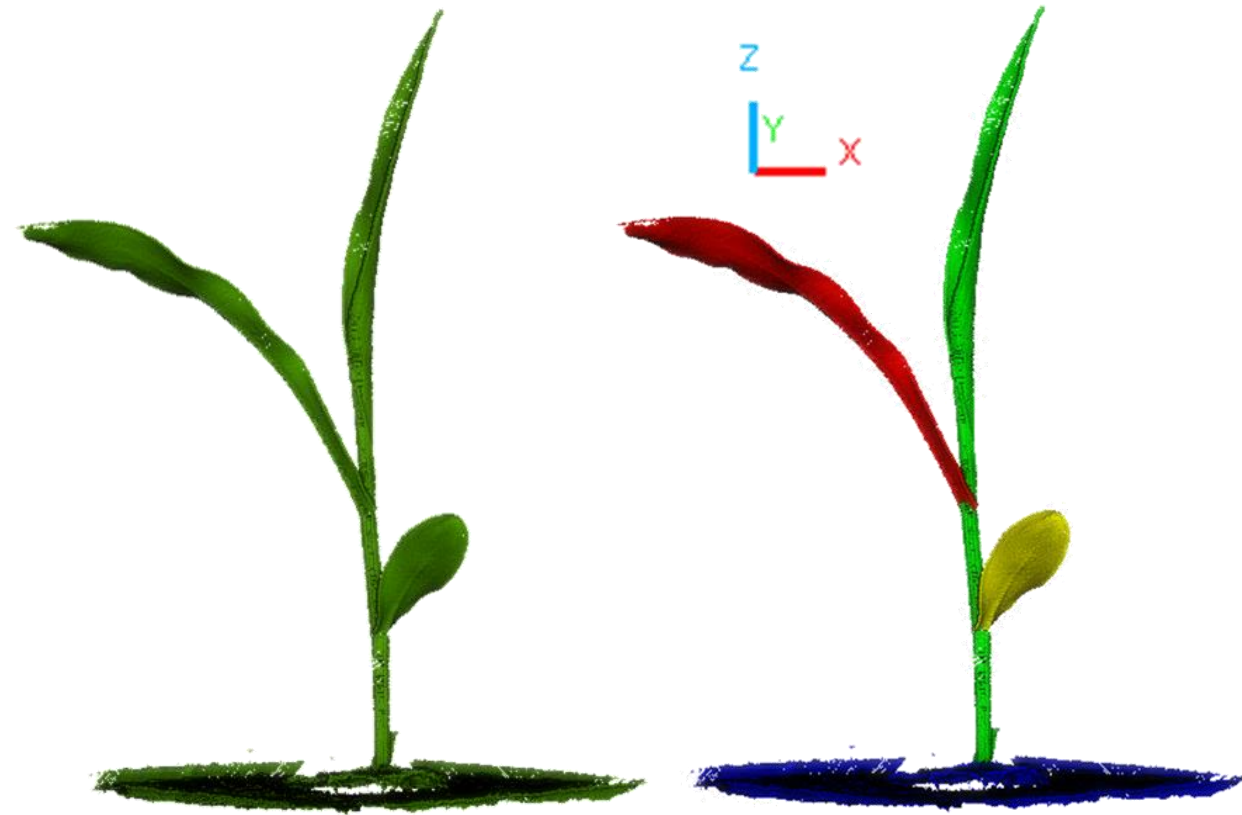


# Automatisierte Punktwolkensegmentierung für die Phänotypisierung von Nutzpflanzen

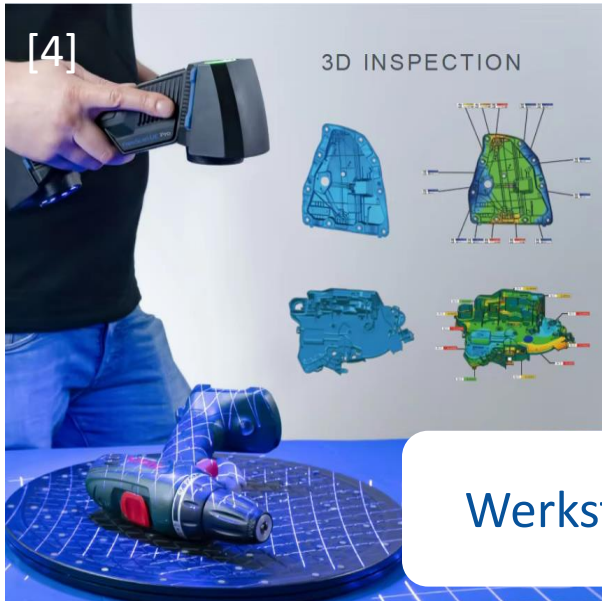
Annika Tobies

Vermessungswesen aktuell

13.11.2025

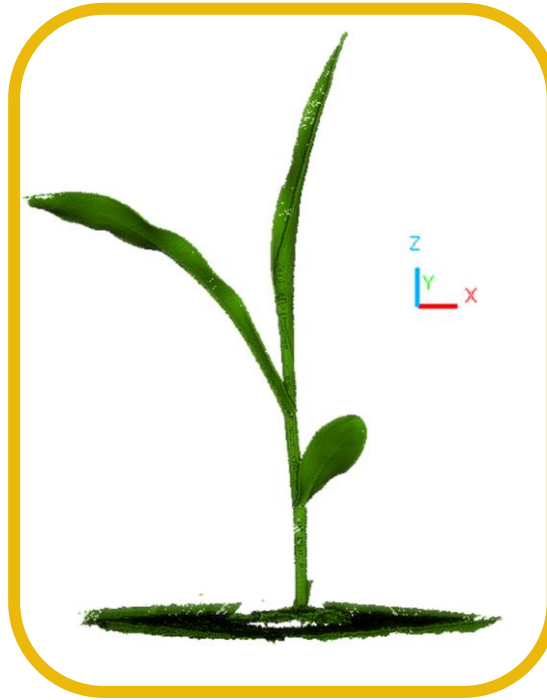


# Anwendungsfelder Punktwolken

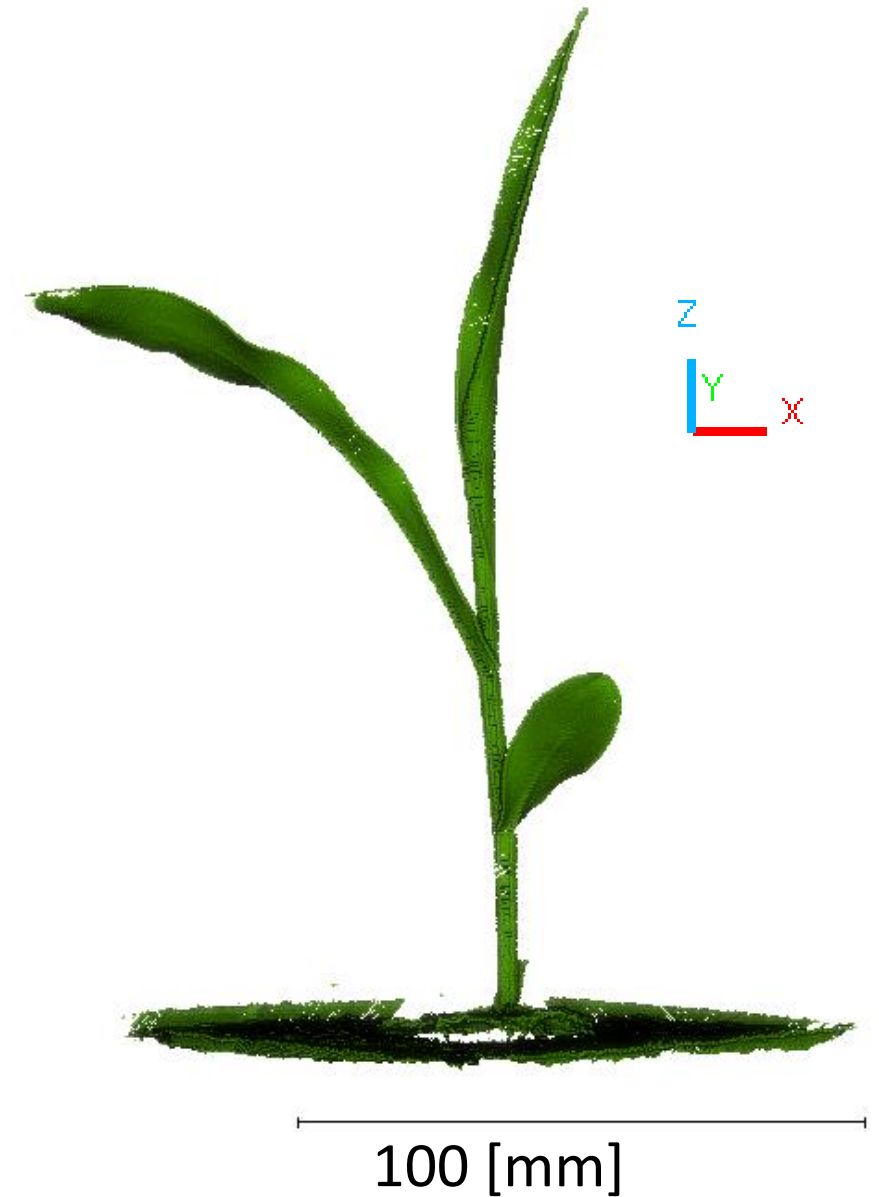
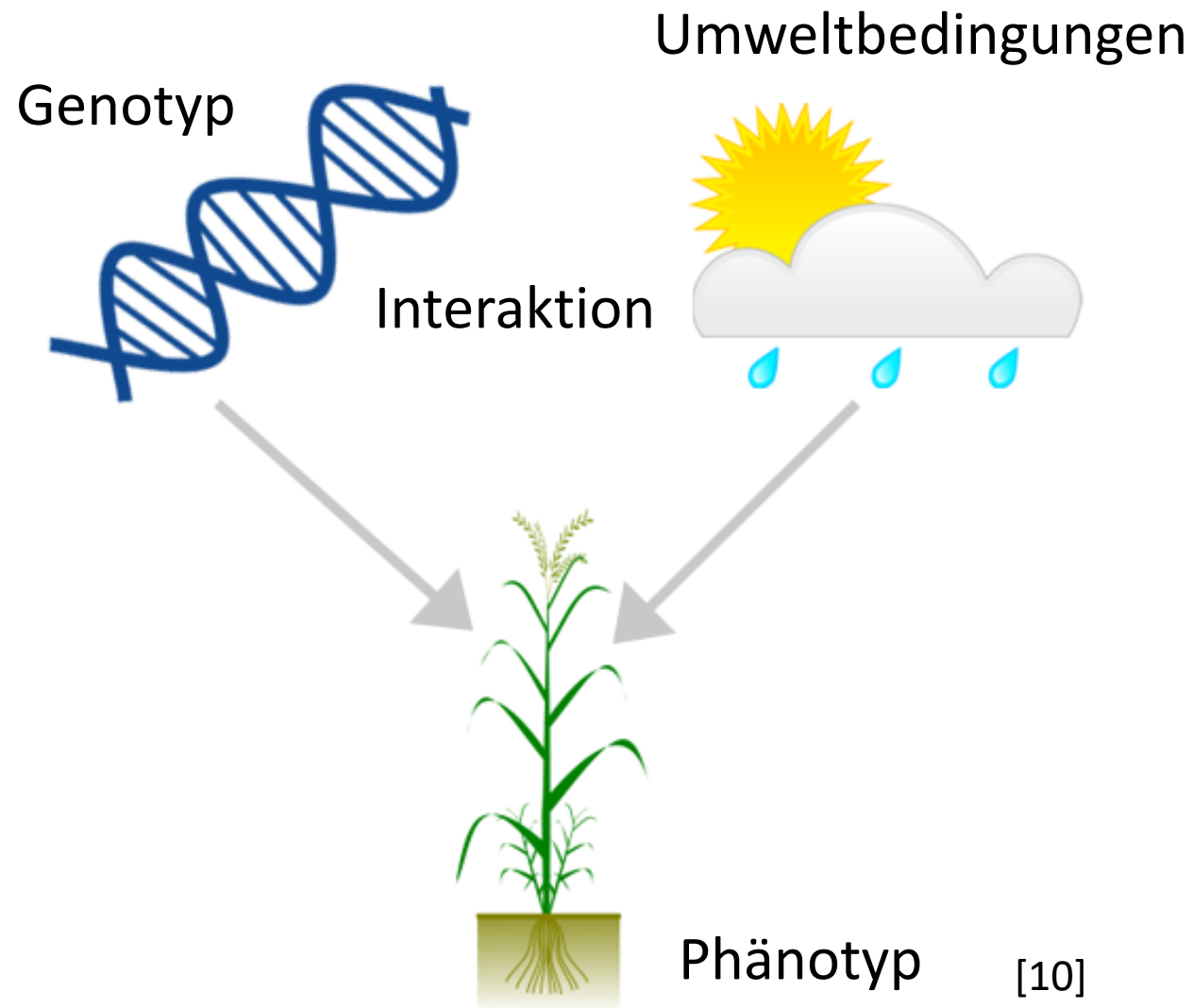




# Anwendungsfeld Agrar- und Umweltwissenschaft

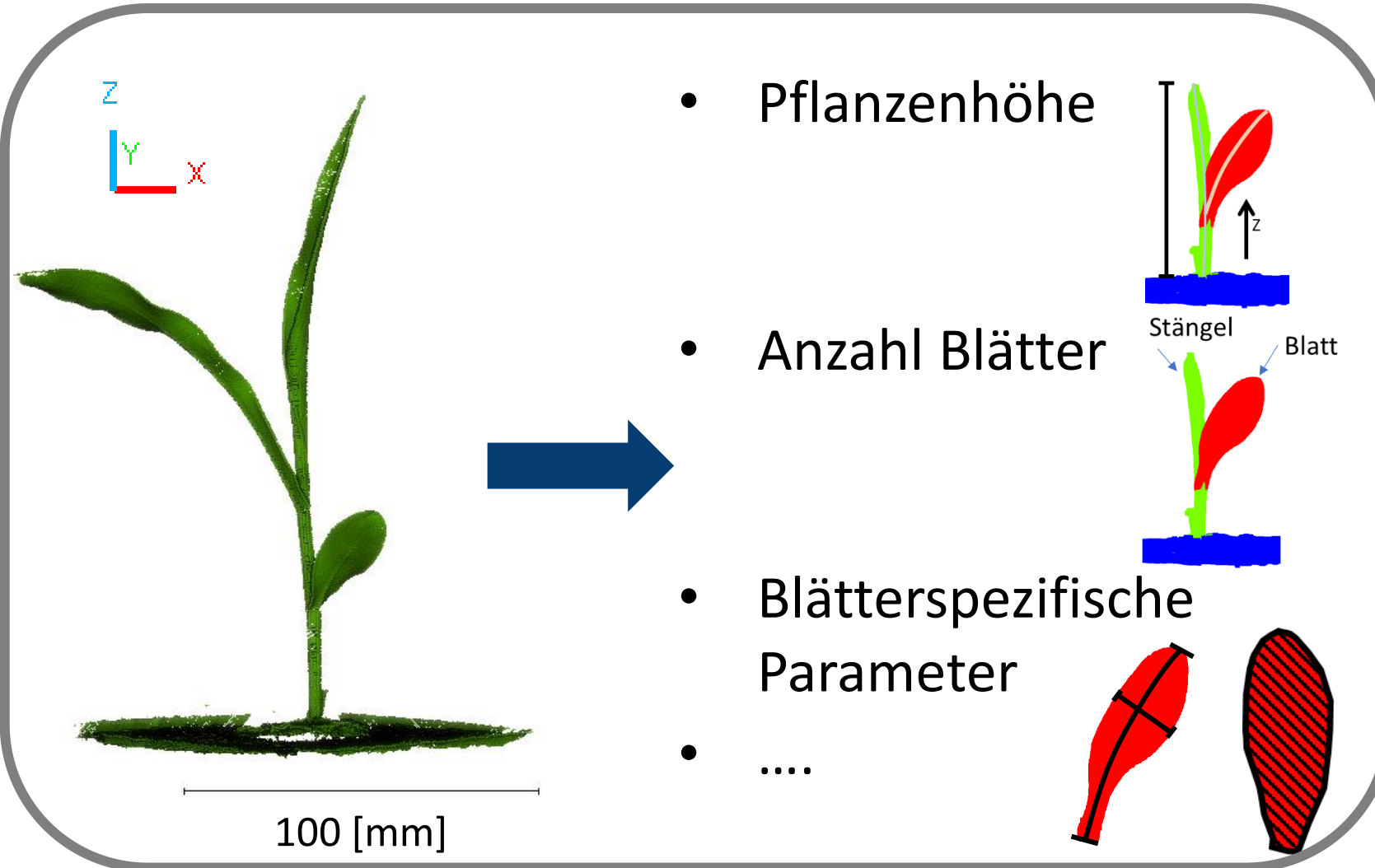


# Phänotypisierung



# Motivation

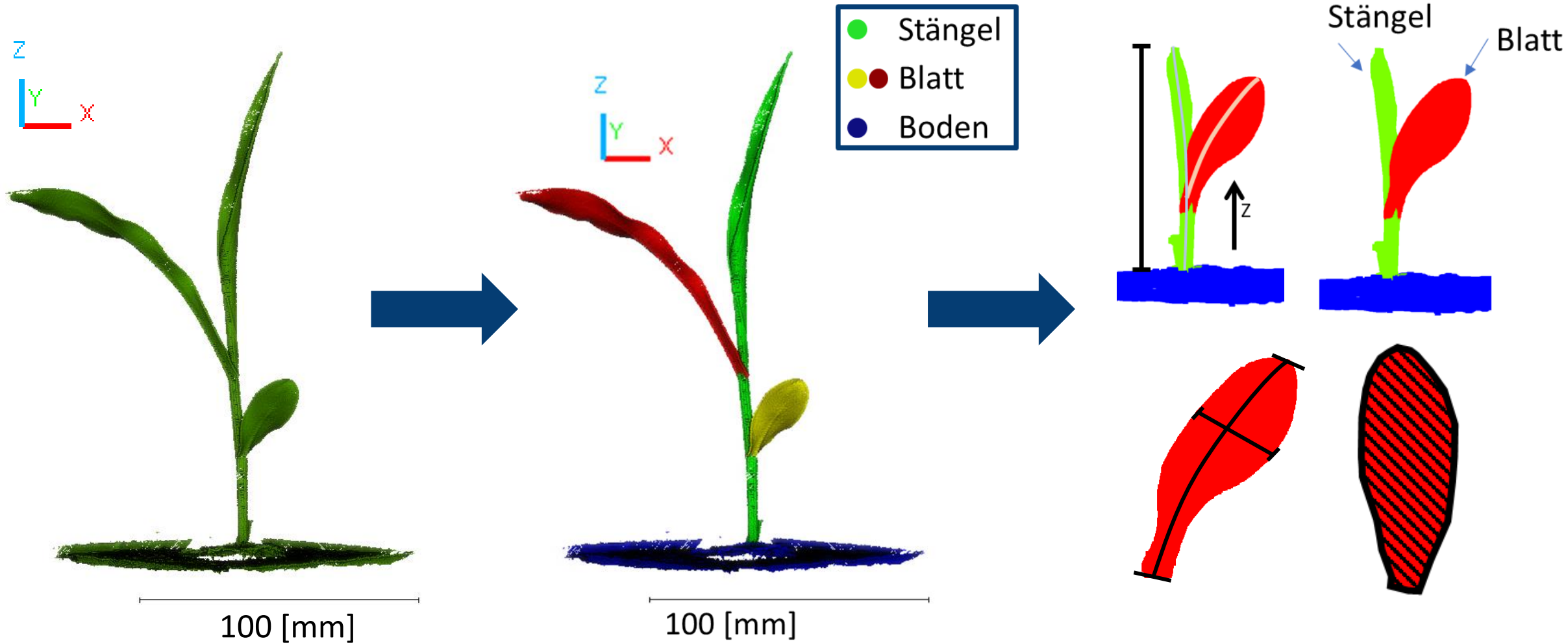
→ Automatische Ableitung von phänotypischen Parametern



- Gesundheit
- Ertrag
- Resistenz gegenüber Stressfaktoren
- ...

# Motivation

## Segmentierung





# Pflanzenstruktur von Mais und Hirse

Fokus auf monokotyle (einkeimblättrigen) Pflanzenarten mit ausschließlich primären Blättern



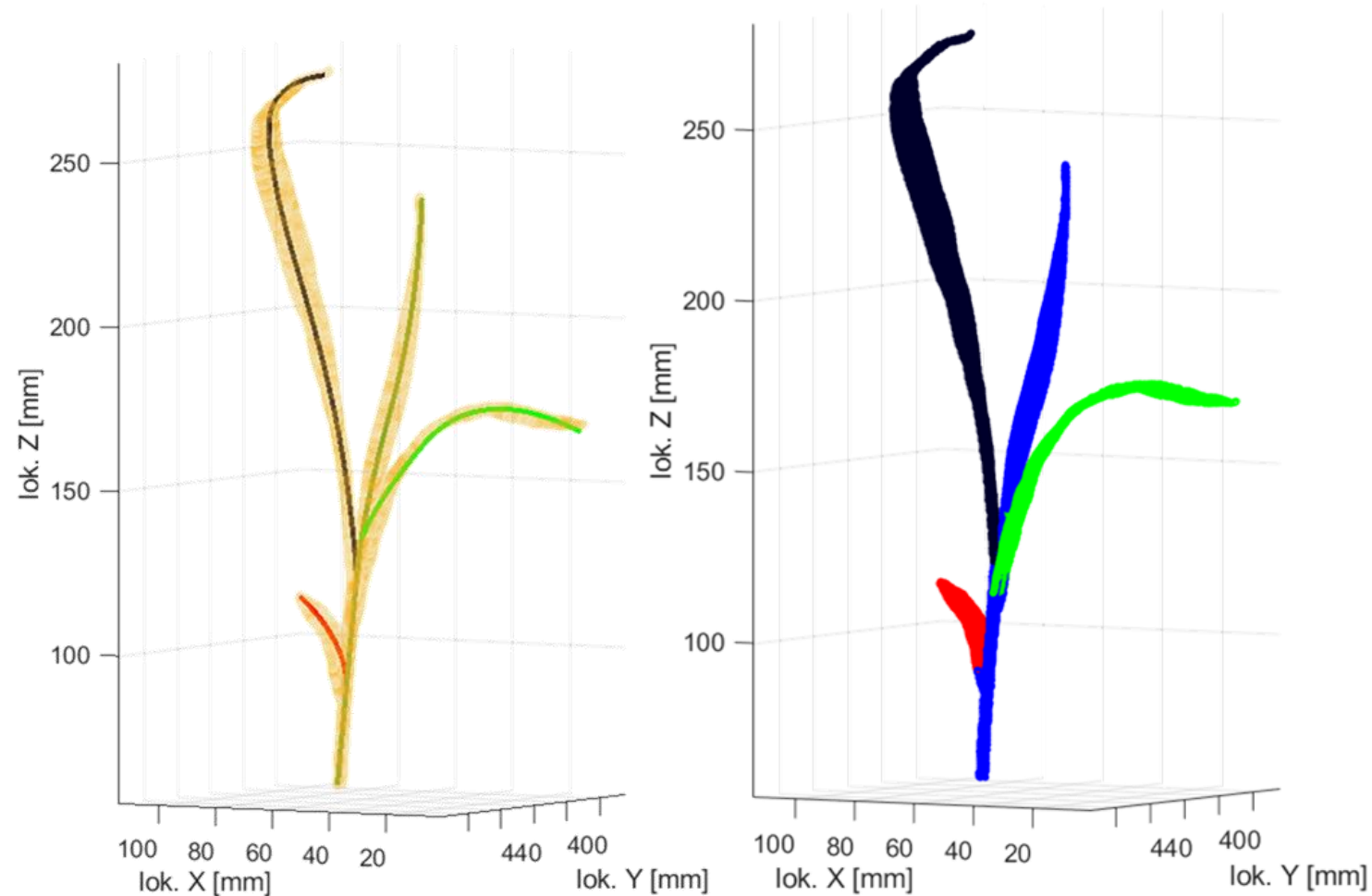
Mais



Hirse

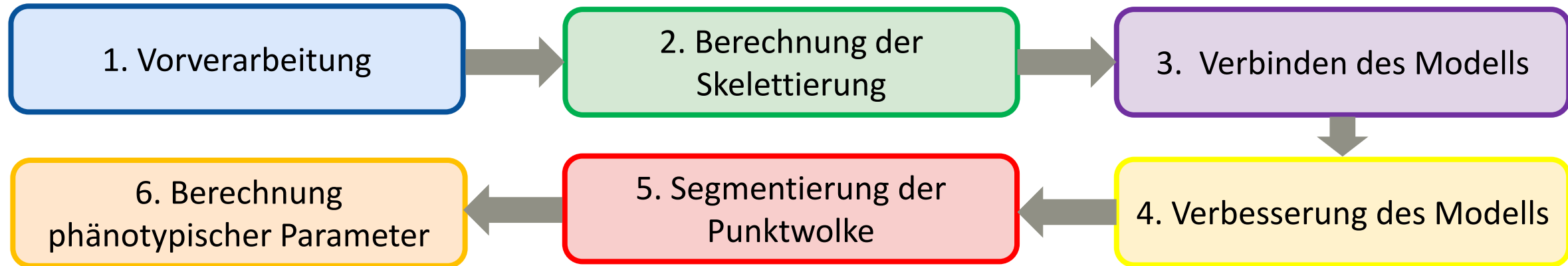
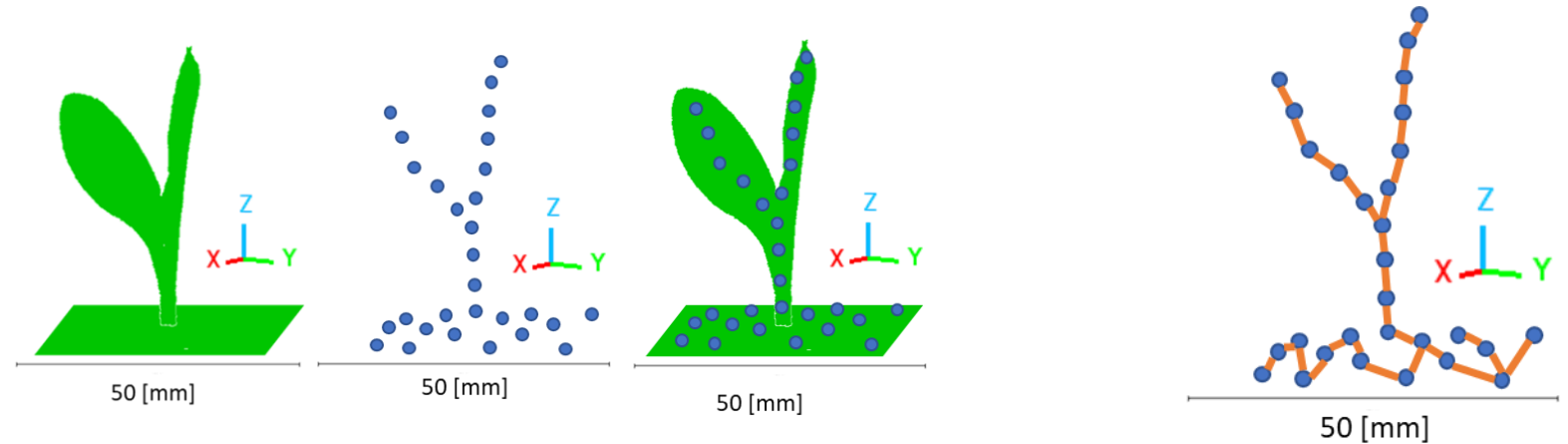
# Segmentierung der monokotylen Pflanzen

