
Energieoptimale Strukturen durch Leichtbau und Mechatronik

„Energieeffiziente Produktion – Forschung und Praxis“

PD Dr. W.-G. Drossel

Chemnitz, 06. Juni 2013

Energieoptimale Strukturen durch Leichtbau und Mechatronik

Gliederung

- 1 Einführung
- 2 Energieeffizienz in der Produktionstechnik
- 3 Energieeffizienz durch Leichtbau
- 4 Energieeffizienz durch Mechatronik

1 Einführung

Energieverbrauch – Deutschland

Jahresbilanz 2008

■ **absoluter Primärenergieverbrauch:**

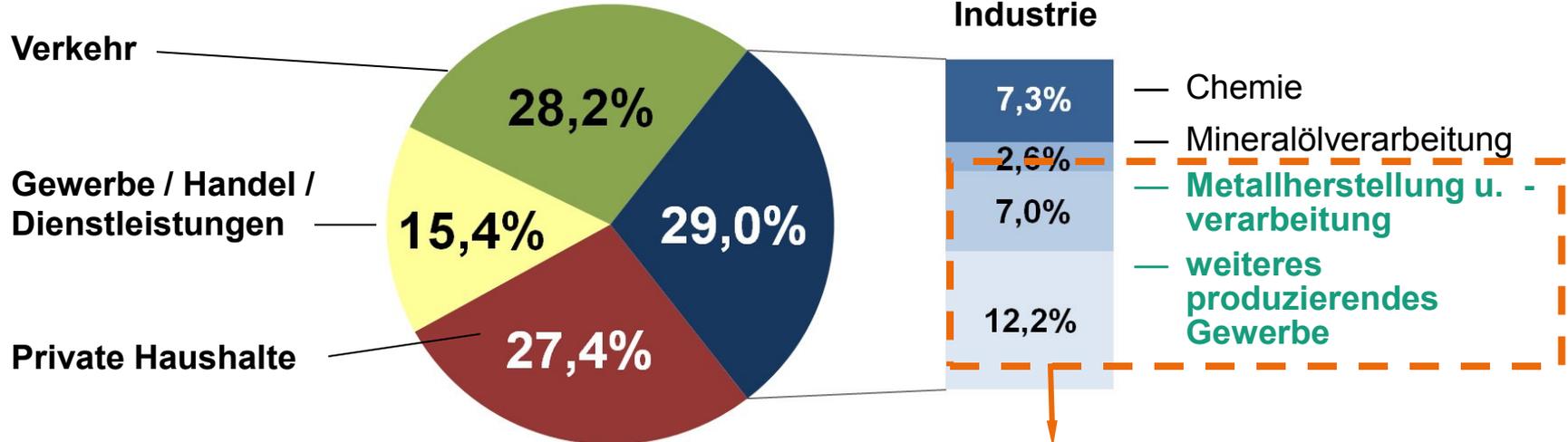
PJ/a

14,280

→ **19,2 %**

■ **davon im Produzierenden Gewerbe:**

2,742 PJ/a
Industrie



■ **Einsparpotenzial** der Industrie: **30%** ⁽¹⁾

→ **≅ 18 Kraftwerke á 1,4 GW**

19,2 %

Quelle: Statistisches Bundesamt 2009 "Energie auf einen Blick" Ausgabe 2009;

⁽¹⁾ Fraunhofer Gesellschaft; Abschätzung aus dem Betrachtungsraum der Untersuchung "Energieeffizienz in der Produktion" 2007

1 Einführung

WZM – Herstellersicht: Markenbewertung

Bitte schätzen Sie die **Bedeutung der einzelnen Merkmale für den Wert Ihrer Marke** auf einer Skala von 1 – 10 ein.*

* Auswahl aus der Kreuztabelle

Indikatoren	N	Minimum	Maximum	Ø	σ
Zuverlässigkeit	13	8	10	9,46	0,660
Bearbeitungsgenauigkeit	13	7	10	9,38	0,961
Produktivität	13	7	10	9,15	1,068
Service	13	7	10	9,08	1,038
Liefertreue	13	6	10	8,54	1,266
Innovationsgrad	12	7	10	8,50	1,243
Lebensdauer	13	6	10	8,38	1,387
Automatisierbarkeit 24 h Betrieb	13	3	10	8,23	1,964
dynamisches Verhalten	13	2	10	8,08	2,139
thermisches Verhalten	13	4	10	7,77	2,048
Betriebskosten	13	3	10	7,62	2,063
Messsysteme	13	0	10	7,38	2,902
Steuerung	13	0	10	7,38	2,785
Lieferzeit	13	2	10	7,08	1,977
Energieeffizienz	13	3	9	6,31	2,287
statisches Verhalten	13	2	10	6,15	2,968
Hauptspindeln	13	0	10	5,00	4,708

