



Anwendung von Machine Learning zur Kompensation von Laserlageschwankungen bei der Messung von Dichteprofilen mittels Thomsonstreuung an Wendelstein 7-X



Jule Frank

Technische Universität Berlin
jule.m.frank@campus.tu-berlin.de



This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 — EUROfusion). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them.



Einleitung Fusion und Plasmaphysik

- Entwicklung der Fusion auf der Erde

Hintergrund und Idee

- Elektronendichteprofile zeigen profilverzerrende Effekte

Methode

- Korrektur der Profile im Nachhinein

Ergebnisse

Ausblick



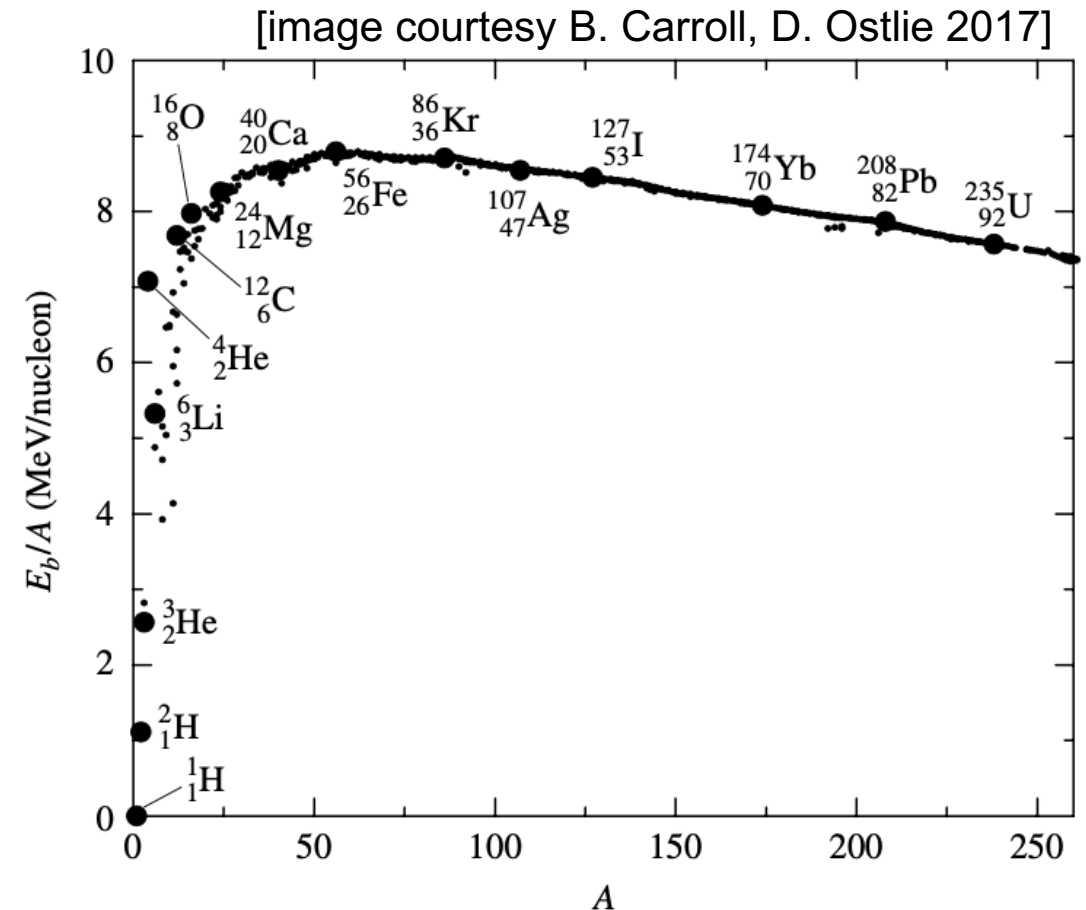
Einleitung Fusion und Plasmaphysik



Nukleare Energiegewinnung



- Energiegewinnung durch Kernspaltung bereits lange üblich (U-Kr,Ba,n,E)
- Massendefekt $E = \Delta m c^2$: Masse der einzelnen Nukleonen geringer als Masse des Atomkerns
→ Energie wird frei
- Kernfusion (De,Tri- He,n) hätte viele Vorteile
 - Wesentlich mehr Energie (2 x 1L Gasflaschen ↔ 470 Tonnen Kohle)
 - Reduzierter radioaktiver Abfall + kürzere Halbwertszeit
 - Einfachere Handhabung beim Abschalten



Kernfusion – Sonne vs. Erde

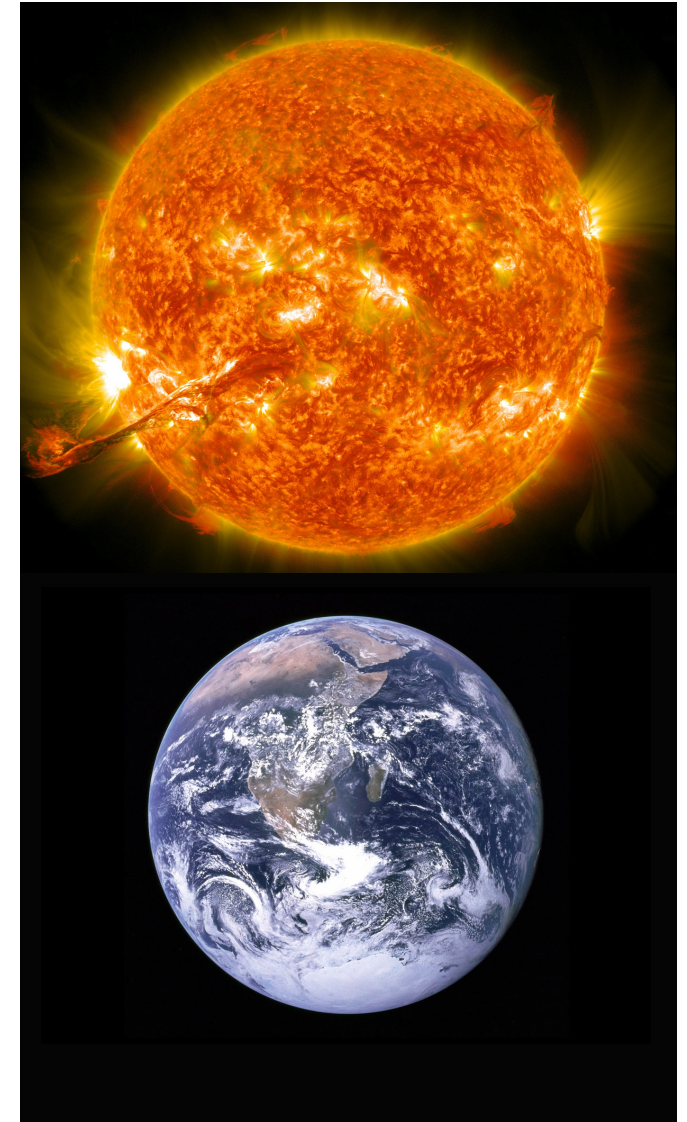
[image courtesy NASA]

Herausforderung: Überwindung des abstoßenden Potentials

- Sonne: hohe Temperatur (20 Mio. K) + großer Druck (200 Mrd. Bar durch Eigengravitation)

Reproduzierbarkeit dieser Verhältnisse auf der Erde:

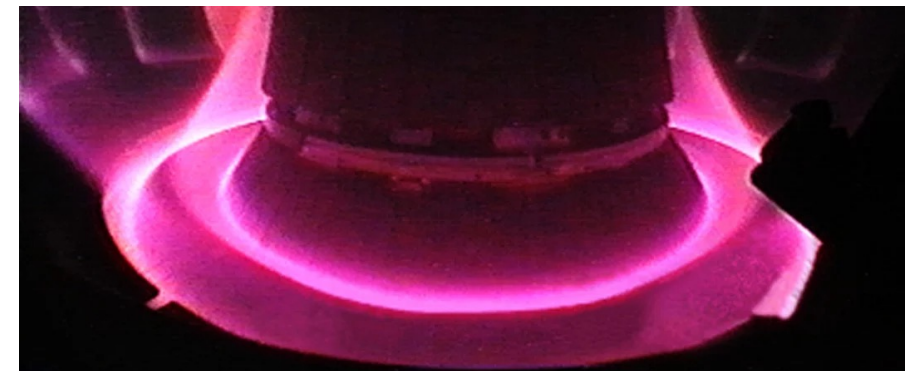
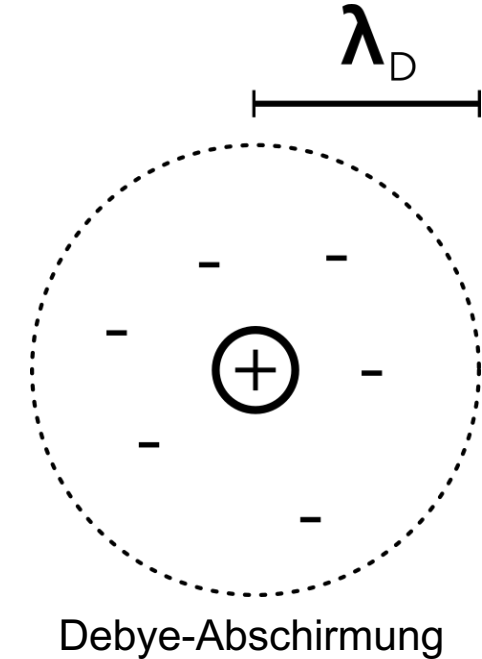
- Derart hoher Druck kann technisch nicht erreicht werden
→ Fusion über hohe Temperatur notwendig, Reaktoren erreichen über 100 Mio. K
- Jegliche Materie ist bei diesen Temperaturen vollständig ionisiert.
→ **Plasmazustand** („vierter Aggregatzustand“)



Plasma



- Materiewolke freier Ladungsträger
→ Zwei Teilchenarten: Elektronen und Ionen (z.B. Atomrümpfe)
- Eigenschaften:
 - Hohe el. Leitfähigkeit
 - Kollektives Verhalten aufgrund von (langreichweitigen) EM-Feldern
 - Quasineutralität
 - Plasmadichte $n \equiv n_i \approx n_e$
 - Debye-Abschirmung: Abschwächen von Ladungen



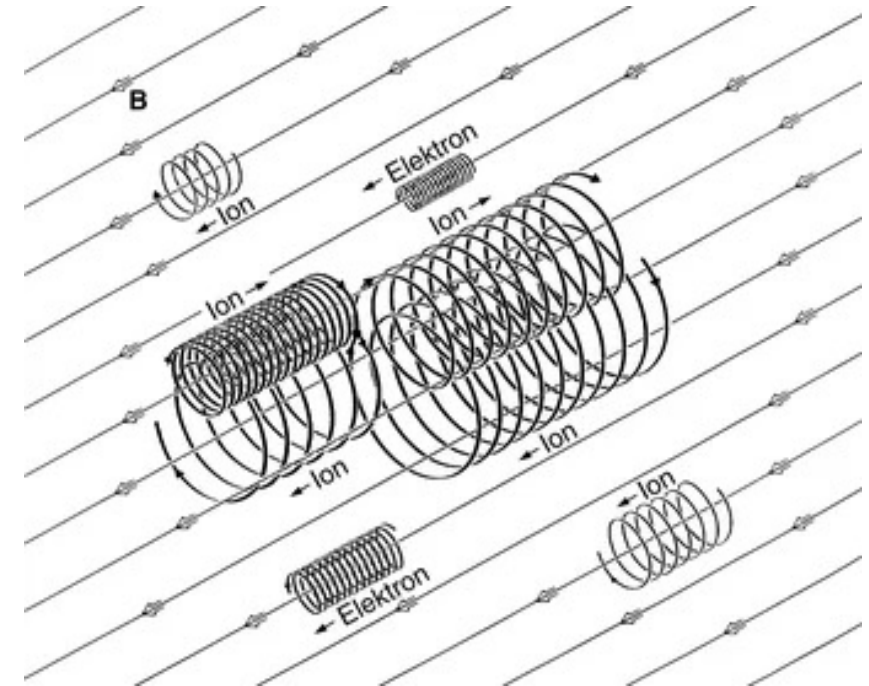
[image courtesy IPP, ASDEX Upgrade]

Einschluss

- Für Fusion muss Plasma in passendem Gefäß gehalten werden
- Zündbedingung: Lawson-Kriterium (Energieeinschlusszeit)
→ **Problem**: Plasma darf aufgrund der hohen Temperaturen keinen Kontakt zum Gefäß haben!!!
- Verschiedene Ansätze um einen Einschluss zu erreichen:
z.B. **magnetischer Einschluss**

Magnetischer Einschluss

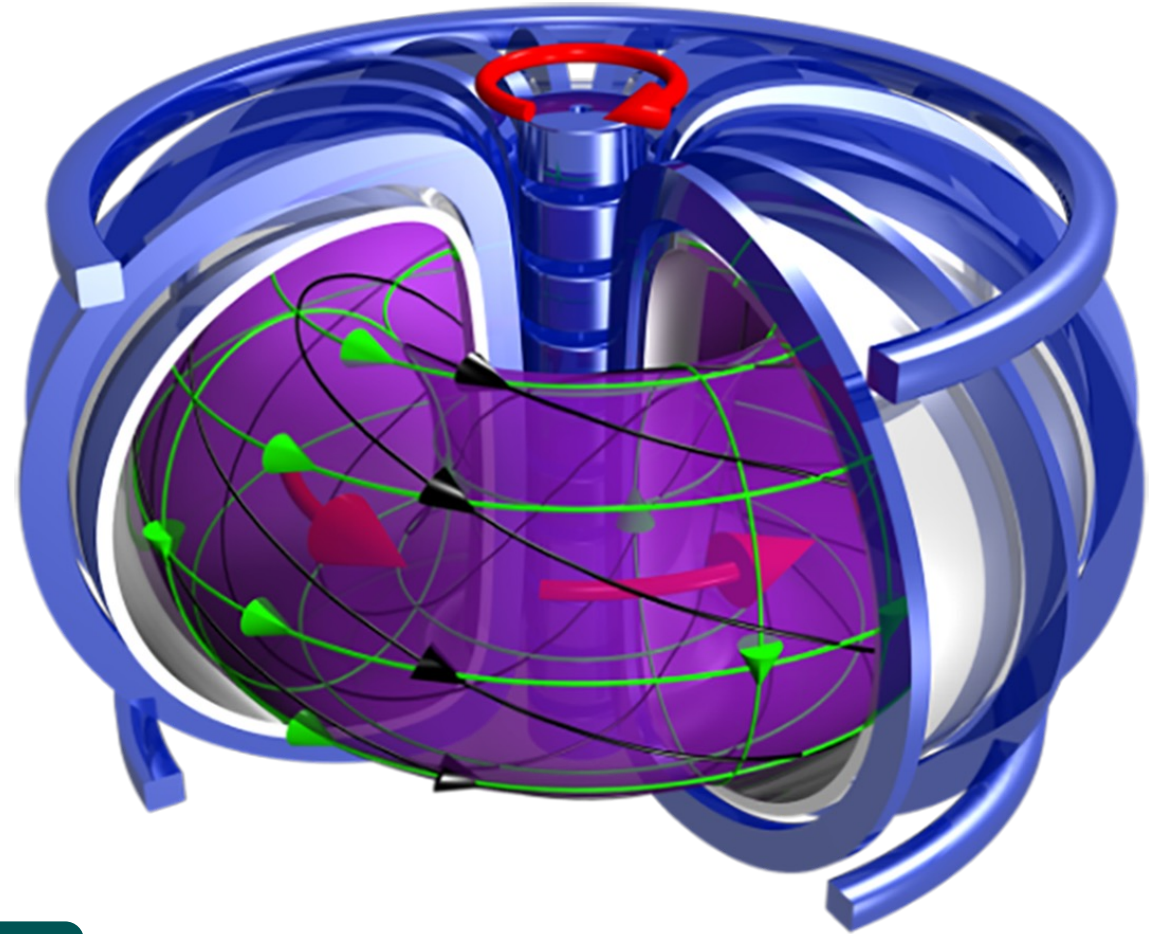
Gyration der Teilchen um Magnetfeldlinien aufgrund der Lorentzkraft → Teilchen folgen Magnetfeld



[image courtesy IPP]

magnetischer Einschluss: Tokamak

- Toroidalfeldspulen sorgen für ringförmiges, toroidales Magnetfeld
→ Reicht aufgrund von Drifts nicht aus um Plasma im Gefäß zu halten
- Transformator induziert einen Plasmastrom
→ Erzeugt poloidales Magnetfeld
- Überlagerung der Magnetfelder führt zu endgültiger helikalen Magnetfeldkonfiguration (schwarz)



Nachteil: Betrieb kann nur gepulst erfolgen

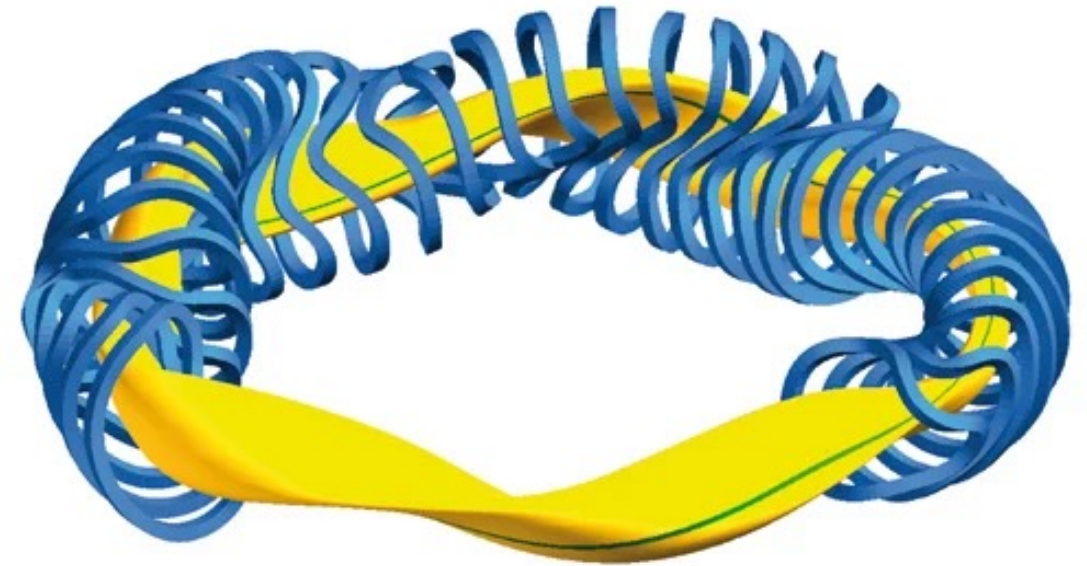
[image courtesy IPP]

Magnetischer Einschluss: Stellarator

- Magnetfeld erzeugt von Spulen, deren Form mithilfe von Supercomputern berechnet wurde
- Konfiguration erlaubt in der Theorie dauerhaften Betrieb

→ **Wendelstein 7-X** soll dies in der Praxis zeigen

Wendelstein 7-X, IPP Geifswald

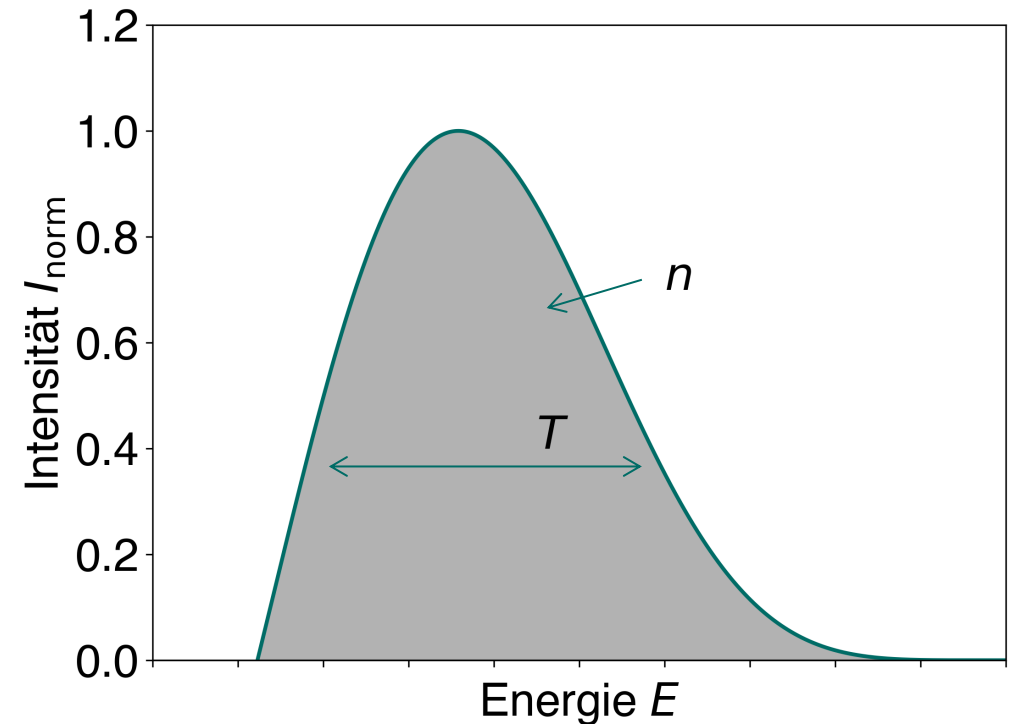


[image courtesy IPP]

