

**Präzise Frässimulationen zur
Oberflächen- und Zerspankraftanalyse**

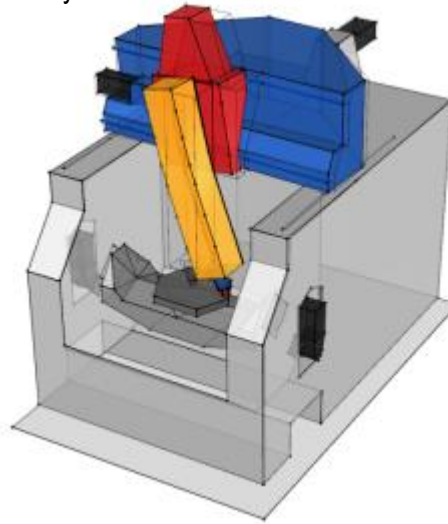
**planlauf GmbH, Aachen
Nürtingen, 14. Oktober 2014**

Dr.-Ing. Severin Hannig



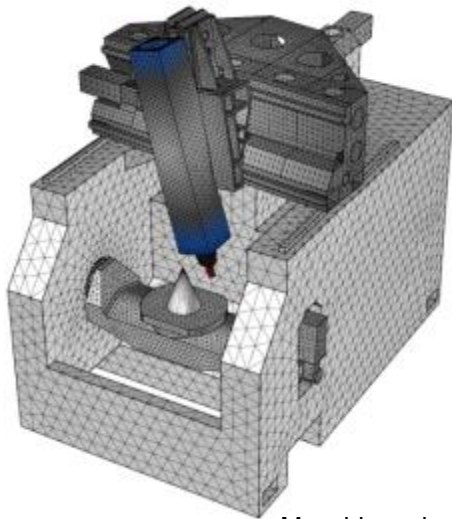
Frequenzgangmessung

Modalanalyse

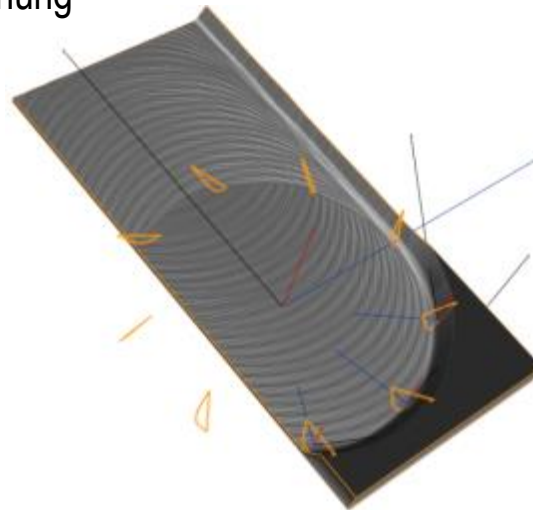


Messung

Berechnung



Maschinensimulation



Zerspansimulation

Produkte und Dienstleistungen:

Messung

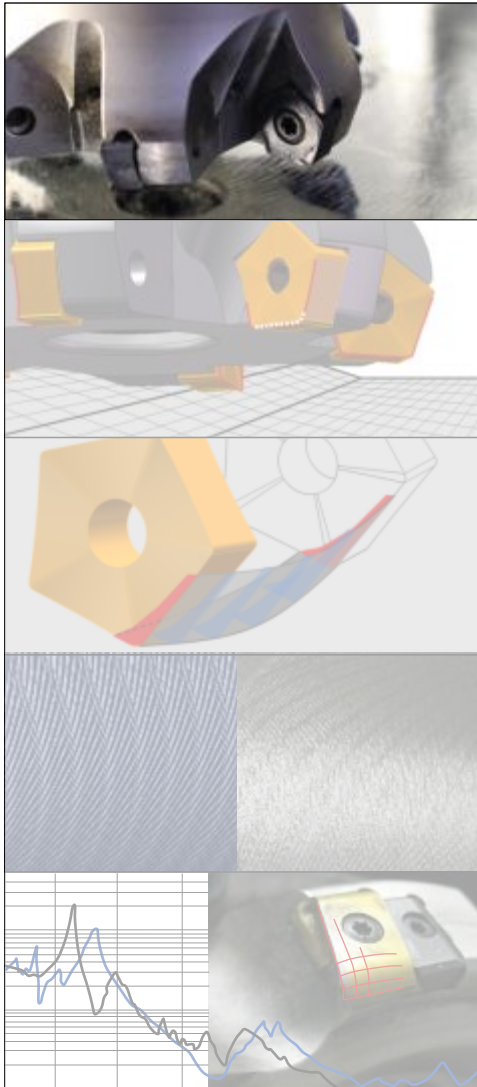
- Verlagerungen / Zerspankräfte
- Schwingungen / Steifigkeiten
- Modalanalyse / Frequenzgänge
- Geometrie / dyn. Spindelrundlauf
- Boden- / Fundamentanalysen
- Langzeitüberwachung von Maschinen

Berechnung

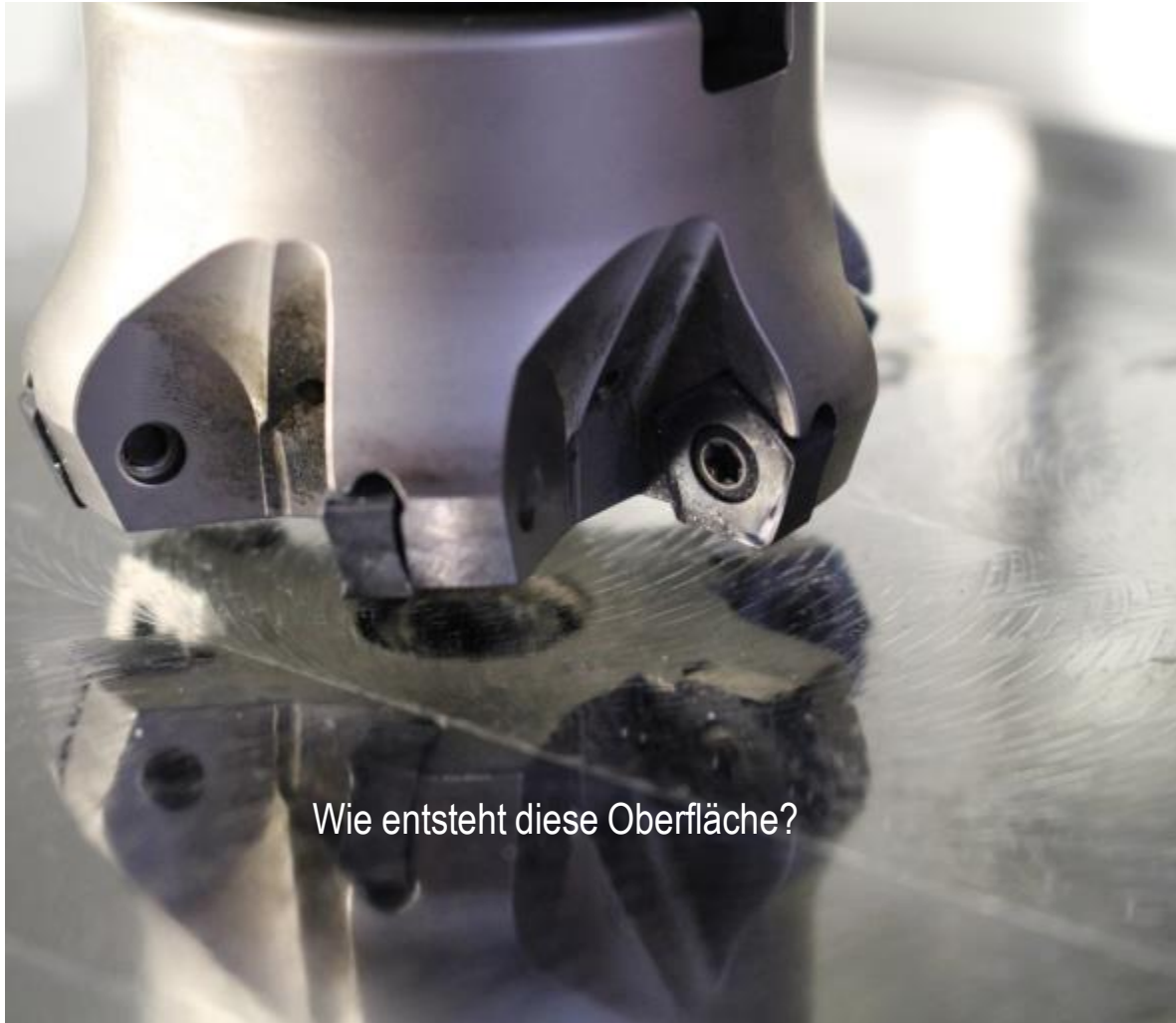
- Berechnung der Strukturmechanik
- Mechatroniksimulation
- Zerspansimulation
- Fundamentanalyse
- Werkzeugberechnung

Entwicklung

- Schwingungserreger und -dämpfer
- Messelektronik
- Mess- und Berechnungsprogramme



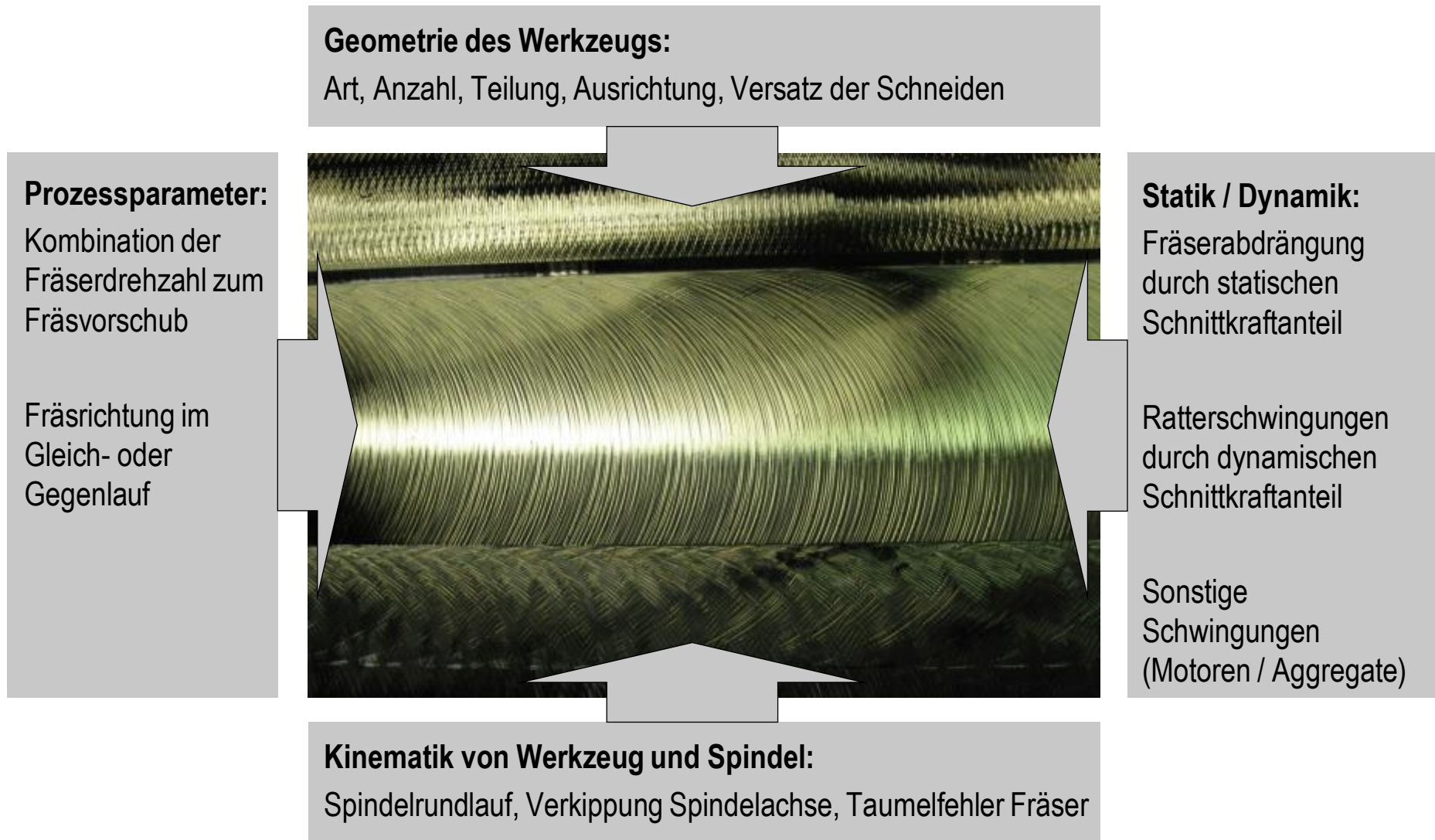
- Problemstellungen komplexer Fräsprozesse
- Mathematische Abbildung von Geometrie und Prozesskinematik
- Berücksichtigung von Prozesskräften und Nachgiebigkeiten
- Praktische Anwendungen der Zerspansimulation
- Ausblick auf Weiterentwicklungen

