

---

# 12. VEMAS-ANWENDERWORKSHOP

"EFFIZIENTE 3-/5-ACHS-BEARBEITUNG FÜR DEN WERKZEUG- UND FORMENBAU"

**Bearbeitungsstrategien und Potenziale einer 5-Achs-Simultan-Bearbeitung**

Carsten Hochmuth, Claudius Rienäcker, Lengefeld/ Erzg., 08. Oktober 2013

---



**Fraunhofer**

**IWU**

# Bearbeitungsstrategien und Potenziale einer 5-Achs-Simultan-Bearbeitung

## Gliederung

- Bearbeitungsaufgaben
  - Differenzierung Formen- und Werkzeugbau
  - Zuordnung der Fertigungsverfahren
- Herausforderungen im Werkzeugbau
- Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung
  - Ausgangssituation
  - Standwegoptimierte Schnittparameter
  - 5-achsige Simultanbearbeitung
- Fazit

# Bearbeitungsaufgaben

## Differenzierung

### Formenbau

- Teilespektrum:**
- Spritz- und Druckgussformen
  - Schmiedegesenke
- Topologie:**
- tiefe Kavitäten
  - große Höhendifferenzen
  - kleine Innenradien
- 5-Achs-Strategie:**
- **kontinuierliche Anstellung des Werkzeuges zur Kollisionsvermeidung**
- Zielstellung:**
- Substitution bzw. Reduzierung des Verfahrens „Senkerodieren“



Druckgusswerkzeug  
Quelle: BMW Group



Spritzgusswerkzeug  
Quelle: Kunststoffreport

### Werkzeugbau

- Umform- und Folgewerkzeuge
  - Stanzwerkzeuge
  - schwach gekrümmte flächige Formen
  - geringe Höhenunterschiede
- Stirnfräsen mit Anstellung normal zur Fläche**
- Substitution von Kugelfräsern durch Torusfräser



Presse mit Werkzeug zur Herstellung von PKW-B-Säulen

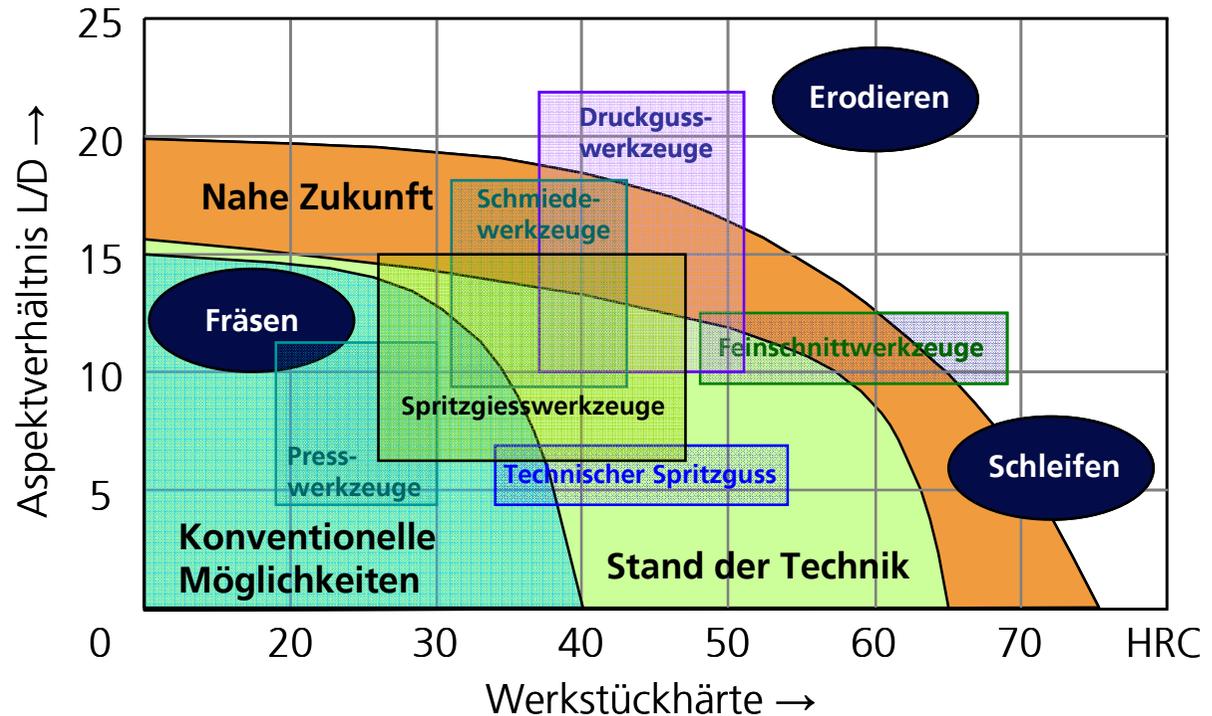
Aufsatz Ziehstempel  
Seitenwandrahmen  
Quelle: LBBZ GmbH



# Bearbeitungsaufgaben

## Zuordnung der Fertigungsverfahren

- Mechanische Bearbeitung vorwiegend mit geometrisch bestimmter Schneide
- Hauptverfahren:  
Werkzeugbau: **Fräsen, Bohren**  
Formenbau: **Fräsen, Bohren, Erodieren**
- Steigende Werkstoffhärten und L/D-Verhältnisse
- Steigende Qualitätsanforderungen (Form, Lage, Oberflächengüte)



➔ **Verschiebung der Verfahrensgrenzen und Entwicklung von CAD/CAM-Bearbeitungsstrategien notwendig!**

# Bearbeitungsstrategien und Potenziale einer 5-Achs-Simultan-Bearbeitung

## Gliederung

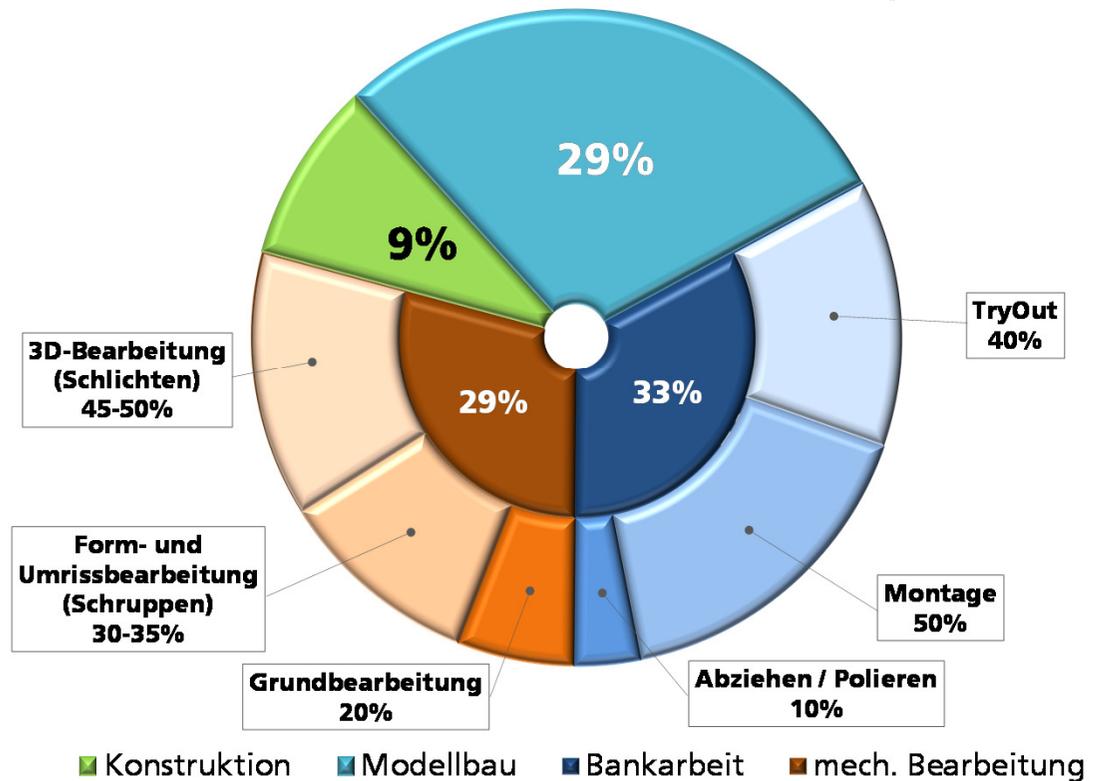
- Bearbeitungsaufgaben
  - Differenzierung Formen- und Werkzeugbau
  - Zuordnung der Fertigungsverfahren
- Herausforderungen im Werkzeugbau
- Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung
  - Ausgangssituation
  - Standwegoptimierte Schnittparameter
  - 5-achsige Simultanbearbeitung
- Fazit