Wendelstein 7-X: Thomsonsteuerung

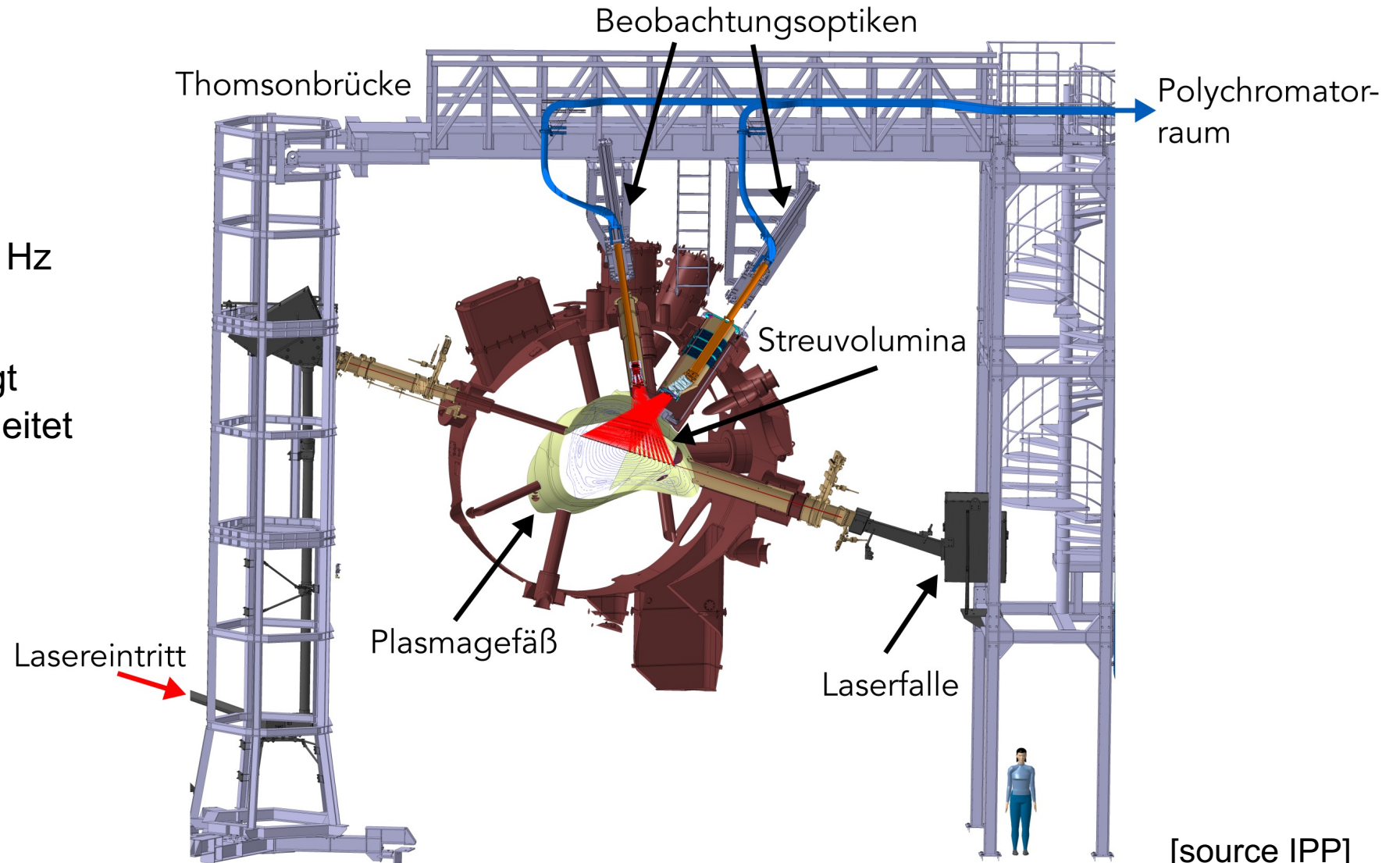
- Kontaktfreie Messmethode für die Dichte (und Temperatur)
- Klassisch:
 - EM-Welle trifft auf freies, geladenes Teilchen
→ Beschleunigung Teilchen (wegen Impulsübertrag Ionen vernachlässigbar)
 - Beschleunigte Ladungen emittieren EM-Strahlung
→ Werden als gestreute Welle detektiert
- Thomsonstreuung:
Photonenmasse $m_p \ll$ Teilchenmasse m
- Temperatur proportional zur Breite
- Dichte proportional zum Integral

Beispielspektrum Thomson-Streuung



Wendelstein 7-X: Thomsonsteuerung

- 3 Nd:YAG Laser feuern abwechseln mit 30 Hz
→ Profilmessung mit 90 Hz
- Laserpulse werden in separatem Labor erzeugt und in die Torushalle geleitet
→ Laser legen weite Strecke zurück



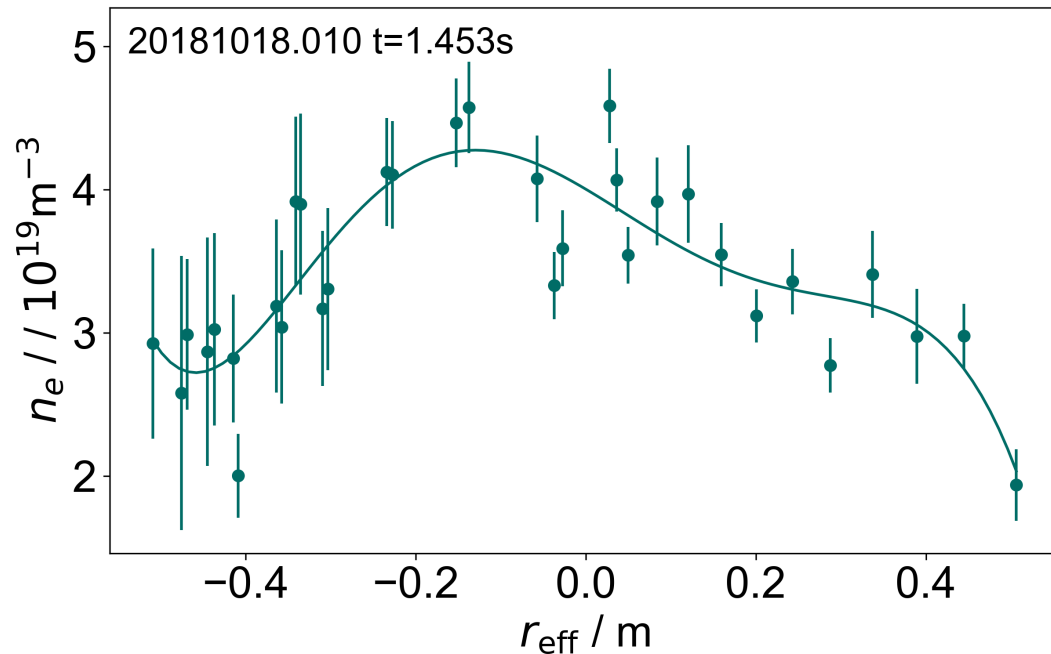
[source IPP]



Hintergrund und Idee

Hintergrund: Problematik der Profile

Die Profile sind nicht glatt und symmetrisch!

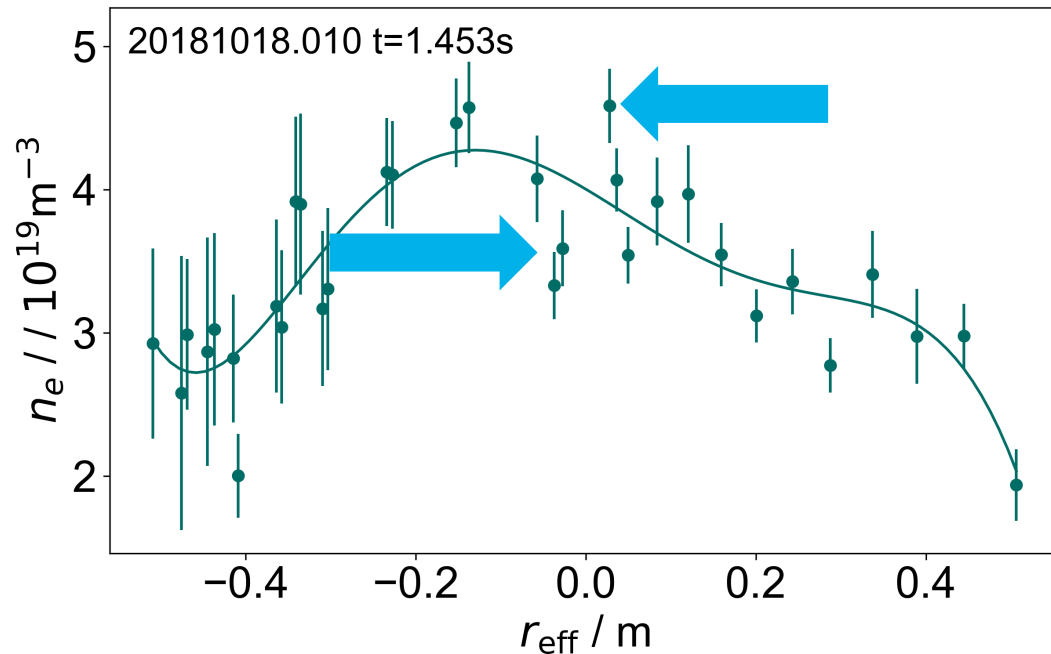


Glätte:

- In der betrachteten Größenordnung verläuft die Dichte kontinuierlich
 - Fehlerbalken zeigen statistischen Fehler
- Keine Sprünge zwischen benachbarten Datenpunkten zu erwarten

Hintergrund: Problematik der Profile

Die Profile sind nicht glatt und symmetrisch!



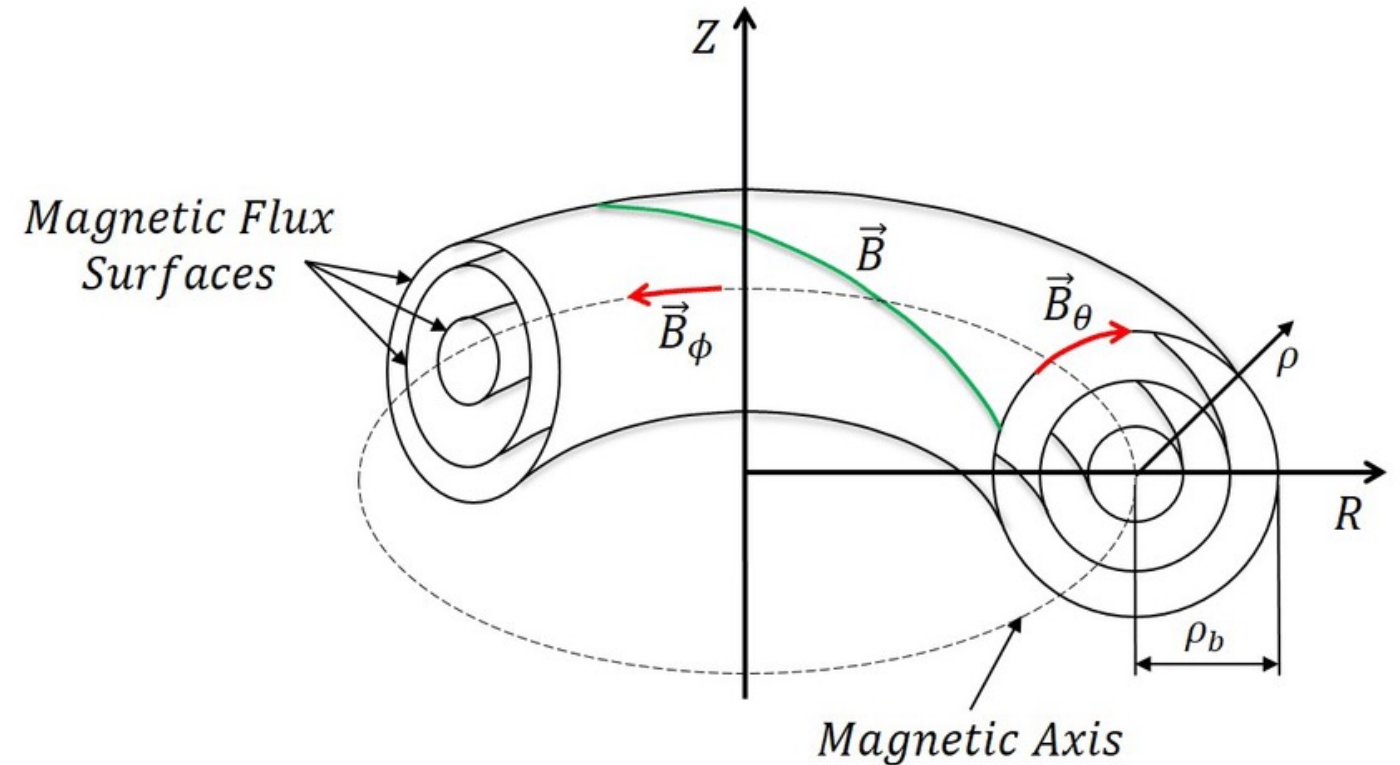
Glätte:

- In der betrachteten Größenordnung verläuft die Dichte kontinuierlich
 - Fehlerbalken zeigen statistischen Fehler
- Keine Sprünge zwischen benachbarten Datenpunkten zu erwarten

Hintergrund: Problematik der Profile

Symmetrie

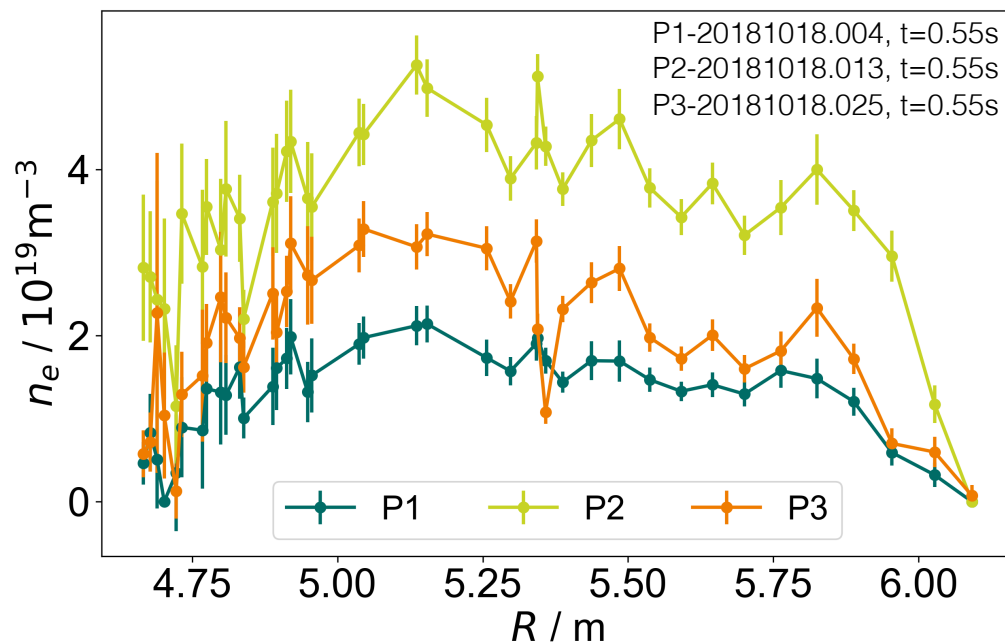
- Beispiel Tokamak: Teilchen bewegen sich ausschließlich auf Flussflächen (*flux surfaces*)
- Konstanter Plasmadruck auf Flussflächen → gleichmäßige Dichteverteilung
- Jede der Flächen wird beim Betrachten des Querschnitts 2 Mal getroffen → in magnetischen Koordinaten Profil symmetrisch zur Mitte



[J.Barton, American Control Conference (2015)]

Hintergrund: Problematik der Profile

- Besonders auffällig für Profile des gleichen Plasmas bzw. gleicher Plasmaparameter (Plasmaenergie, Heizung, ...)



Relevanz für Forschung

- Turbulenz sorgt für Plasmainstabilitäten (z.B. magnetische Rekonnektion)
- Berechnet sich aus dem Dichtegradienten
- Bisher: Fit des Profile \rightarrow durch große Schwankungen Spielraum für Spekulation

Hintergrund: größte Fehlerquelle der TS

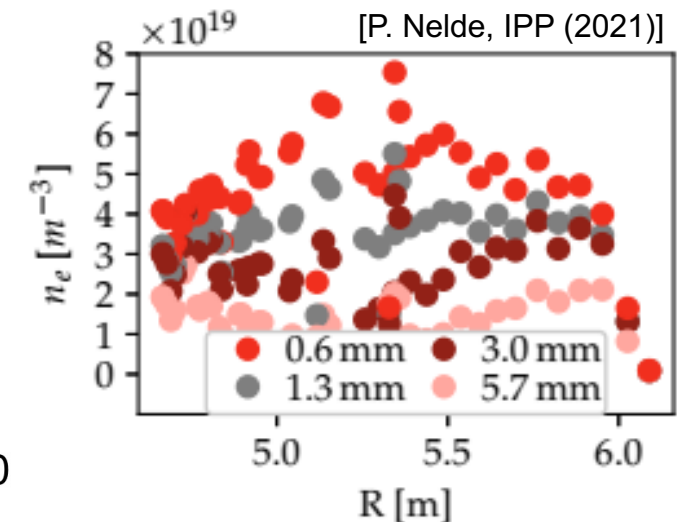
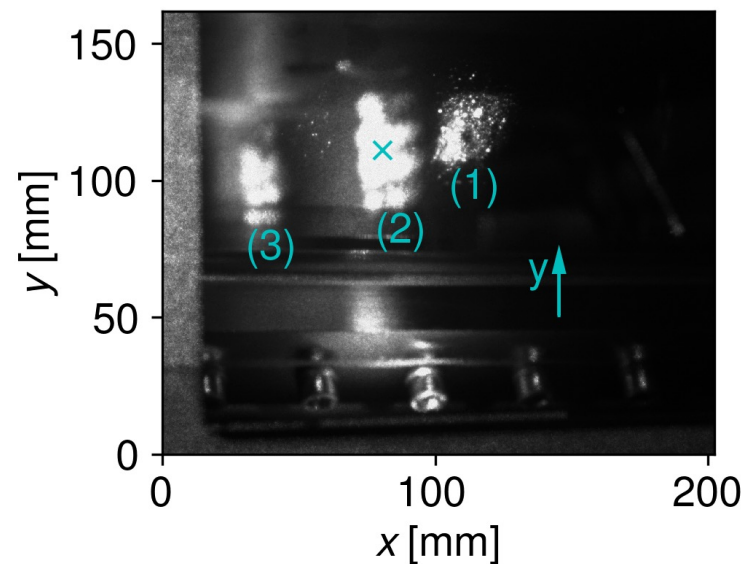
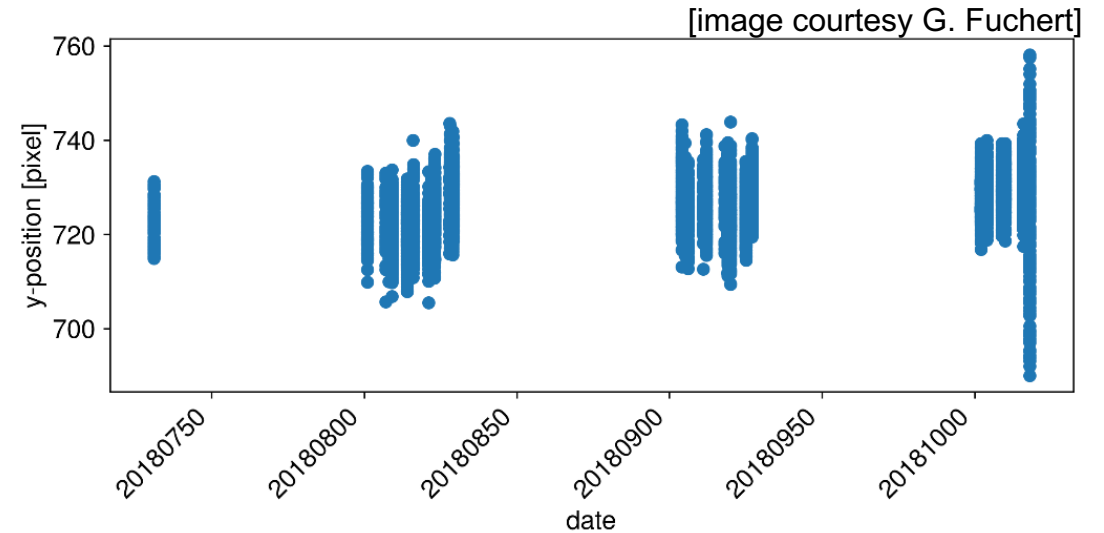
Masterarbeit P. Nelde:

- Größte Fehlerquelle ist instabile Laserlage
- Kamerabeobachtung zeigt zwei Bewegungsarten: Drift und Vibration

→ Resultiert in viele verschiedene Profilformen

- Bereits kleine Drifts können die gemessene Dichte um bis zu 90 % reduzieren

Beispiel Laser 2



Hintergrund: größte Fehlerquelle der TS

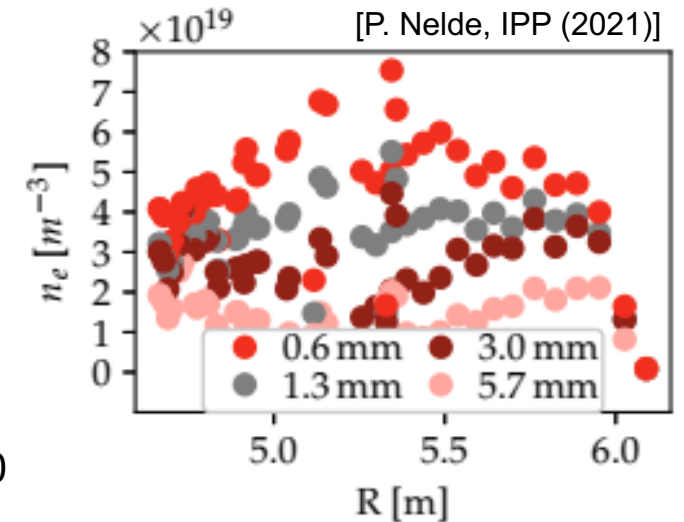
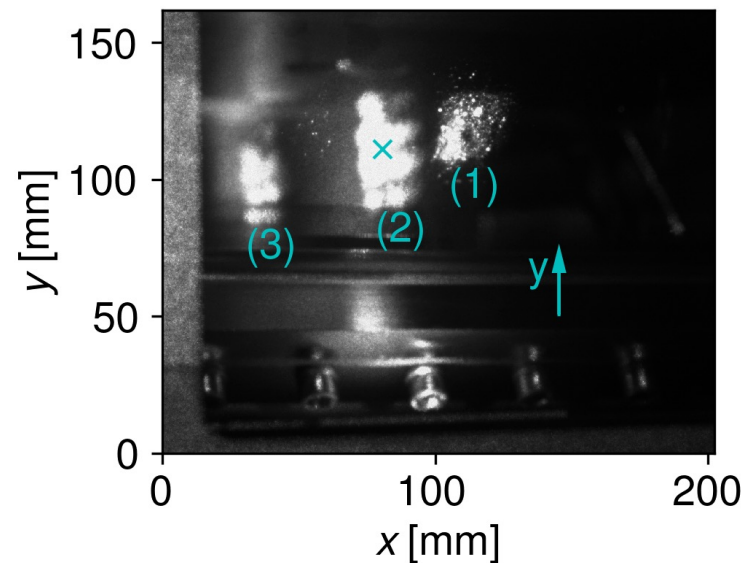
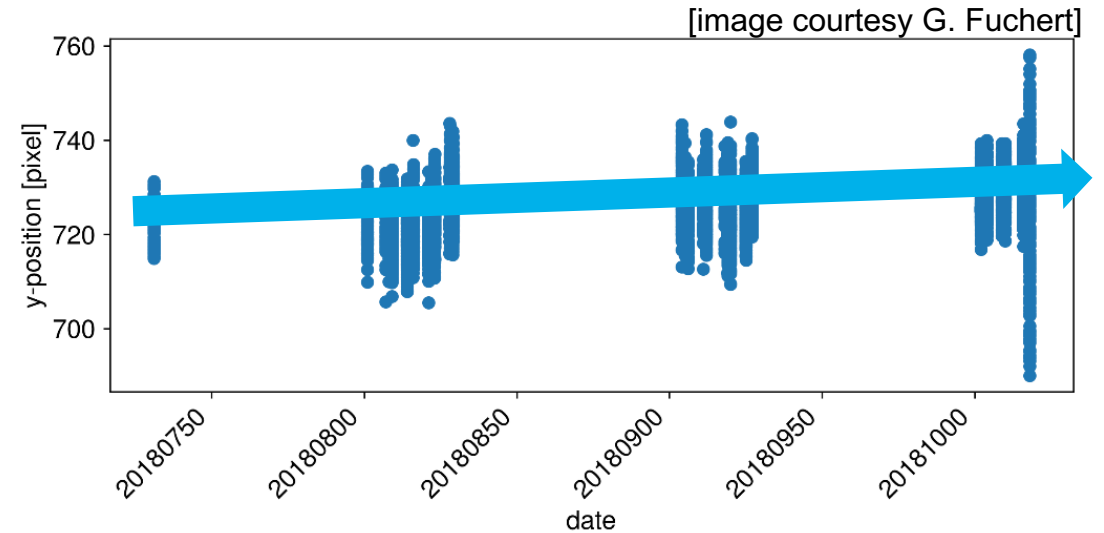
Masterarbeit P. Nelde:

- Größte Fehlerquelle ist instabile Laserlage
- Kamerabeobachtung zeigt zwei Bewegungsarten: Drift und Vibration

→ Resultiert in viele verschiedene Profilformen

- Bereits kleine Drifts können die gemessene Dichte um bis zu 90 % reduzieren

Beispiel Laser 2



Hintergrund: größte Fehlerquelle der TS

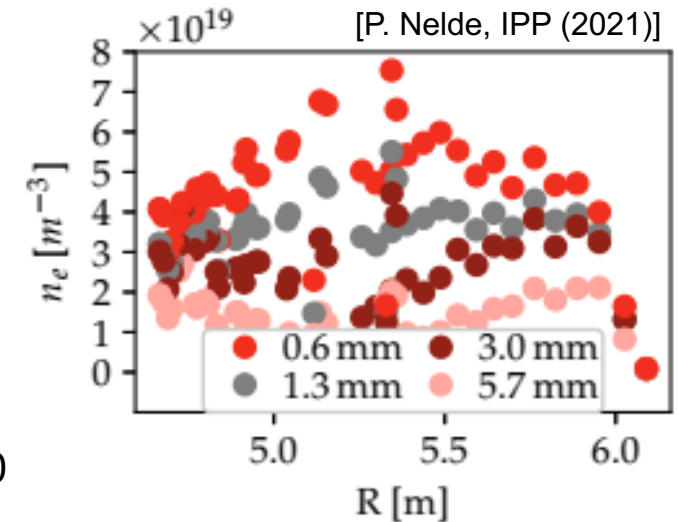
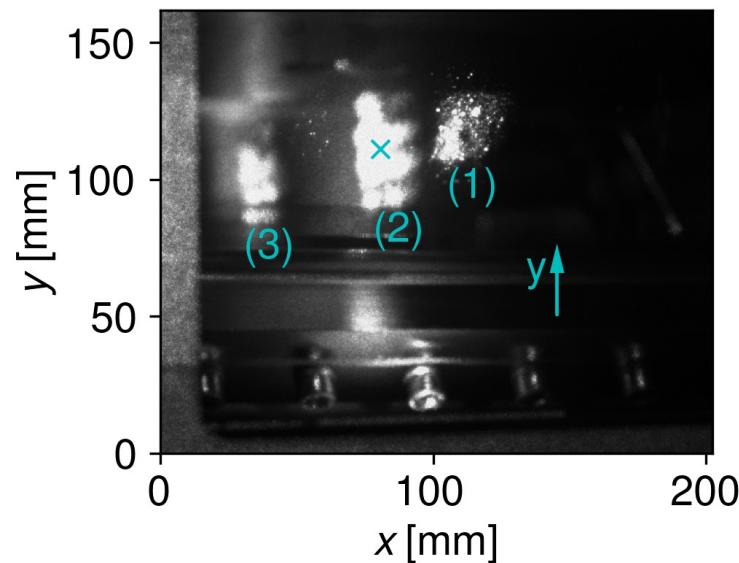
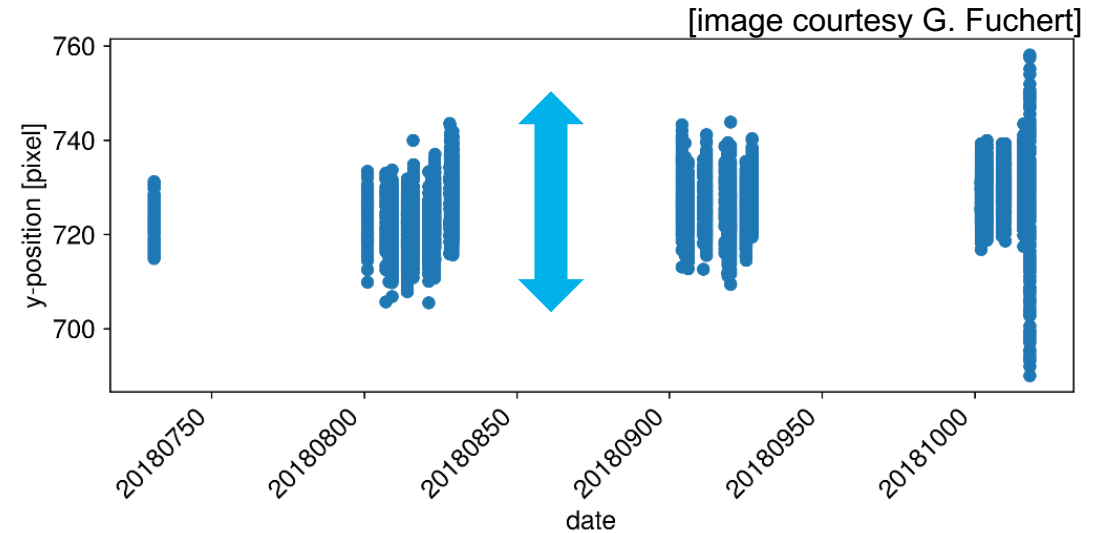
Masterarbeit P. Nelde:

- Größte Fehlerquelle ist instabile Laserlage
- Kamerabeobachtung zeigt zwei Bewegungsarten: Drift und Vibration

→ Resultiert in viele verschiedene Profilformen

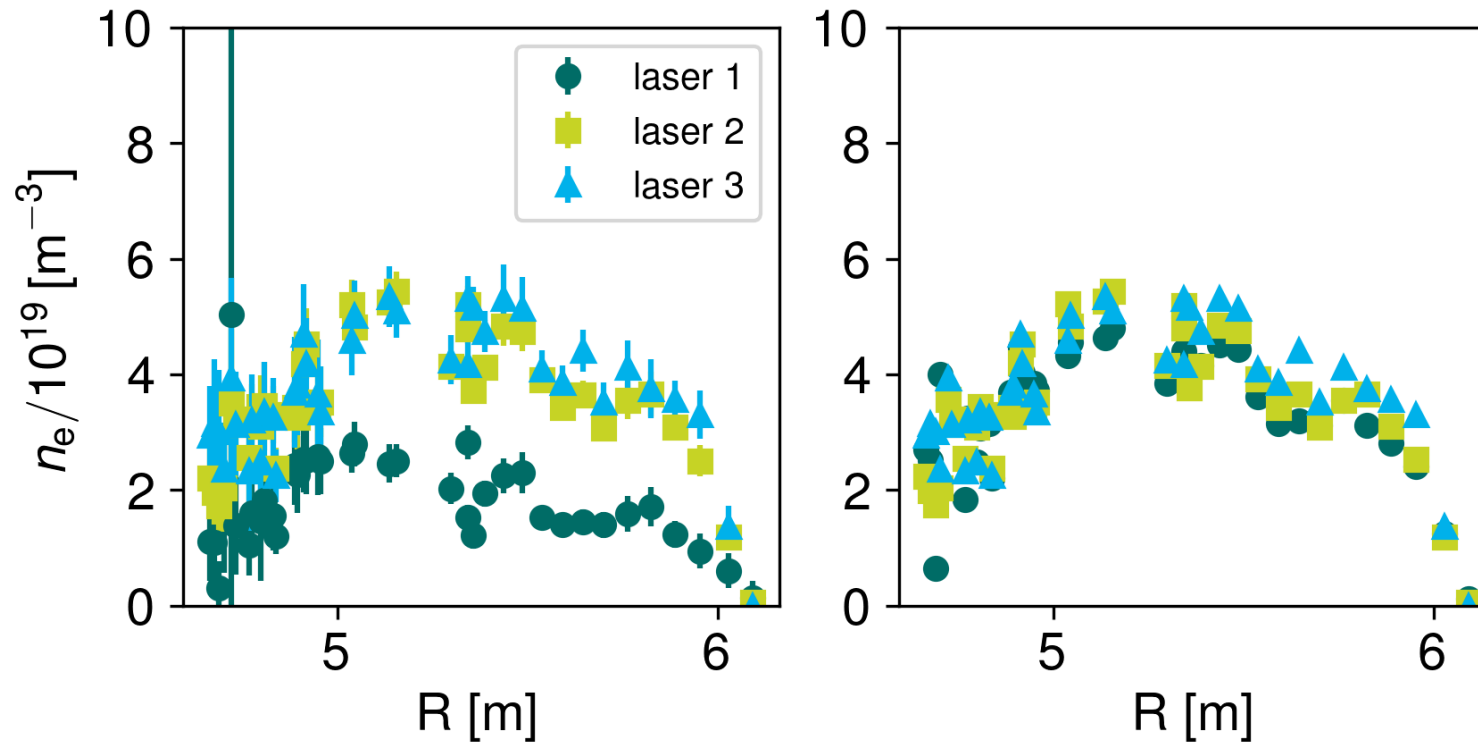
- Bereits kleine Drifts können die gemessene Dichte um bis zu 90 % reduzieren

Beispiel Laser 2



Hintergrund: Korrektur der Profile mithilfe der Kameraposition

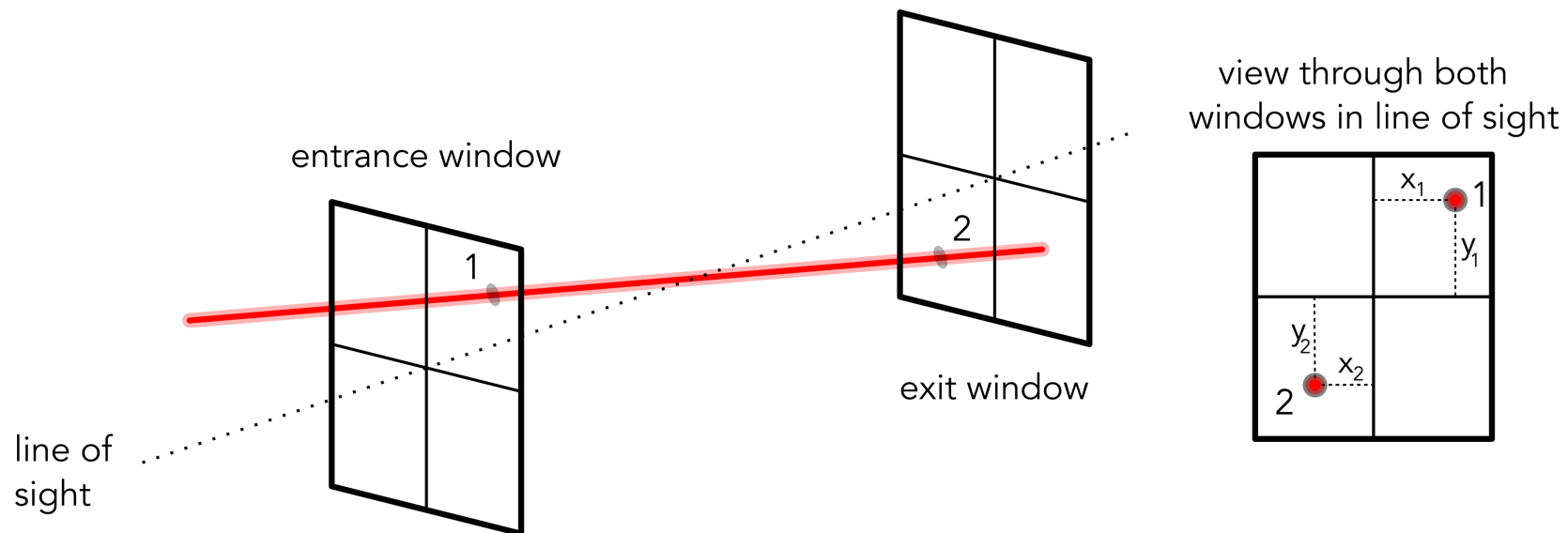
- **Proof of concept:** Korrektur in 2D mit einer Kamera am Eintrittsfenster des Lasers ins Plasmagefäß



Hintergrund: Freiheitsgrade

- Beschreibung der Laserlage
- 2 Koordinaten auf jedem Fenster
- 2 Koordinaten und 2 Winkel
- Nicht alle haben zwangsläufig einen Einfluss → weniger als 4 Dimensionen möglich

} 4 Koordinaten/Freiheitsgrade



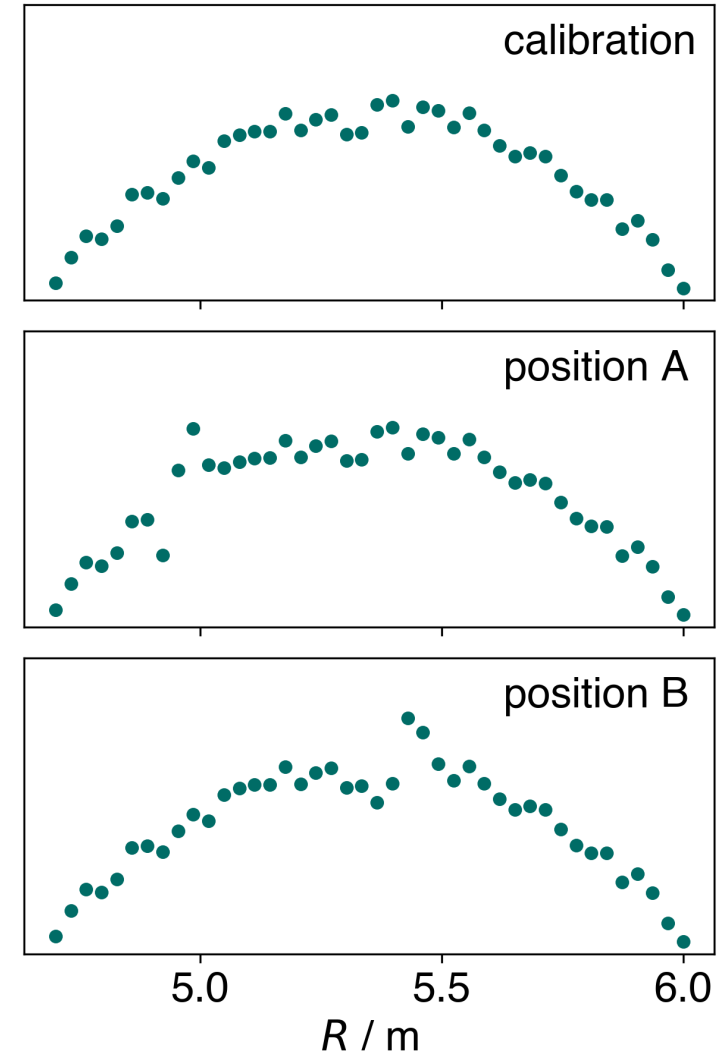
Die Idee: Laserposition bestimmen

Wo findet man die Laserposition

- Laser beeinflusst die Profilform auf bestimmte Art und Weise
→ Laserposition ist in den Profildaten enthalten
- Neue Methode, die die Position aus den Profildaten extrahieren kann

→ Neuronale Netzwerke (Autoencoder)

Vereinfachte Darstellung des
Lasereinflusses



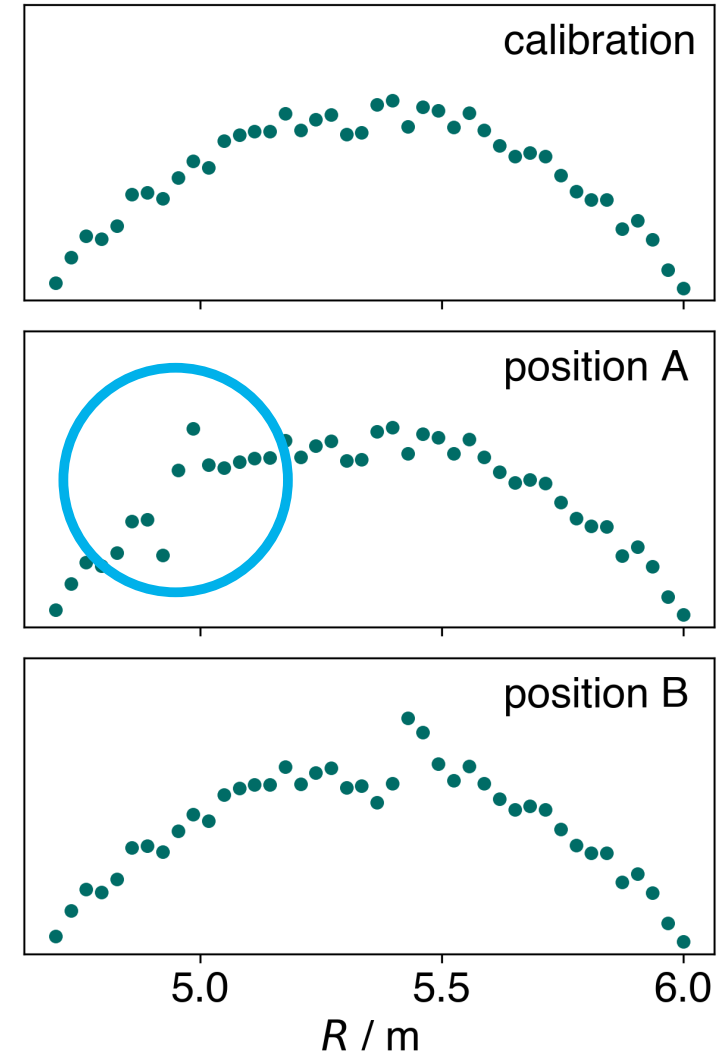
Die Idee: Laserposition bestimmen

Wo findet man die Laserposition

- Laser beeinflusst die Profilform auf bestimmte Art und Weise
→ Laserposition ist in den Profildaten enthalten
- Neue Methode, die die Position aus den Profildaten extrahieren kann

→ Neuronale Netzwerke (Autoencoder)

Vereinfachte Darstellung des
Lasereinflusses



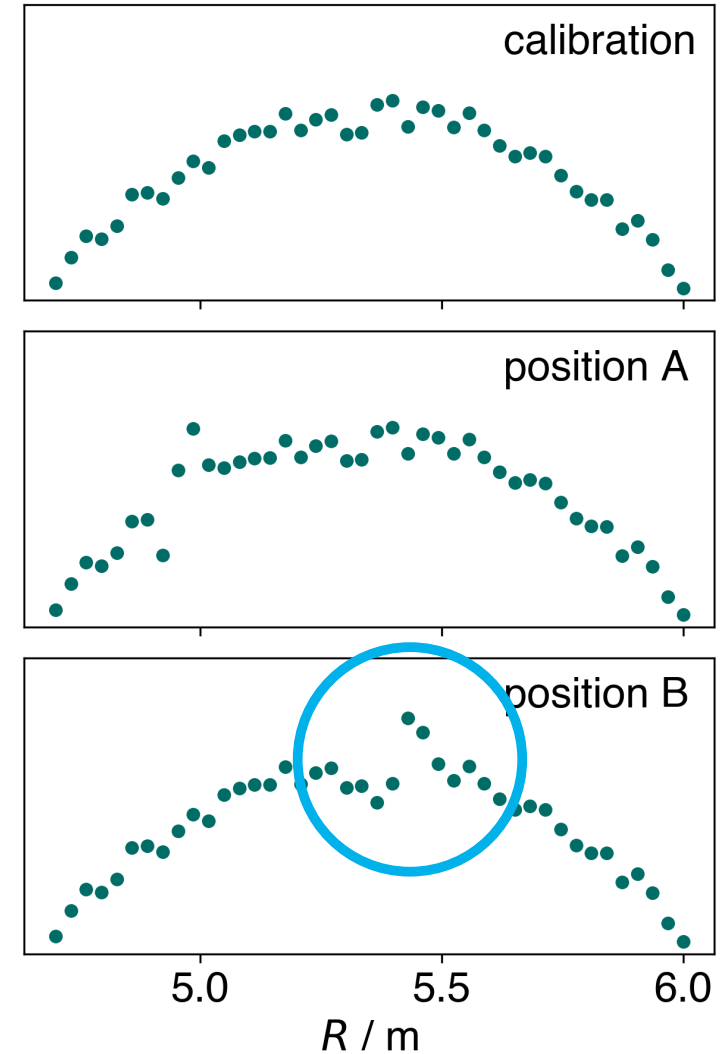
Die Idee: Laserposition bestimmen

Wo findet man die Laserposition

- Laser beeinflusst die Profilform auf bestimmte Art und Weise
→ Laserposition ist in den Profildaten enthalten
- Neue Methode, die die Position aus den Profildaten extrahieren kann

→ Neuronale Netzwerke (Autoencoder)

Vereinfachte Darstellung des
Lasereinflusses



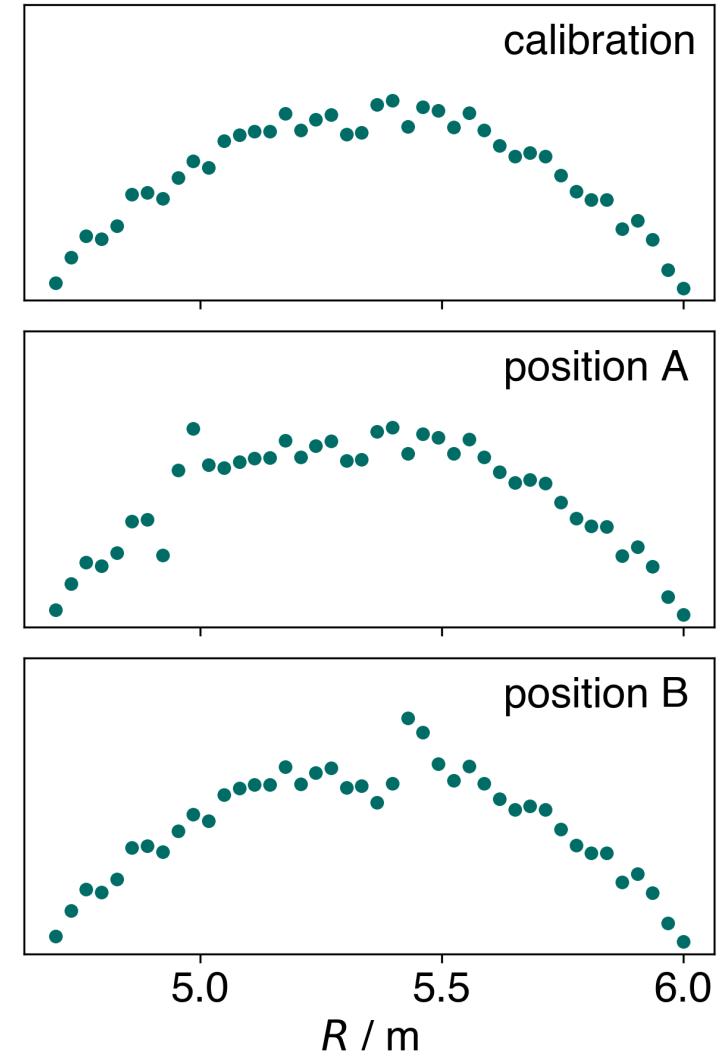
Die Idee: Laserposition bestimmen

Wo findet man die Laserposition

- Laser beeinflusst die Profilform auf bestimmte Art und Weise
→ Laserposition ist in den Profildaten enthalten
- Neue Methode, die die Position aus den Profildaten extrahieren kann

→ Neuronale Netzwerke (Autoencoder)

