

baa:

Bundesanstalt für Arbeitsschutz
und Arbeitsmedizin

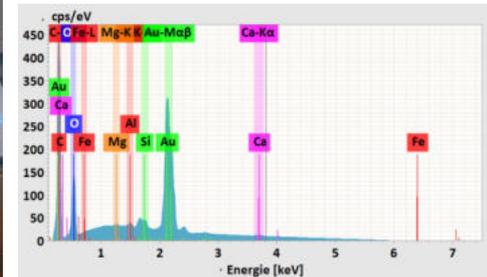
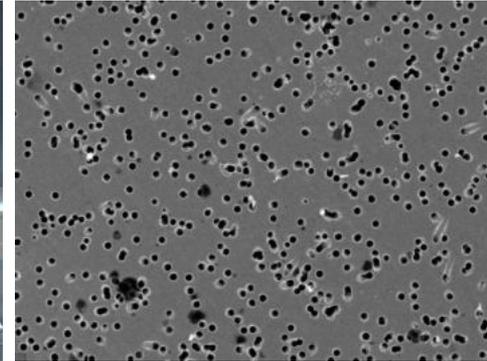
Quantifizierung und morphologische Analyse von Nanofasern zur Expositionskontrolle und Materialcharakterisierung mittels Elektronenmikroskopie und fortschrittlicher Bildverarbeitung

25.05.22

Torben Peters, John Schumann, Asmus Meyer-Plath

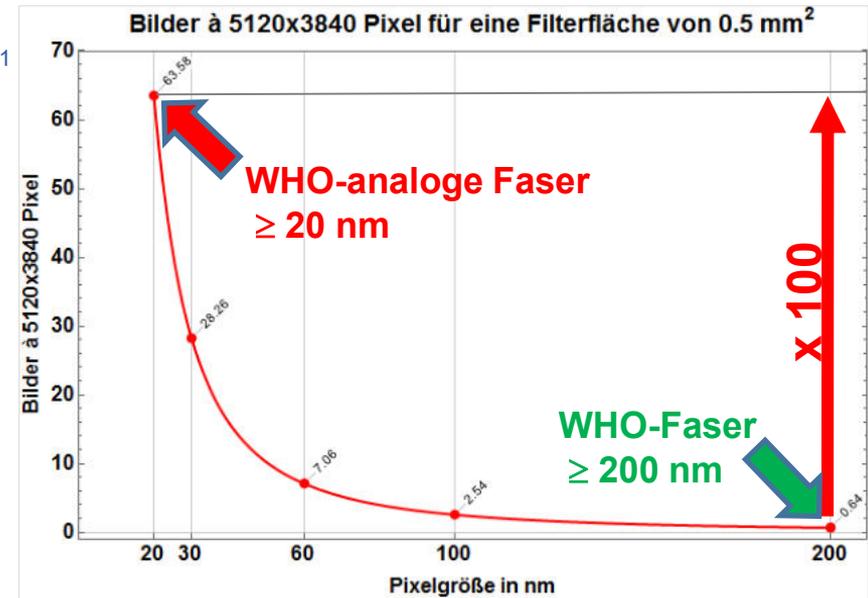
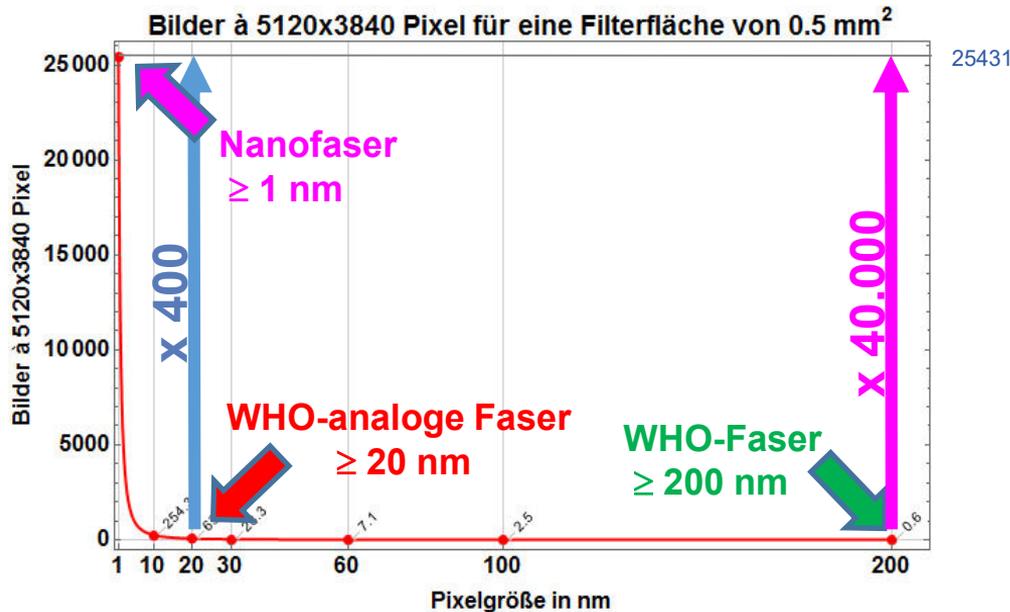
Arbeitsschutz mithilfe Künstlicher Neuronaler Netze (KNN)

Wozu automatische Bilderkennung?



Automatische Auswertung notwendig

Das Drama hinter der Aufgabe, eine vorgegebene Fläche nach kleinen Objekten abzusuchen:
Die Pixelzahl hängt quadratisch von der zur Auflösung des Objekts notwendigen Pixelgröße ab!

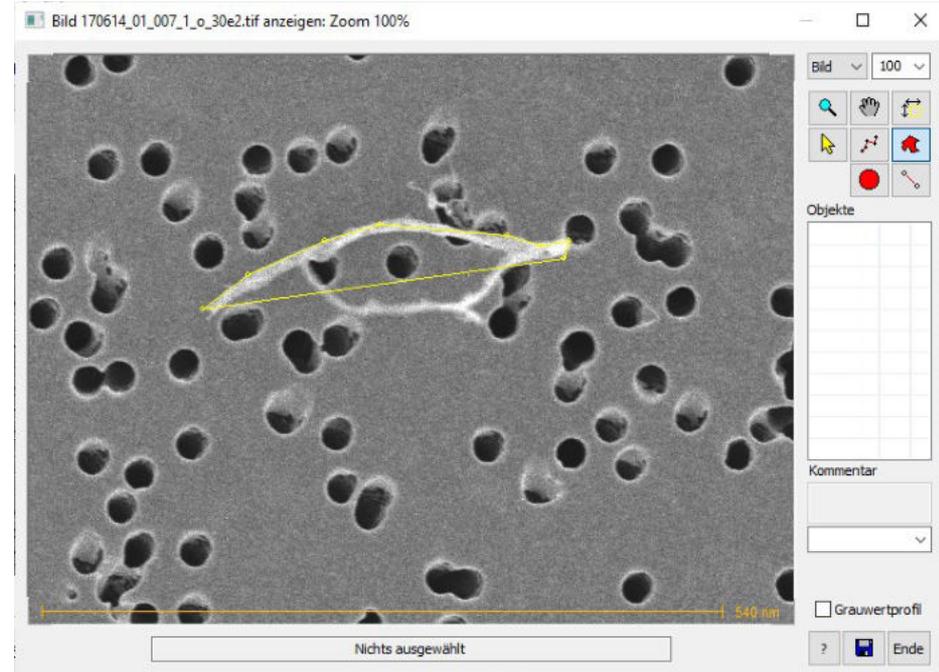


Manuelle Auswertung

Zeitaufwand für eine
Arbeitsplatzprobe:

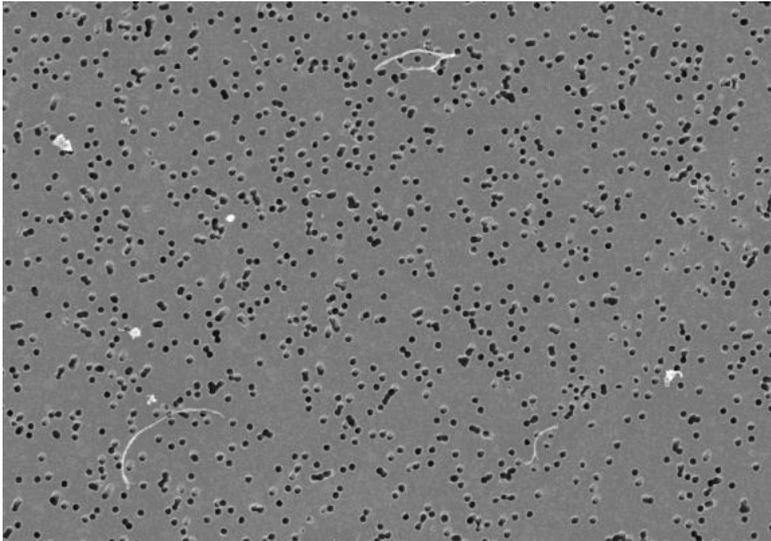
- 80-650 Bilder à 20 MPixel,
im Schnitt 150
- durchschnittlich 3 Minuten pro Bild
- ergibt 450 Minuten = 7,5 Stunden

Nicht vorher abschätzbar!