# Herausforderungen im Werkzeugbau

## Herausforderung: Kosten

- mechanische Fertigung bestimmt die Werkzeugkosten mit ca. **30%**

Daten:  
Referenzwerkzeugbau  
„Innovationsallianz“



# Herausforderungen im Werkzeugbau

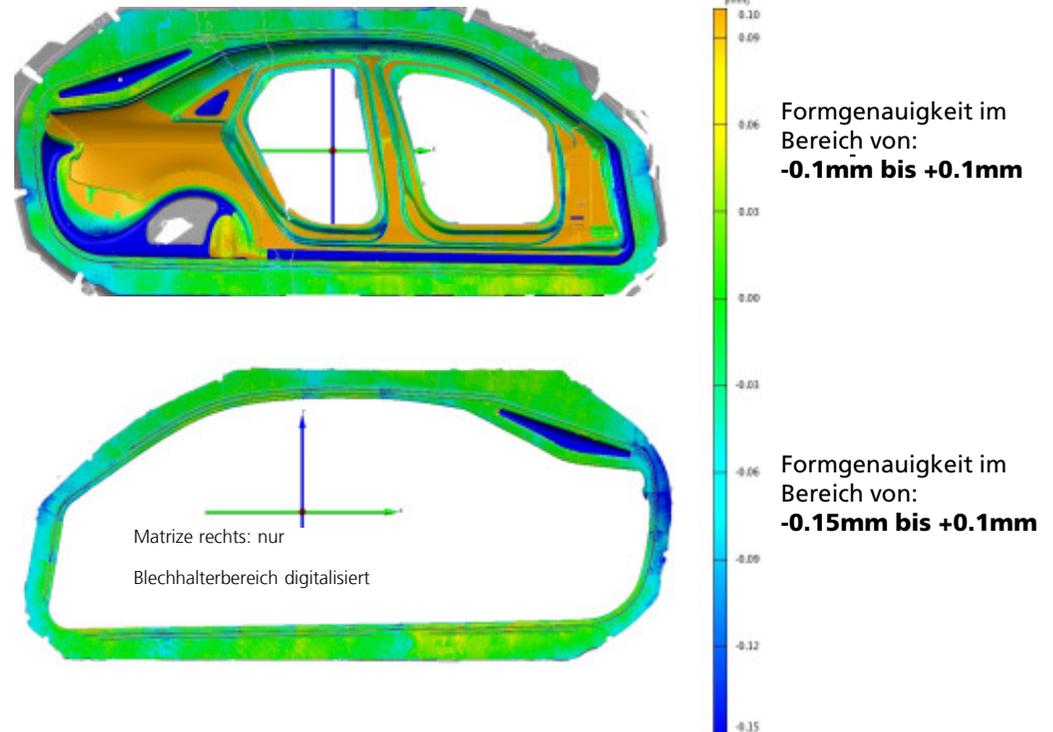
## Herausforderung: Genauigkeit

- Signifikante Abweichungen der Istkontur von der Sollkontur  
⇒  $\Delta \approx \pm 150 \mu\text{m}$   
→ **hoher Aufwand für Nacharbeit**
- Kostenanteil der Hand- und Nacharbeit inkl. TryOut  $\geq 30\%$

## Herausforderung: Zeit

- Mechanische Bearbeitung beeinflusst die **Durchlaufzeit zu 35%**

- **Erhöhung der Genauigkeit**
- **Minimierung der Maschinenbelegungszeit**



# Bearbeitungsstrategien und Potenziale einer 5-Achs-Simultan-Bearbeitung

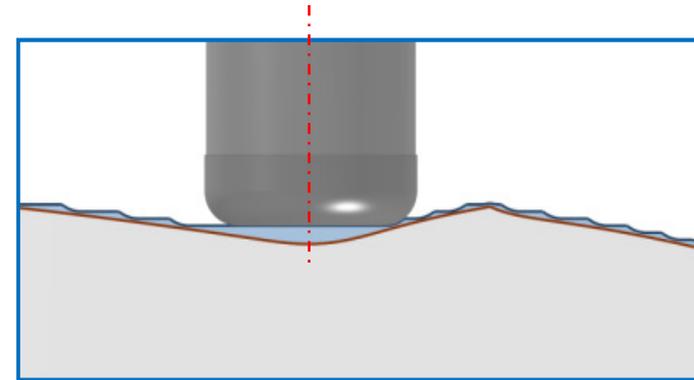
## Gliederung

- Bearbeitungsaufgaben
  - Differenzierung Formen- und Werkzeugbau
  - Zuordnung der Fertigungsverfahren
- Herausforderungen im Werkzeugbau
- Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung
  - Ausgangssituation
  - Standwegoptimierte Schnittparameter
  - 5-achsige Simultanbearbeitung
- Fazit

# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

## Ausgangssituation

- Bearbeitungsoperationen
  - Vorschlichten:
    - Bearbeitung der gestuften Oberfläche
    - Annäherung an Endkontur
  - Schlichten
    - Erzeugung der Endkontur
    - Minimierung des Nacharbeitsaufwandes
- Bearbeitung mit vorwiegend 3- bzw. 3+2-achsige Bearbeitungsstrategien durch Kugel- oder Torusfräser
- geringer Bahnabstand (0,4 – 0,5 mm)
  - hohe Bearbeitungszeiten
- verbleibendes Restmaterial in Hohlkehlen erfordert zusätzlichen Bearbeitungsaufwand



Restmaterial in einer Hohlkehle bei 3-achsiger Bearbeitung

- **Anwendung von standwegoptimierten Schnittparametern**
- **Anwendung von 5-achsig simultanen Bearbeitungsstrategien**

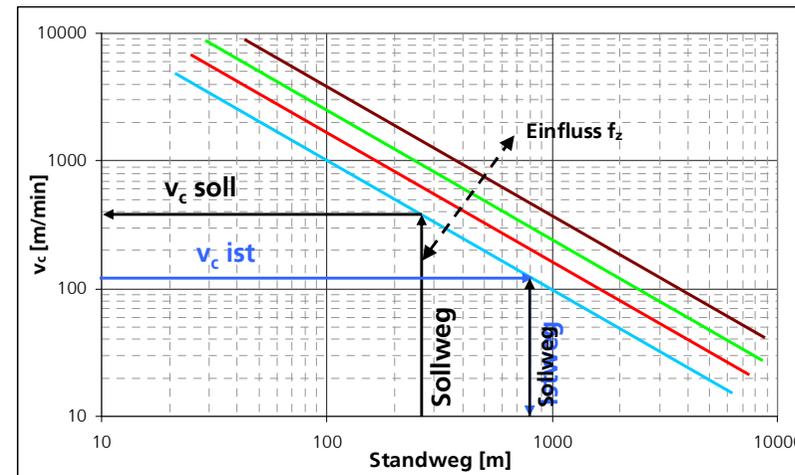
# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