Vereinfachte Darstellung des
Lasereinflusses



Die Idee: Korrekturverfahren



Laserposition mittels Neuronalen Netzwerken extrahieren



Laserposition durch Profilform erschließen



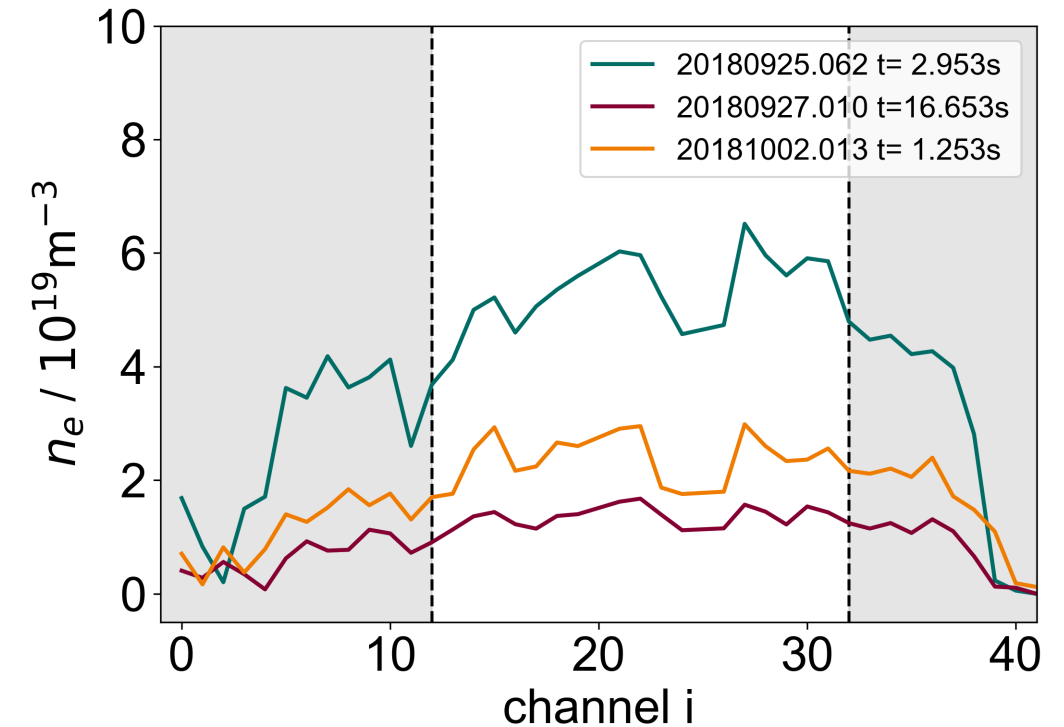
Kalibrierungsposition identifizieren



Profilkorrektur durchführen

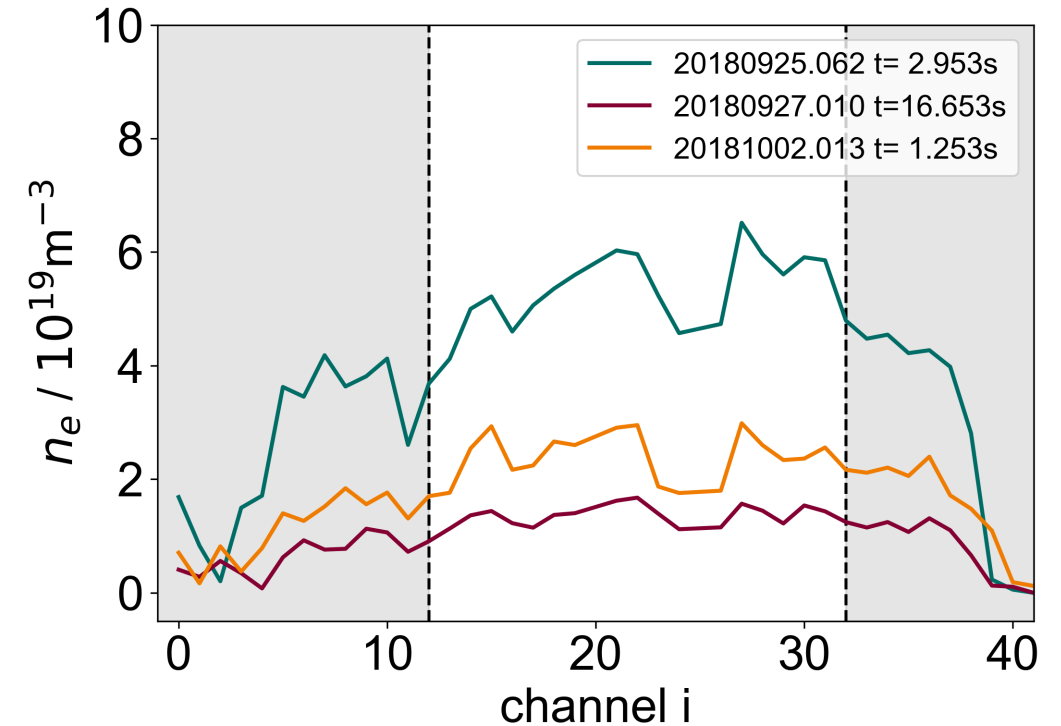
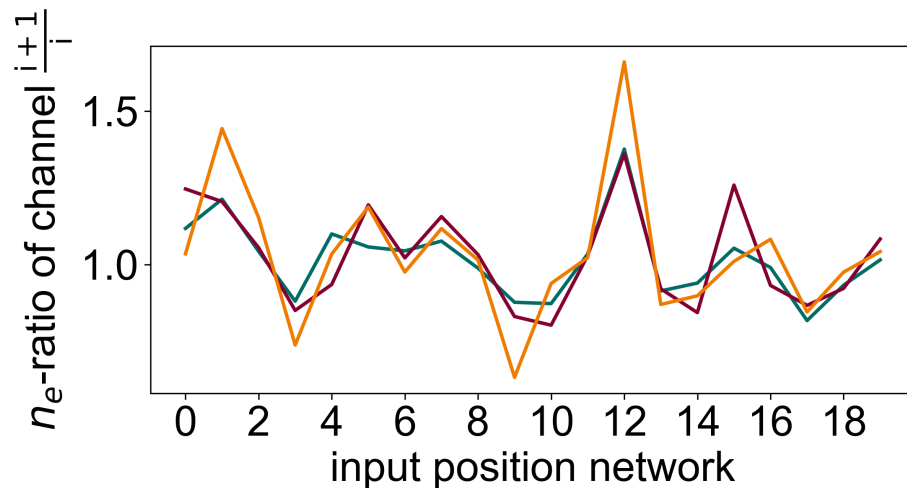
Die Idee: Einfluss der Plasmaparameter verringern

- Vorbereitung der Daten
 - Profilränder ignorieren → bessere Stabilität (statistische Unsicherheit)
 - Dichteverhältnisse → elimiert den Einfluss des tatsächlichen Profilverlaufs



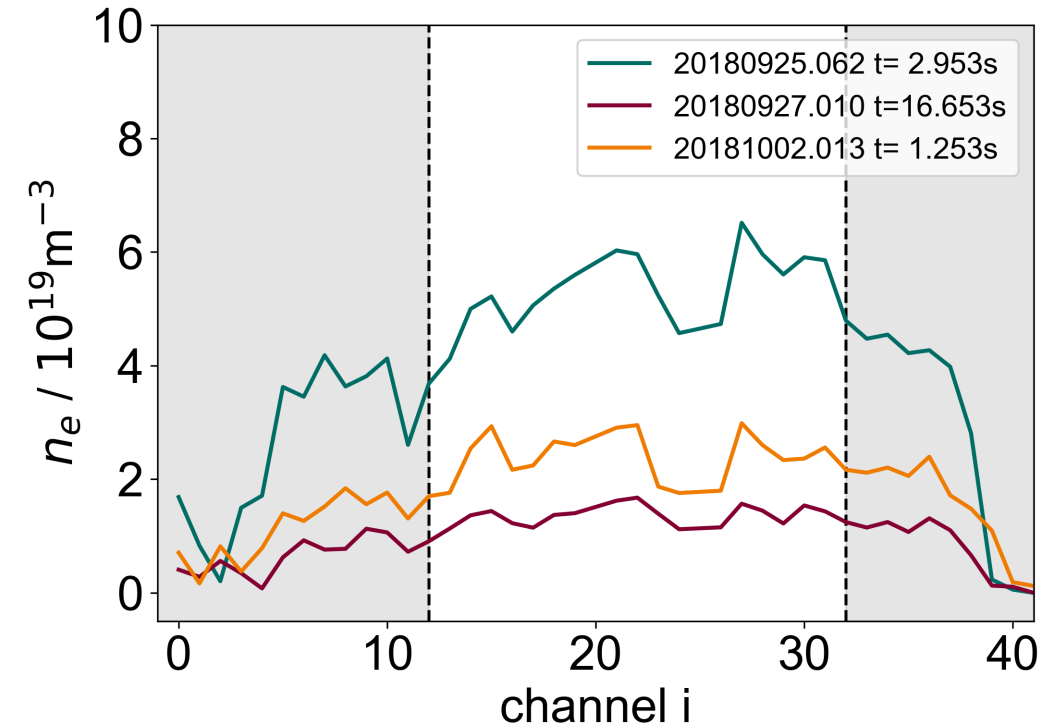
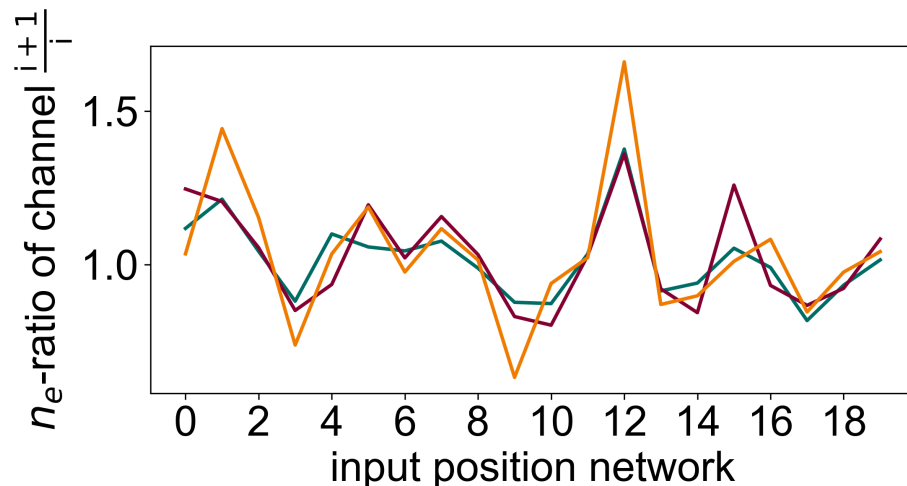
Die Idee: Einfluss der Plasmaparameter verringern

- Vorbereitung der Daten
 - Profilränder ignorieren → bessere Stabilität (statistische Unsicherheit)
 - Dichteverhältnisse → eliminiert den Einfluss des tatsächlichen Profilverlaufs



Die Idee: Einfluss der Plasmaparameter verringern

- Vorbereitung der Daten
 - Profiliränder ignorieren → bessere Stabilität (statistische Unsicherheit)
 - Dichteverhältnisse → elimiert den Einfluss des tatsächlichen Profilverlaufs



- Repräsentation der Daten kodiert eine abstrakte Laserposition
- Informationsreduktion mithilfe von **Neuronalen Netzwerken**

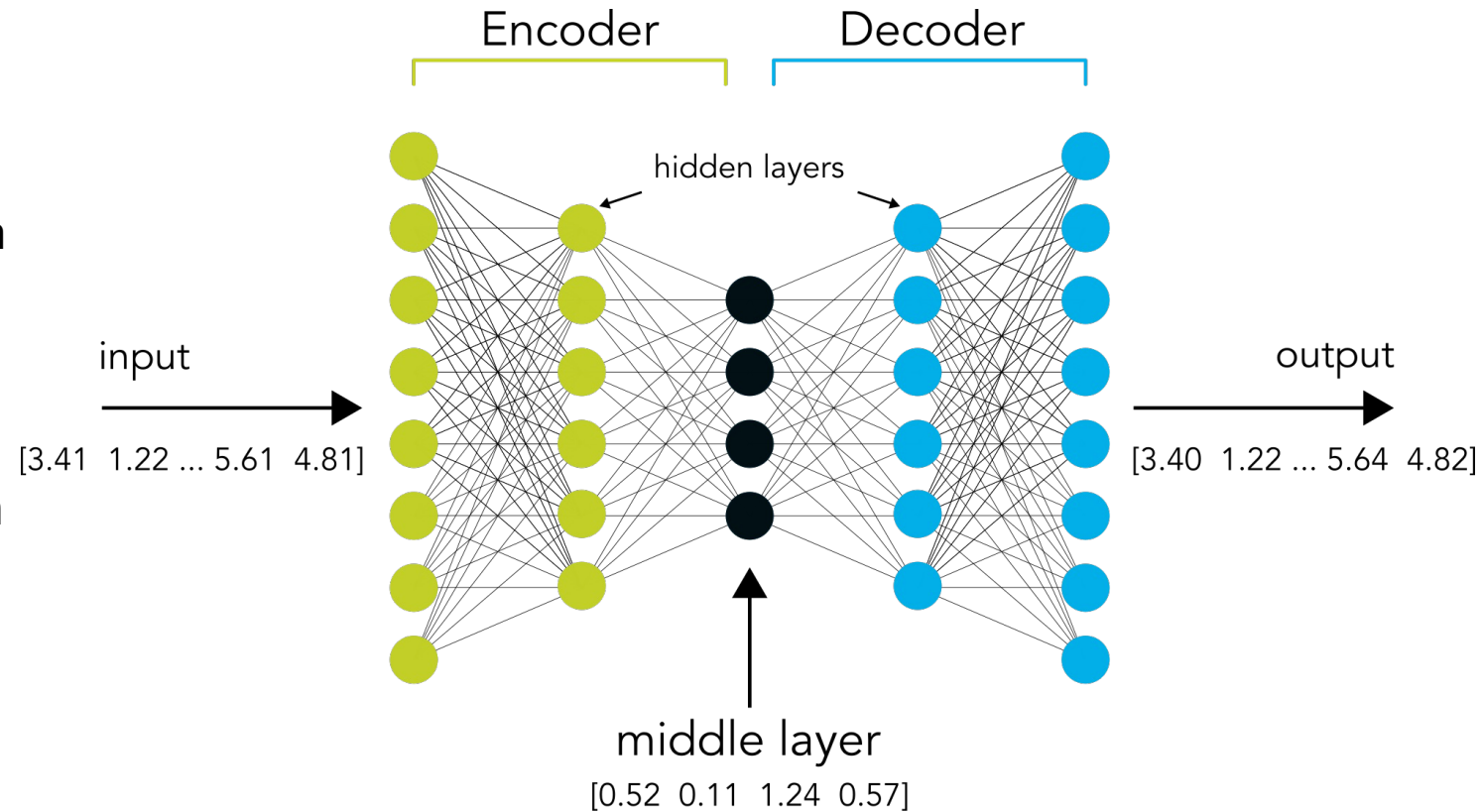
Die Idee: Neuronale Netzwerke benutzen

Autoencoder network

- imitieren die Fähigkeit aus Erfahrungswerten zu lernen und dann anschließend den Ausgang neuer Daten vorherzusagen
- *Unsupervised learning* – kein explizites Trainingsziel → werden genutzt um versteckte Strukturen in Daten zu finden
- Charakteristika werden extrahiert während Information über Rauschen verloren geht

Aufbau: 3 Hauptkomponenten: *encoder*, *decoder* and *middle layer*

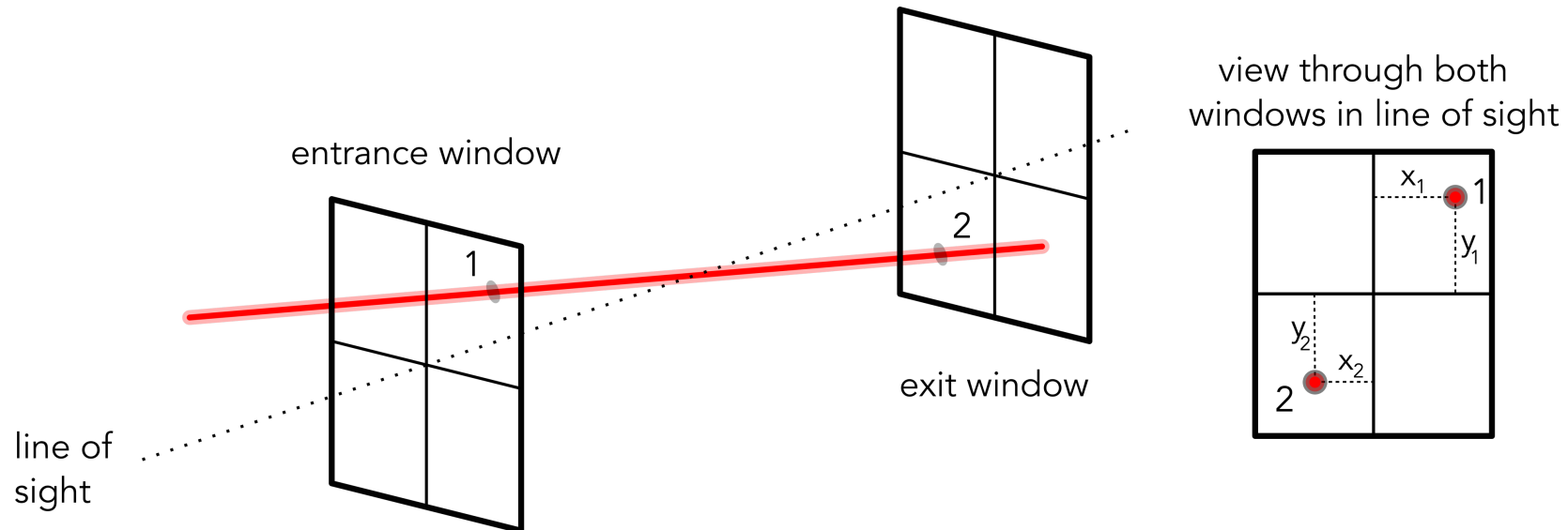
- *Middle layer* repräsentiert **abstrakte Laserposition**



Erinnerung: Freiheitsgrade

- **Erwartung: 4** Freiheitsgrade
- Nicht alle haben zwangsläufig einen Einfluss (möglicherweise koppeln Freiheitsgrade)
→ weniger als 4 Dimensionen möglich

→ **Auswertung: 3** Dimensionen passend



Die Idee: Annahmen



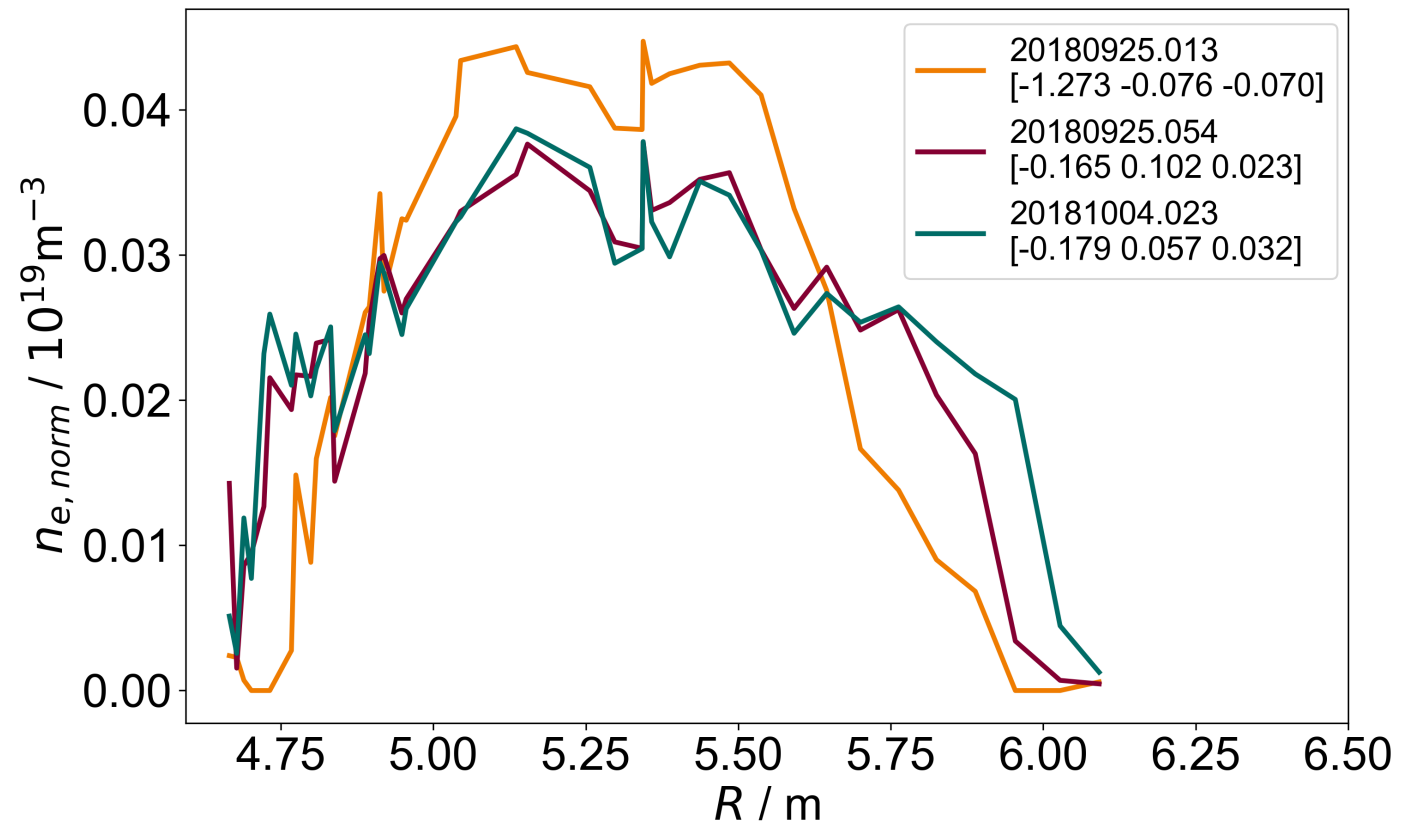
- Laser sind oft genug an ihre Positionen zurückgekehrt (insbesondere an die Kalibrierungsposition) → genug Trainingsdaten insbesondere für die „korrekte“ Profilform
- Ramankalibrierung war erfolgreich → an der Kalibrierungsposition gemessene Profile sind „korrekt“
→ Jeder Laser benötigt pro Kalibrierung eine Untersuchung, da alle Effekte relativ zur Position während der Kalibrierung auftreten



