



Anforderungen an die Feinbearbeitung von morgen

Autor und Referent: Dipl.-Ing. Markus Brumm

Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren/
Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke
Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher

WZL der RWTH Aachen

Seminar „Feinbearbeitung von Zahnrädern“

Aachen, 9./10. November 2011

© WZL/Fraunhofer IPT



Agenda

- 1 Einleitung
- 2 Anforderung an zukünftige Getriebe
- 3 Kostenreduktion durch fertigungsgerechte Konstruktion
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

© WZL/Fraunhofer IPT



Seite 2

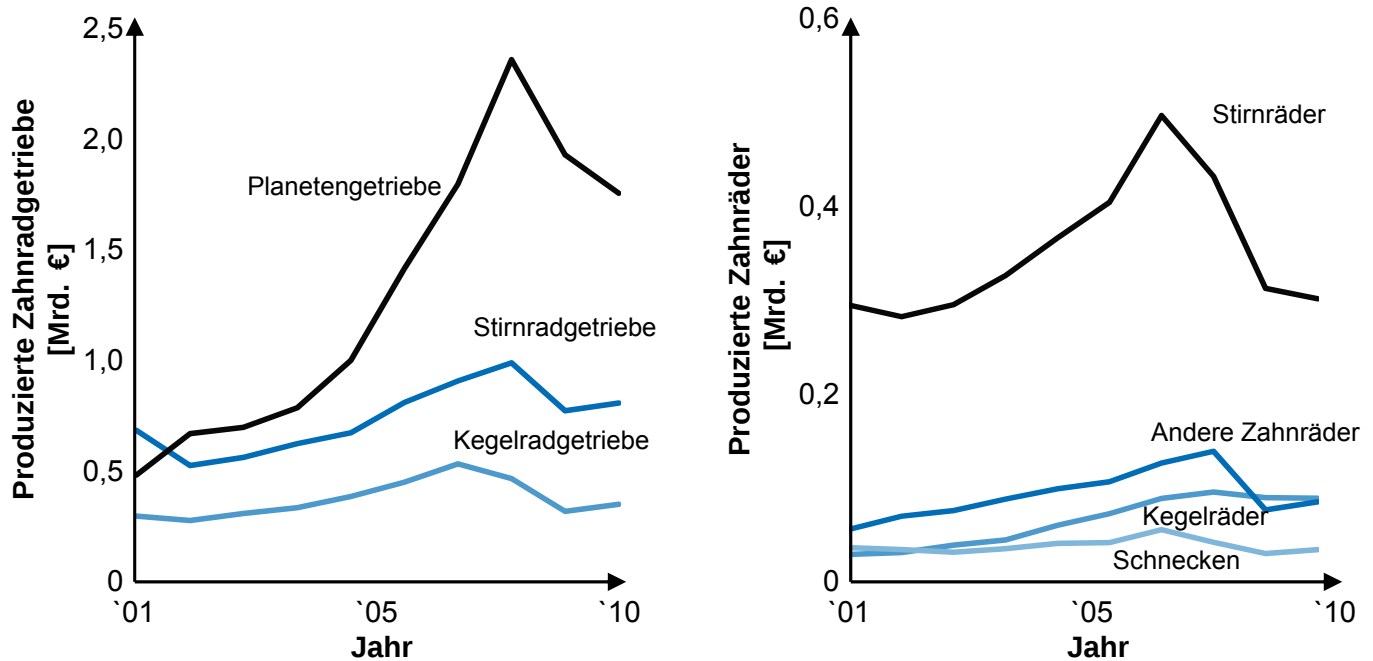
Herausforderung an die Zahnradfeinbearbeitung

Anforderungen an das Zahnrad im Gesamtsystem	Gesetzgebung, Gesellschaft, Wettbewerb	■ Ressourcenschonung ■ Akustik, Kosten, Effizienz, Lebensdauer
	Konstruktion/Gestalt des Gesamtsystems	■ Zugänglichkeit, Steifigkeit, Trägheit, Korrekturen
Restriktionen durch Fertigungsfolge und Konstruktion	Anwendungsgerechte Konstruktion = Fertigungsgerechte Konst.?	■ Korrekturen resultieren aus Einsatzsituation ■ Fertigungssimulation?
	Fertigungsfolge/ Prozesskette	■ Aufmaß, Verzüge ■ Qualität vor der Bearbeitung ■ Werkstoff
	Maschinenpark / Kompetenz/ Erfahrung	■ Erfahrung „Know How“ ■ Werkzeuge ■ Flexibilität
	Einsatzverhalten Erfüllung der Toleranz	■ Resultiert aus Auslegung und Fertigungsverfahren