Quelle:
Fraunhofer IWU,
Studie Markenbewertung,
Sandra Piehler
Auswertung mit
SPSS Statistics 19

1 Einführung

Politische Forderungen

1. ISO 14955: Umweltbewertung von WZM

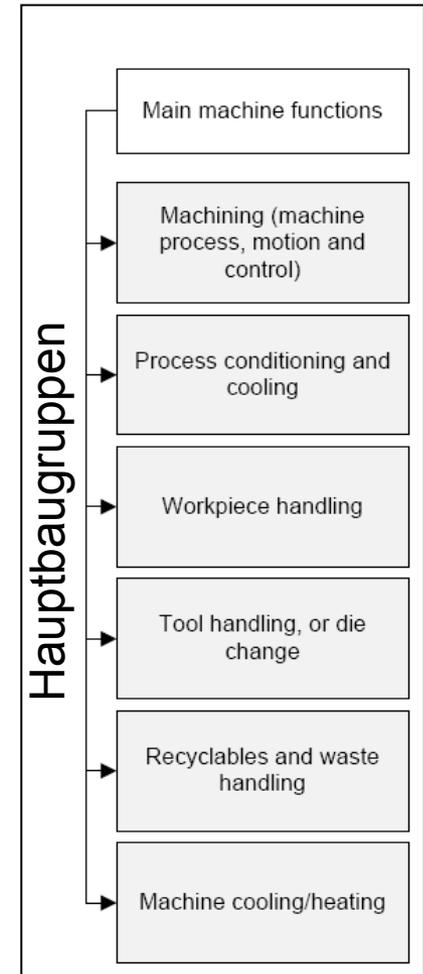
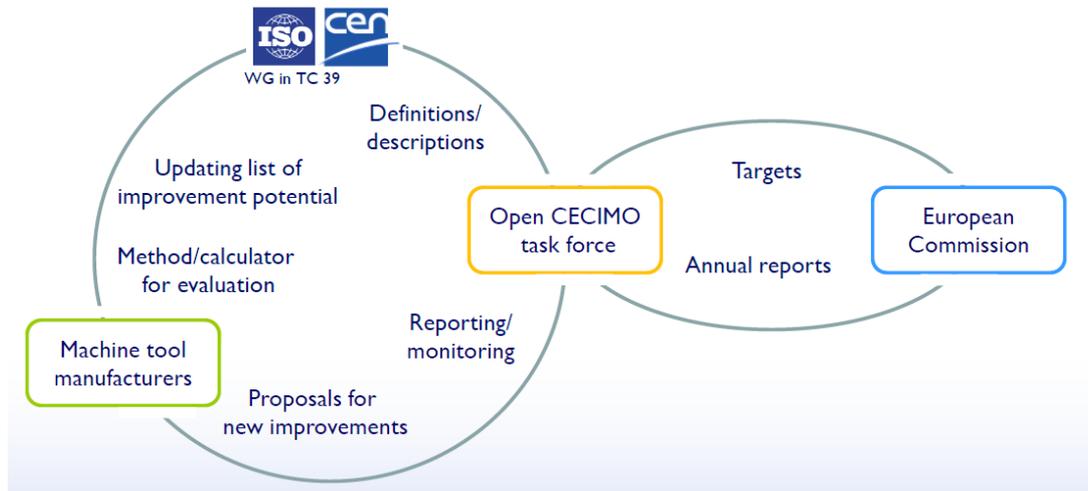
Energieemission und Ressourcenverbrauch von Hauptbaugruppen in Betriebsarten

