



# Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik

---

## Energie- und ressourceneffiziente Endbearbeitung von Powertrain-Komponenten

Prof. Dr.-Ing. Andreas Schubert

27.06.2013

# Gliederung

- Motivation: Energie- und Ressourceneffizienz im Bereich Powertrain
- Energie- und ressourceneffiziente Prozess- und Prozesskettengestaltung
  - Gestaltung von Prozessketten
  - Substitution energieintensiver Prozesse
- Anwendungsoptimierte Endbearbeitung
- Zusammenfassung

# Gliederung

- Motivation: Energie- und Ressourceneffizienz im Bereich Powertrain
- Energie- und ressourceneffiziente Prozess- und Prozesskettengestaltung
  - Gestaltung von Prozessketten
  - Substitution energieintensiver Prozesse
- Anwendungsoptimierte Endbearbeitung
- Zusammenfassung

## Ressourcenbedarf erfordert Paradigmenwechsel



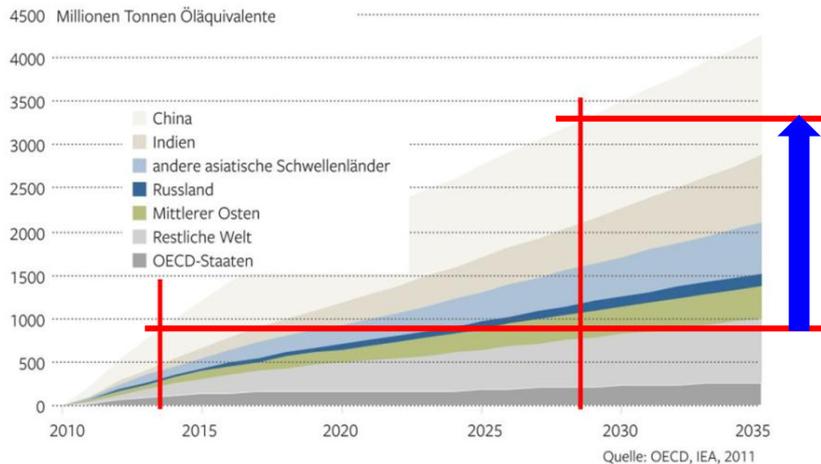
■ Die Nachfrage nach **Produkten** wird weiter wachsen

Indien 18 + 137 Mio. Autos  
China 53 + 367 Mio. Autos

■ Der **Energiebedarf** wird zunehmen

15 Jahre: Steigerung auf 350 %

25 Jahre: Steigerung auf 470 %



Paradigmenwechsel von „maximalem Gewinn bei minimalem Kapitaleinsatz“ hin zu „maximaler Wertschöpfung bei minimalem Ressourceneinsatz“ (Neugebauer)