Agenda

- 1 Einleitung
- 2 Anforderung an zukünftige Getriebe
- 3 Kostenreduktion durch fertigungsgerechte Konstruktion
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

Kostendruck bei einer Branche mit Zugkraft

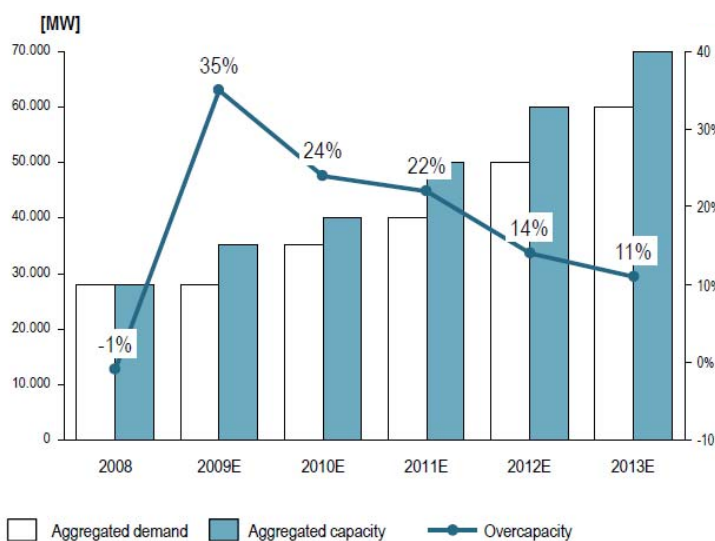


Quelle: Statistisches Bundesamt, Stand: 2011

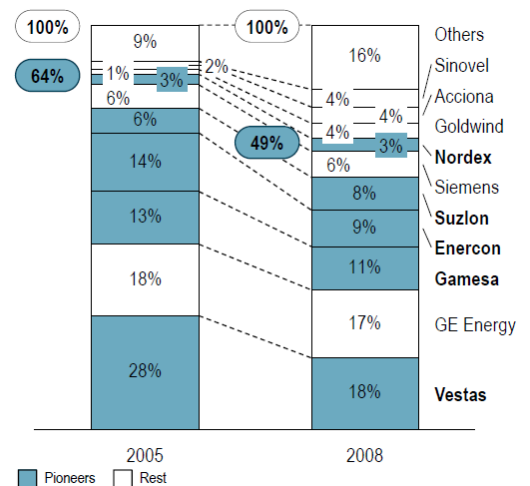
© WZL/Fraunhofer IPT

Kostendruck durch Überkapazität

Entwicklung der Überkapazität



Marktanteil der „Pioniere“ schrumpft



Windenergieanlagen mit Getriebe müssen wirtschaftlich sein! Die Feinbearbeitung von Verzahnungen muss zu einer hohen Verfügbarkeit bei geringen Fertigungskosten führen.