- Geometrischer Ansatz, Modell der Pflanzen entwickeln



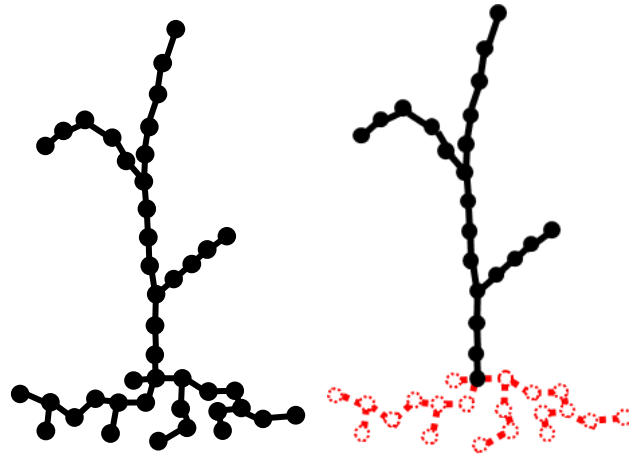


# Übersicht über die entwickelte Methode

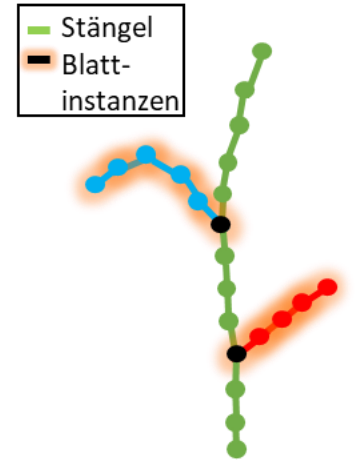


## 4) Verbesserung des Modells

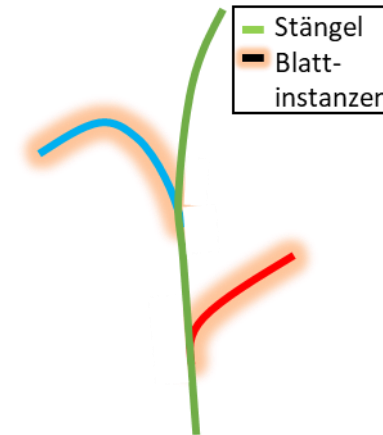
A) Bodenkanten entfernen



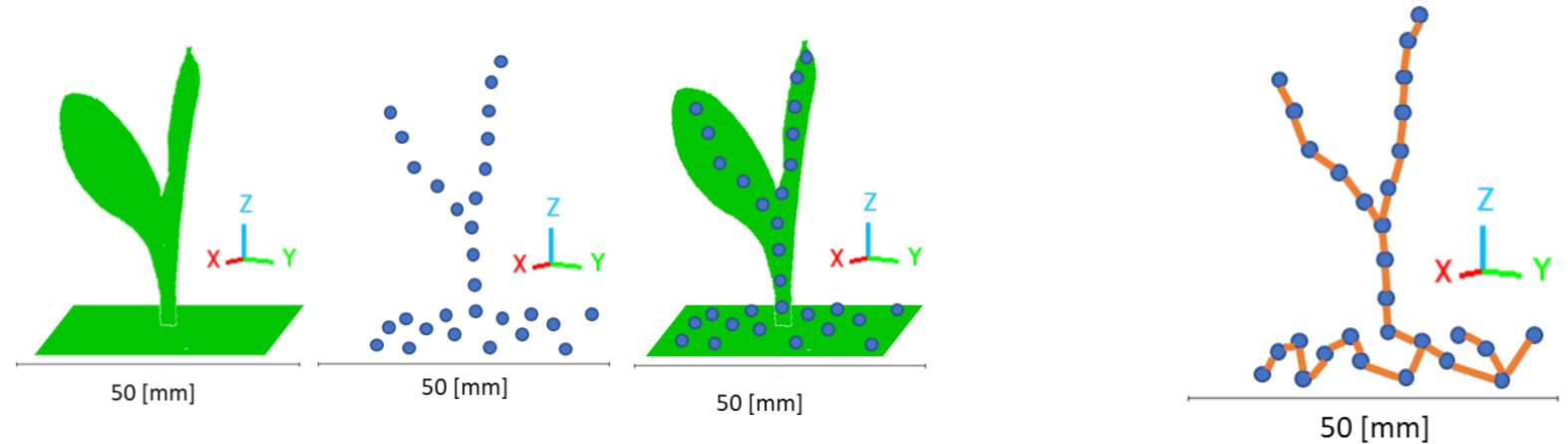
B) Segmentierung



F) Position der Skelettpunkte verbessern



# Übersicht über die entwickelte Methode



1. Vorverarbeitung

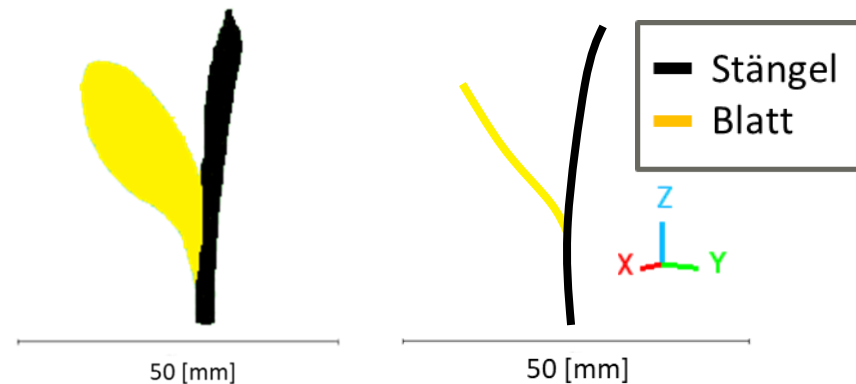
2. Berechnung der Skelettierung

3. Verbinden des Modells

6. Berechnung phänotypischer Parameter

5. Segmentierung der Punktwolke

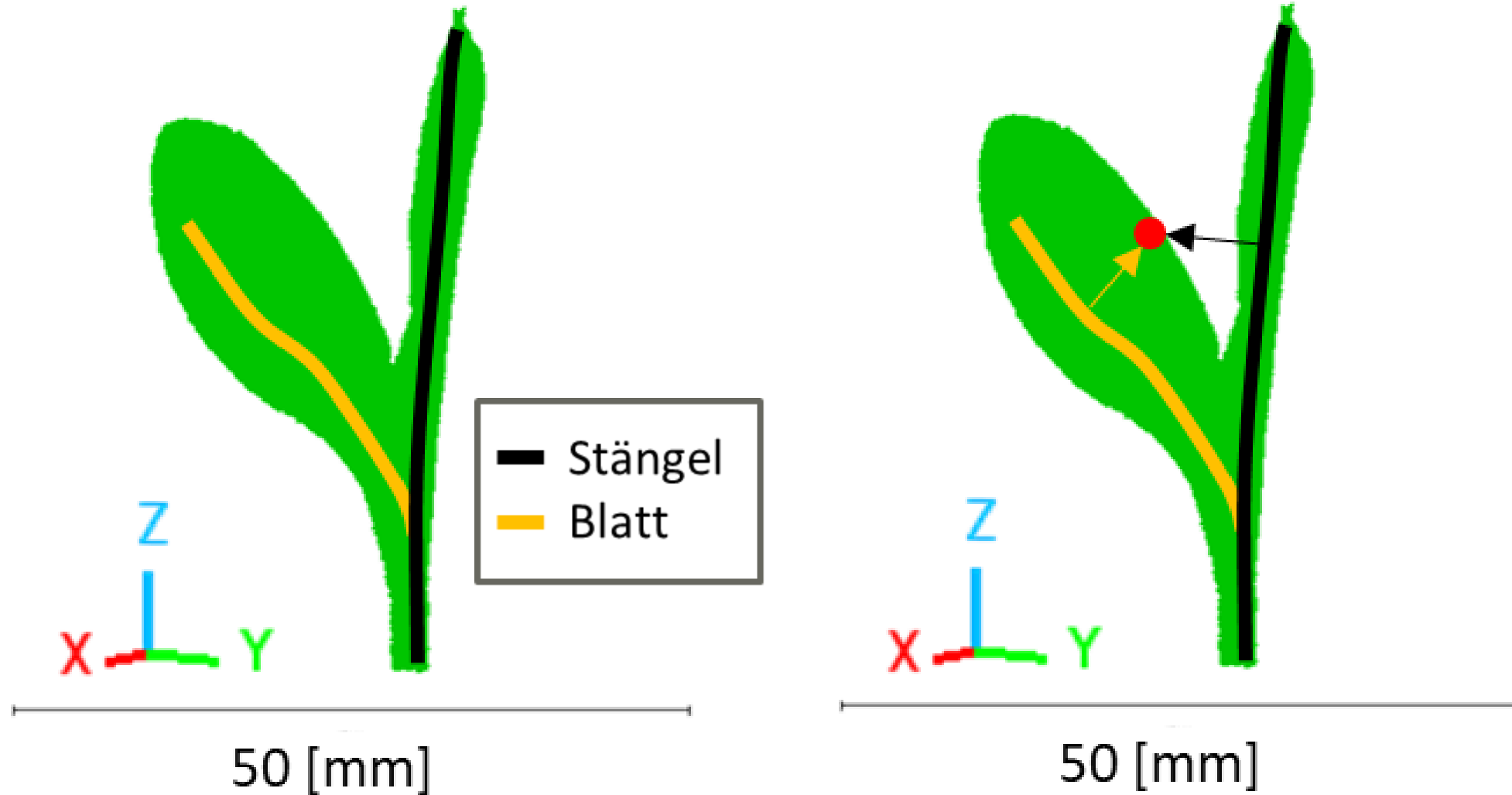
4. Verbesserung des Modells



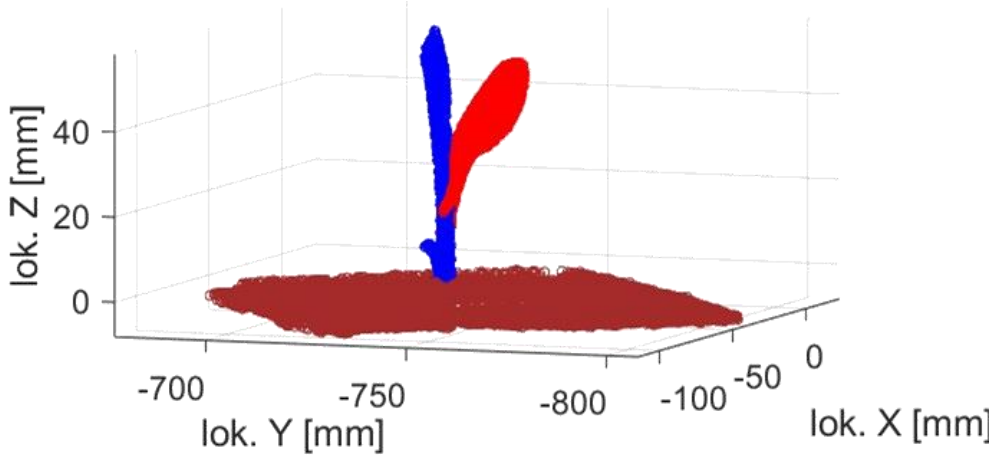
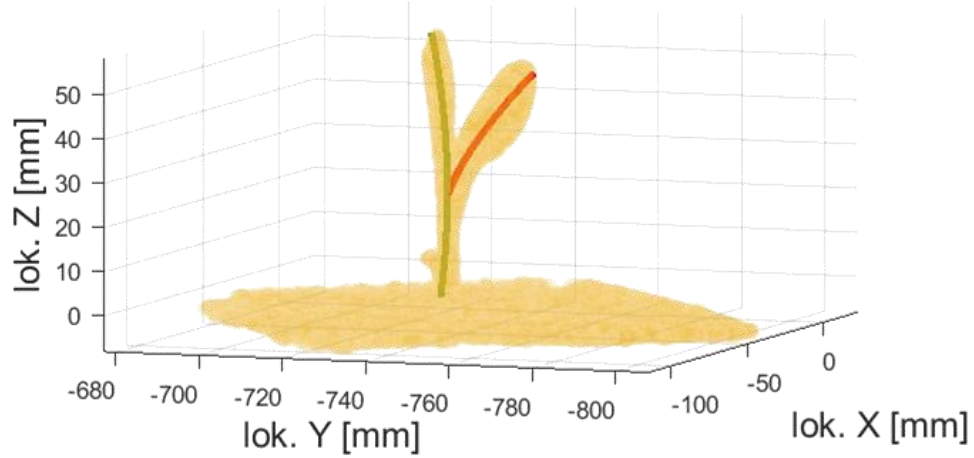


## 5) Segmentierung der Punktwolke

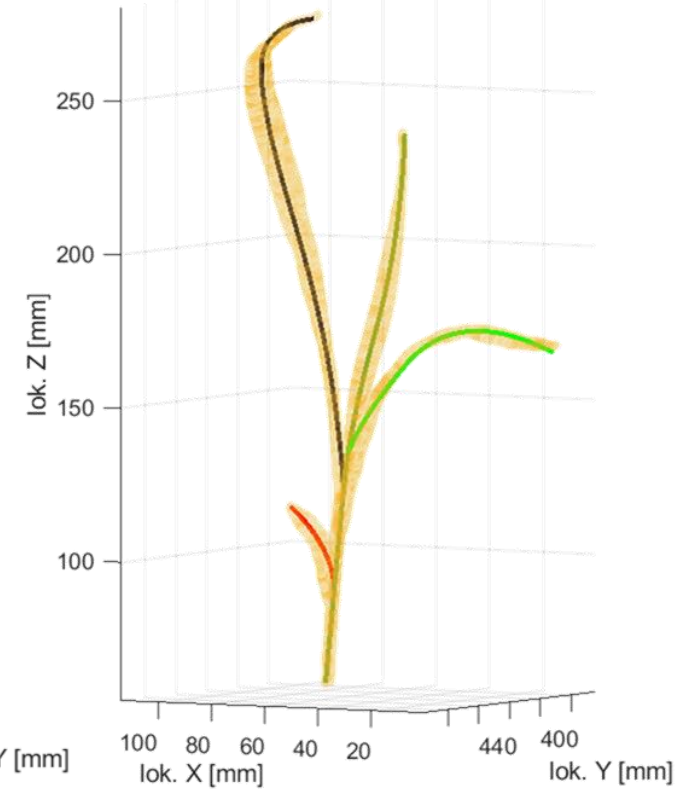
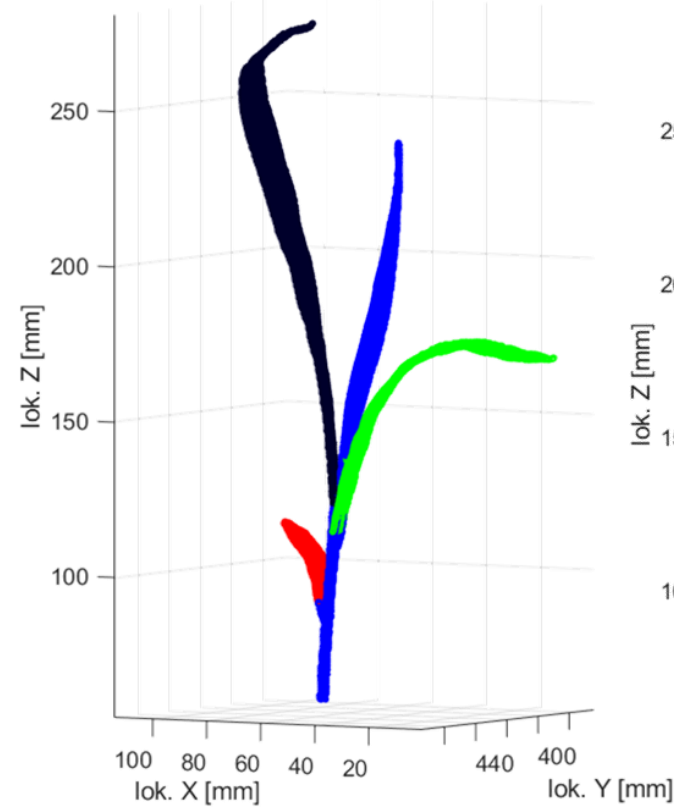
- Segmentierung über euklidischen Abstand



# Ergebnisse Segmentierung



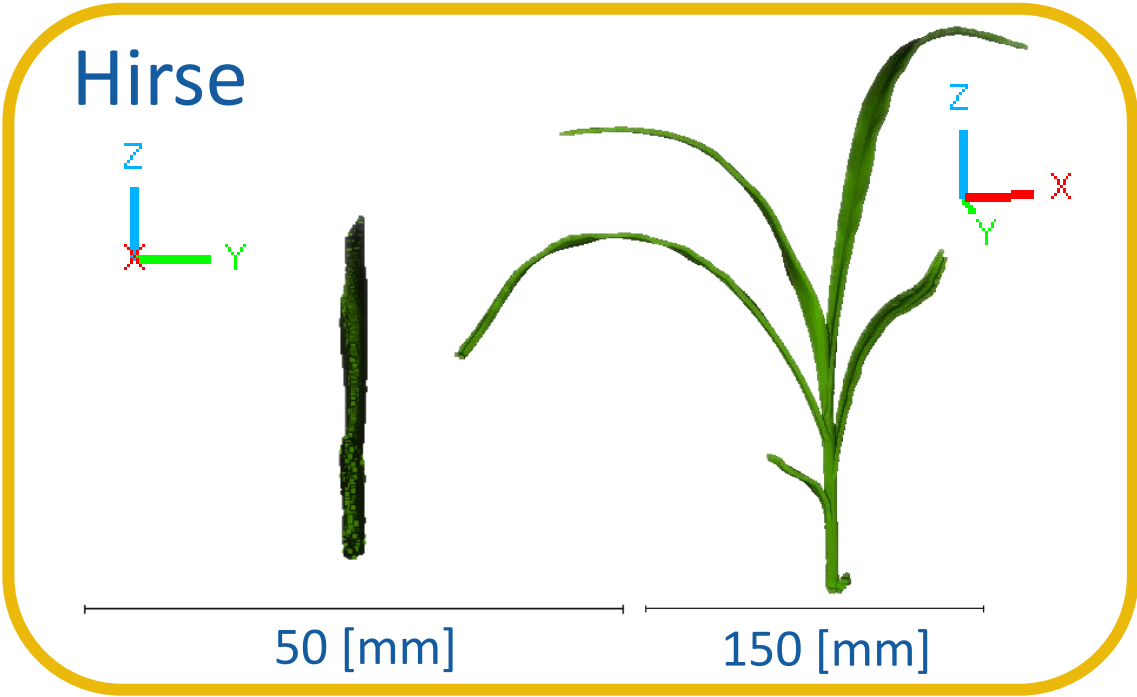
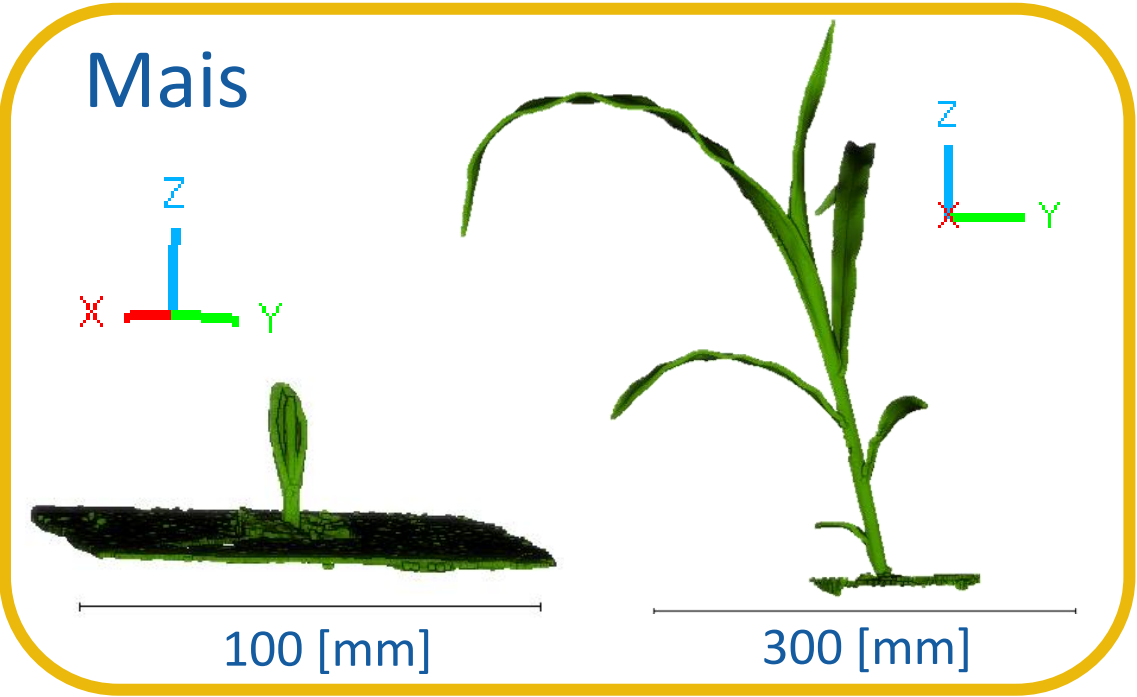
Mais



Hirse

# Datengrundlage

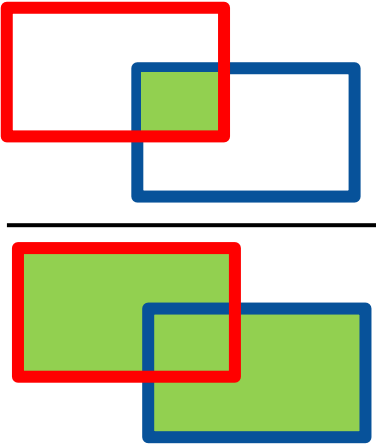
	Schunck et al., (2021) „Pheno4D“ (1)	Conn et al., (2017) (2)
Pflanze	Mais	Hirse
# Datensätze	49	30
Boden vorhanden?	Ja	Nein
Wachstumsstadien	V0 – V4	V0 - V3





# Ergebnisse Vergleich mit Referenzsegmentierung

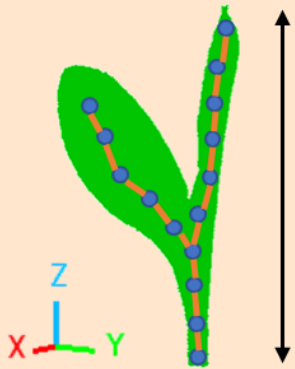
$$\textit{Intersection over Union (IoU)} = \frac{\textit{Schnittmenge}}{\textit{Vereinigungsmenge}}$$



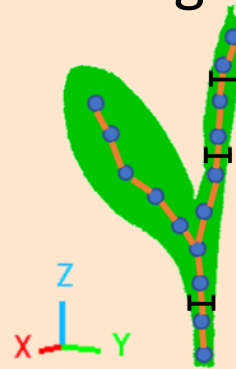
Datensätze	Schnuck et al., (2021) „Pheno4D“, Mais	Conn et al., (2017) Hirse
	$\overline{IoU}$	$\overline{IoU}$
Segmentierung	0.961	0.908

## 6) Berechnung phänotypischer Parameter

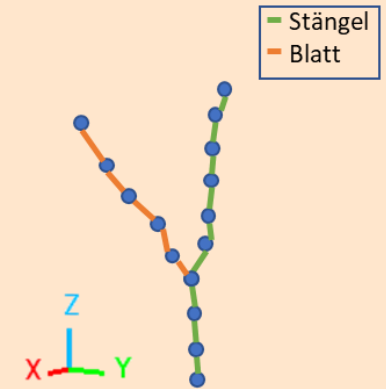
A) Pflanzenhöhe



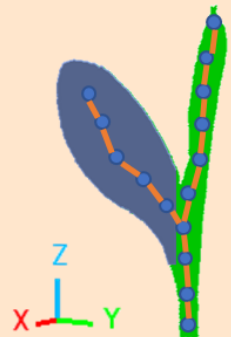
B) Durchmesser des Stängels



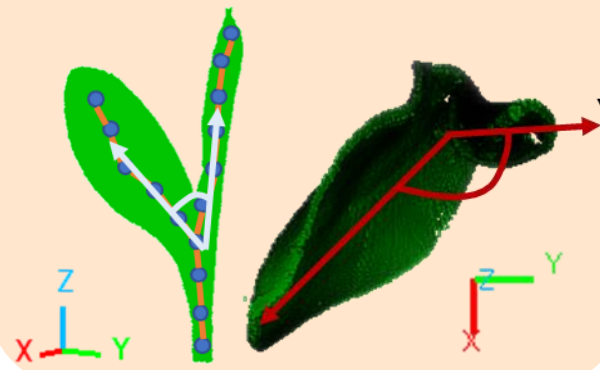
C) Anzahl Blätter



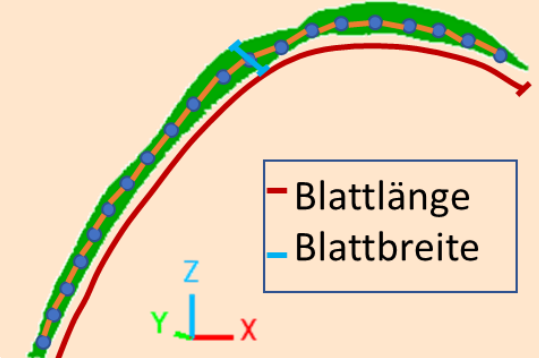
D) Blattfläche



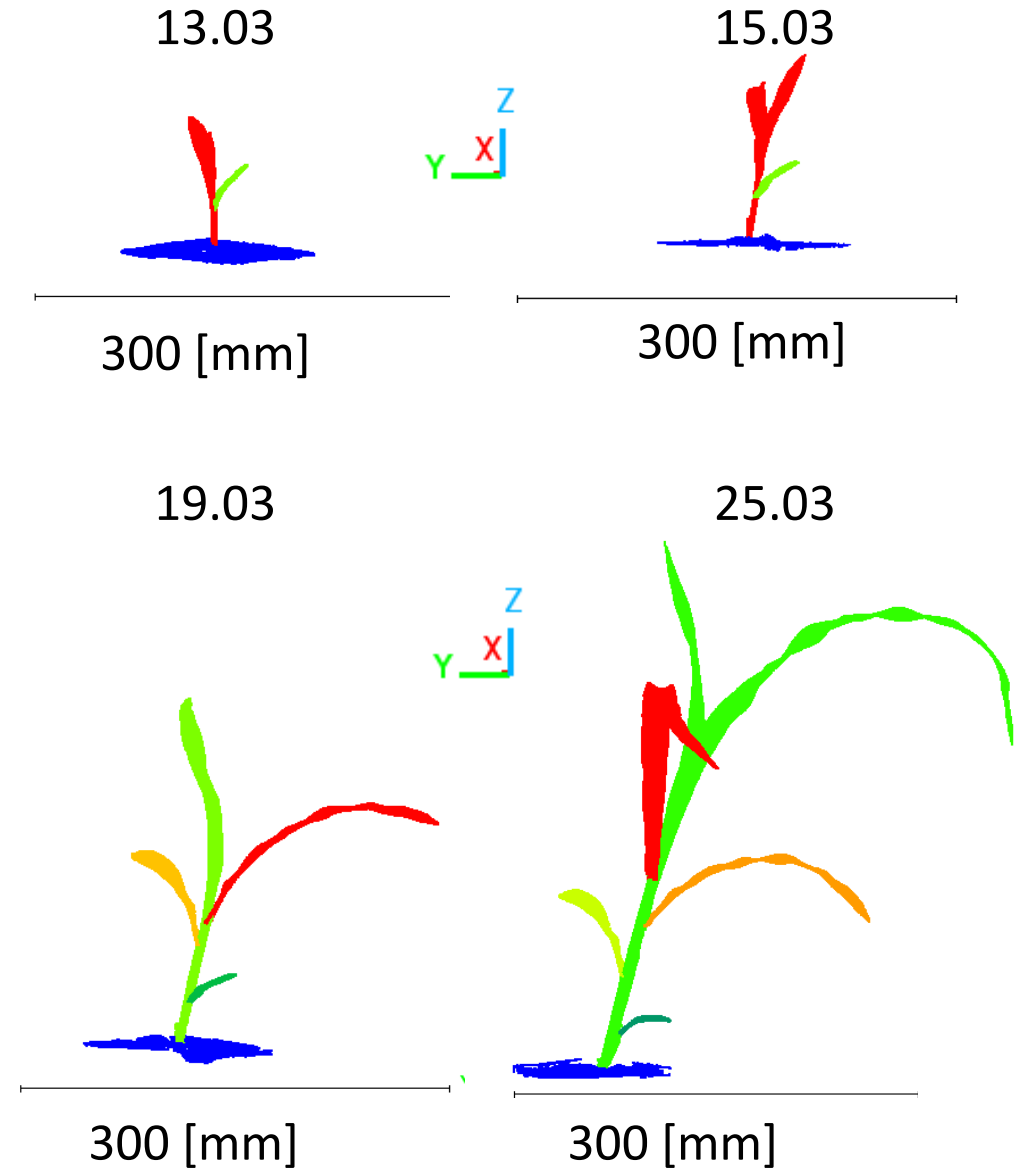
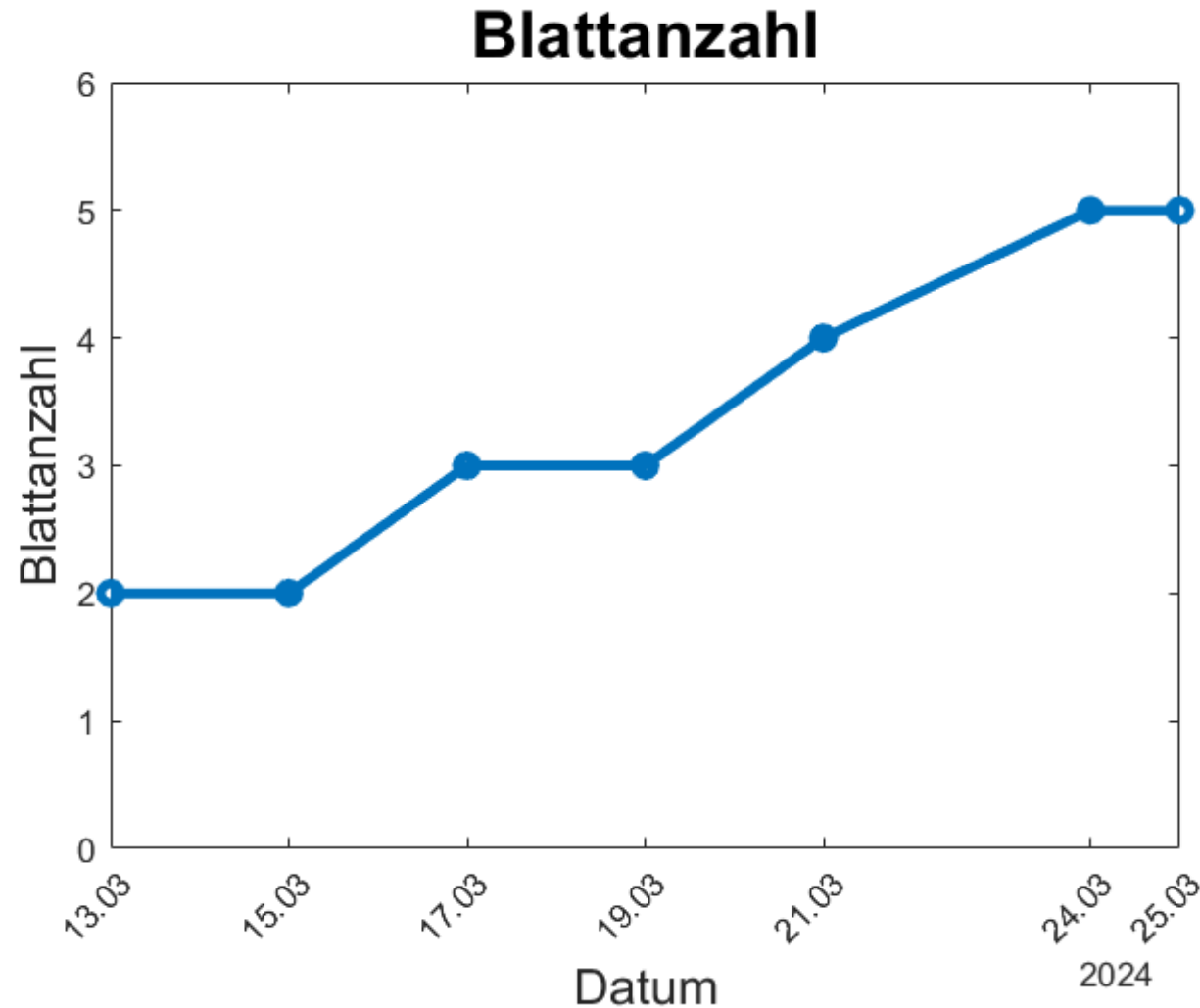
E) Blattwinkel



F) Blattlänge- und -breite

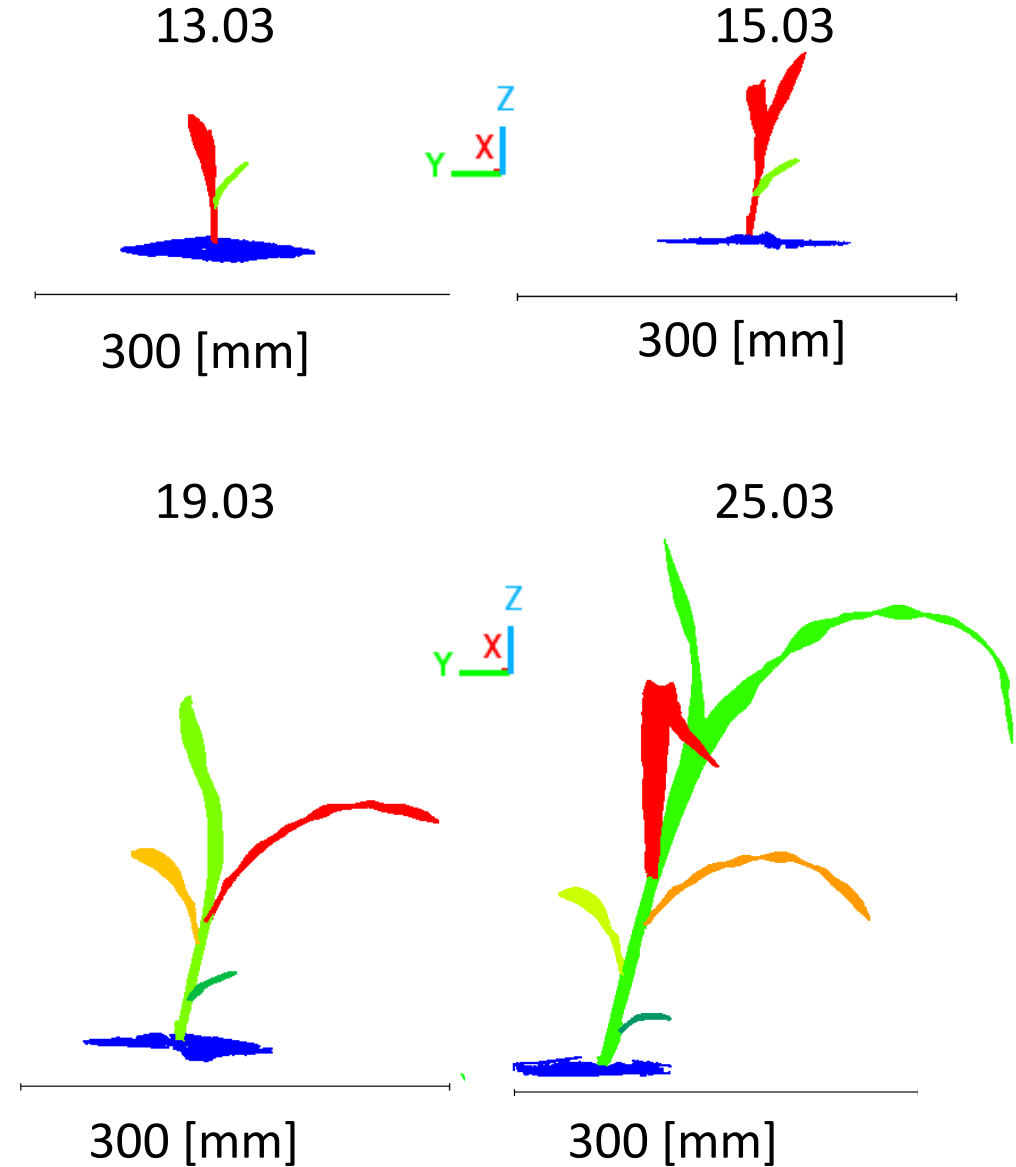
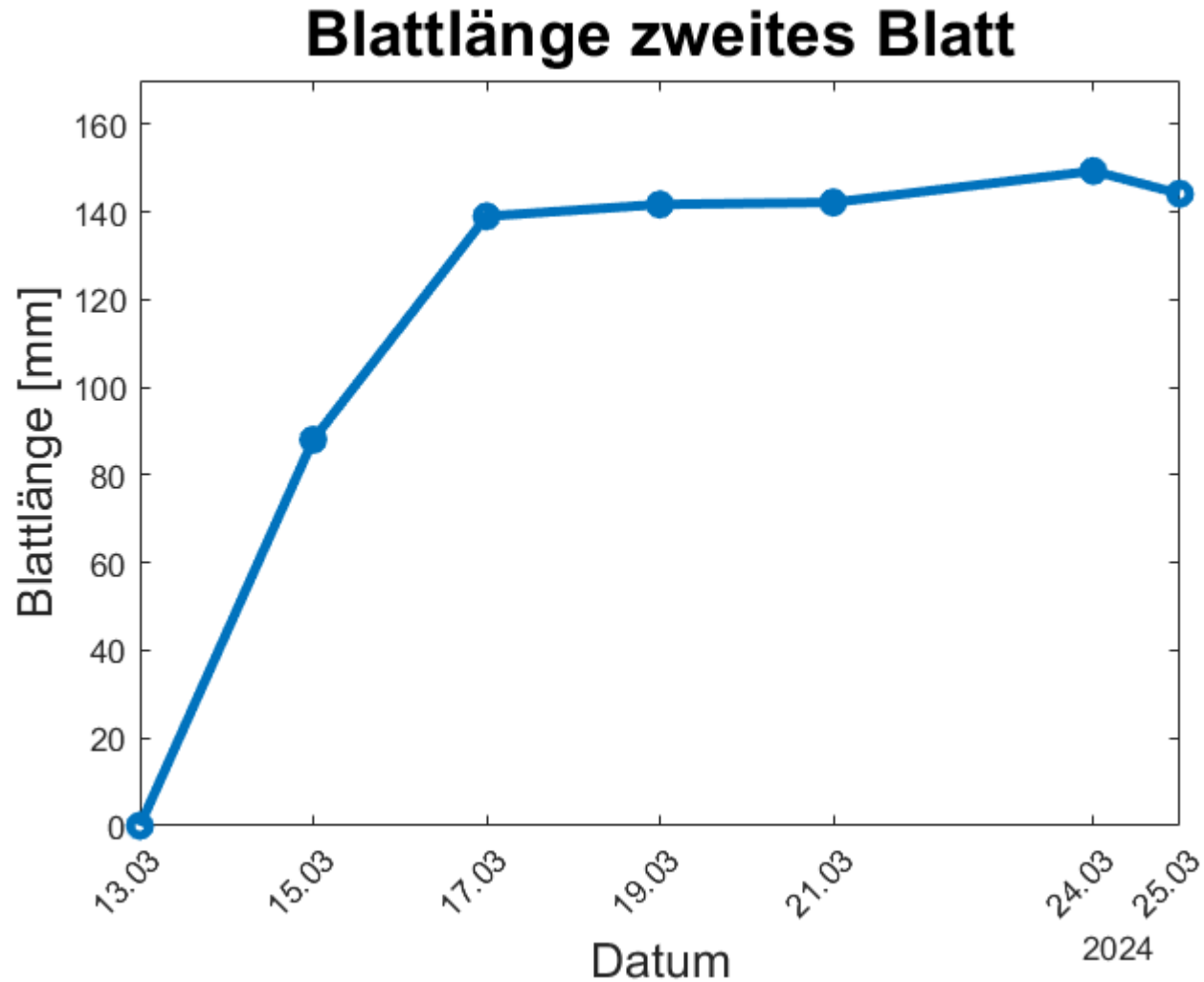