Methode

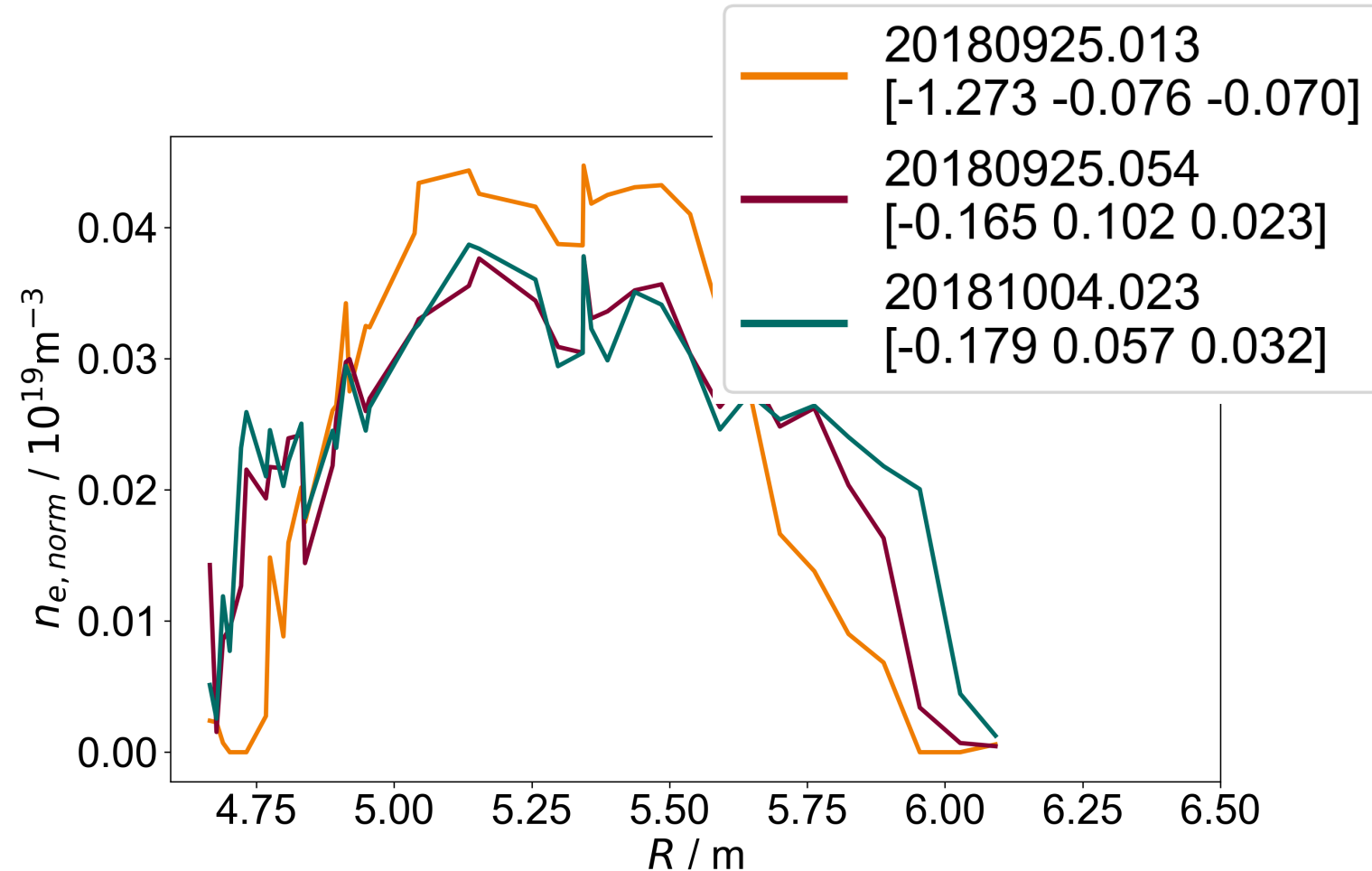
Methode: Zuordnung der Laserposition zu Profilen

- Profile mit ähnlicher Form sollten durch die selbe Laserlage entstanden sein → sollten ähnliche abstrakte Laserpositionen erhalten
 - Profile mit anderer Form sollten demnach eine andere Laserposition erhalten
- Kategorisierung nach abstrakter Laserposition möglich
- Gitter aus abstrakten Laserpositionen erstellen



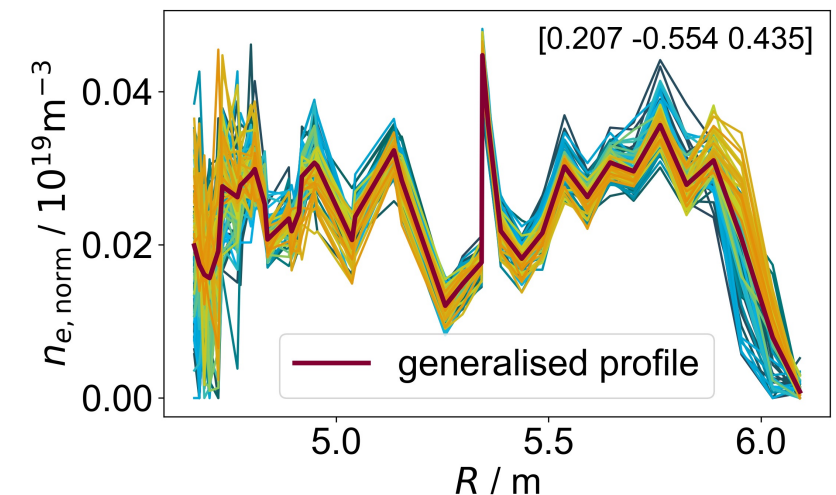
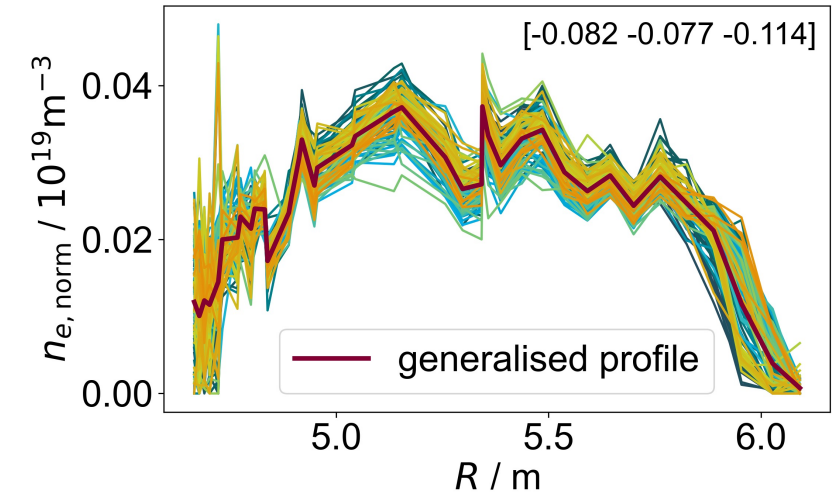
Methode: Zuordnung der Laserposition zu Profilen

- Profile mit ähnlicher Form sollten durch die selbe Laserlage entstanden sein → sollten ähnliche abstrakte Laserpositionen erhalten
 - Profile mit anderer Form sollten demnach eine andere Laserposition erhalten
- Kategorisierung nach abstrakter Laserposition möglich
- Gitter aus abstrakten Laserpositionen erstellen



Methode: Sortierung der Profile mithilfe eines Gitters

- Gitter mit einer Zelle für jedes Profil aus dem Trainingsdatensatz mit entsprechender Laserposition
- Zuordnung der nächsten 100 Profile
- Normierung der Profile um Einfluss der Plasmaparameter zu verringern
- Mittelwertbildung → generalisiertes Profil für jede Zelle



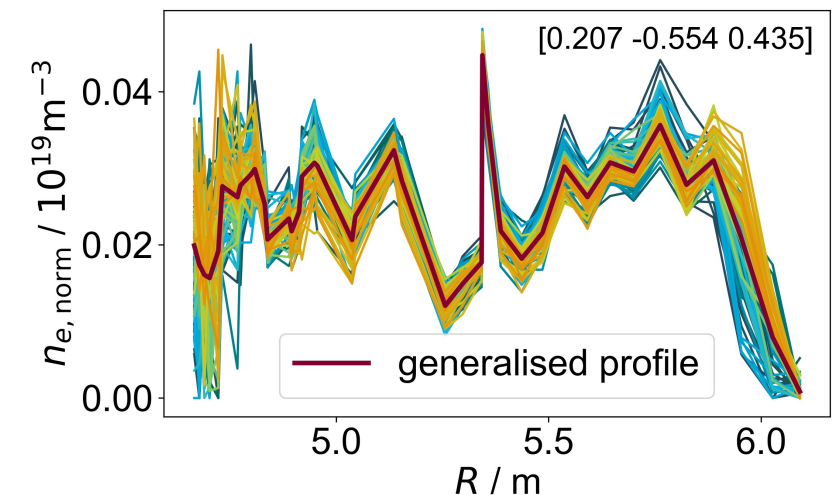
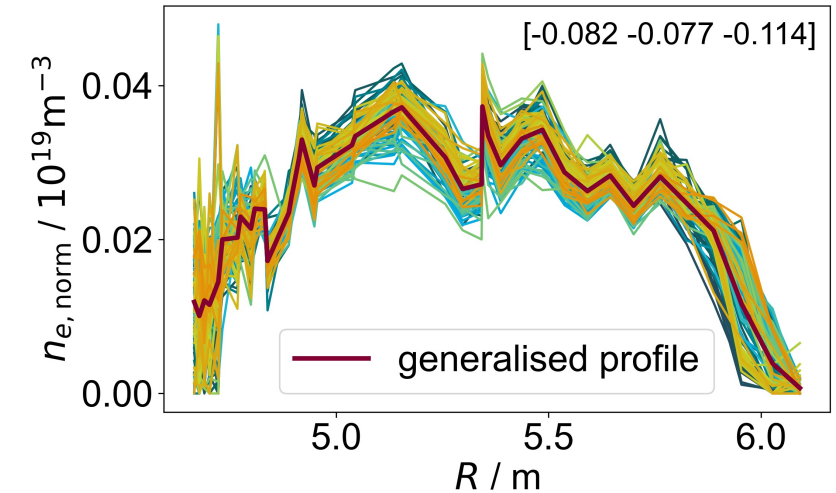
Methode: Sortierung der Profile mithilfe eines Gitters

- Gitter mit einer Zelle für jedes Profil aus dem Trainingsdatensatz mit entsprechender Laserposition
- Zuordnung der nächsten 100 Profile
- Normierung der Profile um Einfluss der Plasmaparameter zu verringern
- Mittelwertbildung → generalisiertes Profil für jede Zelle

→ **Zuordnung erfolgreich**

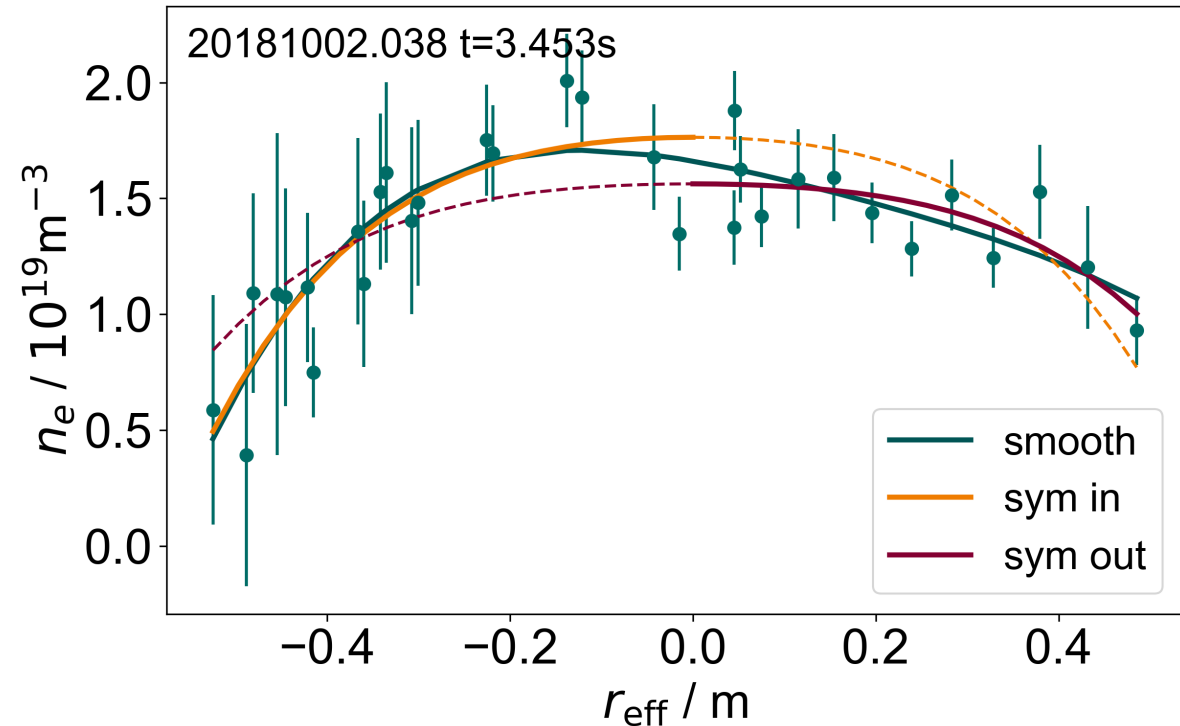
→ Jede Position besitzt einzigartiges generalisiertes Profil

→ Kalibrierungszelle finden



Methode: Kalibrierungszelle (-position) finden

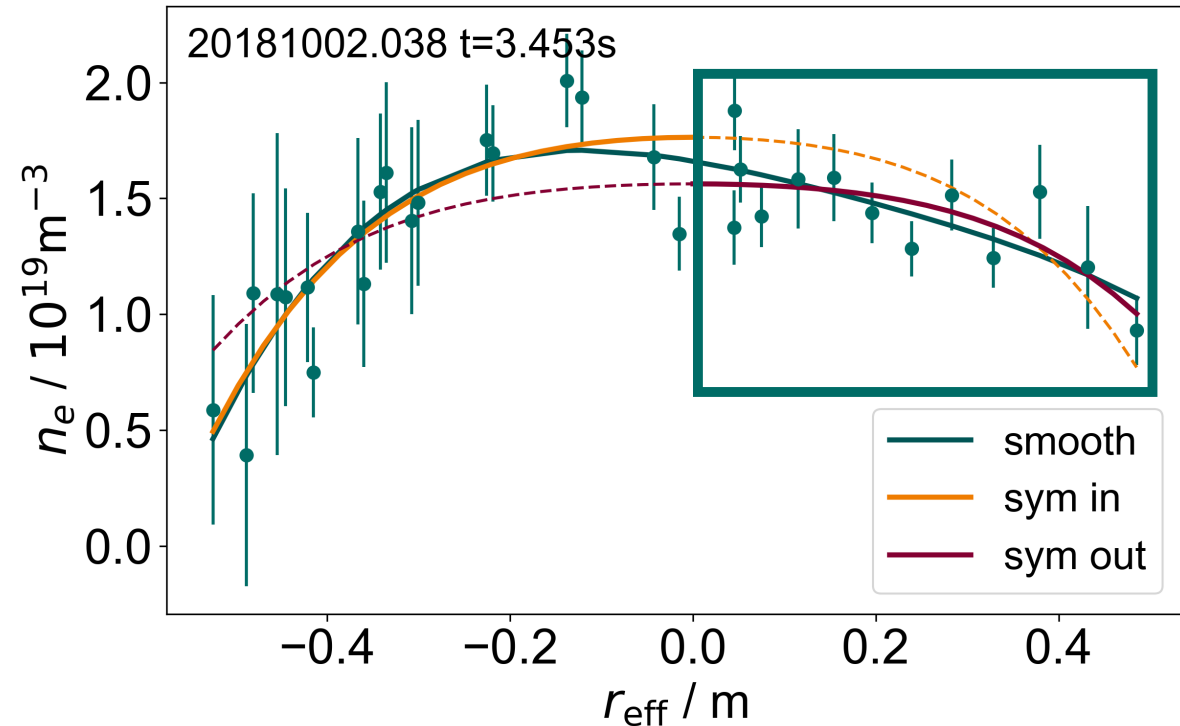
- Nach der Zelle suchen, die das glatteste und symmetrischste Profil enthält
- Vorauswahl der Profile durch Vergleich der Dichte mit Interferometer → spart Zeit und stabilisiert die Auswahl (nicht notwendig!)
- Glätte: Polynom-Fit des ganzen Profils und mittleren quadratischen Fehler für die Seite berechnen, die weiter vom Lasereintritt entfernt liegt → mse_1
- Symmetrie: symmetrischer Polynom-Fit für innere und äußere Seite und Berechnung des mqF für die Abweichung → mse_2



$$\Rightarrow E = \frac{mse_1 + mse_2}{2}$$

Methode: Kalibrierungszelle (-position) finden

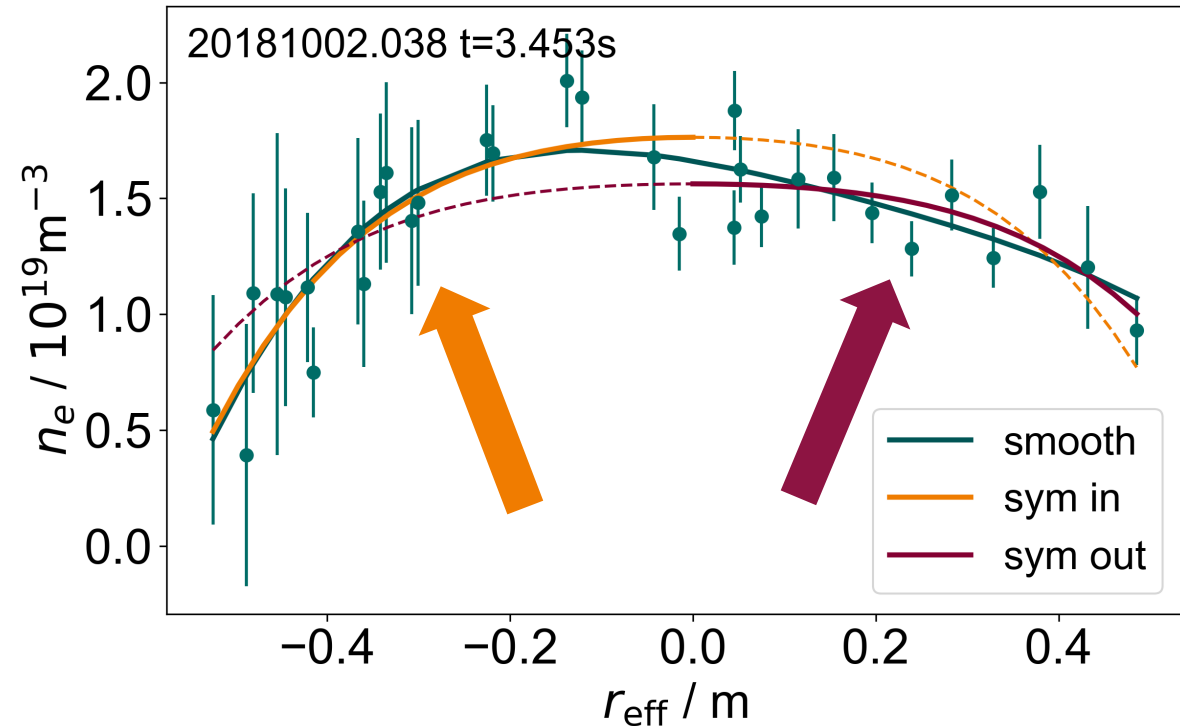
- Nach der Zelle suchen, die das glatteste und symmetrischste Profil enthält
- Vorauswahl der Profile durch Vergleich der Dichte mit Interferometer → spart Zeit und stabilisiert die Auswahl (nicht notwendig!)
- Glätte: Polynom-Fit des ganzen Profils und mittleren quadratischen Fehler für die Seite berechnen, die weiter vom Lasereintritt entfernt liegt → mse_1
- Symmetrie: symmetrischer Polynom-Fit für innere und äußere Seite und Berechnung des mqF für die Abweichung → mse_2



$$\Rightarrow E = \frac{mse_1 + mse_2}{2}$$

Methode: Kalibrierungszelle (-position) finden

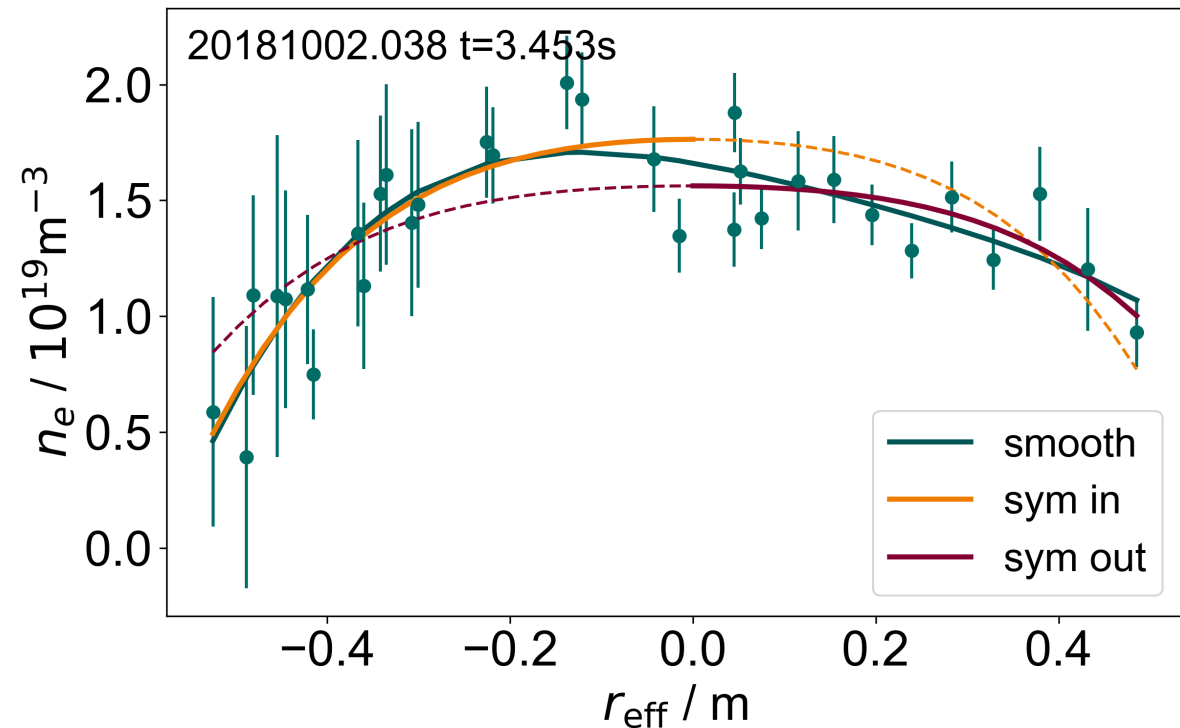
- Nach der Zelle suchen, die das glatteste und symmetrischste Profil enthält
- Vorauswahl der Profile durch Vergleich der Dichte mit Interferometer → spart Zeit und stabilisiert die Auswahl (nicht notwendig!)
- Glätte: Polynom-Fit des ganzen Profils und mittleren quadratischen Fehler für die Seite berechnen, die weiter vom Lasereintritt entfernt liegt → mse_1
- Symmetrie: symmetrischer Polynom-Fit für innere und äußere Seite und Berechnung des mqF für die Abweichung → mse_2



$$\Rightarrow E = \frac{mse_1 + mse_2}{2}$$

Methode: Kalibrierungszelle (-position) finden

- Nach der Zelle suchen, die das glatteste und symmetrischste Profil enthält
- Vorauswahl der Profile durch Vergleich der Dichte mit Interferometer → spart Zeit und stabilisiert die Auswahl (nicht notwendig!)
- Glätte: Polynom-Fit des ganzen Profils und mittleren quadratischen Fehler für die Seite berechnen, die weiter vom Lasereintritt entfernt liegt → mse_1
- Symmetrie: symmetrischer Polynom-Fit für innere und äußere Seite und Berechnung des mqF für die Abweichung → mse_2



$$\Rightarrow E = \frac{mse_1 + mse_2}{2}$$

→ **Kleinsten Fehler** E entspricht Zelle mit der “besten” Form und damit der **Kalibrierungszelle/-position**

Methode: Korrektur

- Laserposition mit Encoder extrahieren
- Profil zu Zelle mit Abstandsmetrik zuordnen
- Wenn keine Normierung der Profile nötig ist (verschiedene Plasmaparameter), Korrektur pro Messkanal i :