Quelle: Roland Berger – From Pioneer to Mainstream

© WZL/Fraunhofer IPT

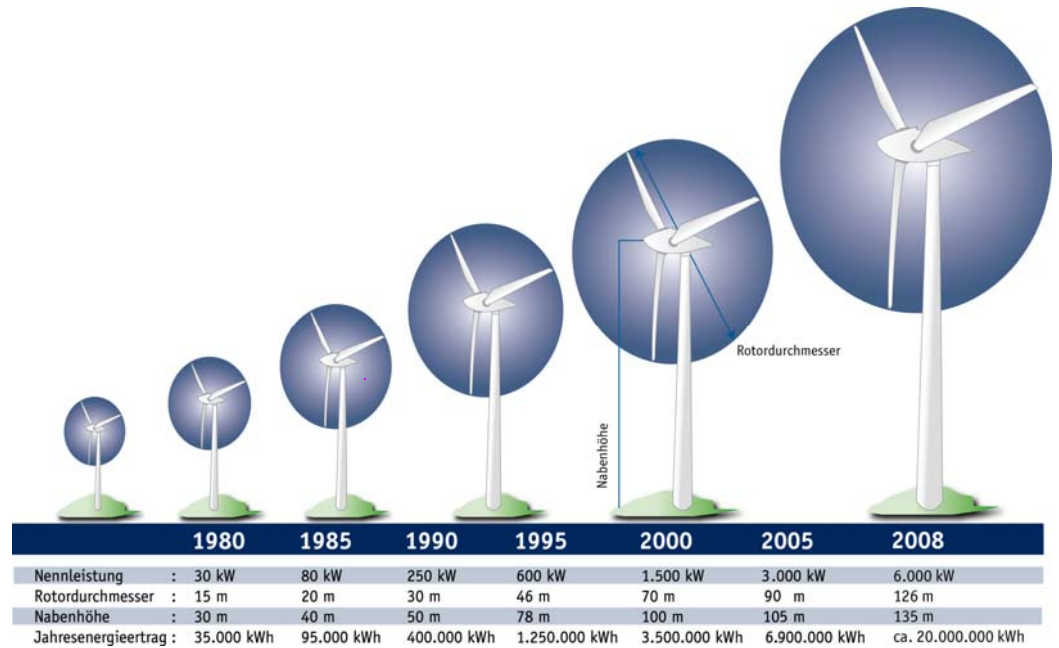
Kostenreduktion durch gesteigerte Verfügbarkeit bei zunehmender Belastung



Getriebelose Bauform



Teilintegrierte Bauform



Leistungssteigerung führt zu steigenden Rotordurchmessern, sinkender Drehzahl und hohen Momenten

Quelle: www.wind-energie.de

© WZL/Fraunhofer IPT

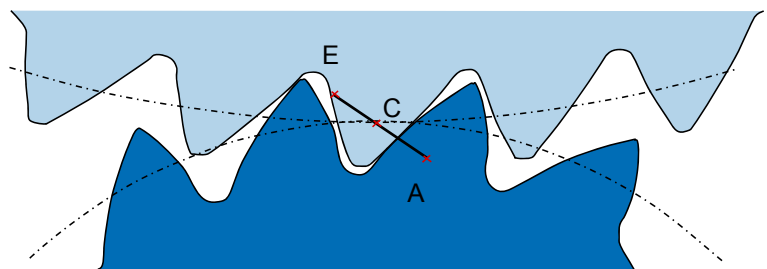
Resourcenschonung durch asymmetrische Verzahnungen – Eine Herausforderung für die Technologie?

Anwendungsbeispiel

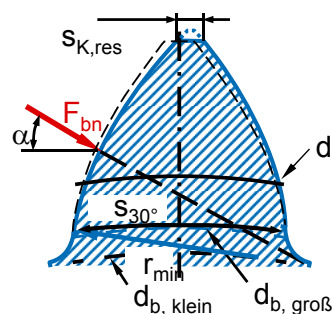


Quellen: VW, NORDEX, DEMAG

Beispielverzahnung mit $\alpha_{n, \text{Zug}} / \alpha_{n, \text{Druck}} = 45^\circ / 17^\circ$



Kombination der Vorteile...