# Phänotypische Parameter Ergebnisse



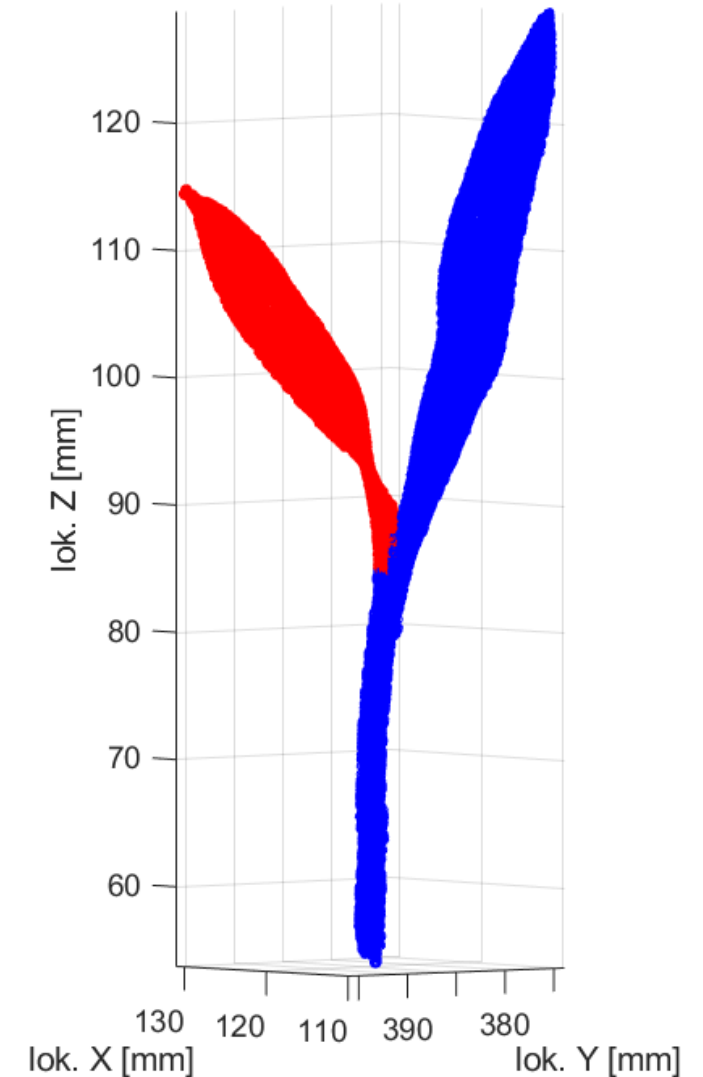


# Phänotypische Parameter Ergebnisse



# Fazit und Ausblick

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

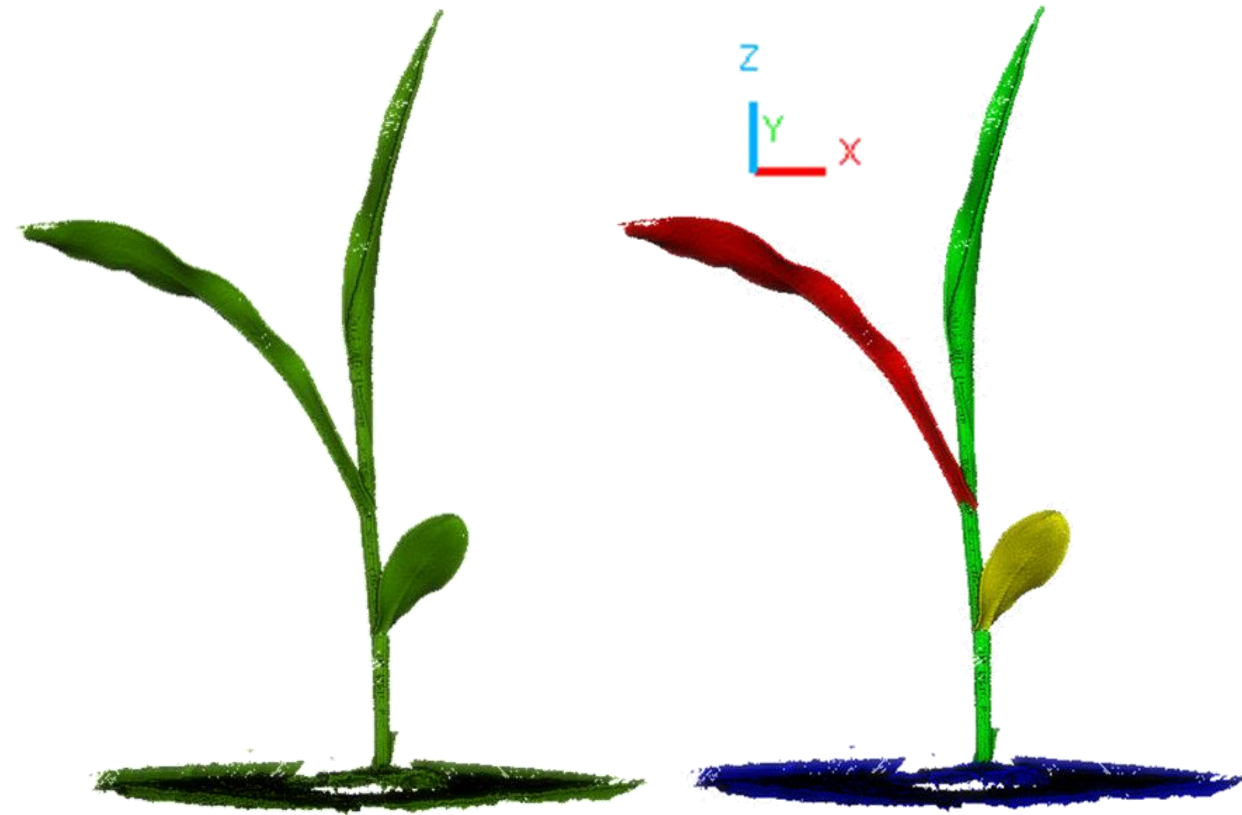


# Automatisierte Punktwolkensegmentierung für die Phänotypisierung von Nutzpflanzen

Annika Tobies

Vermessungswesen aktuell

13.11.2025





# Bildquellen

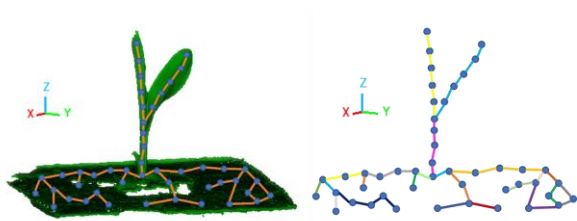
- [1] Laserscanning Europe, „Laserscanning und Modellierung in Bauwesen und Architektur“, URL: <https://www.laserscanning-europe.com>, Zugriff am 12.11.2025
- [2] Laserscanning Bayern, „Denkmalpflege“, URL: <https://laserscanning.bayern>, Zugriff am 12.11.2025
- [3] Laserscanning Europe, „Fassaufmaß & 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://biooekonomie.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/>, Zugriff am 03.11.2024
- [14] Zunel van Eeden, „Why sorghum is seeing a downward trend“, 2024, URL: [https://www.cropscience.bayer.africa/](https://www.cropsscience.bayer.africa/), /, Zugriff am 03.11.2024

# Literaturquellen

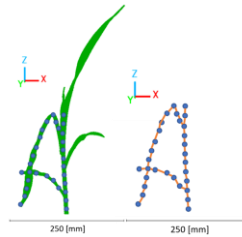
- (1) Schunck, David, et al. "Pheno4D: A spatio-temporal dataset of maize and tomato plant point clouds for phenotyping and advanced plant analysis." *Plos one* 16.8 (2021): e0256340.
- (2) Conn, Adam, et al. "A statistical description of plant shoot architecture." *Current biology* 27.14 (2017): 2078-2088.
- (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

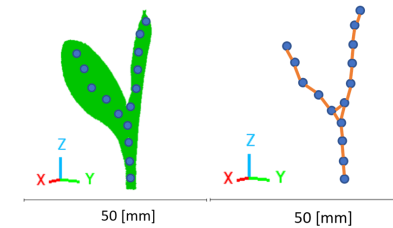
A) Bodenkanten entfernen



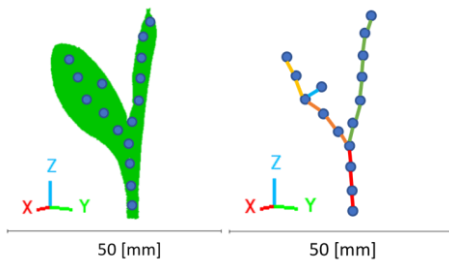
B) Überlappende Blätter



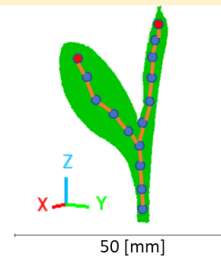
C) Ungewollte Zyklen entfernen



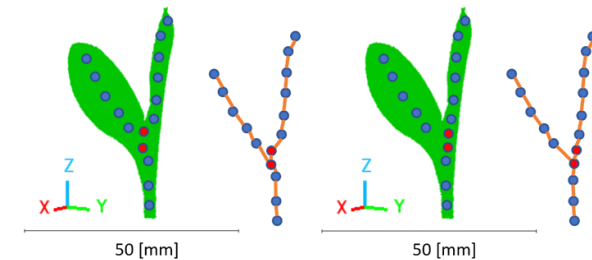
D) Ausreißer entfernen



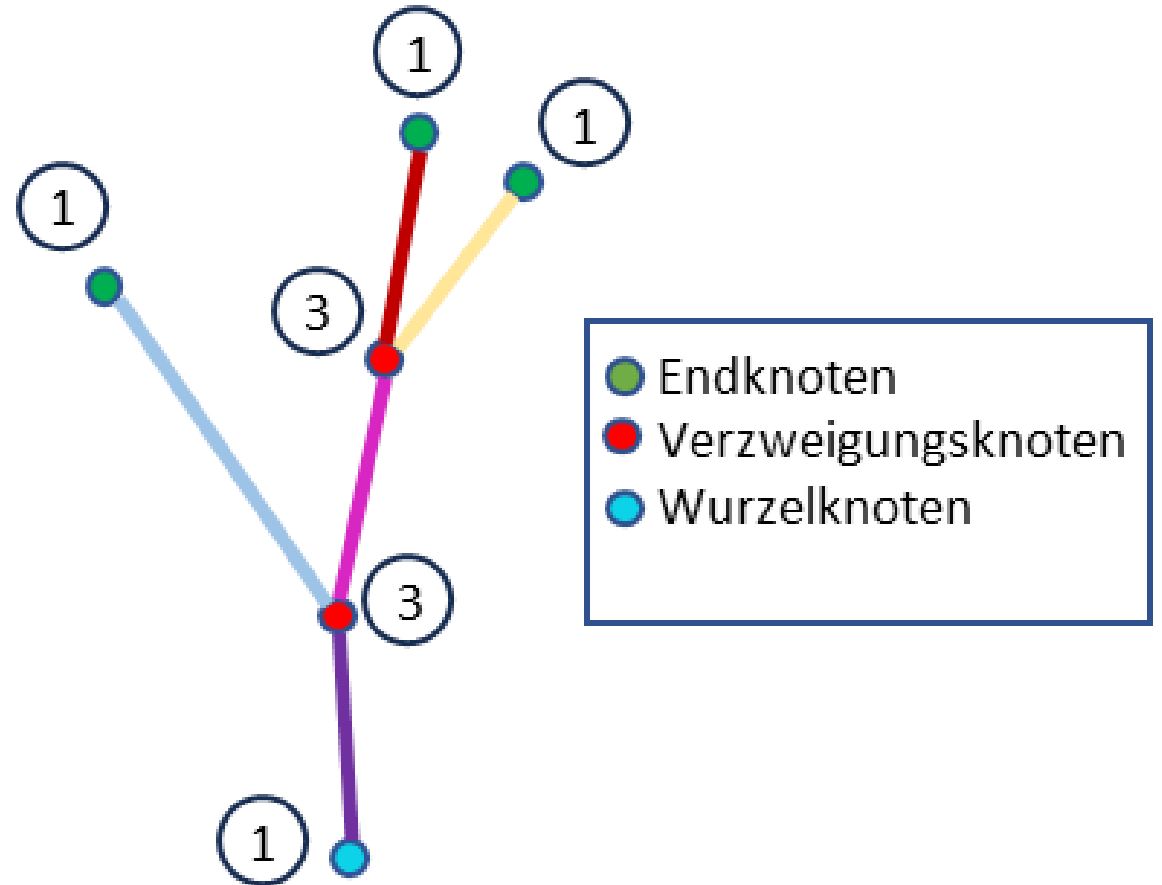
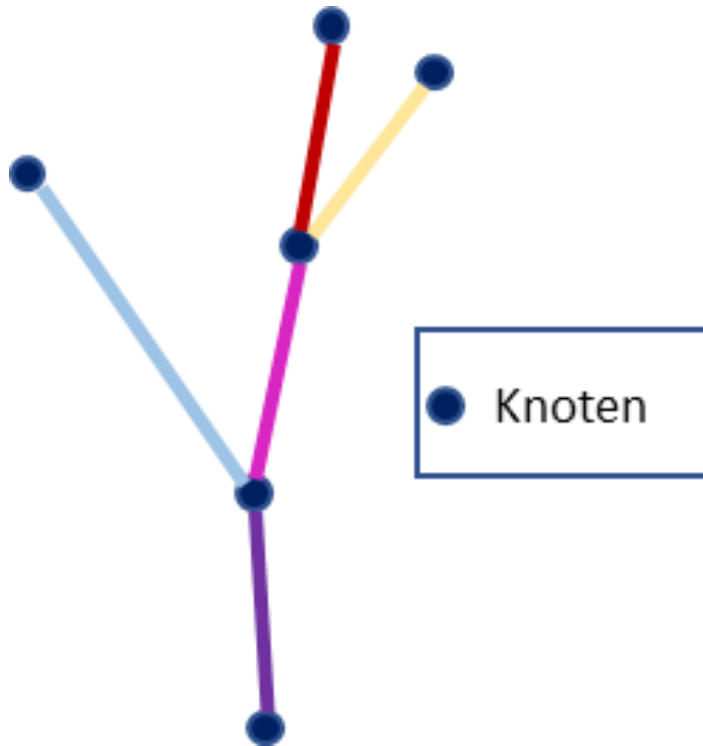
E) Endpunkte der Skelettierung verbessern



F) Position der Skelettpunkte verbessern

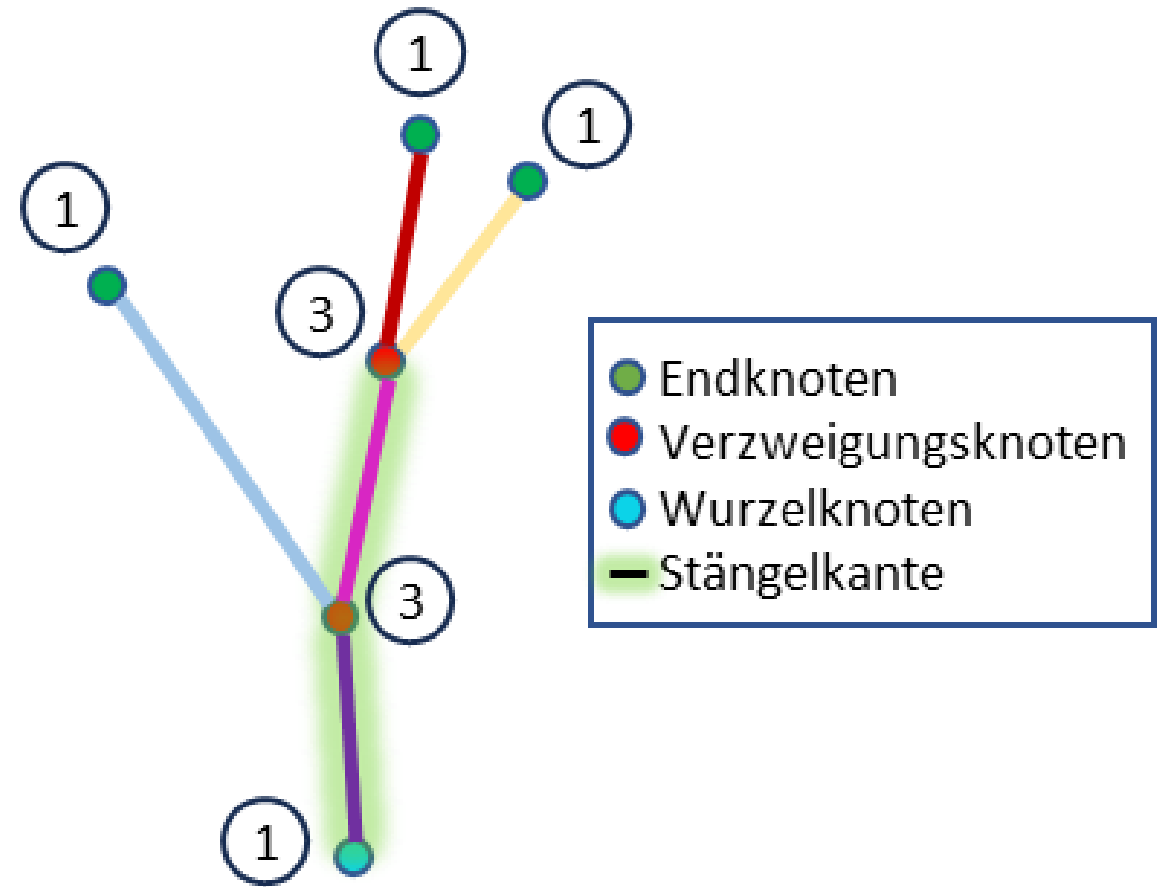
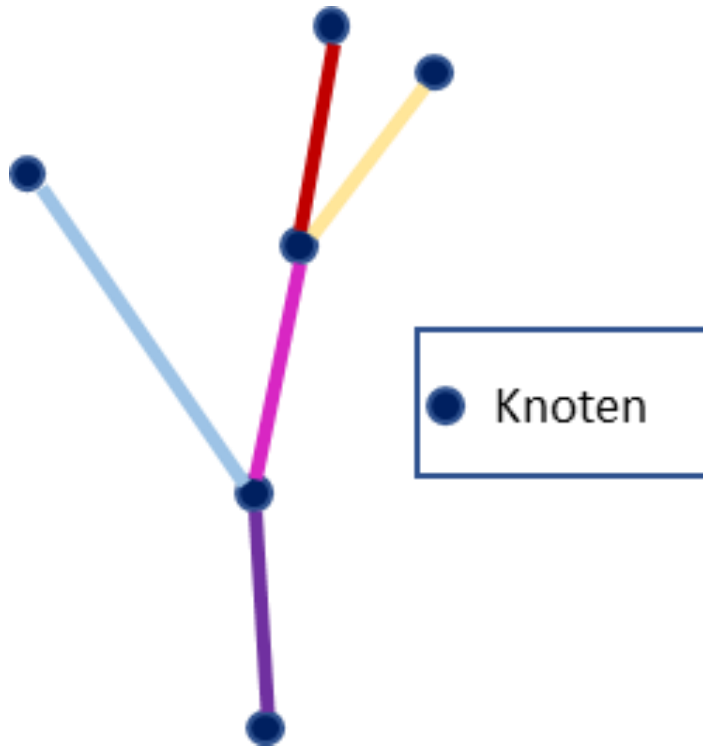


## 5) Graph segmentieren

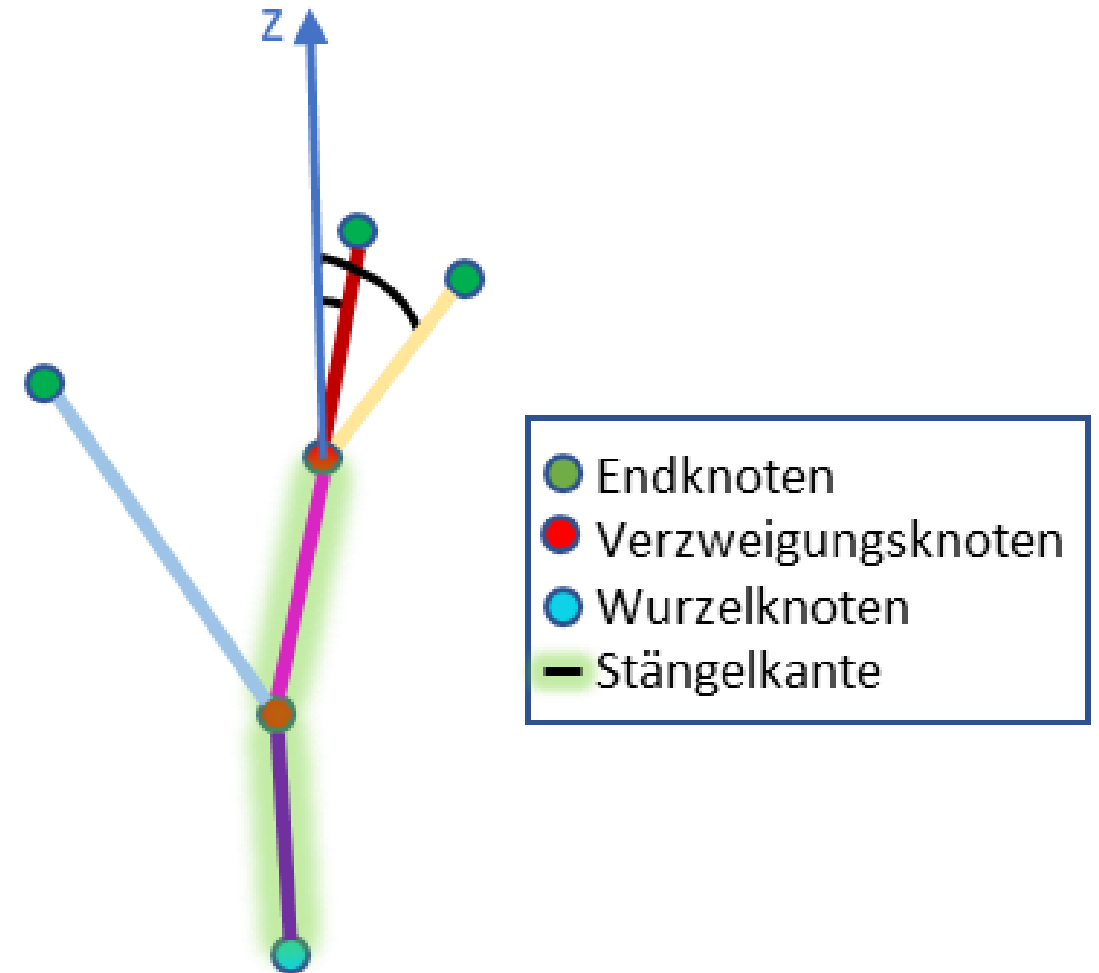
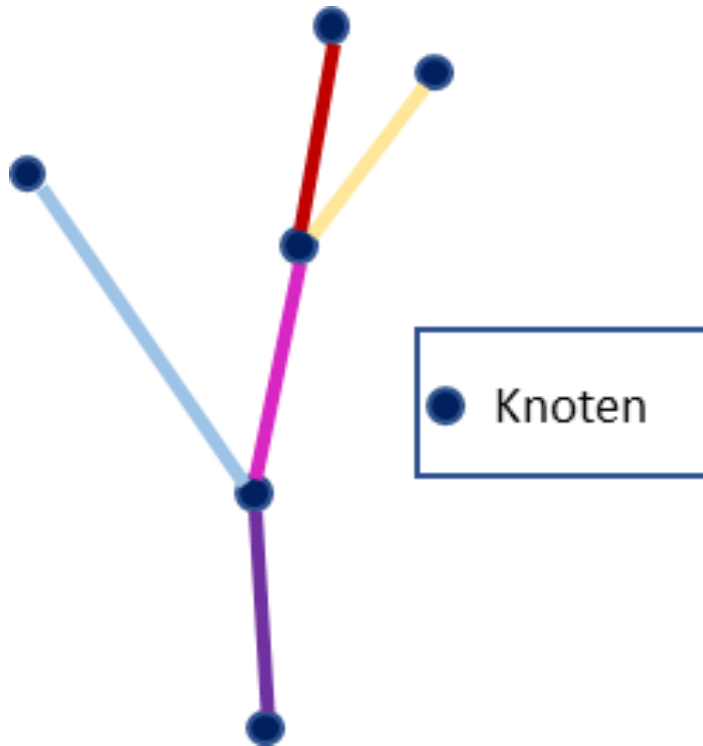




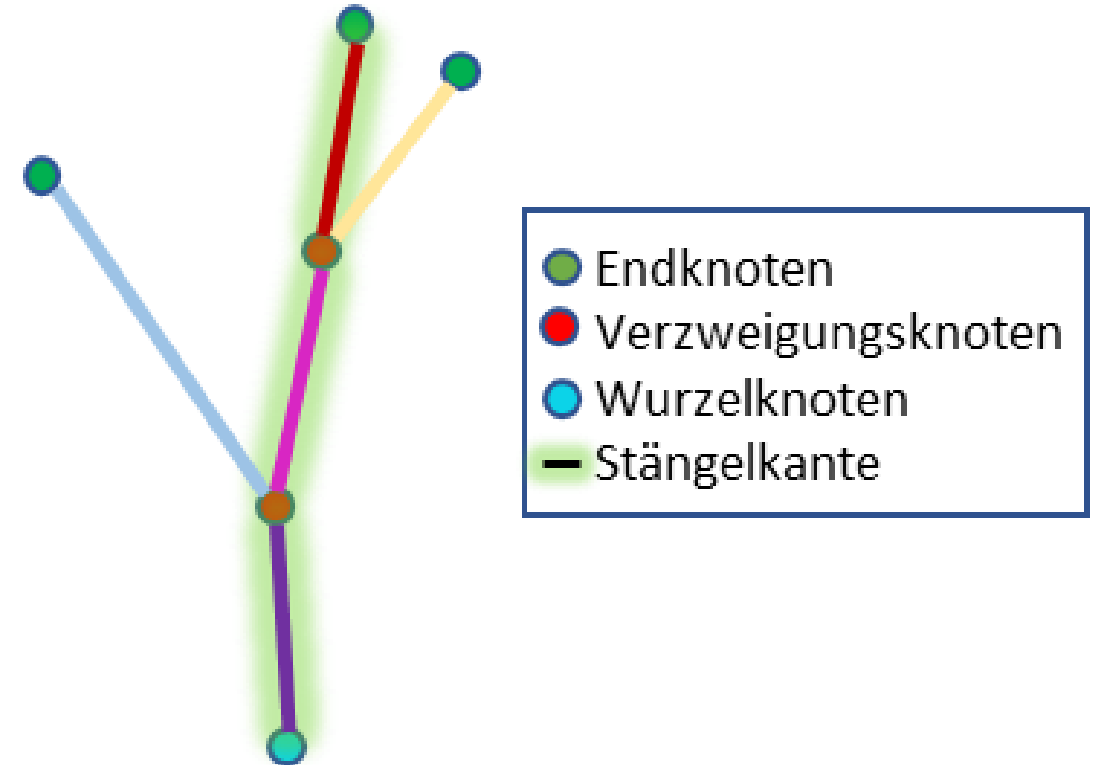
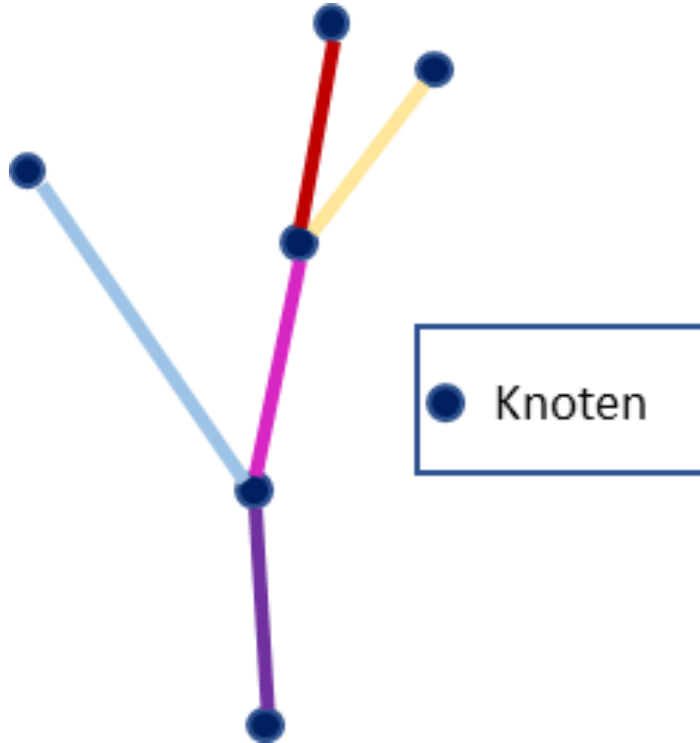
## 5) Graph segmentieren



## 5) Graph segmentieren



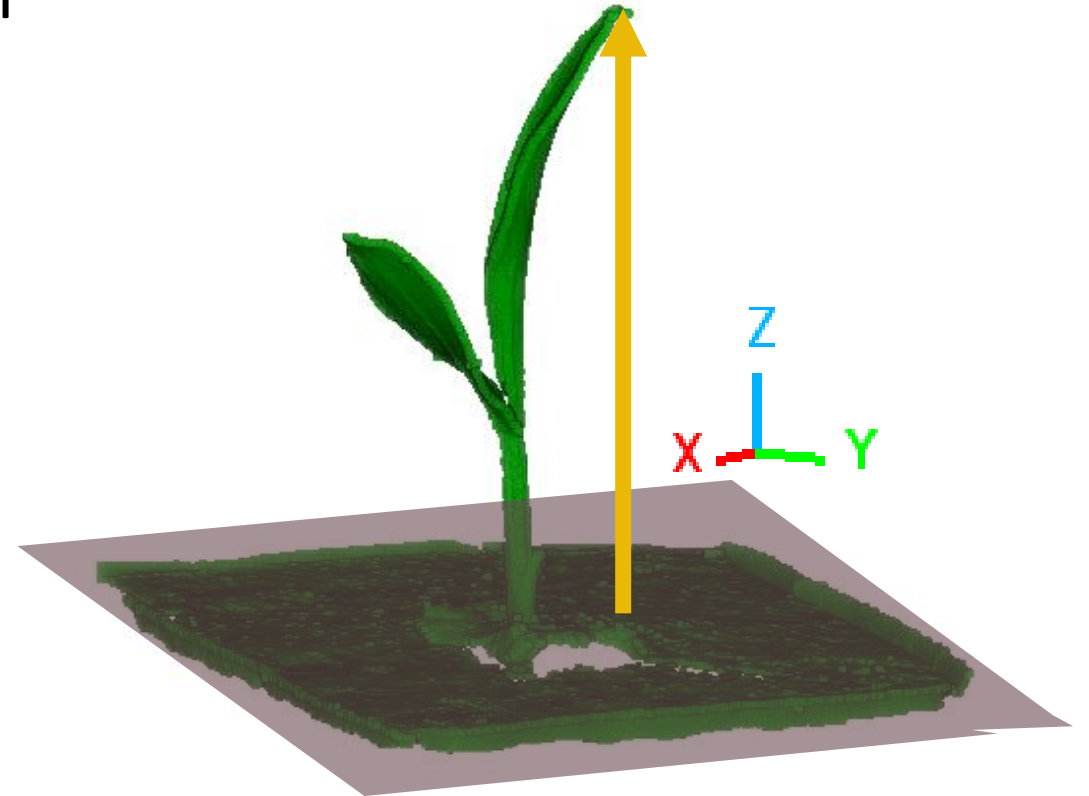
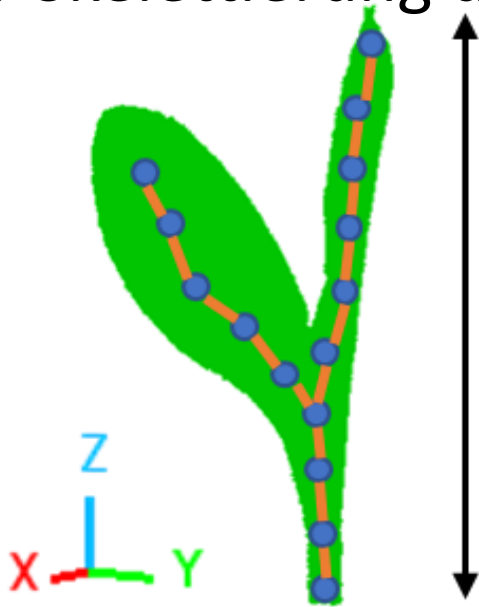
## 5) Graph segmentieren



