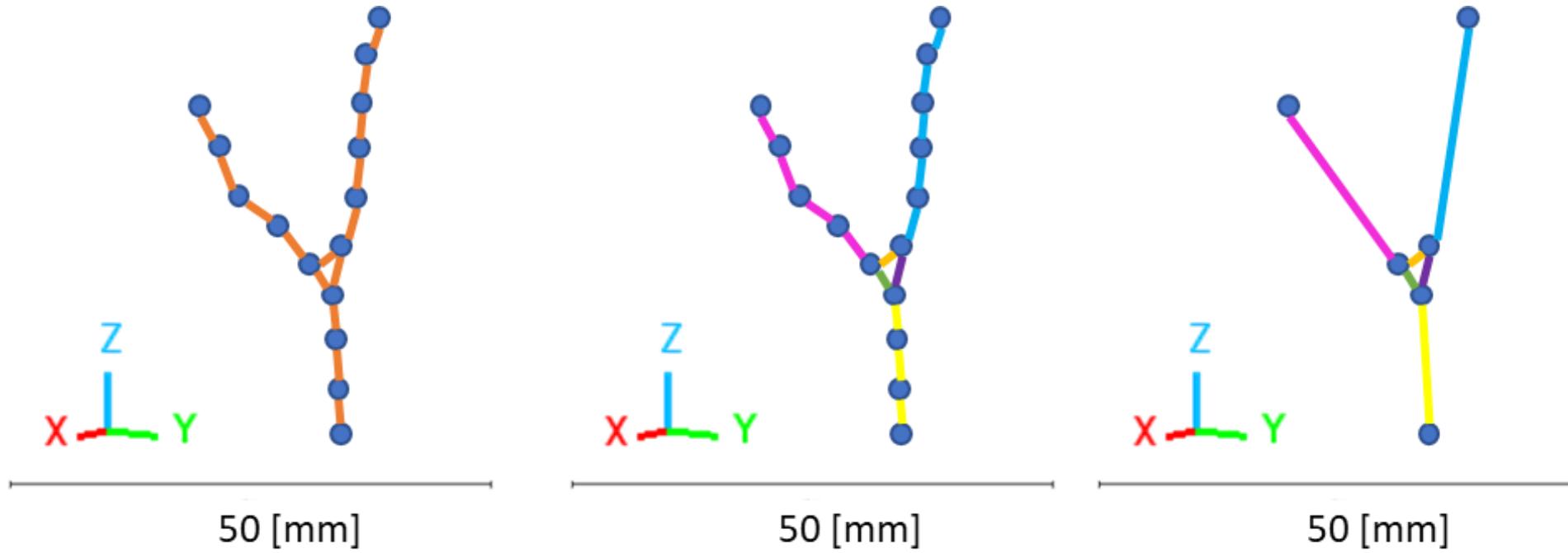
- Abwandlung vom minimalen Spannbaum
- Simulation des Wachstums der Pflanze

Vorwissen über Pflanze

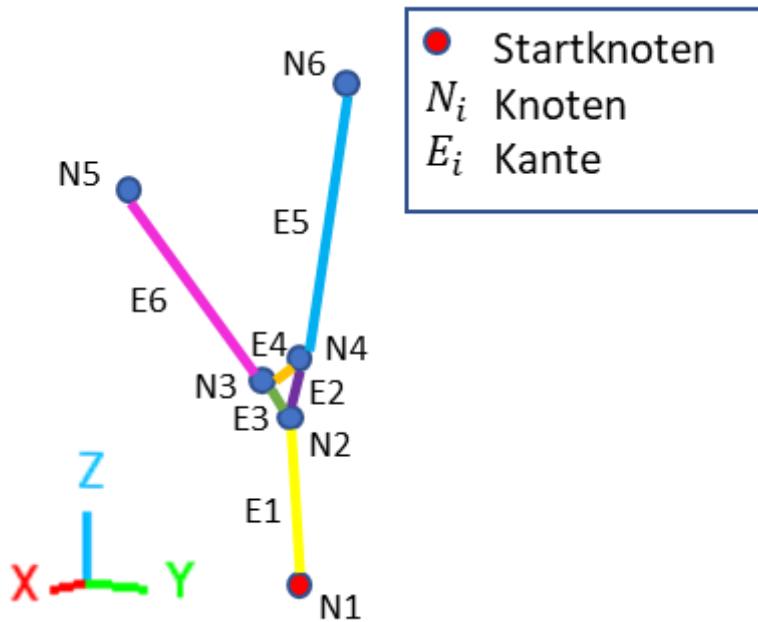
- Die Pflanze wächst nach oben
- Die Blätter wachsen am Anfang (beim Übergang des Stängels) auch nach oben



4C) Ungewollte Zyklen entfernen



4C) Ungewollte Zyklen entfernen

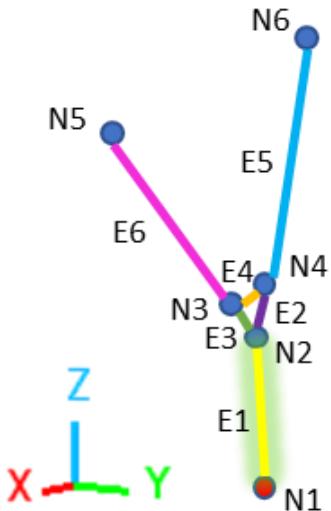


3 Fälle:

- a) Eine weitere Kante am nächsten Knoten
- b) Mehr als eine weitere Kante am nächsten Knoten
- c) Keine weitere Kante am nächsten Knoten

4C) Ungewollte Zyklen entfernen

1



Startknoten

N_i Knoten

E_i Kante

Aktuell betrachtete Kante

Entfernte Kanten

Warteschlange:

{ }

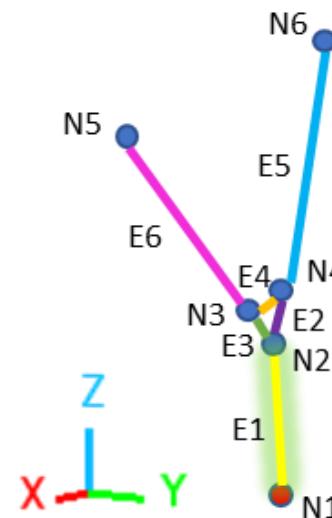
Verwendete Kanten:

{E1}

Betrachtete Knoten:

{N1,N2}

1b)



Startknoten

N_i Knoten

E_i Kante

Aktuell betrachtete Kante

Entfernte Kanten

Warteschlange:

{E3}

Verwendete Kanten:

{E1}

Betrachtete Knoten:

{N1,N2}

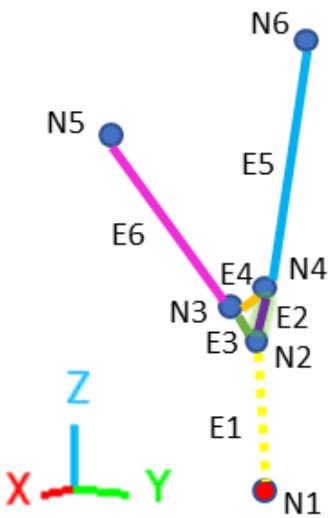
Aktuelle Kante: E_1

Angrenzende Kanten: E_2, E_3

$$\theta_{E_1E_2}, \theta_{E_1E_3}$$

4C) Ungewollte Zyklen entfernen

2



Startknoten

N_i Knoten

E_i Kante

Aktuell betrachtete Kante

Entfernte Kanten

Warteschlange:

{E3 }

Verwendete Kanten:

{E1, E2}

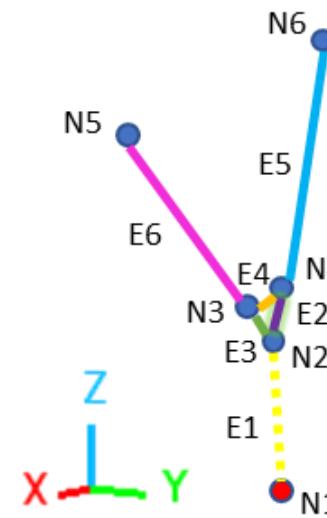
Betrachtete Knoten:

{N1, N2, N4}

Aktuelle Kante: E_2

Angrenzende Kanten: E_4, E_5

2b)



Startknoten

N_i Knoten

E_i Kante

Aktuell betrachtete Kante

Entfernte Kanten

Warteschlange:

{E3, E4}

Verwendete Kanten:

{E1, E2}

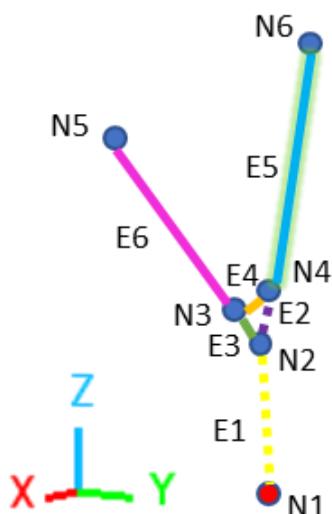
Betrachtete Knoten:

{N1, N2, N4}

$$\theta_{E_2E_4}, \theta_{E_2E_5}$$

4C) Ungewollte Zyklen entfernen

3



Startknoten

N_i Knoten

E_i Kante

— Aktuell betrachtete Kante

--- Entfernte Kanten

Warteschlange:
 $\{E3, E4\}$

Verwendete Kanten:
 $\{E1, E2, E5\}$

Betrachtete Knoten:
 $\{N1, N2, N4, N6\}$

3c)

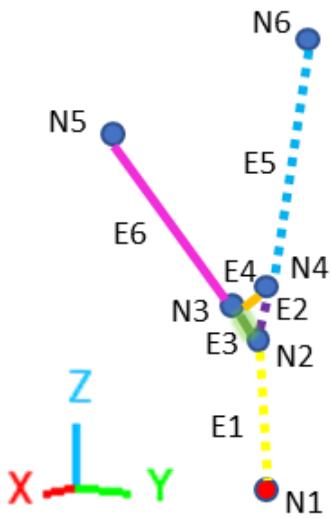
Warteschlange:
 $\{E3, E4\}$

Betrachtete Knoten:
 $\{N1, N2, N4\}$

- Entferne alle Kanten in der Warteschlange, von der schon beide Endknoten betrachtet wurden
- Neue aktuelle Kante: Kante mit minimaler z-Koordinate

4C) Ungewollte Zyklen entfernen

4



Aktuelle Kante: E_3
Angrenzende Kanten: E_4, E_6

Startknoten

N_i Knoten

E_i Kante

Aktuell betrachtete Kante

Entfernte Kanten

Warteschlange:

{E4}

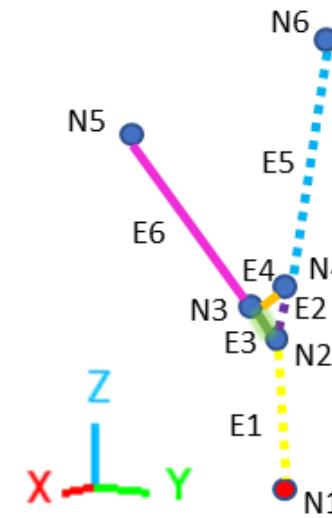
Verwendete Kanten:

{E1, E2, E5, E3}

Betrachtete Knoten:

{N1, N2, N4, N6, N3}

4b)



$\theta_{E_3E_6}, \theta_{E_3E_4}$

Startknoten

N_i Knoten

E_i Kante

Aktuell betrachtete Kante

Entfernte Kanten

Warteschlange:

{E4}

Verwendete Kanten:

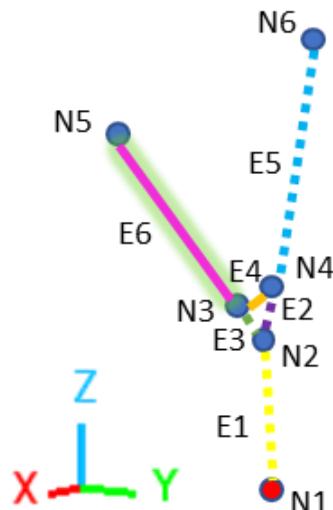
{E1, E2, E5, E3}

Betrachtete Knoten:

{N1, N2, N4, N6, N3}

4C) Ungewollte Zyklen entfernen

5



Aktuelle Kante: E_6
Angrenzende Kanten: -

Startknoten

N_i Knoten

E_i Kante

— Aktuell betrachtete Kante

-- Entfernte Kanten

Warteschlange:

{ E_4 }

Verwendete Kanten:

{ E_1, E_2, E_5, E_3, E_6 }

Betrachtete Knoten:

{ $N_1, N_2, N_4, N_6, N_3, N_5$ }

5c)

Warteschlange:

{}

Betrachtete Knoten:

{ $N_1, N_2, N_4, N_6, N_3, N_5$ }

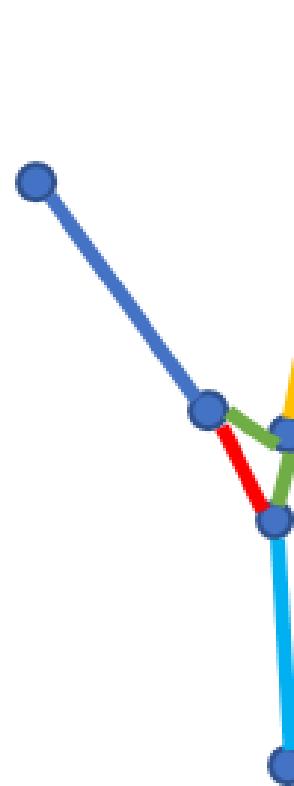
- Entferne alle Kanten in der Warteschlange, von der schon beide Endknoten betrachtet wurden
- Neue aktuelle Kante: Kante mit minimaler z-Koordinate

4C) Ungewollte Zyklen entfernen

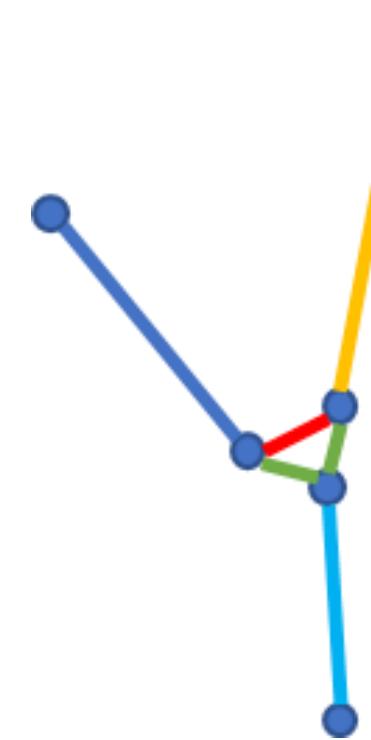
Ergebnis des klassischen minimalen Spannbaumalgorithmus