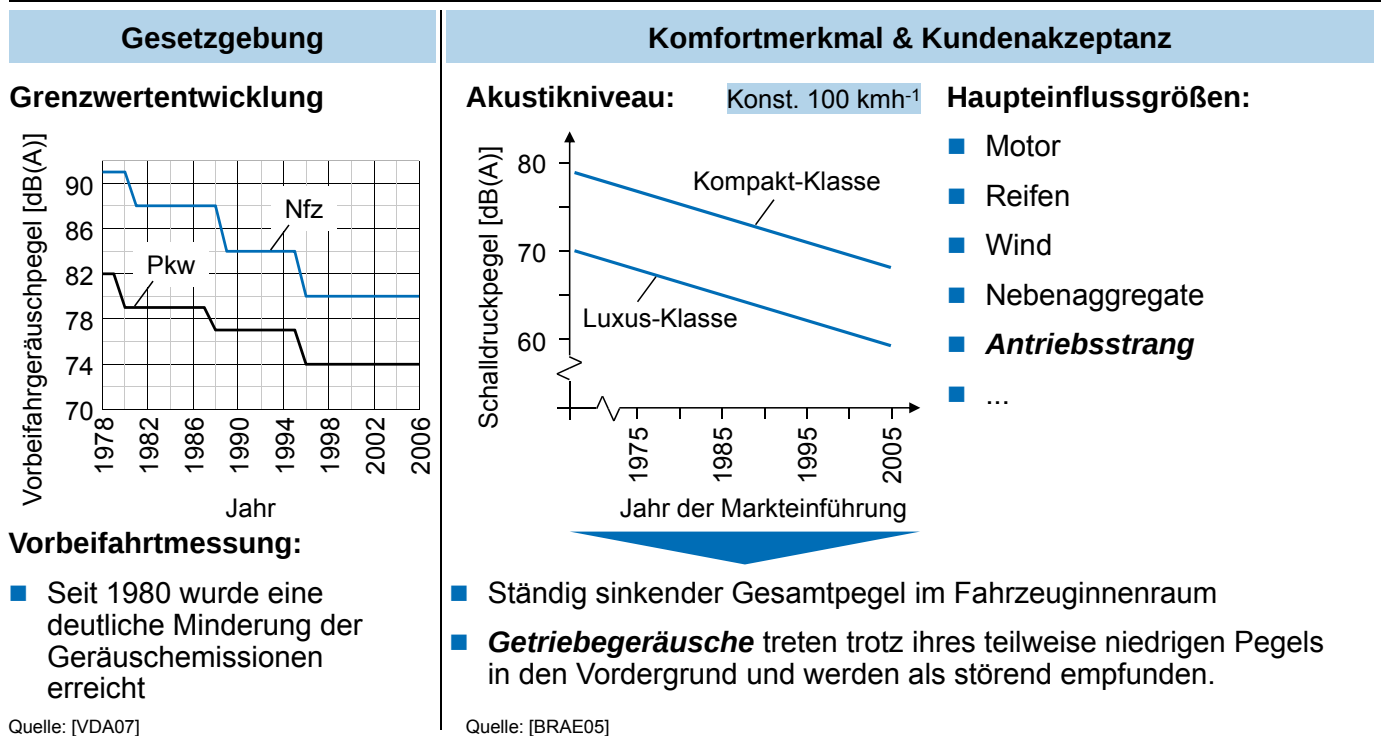


Fragestellung:

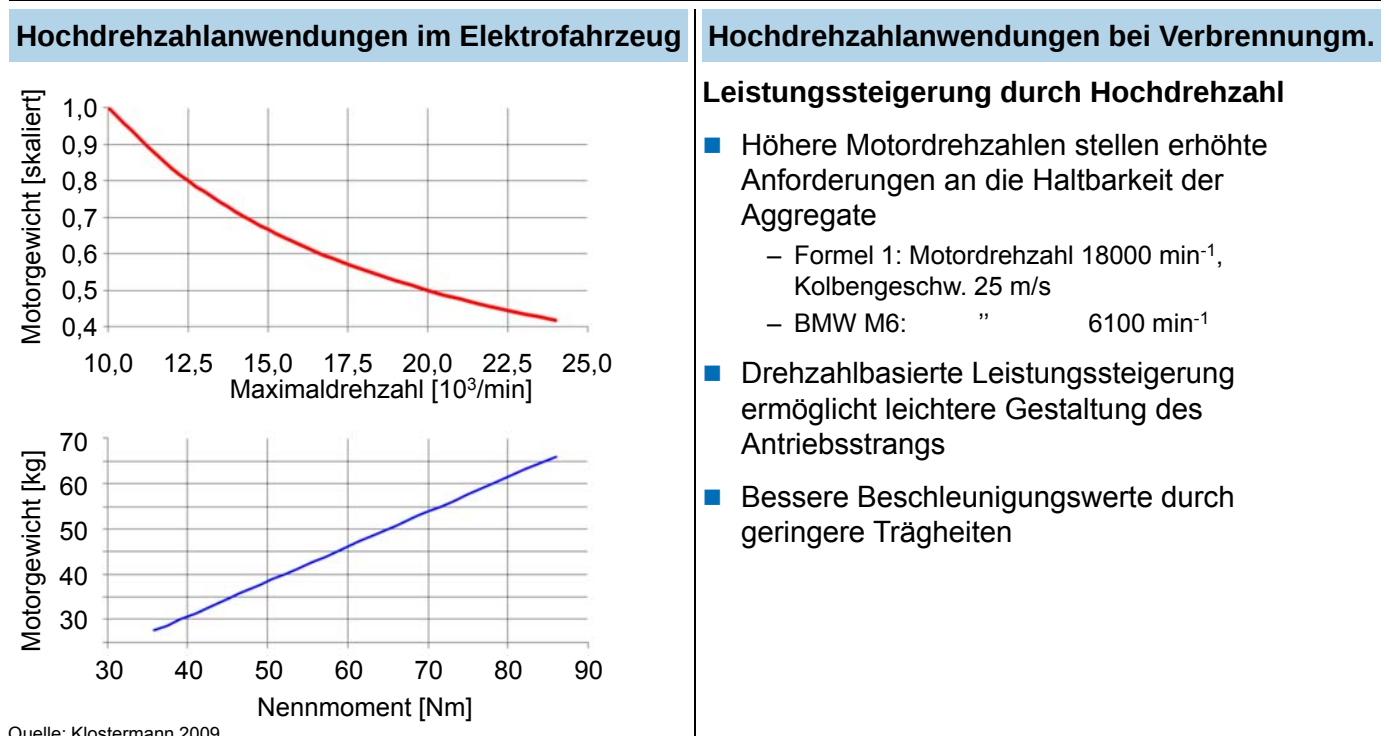
- Prozessdynamik (Einfluss der Kontaktfolge)
- Eingriffsverhältnisse (Schleißbrandgefahr?)
- Verzahnungskorrekturen (Bsp. Verschränkung)
- ...