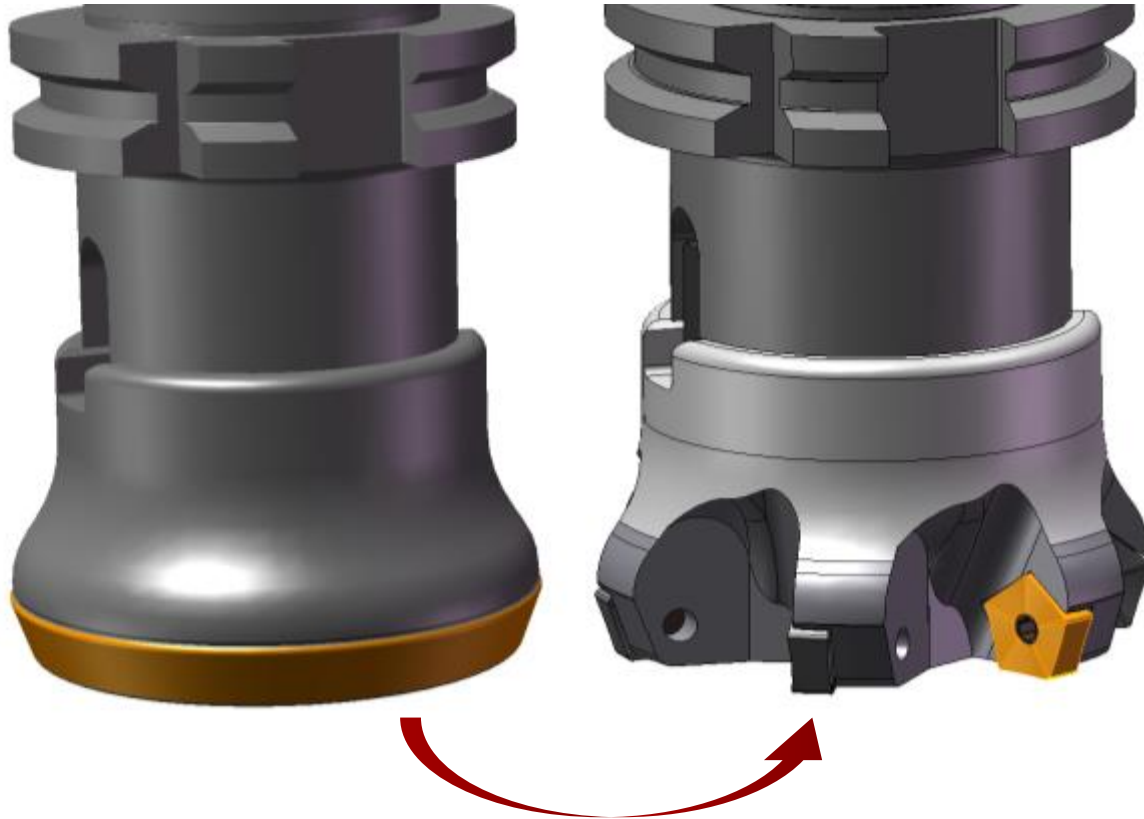


Wie entsteht diese Oberfläche?

Häufige Fragestellungen bei Problem- analysen:

- Ist das Oberflächenbild zwangsläufig fräserbedingt oder sind leichte Schwingungen beteiligt?
- Welches Oberflächenbild könnte mit den gewählten Prozessparametern und der Fräsergeometrie theoretisch erreicht werden?
- Welche Fehleranteile (geometrische und kinematische Fehler, statische und dynamische Nachgiebigkeiten) sind für die Oberflächenmarkierungen verantwortlich?
- Welchen Einfluss besitzt die Spindel und die Maschine?





Berücksichtigung von Einzelschneiden in Simulationen

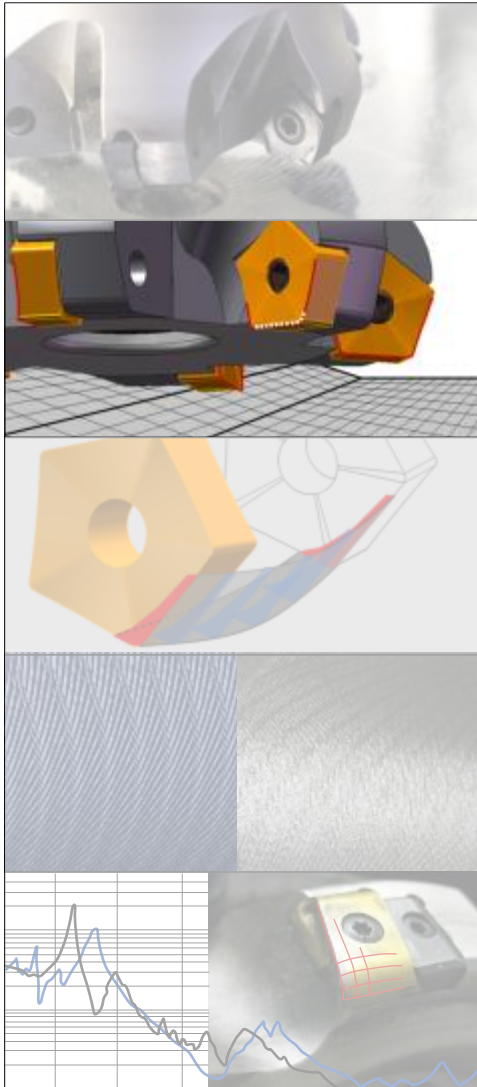
Ein genaues Zerspanmodell bildet die Voraussetzung für präzise Oberflächen-, Prozesskraft- und Stabilitätsanalysen

Problemstellung: Prozesskräfte

- Prozesskräfte sind meist unbekannt.
- Kraftberechnungen basieren auf alten Modellen (z.B. Kienzle), deren Parameter in Analogdrehversuchen ermittelt wurden.

Problemstellung: Dyn. Stabilität

- Ratterschwingungen stellen noch immer ein wesentliches Problem dar.
- Dynamische Nachgiebigkeiten von Maschine und Spindel werden bei der Prozessauslegung nicht berücksichtigt.
- Stabilitätsgrenzen lassen sich bislang nicht sicher prognostizieren.
- Stabilitätsunterschiede z.B. beim Gleich- und Gegenlaufräsen sind nicht erklärbar.

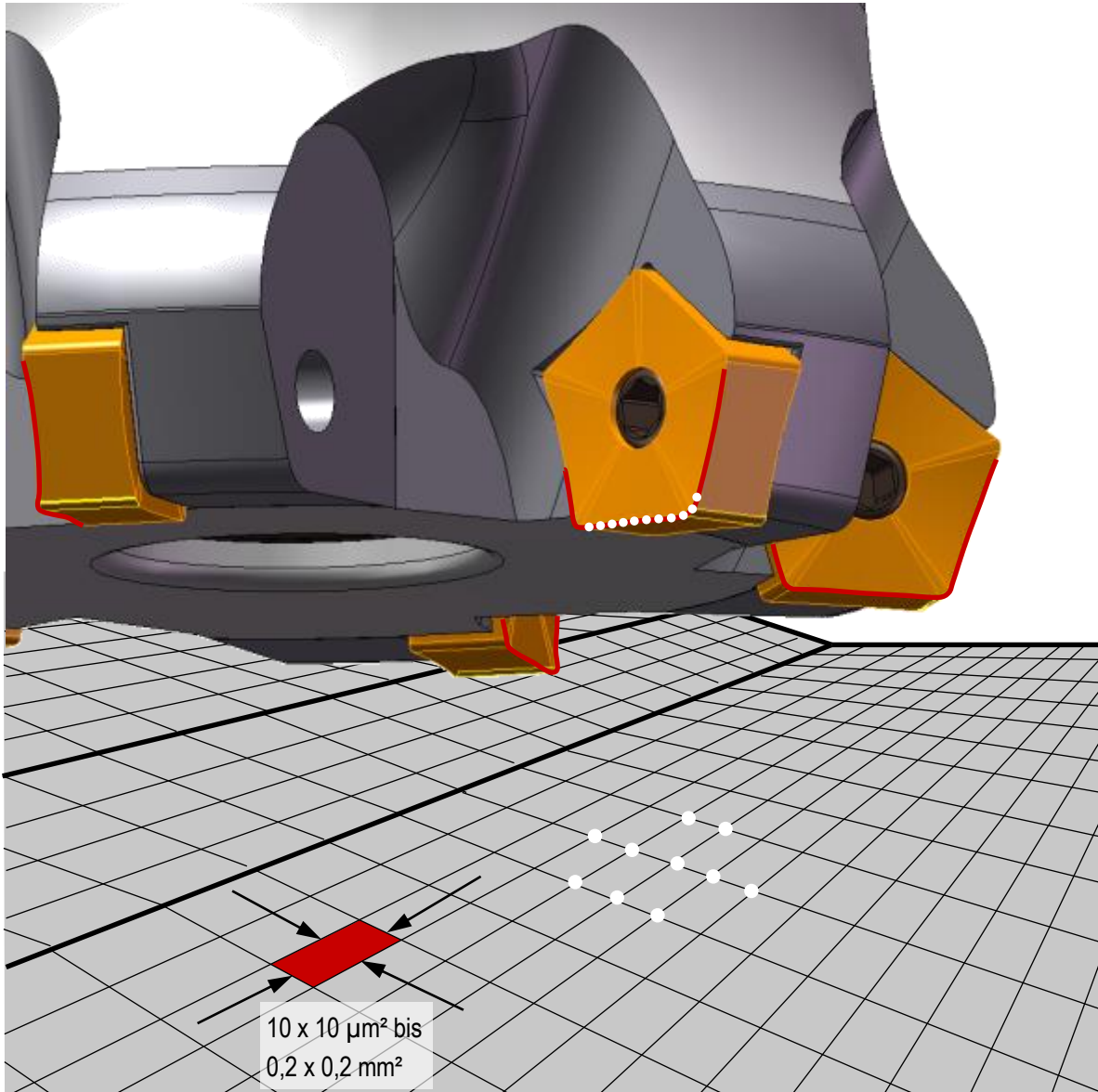


- Problemstellungen komplexer Fräsprozesse
- Mathematische Abbildung von Geometrie und Prozesskinematik
- Berücksichtigung von Prozesskräften und Nachgiebigkeiten
- Praktische Anwendungen der Zerspansimulation
- Ausblick auf Weiterentwicklungen



Vorgehensweise:

- Auswahl der Prozessart
- Auswahl des Werkzeugs und der Schneidenart / -anzahl / -ausrichtung
- Vorgabe der Prozessparameter
- Vorgabe möglicher Fehleranteile
- Vorgabe eines Zerspankraftmodells
- Berücksichtigung von statischen / dynamischen Nachgiebigkeiten der Spindel bzw. Maschine
- Hochoflösende Simulation des Prozesses im Zeitbereich
- 3D-Visualisierung der zerspanten Oberfläche
- Darstellung von Kraft- und Verlagerungsverläufen
- Animation des Zerspanprozesses



Modellierung der Schneiden

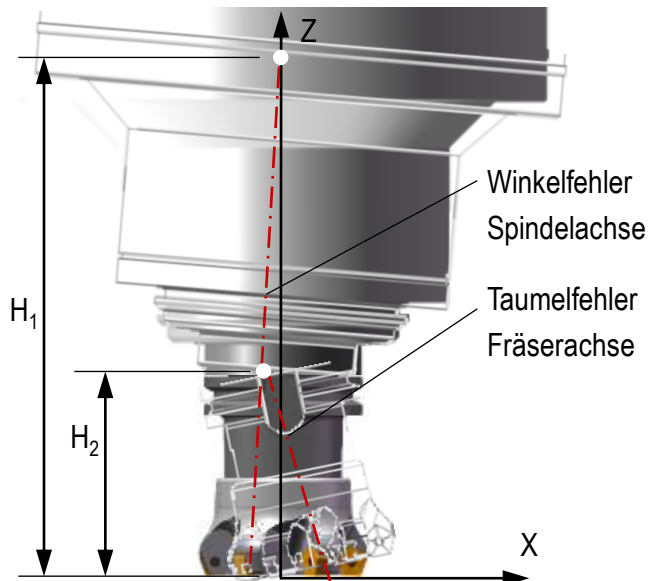
- Standardgeometrien: Auswahl von Eckenanzahl, Schneidenradius, etc.
- Sondergeometrien: Einlesen beliebiger Konturen inkl. räumlicher Verkipfung und Verwindung der Schneide
- Approximation der Schneiden durch Stützpunktlinien

Modellierung des Werkzeugs

- Anordnung eines oder mehrerer Schneidentypen am Werkzeugumfang gleich- oder ungleich geteilt
- Ausrichtung/Versatz der Einzelschneiden bzgl. der drei kartesischen Koordinaten