# Handlungsbedarf Fertigungstechnik

## Entwicklung ressourceneffizienter Produkte – Beispiel Automobil

**Funktion** ↑

Sicherheit  
Komfort  
Transportkapazität  
Design  
Fahrvergnügen

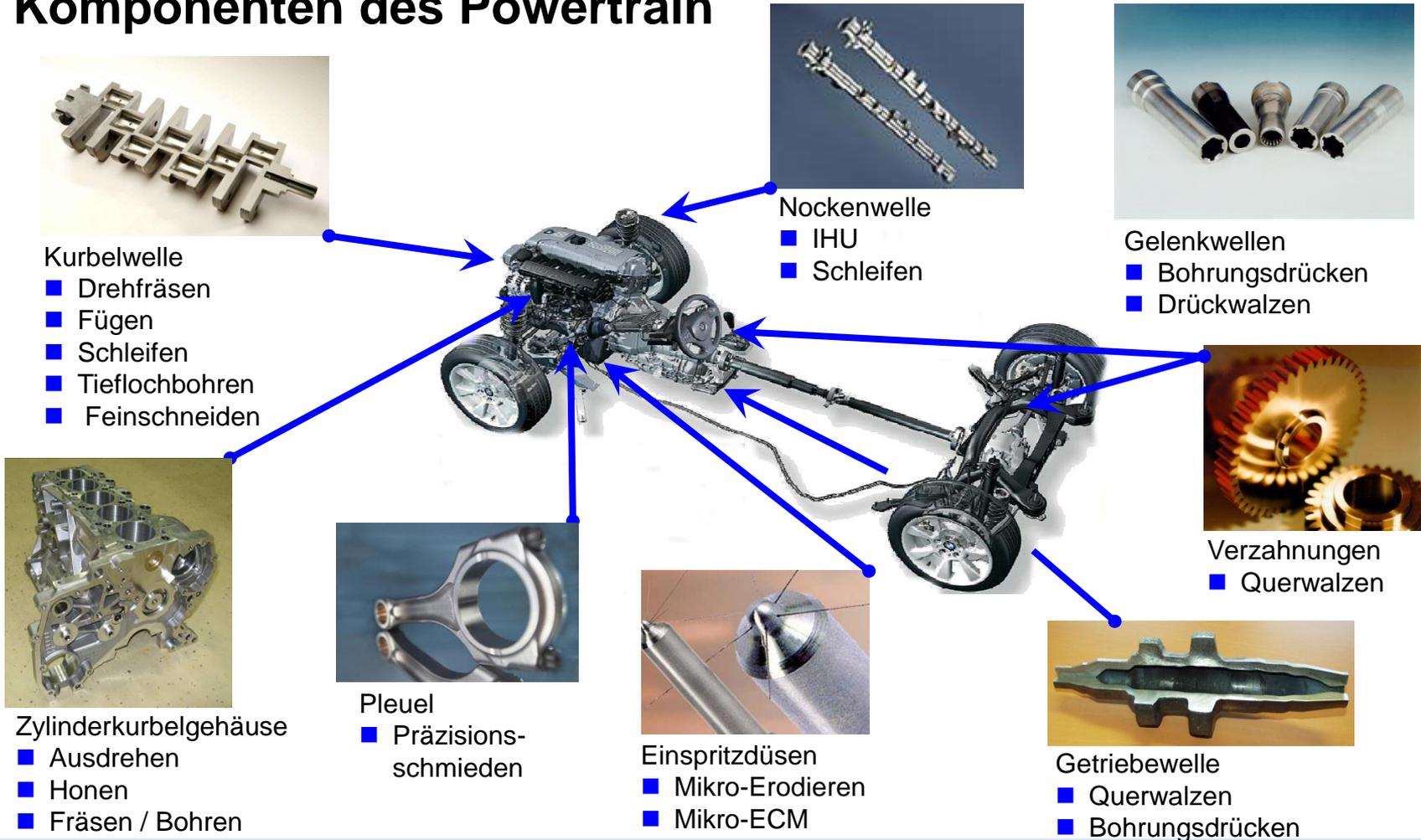


**Ressourcenbedarf** ↓

Miniaturisierung  
Downsizing  
Leichtbau  
Energierückgewinnung  
Alternative Antriebe

**Zunahme der Produktkomplexität bei annähernd gleichem Gewicht und Abmessungen**

# Komponenten des Powertrain



## Technologische Anforderungen an Powertrain-Komponenten

- **Funktionserfüllung** (z. B. Kraft- oder Drehmomentübertragung, Dichten ...)
- **Effizienz im Betrieb** (Reibung, Verschleiß, Masse, ...)
- **Herstellbarkeit** (zu vertretbaren Kosten)
- Haltbarkeit (Verschleiß, Ermüdung, usw.)
- geringe Kosten
- Wiederverwertbarkeit/Recycling

### Bauteilbeanspruchung am Beispiel Turbolader:

- hohe Temperaturen (Otto: 1050 °C, Diesel: max. 800 °C)
- hohe Drehzahlen (160.000 ... 300.000 min<sup>-1</sup>)

### Anforderungen an Bauteile:

- Hochwarmfestigkeit
- hochpräzise



Turbolader: Schnittdarstellung (oben) und im Prüfstandsversuch (unten)

## Was ist „Endbearbeitung“?



Einordnung der Endbearbeitung in der Prozesskette eines (Präzisions-) Bauteils

- **funktionsbestimmende, oftmals letzte Fertigungsschritte** (spanend, umformend oder abtragend) in der Prozesskette meist vor der Montage
- **Realisierung geforderter Abmessungen** (Maß-, Form- und Lagetoleranzen) und **Oberflächeneigenschaften** (Rauheitswerte, Eigenspannungen, Mikrohärt, ...)

# Gliederung

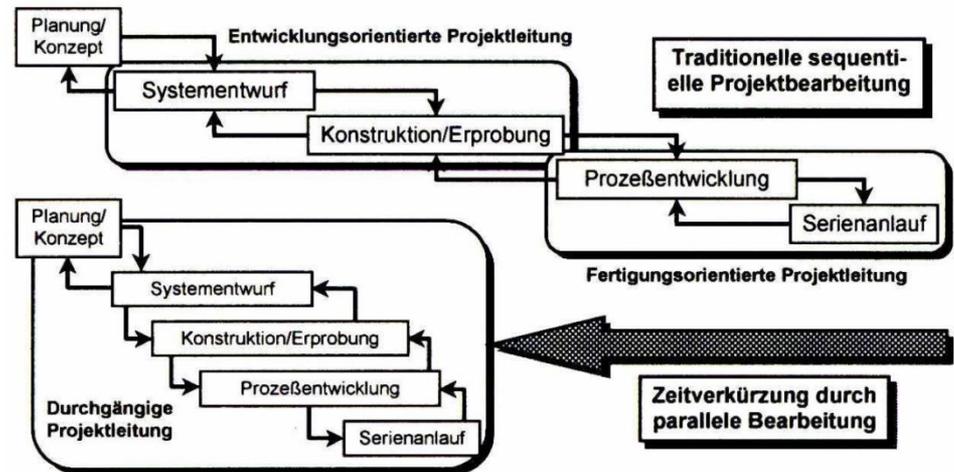
- Motivation: Energie- und Ressourceneffizienz im Bereich Powertrain
- Energie- und ressourceneffiziente Prozess- und Prozesskettengestaltung
  - Gestaltung von Prozessketten
  - Substitution energieintensiver Prozesse
- Anwendungsoptimierte Endbearbeitung
- Zusammenfassung