© WZL/Fraunhofer IPT

Anforderungen an die Akustik durch sinkende Pegel



Anforderungen an die Akustik durch steigende Drehzahlen



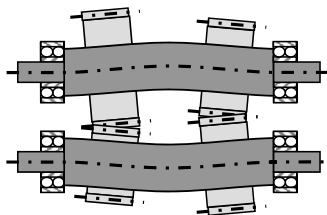
Agenda

- 1 Einleitung
- 2 Anforderung an zukünftige Getriebe
- 3 Kostenreduktion durch fertigungsgerechte Konstruktion
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

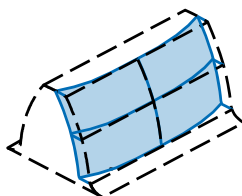
Restriktion – Verzahnungsauslegung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Ausschussrate

Verzahnungsauslegung

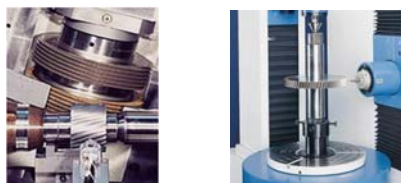
Verformung Welle/Lager



„Optimale“ Korrektur

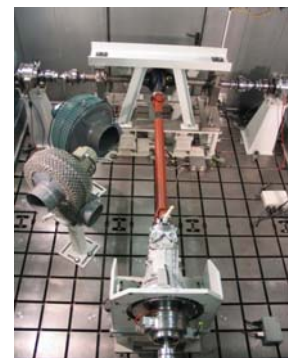


Fertigungs- und Montageeinfluss



- Fertigungsstreuung/-kinematik
- Qualitätskennwert
- Gehäusegeometrie
- Lagervorspannung

Geräuschverhalten des Getriebes im System



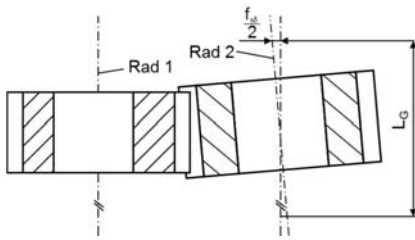
Noise Vibration & Harshness Test										
Rating	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Evaluation	Not Acceptable				Border-line		Acceptable			

Eine robuste Auslegung ist erforderlich

Restriktion – derzeit keine Fertigungssimulation der der Verzahnungsauslegung

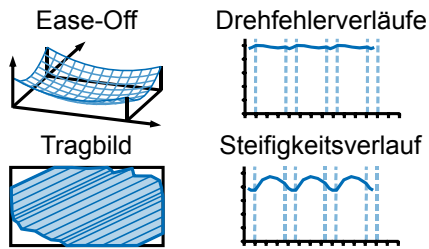
Analyse des Verzahnungsumfelds

Analyse der Gehäuse-, Lager- und Wellenverformung



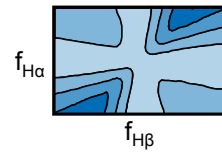
- Tragbildanalyse unter Last
- Analytische Berechnung der Wellenverformung
- Lagersteifigkeit
- Abbildung des Gehäuses mit FEM
- Verformungsmessung