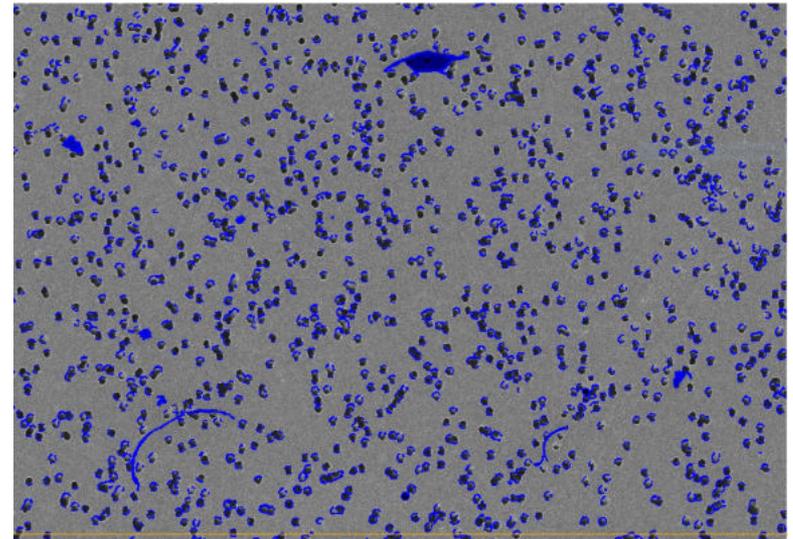


Automatische Objekterkennung durch klassische Bildverarbeitung

Rechenzeit: 2 Minuten pro Bild (schneller Laptop)



REM-Bild

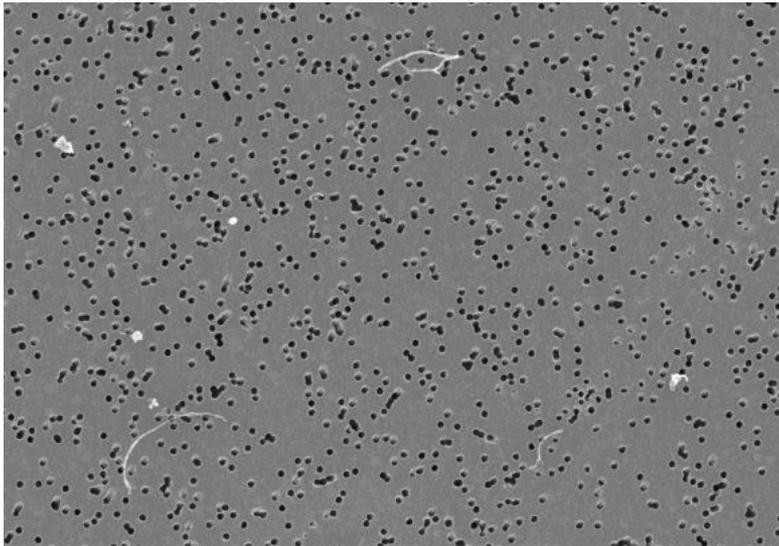


Erkannte Objekte

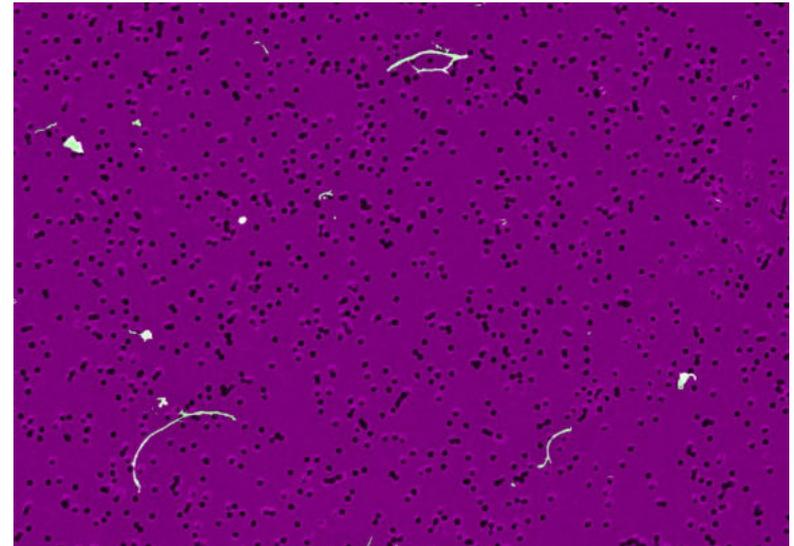
Automatische Objekterkennung durch Faltungsnetz (UNet)

Rechenzeit: 2 Minuten pro Bild (schneller Laptop)

~1s auf High-End Grafikkarte



REM-Bild



Erkannte Objekte

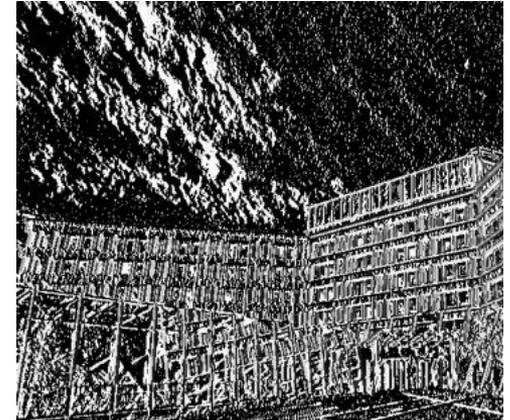
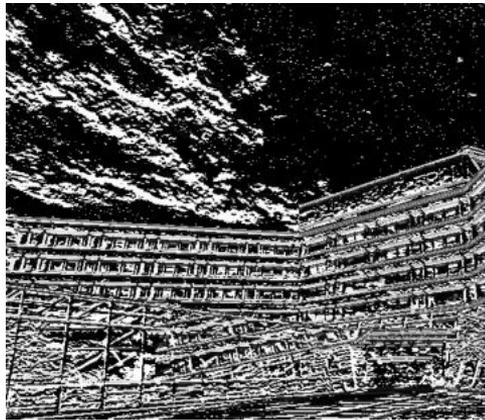
Wie funktionieren Faltungsnetze? (Convolutional Neural Networks)

Faltungen in der Bildverarbeitung

Beispiel: Sobel-Filter
für Kantenerkennung

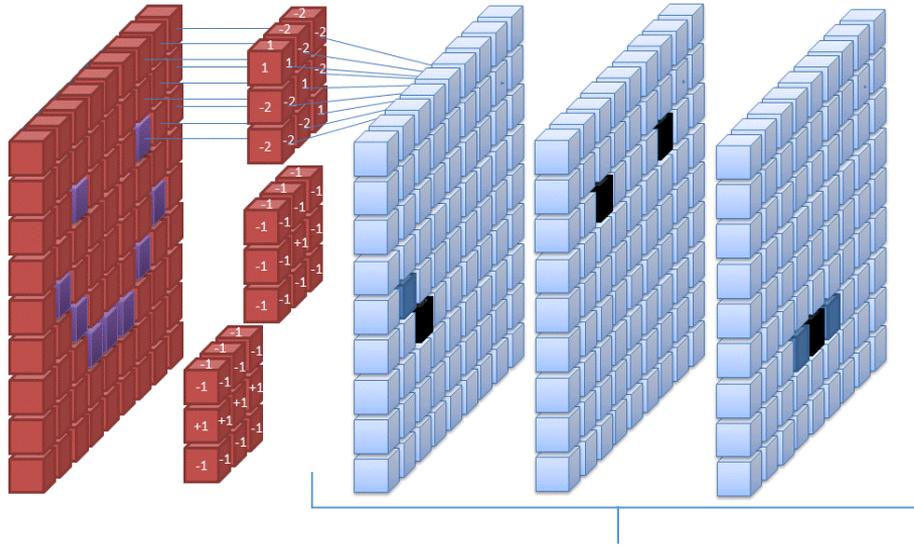
1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1



BAuA, Dortmund

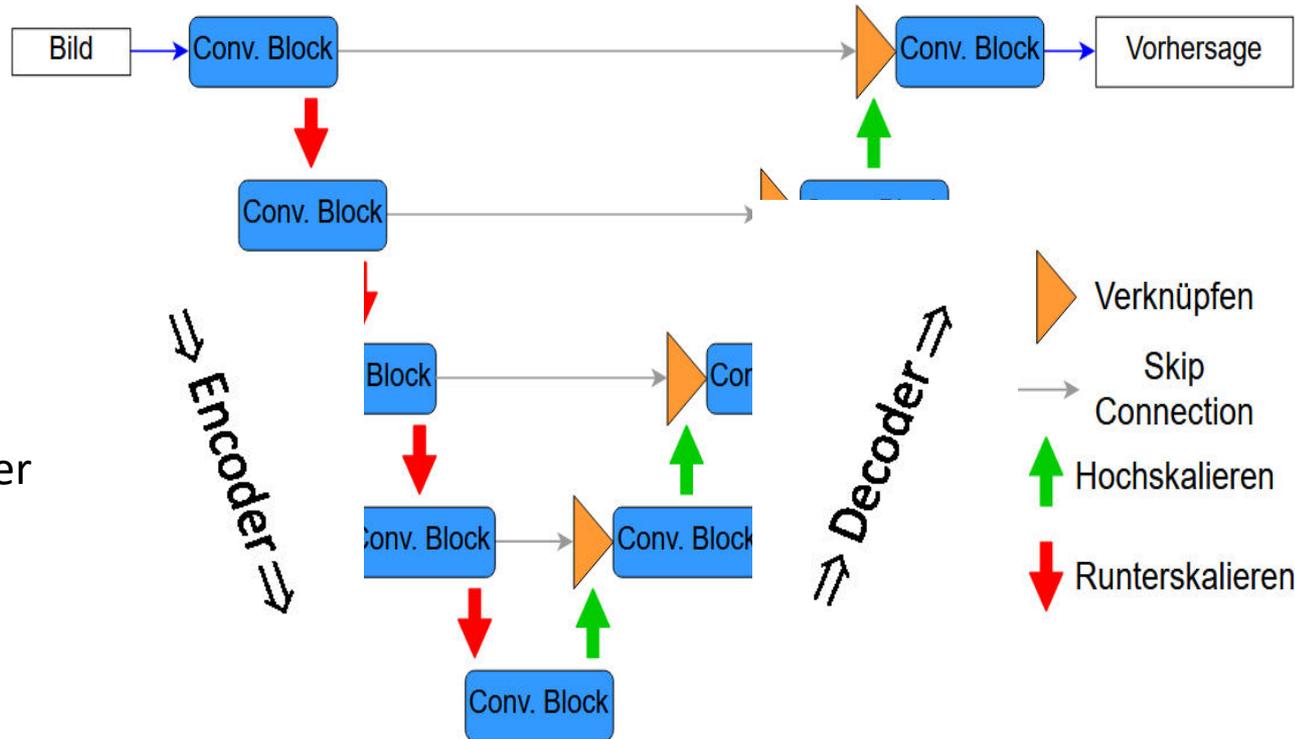
Faltungen im Neuronalen Netz



Optimierung durch Trainingsdaten!