## 6) Berechnung phänotypischer Parameter

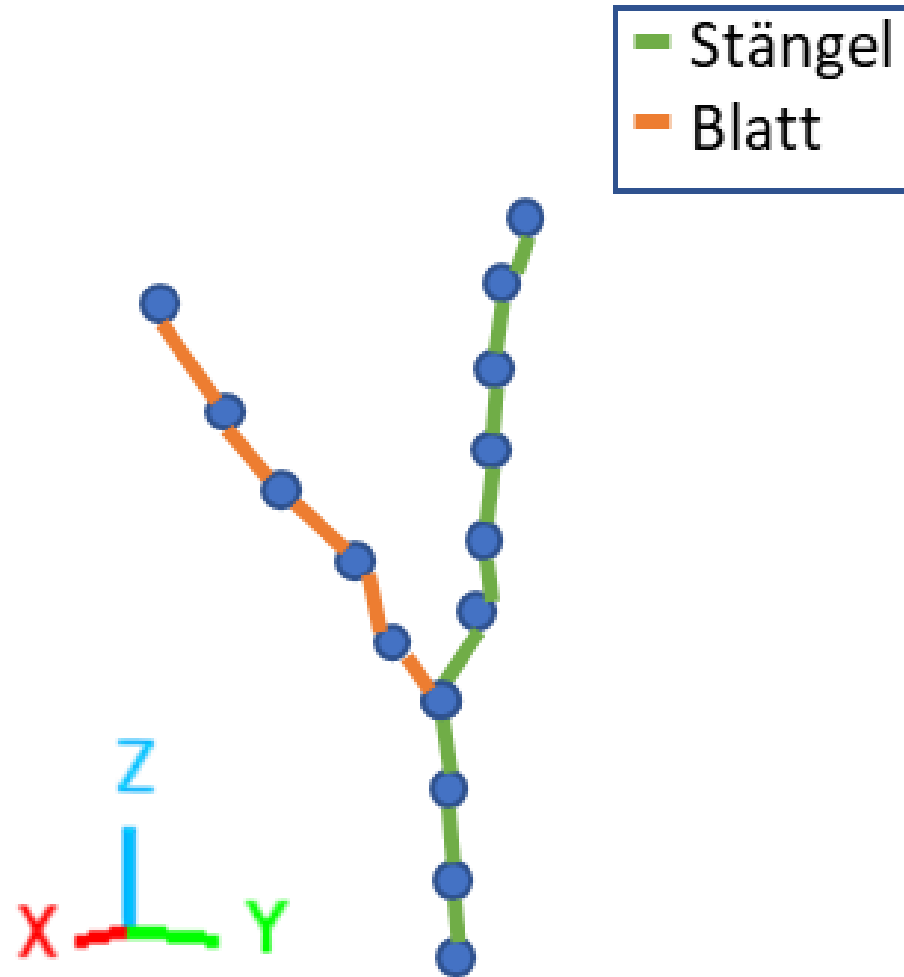
### A) Pflanzenhöhe

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



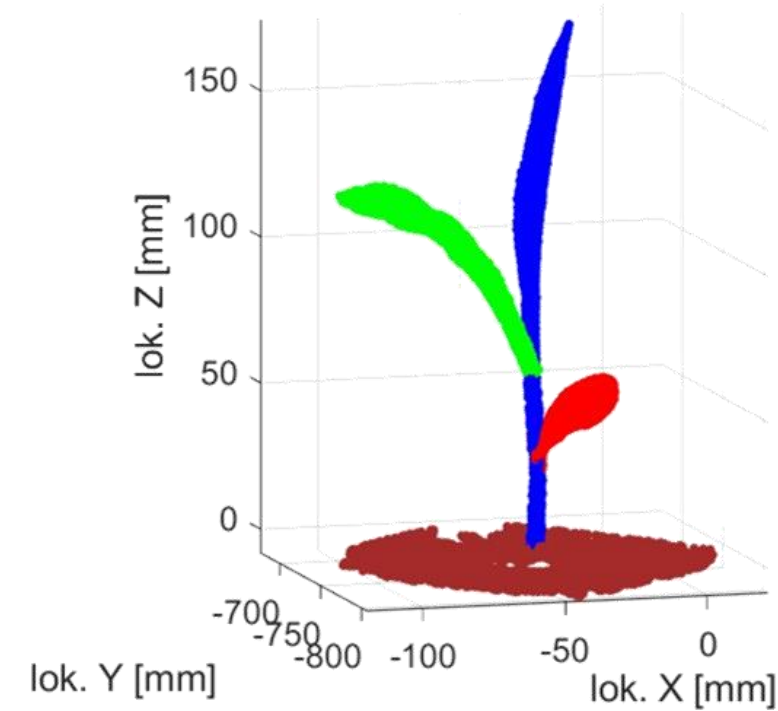
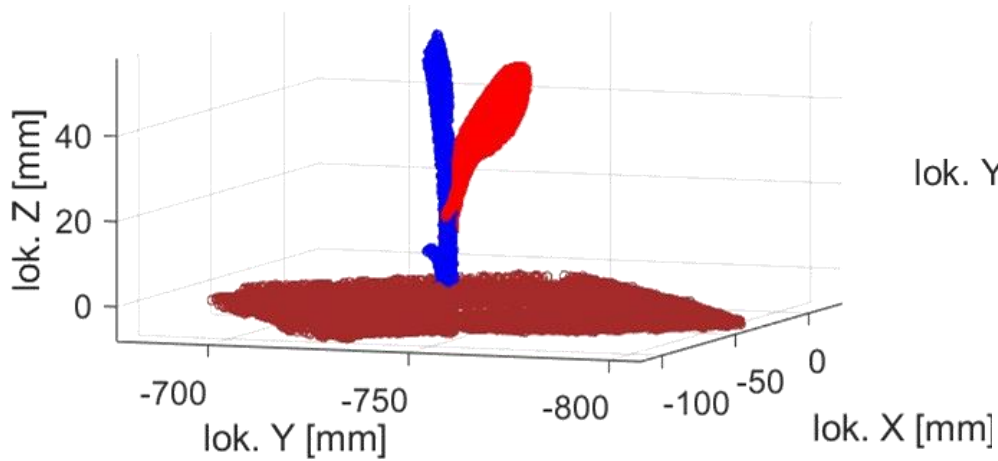
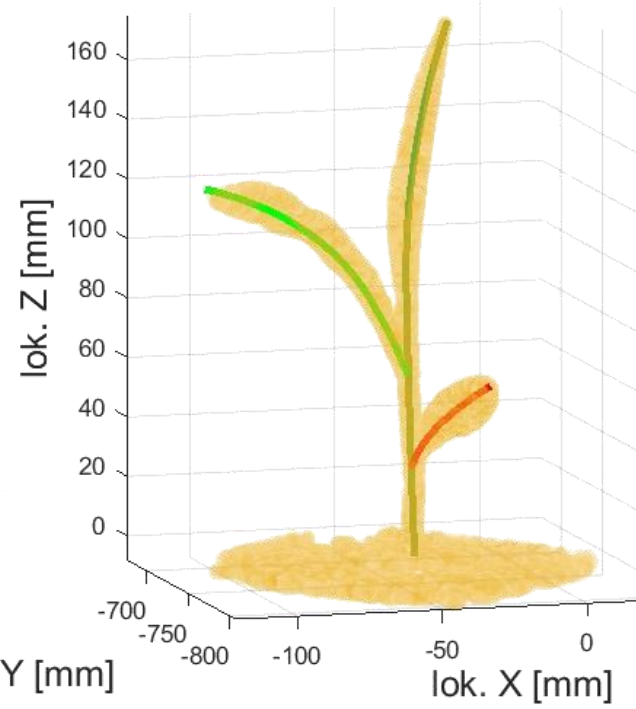
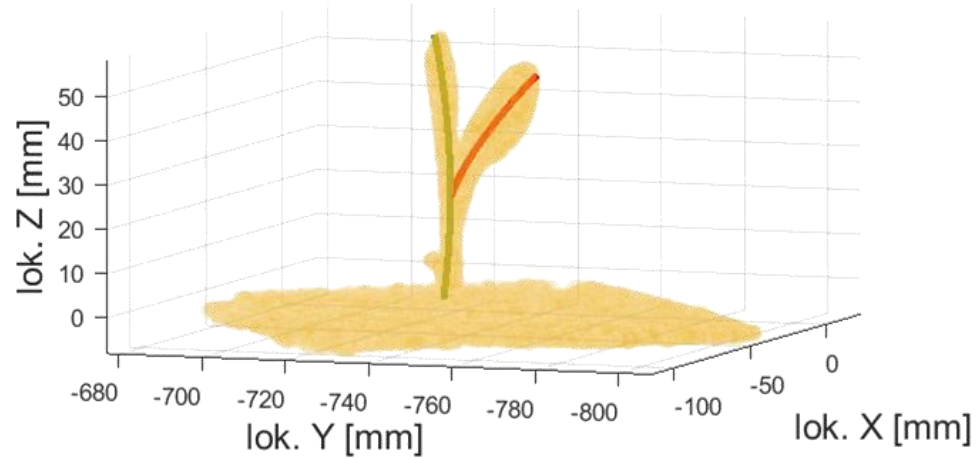
## 6) Berechnung phänotypischer Parameter

### C) Anzahl Blätter

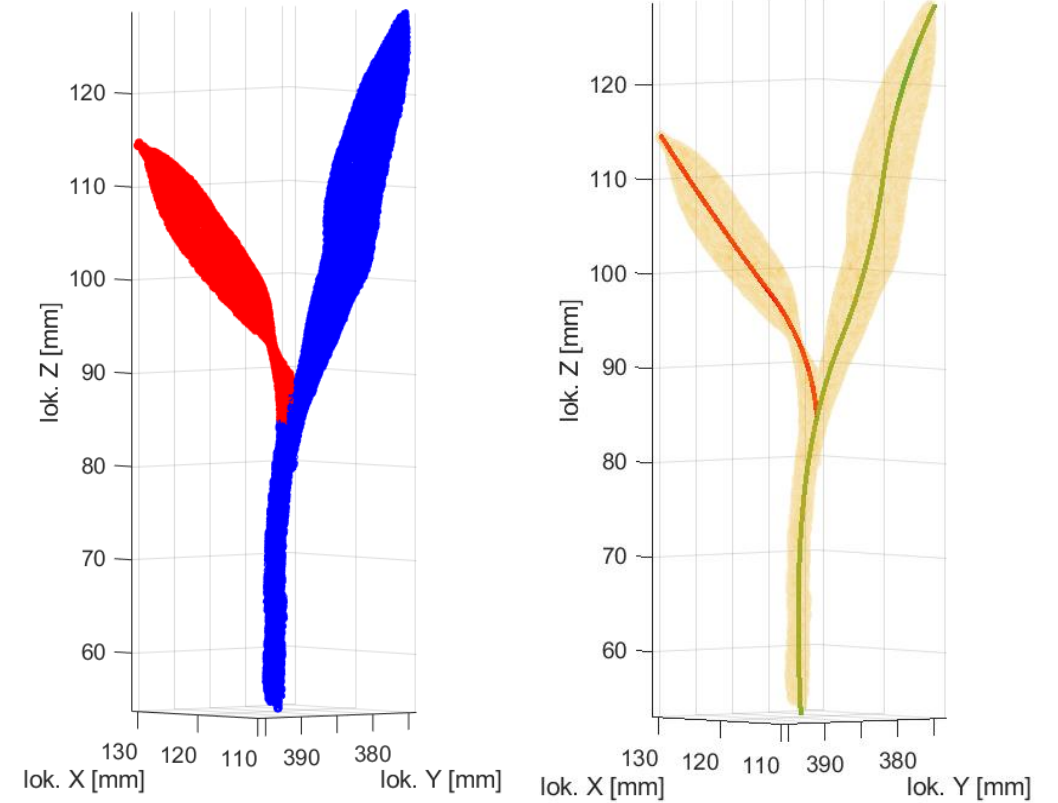
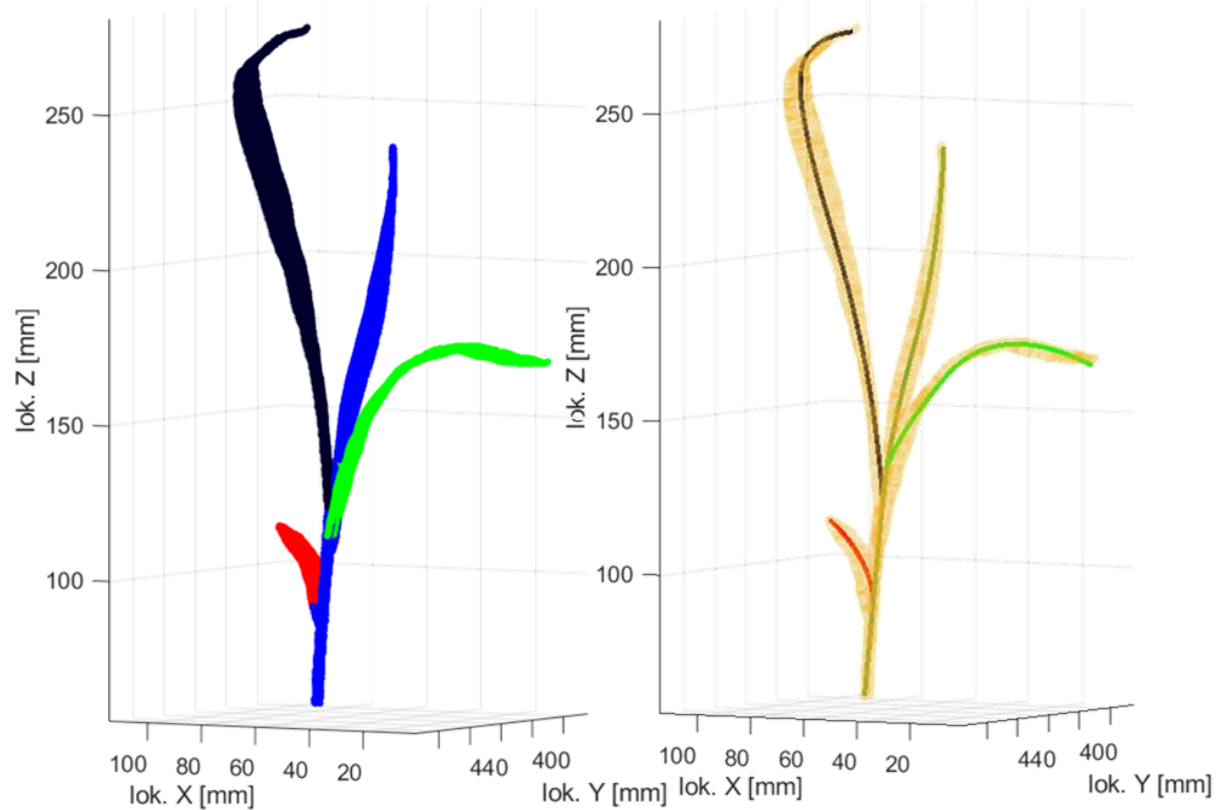




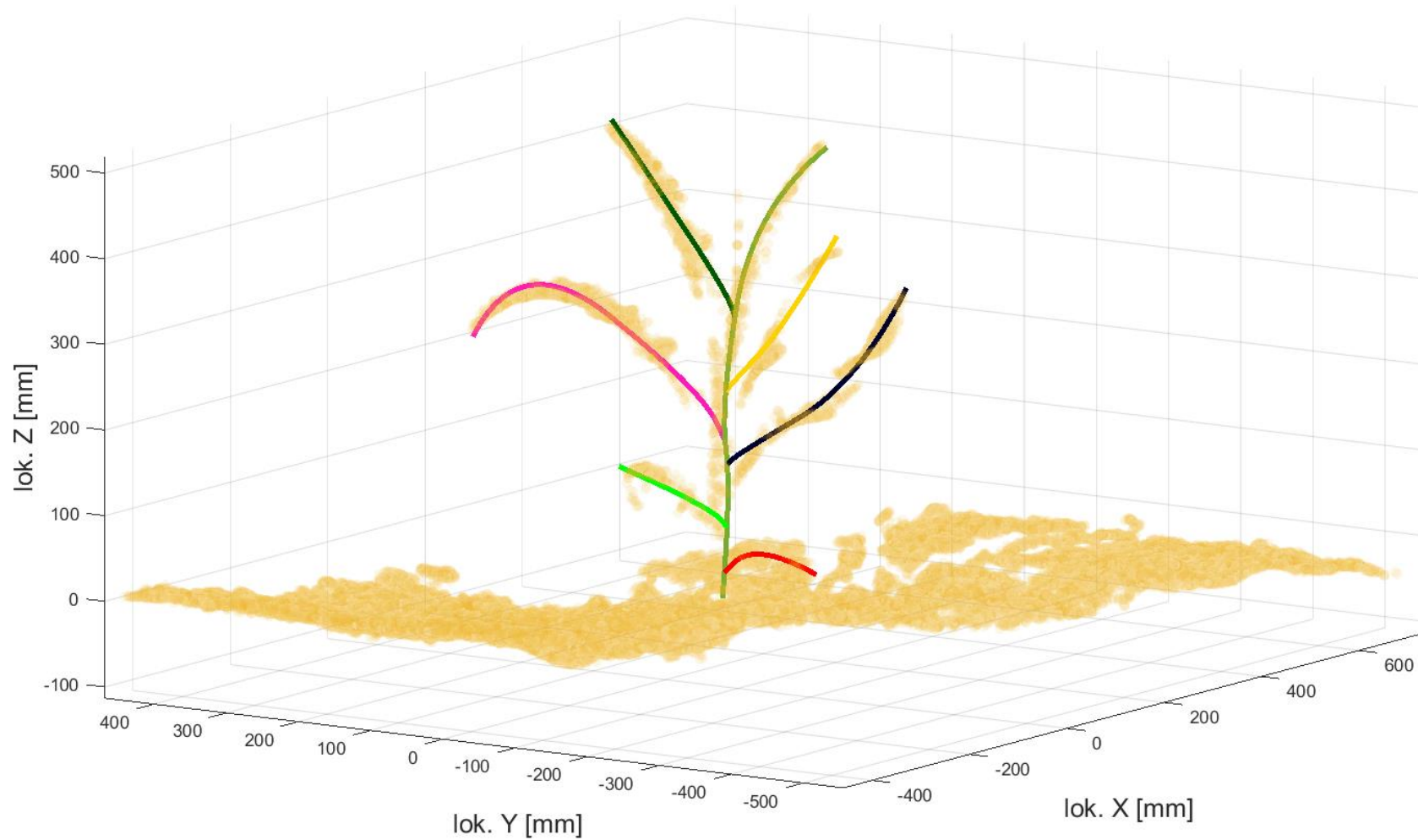
# Ergebnisse (Beispiele Mais)



# Ergebnisse (Beispiele Hirse)



# LMI Ergebnis



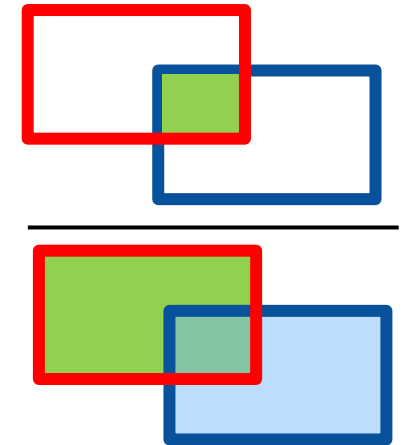


# Vergleich zu anderen Segmentierungsmethoden Pheno4D

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

$$\text{Dice Coeffizient (DC)} = \frac{2 * \text{Fläche der Schnittmenge}}{\text{Fläche}_1 + \text{Fläche}_2}$$

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

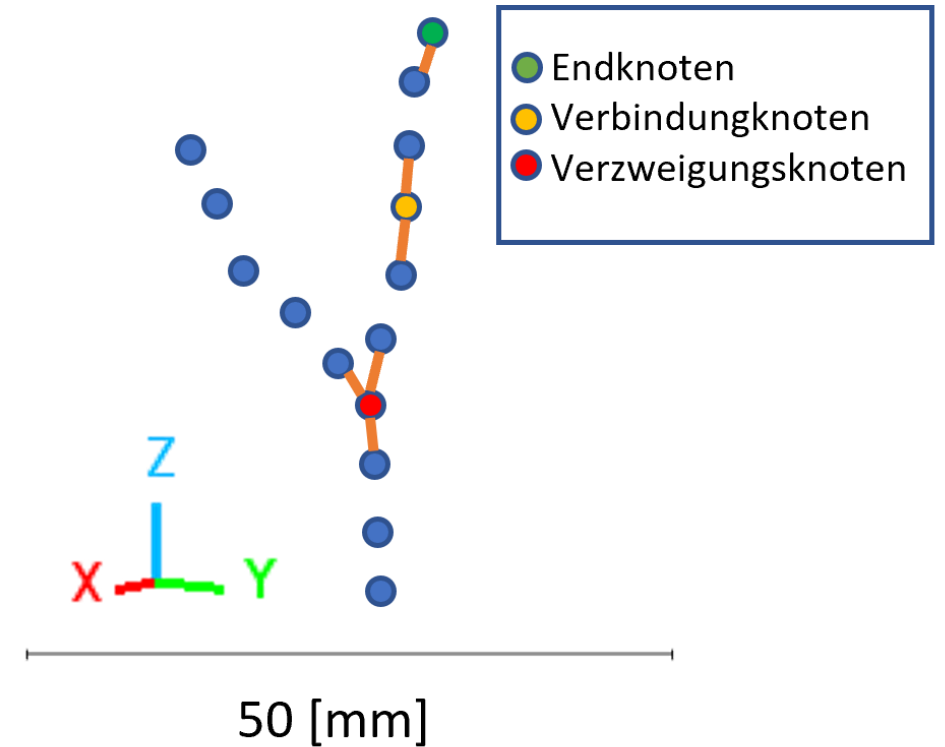




### 3) Berechnung des Graphens

- Skelettpunkte  $\triangleq$  Knoten

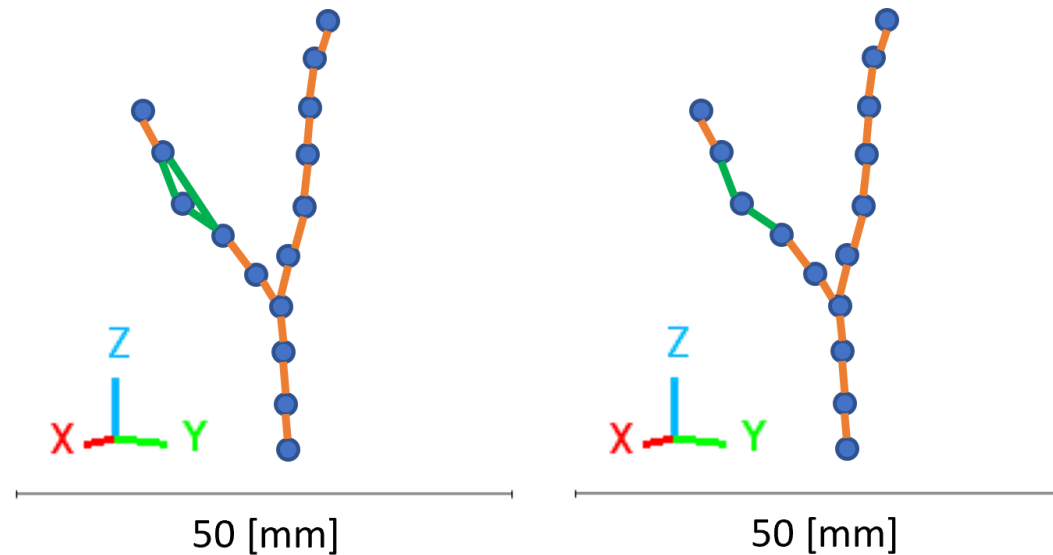
1) Alle Knoten werden mit drei nächsten Nachbarn verbunden



### 3) Berechnung des Graphens

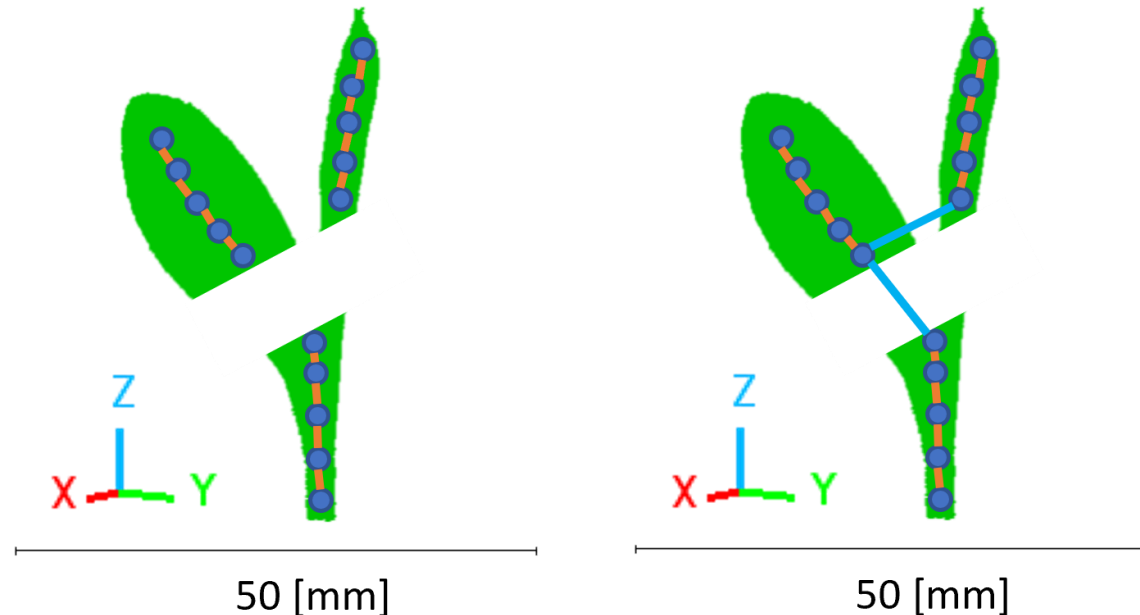
- Skelettpunkte  $\triangleq$  Knoten

- 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

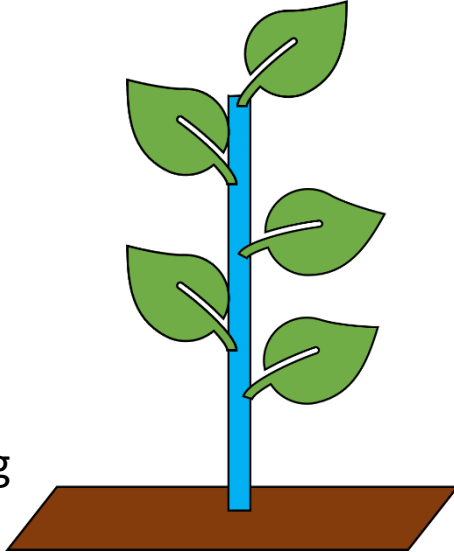


## 4A) Bodenkanten entfernen

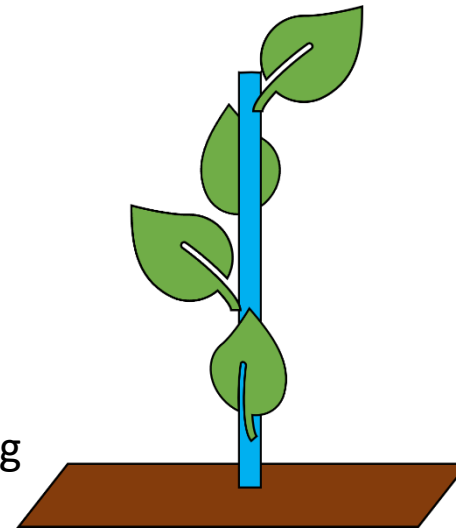
Verwendetes Vorwissen über die Pflanzen:

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

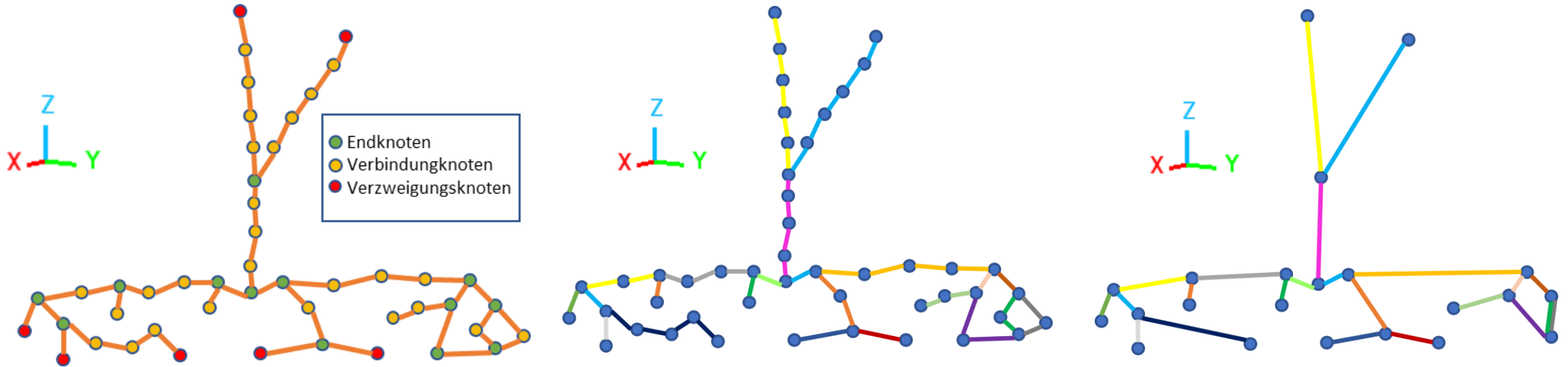
Wechselseitig  
zweizeilig



Wechselseitig  
spiralförmig

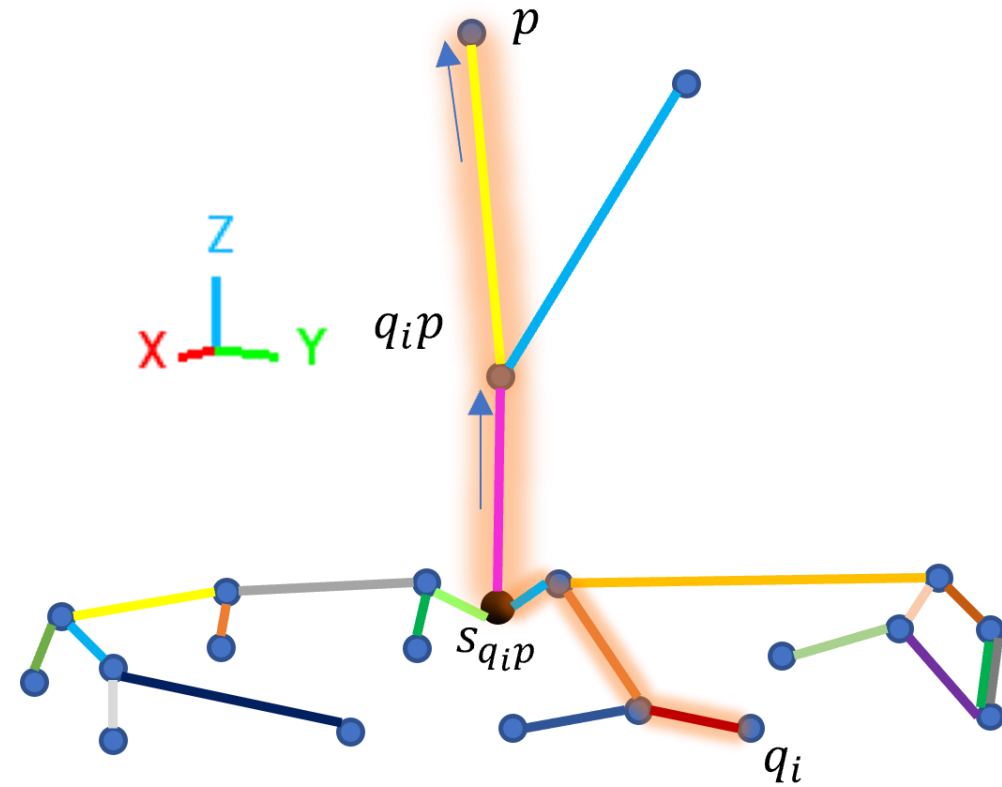
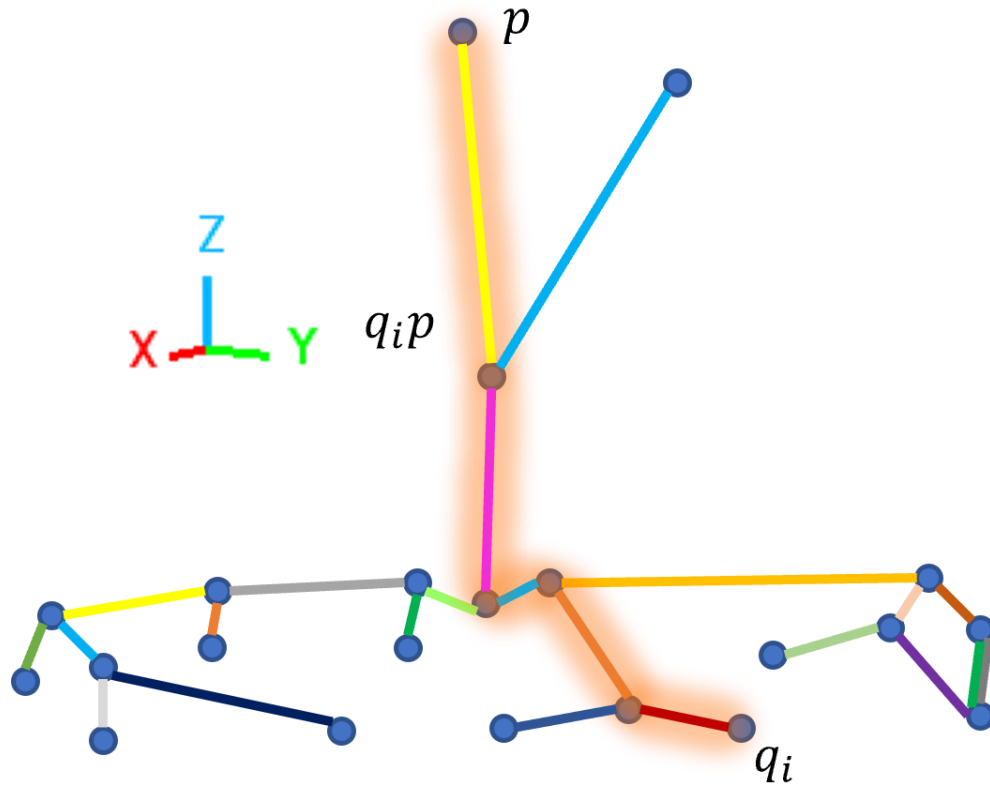