Zahnkontaktanalyse



- Berücksichtigung des Umfelds
- Optimierung der Lastverteilung
- Reduzierung der Verzahnungsanregung
- Modell des Zahneingriffs – Abweichung von der Realität möglich (Strukturen nicht abbildbar)

Toleranzfeldanalyse durch Variationsrechnungen

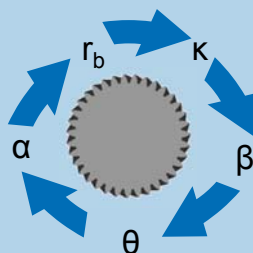


- Variation von Verzahnungsgrößen, Verformungen
- Große Anzahl an Simulationsrechnungen erfordert objektive Auswertung
- Analyse von Wechselwirkungen
- Fertigungs kinematik nicht berücksichtigt
- **Derzeit keine direkte Kopplung mit der Fertigungsplanung**

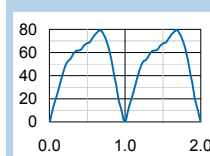
Erfolgreiche Integration der Fertigungssimulation in den Auslegungsprozess einer Beveloidverzahnung



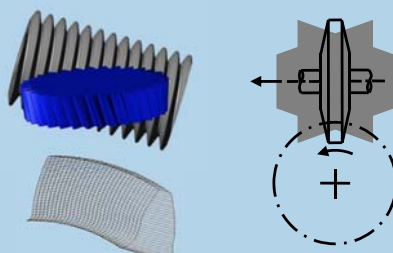
Auslegung von Beveloidradpaarungen



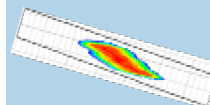
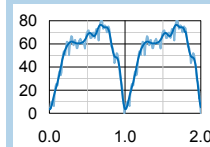
Untersuchung des Einsatzverhaltens