## Anforderungen an Fertigungskonzepte

„Das Fertigungskonzept für ein Bauteil ist einfach ausgedrückt so zu wählen, dass dieses in ausreichender **Stückzahl** und **Qualität** bei minimalen **Kosten** unter ergonomischen und umweltverträglichen Bedingungen **prozesssicher** produziert werden kann.“ (Jochem Heizmann, Mitglied des VW-Vorstands, CPK 2001)

### Anforderungen an Fertigungskonzepte:

- geringe Kosten und hohe Produktivität
- hohe Effizienz hinsichtlich Energie- und Ressourceneinsatz
- kurze Entwicklungs-/Planungszeit
- Geringe Kapitalbindung
- hohe Flexibilität hinsichtlich Bauteilgestaltung, Stückzahl, etc.



Verkürzung von Entwicklungszeiten durch Simultaneous Engineering

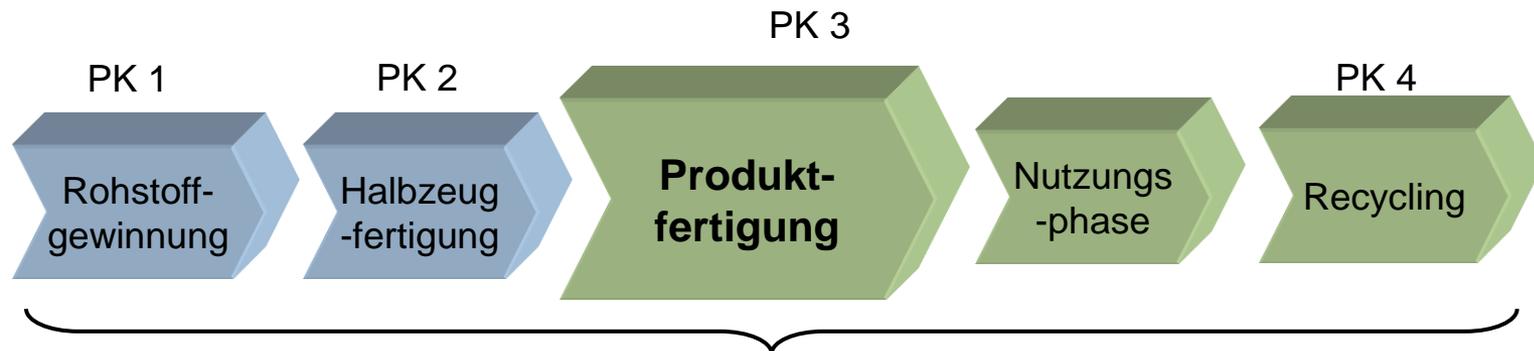
Quelle: Villmer - Simultaneous Engineering und Anforderungen an Prototypen und Modelle, 3. Fachtagung Rapid Prototyping

## Gestaltung von Prozessketten

### Prozesskette - Betrachtungsraum:

- beliebige Festlegung des Betrachtungsraumes (Beginn und Ende) einer Prozesskette
- mögliche Grenzen, z. B. infolge betrieblicher Strukturen (Metallverarbeitung):

PK 1: Rohstoffgewinnung:	vom Erz bis zum Rohmetall
PK 2: Halbzeugfertigung:	vom Rohmetall bis zum Halbzeug
PK 3: Produktfertigung:	vom Halbzeug bis zum Endprodukt
PK 4: Produktrecycling:	vom benutzten Endprodukt zum Rohstoff