# 4A) Bodenkanten entfernen

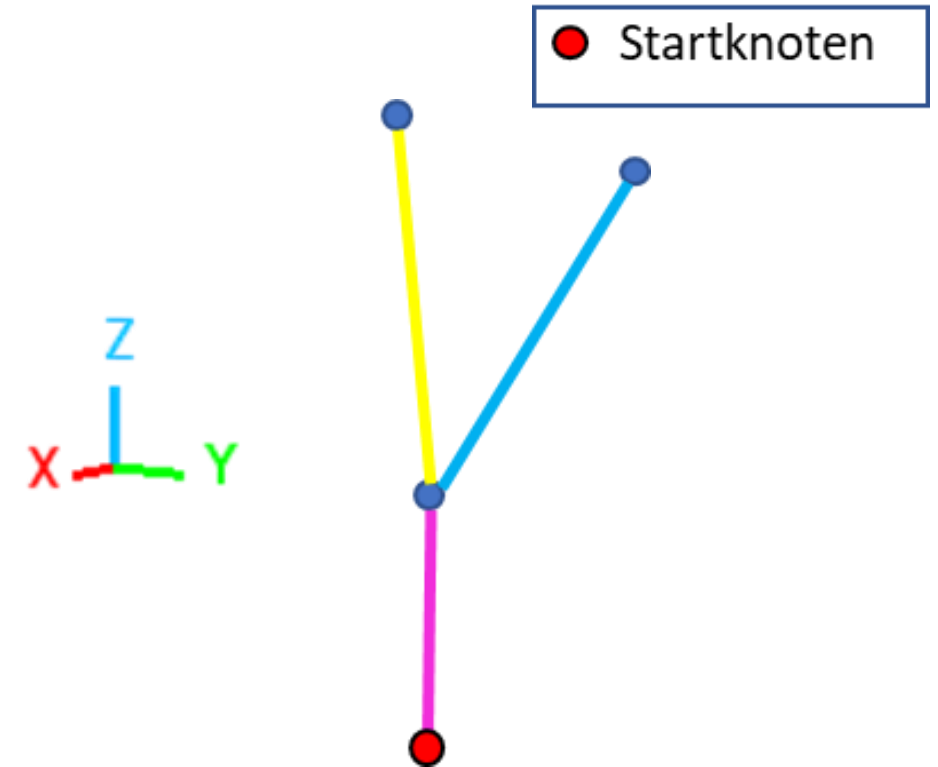
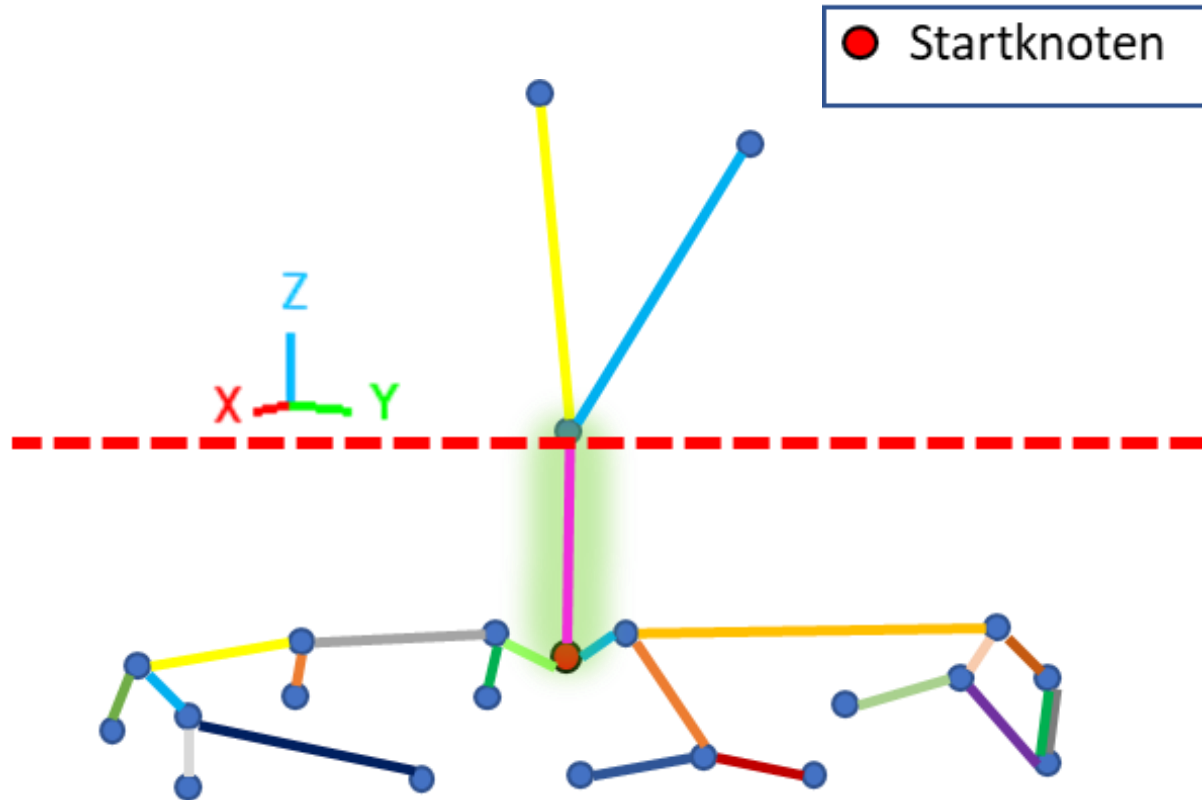




## 4A) Bodenkanten entfernen



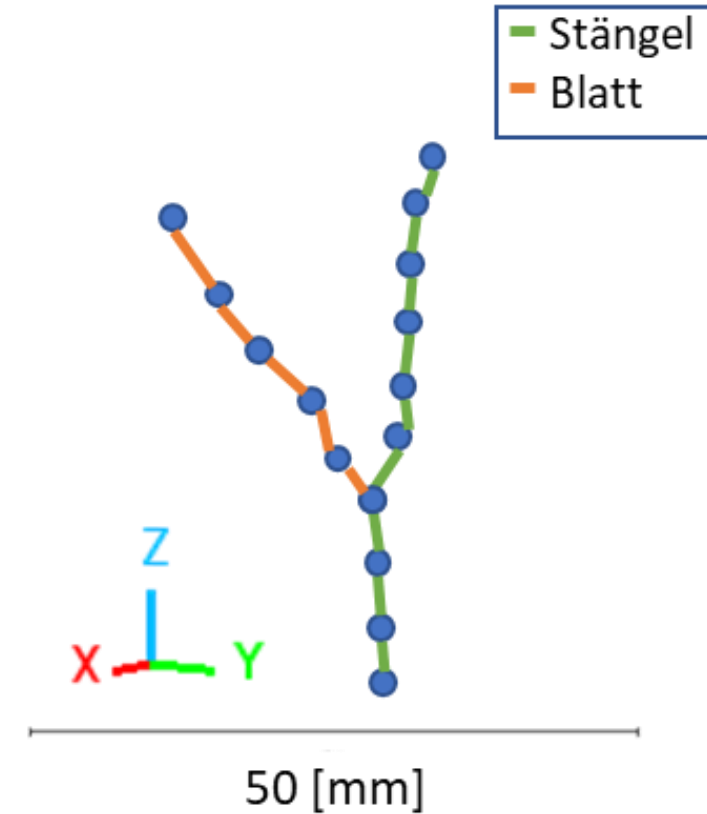
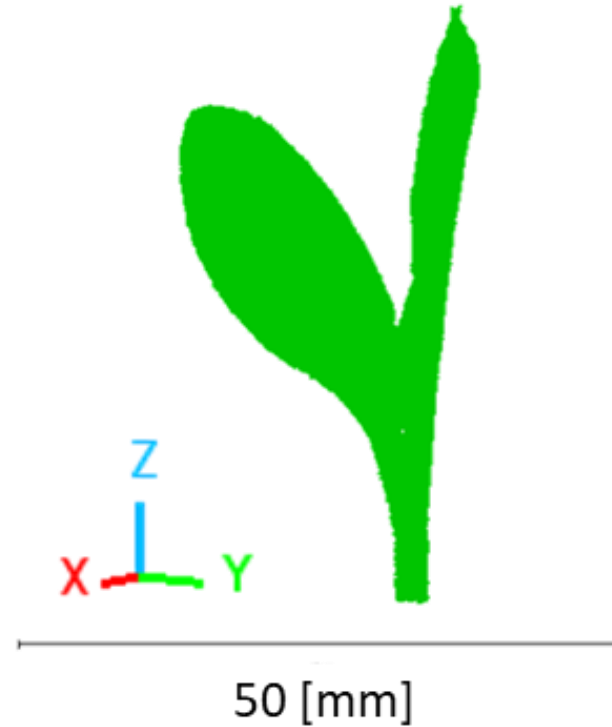
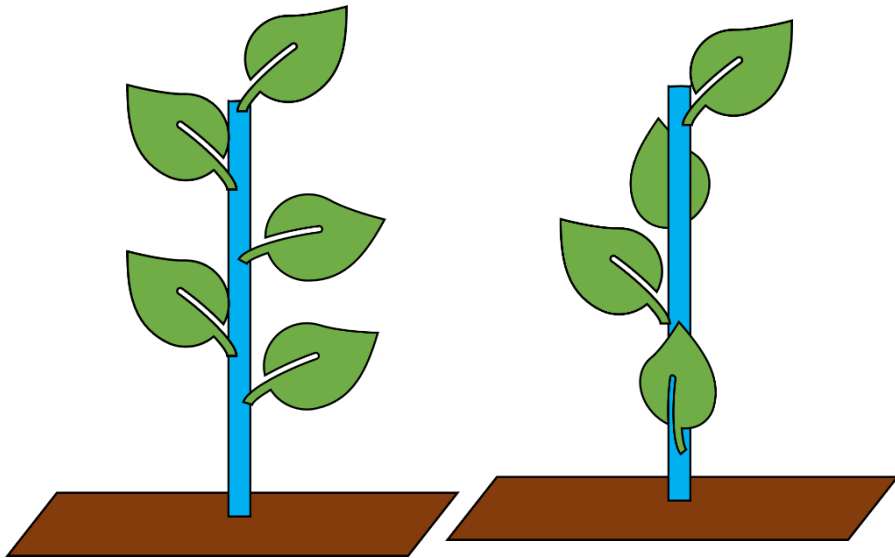
## 4A) Bodenkanten entfernen



## 4F) Position der Knoten verbessern

Vorwissen über Pflanze:

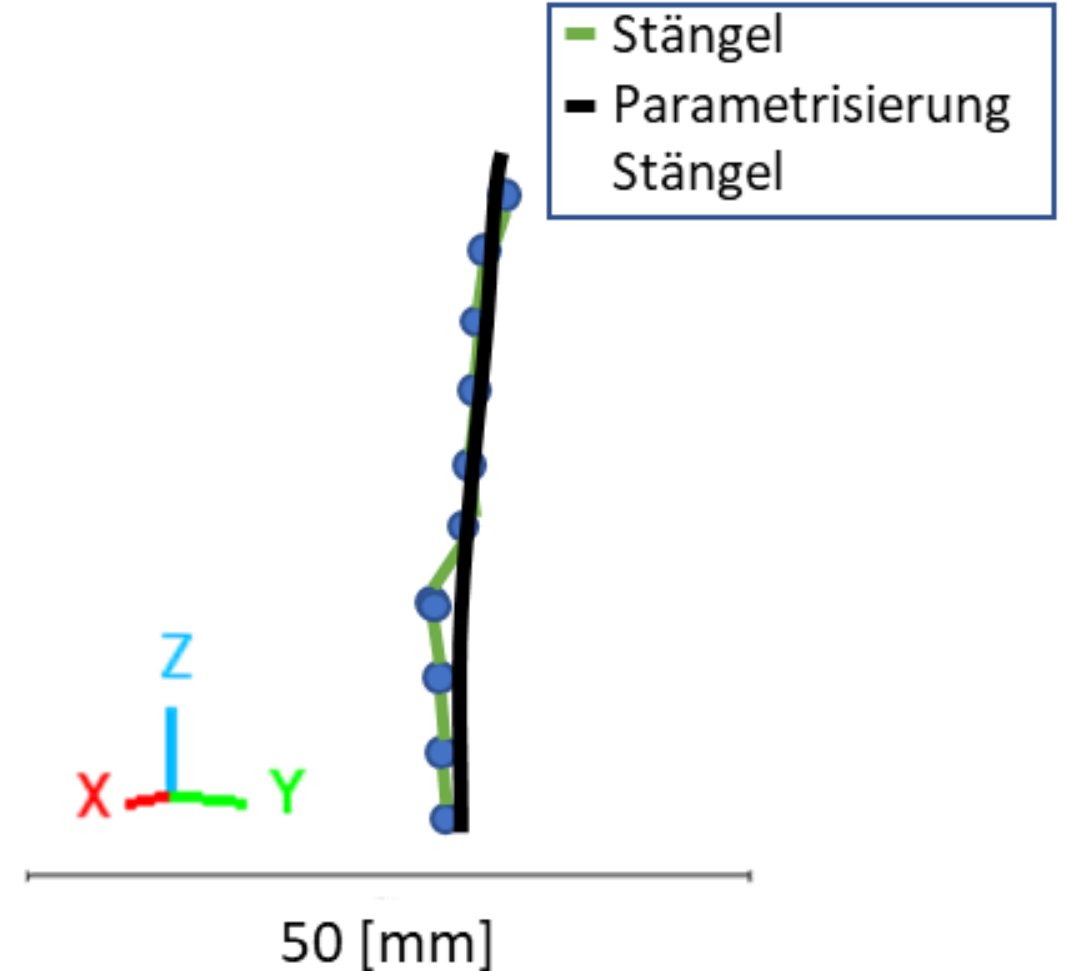
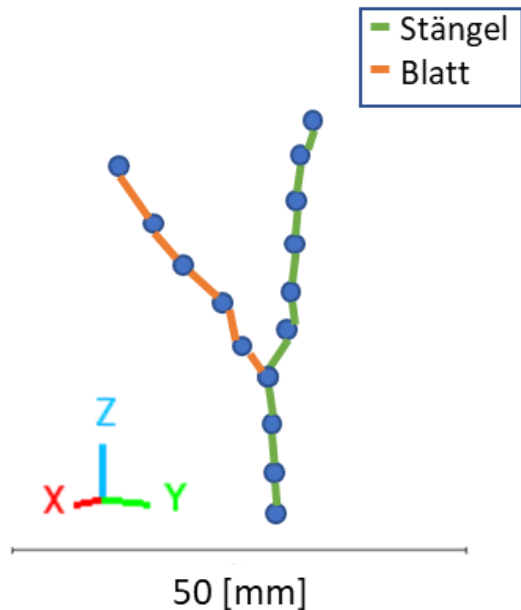
- Wechselseitige Phyllotaxis der Pflanzen
- Monopodiales Wachstum



## 4F) Position der Knoten verbessern

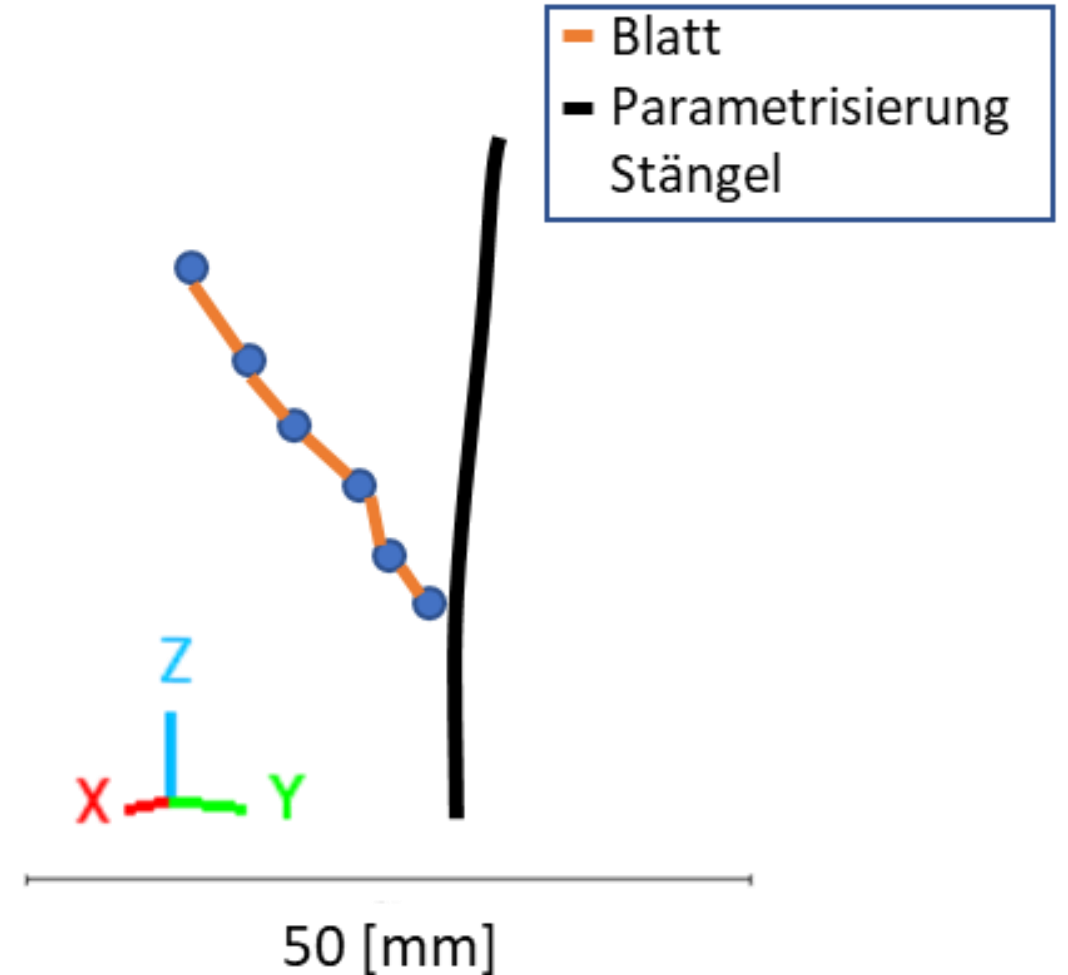
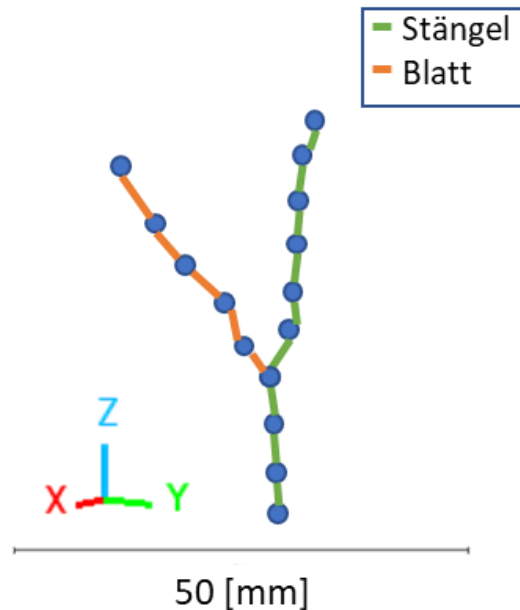
### 1. Parametrisierung des Stängels

→ Stückweise definierte C1 stetige quadratische Beziér-Kurven



## 4F) Position der Knoten verbessern

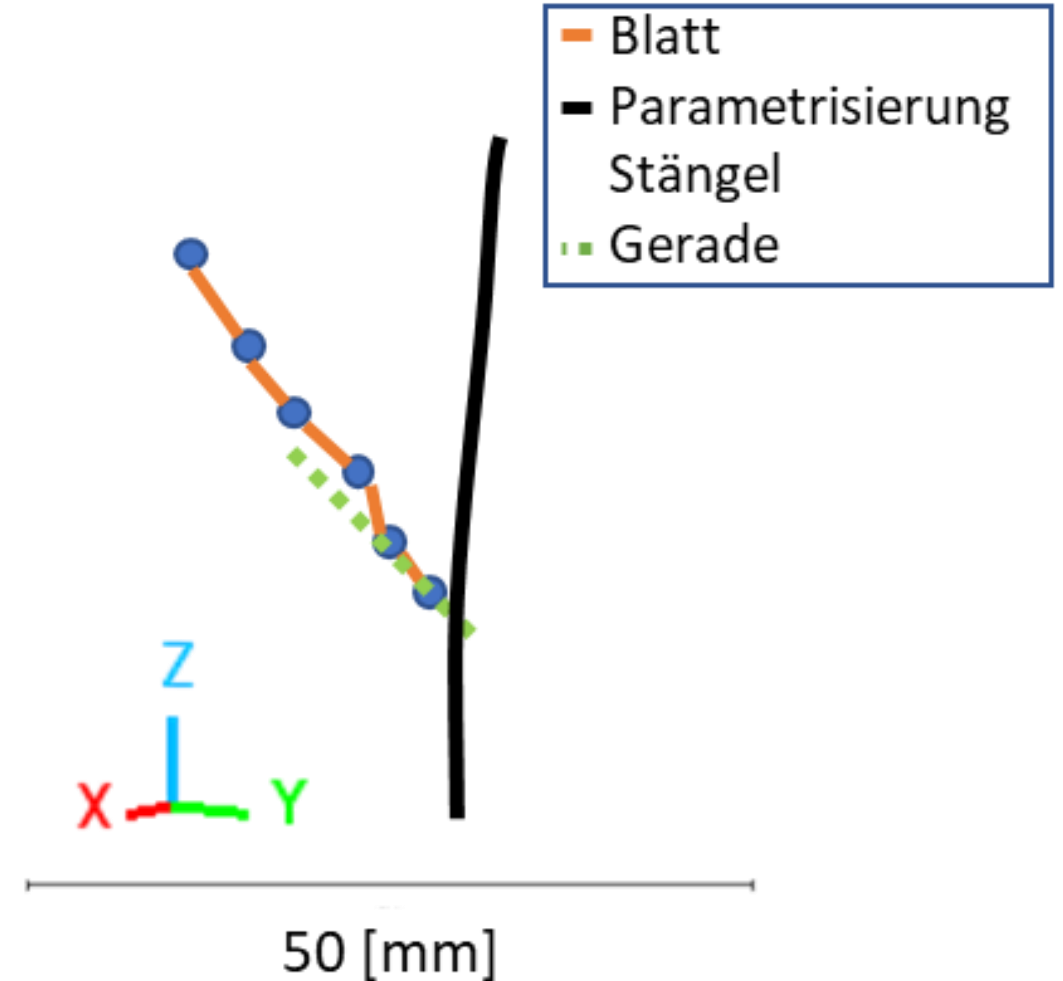
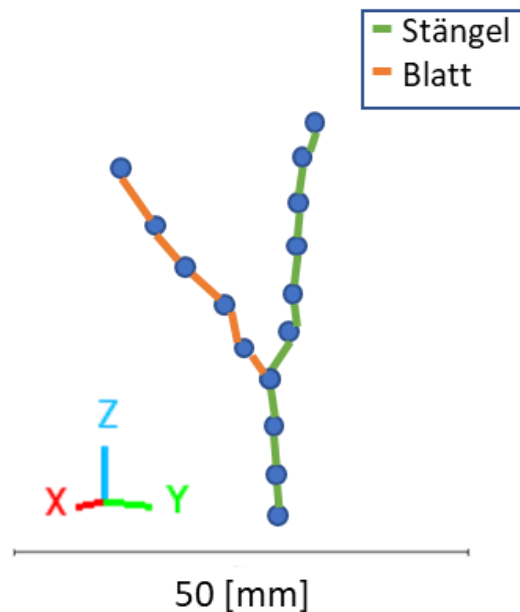
1. Parametrisierung des Stängels
2. Parametrisierung der Blätter





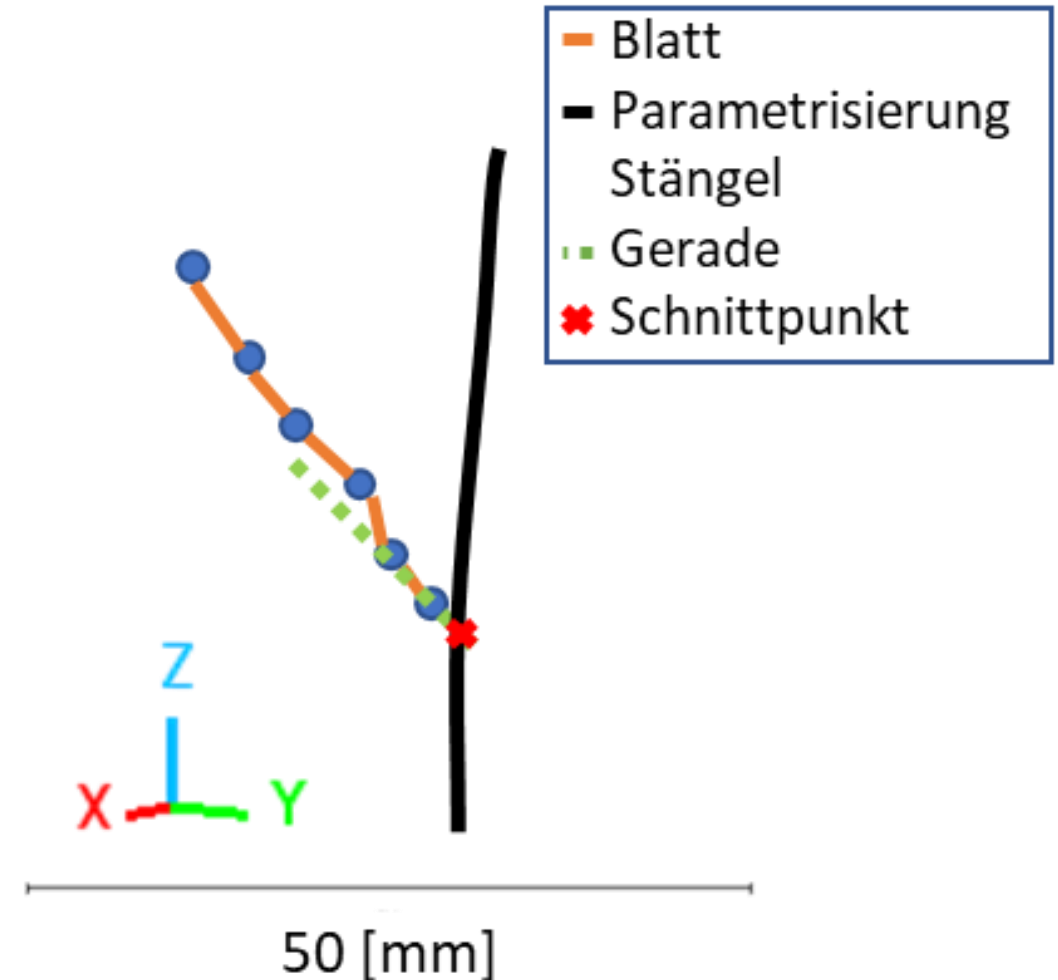
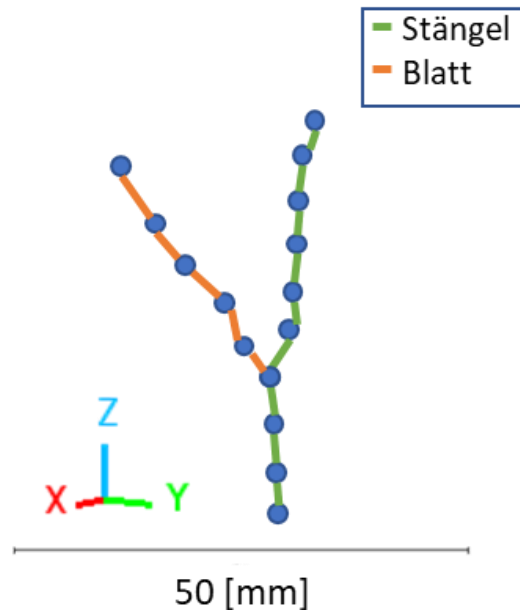
## 4F) Position der Knoten verbessern

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



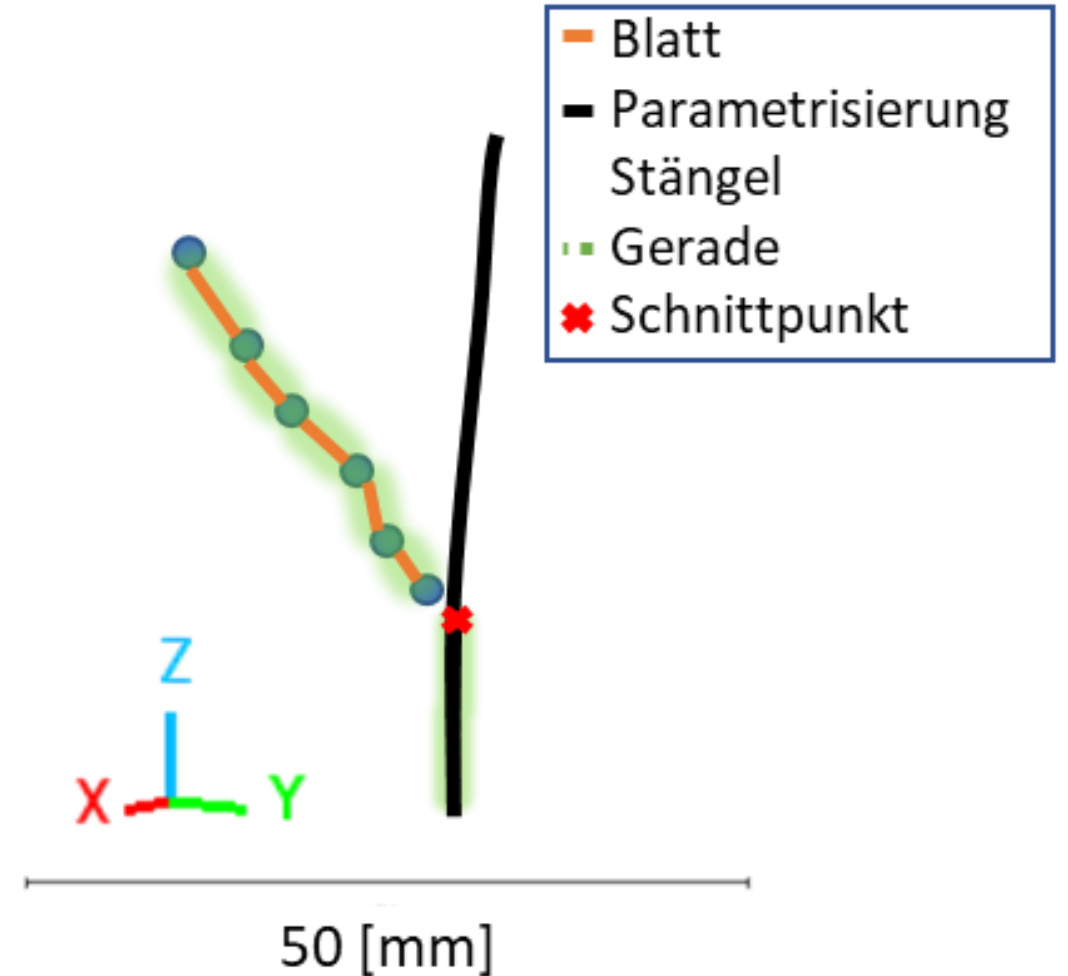
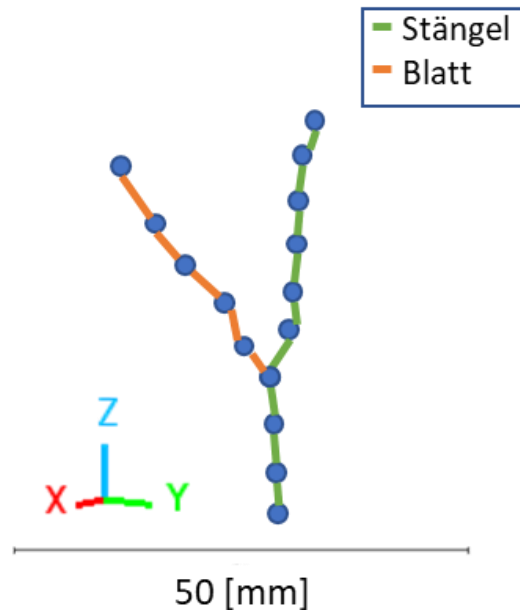
## 4F) Position der Knoten verbessern