Graphbeispiel 1



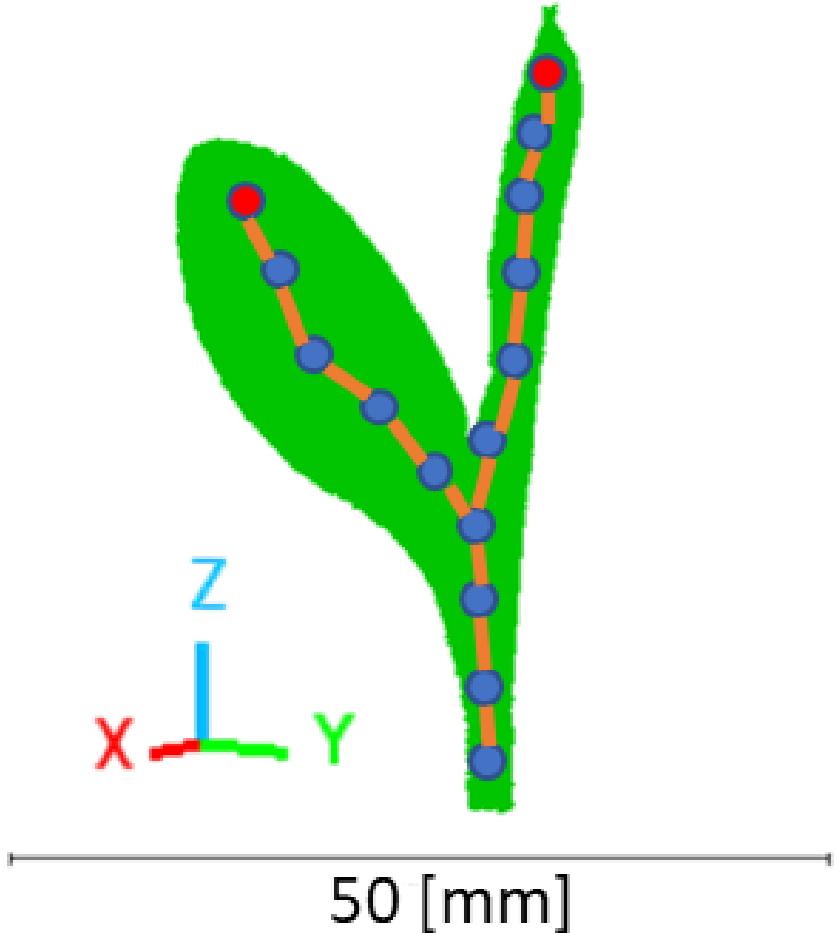
Graphbeispiel 2



Graphbeispiel 3

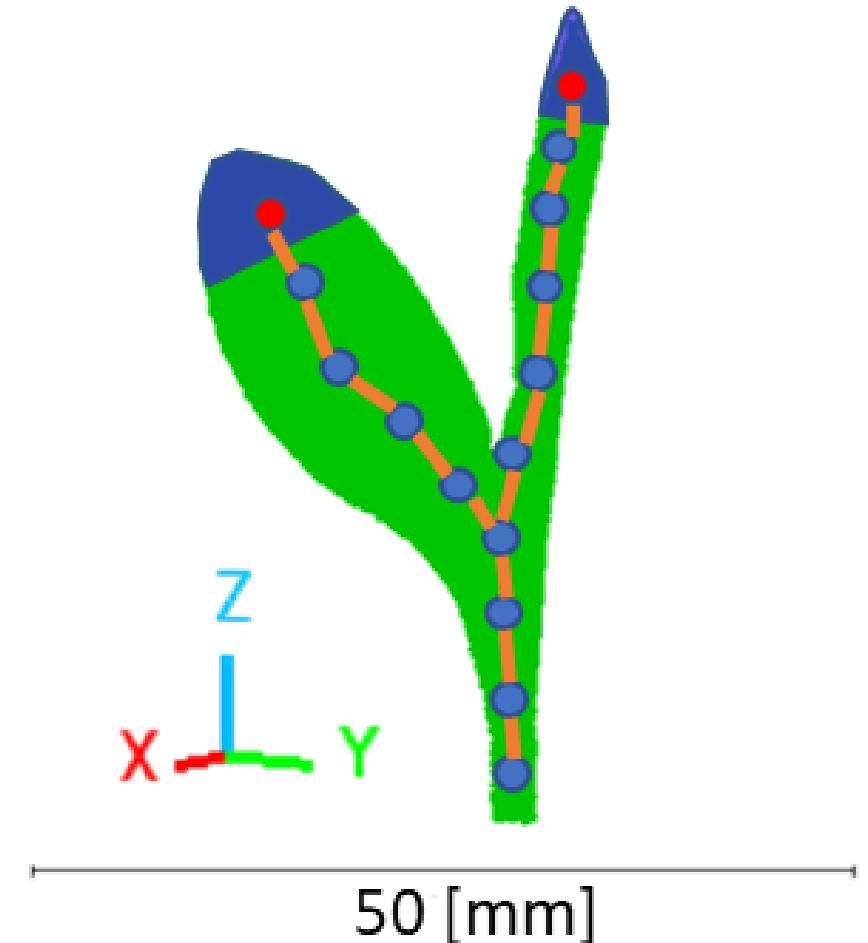
4E) Endpunkte der Skelettierung verbessern

- 1) Abstand von jedem Punkt der Punktwolke zur Skelettierung berechnen



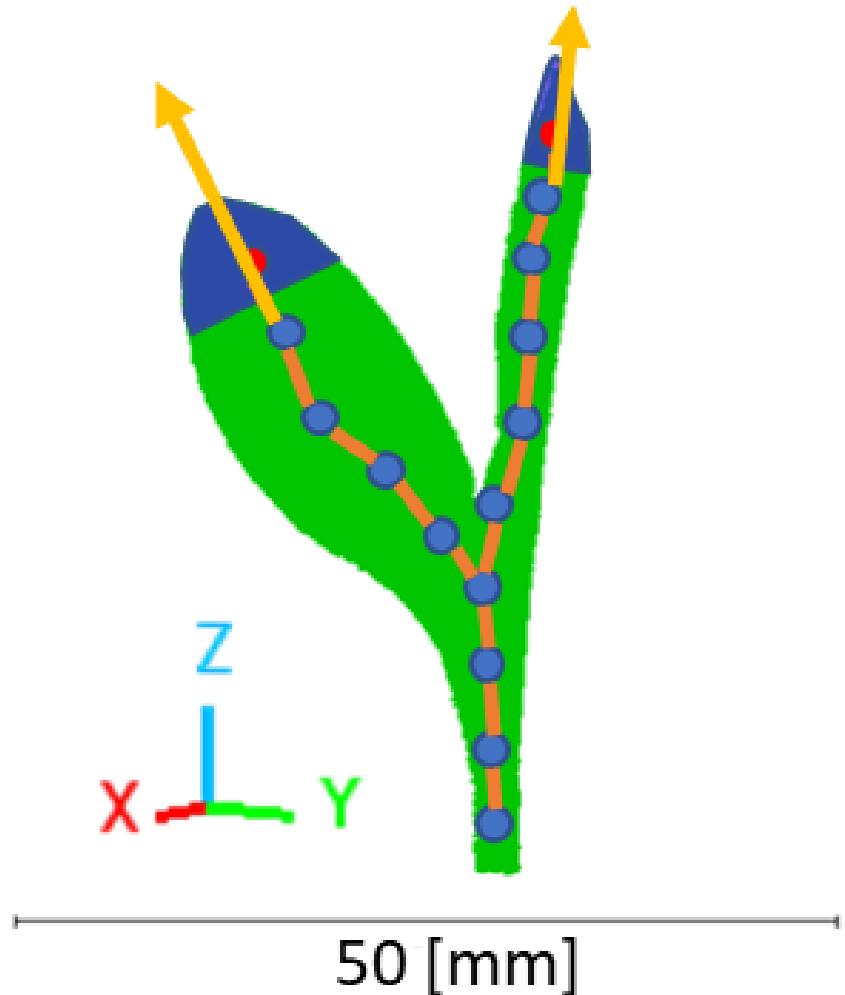
4E) Endpunkte der Skelettierung verbessern

- 1) Abstand von jedem Punkt der Punktwolke zur Skelettierung berechnen
- 2) Punkte, die zu den Endpunkten gehören detektieren



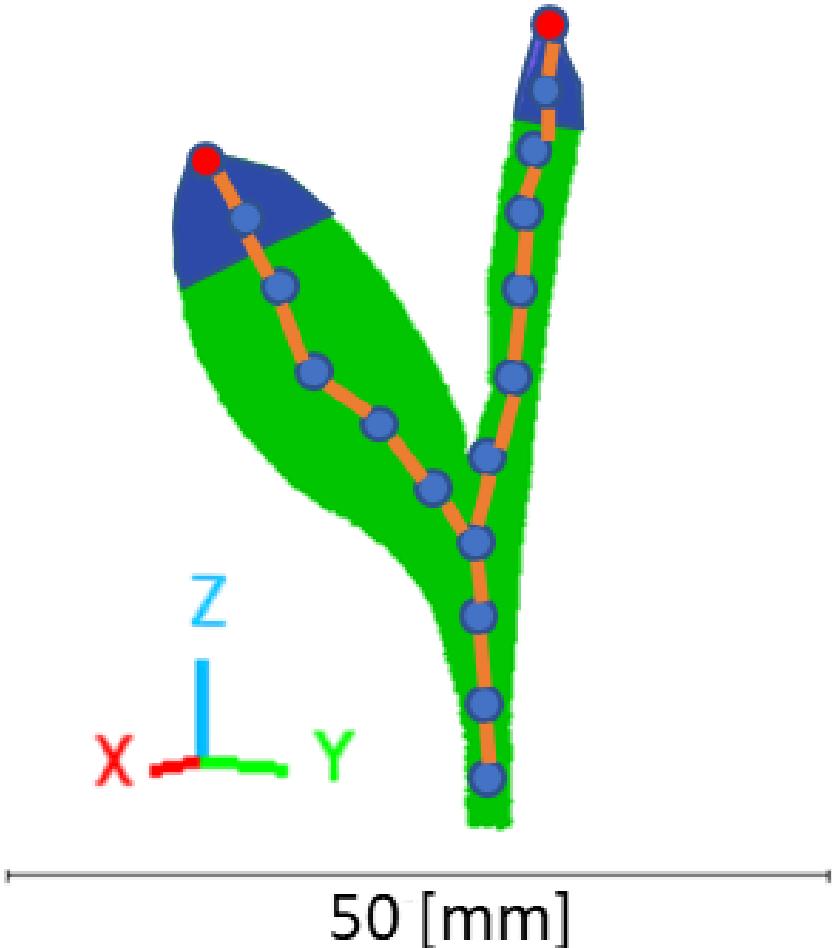
4E) Endpunkte der Skelettierung verbessern