Eine „Feature Map“ pro Filter

U-Net – Architektur



Stufenweise:

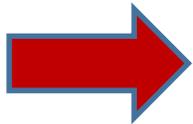
- Halbierung der Auflösung
- Verdopplung der Filter

[O. Ronneberger et al, 2015]

Trainingsdaten

Herausforderungen:

- Unbalancierter Datensatz (Viel Hintergrund, wenige Objekte)
- Aufladungseffekte
- Schwieriger Hintergrund (Porenränder, Verunreinigungen, etc.)
- Teilweise nicht markierte Objekte (Randobjekte) oder ungenau markierte Objekte (Zeitgründe)



Lückenhafte Segmentierung von dünnen Fasern

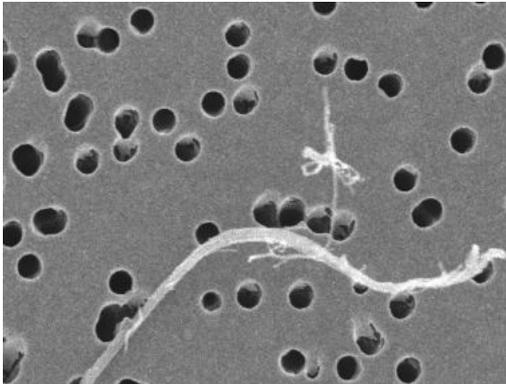
*Lösung: Nachträgliche (halb-)automatische
Ausbesserung der Trainingsdaten*

Trainingsdaten

Verwendeter Datensatz:

- 1080 ausgewertete REM-Bilder (5120x3840)
- 108.000 Trainingsbilder (512x384)
- Hauptsächlich CNT-Materialien, wenige Bilder mit anderen Materialien

REM-Bild



Grundwahrheit



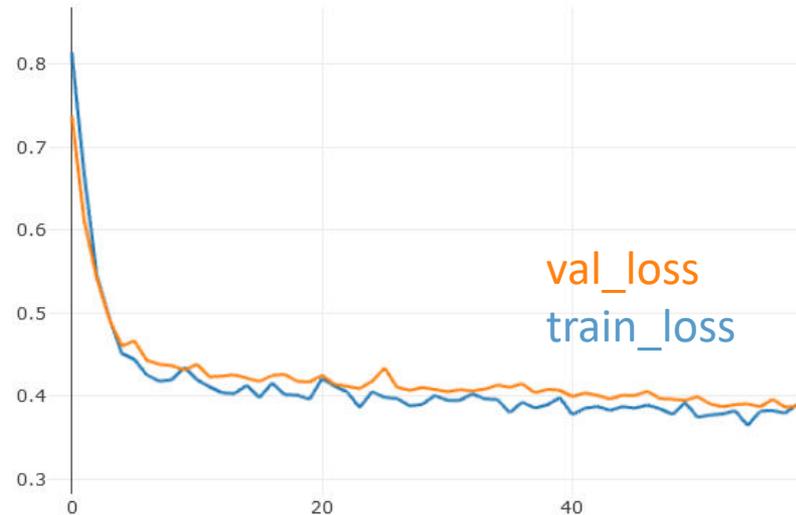
Training

Iteratives Optimieren der Parameter (Faltungskerne) an die Trainingsdaten.
Bewertung des Lernerfolgs über Verlust-Funktion (Loss Function)

Der Gradient der Verlust-Funktion bestimmt die Änderung an den Parameter werden

Trainingsstopp: Verlust auf dem Validierungsdatensatz stagniert

Für unser Problem:
Focal Loss + Dice Loss



Manuelle Faserauswertung

FibreDetect 1.4.19 (May 4 2021)* - Bearbeiter: AMP

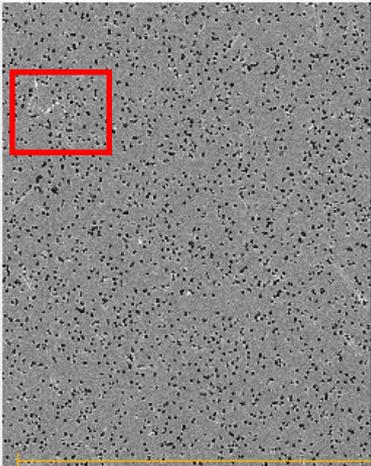
File Parameter Erkennung Ergebnisse ?

Bilderliste

S	Bildnr.	Ursprung
●	0001	190620_01_007_1.c

Bildansicht

1: TIFF

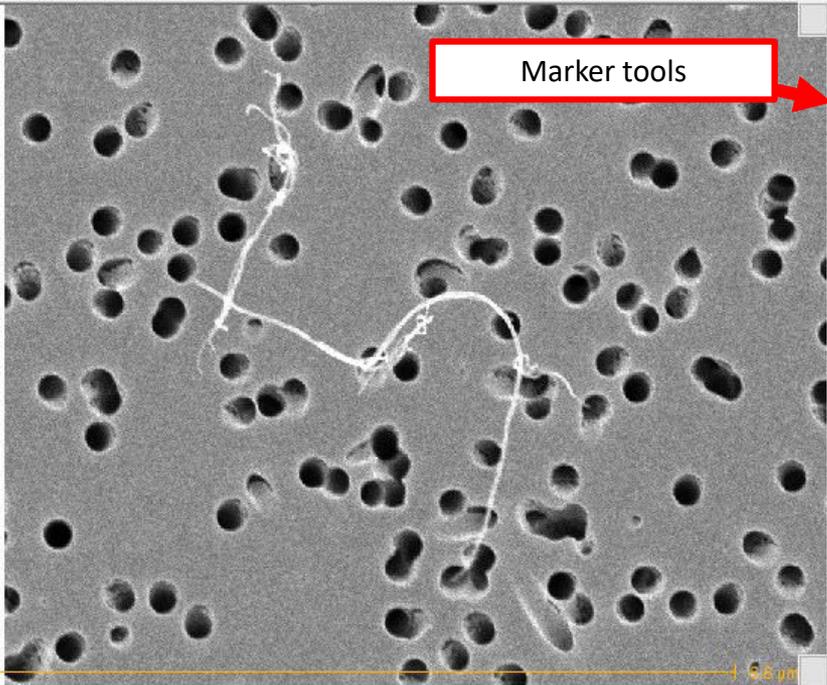


Pixelgröße des Bildes [nm] 8.268 Aut

Kommentar

Projektbeschreibung

Bild 190620_01_007_1_o_30e2.tif anzeigen: Zoom 67%



Marker tools

Objekte

Objekt	Farbe	Größe	Form
--------	-------	-------	------

Kommentar

Grauwertprofil

? [Diskette] Ende

Nichts ausgewählt

Manuelle Faserauswertung

The screenshot displays the FibreDetect software interface. The main window shows a grayscale image of fibers with two green lines tracing paths labeled "Faser 1" and "Faser 2". The interface includes a "Bilderliste" (Image List) on the left, a "Bildansicht" (Image View) in the center, and a toolbar on the right with various analysis tools and an "Objekte" (Objects) list.

Bilderliste

S	Bildnr.	Ursprung
●	0001	190620_01_007_1.c

Bildansicht

1: TIFF

Pixelgröße des Bildes [nm] 8.268 Aut

Kommentar

Objekte

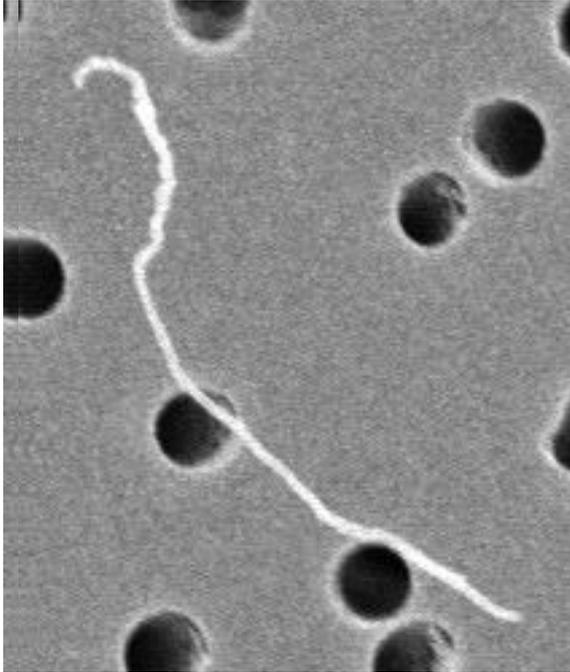
Objekt	Farbe	Linienbreite	Objekttyp

Kommentar

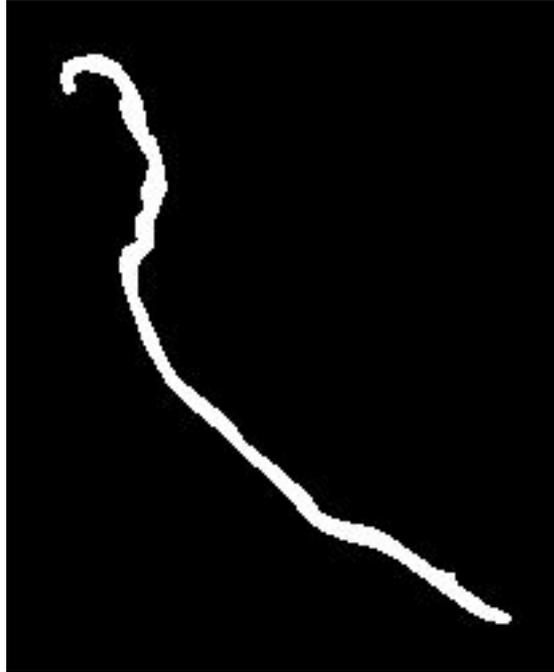
Grauwertprofil

? [Diskette] Ende

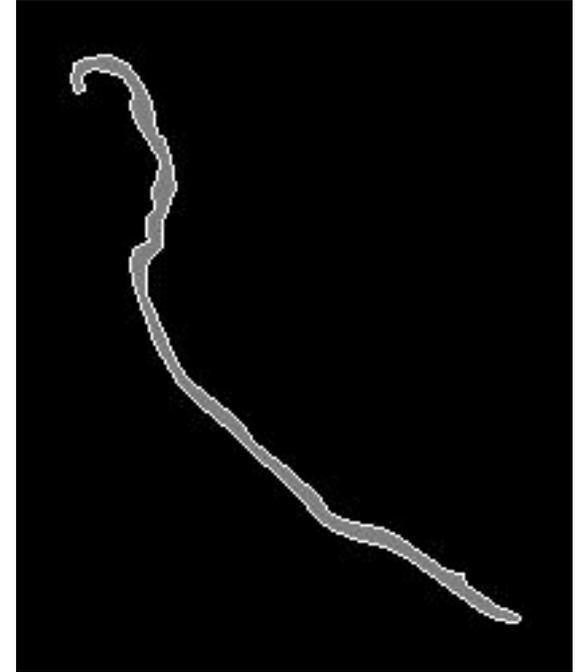
Algorithmische Faserverfolgung - Vektorisierung