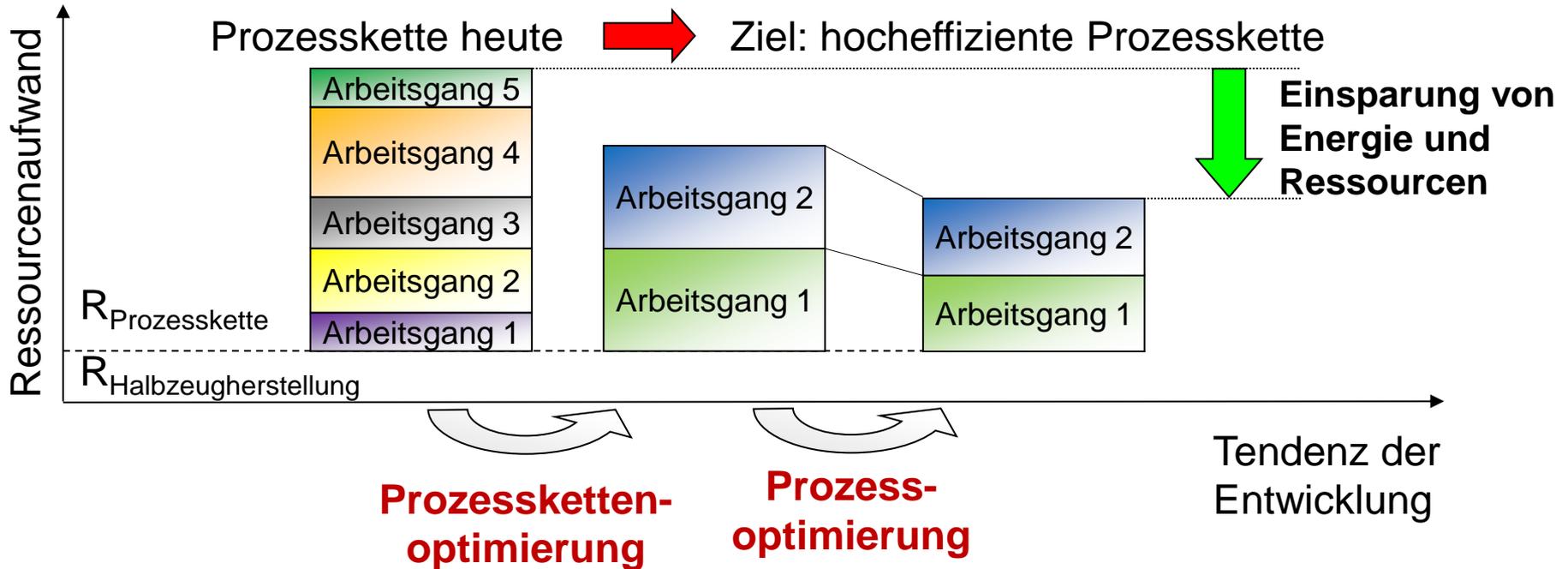


- gesamtheitlicher, **volkswirtschaftlicher Betrachtungsraum:**
  - Im Folgenden für Endbearbeitung: **Betrachtung von PK3**

## Effizienzsteigerung von Produktionssystemen und Produkten

- Ressourceneffizienz durch kurze, integrierte und **intelligent verknüpfte Prozessketten**
- Effizienzsteigerung von Einzelprozessen durch **Optimierung von Prozessparametern und -bedingungen**
- **Substitution** und **Integration** energieintensiver Prozesse
- Energieeffizienz im Bauteillebenszyklus durch verbesserte **Bauteilfunktionalität** (z.B. durch funktionalisierte Oberflächen)