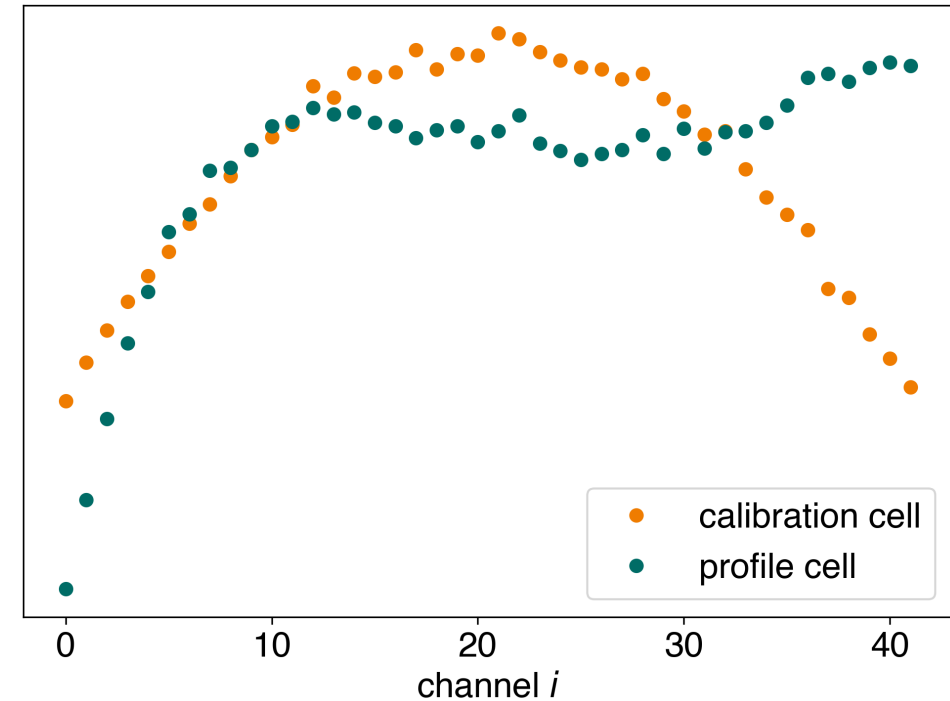
$$n_{i,new} = n_{i,old} \cdot c_{i,shape}$$

$$c_{i,shape} = \frac{n_{i,calibration}}{n_i}$$

ABER: durch Normierung geht Information über Skalierung verloren → Zusätzlicher Korrekturfaktor:

$$\Rightarrow n_{i,new} = n_{i,old} \cdot c_{i,shape} \cdot c_{scale}$$

Darstellung der Nutzung von (normierten) generalisierten Profilen für die Korrektur



Methode: Korrektur

- Laserposition mit Encoder extrahieren
- Profil zu Zelle mit Abstandsmetrik zuordnen
- Wenn keine Normierung der Profile nötig ist (verschiedene Plasmaparameter), Korrektur pro Messkanal i :

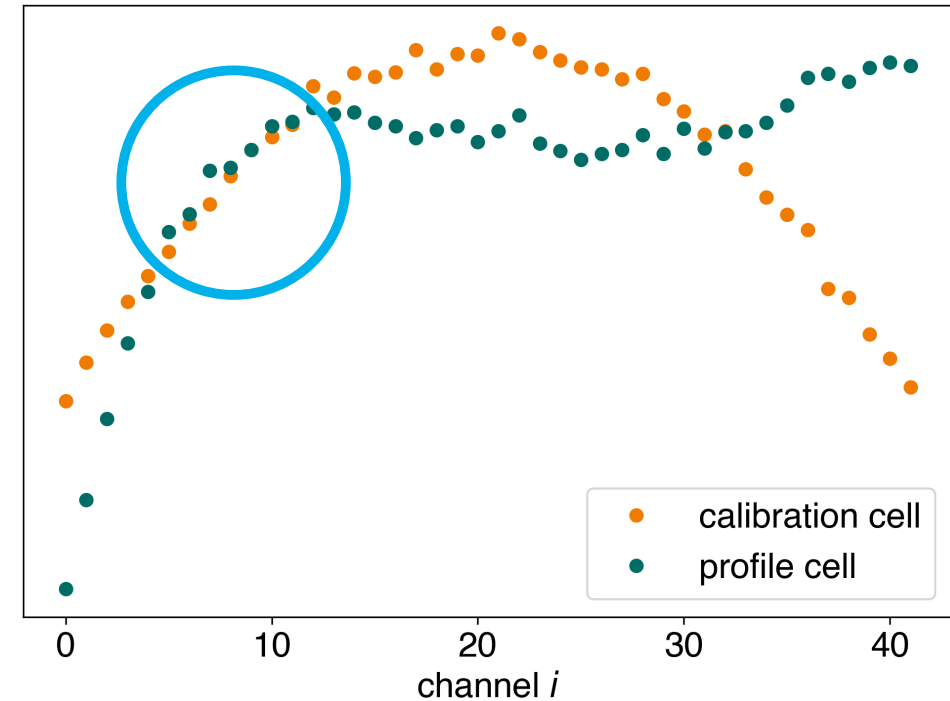
$$n_{i,new} = n_{i,old} \cdot c_{i,shape}$$

$$c_{i,shape} = \frac{n_{i,calibration}}{n_i}$$

ABER: durch Normierung geht Information über Skalierung verloren → Zusätzlicher Korrekturfaktor:

$$\Rightarrow n_{i,new} = n_{i,old} \cdot c_{i,shape} \cdot c_{scale}$$

Darstellung der Nutzung von (normierten) generalisierten Profilen für die Korrektur



Methode: Korrektur

- Laserposition mit Encoder extrahieren
- Profil zu Zelle mit Abstandsmetrik zuordnen
- Wenn keine Normierung der Profile nötig ist (verschiedene Plasmaparameter), Korrektur pro Messkanal i :

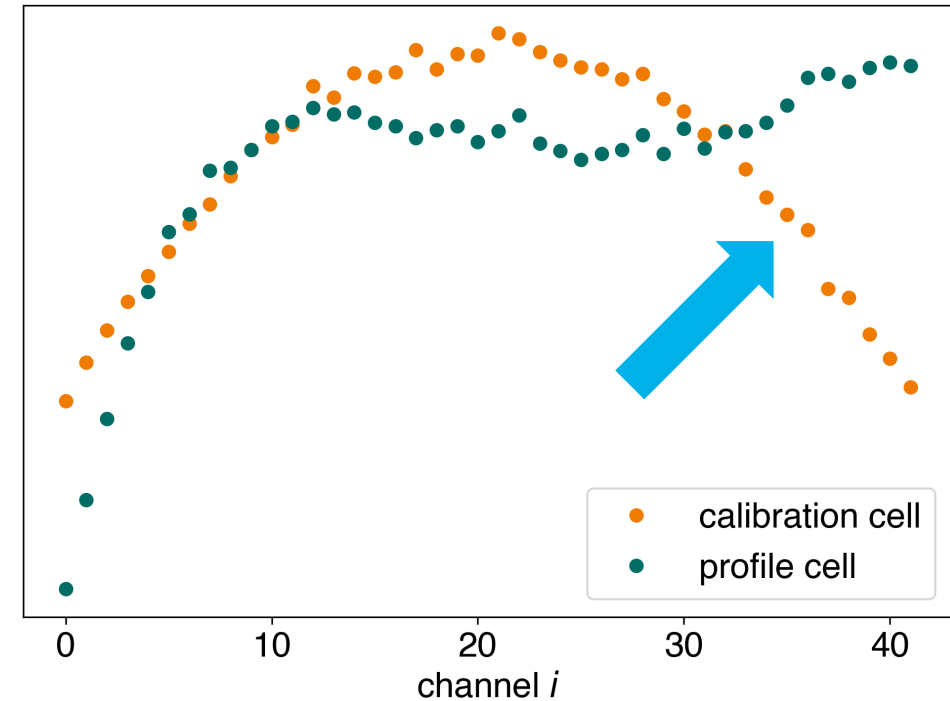
$$n_{i,new} = n_{i,old} \cdot c_{i,shape}$$

$$c_{i,shape} = \frac{n_{i,calibration}}{n_i}$$

ABER: durch Normierung geht Information über Skalierung verloren → Zusätzlicher Korrekturfaktor:

$$\Rightarrow n_{i,new} = n_{i,old} \cdot c_{i,shape} \cdot c_{scale}$$

Darstellung der Nutzung von (normierten) generalisierten Profilen für die Korrektur



Methode: Korrektur

- Laserposition mit Encoder extrahieren
- Profil zu Zelle mit Abstandsmetrik zuordnen
- Wenn keine Normierung der Profile nötig ist (verschiedene Plasmaparameter), Korrektur pro Messkanal i :

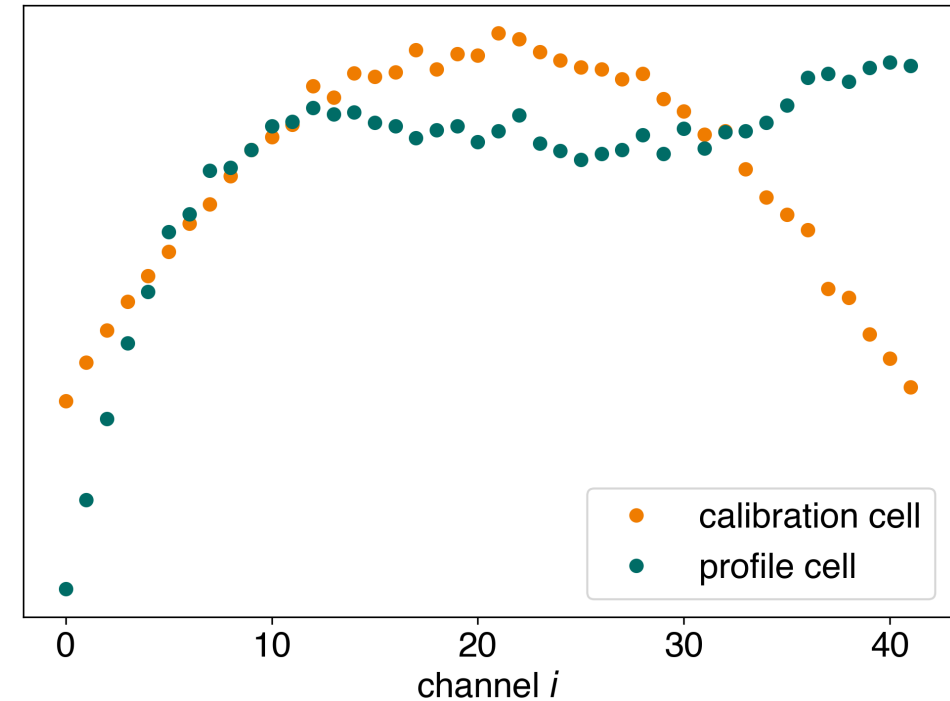
$$n_{i,new} = n_{i,old} \cdot c_{i,shape}$$

$$c_{i,shape} = \frac{n_{i,calibration}}{n_i}$$

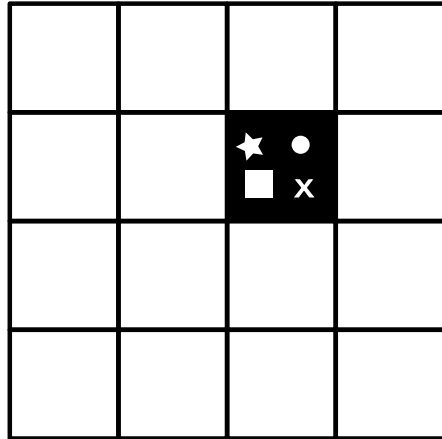
ABER: durch Normierung geht Information über Skalierung verloren → Zusätzlicher Korrekturfaktor:

$$\Rightarrow n_{i,new} = n_{i,old} \cdot c_{i,shape} \cdot c_{scale}$$

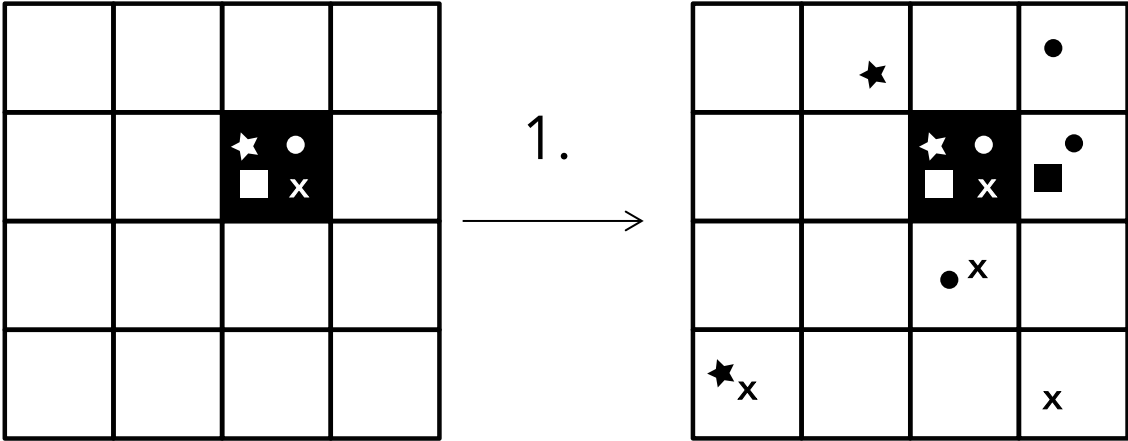
Darstellung der Nutzung von (normierten) generalisierten Profilen für die Korrektur



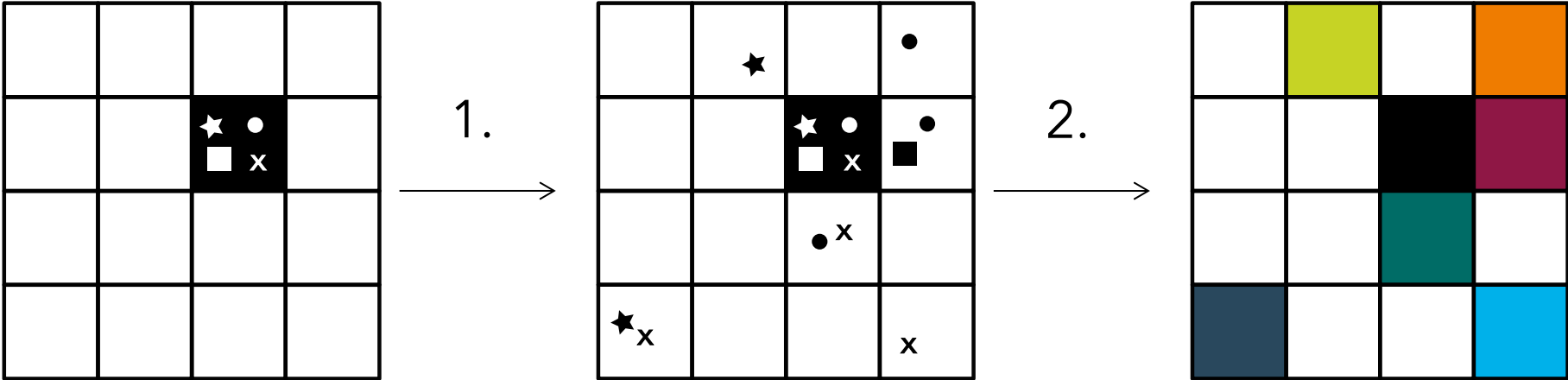
Methode: Skalierung



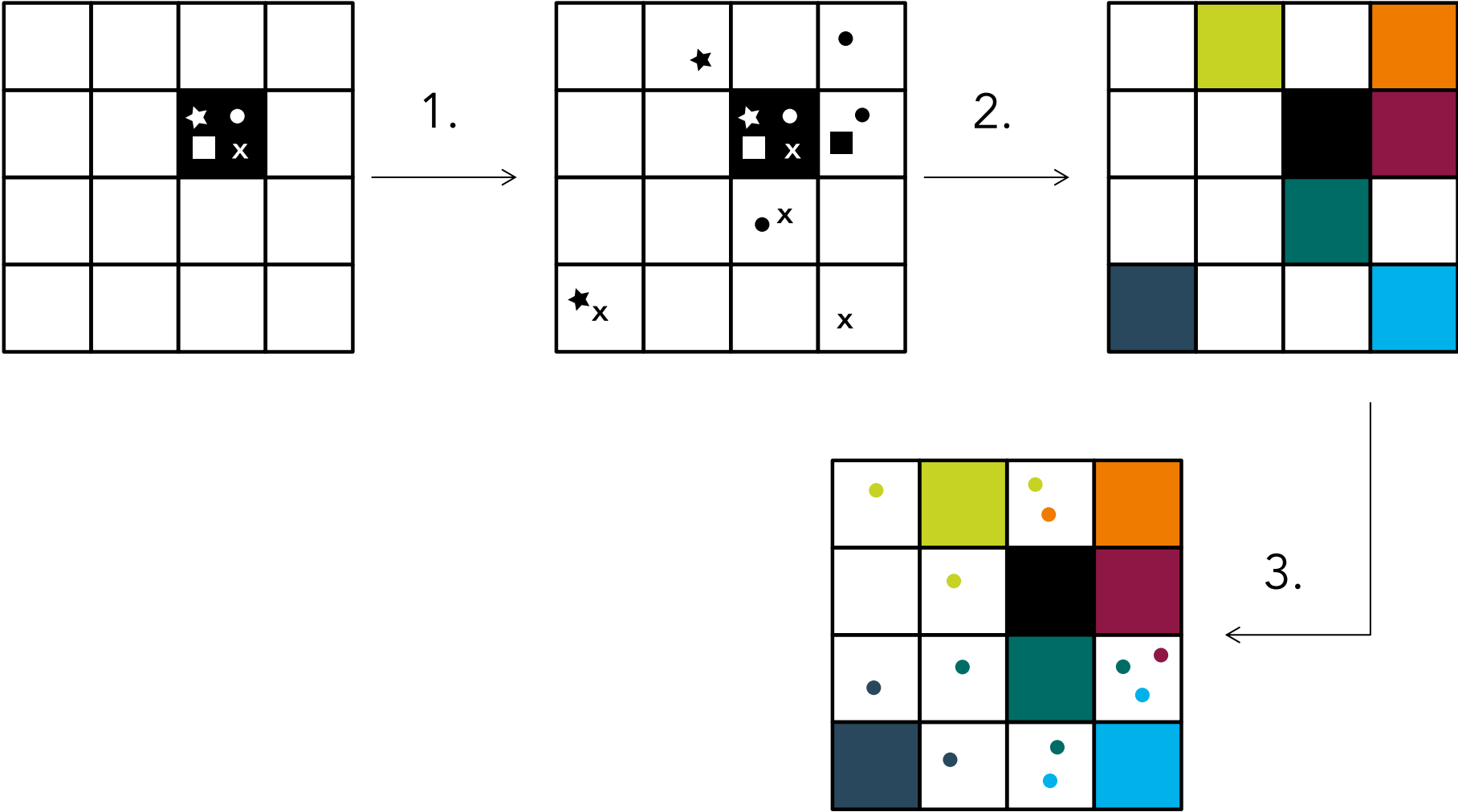
Methode: Skalierung



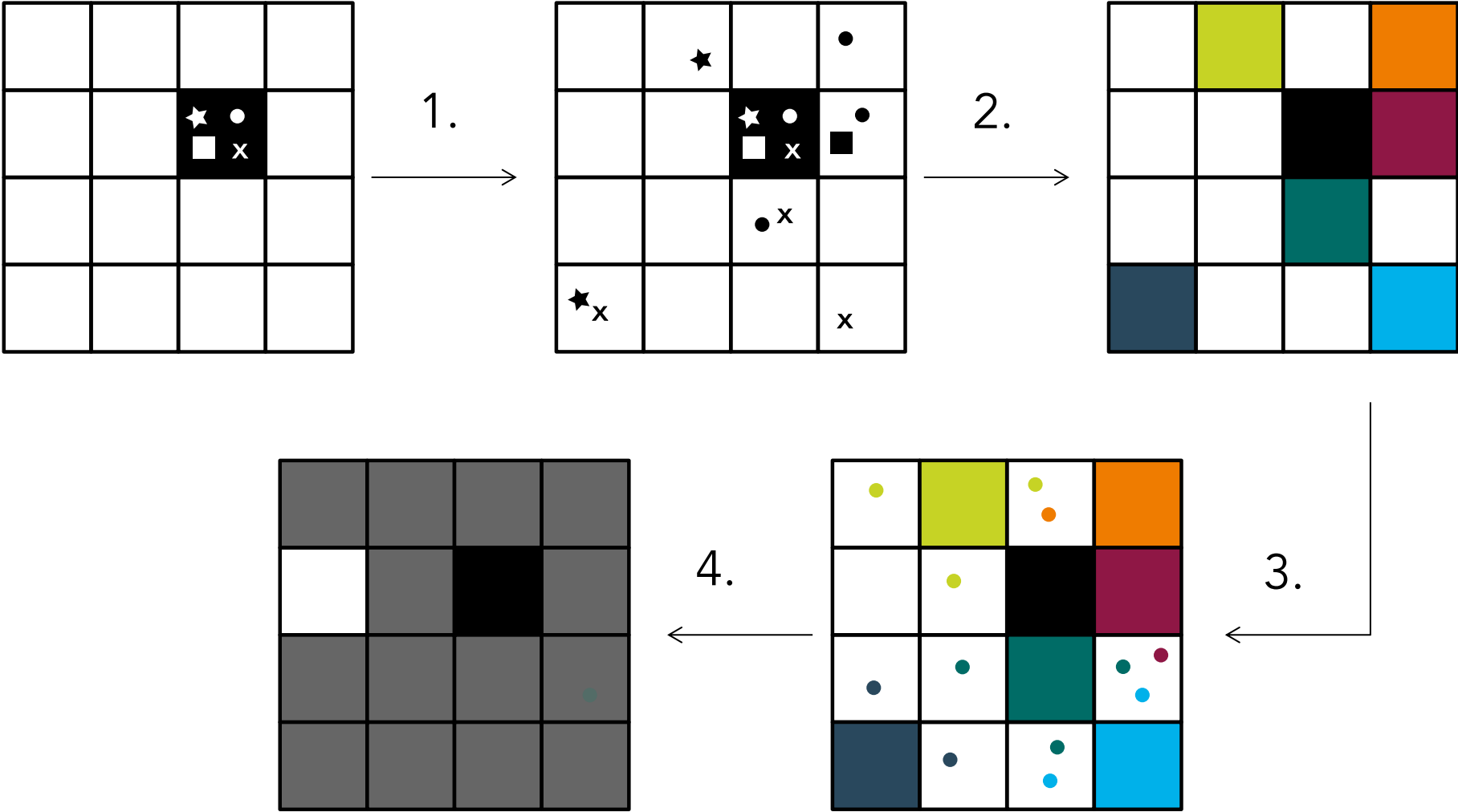
Methode: Skalierung



Methode: Skalierung



Methode: Skalierung



Methode: Fehler der Korrektur

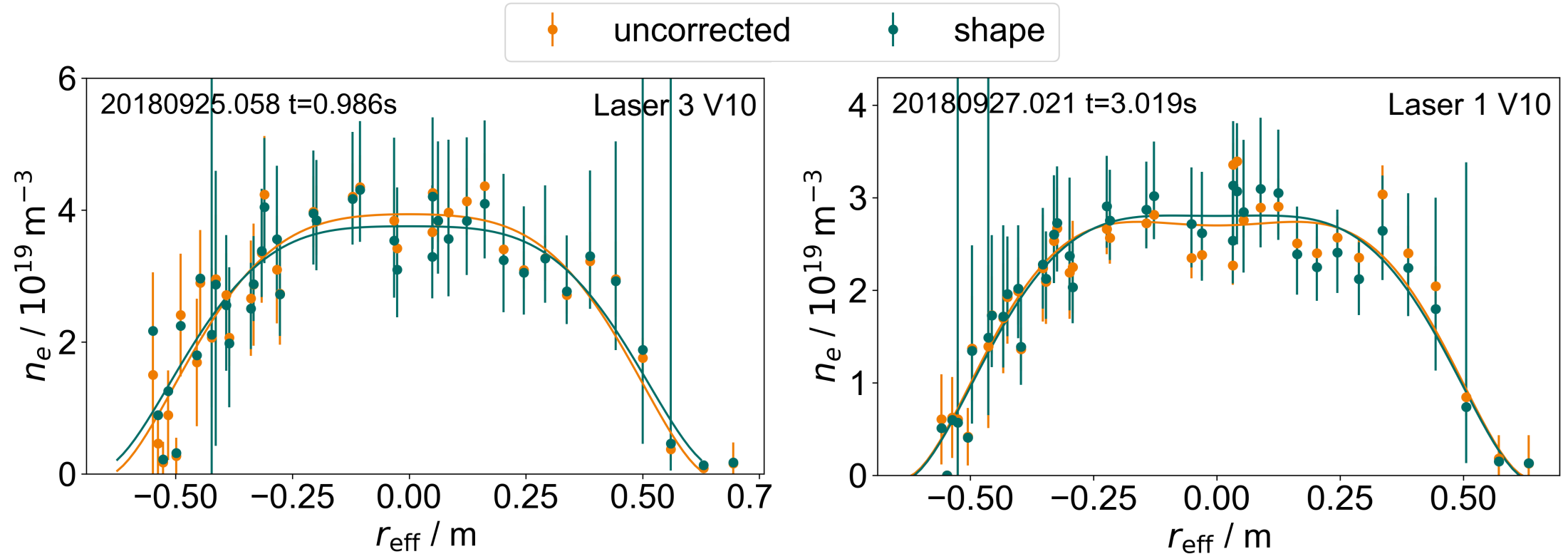
- Fehler: Korrektur 100 Profile in der Profilzelle auf 100 Profilen der Kalibrierungszelle (10000 Korrekturfaktoren)
→ 95% Konfidenzintervall
- Enthält den ursprünglichen Fehler → keine weitere Fehlerevaluierung notwendig
- Repräsentiert die Profilzelle → je ähnlicher die Profilformen in der Zelle, desto kleiner der Fehler