Bildausschnitt

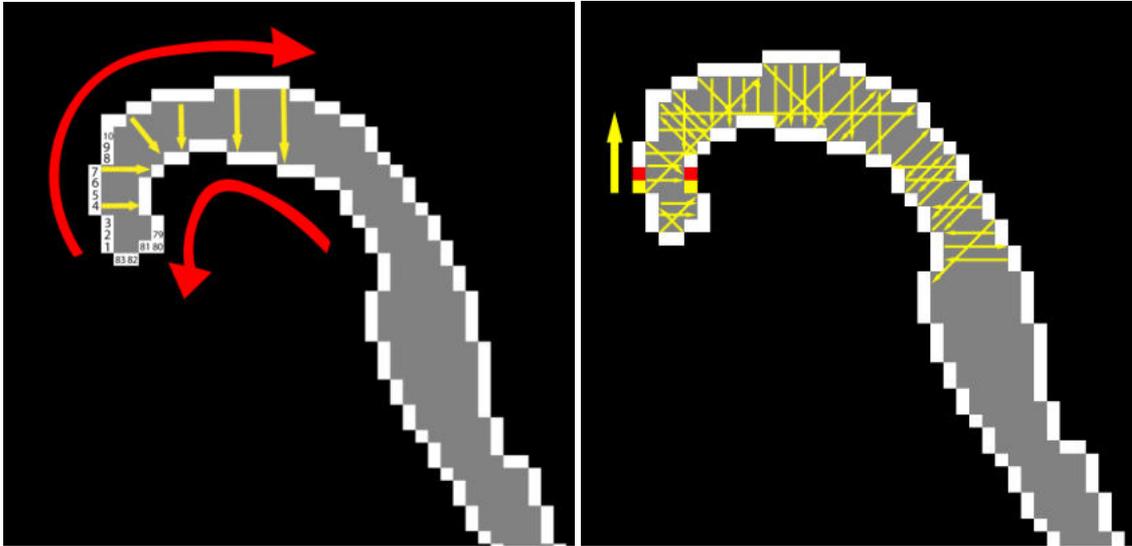


Segmentierung



Vektorisierung (Polygon)

Algorithmische Faserverfolgung - Breitenberechnung

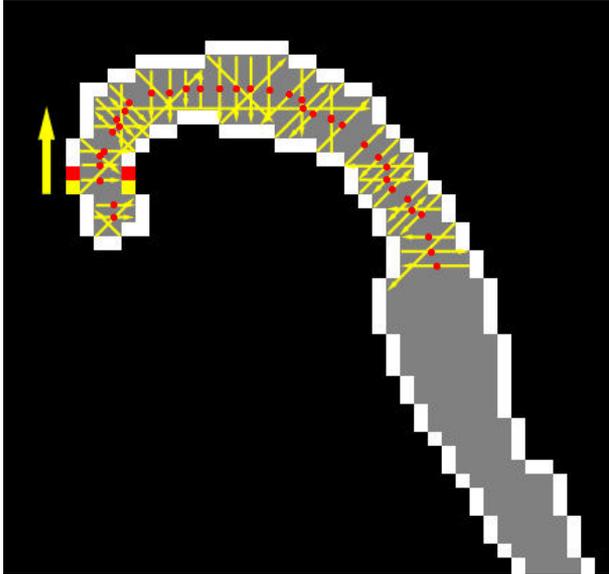


Benachbarte Punkte: Orthometrische Abstände zum gegenüberliegenden Rand

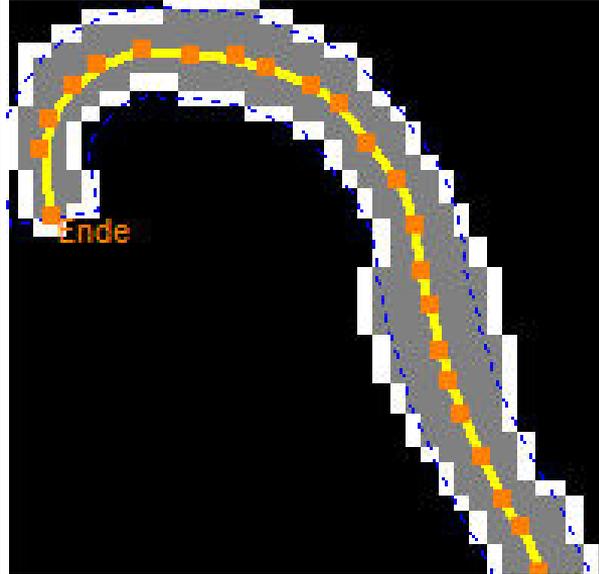


Breitenhistogramm:
Maximum = Faserbreite

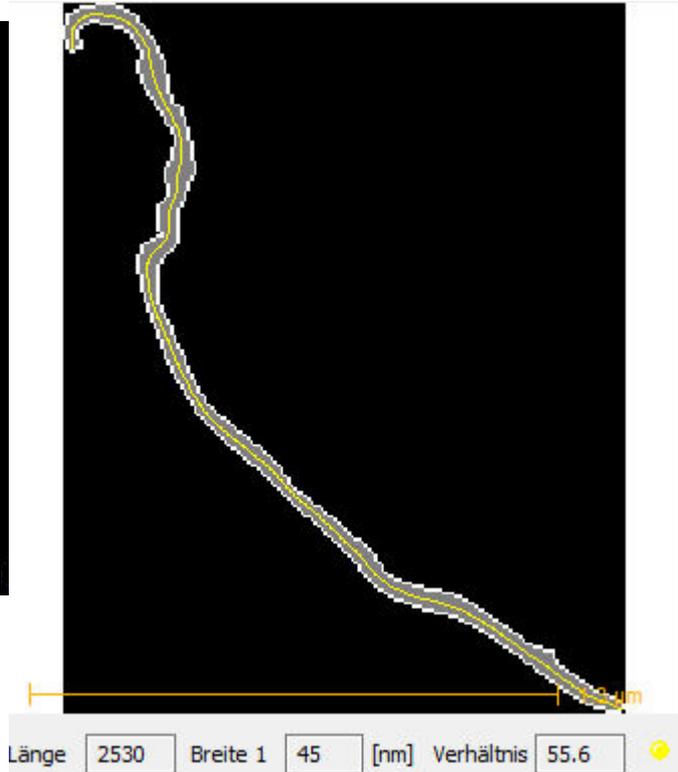
Algorithmische Faserverfolgung - Faserachse



Halbe Abstände zum Rand:
Stützpunkte der Faserachse,
innerhalb der
Breitentoleranz



Stützpunkte
berechnen einen
Spline



Faserlänge und -breite

Bestimmung der Fasermorphologie

	Einzelnes Objekt	Cluster		Agglomerate		
		Partikelförmig	Faserförmig	Partikelförmig	Faserförmig	
Low-Aspect Ratio	LARPO Einzelnes Partikel	LARIC (GNS-Cluster) Agglomeriert und zählbar		LARA (GNS-Agglomerate) Agglomeriert und zählbar		Low-Aspect Ratio
		LARPC	LARFC	LARPA	LARFA	
High-Aspect Ratio	HARFO Einzelne Faser	HARIC HAR-Cluster		HARA HAR-Agglomerat		High-Aspect Ratio
		HARPC	HARFC	HARPA	HARFA	
entspricht WHO-Definition	WHOFO Einzelne WHO-Faser	WHOC WHO-Cluster		WHOA WHO-Agglomerat		entspricht WHO-Definition
		WHOPC	WHOFC	WHOPA	WHOFA	

LAR steht für Low-Aspect Ratio ist durch ein Verhältnis von Länge zu Breite kleiner als 3 definiert.

HAR steht für High-Aspect Ratio ist durch ein Verhältnis von Länge zu Breite größer als 3 definiert.

WHO steht für Objekte länger als als 5 µm und schmaler als 3 µm.

O steht für Objekt, z.B., Partikel oder Faser. C für Cluster. A für Agglomerate.

Clusters sind charakterisiert durch eine kleine Anzahl an Objekten, die noch voneinander unterschieden werden können.

Agglomerates hingegen enthalten eine Objekte in so großer Anzahl, dass diese nicht voneinander unterschieden werden können

Algorithmische Vermessung von KNN-segmentierten Objekten

FibreDetect 1.4.19 (May 4 2021) - Auswertungvergleich - KNN-Segmentierung mit UNet_ce_210714_e120_w5 - REM 190620_01.fib - Bearbeiter: AMP

Datei Parameter Erkennung Ergebnisse ?