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



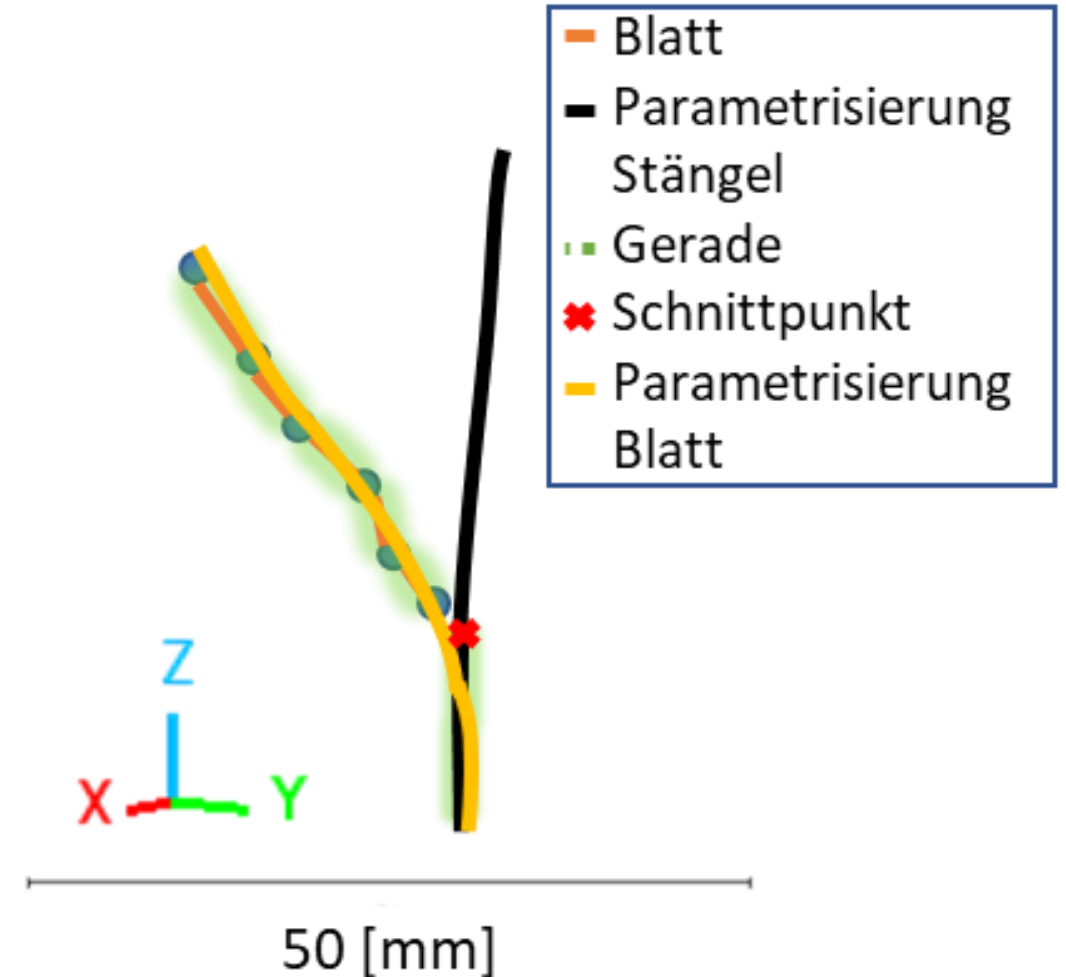
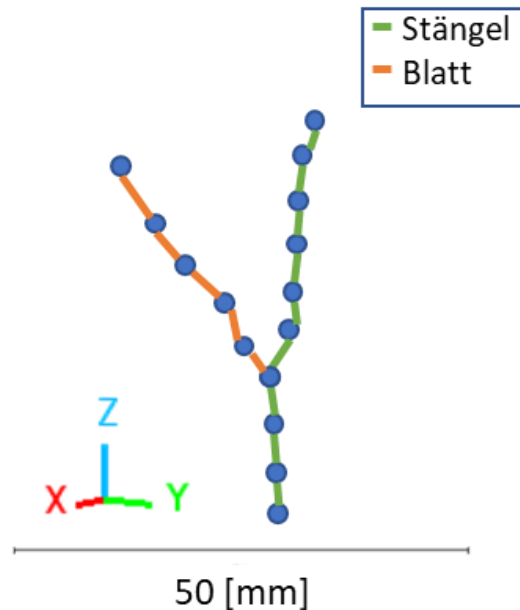
## 4F) Position der Knoten verbessern

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



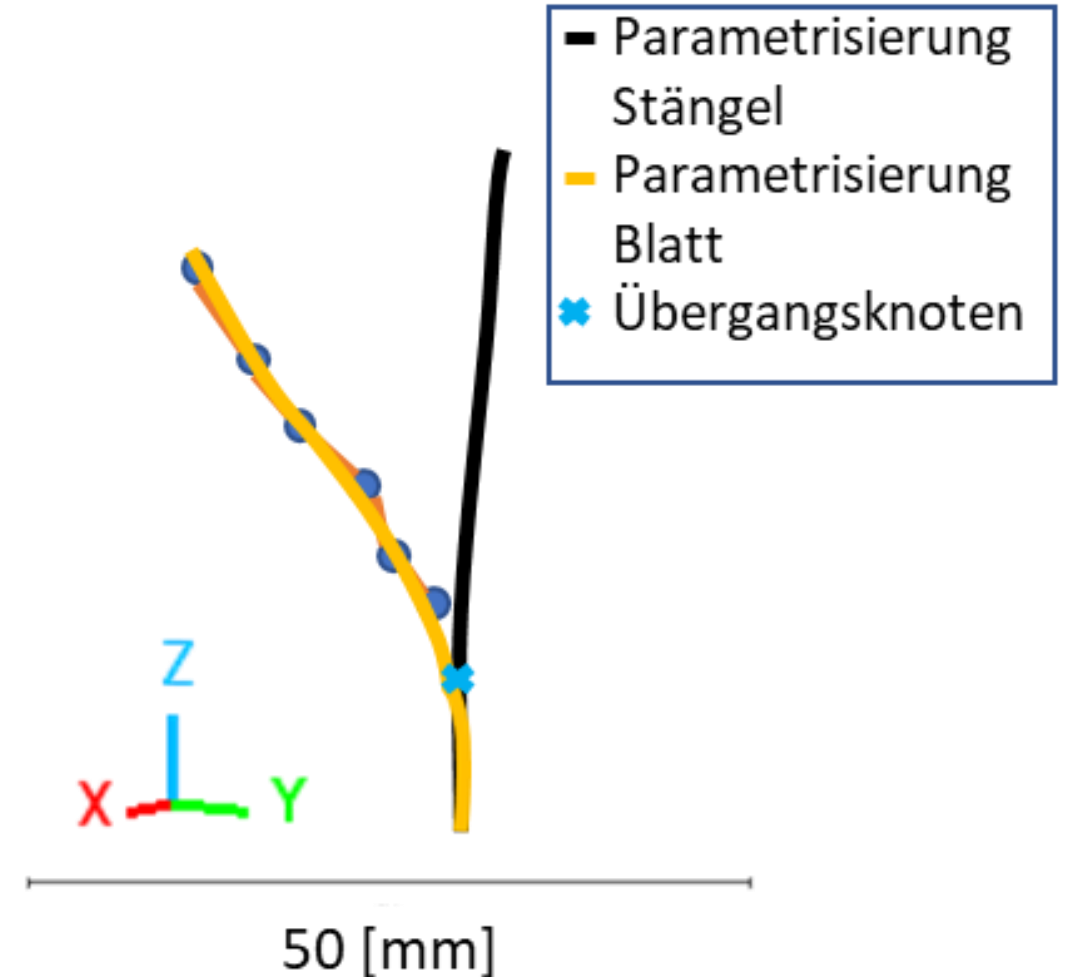
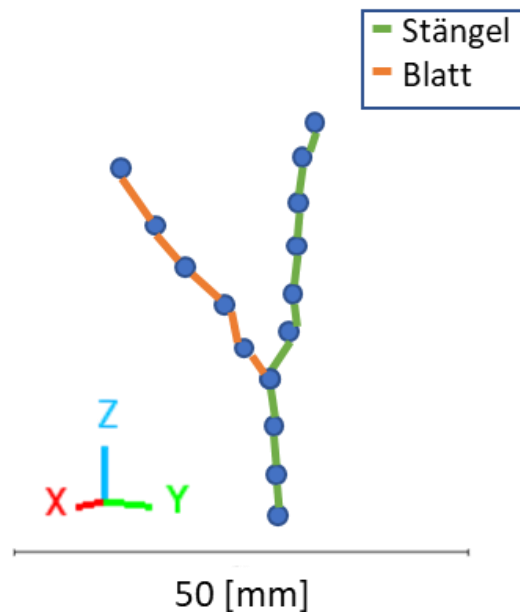
## 4F) Position der Knoten verbessern

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



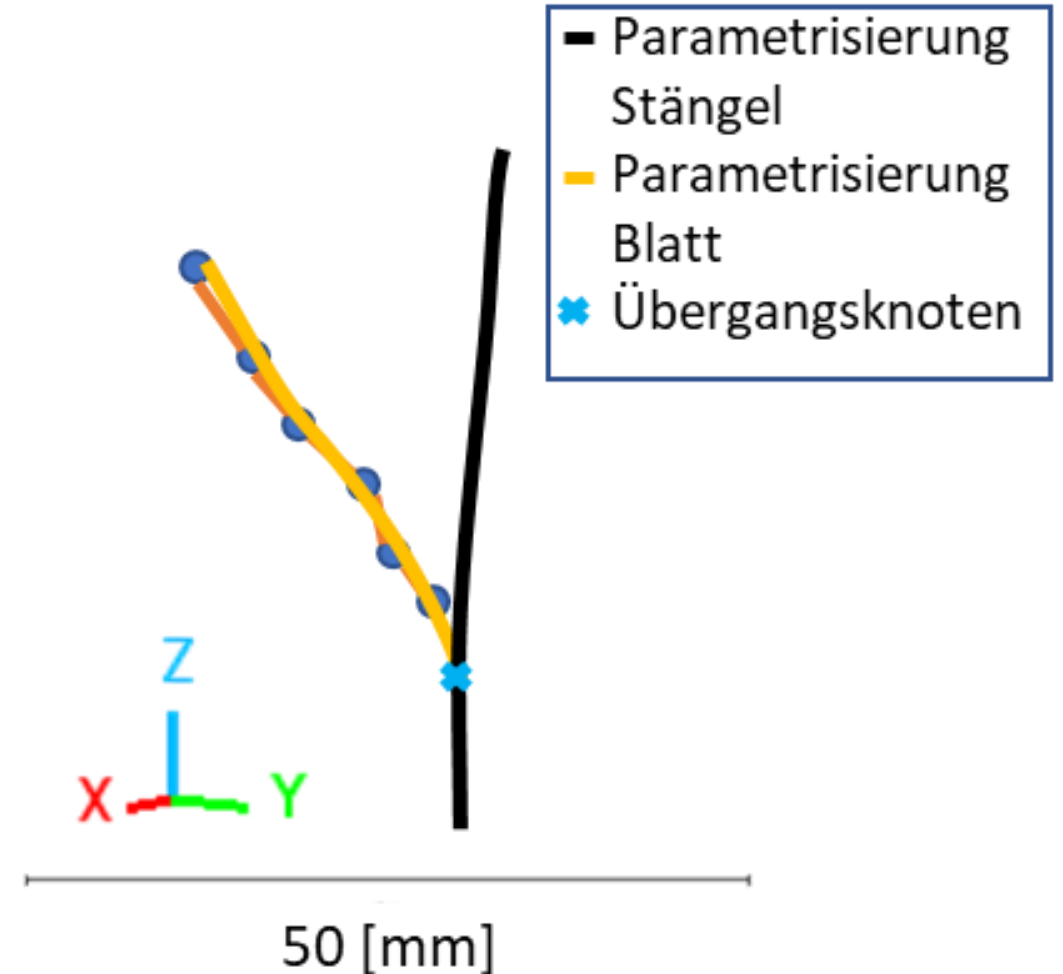
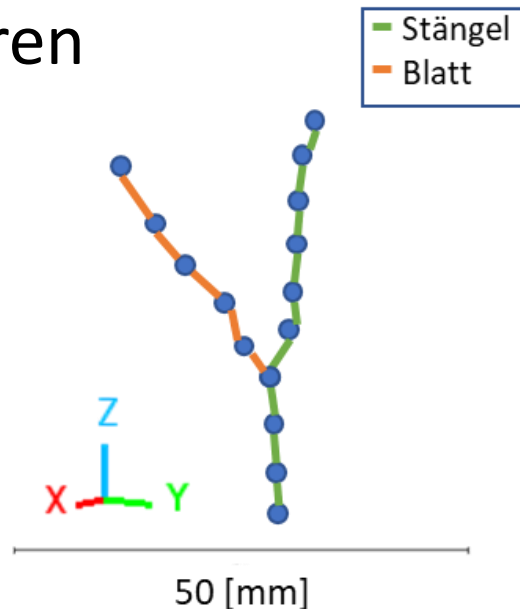
## 4F) Position der Knoten verbessern

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



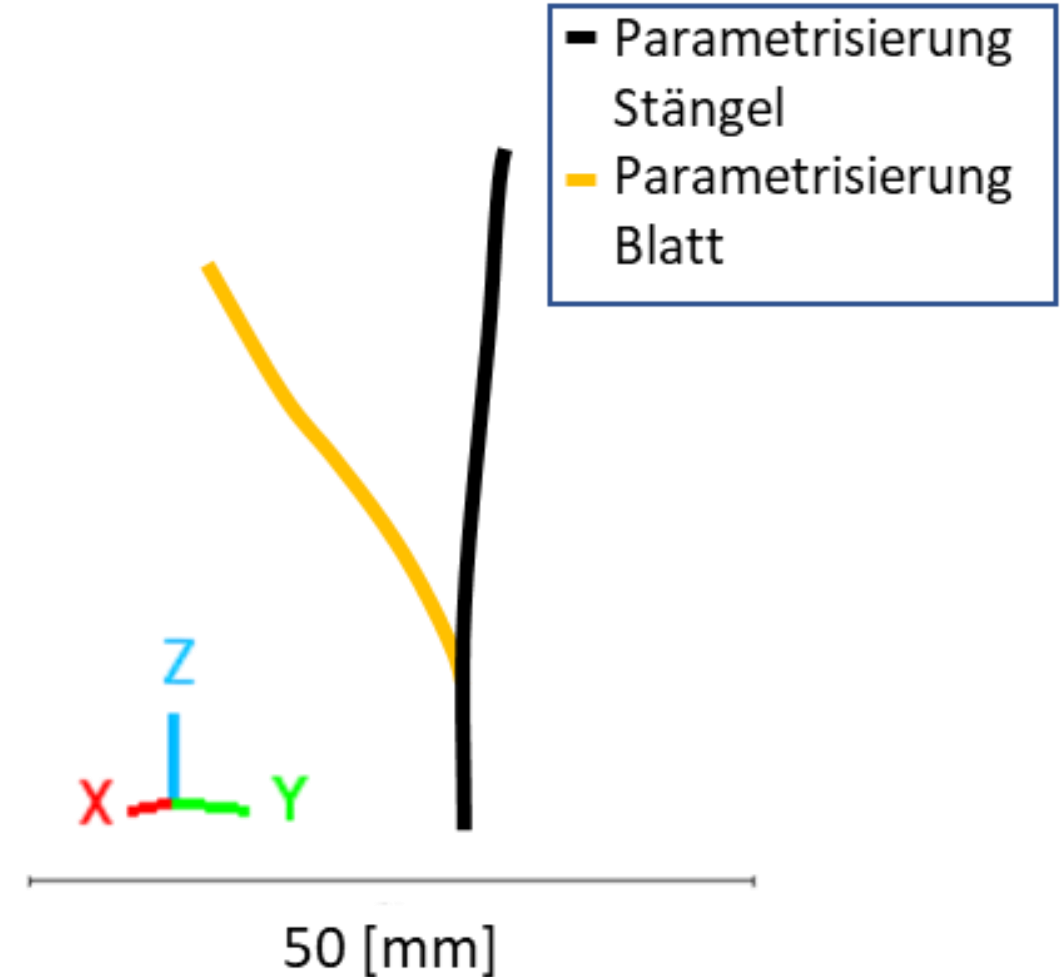
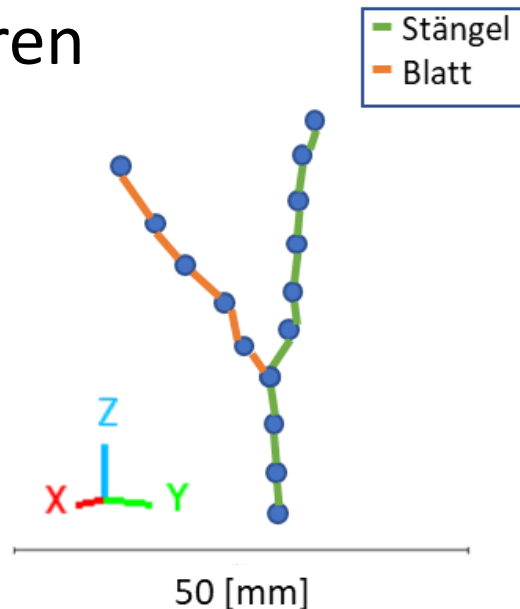
## 4F) Position der Knoten verbessern

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

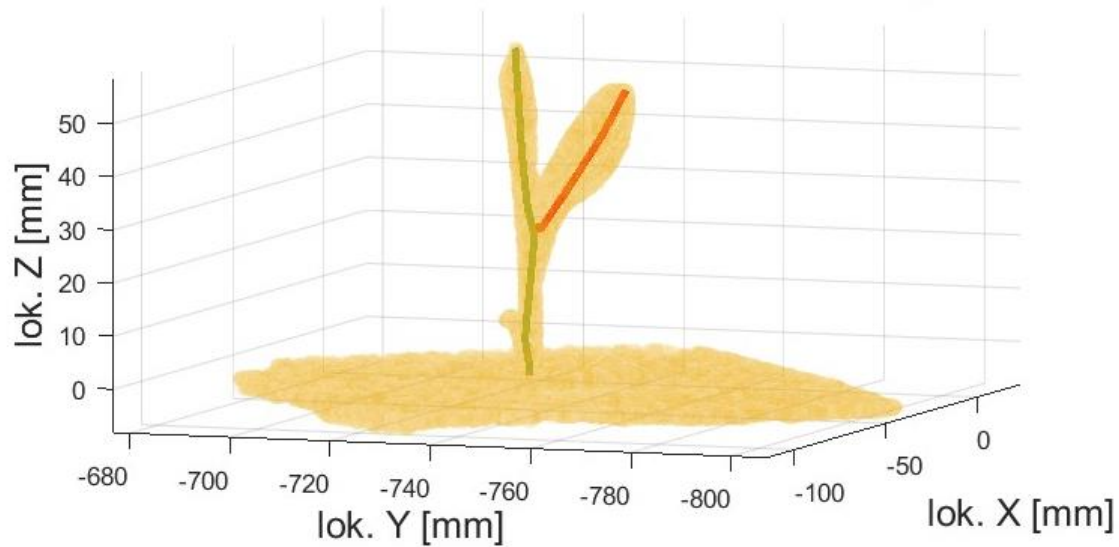




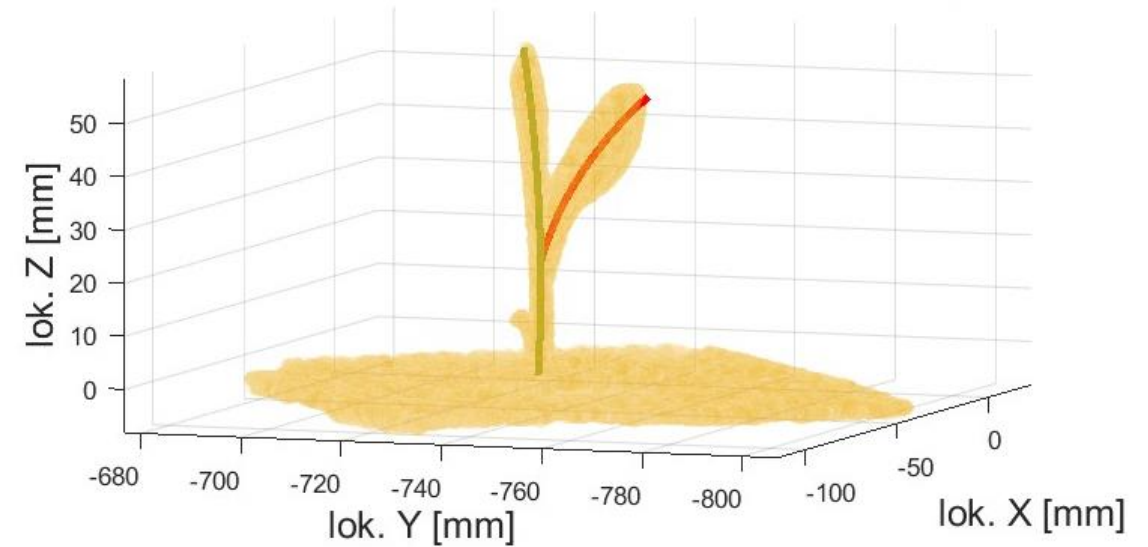
## 4F) Position der Skelettpunkte verbessern