# Entwicklungsziel: Die ressourceneffiziente Produktion

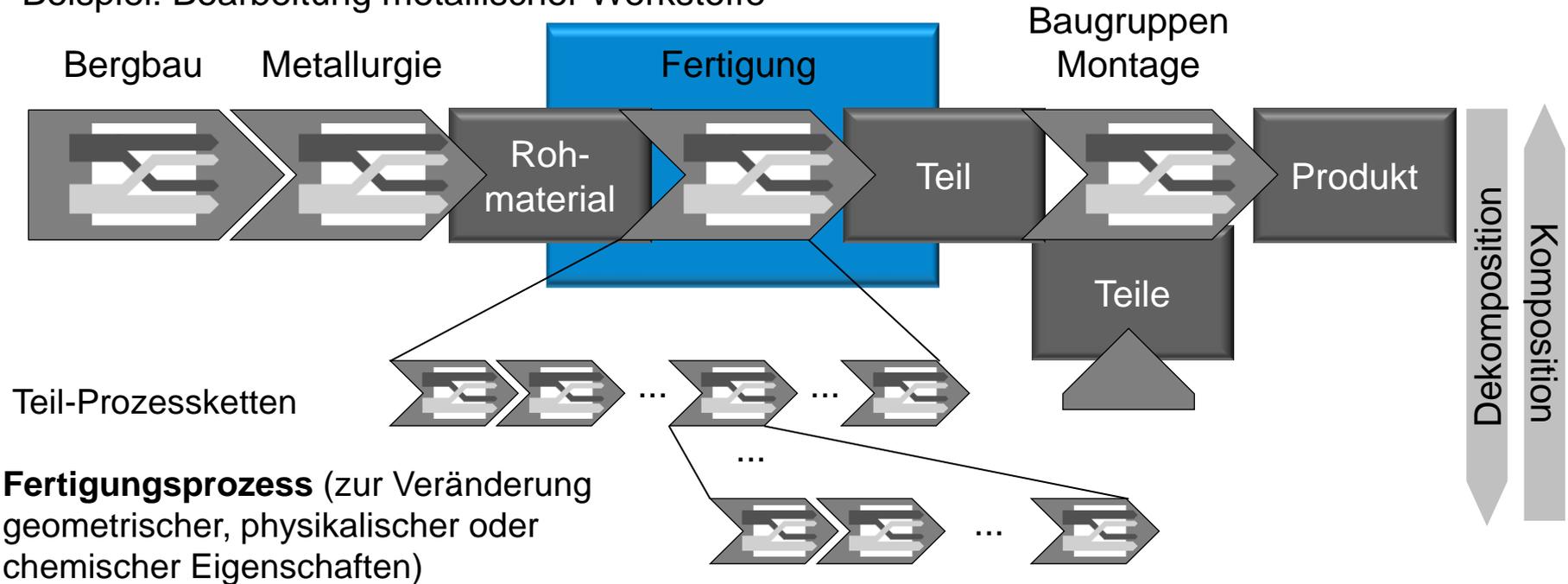


## Gestaltung ressourceneffizienter Prozessketten

Voraussetzungen

- Dekomposition und Komposition von Prozessketten und Prozessen
- Bewertbarkeit der Modelle

Beispiel: Bearbeitung metallischer Werkstoffe



**Fertigungsprozess** (zur Veränderung geometrischer, physikalischer oder chemischer Eigenschaften)

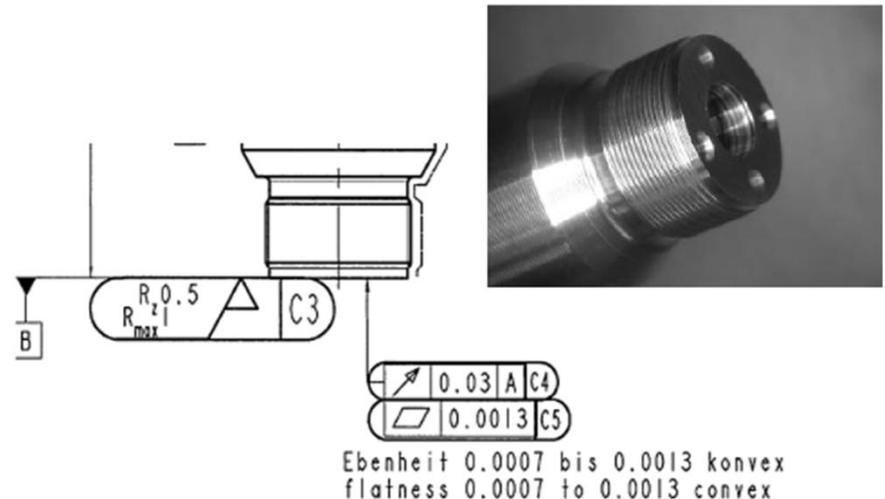
# Gliederung

- Motivation: Energie- und Ressourceneffizienz im Bereich Powertrain
- Energie- und ressourceneffiziente Prozess- und Prozesskettengestaltung
  - Gestaltung von Prozessketten
  - Substitution energieintensiver Prozesse
- Anwendungsoptimierte Endbearbeitung
- Zusammenfassung

## Anforderungen an Fertigungstechnologien

### Anforderungen an Fertigungstechnologien:

- **hohe Stückzahlen**  
(z. B. 50 Mio. weltweit produzierte PKW 2009, 500.000 Kurbelwellen/a auf einer Fertigungslinie (Quelle: VW Sachsen))
- Erfüllung **hoher Genauigkeitsanforderungen** und **Erzielung geringer bzw. definierter Oberflächenrauheiten** und **hoher Formgenauigkeit**
- hohe Prozesssicherheit
- möglichst geringe Bearbeitungskräfte („labile“ Werkstücke durch Leichtbau)
- oftmals **Bearbeitung gehärteter Werkstücke**



Beispiel: Spezifikation der Hochdruckdichtfläche an einem Diesel-Injektorkörper

## Verfahrenssubstitution

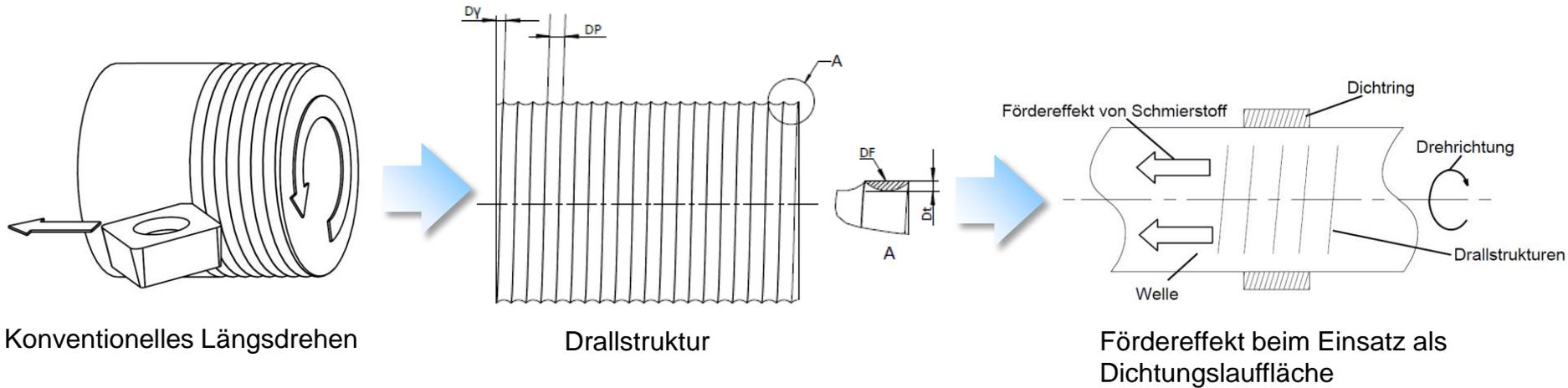
### *Substitution des Einstechschleifens durch drallfreies Hartdrehen*