Bilderliste

S	Bildnr.	Ursprung
●	0001	190620_01_007_1_c

Bildansicht
1: TIFF

ANN-segmented objects

Objektklassifizierung

Kl	Typ	Status	Länge	Br
●	HARFA (A)	Auto	30016	33
●	HARFA (A)	Auto	17221	37
●	HARFA (A)	Auto	10320	62
●	HARFA (A)	Auto	9675	37
●	HARFA (A)	Auto	8813	58
●	HARFA (A)	Auto	8274	33
●	HARFA (A)	Auto	6872	37
●	LARFA (G)	Auto	6592	50
●	HARFA (A)	Auto	5409	33
●	HARFA (A)	Auto	5303	62
●	HARFA (A)	Auto	4890	45
●	HARFA (A)	Auto	4883	58
●	HARFA (A)	Auto	4671	45
●	HARFA (A)	Auto	4648	45
●	HARFA (A)	Auto	4630	62
●	HARFA (A)	Auto	4509	58
●	HARFA (A)	Auto	4168	50
●	HARFA (A)	Auto	4029	50
●	HARFA (A)	Auto	3983	45
●	HARFA (A)	Auto	3918	25
●	HARFA (A)	Auto	3914	37
●	HARFA (A)	Auto	3552	45
●	HARFA (A)	Auto	3477	37

Algorithmisch vermessene Faser

Segment: 0002 aus Bild: 0007:1 von unbekannt

Länge 6872 Breite 1 37 [nm] Verhältnis 184.7

Anzahl 4614 ausgewählt: 1 Splines 5 Breitenmaxima 1 unbekannt (neu)

Algorithmische Vermessung von KNN-segmentierten Objekten

The screenshot displays the FibreDetect 1.4.19 software interface. The main window is titled 'Objekt 0053 anzeigen: Zoom 104%' and shows a grayscale image of a fiber network with red dashed lines indicating algorithmically measured fibers. A red box highlights one of these fibers with the text 'Algorithmisch vermessene Faser'. The left panel shows a 'Bilderliste' with a table of image files and their origins. A blue box highlights a specific object in the list with the text 'KNN-segmentiertes Objekt'. The bottom panel shows a 'Bildansicht' with a zoomed-in view of the selected object, showing its segmented structure and measurement parameters.

Bilderliste

S	Bildnr.	Ursprung
0049	190620_01_049	
0050	190620_01_050	
0051	190620_01_051	
0052	190620_01_052	
0053	190620_01_053	
0054	190620_01_054	
0055	190620_01_055	
0056	190620_01_056	
0057	190620_01_057	
0058	190620_01_058	
0059	190620_01_059	
0060	190620_01_060	
0061	190620_01_061	
0062	190620_01_062	
0063	190620_01_063	
0064	190620_01_064	
0065	190620_01_065	
0066	190620_01_066	

Objekt 0053 anzeigen: Zoom 104%

Algorithmisch vermessene Faser

KNN-segmentiertes Objekt

Pixelgröße des Bildes [nm] 8.268 Autokontrast

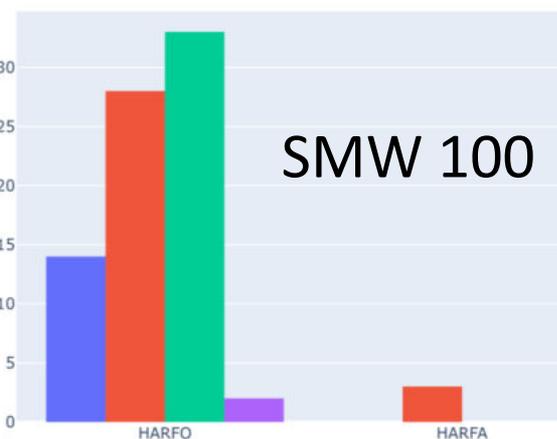
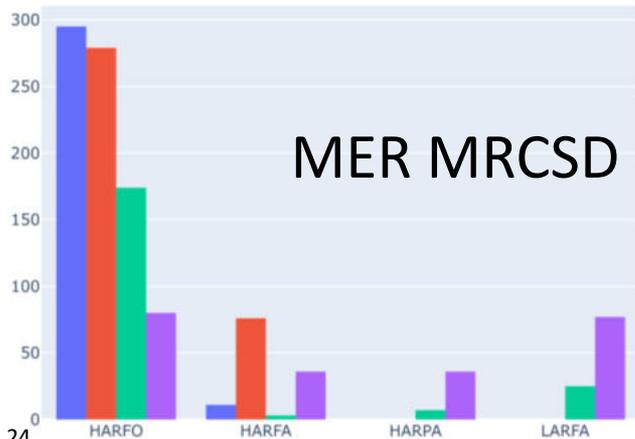
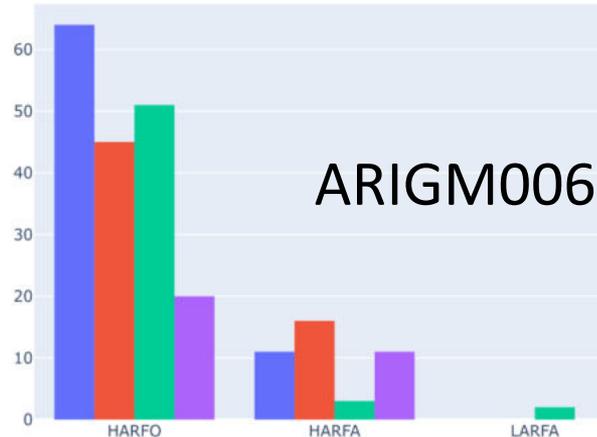
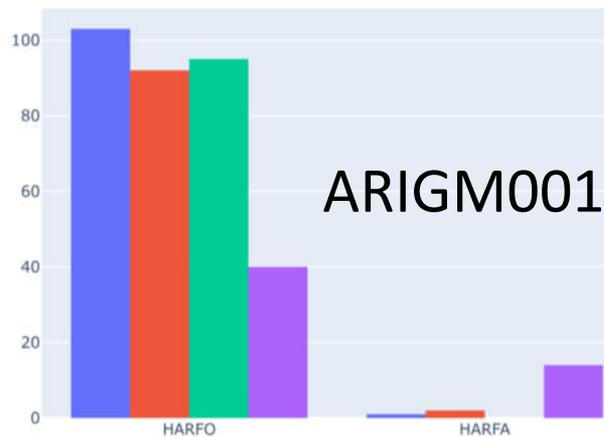
Krümmungen

Faserpolygon **Faserhärten**

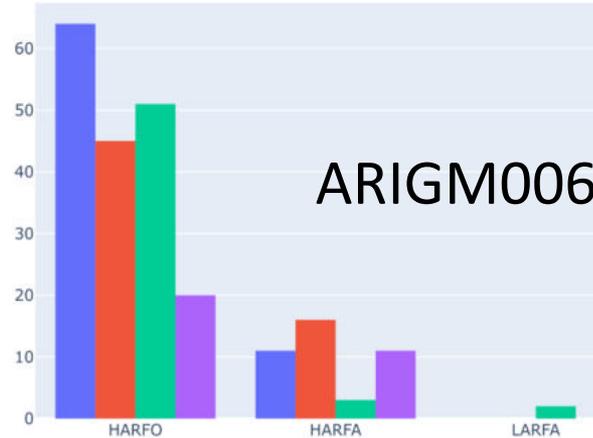
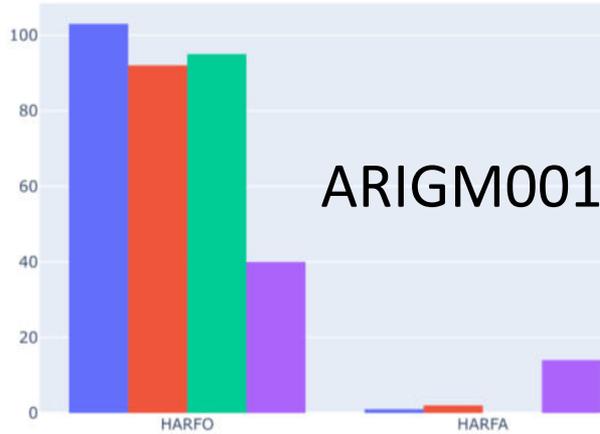
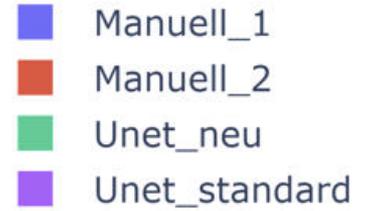
Nichts ausgewählt

Auswertungsvergleich - Anzahl

- Manuell_1
- Manuell_2
- Unet_neu
- Unet_standard

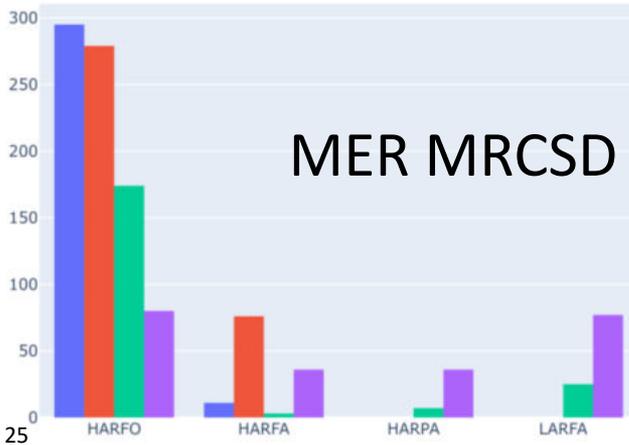


Auswertungsvergleich - Anzahl



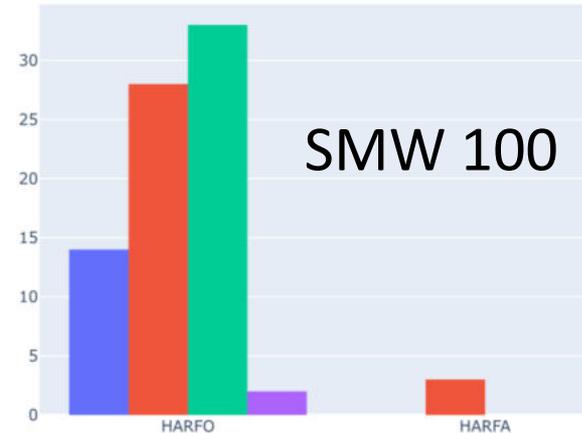
ARIGM006:

- breite Verteilung
- oft agglomeriert



MER MRCS D:

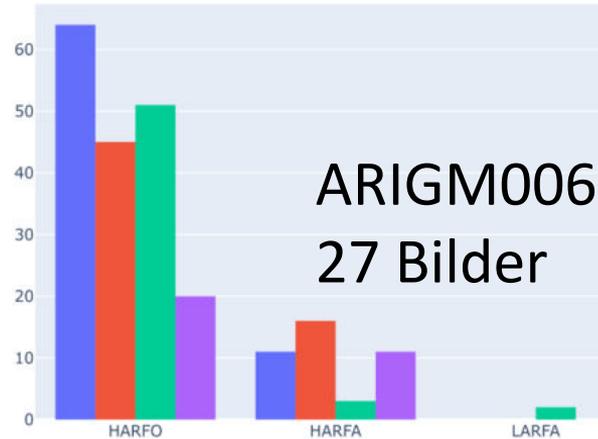
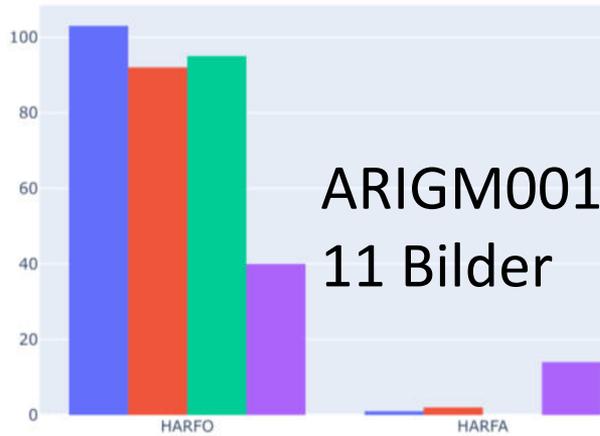
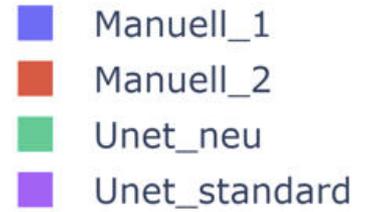
- sehr lang
- oft agglomeriert



SMW 100:

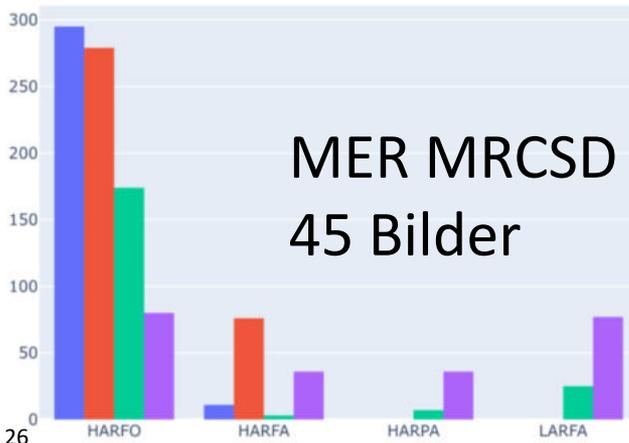
- kurz
- sehr niedrige Belegung

Auswertungsvergleich - Anzahl



ARIGM006:

- breite Verteilung
- oft agglomeriert



MER MRCSO:

- sehr lang
- oft agglomeriert

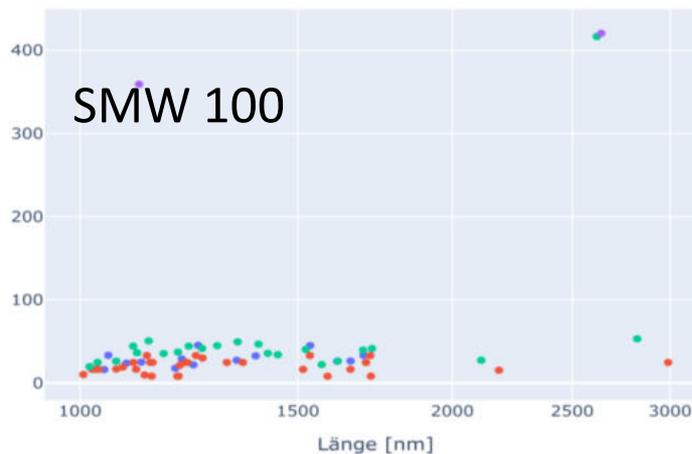
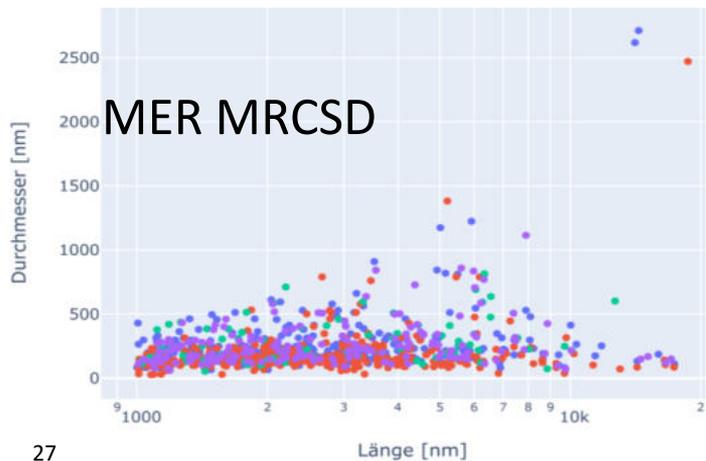
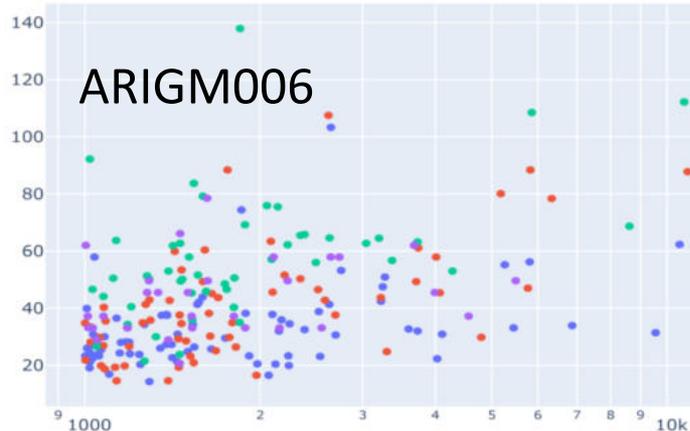
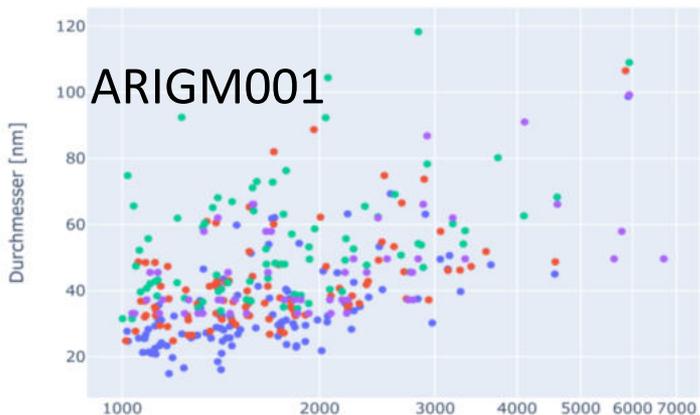


SMW 100:

- kurz
- sehr niedrige Belegung

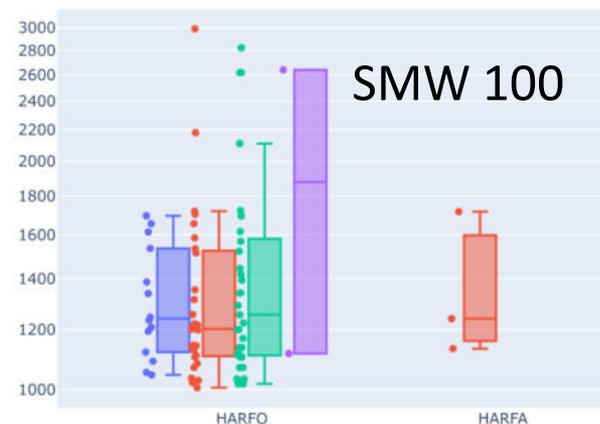
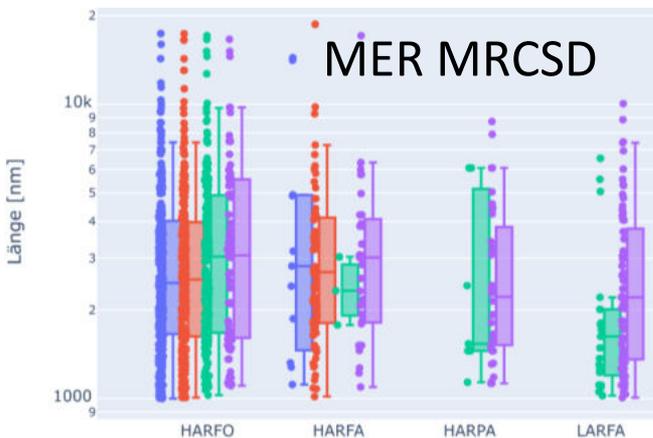
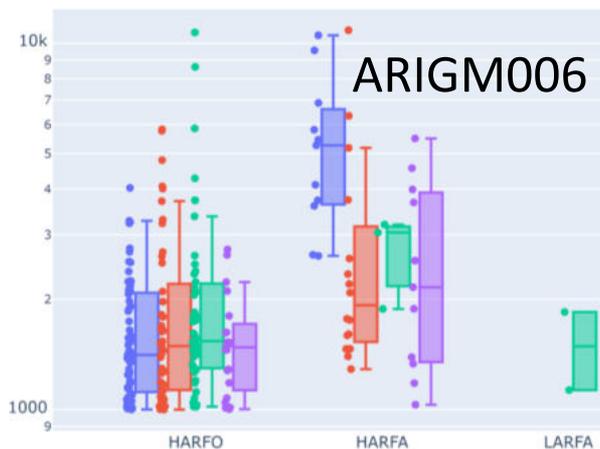
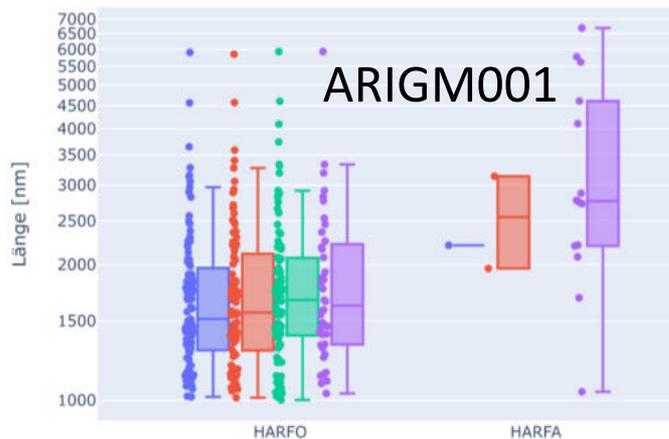
Auswertungsvergleich - Streudiagramme