## Standwegoptimierte Schnittparameter

### Ausgangssituation:

- Die Auswahl von Schnittparametern ( $v_c$ ,  $f_z$ ) beruhen auf den Erfahrung des Anwenders
- Zerspanung **unterhalb des technologischen und technischen Grenzbereiches** von eingesetzter Maschine und Zerspanungswerkzeug
- Zeitanteile sind durch Prozessparameter beeinflussbar

➔ **Ermittlung und Anwendung standwegoptimierter Technologieparameter**

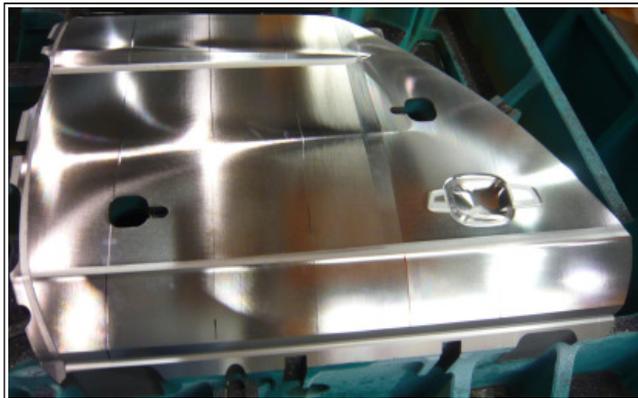


# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

## Standwegoptimierte Schnittparameter

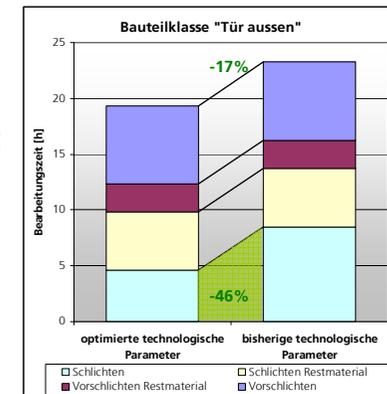


- Ergebnisse Bauteilkategorie "Türblech außen"
  - **Erhöhung** der **Schnittgeschwindigkeit** für den Arbeitsgang Schlichten um **bis zu 66%**
  - Werkstoffabhängige Anpassung des Zahnvorschubes
  - Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit EN-JS1070 **um 113%**  
EN-JL1040 **um 220%**



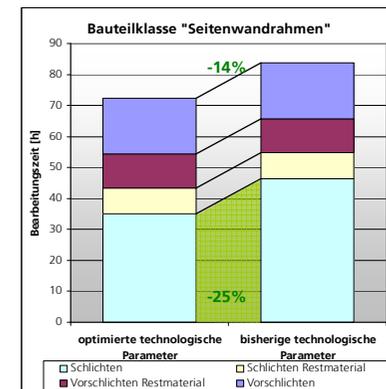
### Reduzierung der Bearbeitungszeit: Bauteilkategorie "Tür außen"

- Arbeitsstufe Schlichten (SF25R5):
  - **Zeit: -46%**
- Operation 3D-Bearbeitung
  - **Zeit: -17%**
- Reduzierung **Energieverbrauch**
  - **ca. 15-20%**



### Reduzierung der Bearbeitungszeit: Bauteilkategorie "Seitenwandrahmen"

- Arbeitsstufe Schlichten (SF25R5):
  - **Zeit: -25%**
- Operation 3D-Bearbeitung:
  - **Zeit: -14%**
- Reduzierung **Energieverbrauch**:
  - **ca. 10 - 15%**

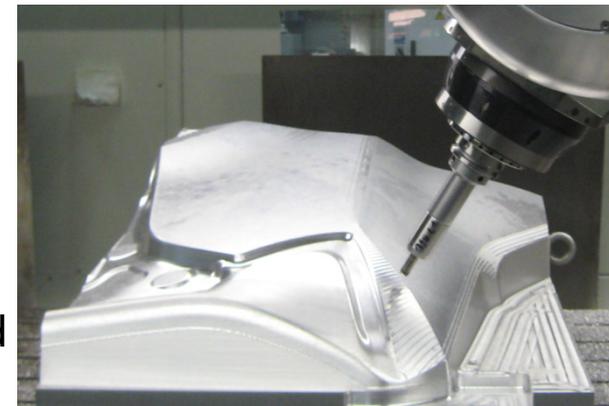
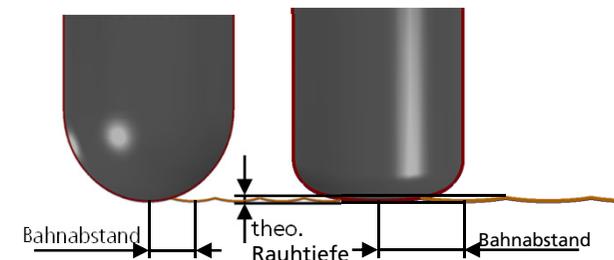


# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

## 5-achsige Simultanbearbeitung im Werkzeugbau

### Ausgangssituation

- Bearbeitung von Umformwerkzeugen erfolgt in der Regel 3- bzw. 3+2-achsig durch Kugel- oder Torusfräser mit geringem Bahnabstand
- 5-achsige Simultanbearbeitung erlaubt größeren Bahnabstand
- **Komplexe Programmierung** und Parametervorgaben für 5-Achs-Programmierung, die die Bauteilqualität und Bearbeitungszeit beeinflussen
  - vorhandene Zeitpotenziale durch größeren möglichen Bahnabstand bleiben ungenutzt
- Erzeugung paralleler Werkzeugwege mit einem gleichmäßigen Bahnabstand
- Keine Unterstützung bei Auswahl der Werkzeuge und technologischer Parameter



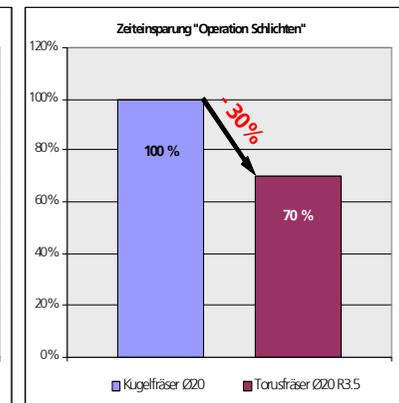
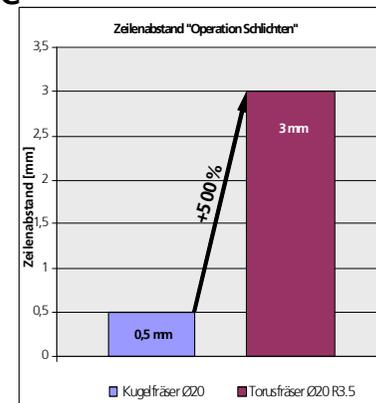
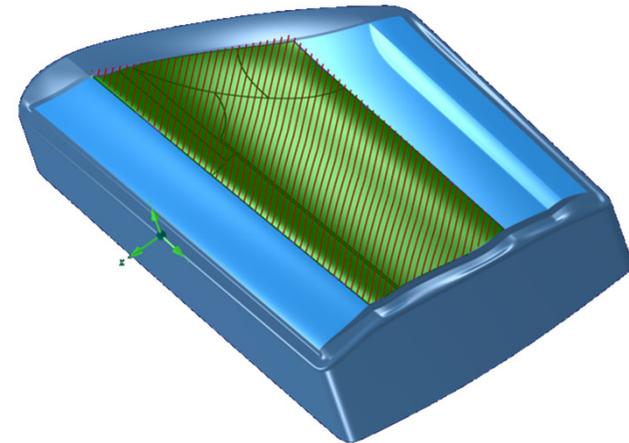
➔ **Verbesserte Strategien für die 5-Achs-Bearbeitung und -Programmierung notwendig**

# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

## 5-achsige Simultanbearbeitung im Werkzeugbau

### Stand der Technik

- Wälz- und Stirnfräsen sind Basisstrategien
- Bearbeitungsrichtung entlang von ISO-Parametern einer Fläche/Steuerfläche oder Maschinenachse
- Adaption konventioneller 3-achsiger Strategien
  - "Abzeilen" der Oberfläche mit Werkzeuganstellung normal zur Oberfläche
  - $a_e$  konventionell = 0,5 mm
  - $a_e$  5-Achs-Simultan = 3,0 mm
  - ➔ **Erhöhung Zeilenabstand um 500%**
  - ➔ **Reduzierung der Bearbeitungszeit um 30%**



# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

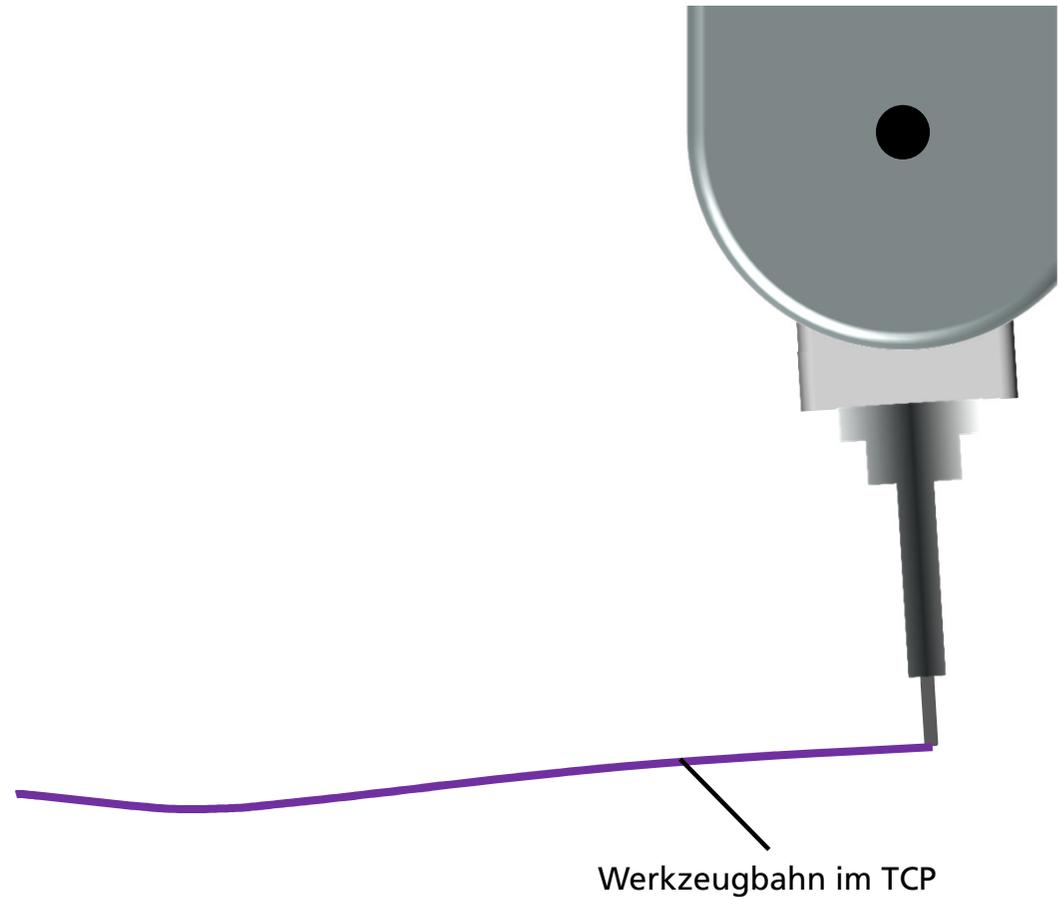
## 5-achsige Simultanbearbeitung im Werkzeugbau

### Problemstellung

- Erhöhung  $a_e$  um 500%
  - ➔ Reduzierung der Bahnlänge um ca. 85%
  - ➔ Reduzierung der Bearbeitungszeit um 30%?



**Unzureichende  
Berücksichtigung der  
Maschinenkinematik**



# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

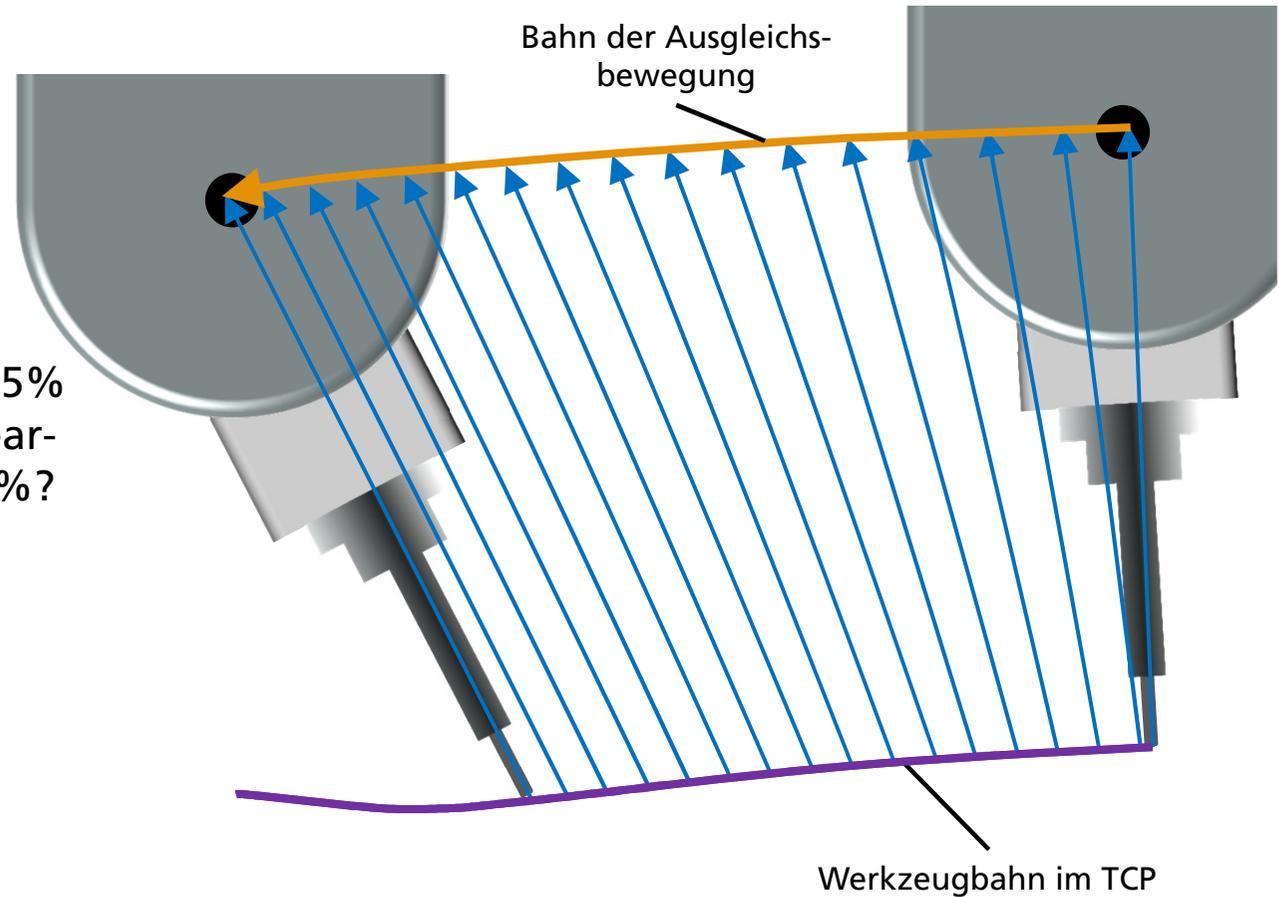
## 5-achsige Simultanbearbeitung im Werkzeugbau