2. EU: ECODESIGN Directive 2009/125/EG

→ Energieverbrauch - 30%

Zwangsbeitrag des Maschinenbaus zur Kyoto-Einsparungsverpflichtung

3. CECIMO Self-Regulatory Initiative als Herstellerverpflichtung



1 Einführung

Forderungen der Anwender

- Bisherige Kriterien:
 - Arbeitsgenauigkeit,
 - Produktivität,
 - Verfügbarkeit

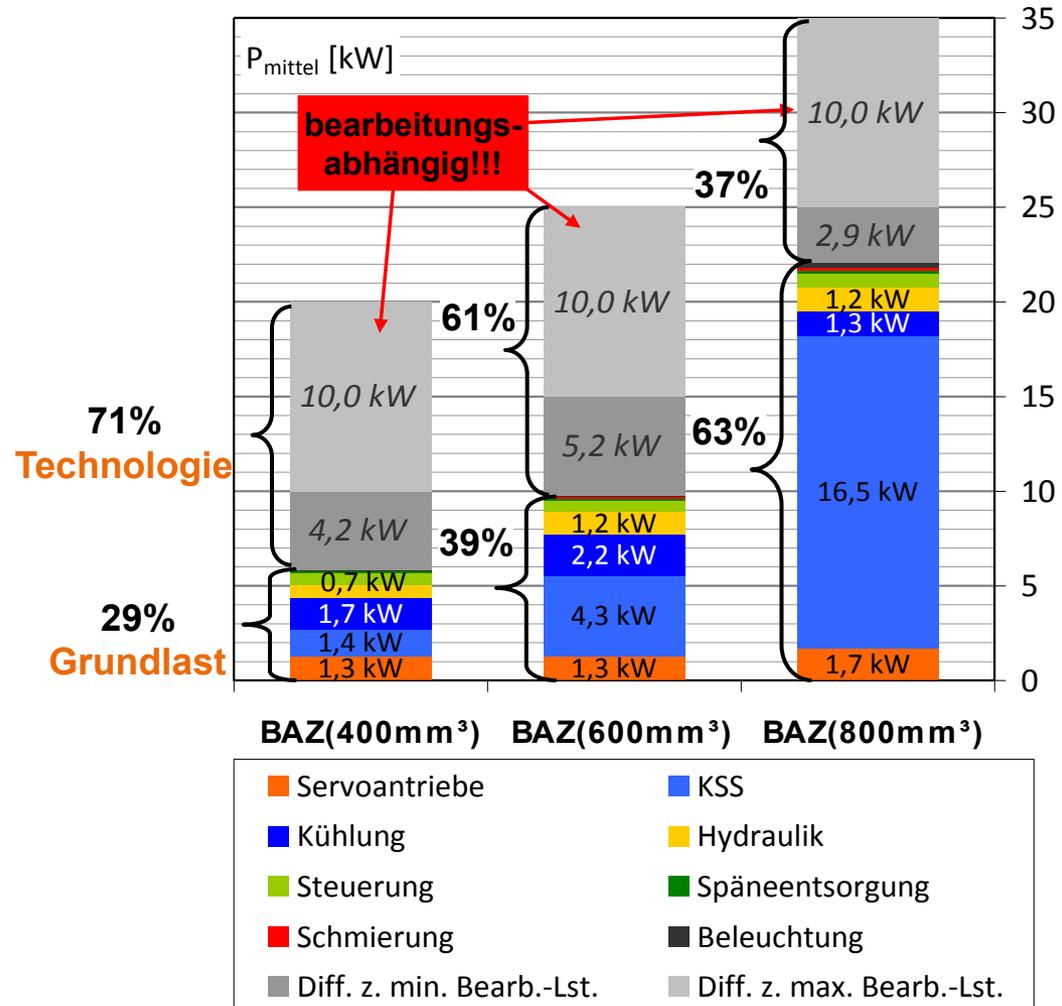
NEU: Energieeffizienz im Lastenheft

- $\frac{\text{Grundlast}}{\text{Technologie}} = f(\text{Baugröße, Bauteil, Prozess})$

Ziel: Grundlast → Minimum

Handlungsschwerpunkte

- Effizienzsteigerung der Komponenten
- Reduzierung der Hauptzeiten
- Kreisläufe schließen



Energieoptimale Strukturen durch Leichtbau und Mechatronik

Gliederung

- 1 Einführung
- 2 Energieeffizienz in der Produktionstechnik
- 3 Energieeffizienz durch Leichtbau
- 4 Energieeffizienz durch Mechatronik

1 Einführung

Vision der energieeffizienten Produktion

Stufe 1 **Wirkungsgradoptimierte Produktion**

- Effizienztechnologien
- Prozesssicherheit
- Niedrigenergie-Fertigungsanlagen

➔ **Effizienz**

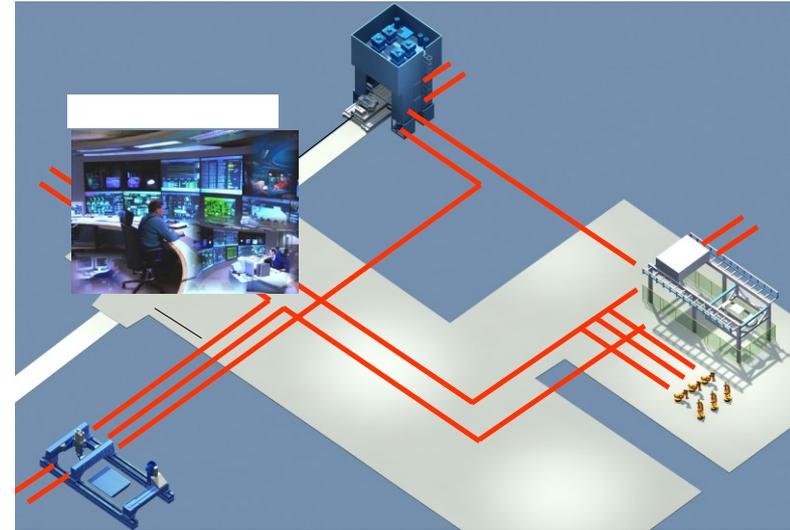
Stufe 2 **Total Energy Management**

- Energieketten
- „geschlossene“ Energiekreisläufe

➔ **Nachhaltigkeit**

Stufe 3 **Nutzung unabhängiger Energiequellen** (Geothermie, Solarenergie, Windenergie)