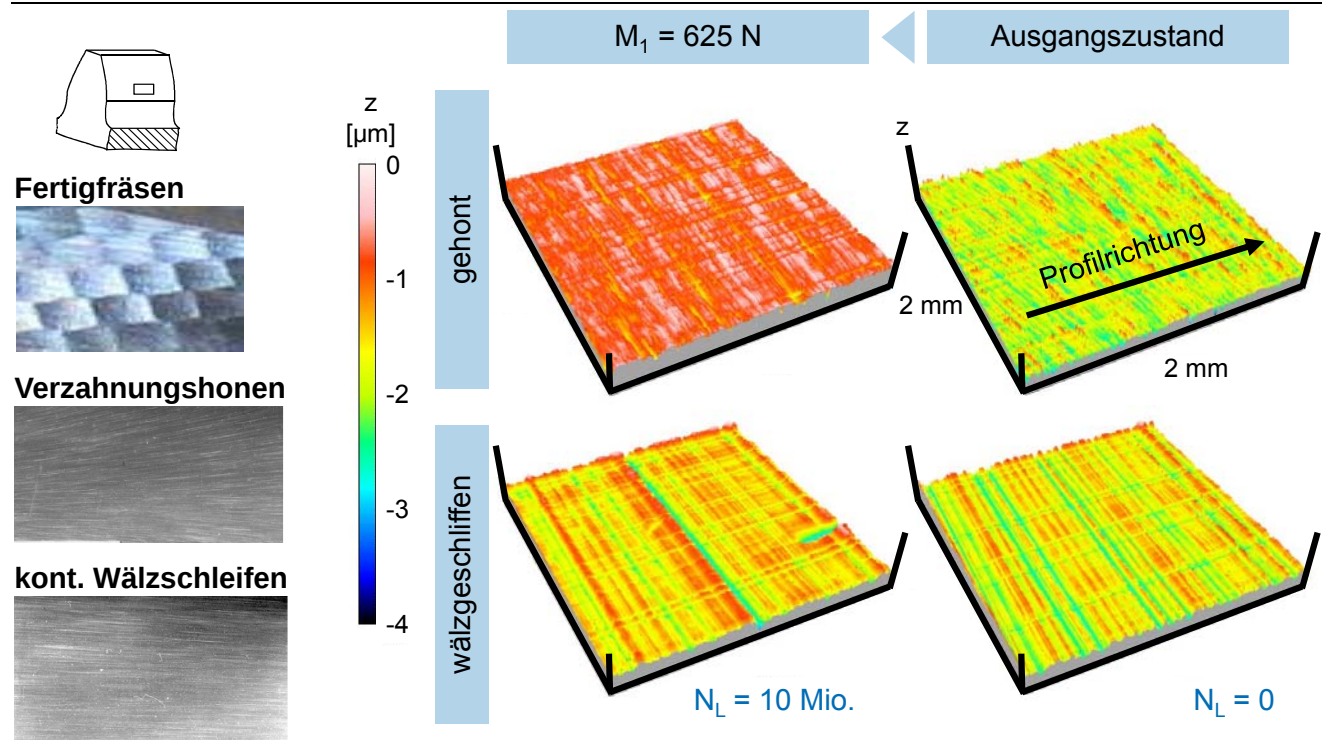
Fertigungssimulation GearGenerator



Zahnkontaktanalyse ZaKo3D



Herausforderung bei der Bewertung von Oberflächenstrukturen feinbearbeiteter Zahnflanken



© WZL/Fraunhofer IPT

Fraunhofer
IPT

WZL
RWTHAACHEN

Seite 15

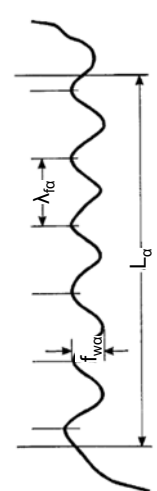
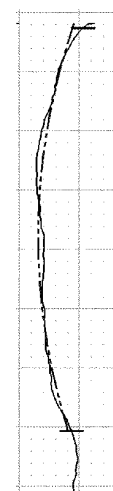
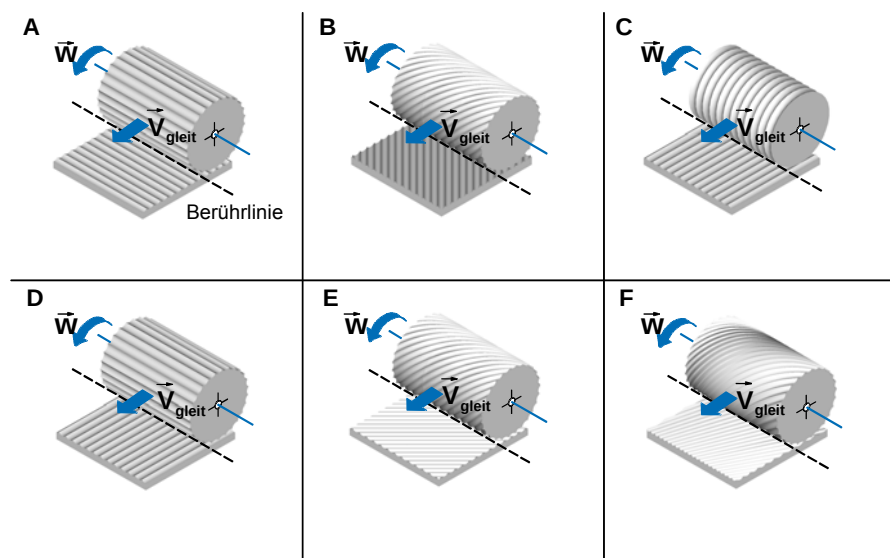
Herausforderung bei der Tolerierung von Bearbeitungsspuren – Einfluss auf Tragfähigkeit und Akustik

Oberflächenstrukturen haben einen Einfluss auf die Anregung

Profilmessschriebe

Beispiel

VDI 2607



Neue Kennwerte erfordern ebenso neue Strategien zur Kompensation von Verzahnungsabweichungen