- 1) Abstand von jedem Punkt der Punktwolke zur Skelettierung berechnen
- 2) Punkte, die zu den Endpunkten gehören detektieren
- 3) Wachstumsrichtung ermitteln

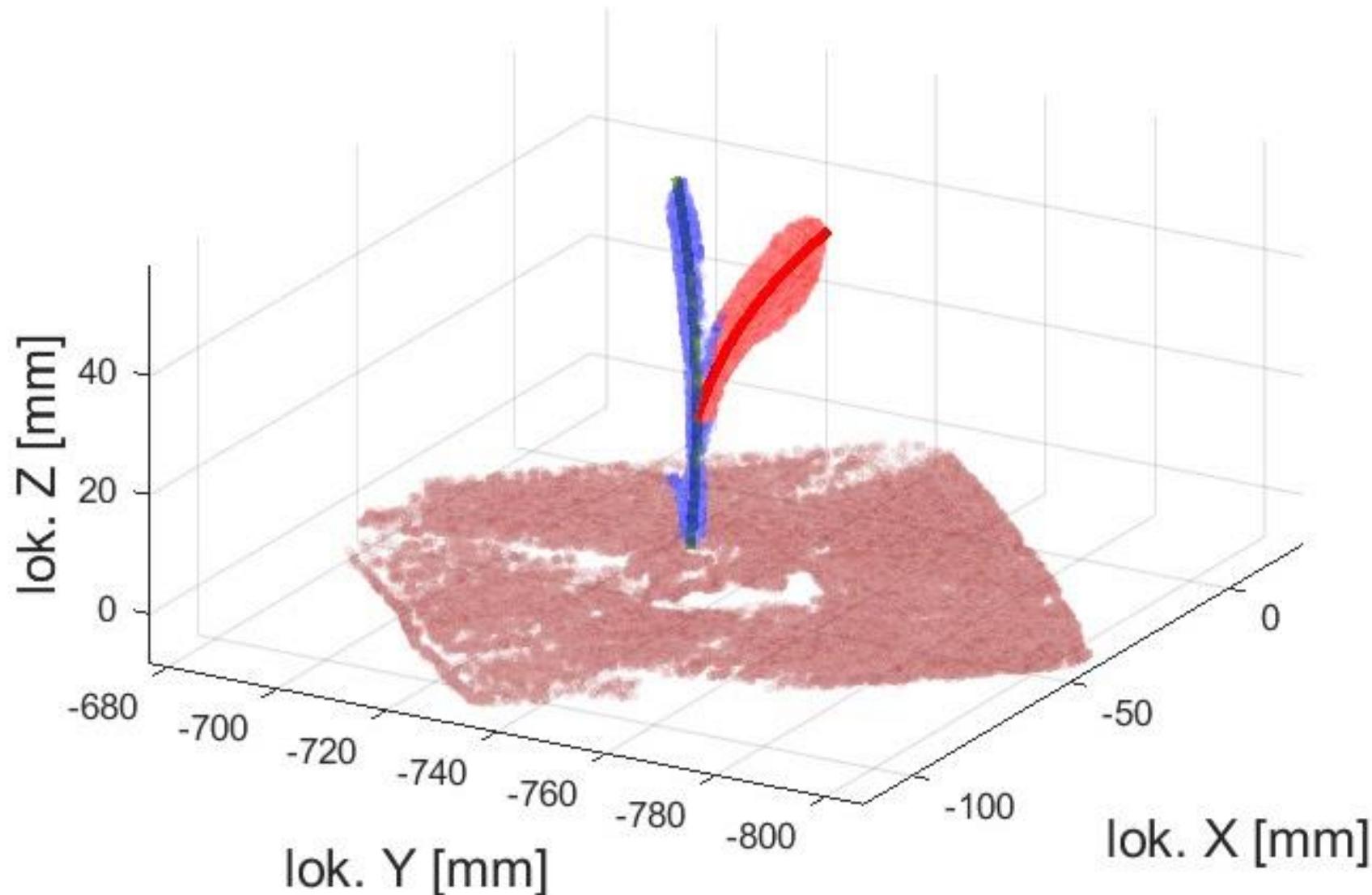


4E) Endpunkte der Skelettierung verbessern

- 1) Abstand von jedem Punkt der Punktwolke zur Skelettierung berechnen
- 2) Punkte, die zu den Endpunkten gehören detektieren
- 3) Wachstumsrichtung ermitteln
- 4) Neue Endknoten definieren