### Problemstellung

- Erhöhung  $a_e$  um 500%
  - ➔ Reduzierung der Bahnlänge um ca. 85%
  - ➔ Reduzierung der Bearbeitungszeit um 30%?



**Unzureichende Berücksichtigung der Maschinenkinematik**



# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

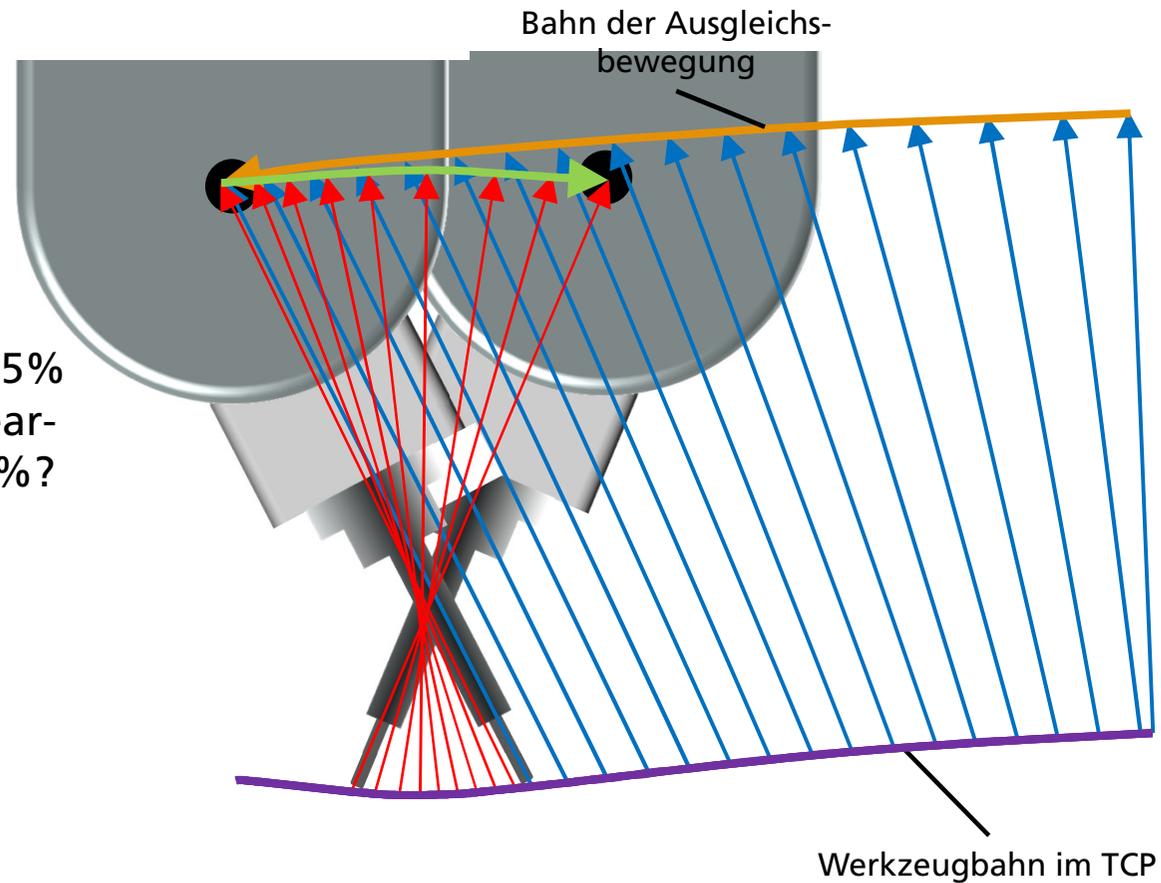
## 5-achsige Simultanbearbeitung im Werkzeugbau

### Problemstellung

- Erhöhung  $a_e$  um 500%
  - ➔ Reduzierung der Bahnlänge um ca. 85%
  - ➔ Reduzierung der Bearbeitungszeit um 30%?



**Unzureichende Berücksichtigung der Maschinenkinematik**



# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

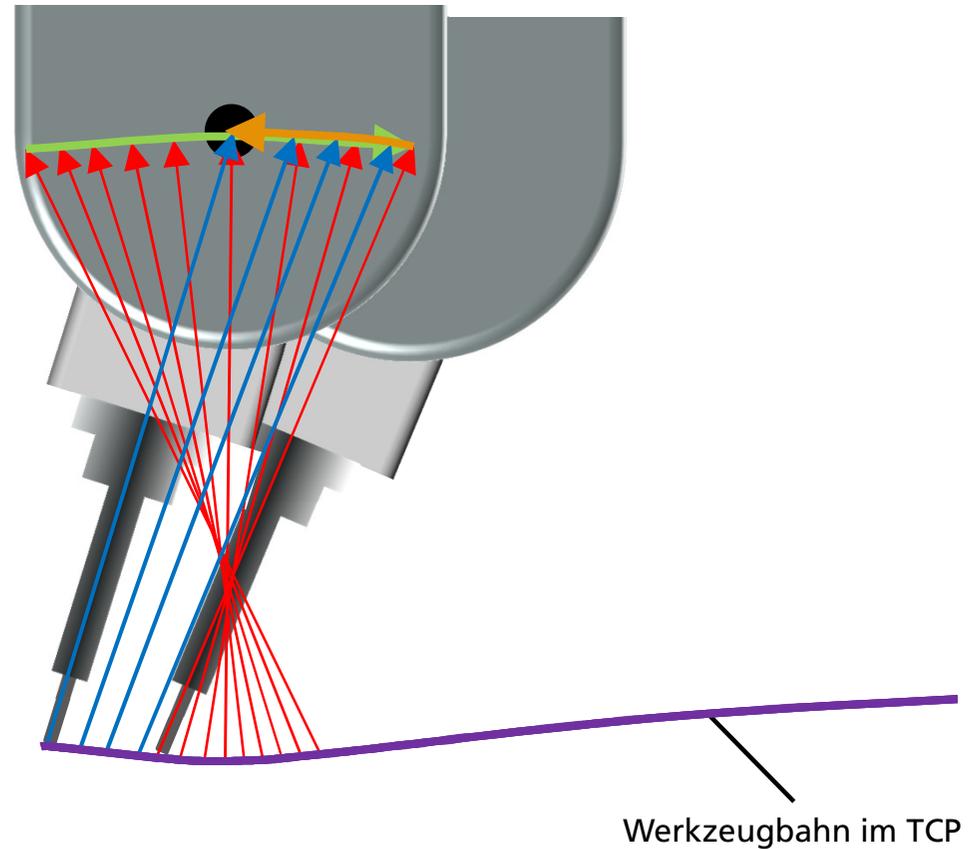
## 5-achsige Simultanbearbeitung im Werkzeugbau

### Problemstellung

- Erhöhung  $a_e$  um 500%
  - ➔ Reduzierung der Bahnlänge um ca. 85%
  - ➔ Reduzierung der Bearbeitungszeit um 30%?