Quelle: Kotthaus und Stadfeld

Quelle: VDI 2607

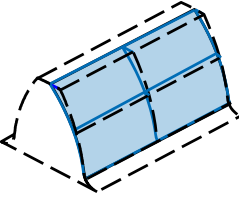
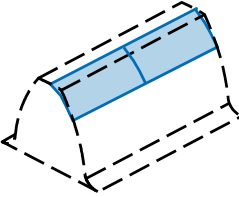
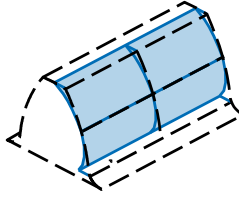
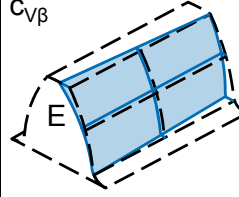
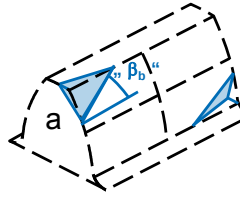
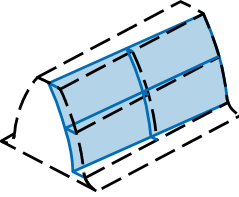
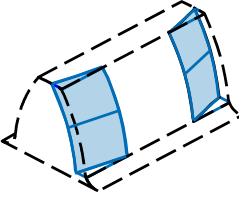
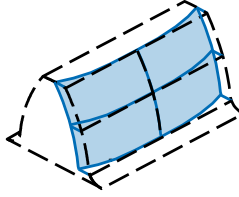
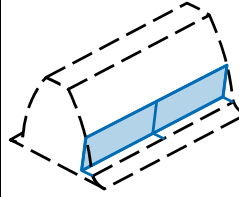
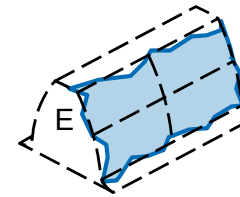
© WZL/Fraunhofer IPT

Fraunhofer
IPT

WZL
RWTHAACHEN

Seite 16

Beschreibbare Flankenabweichungen und -korrekturen

Profilwinkel $f_{H\alpha}$ 	Kopfrücknahme c_a, d_{ca} 	Profilballigkeit c_α 	Verschränkung (Twist) $c_{v\beta}$ 	Diagonalrücknahme 
Flankenlinienwinkel $f_{H\beta}$ 	Endrücknahme b_e, l_e 	Breitenballigkeit c_β 	Fußrücknahme c_f, d_{cf} 	Topologische Korrektur 

Nicht alle Verzahnungskorrekturen sind sinnvoll bzw. in der Serie wirtschaftlich und reproduzierbar!

Zukünftige Gestaltung der Prozesskette für die Hartfeinbearbeitung von Großverzahnungen



Ausgangssituation

- Die zunehmende Serienproduktion von Großverzahnungen erfordert eine Optimierung bestehender Prozessketten.

Problemstellung

- Wie sollen Prozessketten in Zukunft gestaltet werden?
- Welches ist das für ein Bauteil(spektrum) wirtschaftlichste, geeigneteste Feinbearbeitungsverfahren?
- Lohnt immer die Investition in neue Verfahren?
- Kann durch eine Optimierung der Betriebsabläufe/Nebenzeit der gleiche Effekt erzielt werden?

Lösungsansatz

- Ein objektiver Verfahrensvergleich für eine individuelle Entscheidung

Agenda

- 1 Einleitung
- 2 Anforderung an zukünftige Getriebe
- 3 Kostenreduktion durch fertigungsgerechte Konstruktion
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung



Zusammenfassung

- Trend zu hohen Drehzahlen führt zu steigenden Anforderungen an Oberflächen der Verzahnung
- Der Kostendruck bei Windkraftgetrieben steigt
- Nur durch eine robuste Verzahnungsauslegung kann die Fehlerrate bei der Hartfeinbearbeitung signifikant verbessert werden
- Fertigungsplanung und Konstruktion müssen „Hand in Hand“ arbeiten - Viele Zahnflankenmodifikationen sind Kostentreiber und nicht sinnvoll

Forschungsbedarf aus Sicht der WZL Getriebeabteilung



- Entwicklung von funktionsbasierten Geometrie Kennwerten zur Tolerierung der Fertigungsqualität
- Kennwerte zur Tolerierung der Fertigungsqualität
- Effiziente Prozesse beim Einrichten von Fertigungsprozessen für Großbauteile
- Berechnungsmethode zur Beschreibung des Einflusses von Schleifkerben auf die Bauteilbeanspruchung
- Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen in den Konstruktionsprozess
- Einfluss von asymmetrischen Zahnprofilen auf die Technologieparameter beim Verzahnungsschleifen

Agenda

- 1 Einleitung
- 2 Anforderung an zukünftige Getriebe
- 3 Kostenreduktion durch fertigungsgerechte Konstruktion
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