- Manuell_1
- Manuell_2
- Unet_neu
- Unet_standard



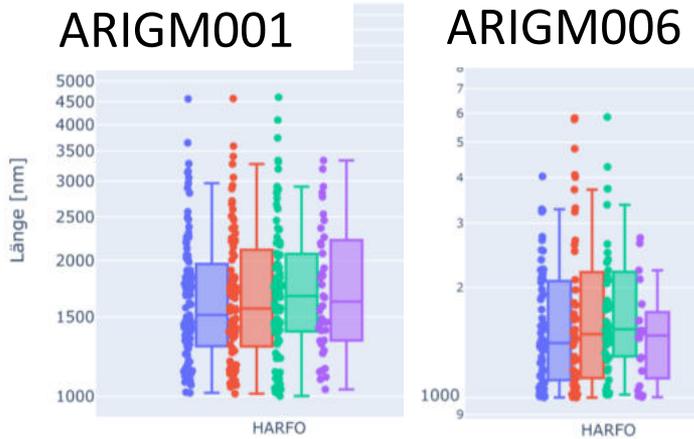
Auswertungsvergleich - Länge

- Manuell_1
- Manuell_2
- Unet_neu
- Unet_standard



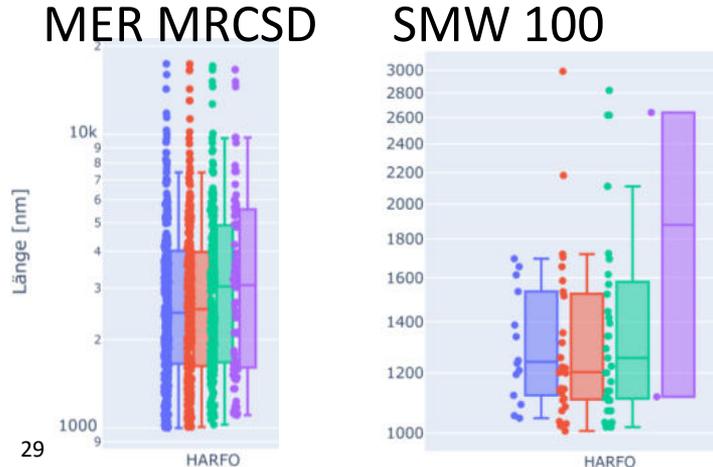
Auswertungsvergleich - Länge

- Manuell_1
- Manuell_2
- Unet_neu
- Unet_standard



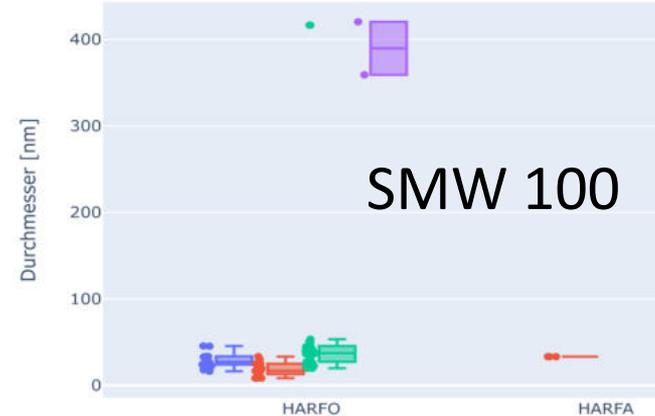
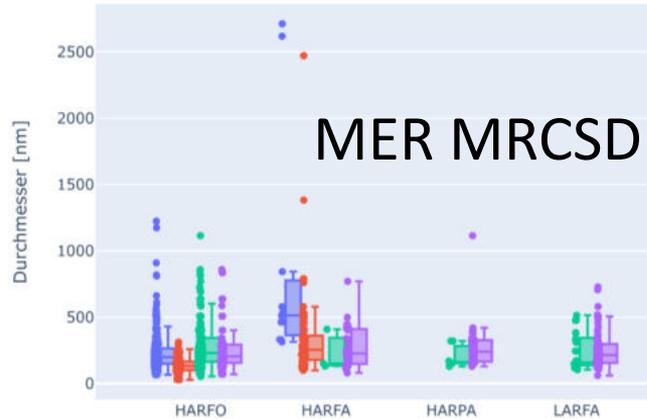
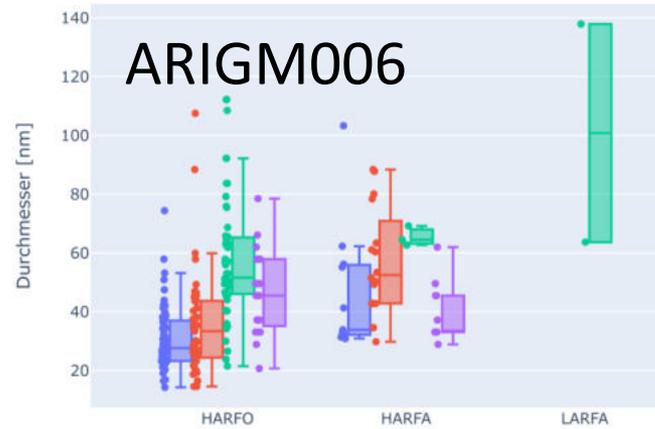
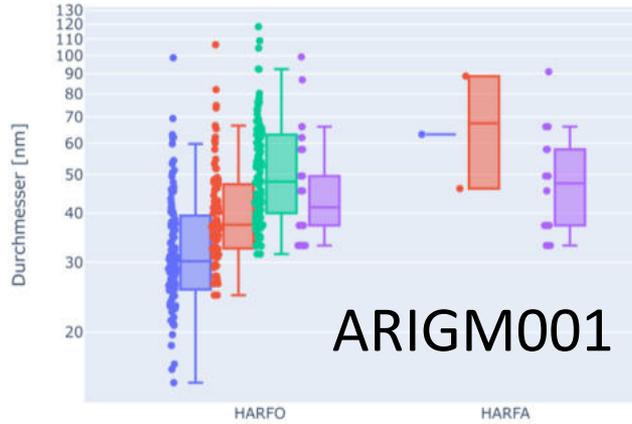
Median Länge [nm] (HARFOs)

	Man. 1	Man. 2	Unet (neu)	Unet (standard)
ARIGM001	1520	1570	1670	1620
ARIGM006	1420	1490	1540	1480
MER MRCSD	2470	2540	3030	3070
SMW 100	1240	1200	1260	1880



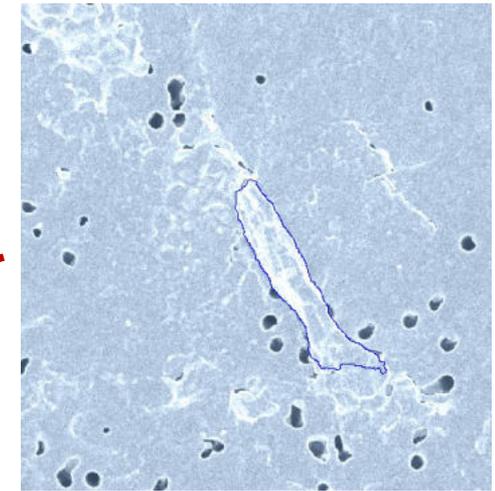
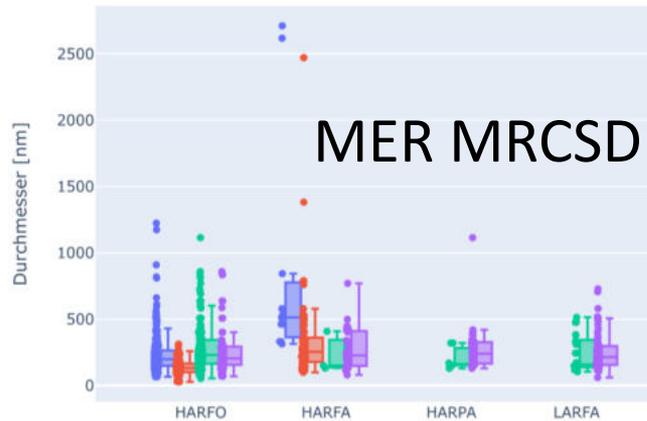
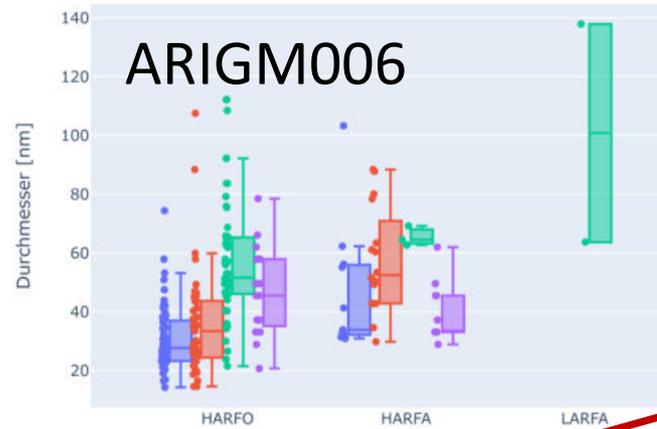
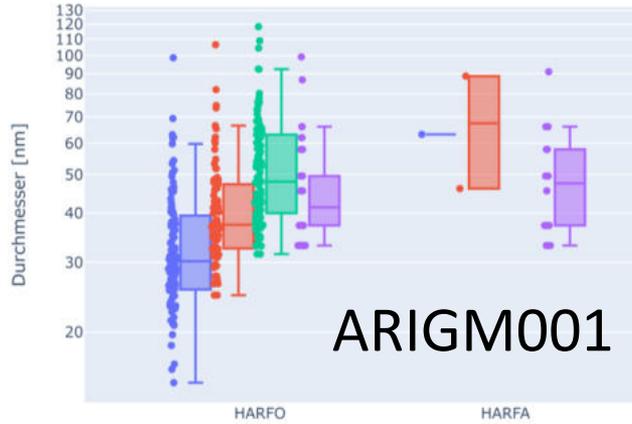
Auswertungsvergleich - Durchmesser