- Punktwolkenbeispiel

**Vor der Parametrisierung**

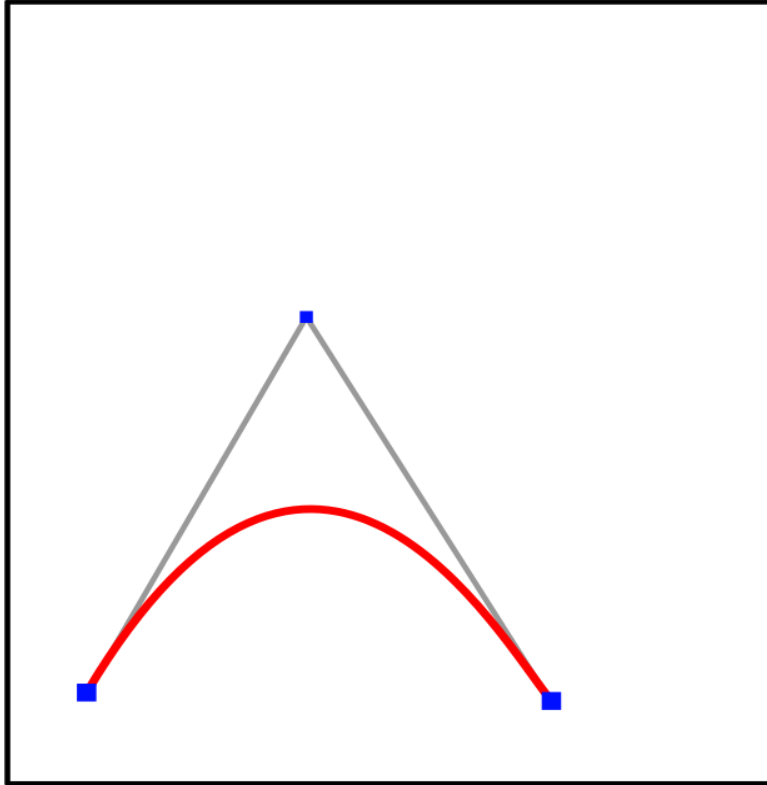


**Nach der Parametrisierung**



## 4F) Positionen der Skelettpunkte verbessern

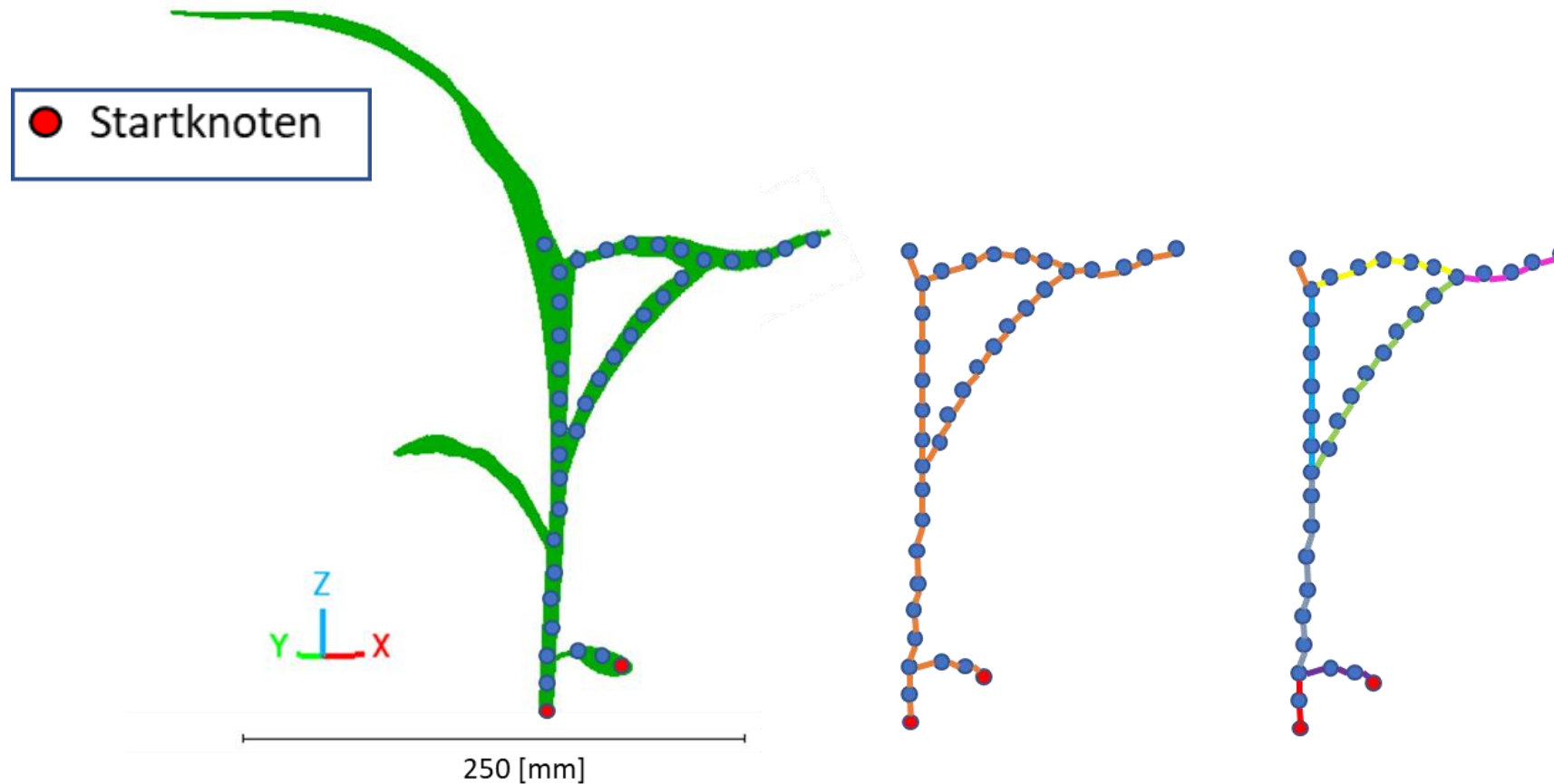
- Bezierkurven



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

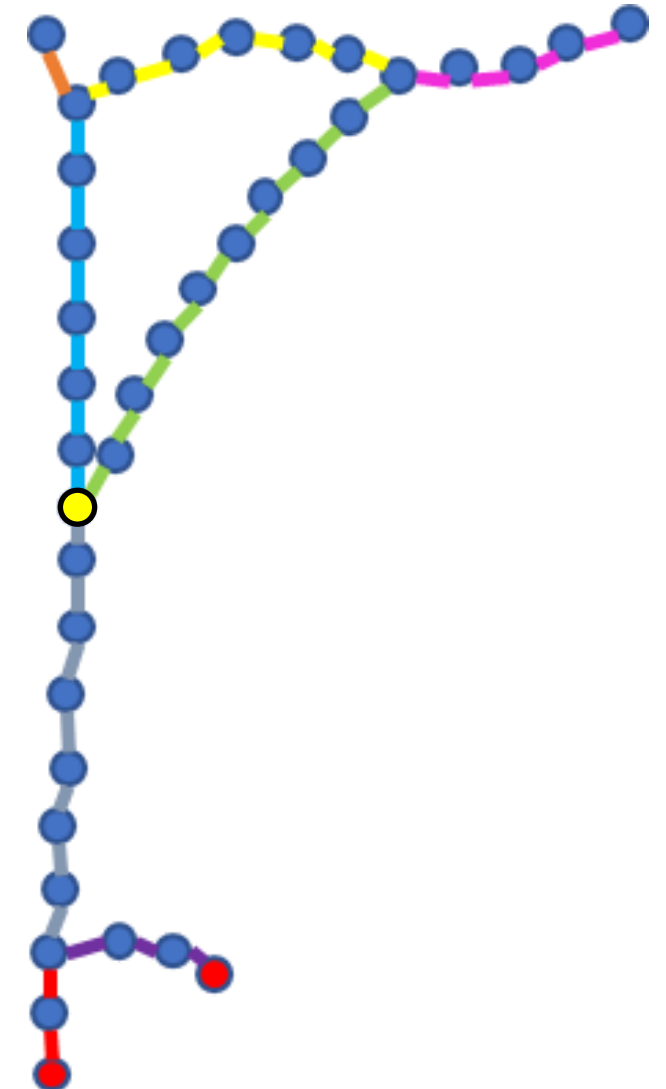
## 4B) Überlappende Blätter

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



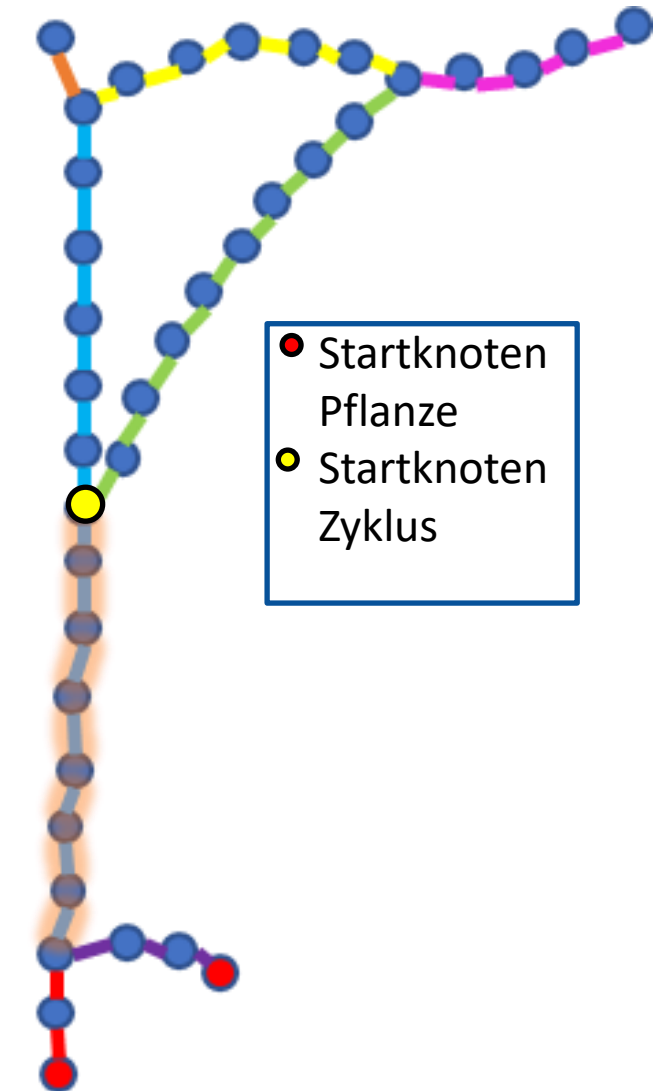
## 4B) Überlappende Blätter

### 1) Startknoten des Zyklus definieren



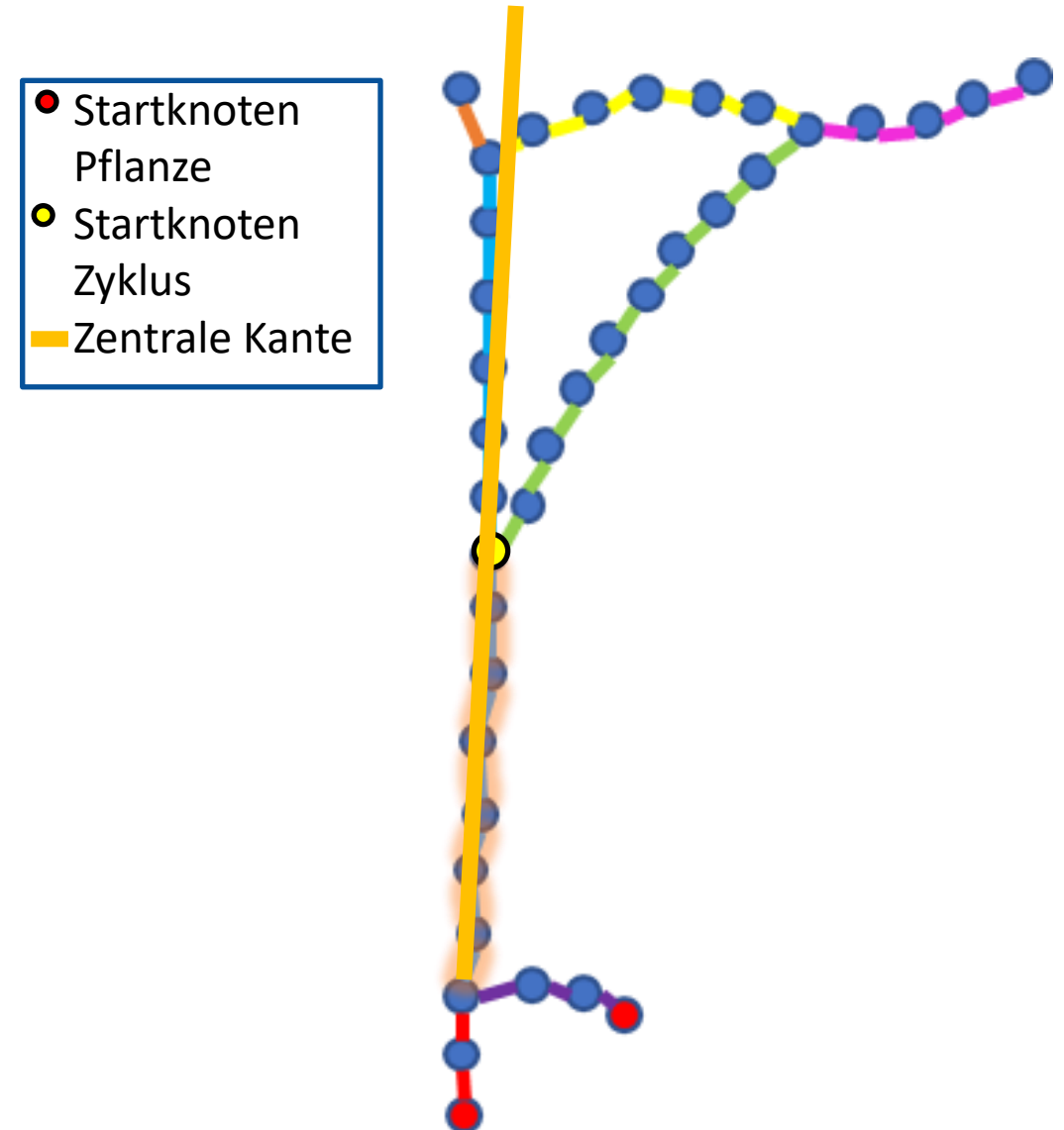
## 4B) Überlappende Blätter

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



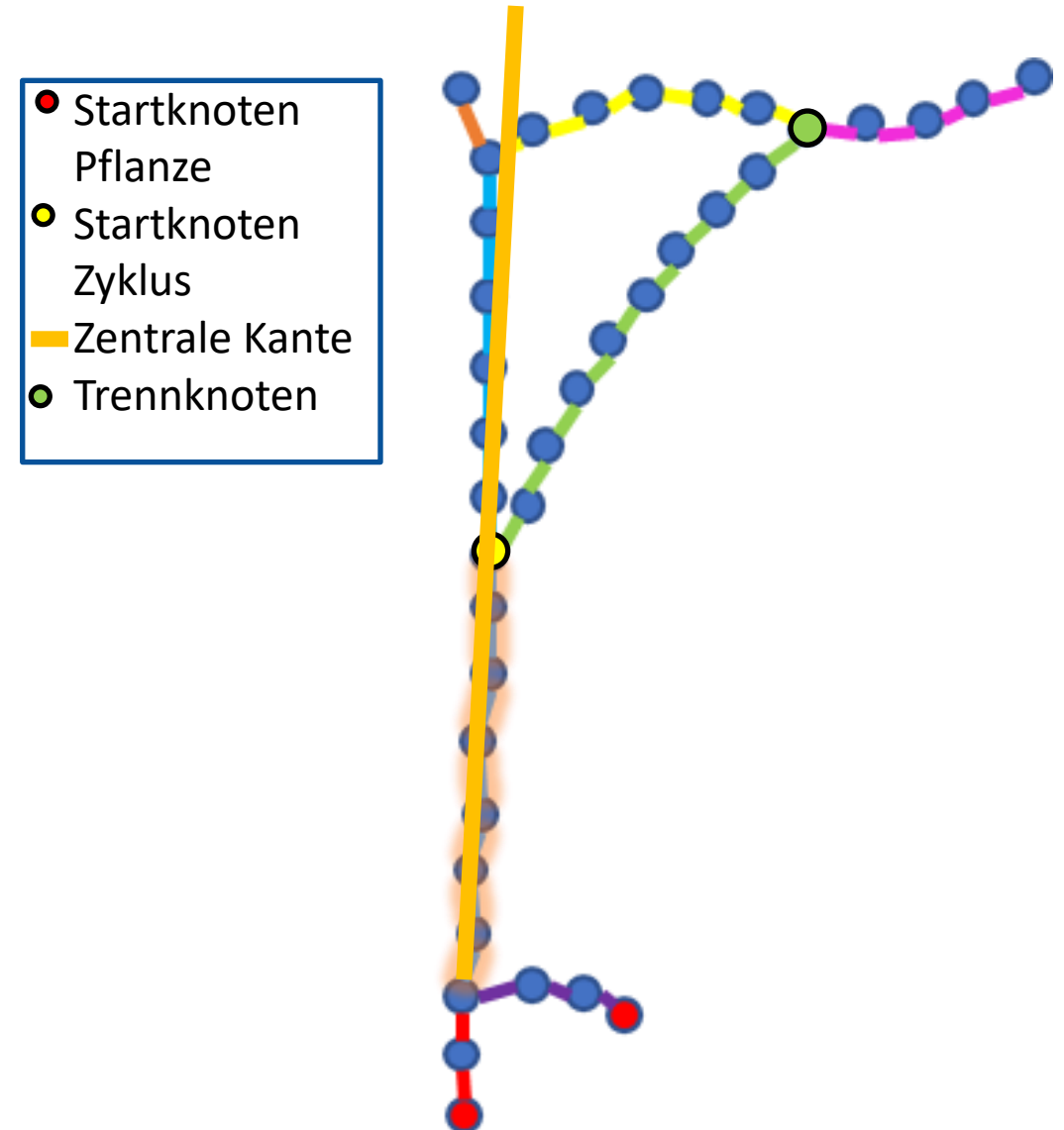
## 4B) Überlappende Blätter

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



## 4B) Überlappende Blätter

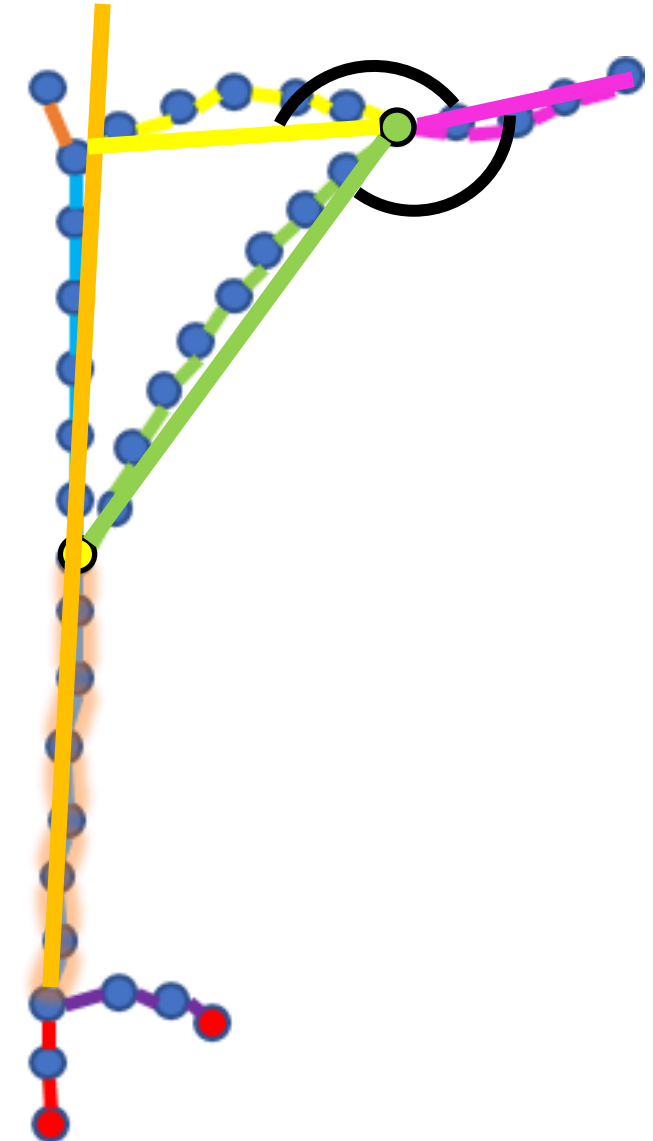
- 1) Startknoten des Zyklus definieren
- 2) Zentrale Kante definieren
- 3) Trennknoten definieren





## 4B) Überlappende 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

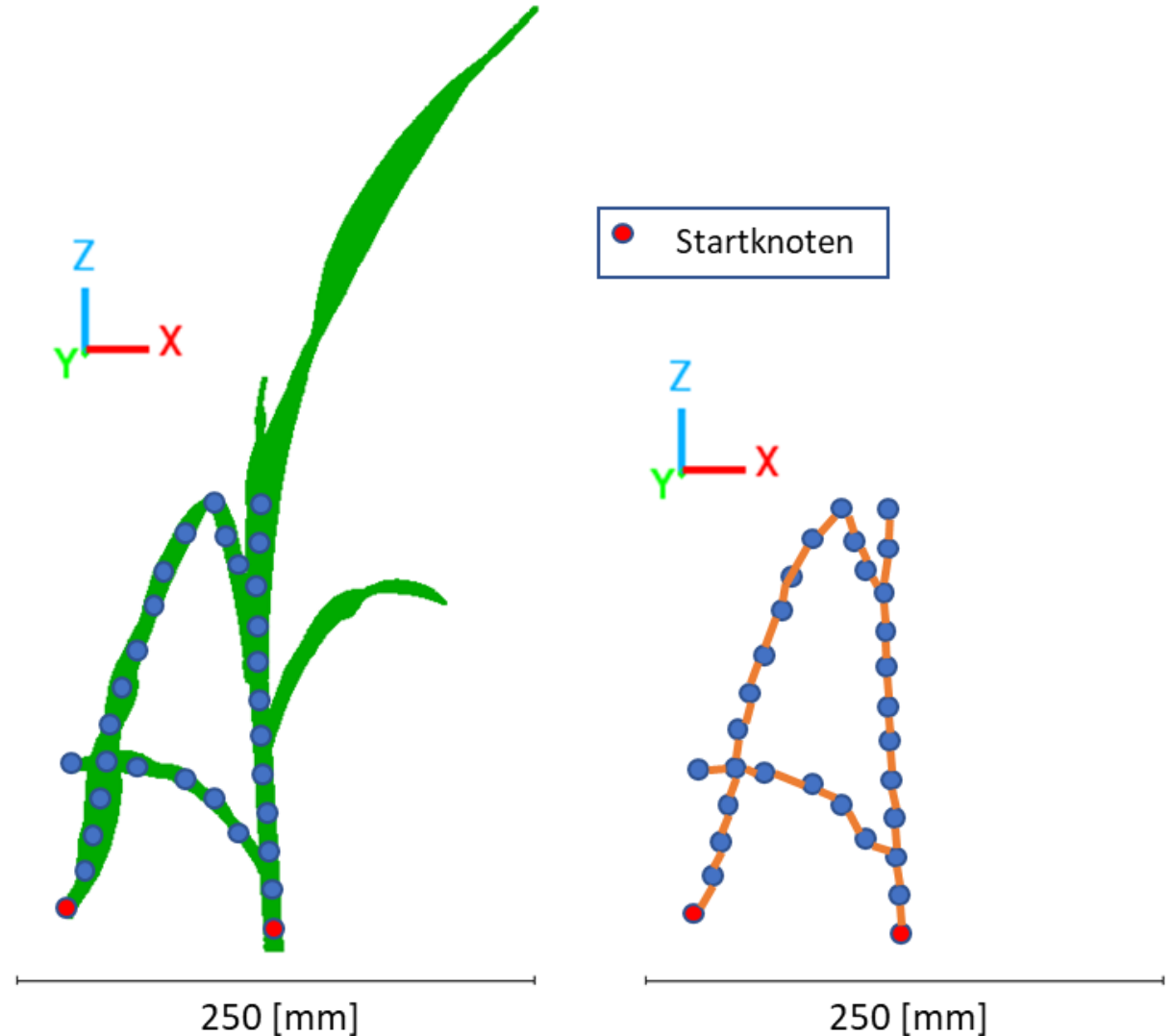


## 4B) Überlappende Blätter

- 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

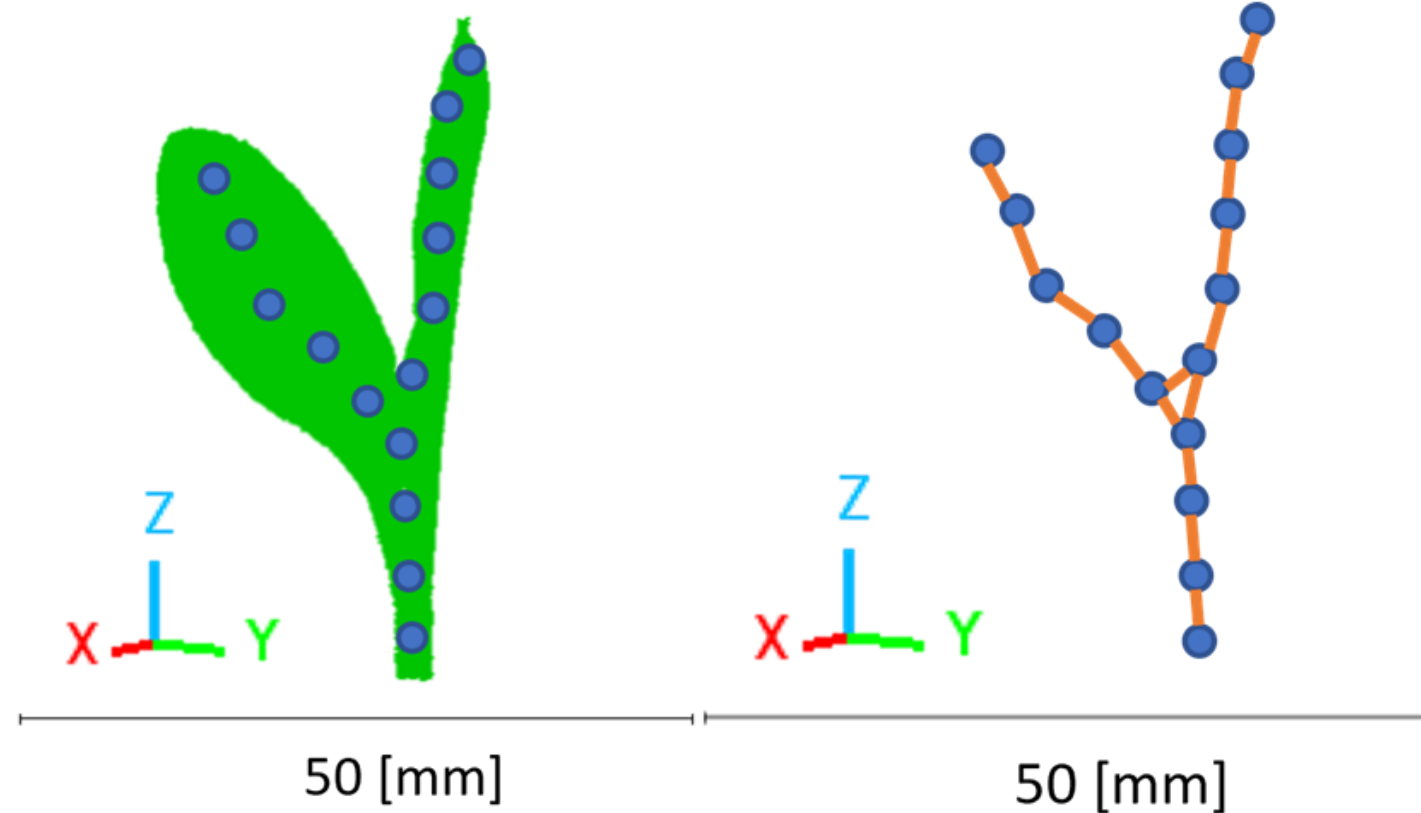


## 4C) Ungewollte Zyklen entfernen

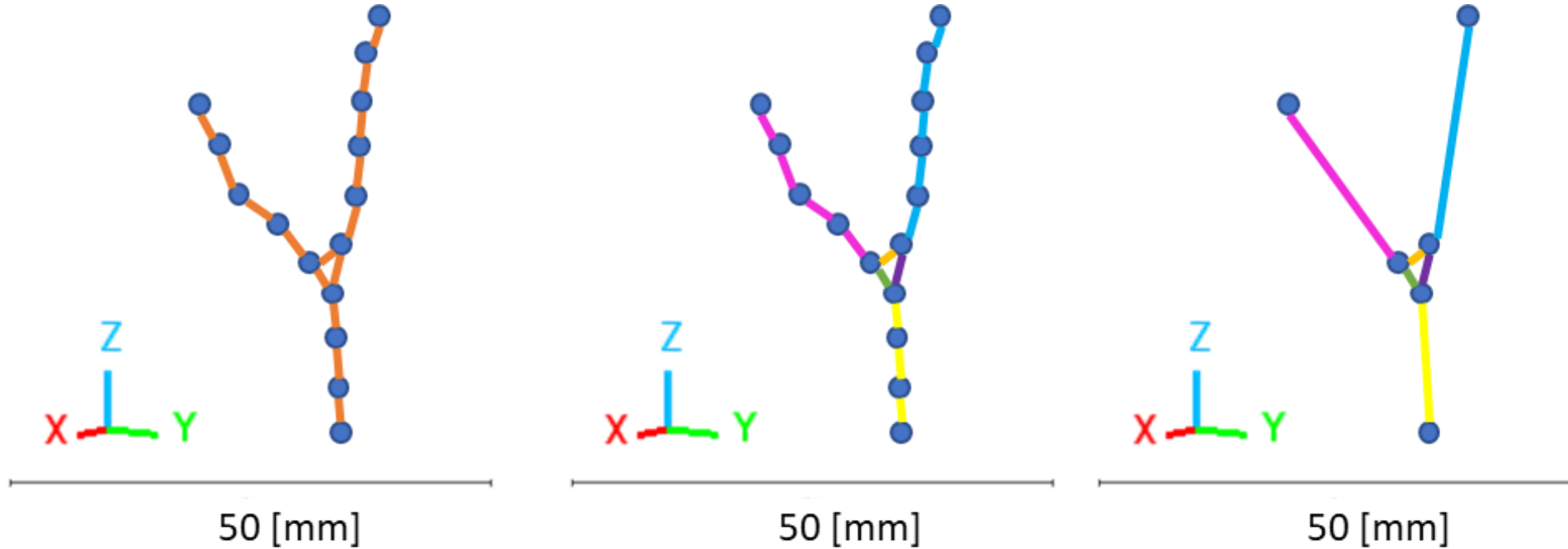
- Abwandlung vom minimalen Spannbaum
- Simulation des Wachstums der Pflanze

Vorwissen über Pflanze

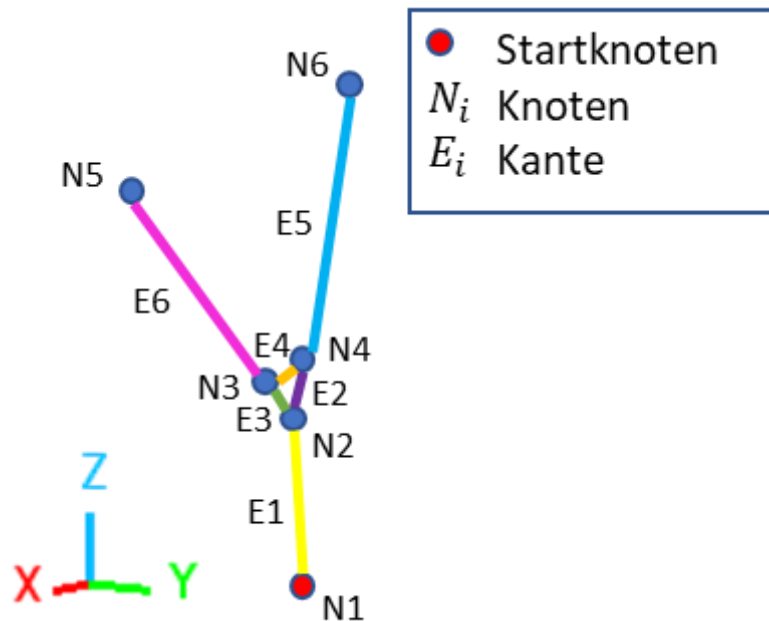
- Die Pflanze wächst nach oben
- Die Blätter wachsen am Anfang (beim Übergang des Stängels) auch nach oben



## 4C) Ungewollte Zyklen entfernen



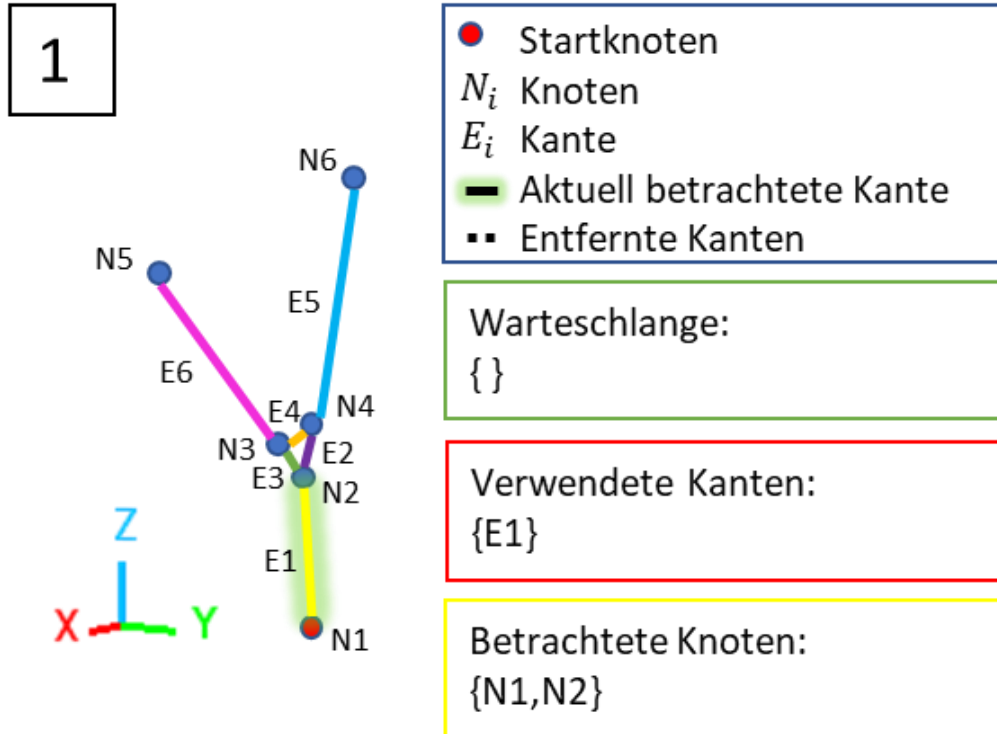
## 4C) Ungewollte Zyklen entfernen



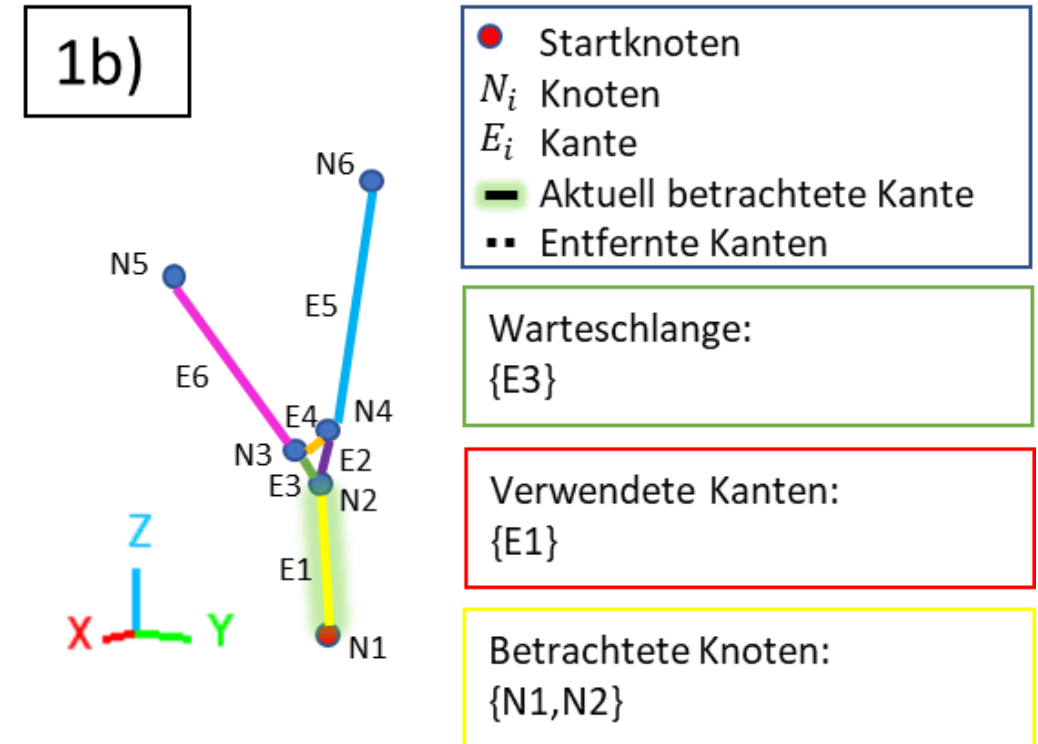
3 Fälle:

- 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



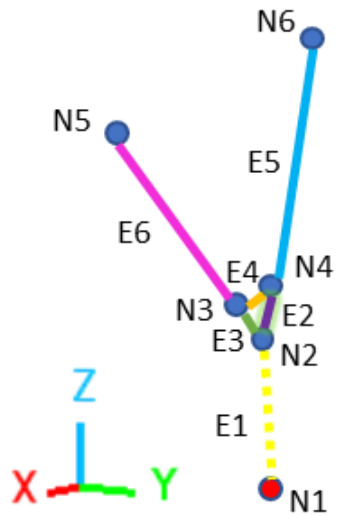
Aktuelle Kante:  $E_1$   
 Angrenzende Kanten:  $E_2, E_3$



$\theta_{E_1 E_2}, \theta_{E_1 E_3}$

# 4C) Ungewollte Zyklen entfernen

2



● Startknoten  
 $N_i$  Knoten  
 $E_i$  Kante  
    Aktuell betrachtete Kante  
--- Entfernte Kanten

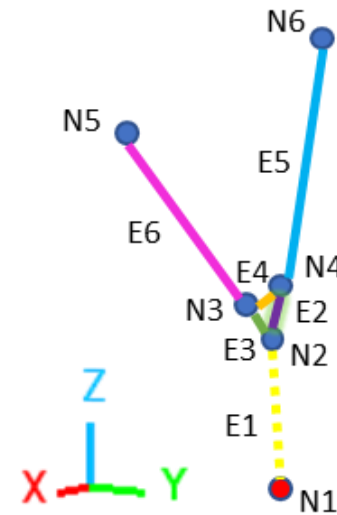
Warteschlange:  
 {E3 }

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}

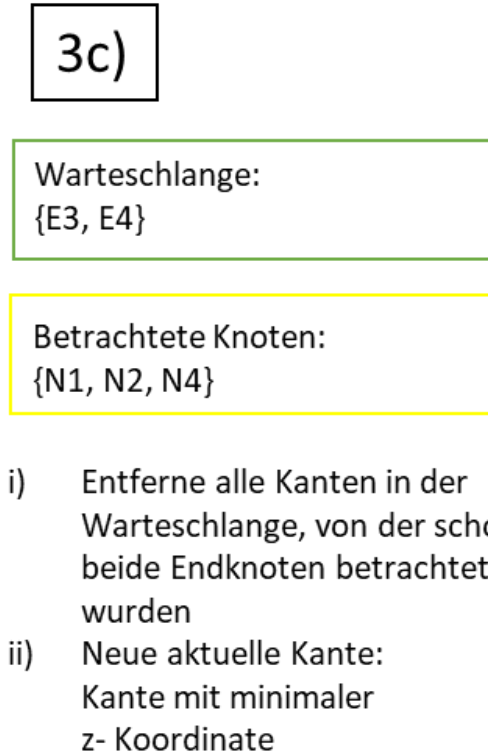
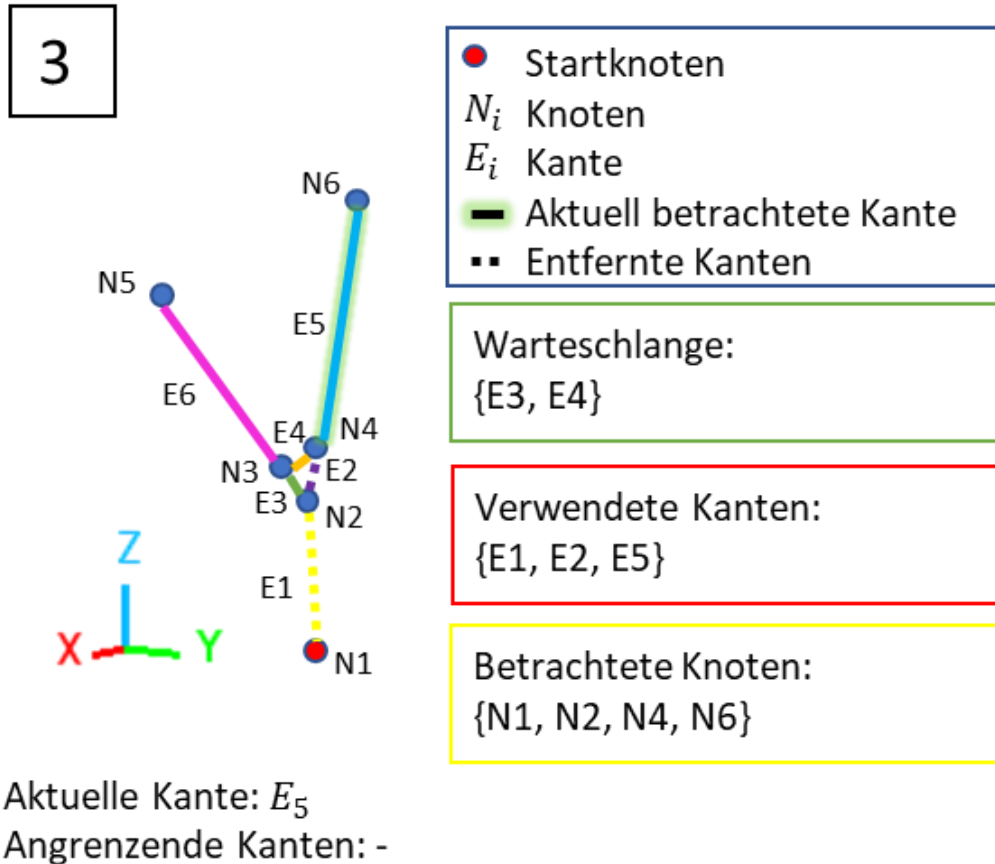
Verwendete Kanten:  
 {E1, E2}

Betrachtete Knoten:  
 {N1, N2, N4}

$\theta_{E_2 E_4}, \theta_{E_2 E_5}$

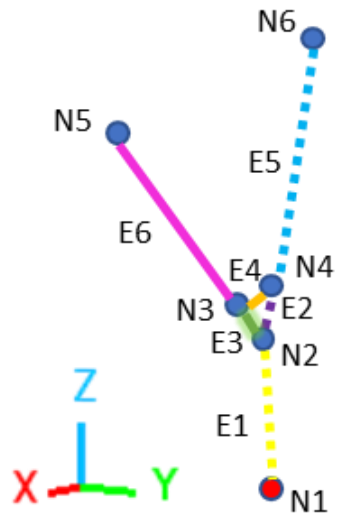


## 4C) Ungewollte Zyklen entfernen



# 4C) Ungewollte Zyklen entfernen

4



● Startknoten  
 $N_i$  Knoten  
 $E_i$  Kante  
— Aktuell betrachtete Kante  
- - Entfernte Kanten

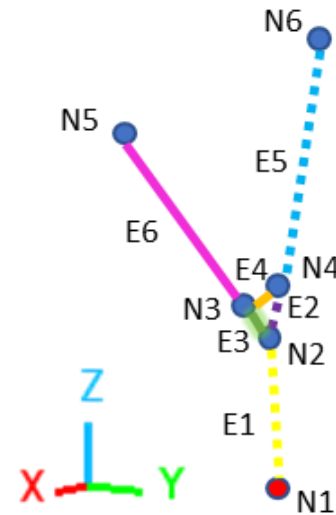
Warteschlange:  
 {E4}

Verwendete Kanten:  
 {E1, E2, E5, E3}

Betrachtete Knoten:  
 {N1, N2, N4, N6, N3}

Aktuelle Kante:  $E_3$   
 Angrenzende Kanten:  $E_4, E_6$

4b)



● Startknoten  
 $N_i$  Knoten  
 $E_i$  Kante  
— Aktuell betrachtete Kante  
- - Entfernte Kanten

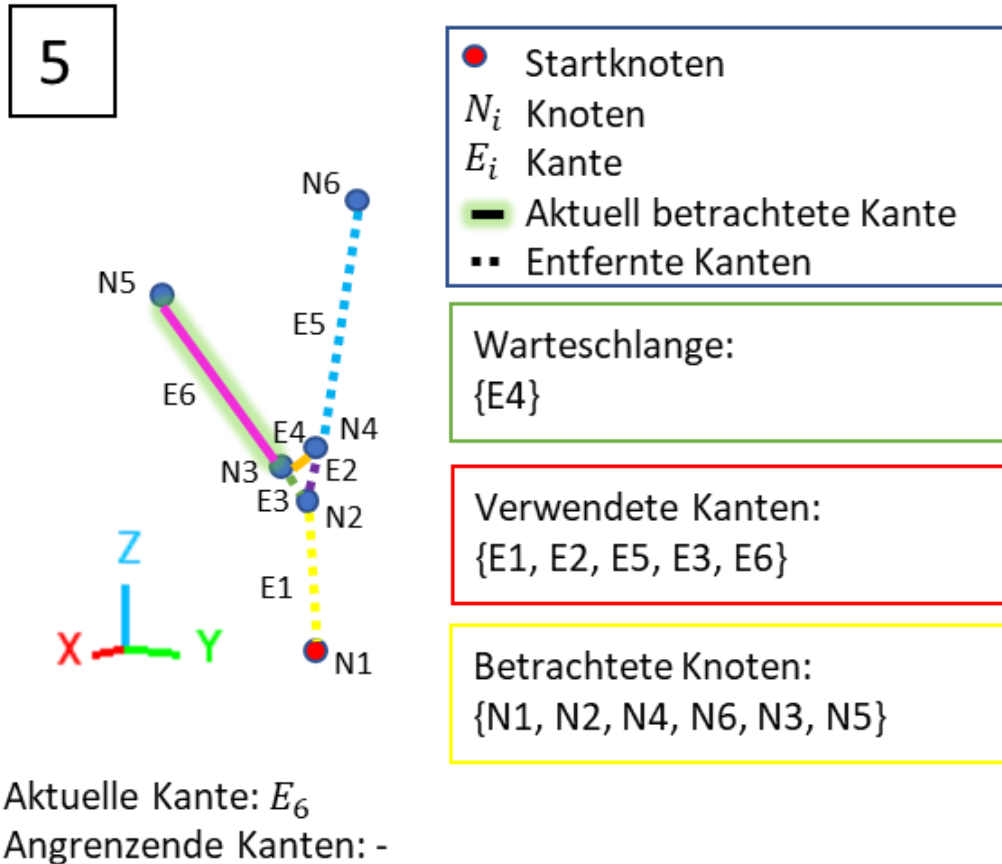
Warteschlange:  
 {E4}

Verwendete Kanten:  
 {E1, E2, E5, E3}

Betrachtete Knoten:  
 {N1, N2, N4, N6, N3}

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

## 4C) Ungewollte Zyklen entfernen



5c)