#### Ökologische Potentiale:

1. Trockenbearbeitung
  2. Einsparung von Kühlschmierstoff
  3. problemlose Rückführung der Späne in den Recyclingkreislauf
- geringerer Energiebedarf aufgrund:
- geringere Haupt- und Nebenzeiten (Nebenaggregate fallen geringer in Gewicht)
  - kein Betrieb von Kühlschmierstoffpumpen und keine KSS-Aufbereitung notwendig

<b>Schleifen</b>	42 kWh	+	49 kWh	+	169 kWh	=	260 kWh
	Hilfsantriebe / Steuerung		Spanen		Hilfsaggregate / Pumpe		Energieverbrauch je Jahr bei 5000 Teilen
<b>Hartdrehen</b>	24 kWh		9 kWh		0 kWh		32 kWh

## Drallfreies Drehen - Motivation



Konventionelles Längsdrehen

Drallstruktur

Fördereffekt beim Einsatz als Dichtungslaufläche

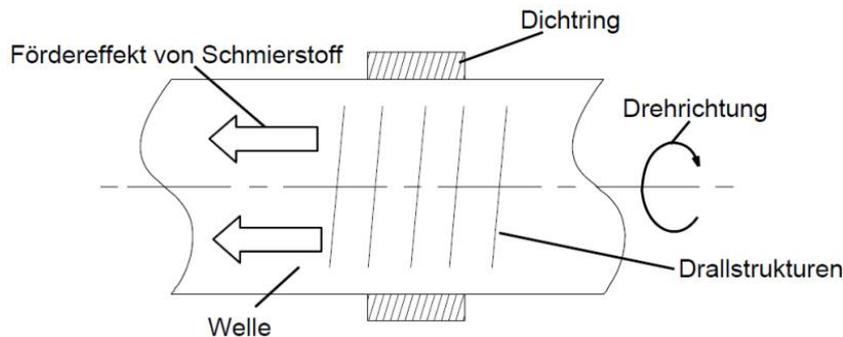
**Herkömmliches Fertigungsverfahren**  
Einstechschleifen

**→ Drallfreiheit!**

- Leckage
- ungleichmäßige Schmierstoffverteilung
- hoher Verschleiß des Radialwellendichtrings

# Drallfreies Drehen

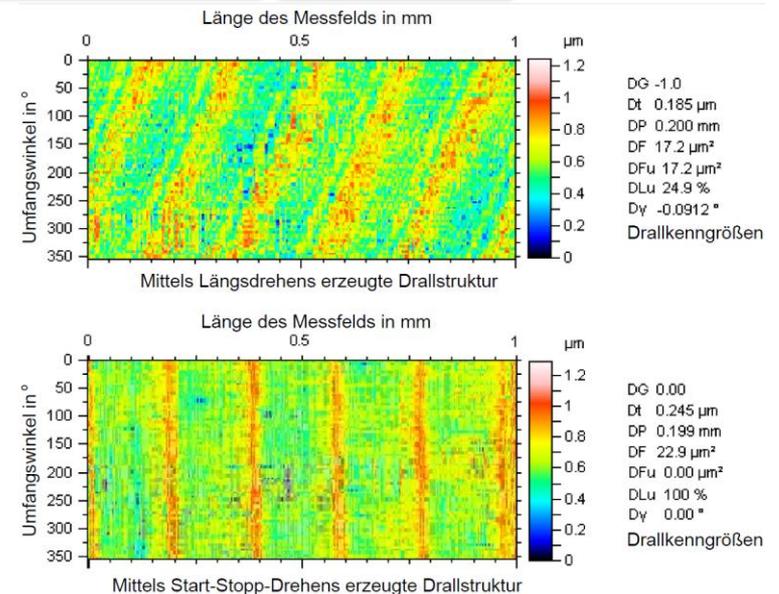
## Substitution des Einstechschleifens durch drallfreies Hartdrehen