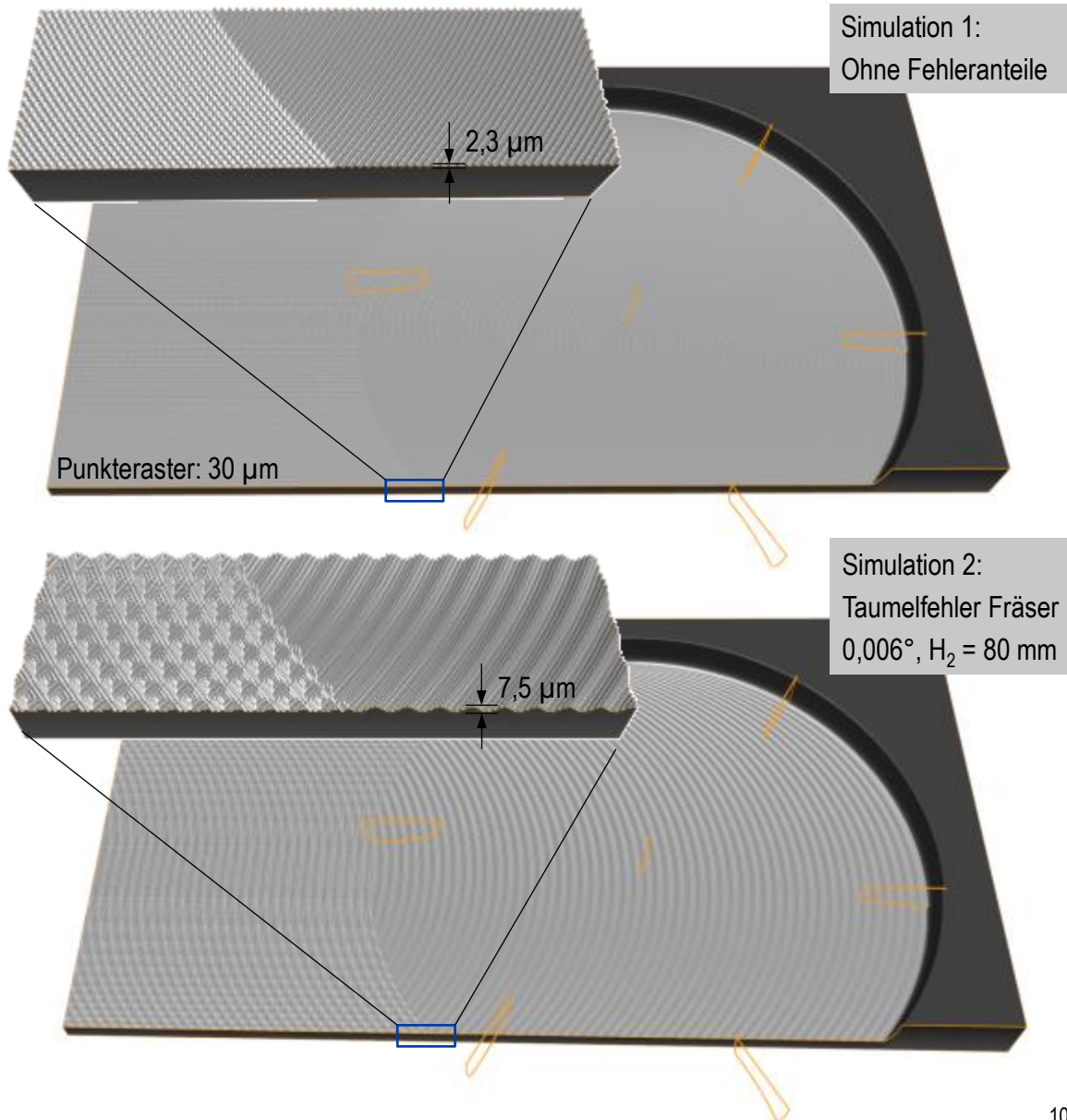
Modellierung des Werkstücks

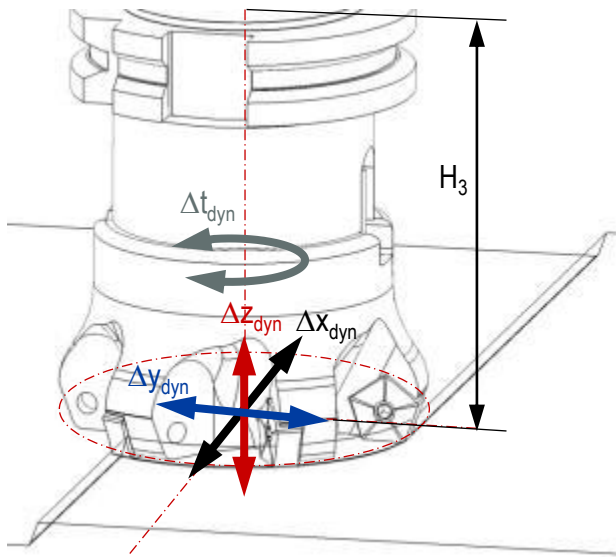
- Hochauflösendes Punktgitter in der Ebene (Fräsen, Plandrehen) bzw. in Umfangsrichtung (Drehen)



Darstellbare Fehleranteile:

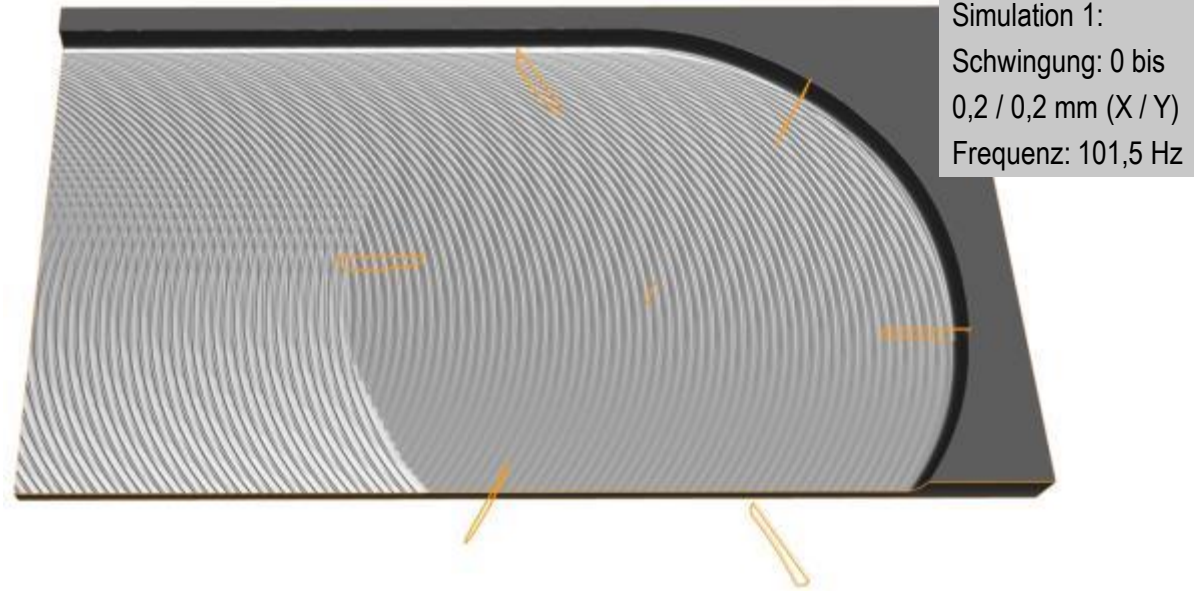
- Winkelfehler der Spindelachse: Verkippung in X- / Y-Richtung um Drehpunkt H_1
- Taumelfehler der Fräserachse: Mitdrehende Verkippung relativ zur Spindelachse um Drehpunkt H_2
- Höhen- bzw. Radienversatz der Positionen einzelner Schneiden
- Rauheit/Verschleiß der Schneiden



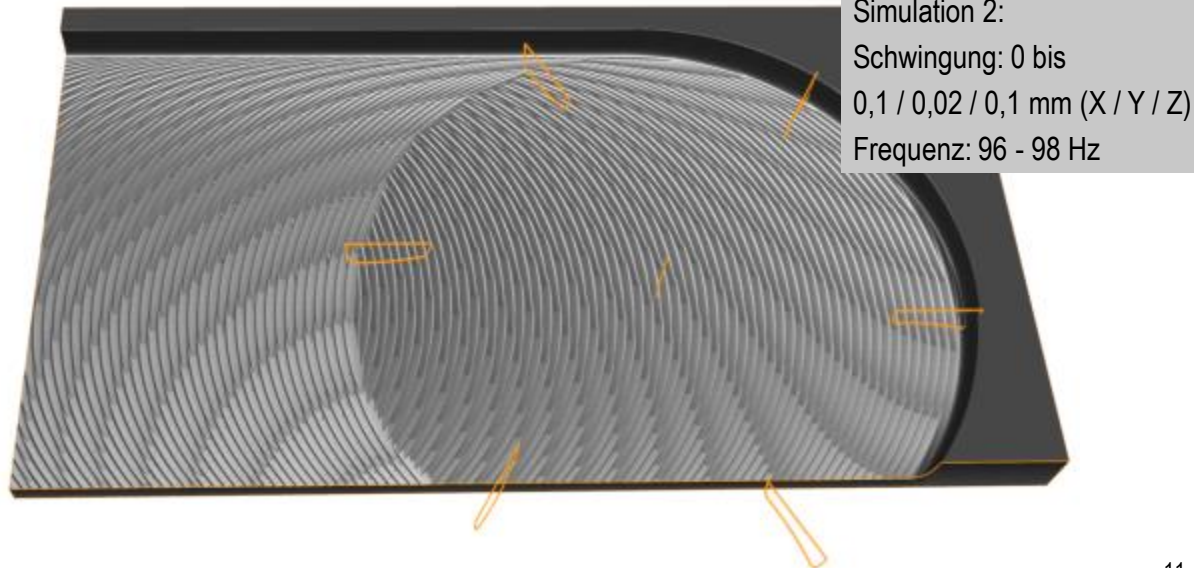


Darstellbare Prozessschwingungen:

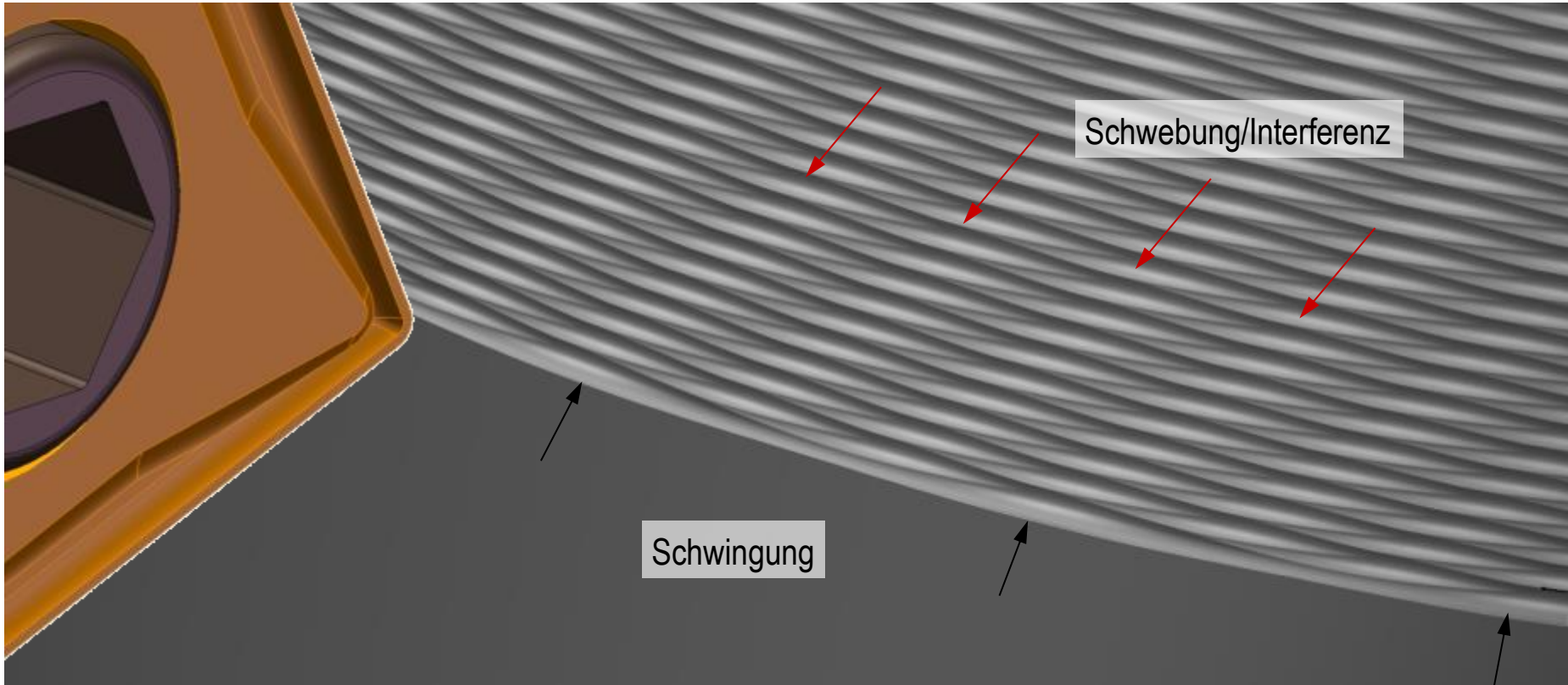
- Radialschwingungen Δx_{dyn} , Δy_{dyn} mit beliebigem Drehpunkt H_3
- Axialschwingung Δz_{dyn}
- Torsionsschwingung Δt_{dyn}
- Zeitliche Änderungen der Schwingungsamplitude und -frequenz