**Unzureichende Berücksichtigung der Maschinenkinematik**



# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

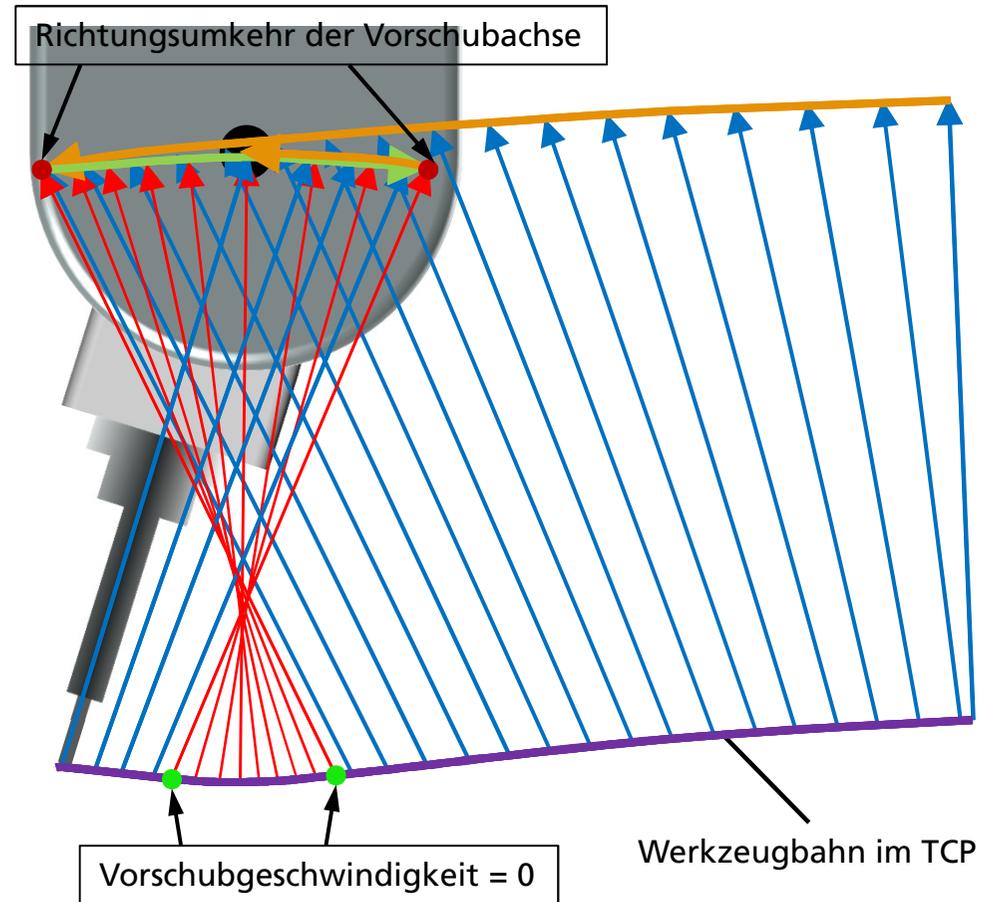
## 5-achsige Simultanbearbeitung im Werkzeugbau

### Problemstellung

- Erhöhung  $a_e$  um 500%
  - ➔ Reduzierung der Bahnlänge um ca. 85%
  - ➔ Reduzierung der Bearbeitungszeit um 30%?



**Unzureichende Berücksichtigung der Maschinenkinematik**



➔ **Betrachtung von Bauteil – Strategie – Maschine als Gesamtheit**

# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

## Entwicklung neuer 5-achsig simultaner Strategien



### Ansatz

- Die optimale Ansmiegung eines Torusfräasers, d. h. der maximal mögliche Bahnabstand kann erreicht werden, wenn die Fräsrichtung der Richtung der maximalen Krümmung (Hauptkrümmung) entspricht.

(lt. Jensen et. Al.: *Tool selection for five-axis curvature matched machining. Computer-Aided Design 2002; 34:251–66*).



# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

## Entwicklung neuer 5-achsig simultaner Strategien

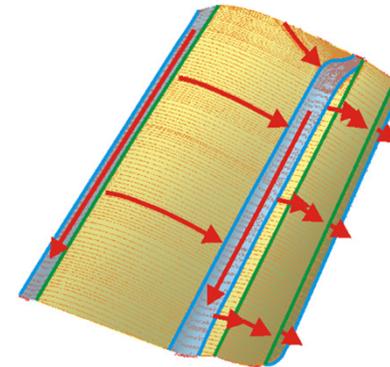
### Ansatz

- Die optimale Anשמiegung eines Torusfräasers, d. h. der maximal mögliche Bahnabstand kann erreicht werden, wenn die Fräsrichtung der Richtung der maximalen Krümmung (Hauptkrümmung) entspricht.

(lt. Jensen et. Al.: *Tool selection for five-axis curvature matched machining. Computer-Aided Design 2002; 34:251–66*).



- Entwicklung neuer Methoden
  - Aufteilung der Geometrie in konvexe / konkave Bearbeitungsbereiche
  - Festlegung der Fräsrichtung auf Basis der Hauptkrümmungsrichtungen
  - Automatisierte Vorschläge für das optimale Fräswerkzeug im CAD/CAM-System TEBIS



# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

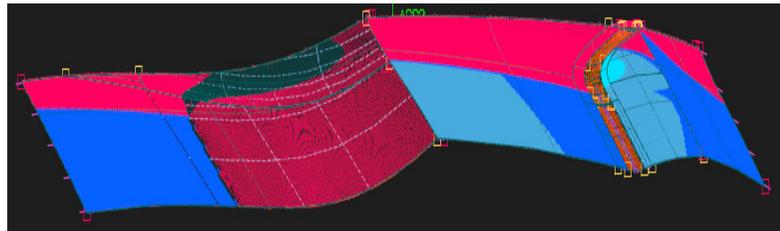
Entwicklung neuer 5-achsig simultaner Strategien

Software-Prototyp „Hauptkrümmungsbasiertes Fräsen“



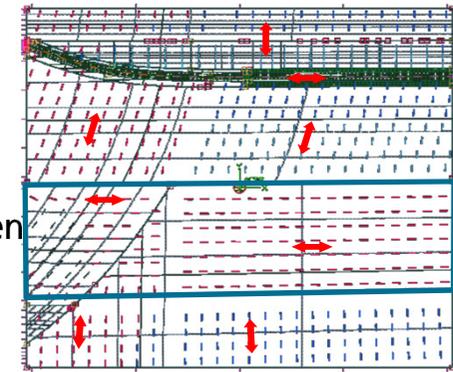
## Visualisierung der Inflexionen

- Blau = konvexe Bereiche
- Rot = konkave Bereiche
- Schwarz = Nabelbereiche (gleiche Krümmungen)