Ergebnisse

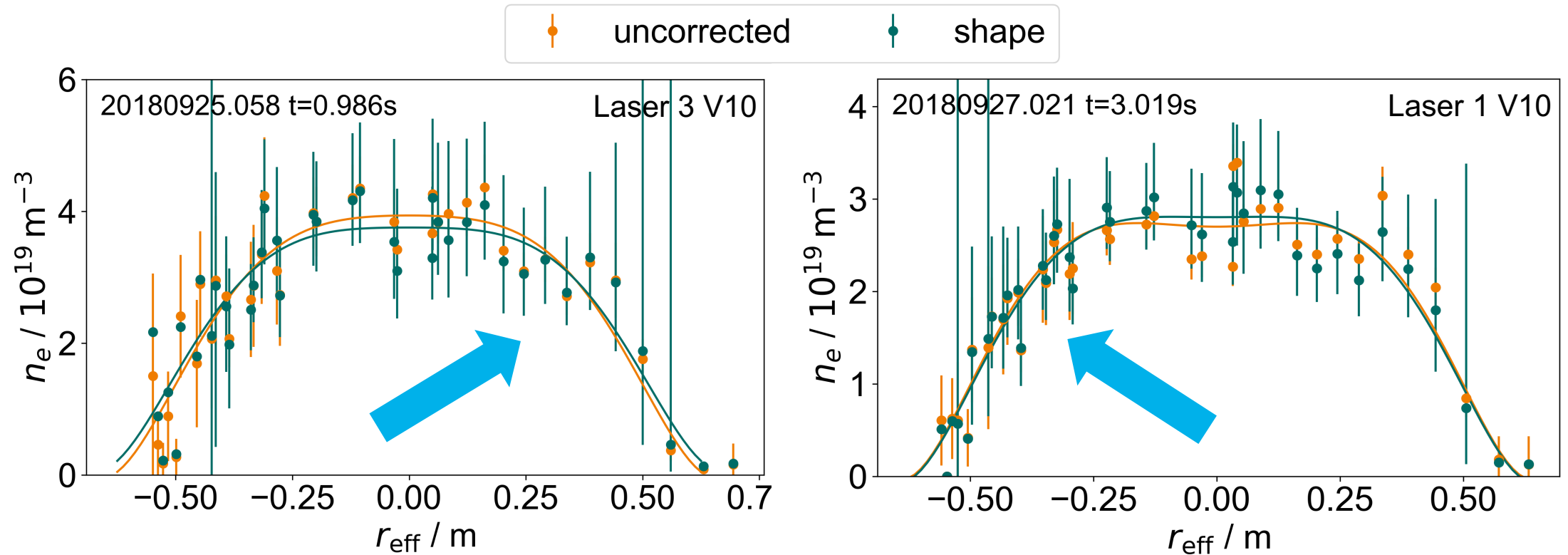


Ergebnisse: „gute“ Profile werden kaum korrigiert



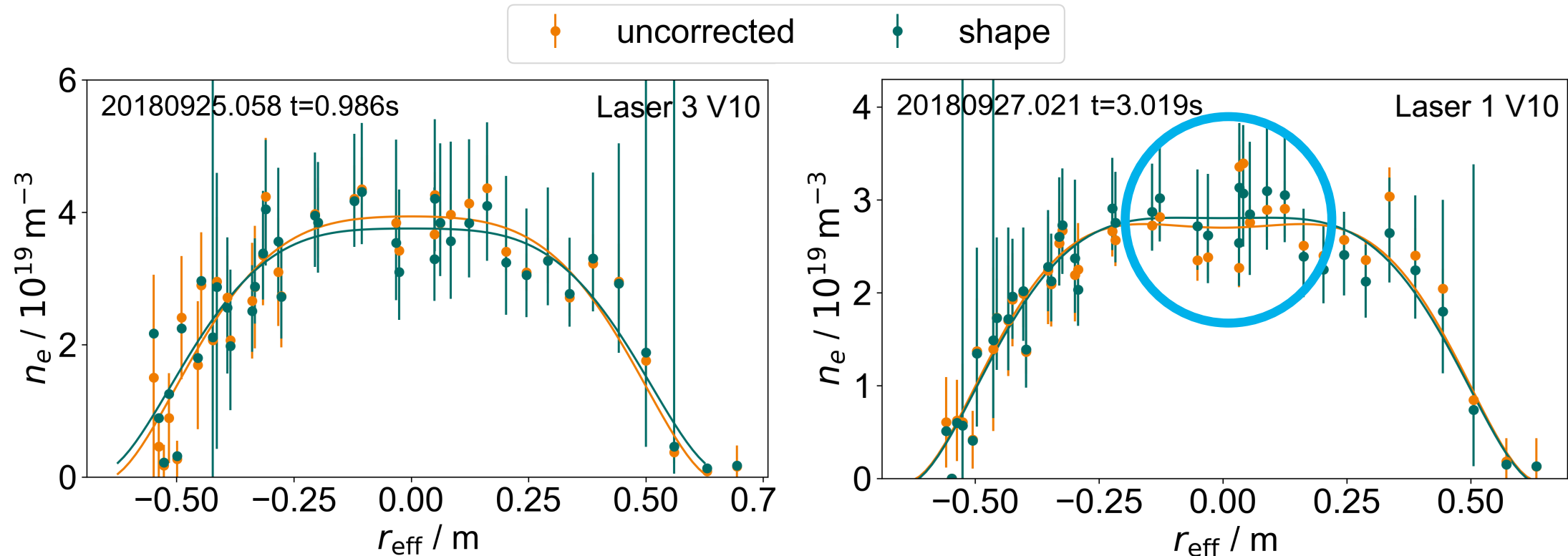
- Profile mit guter Qualität zeigen kaum Unterschiede nach der Korrektur
- Großer Sprung in der Mitte des Profils wird verringert
- Verbesserung der Glätte

Ergebnisse: „gute“ Profile werden kaum korrigiert



- Profile mit guter Qualität zeigen kaum Unterschiede nach der Korrektur
- Großer Sprung in der Mitte des Profils wird verringert
- Verbesserung der Glätte

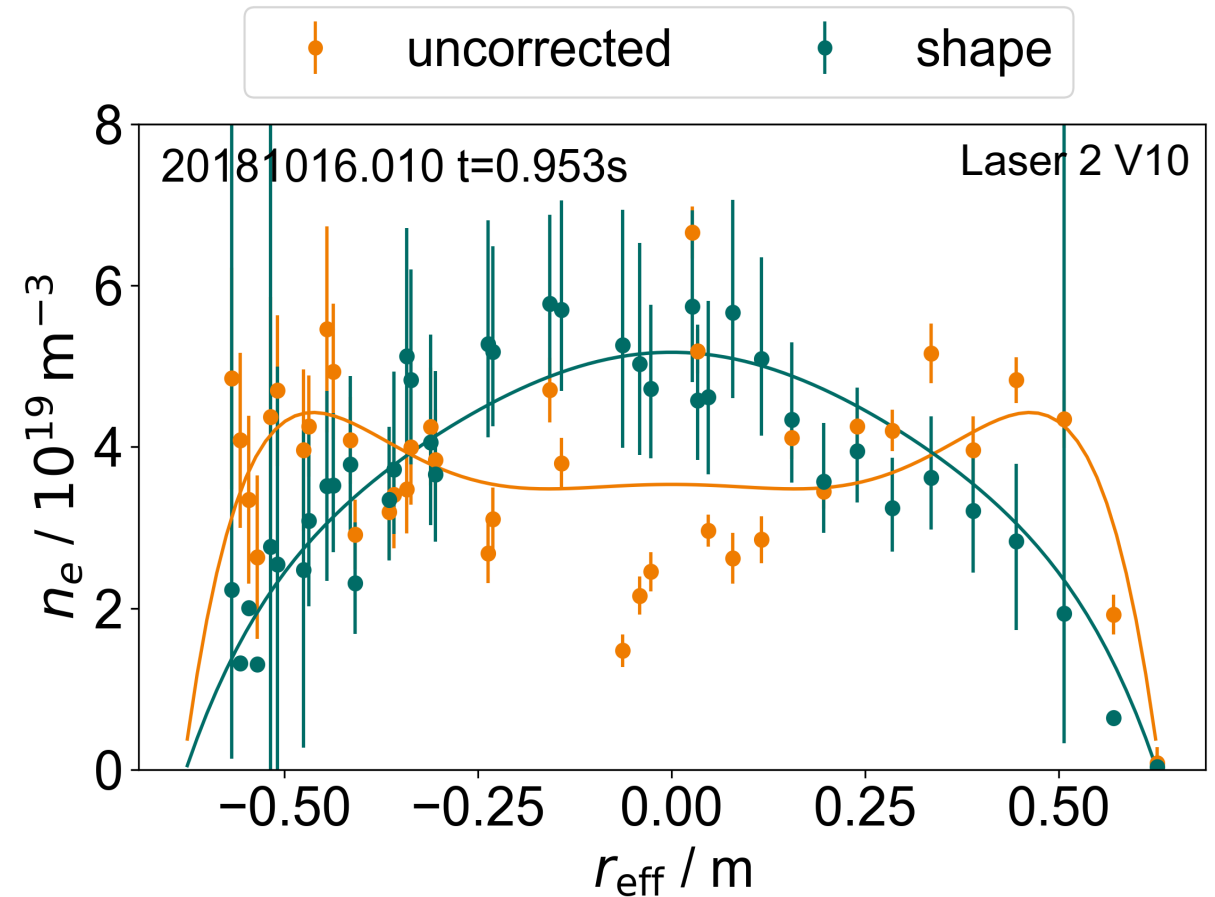
Ergebnisse: „gute“ Profile werden kaum korrigiert



- Profile mit guter Qualität zeigen kaum Unterschiede nach der Korrektur
- Großer Sprung in der Mitte des Profils wird verringert
- Verbesserung der Glätte

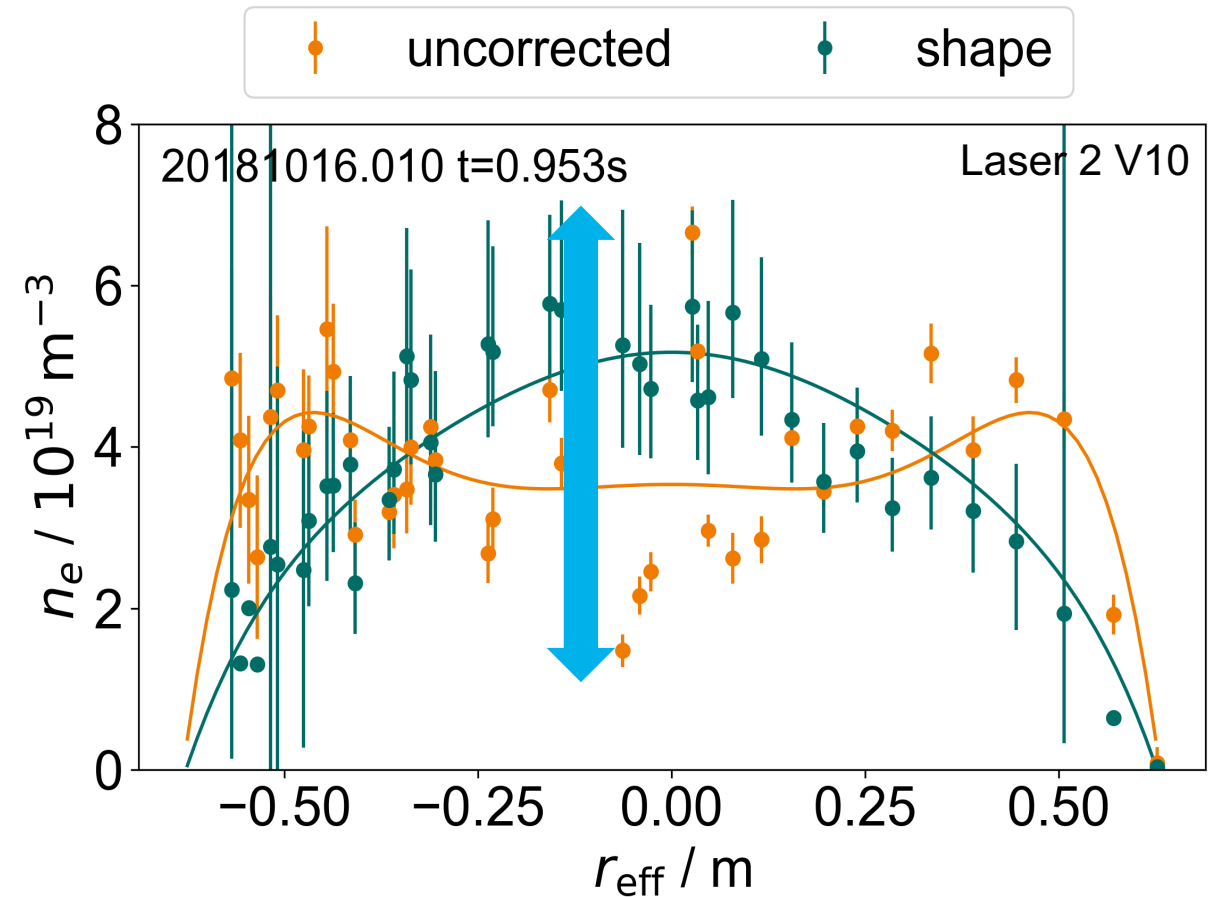
Ergebnisse: Beispiel für eine drastische Korrektur

- Schlechte Qualität vor der Korrektur
- Gemessene Dichte ist in der Mitte des Profils über einen großen Bereich gestreut ($\sim 1,5 - 7 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$)
- Signifikante Änderung der Profilform
- Immense Verbesserung der Glätte und Symmetrie

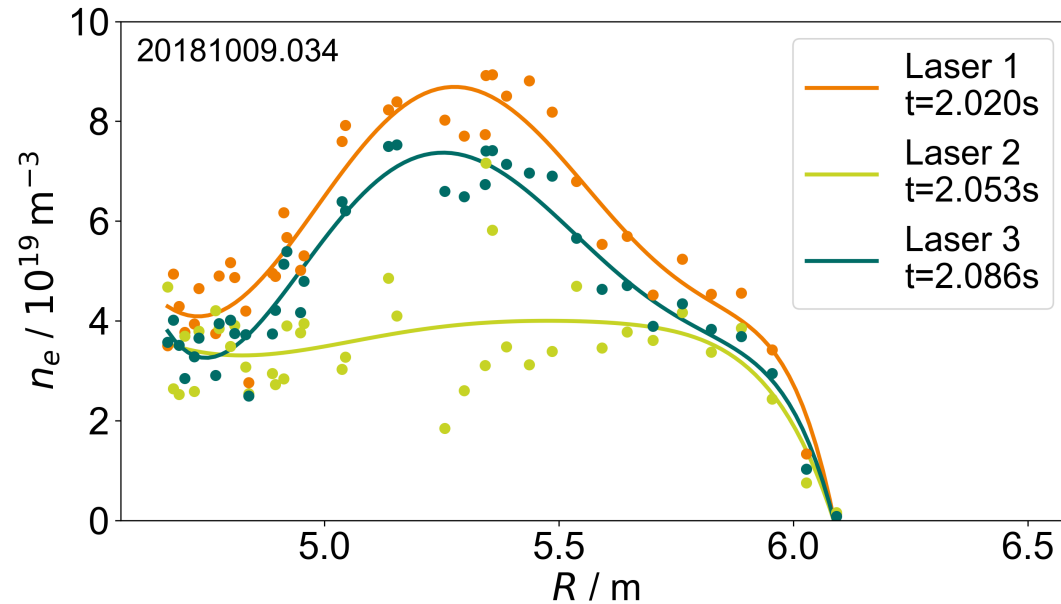


Ergebnisse: Beispiel für eine drastische Korrektur

- Schlechte Qualität vor der Korrektur
- Gemessene Dichte ist in der Mitte des Profils über einen großen Bereich gestreut ($\sim 1,5 - 7 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$)
- Signifikante Änderung der Profilform
- Immense Verbesserung der Glätte und Symmetrie



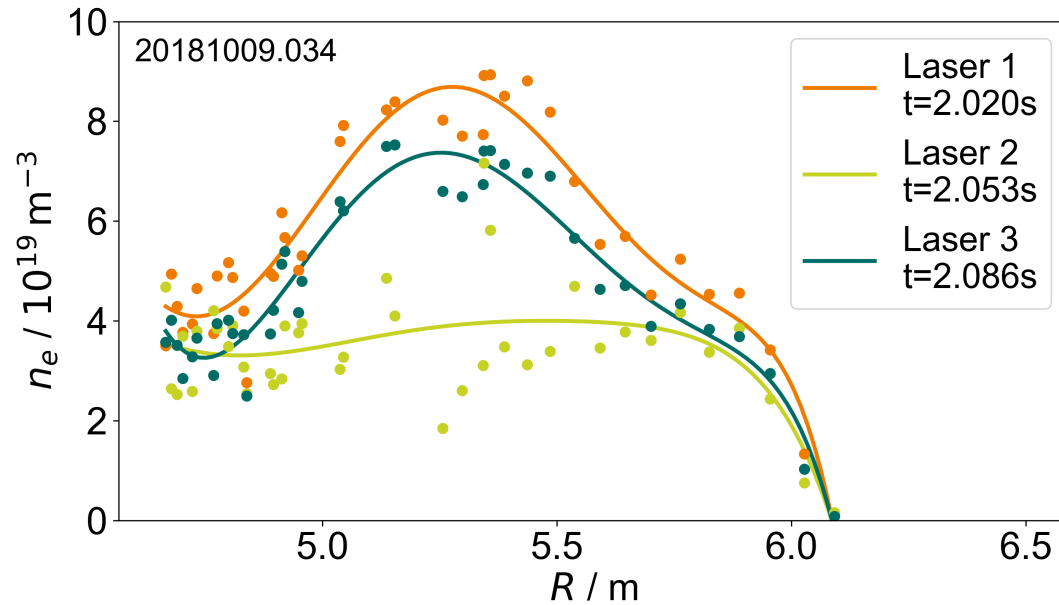
Ergebnisse: Skalierung



- 3 aufeinanderfolgende Profile → sollten ein ähnliche Form besitzen
- Laser 2 passt nicht
- Korrektur hängt nicht von der Profilform ab

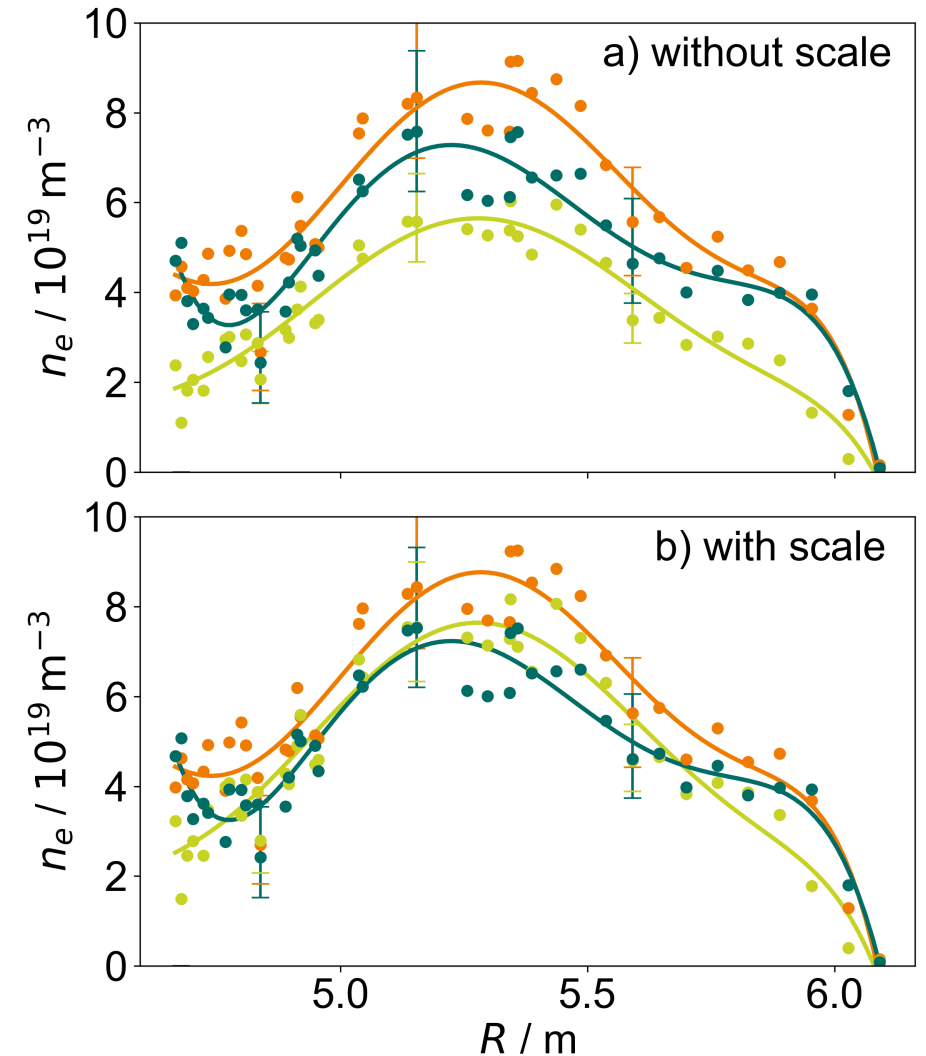
→ Skalierung funktioniert in diesem Beispiel gut