Fördereffekt einer konventionellen gedrehte Welle

### Lösungsansatz:

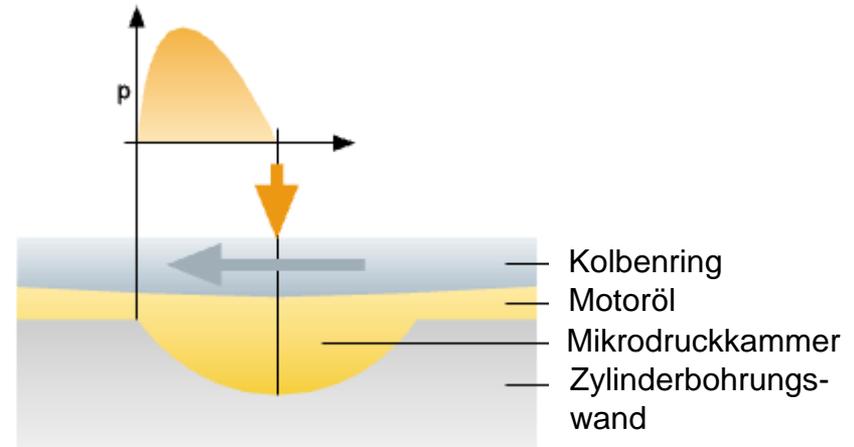
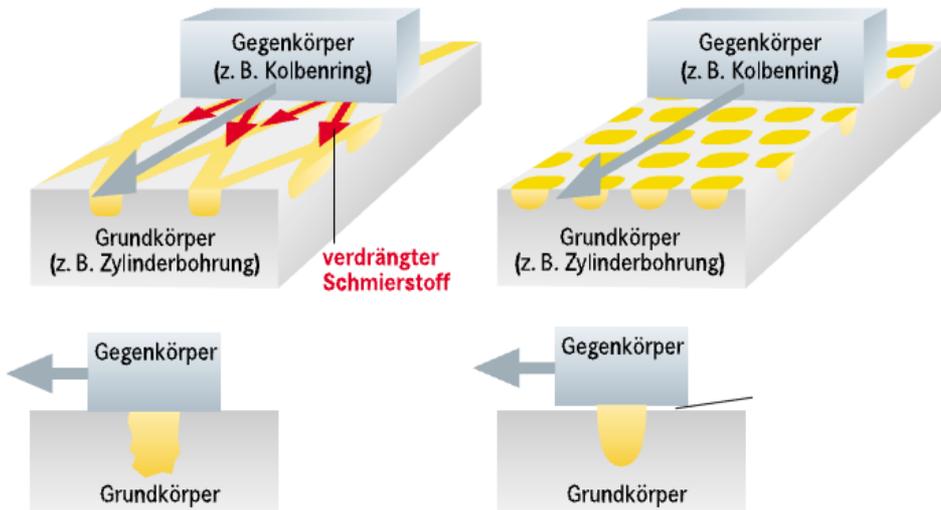
Erzeugung drallfreier Oberflächen durch Start-Stop-Drehen (SSD)



# Gliederung

- Motivation: Energie- und Ressourceneffizienz im Bereich Powertrain
- Energie- und ressourceneffiziente Prozess- und Prozesskettengestaltung
  - Gestaltung von Prozessketten
  - Substitution energieintensiver Prozesse
- **Anwendungsoptimierte Endbearbeitung**
- Zusammenfassung

# Wirkung von Mikrostrukturen



Aufbau eines hydrodynamischen Drucks in einer Mikrostruktur beim Übergleiten des Kolbenrings

Ölverdrängung bei einer plateaugehonten Oberfläche (kommunizierendes System) und einer lasergehonten Oberfläche (nichtkommunizierendes System)