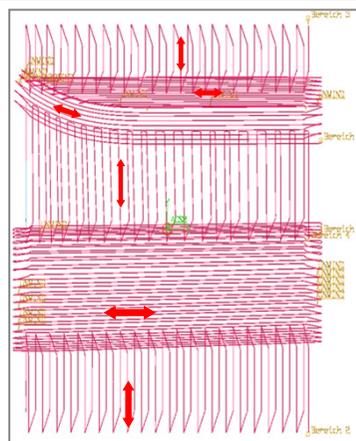
## Darstellung der Krümmungsverläufe

- Abbildung der Hauptkrümmungsrichtungen



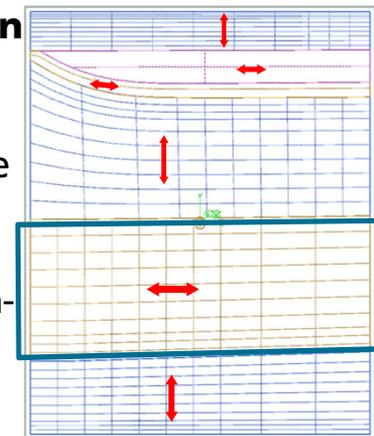
## Fräsbahnberechnung

- Berechnung der Werkzeugwege auf Basis der Steuerflächen
- Realisierung einer optimalen Anschmiegung der Werkzeuge



## Erzeugung Steuerflächen

- Zusammenfassung von Einzelflächen auf Basis der Krümmungsanalyse zur Beschreibung der
  - Fräsbereiche
  - Fräsrichtungen repräsentiert durch die ISO-Parameter



# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

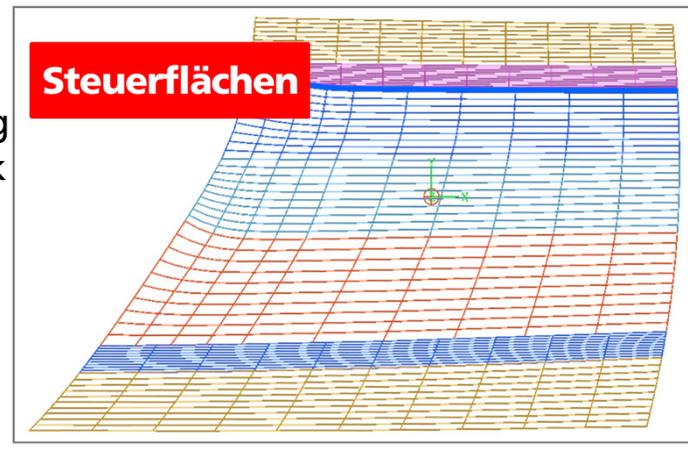
Entwicklung neuer 5-achsig simultaner Strategien

Software-Prototyp „Hauptkrümmungsbasiertes Fräsen“



## Technologieoptimierung für das Gesamtbauteil

- Berechnung der theoretischen Fräszeit anhand der Steuerflächen, die den Fräsbereich und die Fräsrichtung definieren sowie Werkzeugen aus Werkzeugdatenbank
- Berücksichtigung von:
  - Werkzeuggeometrie
  - Technologischen Parametern
  - Bauteilkrümmung
  - geforderte Oberflächenqualität
  - Restriktionen für minimalen und maximalen Voreilwinkel



## Werkzeugempfehlung

- Erzeugung einer Liste mit Werkzeugvorschlägen auf der Basis einer ausgewählten Gruppe von Werkzeugen in der Werkzeugdatenbank

Fläche	Wtz. 01	Wtz. 02	Wtz. 03	Wtz. 04	Wtz. 05	Wtz. 06	Wtz. 07
1	552 qcn	( 1,0nis)	1,1nis	1,9nis	---	---	---
2	258 qcn	( 0,5nis)	0,6nis	0,9nis	---	---	---
3	72 qcn	-X-	-X-	-X-	( 1,3nis)	-X-	1,8nis 1,8nis
4	1 qcn	-X-	-X-	( 0,8nis)	0,8nis	-X-	0,8nis 0,8nis
5	908 qcn	4,3nis	( 4,8nis)	5,6nis	---	---	---
6	117 qcn	5,5nis	( 5,8nis)	6,6nis	---	---	---
7	1801 qcn	7,8nis	( 7,4nis)	10,4nis	---	---	---
8	518 qcn	( 3,3nis)	3,3nis	4,3nis	---	---	---
9	1524 qcn	6,8nis	( 6,3nis)	9,4nis	---	---	---
Gesamtzeit: 28,7nis							

---X- Werkzeug nicht verwendbar  
--- Schlechtere Bewertung

**Werkzeugliste**

```

Wtz.01 D66.000000 Schlichten_5-Achsen/T234 TF D66 R6 ET150 AL053 QL170
Wtz.02 D35.000000 Schlichten_5-Achsen/T230 TF D35 R5 ET089 AL042 QL116
Wtz.03 D25.000000 Schlichten_5-Achsen/T229 TF D25 R5 ET089 AL033 QL106
Wtz.04 D16.000000 Schlichten_5-Achsen/T224 TF D16 R1 ET068 AL070 QL150
Wtz.05 D42.000000 Schlichten_5-Achsen/T225 TF D42 R5 ET088 AL043 QL110
Wtz.06 D12.000000 Schlichten_5-Achsen/T201 TF D12 R1 ET058 AL060 QL140
Wtz.07 D10.000000 Schlichten_5-Achsen/T200 TF D10 R1 ET038 AL060 QL140
    
```

# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

Entwicklung neuer 5-achsig simultaner Strategien

Software-Prototyp „Hauptkrümmungsbasiertes Fräsen“

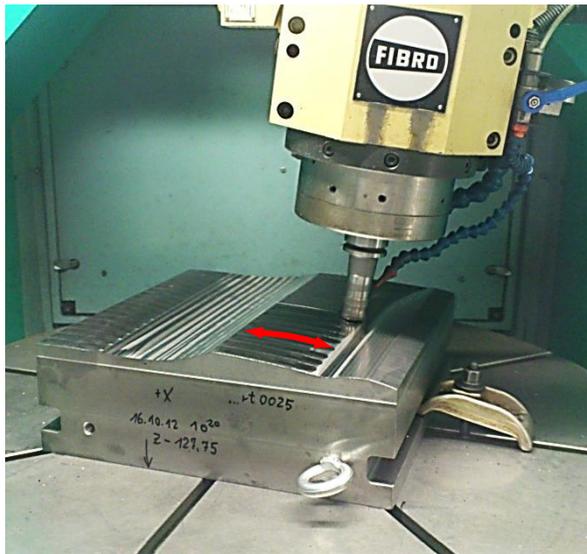


## Definition der Frässtrategie

- Festlegung der Eingriffsbreite durch Vorgabe der maximalen Rilligkeit  
→ Variable Eingriffsbreite in Abhängigkeit der Krümmung

## Konvexe Fräsbereiche

- Bearbeitung mit maximaler Eingriffsbreite und minimalen Voreilwinkel



## Konkave Fräsbereiche

- Anpassung des Voreilwinkels für bestmögliche Anschmiegung des Fräasers an lokale minimale Krümmung



# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

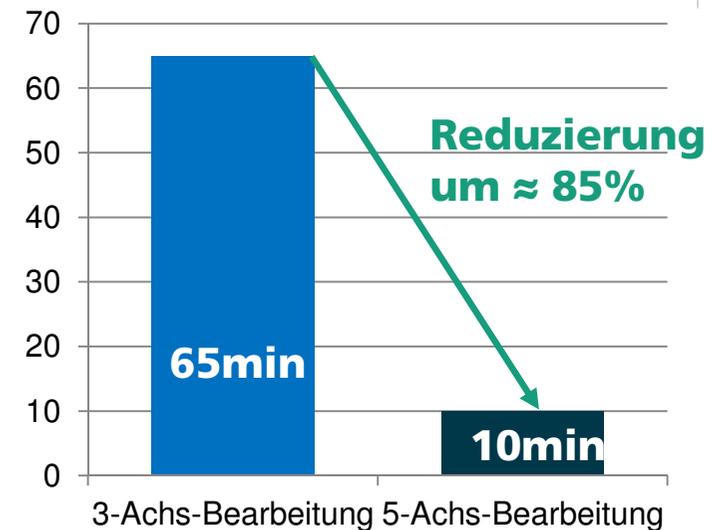
Entwicklung neuer 5-achsig simultaner Strategien  
Software-Prototyp „Hauptkrümmungsbasiertes Fräsen“



## Potentialanalyse am Demonstrator

- Bearbeitung eines Ausschnitts aus Demonstratorwerkzeug "Türblech - Außen"
- Vergleich der Bearbeitungsergebnisse zwischen 3-achsiger und 5-achsig simultaner Bearbeitung
- Bearbeitungsparameter:

	3-achsige Bearbeitung	5-achsig simultane Bearbeitung
<b>Werkzeug</b>	Torusfräser Ø25R5	Torusfräser Ø30R3,5
<b>Schnittbreite</b>	0,4mm	Variabel 6 ... 11 mm
<b>Vorschubgeschwindigkeit</b>	9600mm/min	9600mm/min



# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

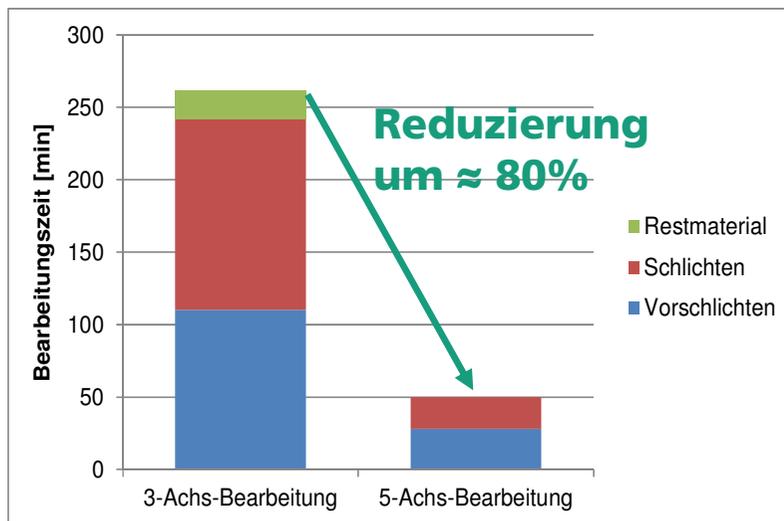
Entwicklung neuer 5-achsig simultaner Strategien

Software-Prototyp „Hauptkrümmungsbasiertes Fräsen“



## Technologietransfer auf Realbauteil

- Übertragung der Vorgehensweise auf Realbauteil Aufsatz "Türblech – aussen OP70"
- Bearbeitung der Aufsätze mit 3-achsiger (Tür rechts) und 5-achsig simultaner Frässtrategie (Tür links)
- Verwendung des gleichen Werkzeuges mit den gleichen technologischen Parametern
- Vergleich der Bearbeitungszeiten und Bewertung der Polierfähigkeit der Oberflächen



**Polierfähigkeit ist gegeben**

**Eingewöhnung auf andere Oberflächenstruktur notwendig!**

# Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung

Entwicklung neuer 5-achsig simultaner Strategien

Bearbeitungsstrategie: Verrunden von 3D-Konturen mit Formfräsern

## Problemstellung

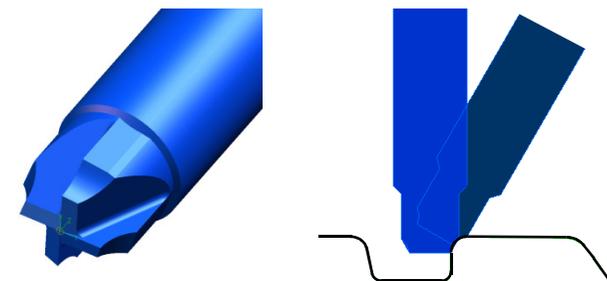
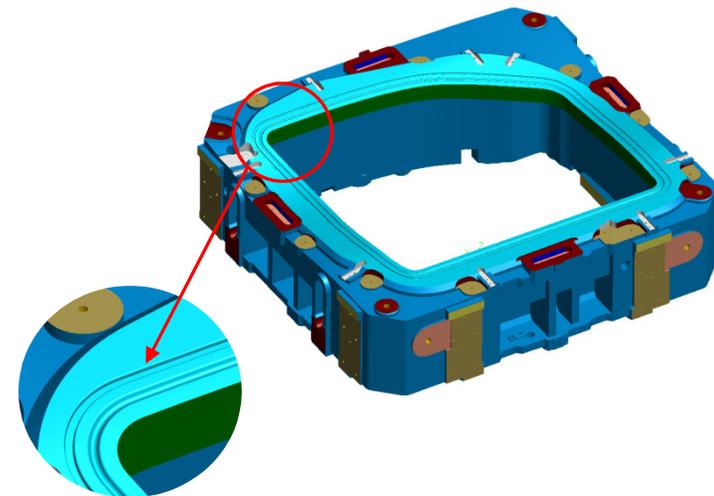
- Hoher Aufwand beim Abzeilen von Verrundungen in 3D-Formbereichen (Sperrleiste)

## Lösungsansatz

- Einsatz von „Radienfräsern“ mit Öffnungswinkel  $> 90^\circ$
- Herstellung von konvexen Radien in 2 Bearbeitungsschritten
- Führung des Werkzeuges an den sich anschließenden Flankenflächen

## Potenzial

- Senkung der Gesamtbearbeitungszeit um **ca. 25 Prozent**



# Bearbeitungsstrategien und Potenziale einer 5-Achs-Simultan-Bearbeitung

## Gliederung

- Bearbeitungsaufgaben
  - Differenzierung Formen- und Werkzeugbau
  - Zuordnung der Fertigungsverfahren
- Herausforderungen im Werkzeugbau
- Effektivitätssteigerung in der 3D-Bearbeitung
  - Ausgangssituation
  - Standwegoptimierte Schnittparameter
  - 5-achsige Simultanbearbeitung
- Fazit

# Fazit



- Standwegoptimierte Schnittparameter führen zur signifikanten Bearbeitungszeitreduzierung
- Anwendung 5-achsiger Bearbeitungsstrategien bietet große Potentiale zur Erhöhung der Effektivität
- Stetige Weiterentwicklung der CAD/CAM-Systeme notwendig
- Im Fokus muss die ganzheitliche Betrachtung CAD/CAM-CNC-Antrieb-Maschine-Werkzeug-Prozess stehen
  
- Wir helfen Ihnen gern bei der Lösung Ihrer Aufgabenstellungen!

## Kontaktdaten:

Carsten Hochmuth  
Reichenhainer Str. 88  
09126 Chemnitz  
Tel: 0371 / 5397 1811  
[carsten.hochmuth@iwu.fraunhofer.de](mailto:carsten.hochmuth@iwu.fraunhofer.de)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!