Warteschlange:  
{}

Betrachtete Knoten:  
{N1, N2, N4, N6, N3, N5}

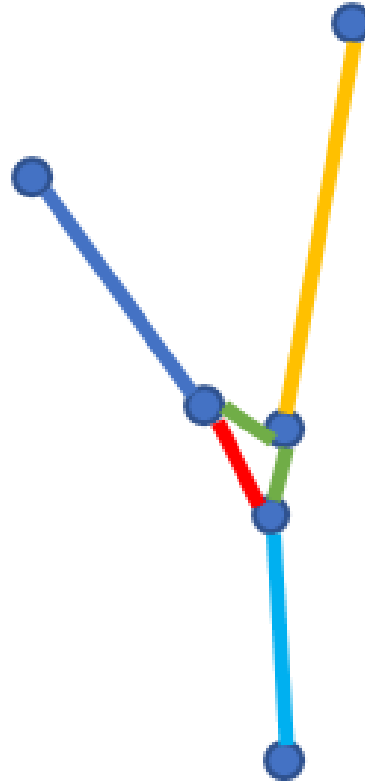
- Entferne alle Kanten in der Warteschlange, von der schon beide Endknoten betrachtet wurden
- Neue aktuelle Kante: Kante mit minimaler z-Koordinate

## 4C) Ungewollte Zyklen entfernen

Ergebnis des klassischen minimalen Spannbaumalgorithmus



Graphbeispiel 1



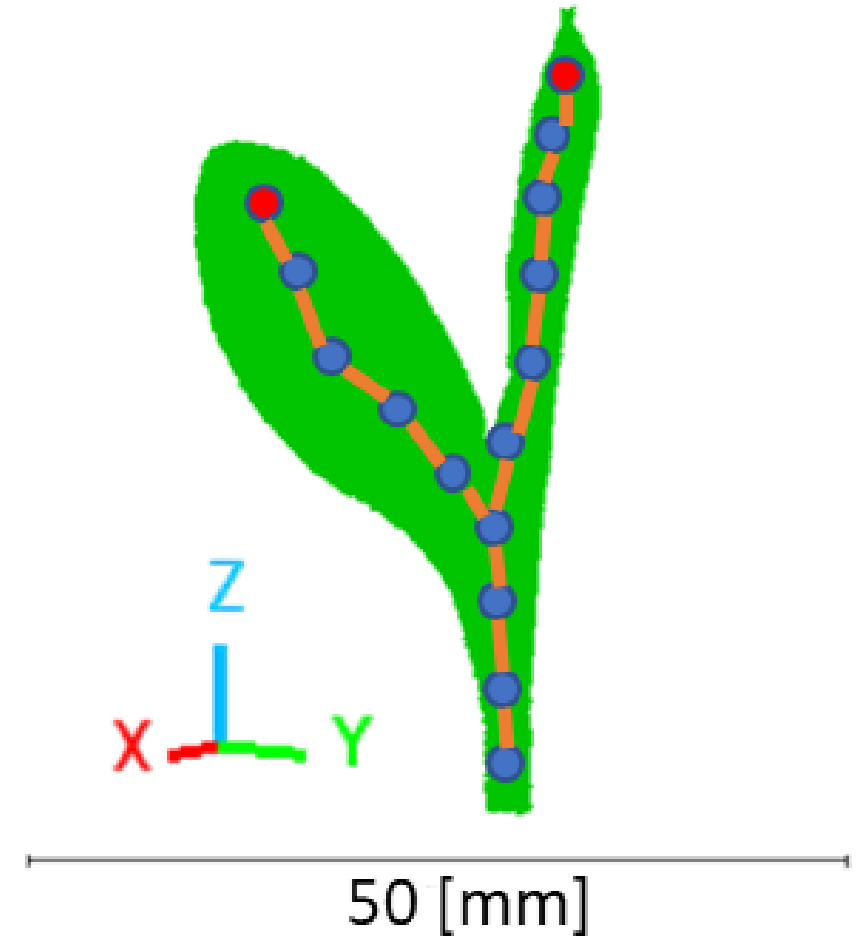
Graphbeispiel 2



Graphbeispiel 3

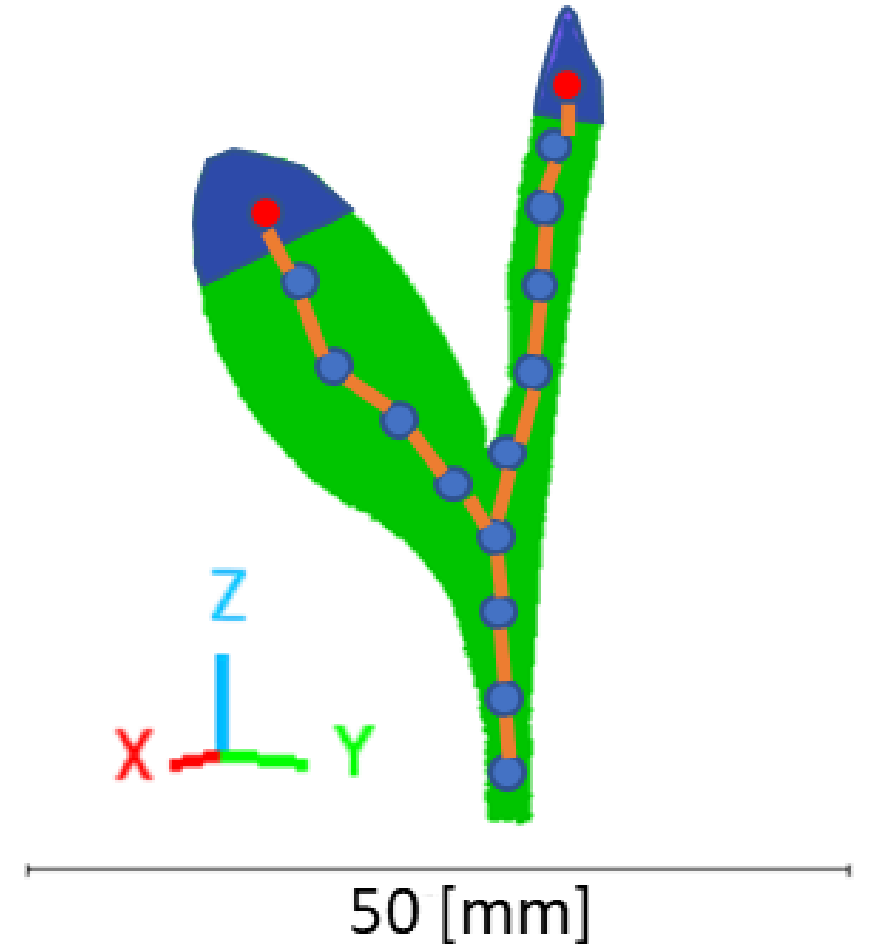
## 4E) Endpunkte der Skelettierung verbessern

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



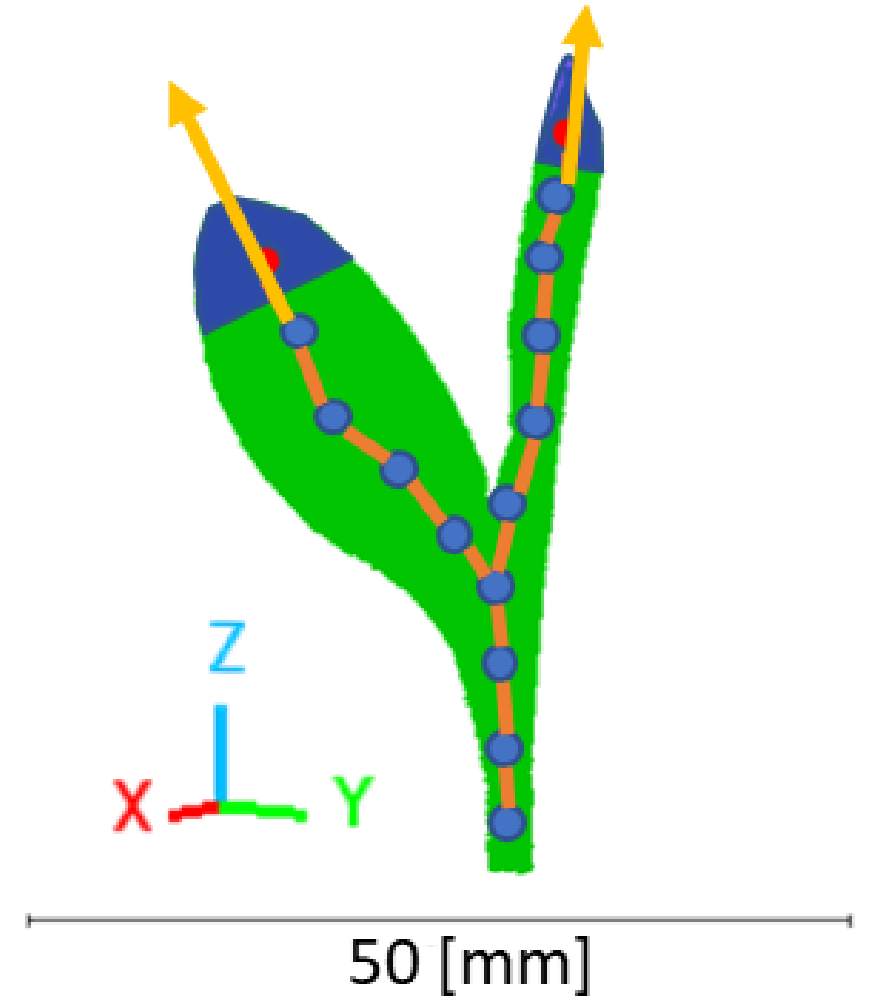
## 4E) Endpunkte der Skelettierung verbessern

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



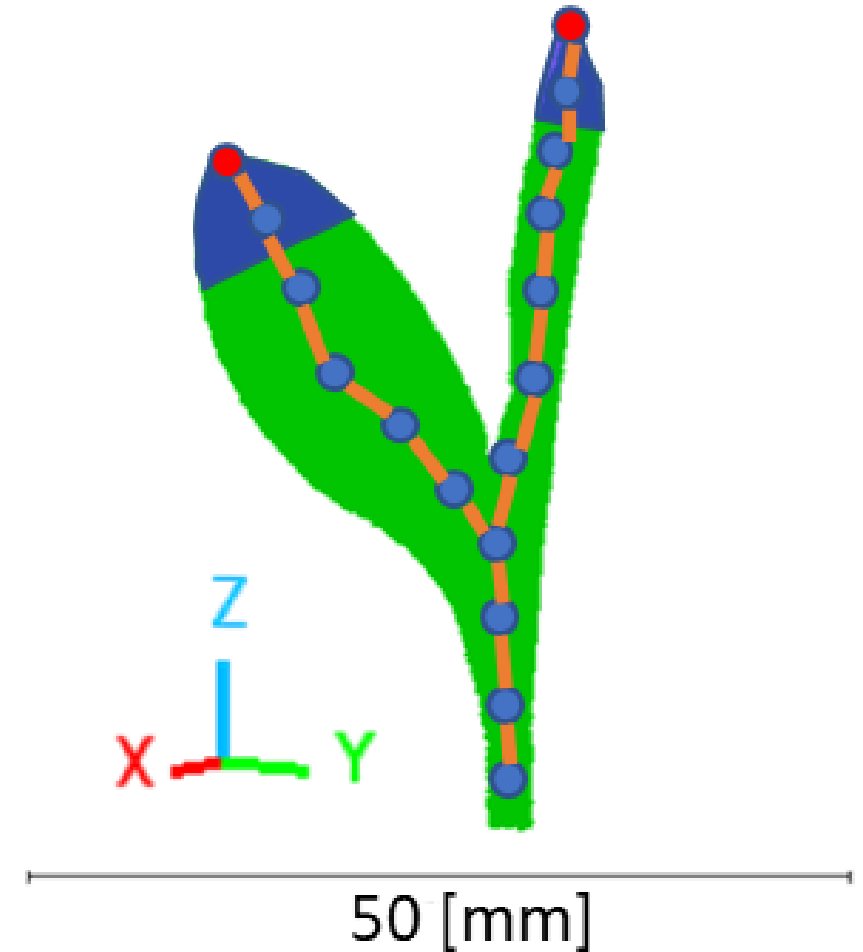
## 4E) Endpunkte der Skelettierung verbessern

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



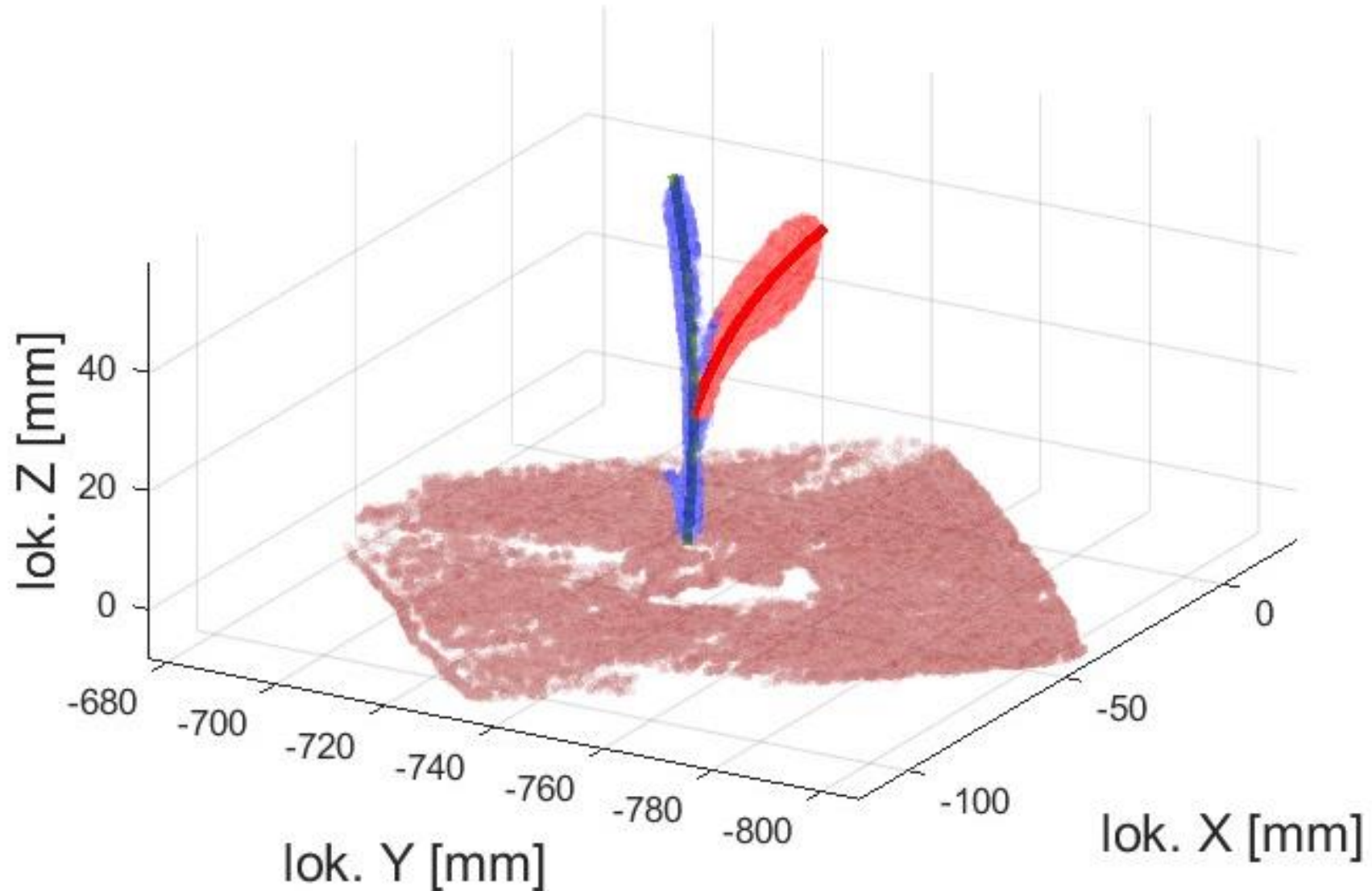
## 4E) Endpunkte der Skelettierung verbessern

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



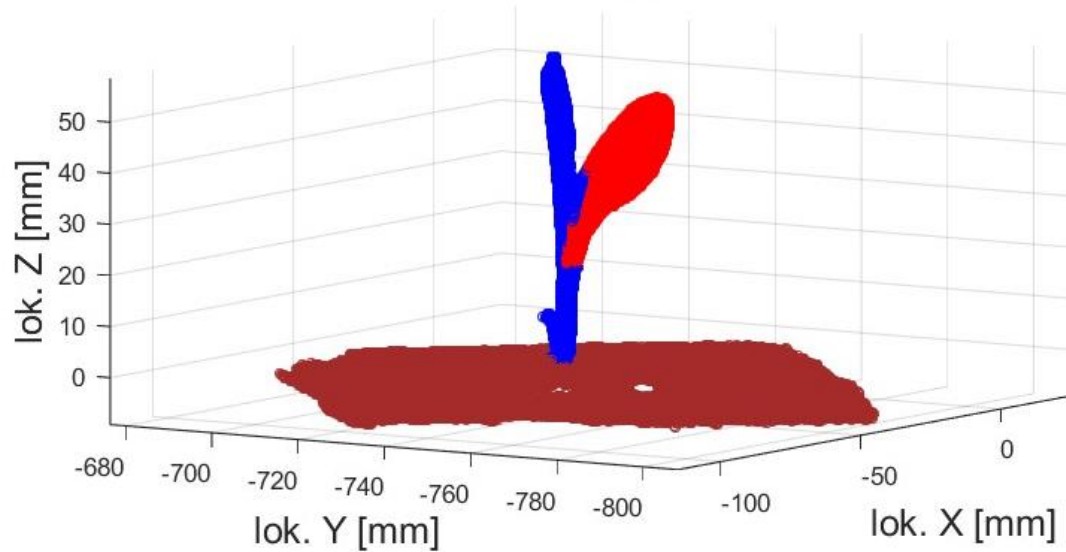


# Motivation Feinsegmentierung Punktwolke

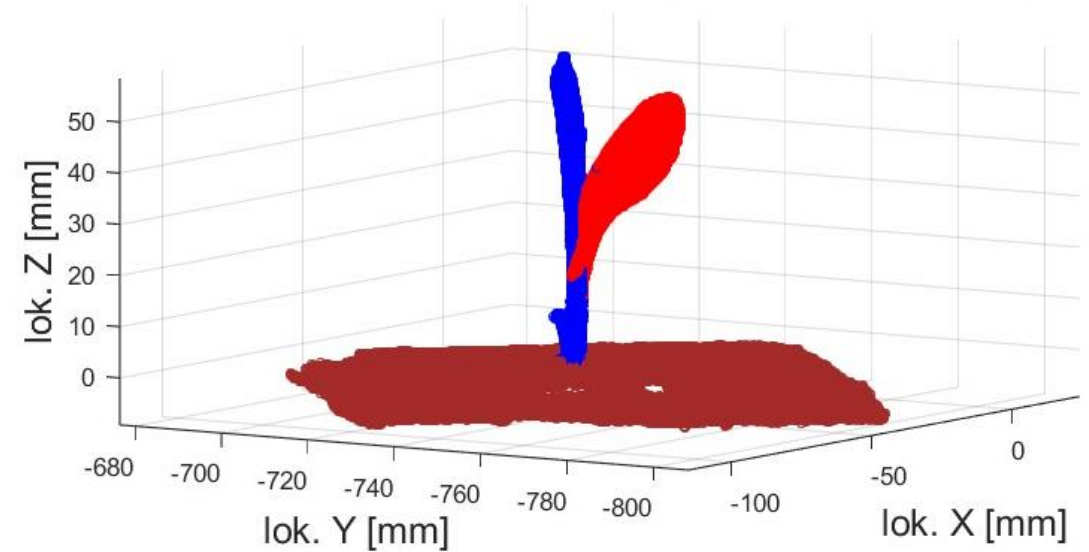


# Ergebnis Feinsegmentierung Punktwolke

## Vor der Feinsegmentierung

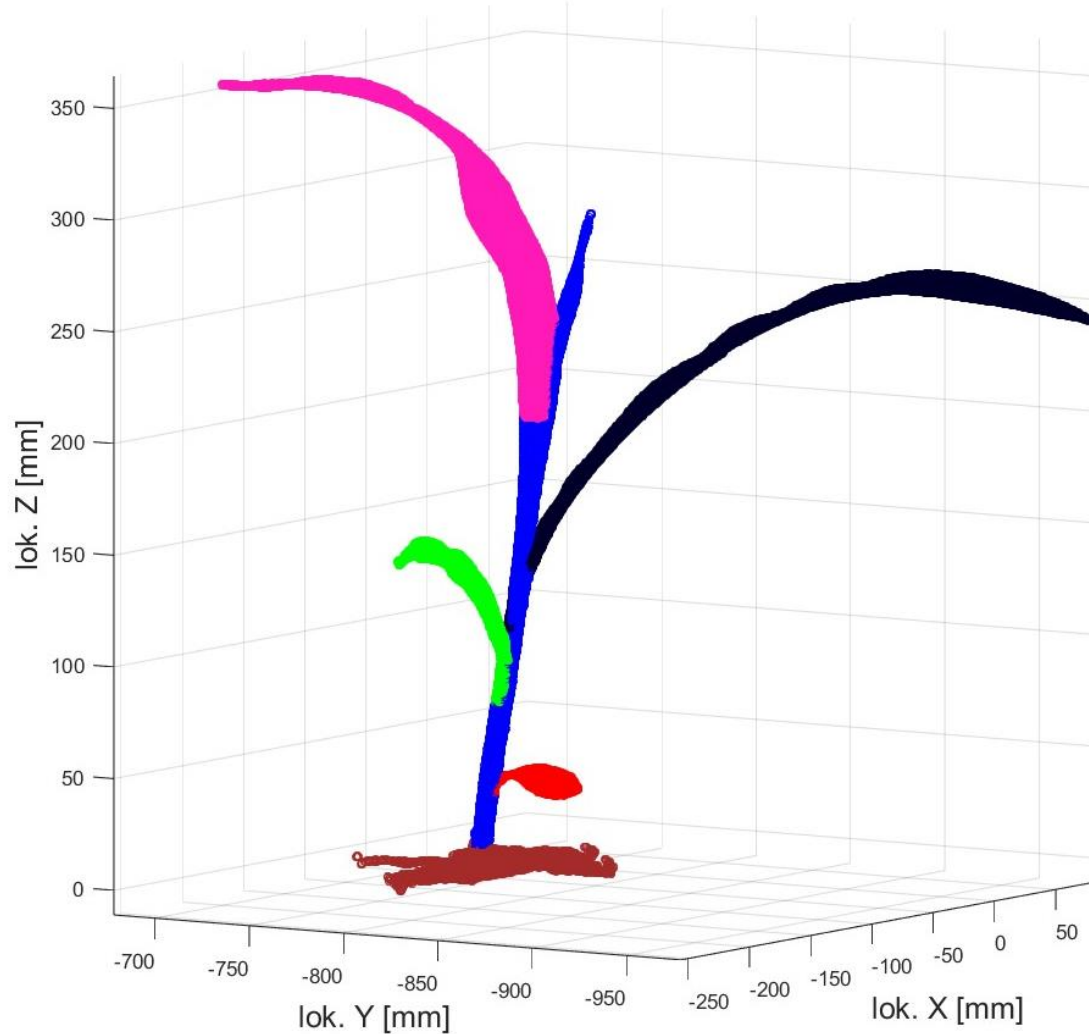


## Nach der Feinsegmentierung

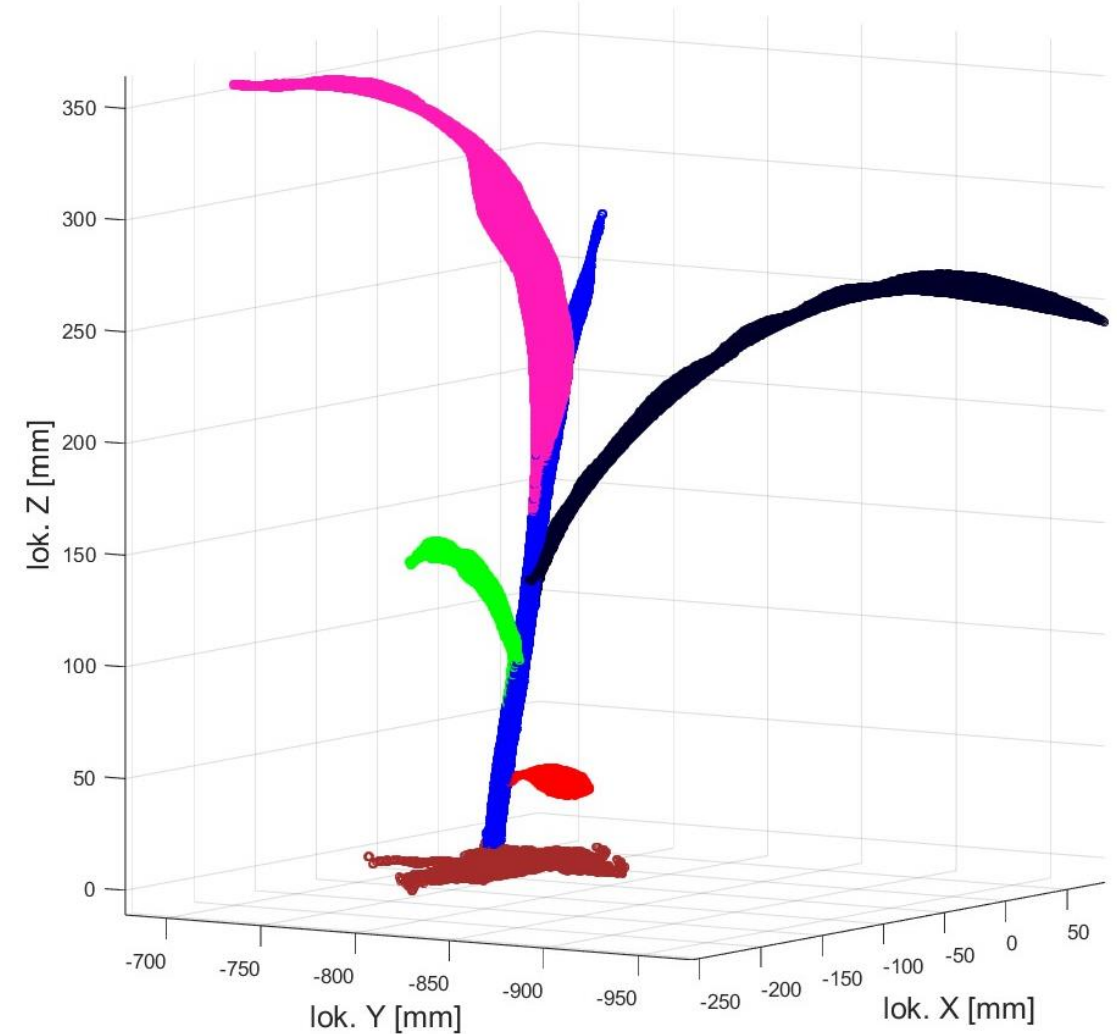


# Ergebnis Feinsegmentierung Punktwolke

**Vor der Feinsegmentierung**

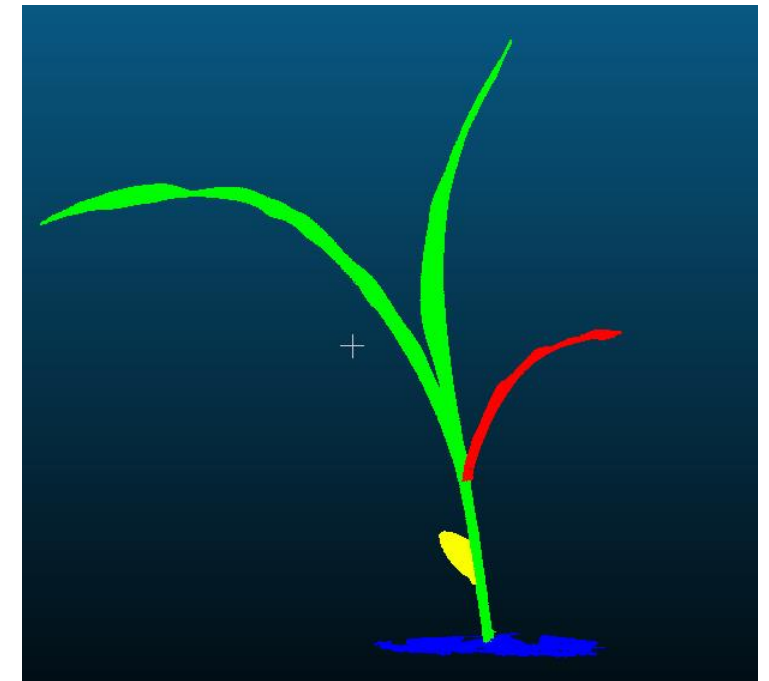
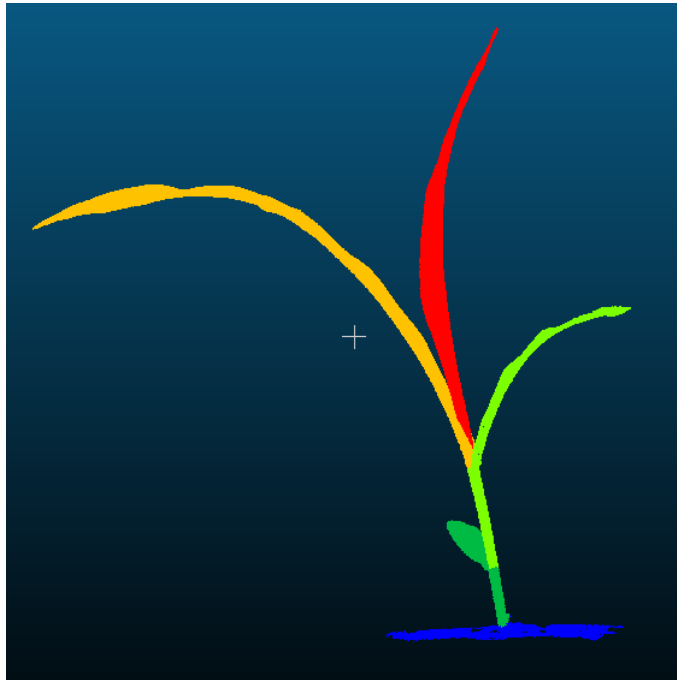


**Nach der Feinsegmentierung**



# Wachstumsstadien von Mais- und Hirse

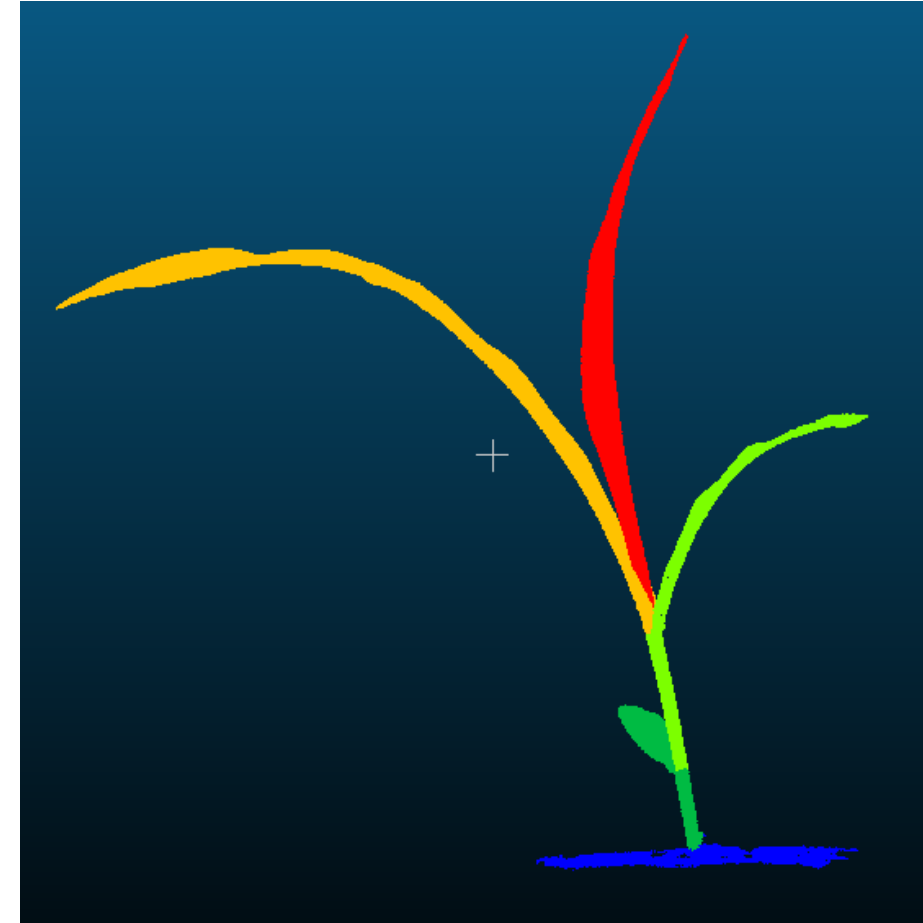
Leaf Tip Method	Leaf Collar Method
<ul style="list-style-type: none"><li>- Jedes Blatt ist eine separate Instanz</li><li>- Stängel gehört bis zum Beginn einer neuen Instanz zum Blatt</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Die am weitesten verbreitete Methode</li><li>- Blatt ist separate Instanz,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



# 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