Simulation 1:
Schwingung: 0 bis
0,2 / 0,2 mm (X / Y)
Frequenz: 101,5 Hz



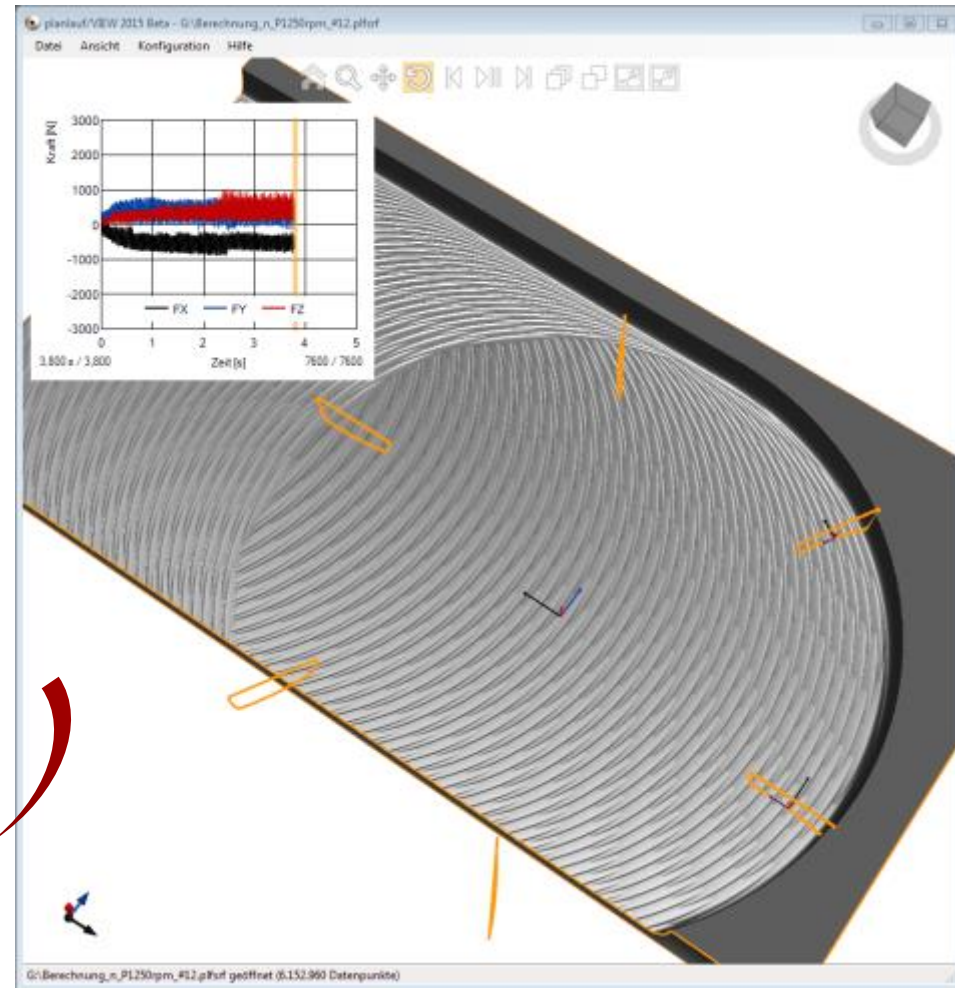
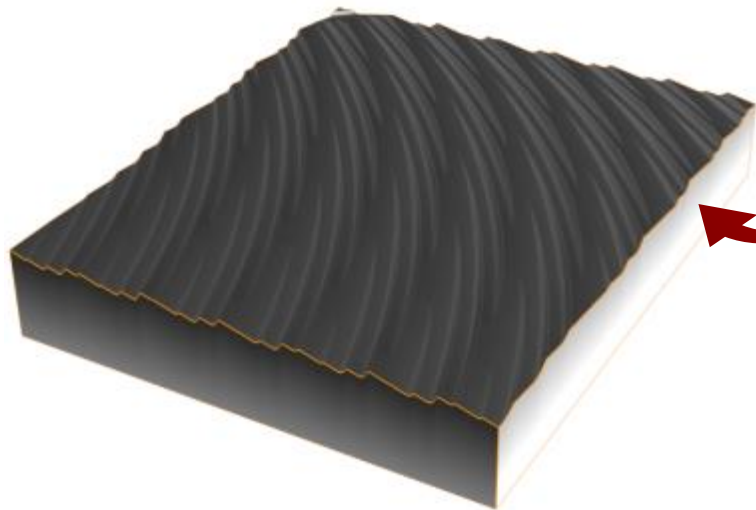
Simulation 2:
Schwingung: 0 bis
0,1 / 0,02 / 0,1 mm (X / Y / Z)
Frequenz: 96 - 98 Hz



- Sichtbare Rattermuster zeigen oft Interferenzen, die durch den Phasenversatz der Wellenberge von Überschnitt zur Überschnitt entstehen.
- Eine direkte Auszählung der sichtbaren Schwebungswellenlänge und die Rückrechnung auf die erforderliche Ratterfrequenz führt zu einer falschen Interpretation des Schwingungsproblems.

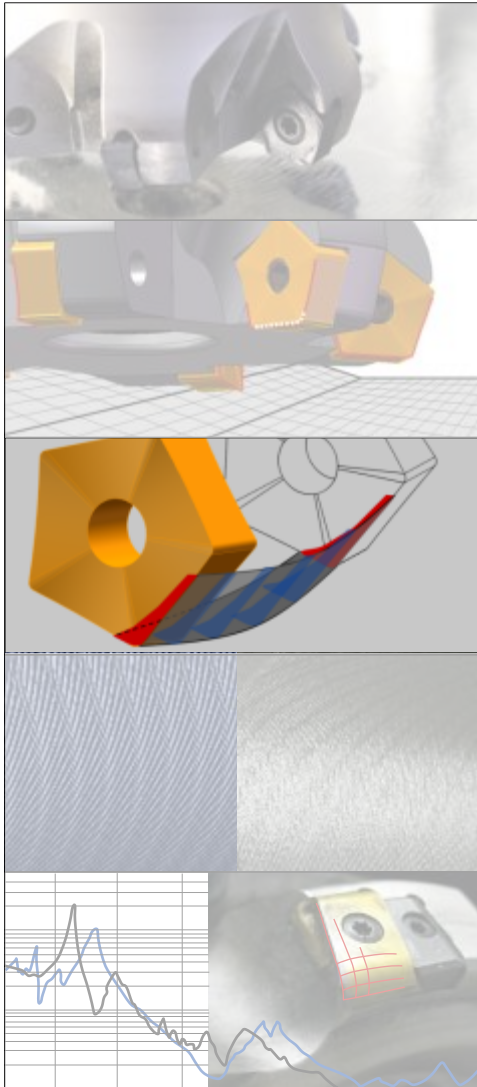
Visualisierungs-Software: planlauf/VIEW

- Darstellung und Betrachtung der zerspannten Oberfläche aus allen Raumrichtungen mit beliebiger Vergrößerung einzelner Ausschnitte
- Animation des Fräsers und der Oberflächenentstehung in beliebigen Geschwindigkeiten
- Darstellung und Animation der Kraftverläufe
- Freier Download unter:
www.planlauf.com/de/software/planlaufview

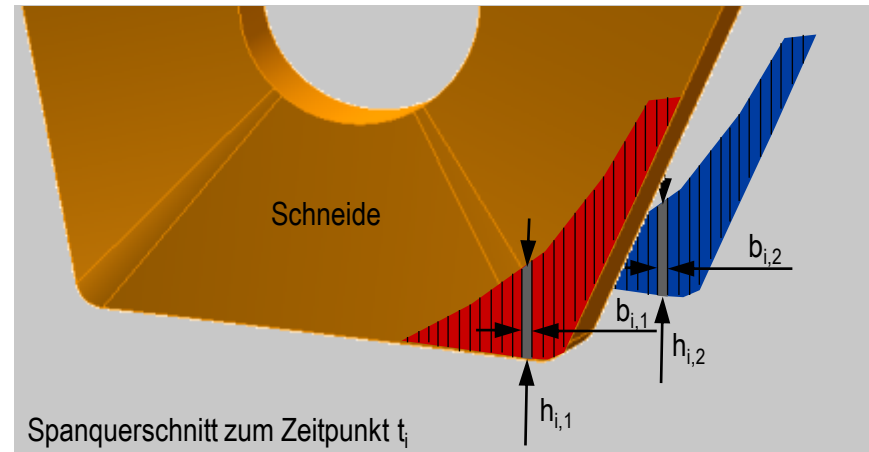
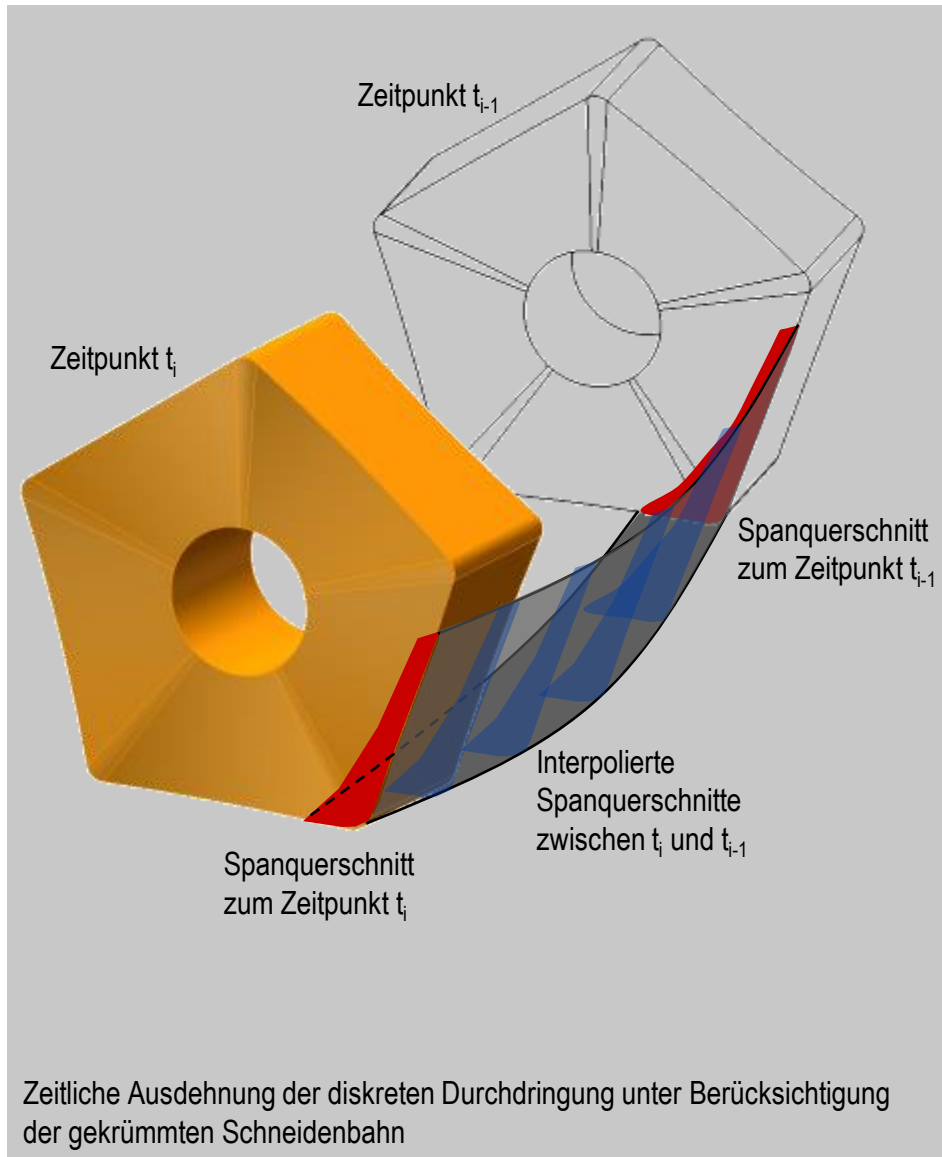


Oberfläche:
Auflösung: 30 x 30 μm
Stützpunkte: 6,1 Millionen

Kraftverlauf:
Auflösung: 4000 Werte/Zerspansekunde
Stützpunkte: 15200



- Problemstellungen komplexer Fräsprozesse
- Mathematische Abbildung von Geometrie und Prozesskinematik
- Berücksichtigung von Prozesskräften und Nachgiebigkeiten
- Praktische Anwendungen der Zerspansimulation
- Ausblick auf Weiterentwicklungen



Anpassung des Kraftmodells nach Kienzle:

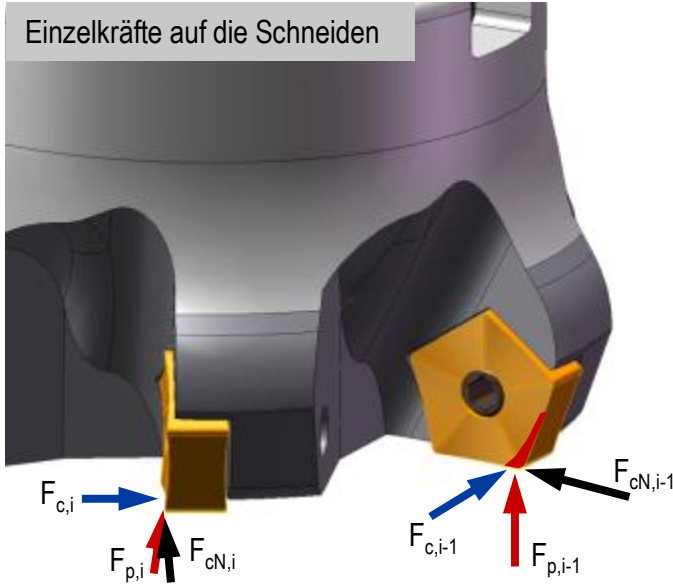
Kräfte auf die Schneide zum Zeitpunkt t_i :

- Schnittkraft: $F_c = \sum (b_{i,j} * k_{c1.1} * h_{i,j}^{(1-mc)})/A$
- Schnittnormalkraft: $F_{cN} = \sum (b_{i,j} * k_{cN1.1} * h_{i,j}^{(1-mcN)})/A$
- Passivkraft: $F_p = \sum (b_{i,j} * k_{p1.1} * h_{i,j}^{(1-mp)})/A$

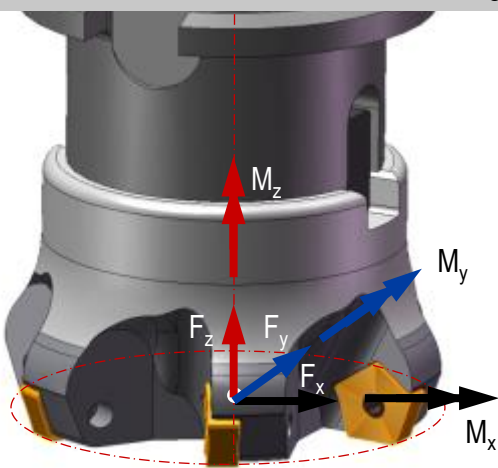
k, m : Koeffizienten, Exponenten nach Kienzle

A : Anzahl interpolierter Spanquerschnitte

Einzelkräfte auf die Schneiden

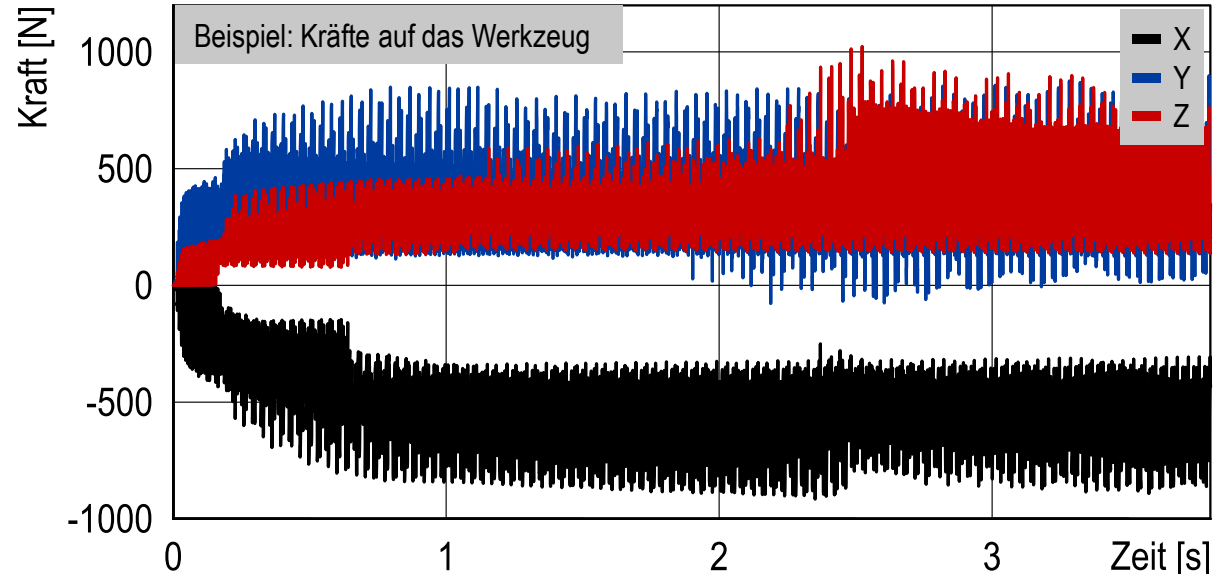


Kraft- / Momentresultierende auf das Werkzeug



Berechnungsmöglichkeiten zu jedem Zeitpunkt t:

- Berechnung der mitdrehenden Kräfte auf die Einzelschneiden als Schnittkraft $F_{c,i}$, Schnittnormalkraft $F_{cN,i}$ und Passivkraft $F_{p,i}$
- Berechnung der nicht mitdrehenden Kraftresultierenden in X, Y und Z-Richtung, die auf das Werkzeug bzw. die Spindel wirken
- Berechnung der Momentresultierenden in X, Y und Z-Richtung bezogen auf einen Punkt auf der Spindelachse



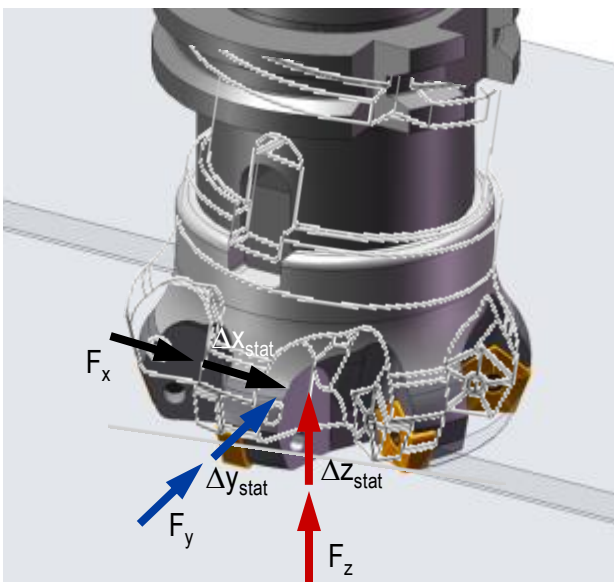
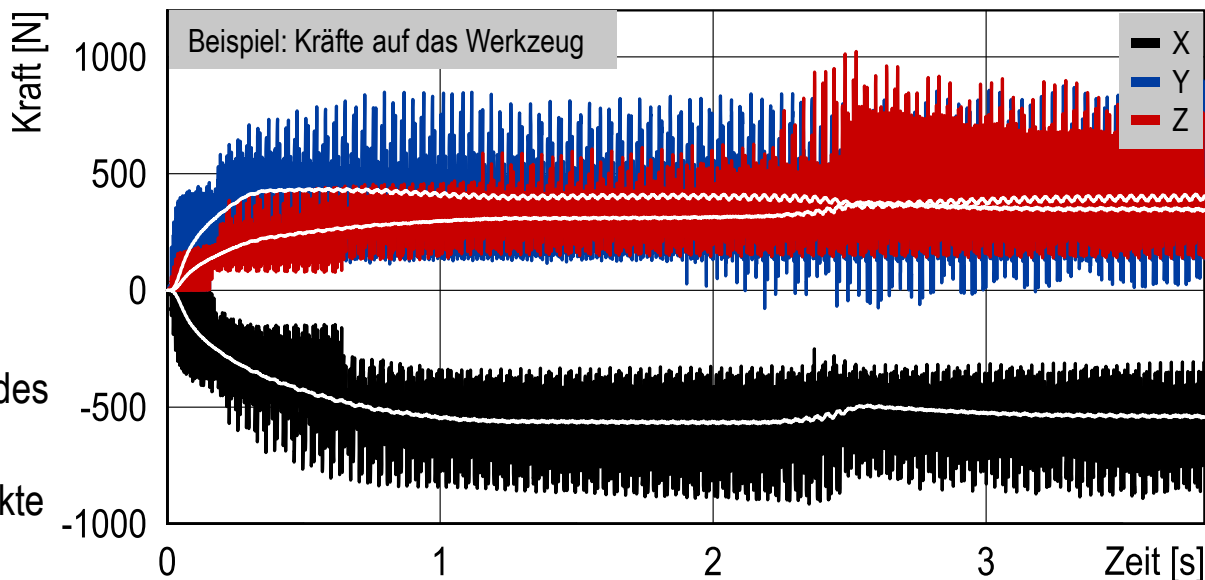
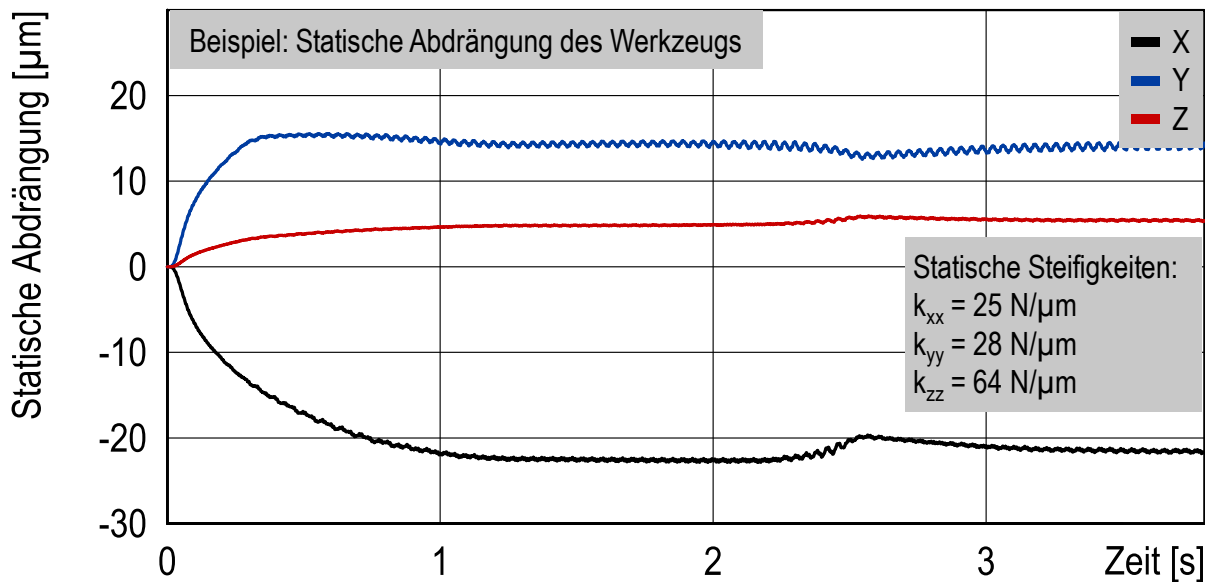
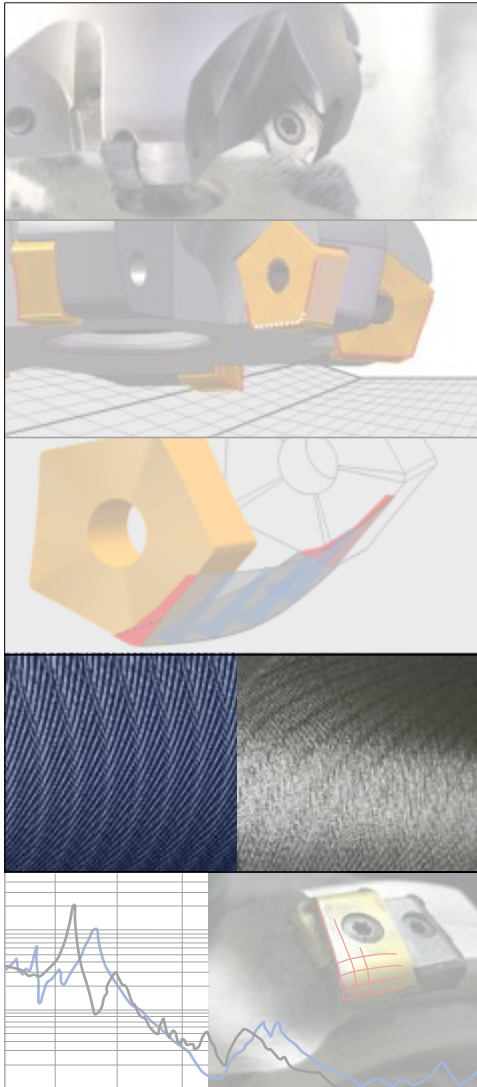


Abbildung der Statik:

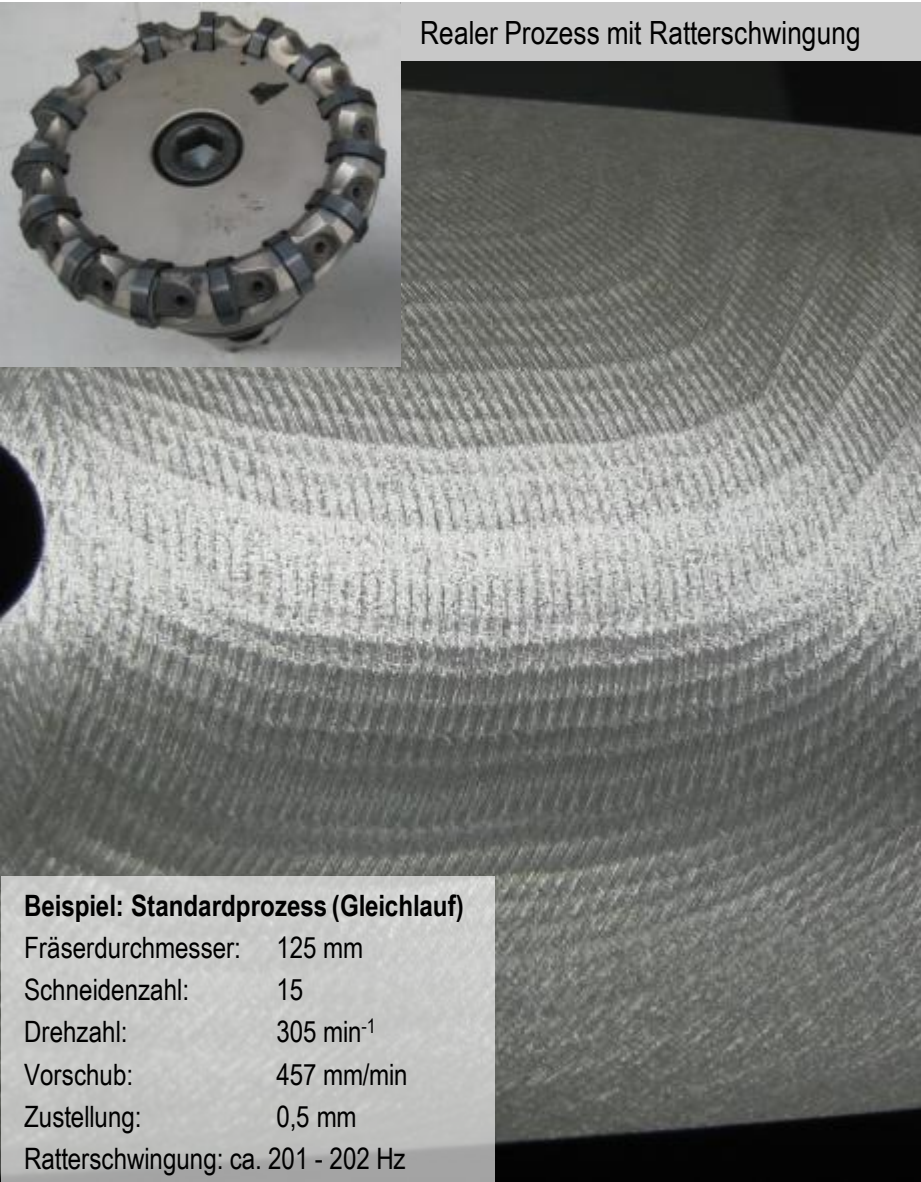
- Die statischen Steifigkeiten relativ zwischen Werkzeug und Werkstück bilden die Verbindung zwischen Kraft und resultierender Verlagerung.
- Der statische Anteil der Prozesskräfte führt zu einer statischen Verlagerung des Werkzeugs in X- Y- und Z-Richtung.
- Verkippen sind über Achsdrehpunkte möglich.





- Problemstellungen komplexer Fräsprozesse
- Mathematische Abbildung von Geometrie und Prozesskinematik
- Berücksichtigung von Prozesskräften und Nachgiebigkeiten
- Praktische Anwendungen der Zerspansimulation
- Ausblick auf Weiterentwicklungen

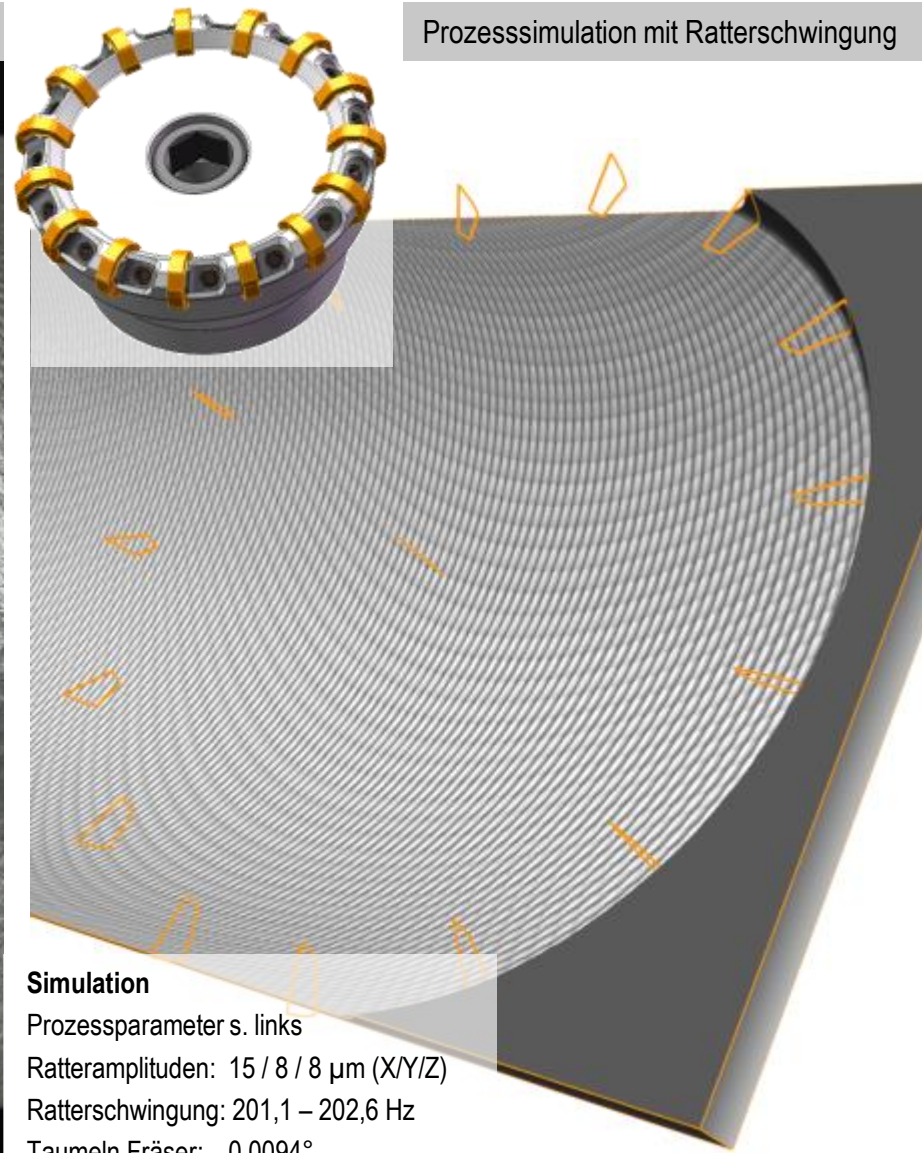
Realer Prozess mit Ratterschwingung



Beispiel: Standardprozess (Gleichlauf)

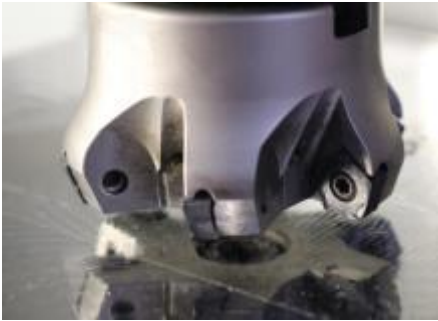
Fräserdurchmesser: 125 mm
 Schneidenzahl: 15
 Drehzahl: 305 min⁻¹
 Vorschub: 457 mm/min
 Zustellung: 0,5 mm
 Ratterschwingung: ca. 201 - 202 Hz

Prozesssimulation mit Ratterschwingung



Simulation

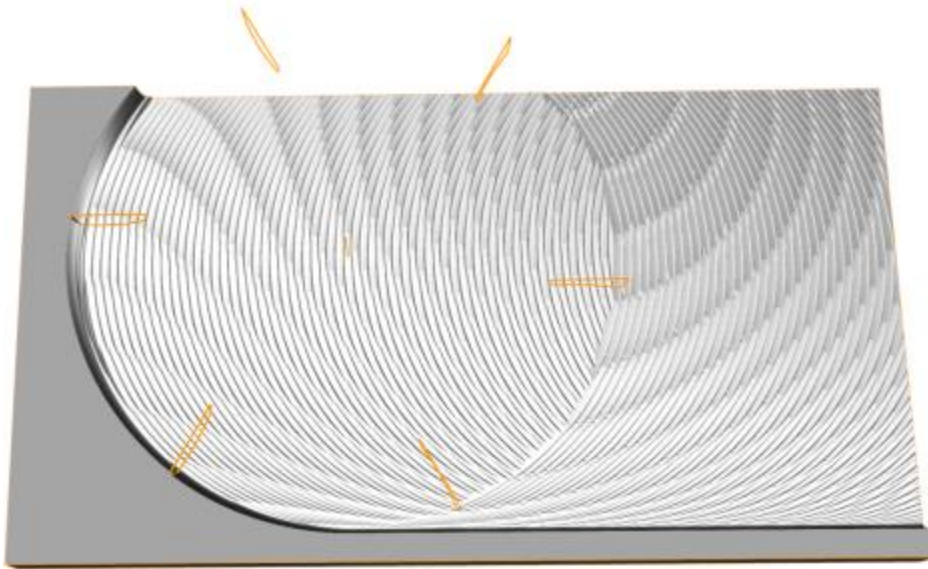
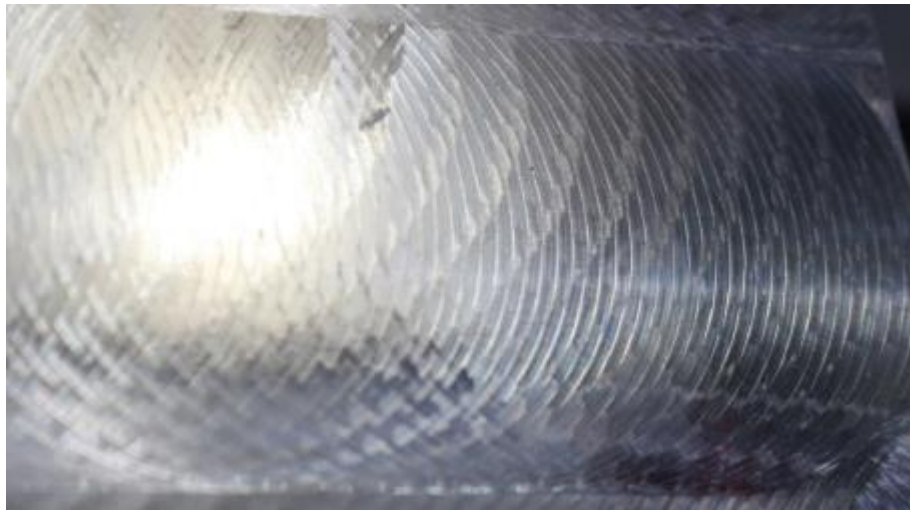
Prozessparameter s. links
 Ratteramplituden: 15 / 8 / 8 μm (X/Y/Z)
 Ratterschwingung: 201,1 – 202,6 Hz
 Taumeln Fräser: 0,0094°



Realer Prozess mit Ratterschwingung



Prozesssimulation mit Ratterschwingung

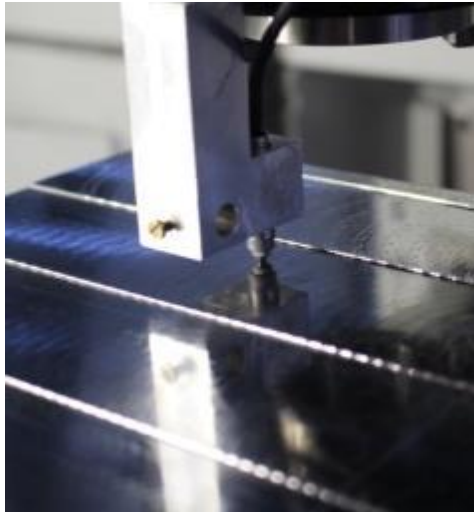


Beispiel: Ratterschwingung mit starkem Axialanteil

Fräserdurchmesser: 63 mm
 Schneidenzahl: 6
 Drehzahl: 1250 min⁻¹
 Vorschub: 1500 mm/min
 Zustellung: 3,5 mm
 Ratterschwingung: ca. 101 - 102 Hz