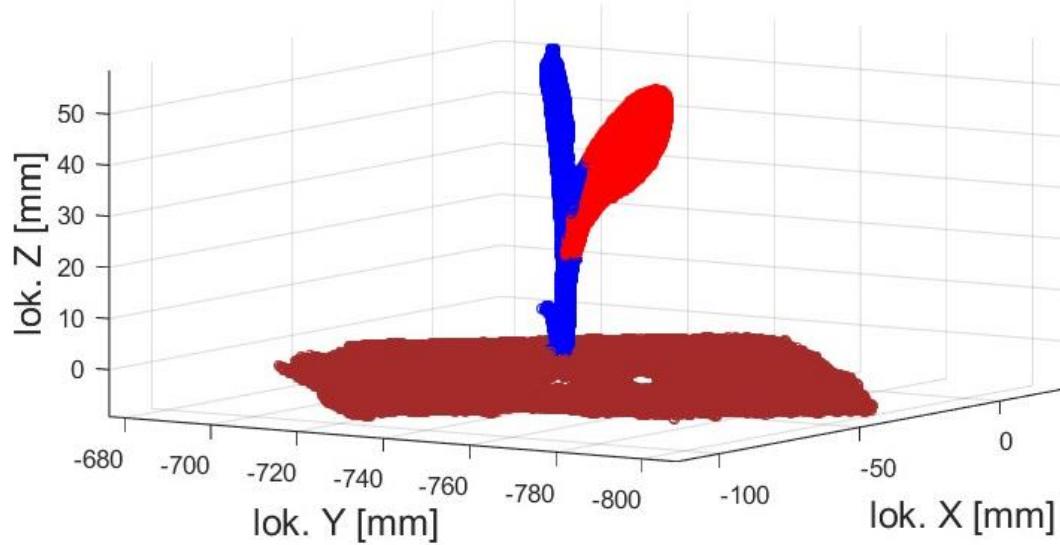


Motivation Feinsegmentierung Punktwolke

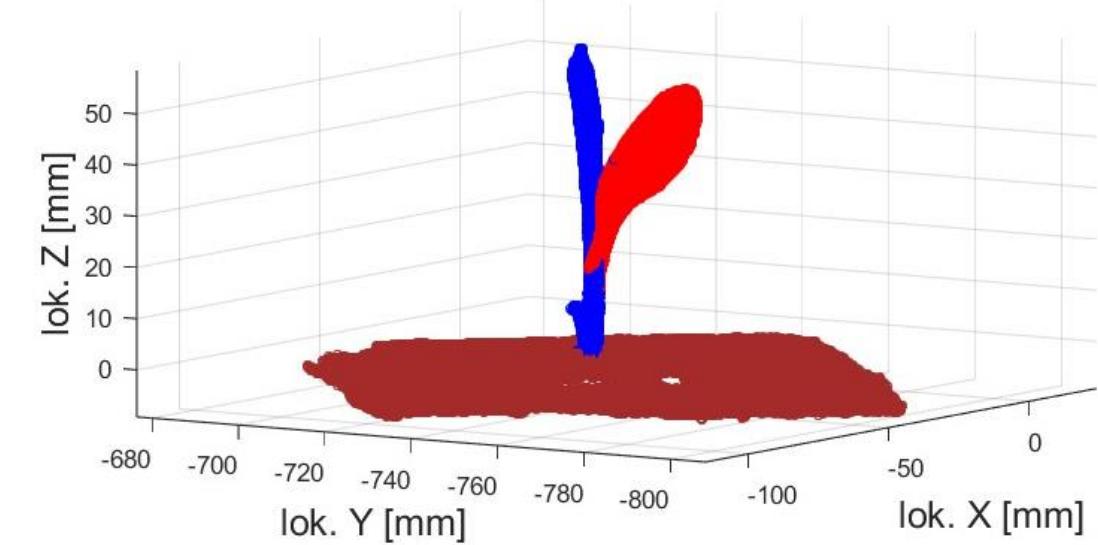


Ergebnis Feinsegmentierung Punktfolge

Vor der Feinsegmentierung

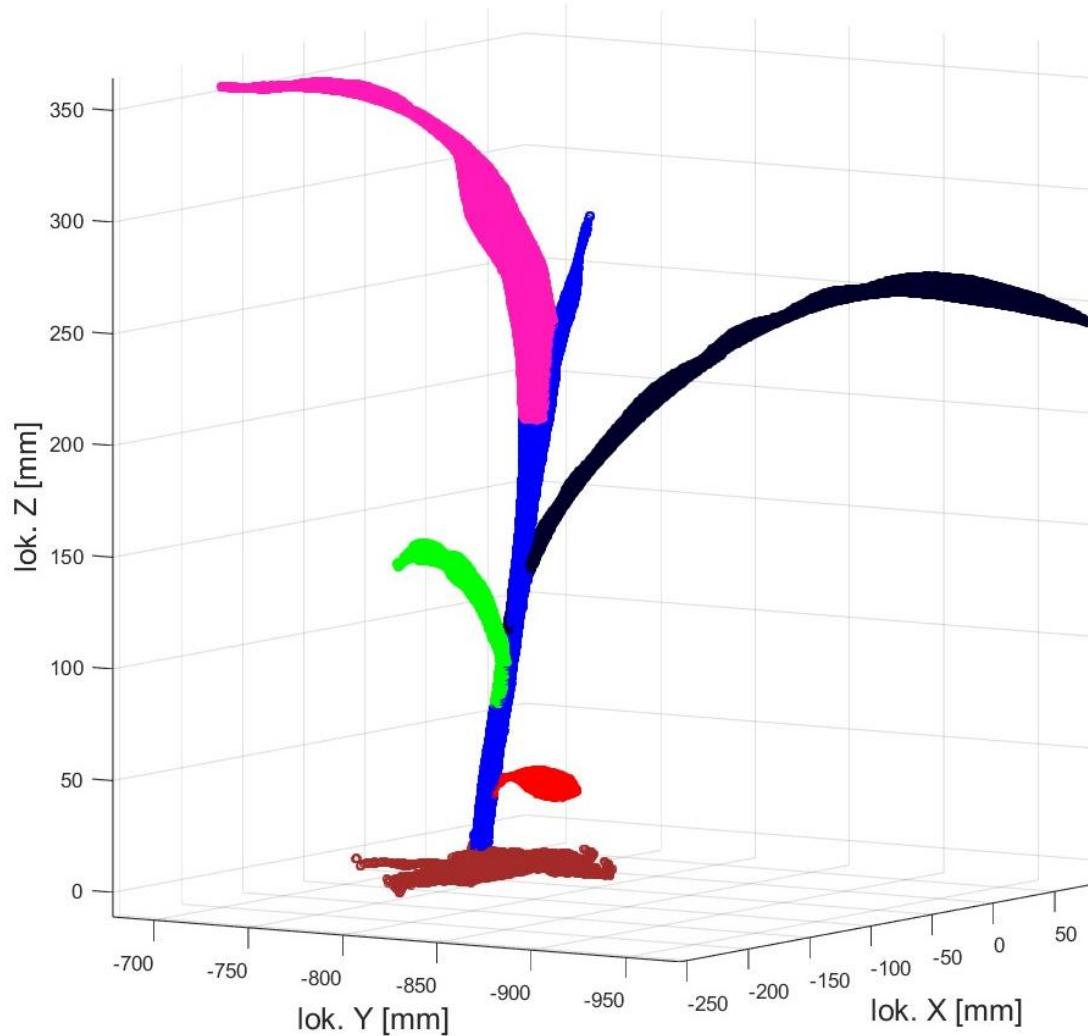


Nach der Feinsegmentierung

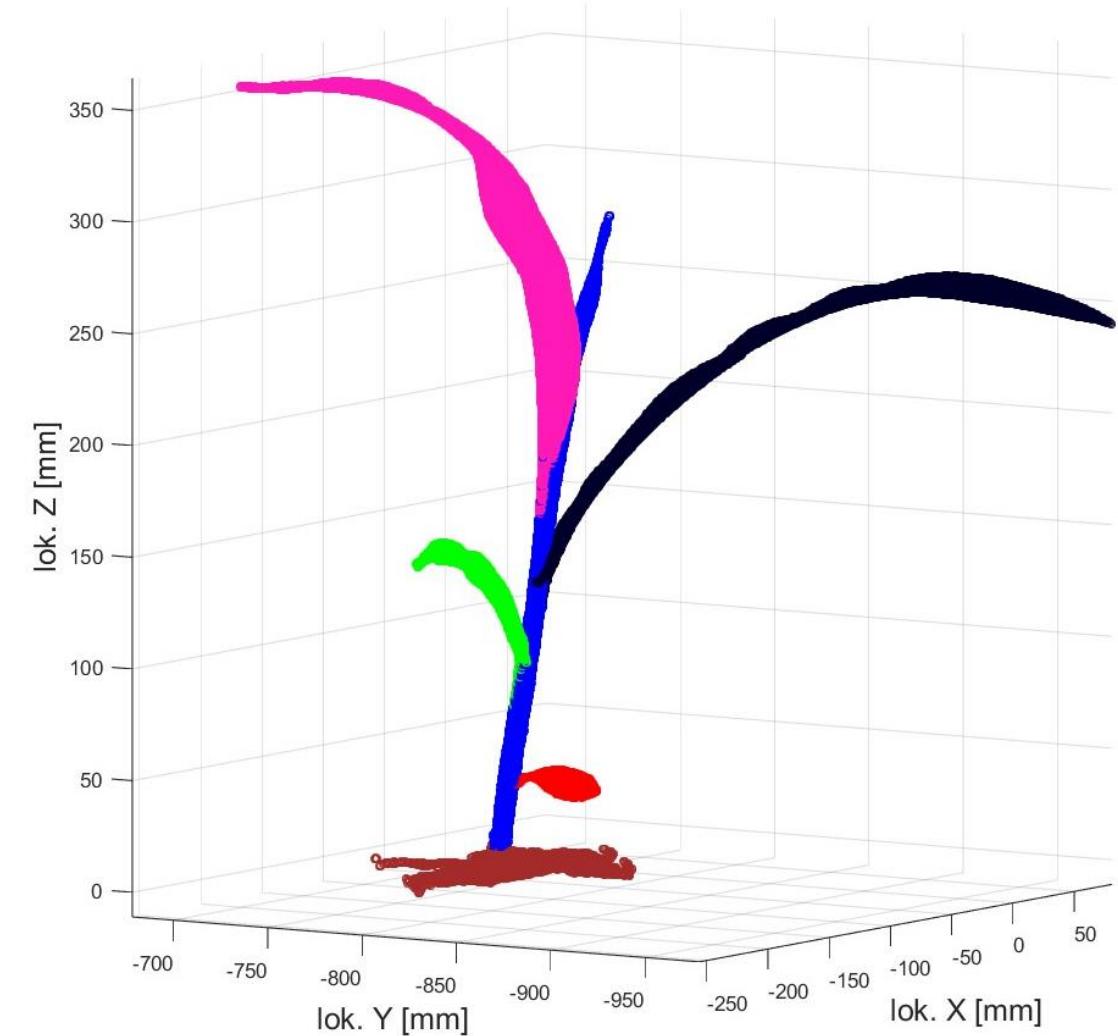


Ergebnis Feinsegmentierung Punktfolge

Vor der Feinsegmentierung

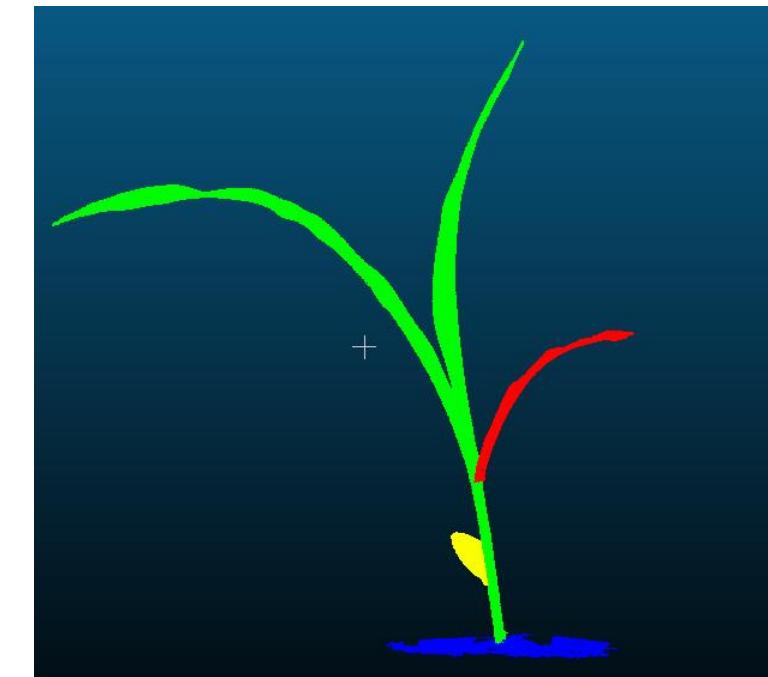
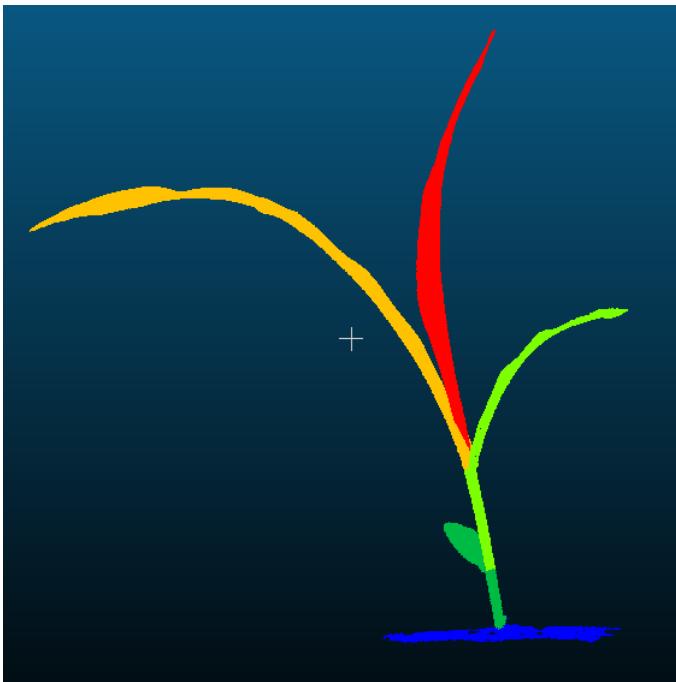


Nach der Feinsegmentierung



Wachstumsstadien von Mais- und Hirse

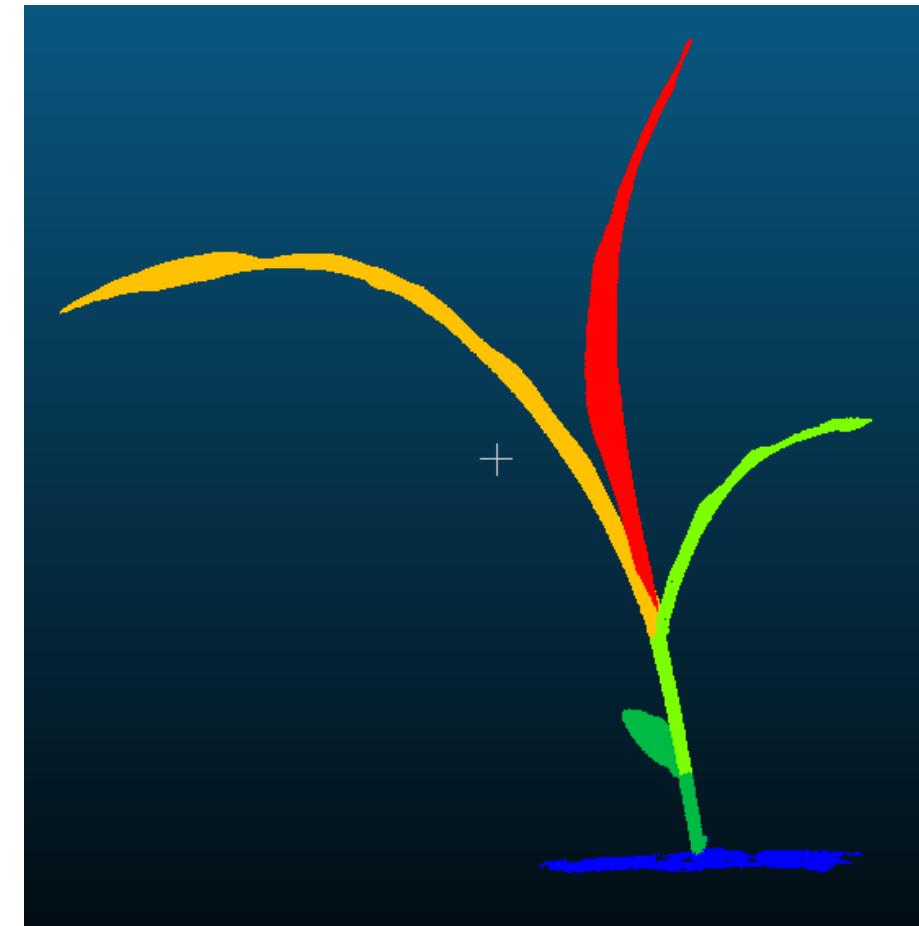
Leaf Tip Method	Leaf Collar Method