Quelle: Gearing GmbH

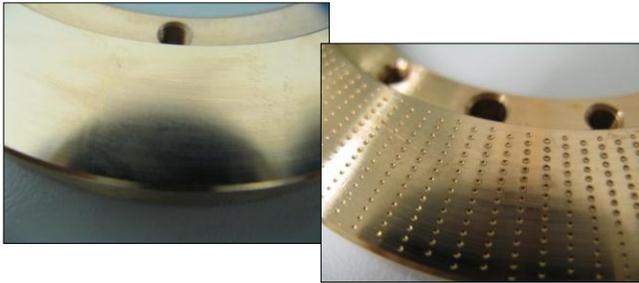


Laserstrukturierte Stirnfläche einer Pleuelstange

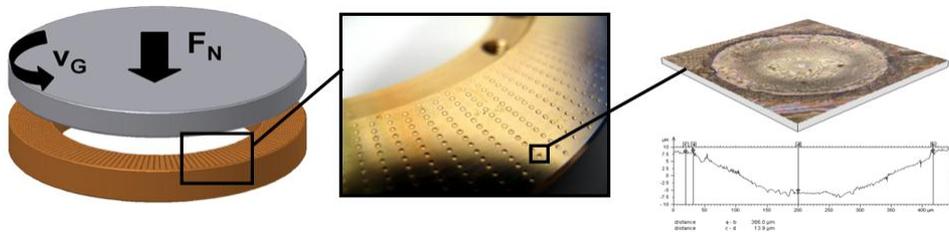


Lasergehonte Zylinderlaufbuchse

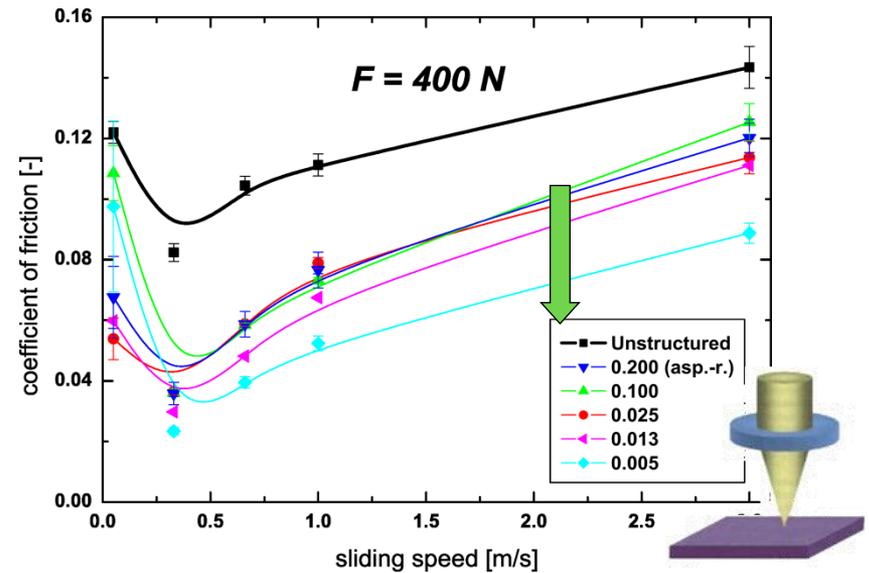
## Tribometrische Untersuchung



unstrukturierte und mikrostrukturierte Ringproben für die Messung des Reibungskoeffizienten



Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus



Vergleich des Reibungskoeffizienten für unstrukturierte und mikrostrukturierte Oberflächen mit unterschiedlichen Aspekt-Verhältnissen und Flächendichten

- geringere Reibung wird tendenziell durch geringeres Aspekt-Verhältnis der Strukturen erreicht
- optimierte Oberflächenstrukturierung reduziert den Reibungskoeffizienten bis zu 45 %

## Einsparpotential im Betriebslebenszyklus

### Annahmen

#### Kfz

- Laufleistung 150.000 km, 15 Jahre
- Verbrauch 5,5 l/h (Diesel)
- durchschnittliche Motor-Drehzahl 2.500 U/min
- durchschnittliche Geschwindigkeit: 60 km/h

#### Motor

- Reibkoeffizient unstrukturierte Lager: 0.0020
- Reibkoeffizient laser-strukturierte Lager: 0.0018 (-10%)
- Reibkoeffizient Jet-EC-strukturierte Lager: 0.0016 (-20%)



Quelle: Die Zeit online

	unstrukturiert	Strukturierung Laser	Strukturierung Jet ECM
<b>Strukturierung</b>	-	<b>444 kJ</b>	<b>446 kJ</b>
<b>Energieverlust Quelle [1]</b>	14.1 GJ	12.7 GJ	11.3 GJ
<b>im Lebenszyklus [2]</b>	14.3 GJ	12.8 GJ	11.4 GJ
<b>Mittelwert</b>	14.2 GJ	<b>12.8 GJ</b>	<b>11.4 GJ</b>
<b>Ersparnis</b>	-	2.7 MWh*	5.3 MWh*

[1] Durak et.al. / Tribology International 36 (2003) 599–5607

[2] <http://www.autobild.de/artikel/studie-zur-energiebilanz-im-verkehr-3715972.html>

\* Energie für Produktion unberücksichtigt

\*1 MWh entspricht etwa 100 l Dieselkraftstoff, Annahme: Reibungsreduzierende Maßnahmen im gesamten Antriebsstrang, Anteil Kurbelwelle 15 %

# Gliederung

- Motivation: Energie- und Ressourceneffizienz im Bereich Powertrain
- Energie- und ressourceneffiziente Prozess- und Prozesskettengestaltung
  - Gestaltung von Prozessketten
  - Substitution energieintensiver Prozesse
- Anwendungsoptimierte Endbearbeitung
- Zusammenfassung

## Prozesskettengestaltung

- Energie- und Ressourceneffizienz durch kurze, integrierte und **intelligent verknüpfte Prozessketten:**
  - **Substitution** und **Integration** energieintensiver Prozesse
  - Effizienzsteigerung von Einzelprozessen
- **geringerer Energiebedarf** aufgrund:
  - geringere Haupt- und Nebenzeiten
  - Trockenbearbeitung/Minimalmengenschmierung
  - Einfaches Recycling der Bearbeitungsabfälle



## Anwendungsoptimierte Endbearbeitung

- **Energieeffizienz im Produktlebenszyklus** wird erreicht durch:
  - Energetisch optimierte Herstellungsprozesse
  - Energetisch günstiges Verhalten während der Produktlebensdauer
- Oberflächenfunktionalisierung durch Mikrostrukturieren im Bereich der tribologischen Optimierung von Oberflächen