- Manuell_1
- Manuell_2
- Unet_neu
- Unet_standard



Auswertungsvergleich - Durchmesser

- Manuell_1
- Manuell_2
- Unet_neu
- Unet_standard

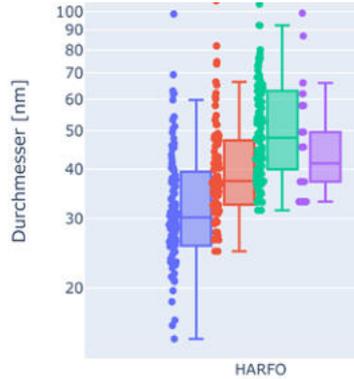


Hintergrund wird
als Faser gewertet

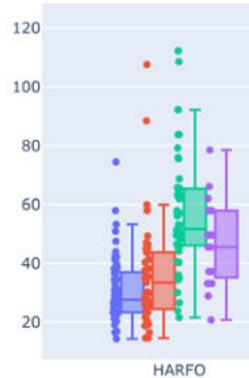
Auswertungsvergleich - Durchmesser

- Manuell_1
- Manuell_2
- Unet_neu
- Unet_standard

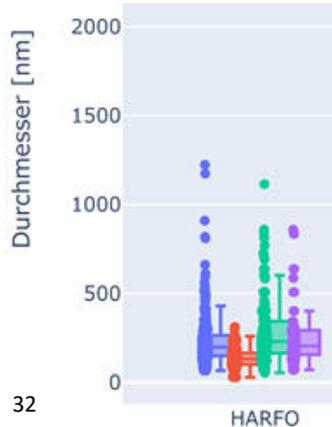
ARIGM001



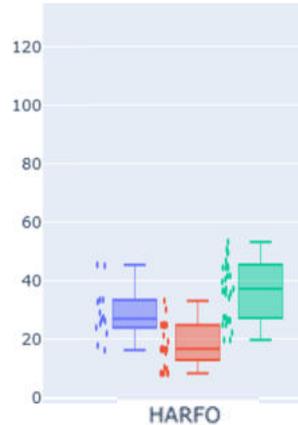
ARIGM006



MER MRCSD



SMW 100



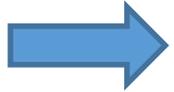
Median Durchmesser [nm] (HARFOs)

	Man. 1	Man. 2	Unet (neu)	Unet (standard)
ARIGM001	30,2	37,4	48,0	41,4
ARIGM006	27,7	33,4	51,6	45,5
MER MRCSD	200	130	230	205
SMW 100	27,0	16,7	37,2	390

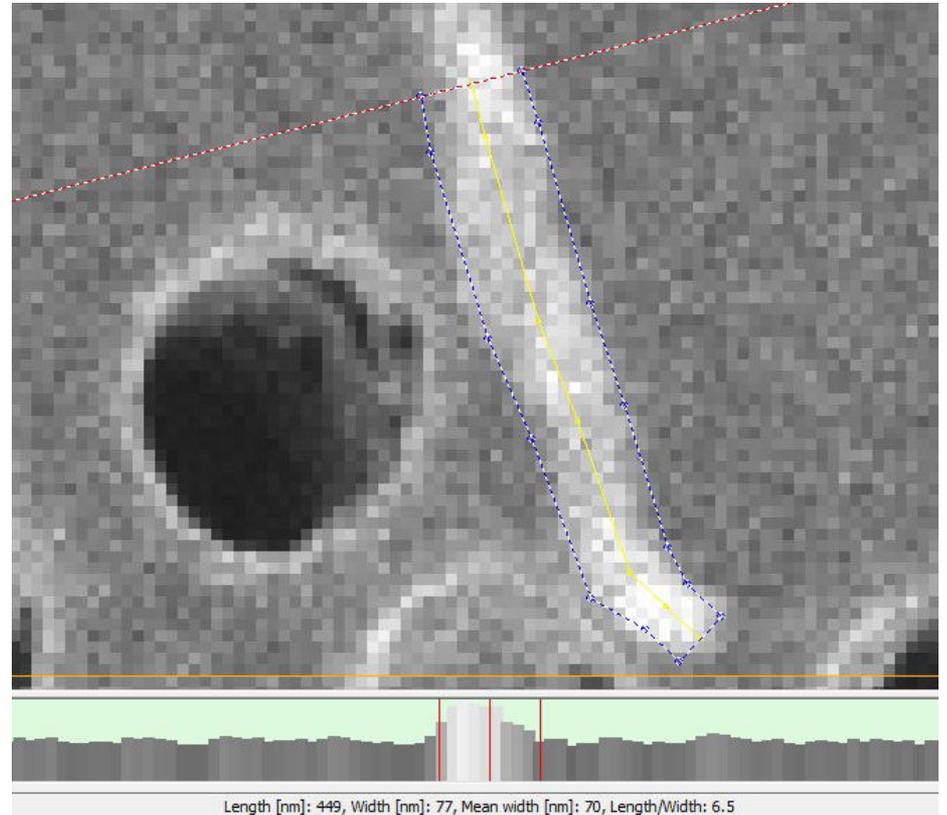
Durchmesser wird
systematisch überschätzt

Durchmesserbestimmung via Grauwertprofil

Faserdurchmesser über das Grauwertprofil (**senkrechte Linie** zum **Spline**) bestimmbar



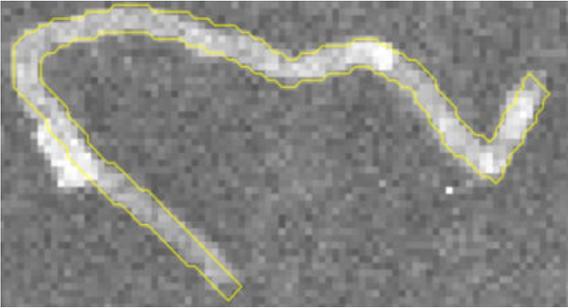
Automatische Korrektur des Durchmessers von bereits erkannten Fasern möglich!



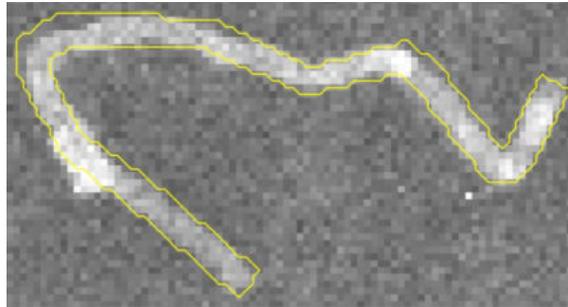
Exemplarischer Durchmesservergleich

Manuell

Auswerter 1: $d = 31 \text{ nm}$

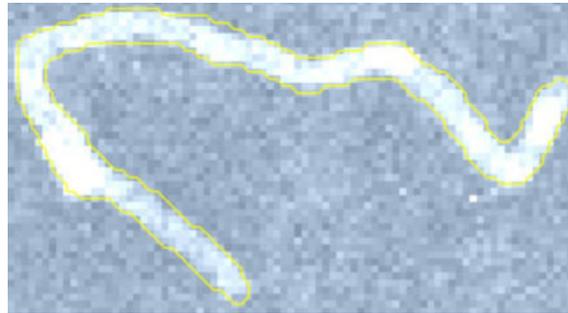


Auswerter 2: $d = 37 \text{ nm}$



Automatisch

Unet: $d = 45 \text{ nm}$



Korrektur via Grauwertprofil

Mittelwert: $d = 40 \text{ nm}$

Mittelwert ohne Ausreißer*: $d = 38 \text{ nm}$

*nur Durchmesser innerhalb von 2σ

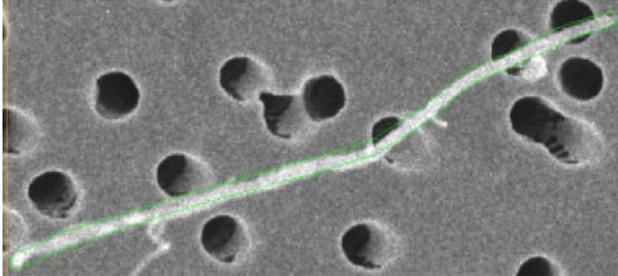
Abweichung kleiner als 1 Pixel!

1 Pixel: 8,268 nm

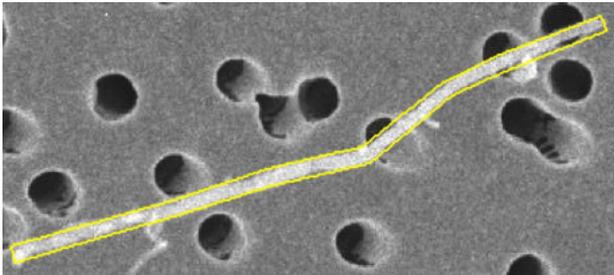
Exemplarischer Durchmesservergleich

Manuell

Auswerter 1: $d = 63 \text{ nm}$

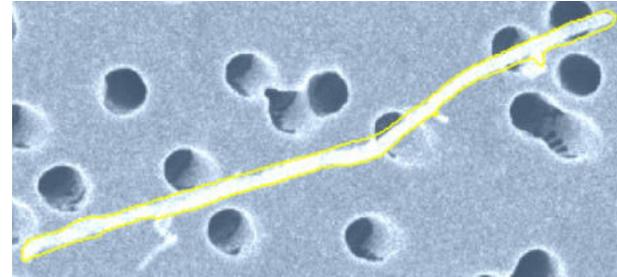


Auswerter 2: $d = 74 \text{ nm}$



Automatisch

Unet: $d = 87 \text{ nm}$



Korrektur via Grauwertprofil:

Mittelwert: $d = 71 \text{ nm}$

Mittelwert ohne Ausreißer*: $d = 67 \text{ nm}$

*nur Durchmesser innerhalb von 2σ

Korrigierter Wert stimmt mit der manuellen Auswertung überein!

Zusammenfassung und Ausblick

- Längenvergleich (HARFOS): **passt**
- Durchmesservergleich: **Durchmesser wird überschätzt**
 - Grauwertkorrektur auf alle Fasern anwenden
 - Verschwindet die systematische Abweichung?
- Algorithmische Klassifikation der Objektmorphologie nicht immer zuverlässig
 - Kann ein neuronales Netz das besser?