<ul style="list-style-type: none">- Jedes Blatt ist eine separate Instanz- Stängel gehört bis zum Beginn einer neuen Instanz zum Blatt	<ul style="list-style-type: none">- Die am weitesten verbreitete Methode- Blatt ist separate Instanz, wenn der Blattkragen sichtbar ist



Segmentierung in Form der Wachstumsstadien bringen

Leaf Tip Methode

- Anhand von Parametrisierung Stängel zu den jeweiligen Instanzen zuordnen



Segmentierung in Form der Wachstumsstadien bringen

Leaf Collar Methode

→ Für jedes Blatt muss entschieden werden, ob es zum Stängel gehört oder eine separate Instanz bildet

- Random Forst
- 4 Parameter:
 1. Vertikaler Blattwinkel
 2. Maximaler Abstand zwischen Stängel und Blatt
 3. Abstand des Blattes und des Stängels nach 5 Zentimetern
 4. Der Anteil des Stängels, der nach der Blattabzweigung verbleibt



Segmentierung in Form der Wachstumsstadien bringen

Leaf Collar Methode

- Trainingsdaten 70%
- Testdaten 30%
- Ableitung der Parameter durch die Segmentierung und das Graphenmodell
- Gewichtung der Gruppen (Separate Instanz und Zum Stängel gehörend) mit inversen Auftreten der Gruppen

Ergebnis Testdaten

- Präzision: 1
- Recall: 92.3
- F1-Score: 0.96