Simulation

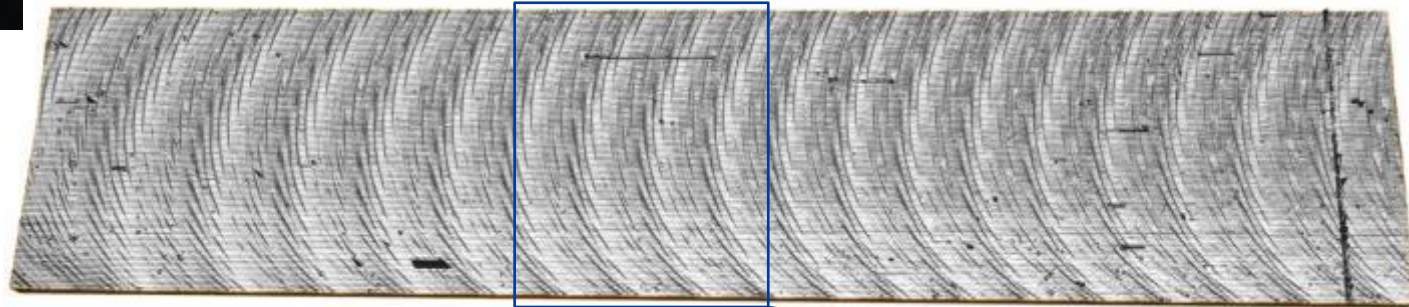
Prozessparameter s. links
 Ratteramplituden: 8 / 50 / 100 µm (X/Y/Z)
 Ratterschwingung: 101 – 102 Hz



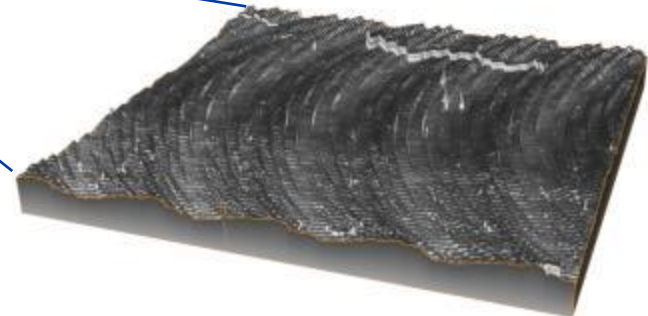
Störende Reflexionen auf dem Foto der Oberfläche

Scannen der Oberfläche:

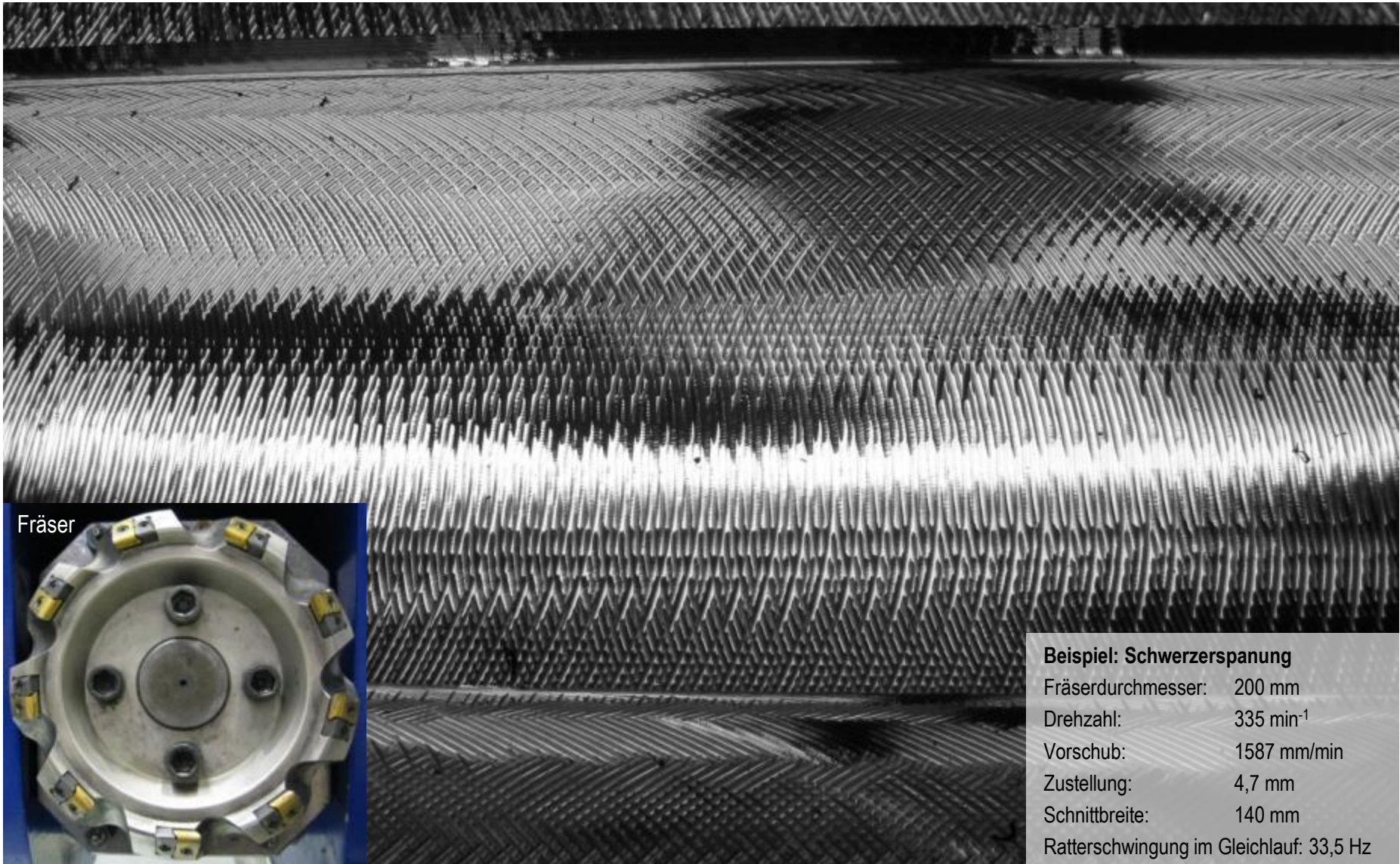
- Abtastung der gefrästen Oberfläche mit einem Messtaster
- Interpolation der Tastschnitte zur Oberfläche
- Keine störenden Reflexionen
- Oberflächenmuster lässt sich archivieren



Direkt auf der Maschine gescannte Oberfläche lässt sich vergrößert aus allen Raumrichtungen betrachten und quantitativ auswerten.



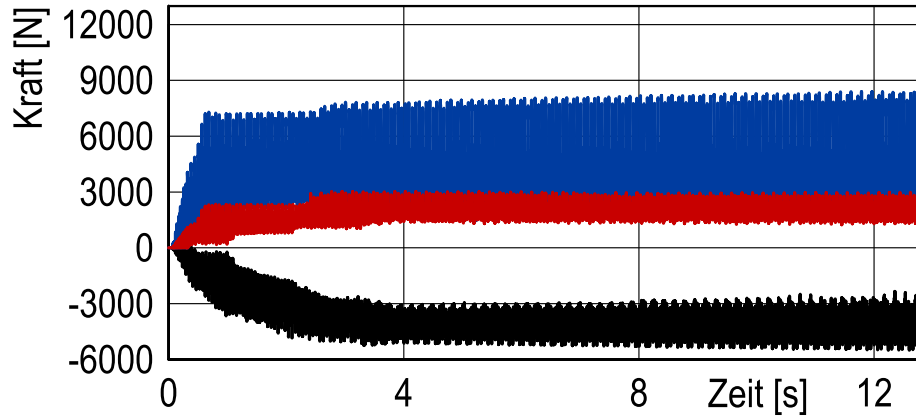
Anmerkung: Die Oberflächenabweichungen müssen deutlich größer sein, als die Bahnabweichungen der Maschine während des Scannens



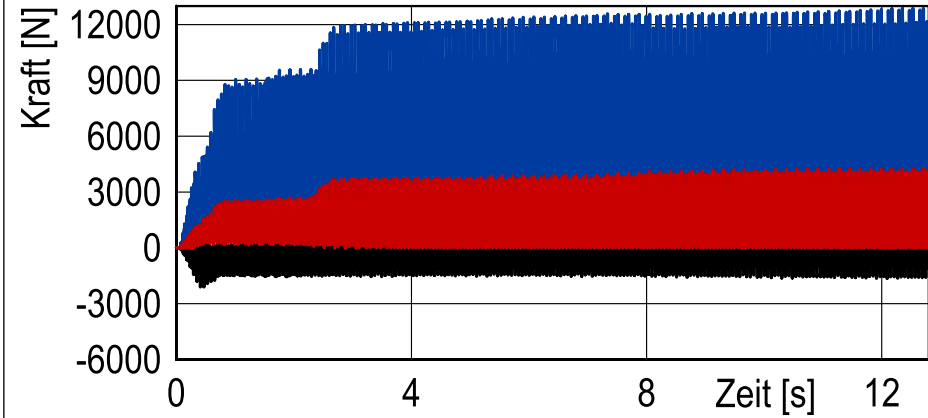
Fräser

Beispiel: Schwerzerspannung	
Fräserdurchmesser:	200 mm
Drehzahl:	335 min ⁻¹
Vorschub:	1587 mm/min
Zustellung:	4,7 mm
Schnittbreite:	140 mm
Ratterschwingung im Gleichlauf:	33,5 Hz

Simulation im Gegenlauf



Simulation im Gleichlauf



Parameter der Simulationen

s. vorherige Seite

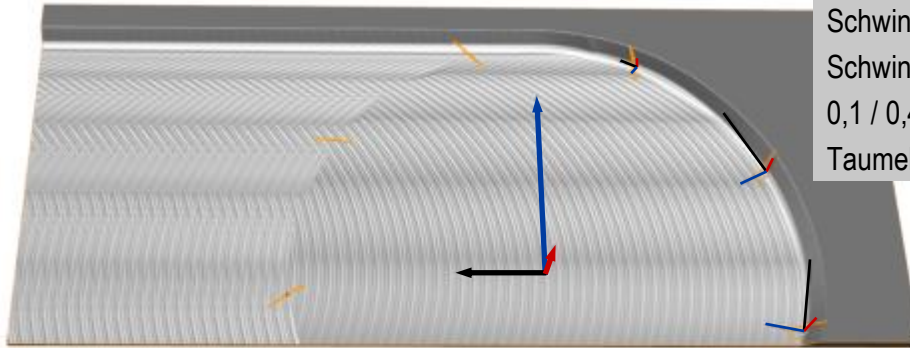
Schwingungsfrequenz: 33,5 Hz

Schwingungsamplituden:

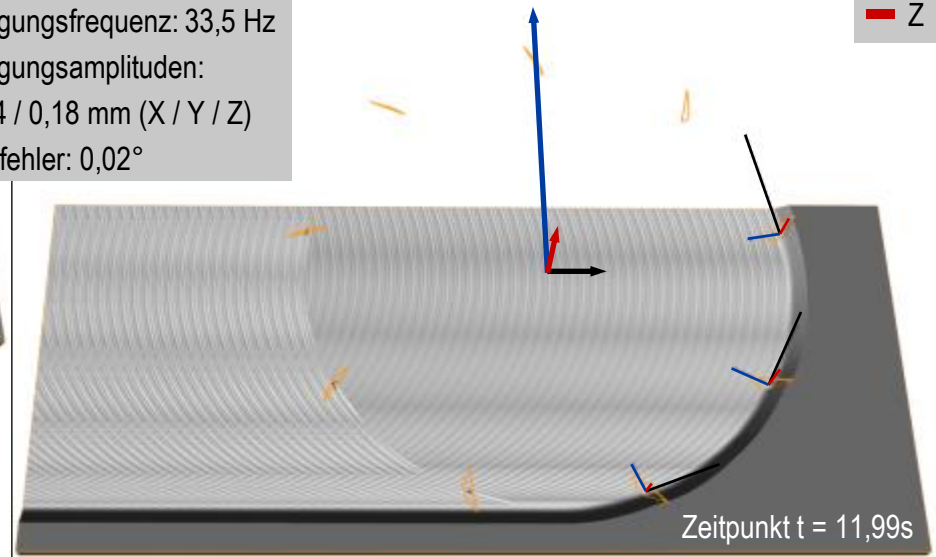
0,1 / 0,4 / 0,18 mm (X / Y / Z)