Ergebnisse: Skalierung



- 3 aufeinanderfolgende Profile → sollten ein ähnliche Form besitzen
- Laser 2 passt nicht
- Korrektur hängt nicht von der Profilform ab

→ Skalierung funktioniert in diesem Beispiel gut





Ausblick



Ausblick: Korrektur auf Basis von Referenzentladungen

Problematik

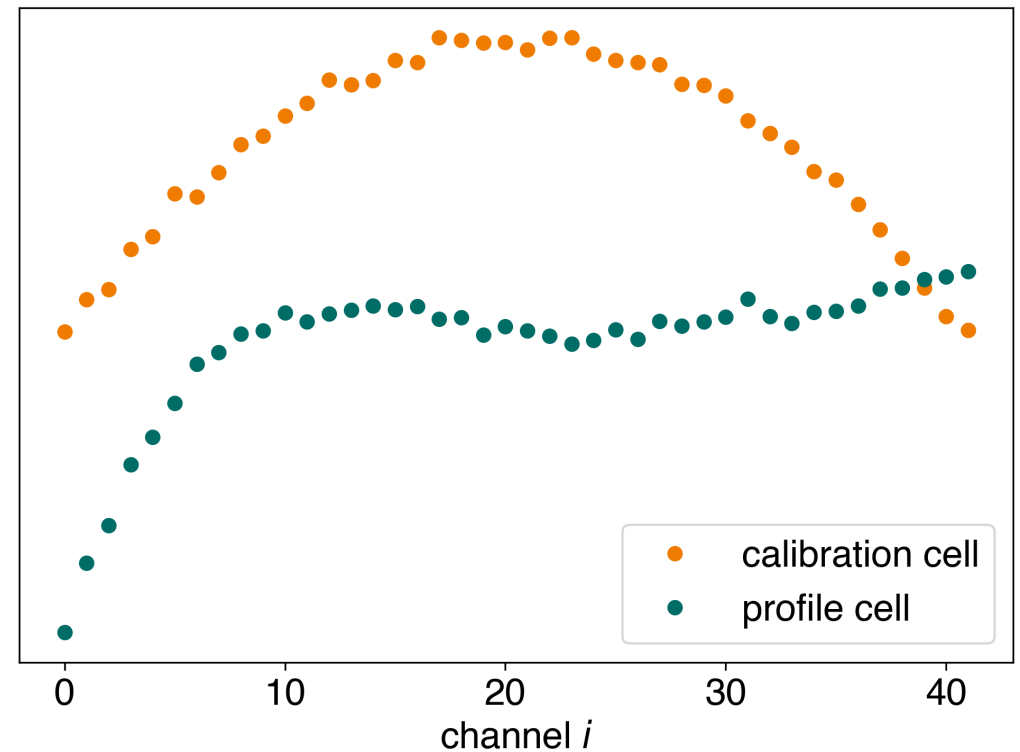
- Normierung sorgt für Informationsverlust über Skalierung

Bessere Alternative

- Form-Korrekturfaktor aus Trainingsdatensatz identischer Referenzplasmen ermitteln

→ Information über Skalierung bleibt erhalten und ist automatisch Teil des Korrekturfaktors

Darstellung der Nutzung von nicht normierten generalisierter Profile für die Korrektur



Ausblick: zukünftiger Nutzen der Methode

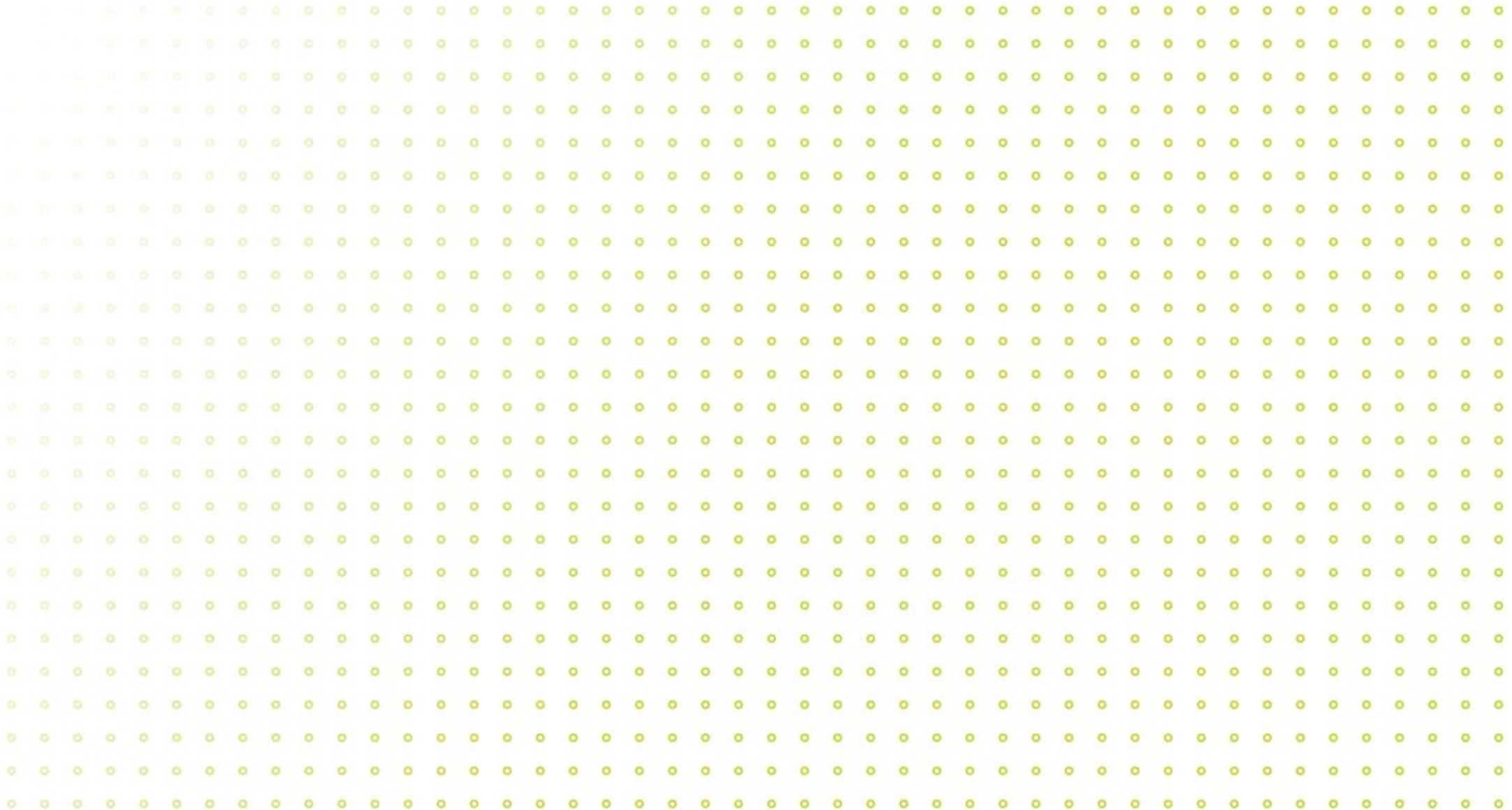
Thomsonstreuung

Aktuelle OP: Laser werden mit zwei Kameras beobachtet

- Laserpositionen können nun vollständig extrahiert werden und es existiert eine ortsabhängige Ramankalibrierung
 - Machine Learning Methode nicht mehr notwendig
- **ABER:** hilfreich für Anwendungen in der Kontrolle der Profilform
 - Auswertung und Übertragung der großen Bilddaten kann lange → vermutlich nicht schnell genug
 - Machine Learning Ansatz ist schnell genug für Echtzeit Anwendungen
- **ITER** wird vermutlich das selbe Problem haben

Allgemein

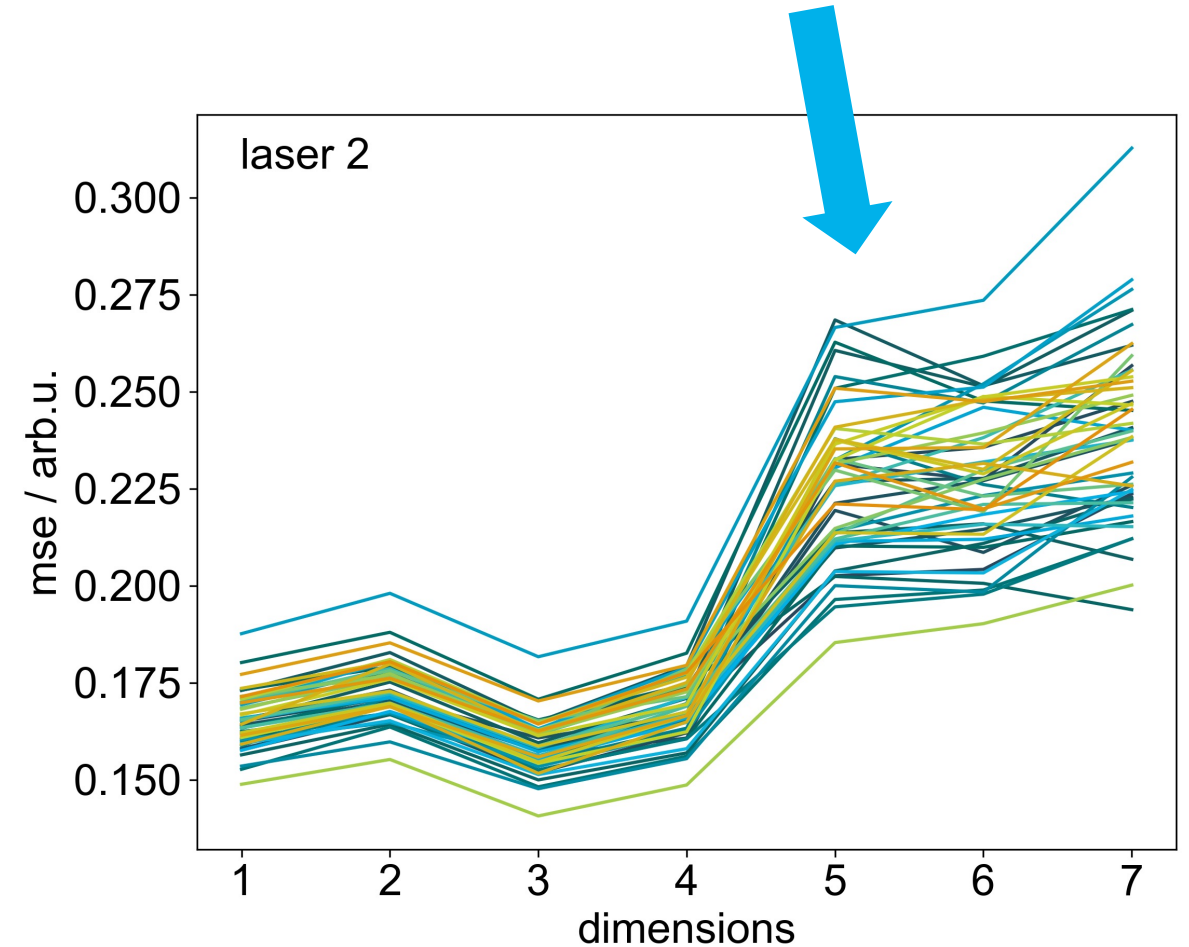
- Deterministische Effekte - mehr Datenpunkte als Freiheitsgrade → Überbestimmt und Information Teil der Daten → evtl. mehr Anwendungsbereiche als nur TS



The idea: degrees of freedom – fitting dimension

- Comparing corrections of the same profiles with 1-7 dimensions in the middle layer
- More than 4 dimensions seem to make the correction worse
- 1-4 dimensions are rather similar
- Minimum seems to be at **3 dimensions**

→ Agrees with expectation from geometric configurations

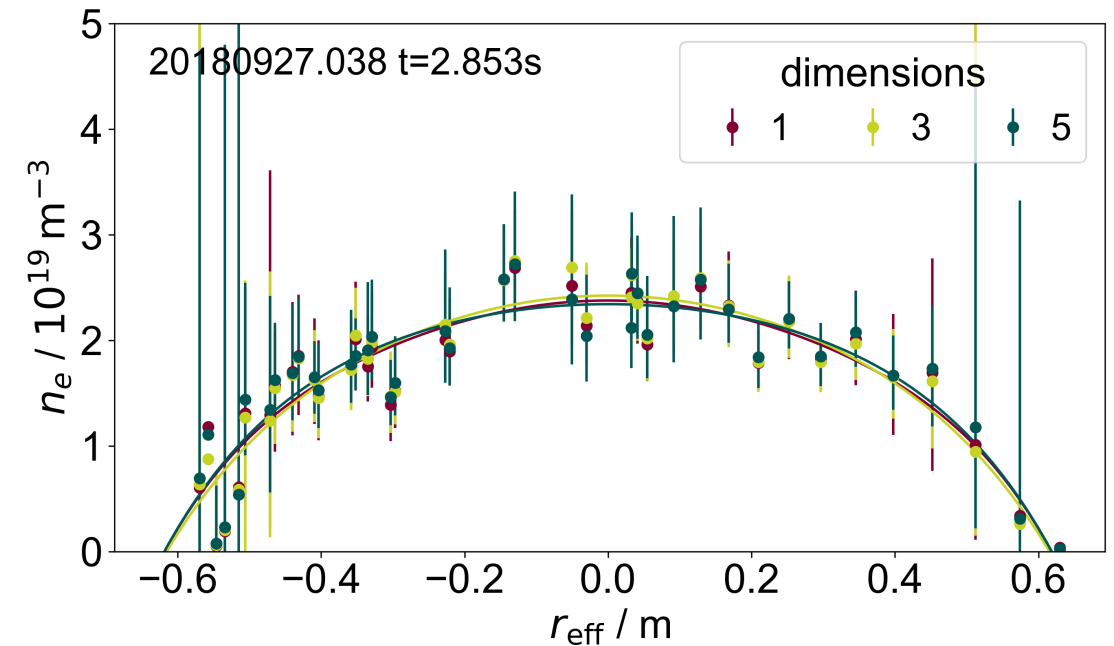
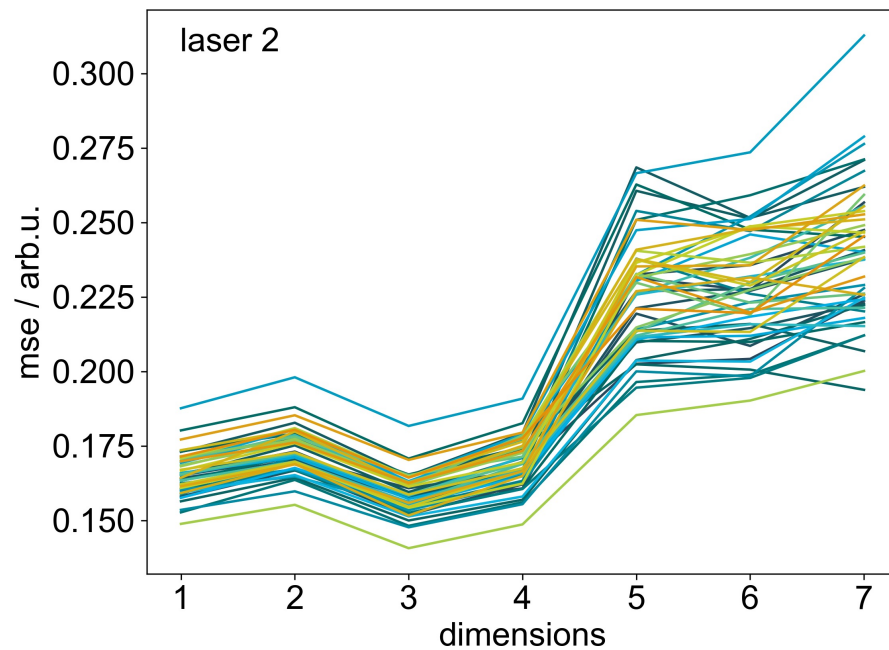


The method: choosing the fitting dimension

- Correction of 1000 random profiles and checking for smoothness and symmetry (error E)
- Building mean of E for each dimension
- Repeating the process above 49 times → result more stable

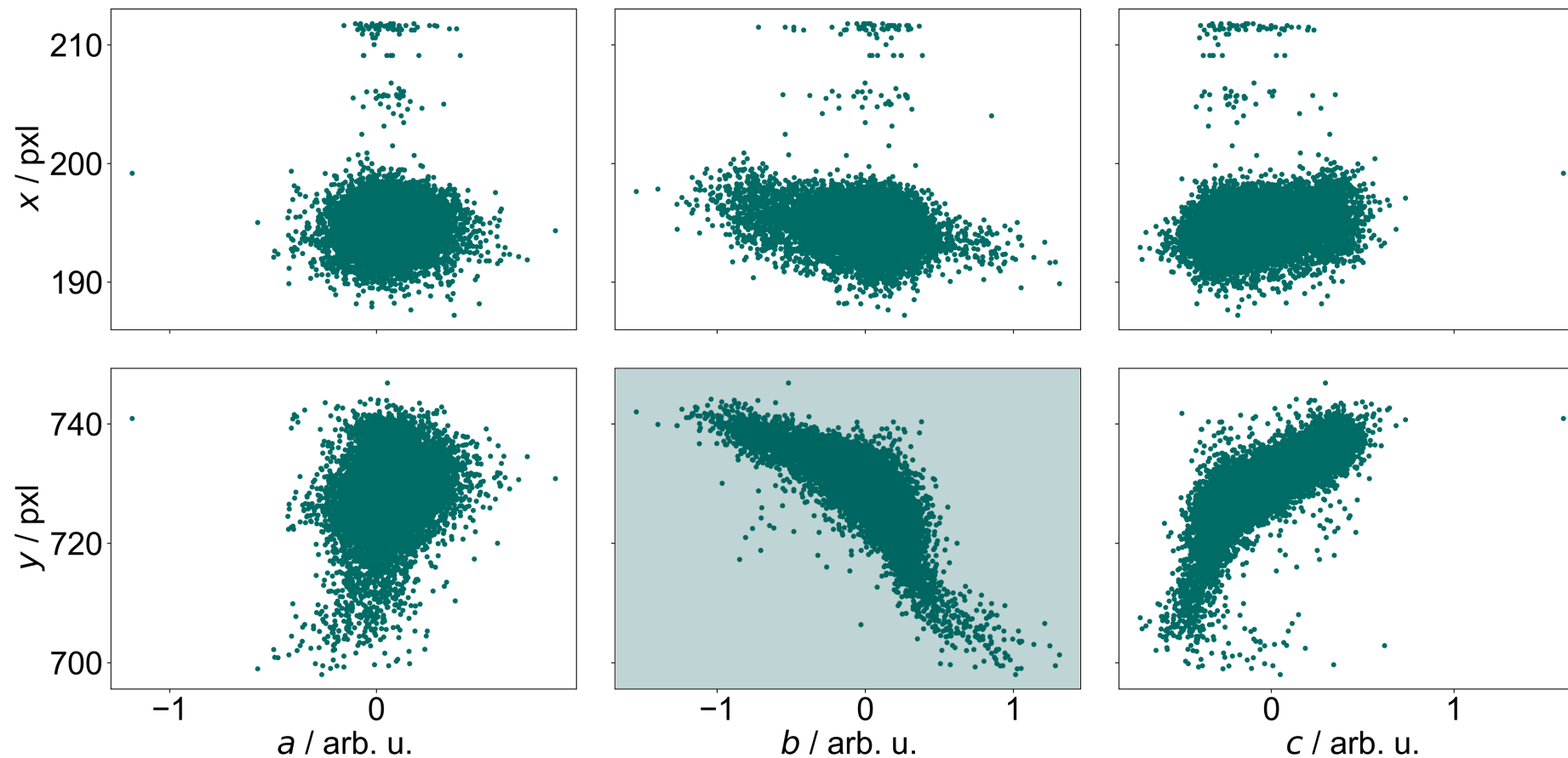
→ How big is the difference?

example profile laser 2

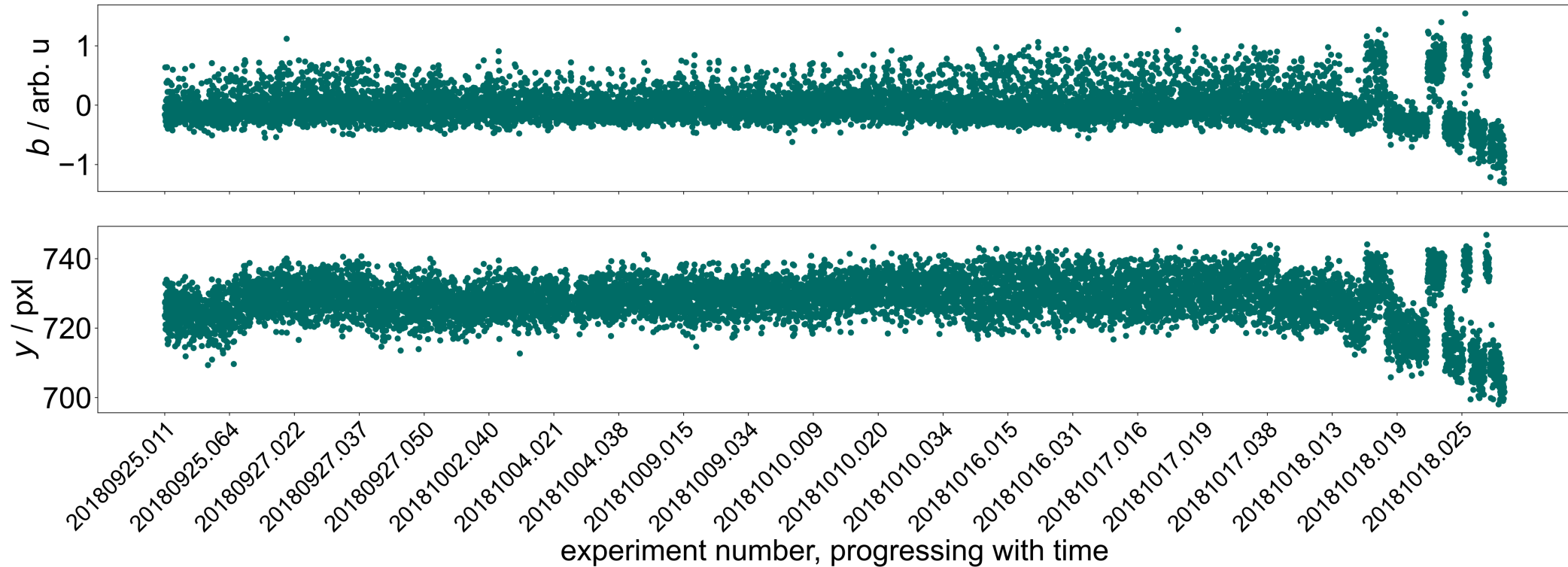


→ **3 dimensions** for all lasers in V10 as an agreement between precision and time management

The method: correlation between real and abstract laser coordinates



The method: correlation between real and abstract laser coordinates



- abstract laser positions actually mimic the real movement in this case → reduction in middle layer **successful** in terms of position
- Profiles can be identified by abstract laser position