Taumelfehler: 0,02°

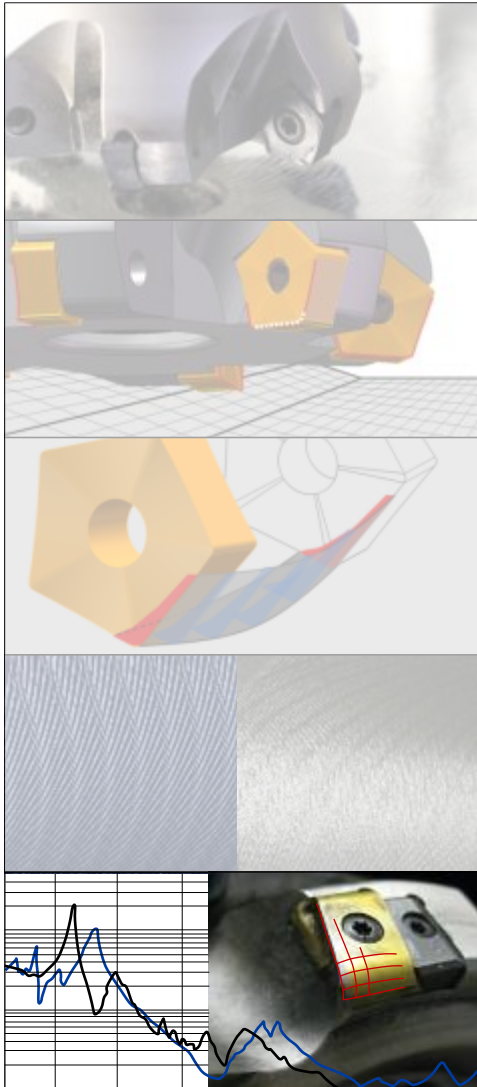
- X
- Y
- Z



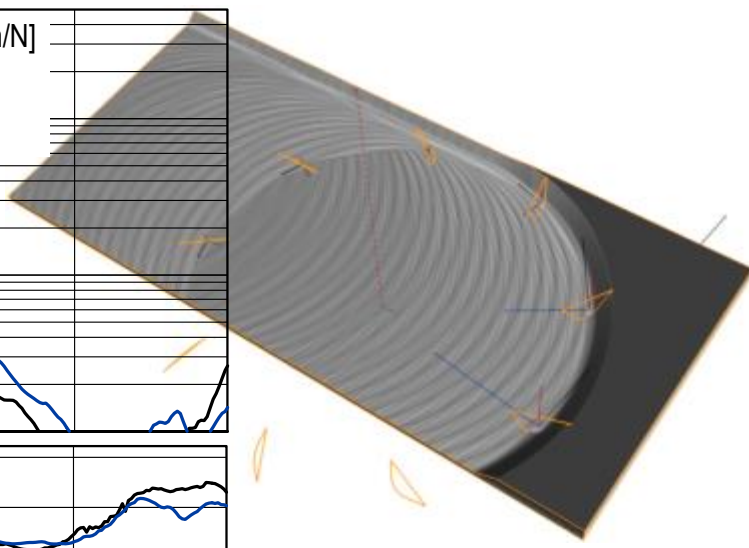
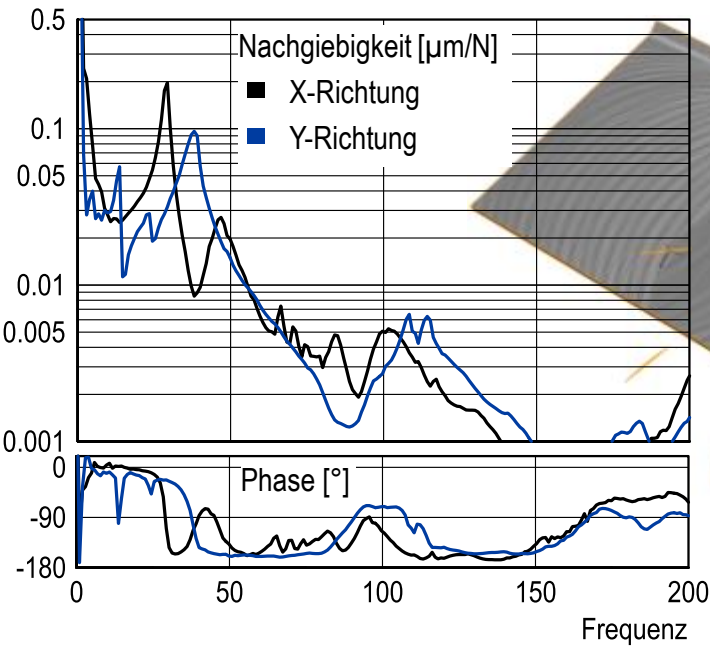
Zeitpunkt t = 12,02s



Zeitpunkt t = 11,99s



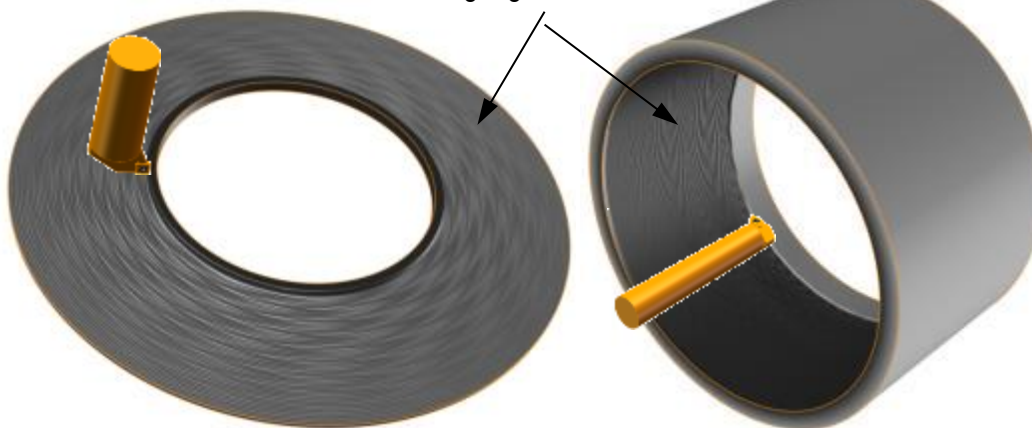
- Problemstellungen komplexer Fräsprozesse
- Mathematische Abbildung von Geometrie und Prozesskinematik
- Berücksichtigung von Prozesskräften und Nachgiebigkeiten
- Praktische Anwendungen der Zerspansimulation
- Ausblick auf Weiterentwicklungen



Berücksichtigung der Dynamik:

- Mess- oder berechenbare Nachgiebigkeitsfrequenzgänge beinhalten das statische und dynamische Steifigkeitsverhalten.
- Für die Verwendung in Prozesssimulation werden die Frequenzgänge mathematisch approximiert und z.B. als modale Parameter berücksichtigt.

Schwingungsmuster

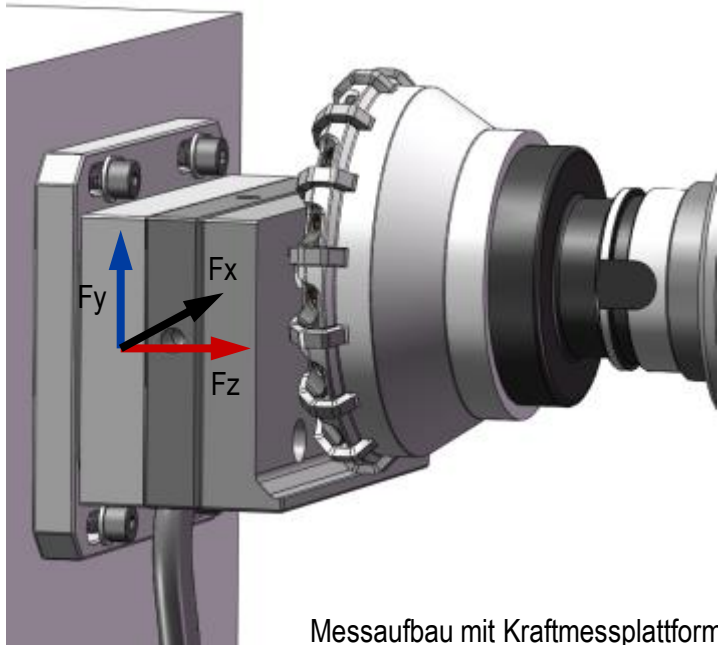


Zerspansimulation Plandrehen

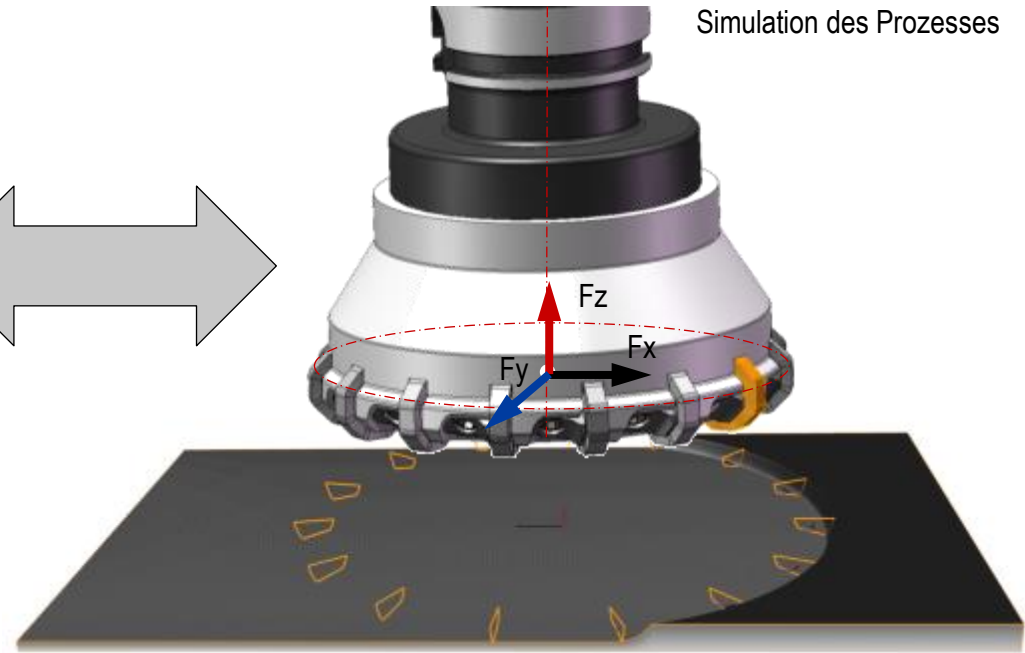
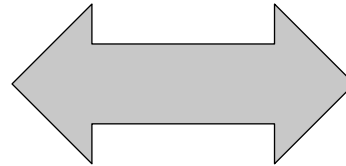
Zerspansimulation Innenrunddrehen

Adaption auf weiter Prozesse:

- Die Berechnungsgeschwindigkeit wird durch die Anpassung auf einen definierten Prozess erreicht.
- Die Adaption auf beliebige Zerspansprozesse ist jedoch möglich.



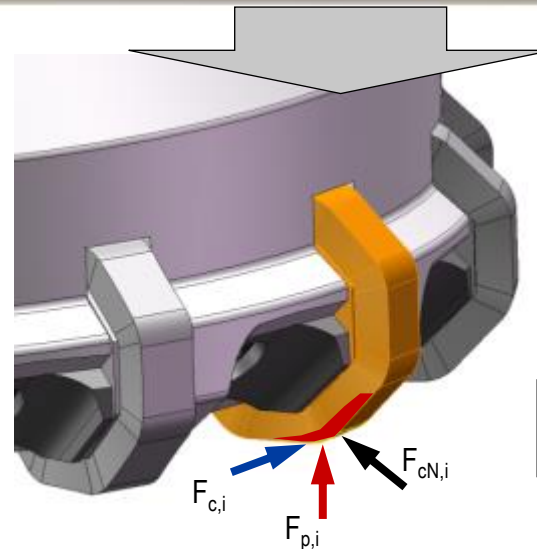
Messaufbau mit Kraftmessplattform



Simulation des Prozesses

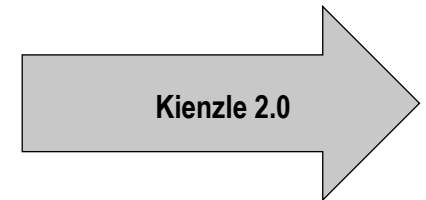
Mögliche Vorgehensweise:

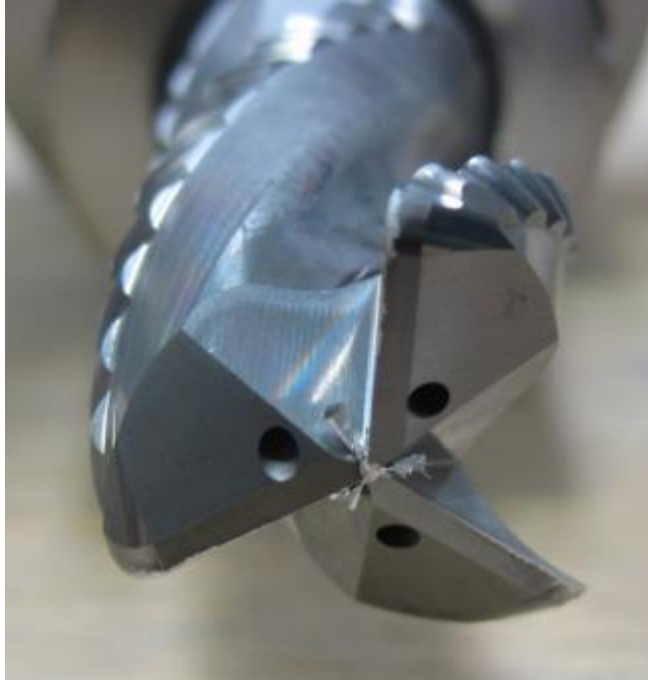
- Messung resultierender Zerspankräfte im realen Prozess (Kraftmessplattform)
- Zerspansimulation und Abgleich der berechneten mit den gemessenen resultierenden Prozesskräften
- Rückrechnung auf die Kräfte an den Einzelschneiden und Ermittlung der Koeffizienten / Exponenten des Kraftmodells



Rechnerischer Rückschluss auf das Einzelkraftniveau und den zugehörigen Spanquerschnitt

Ermittlung der Parameter des Kraftmodells





Hinweis:

Arbeitskreis „Zerspansimulation“

Kick-off Meeting im November 2014

Nähere Informationen unter: www.planlauf.com