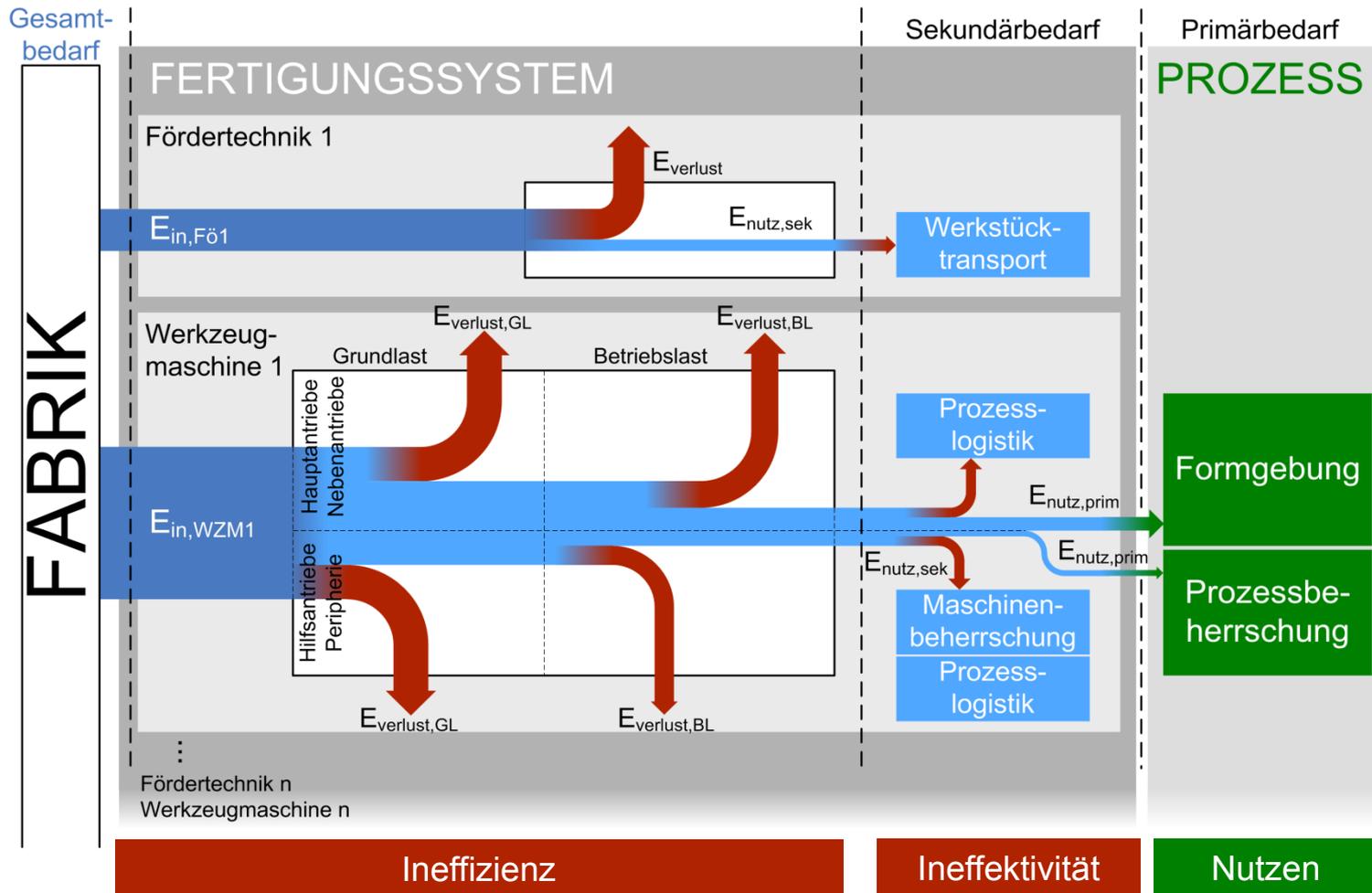
➔ **Substitution**



Energetische Interaktion
(Prozessketten – Fertigungsanlagen – Gebäude)

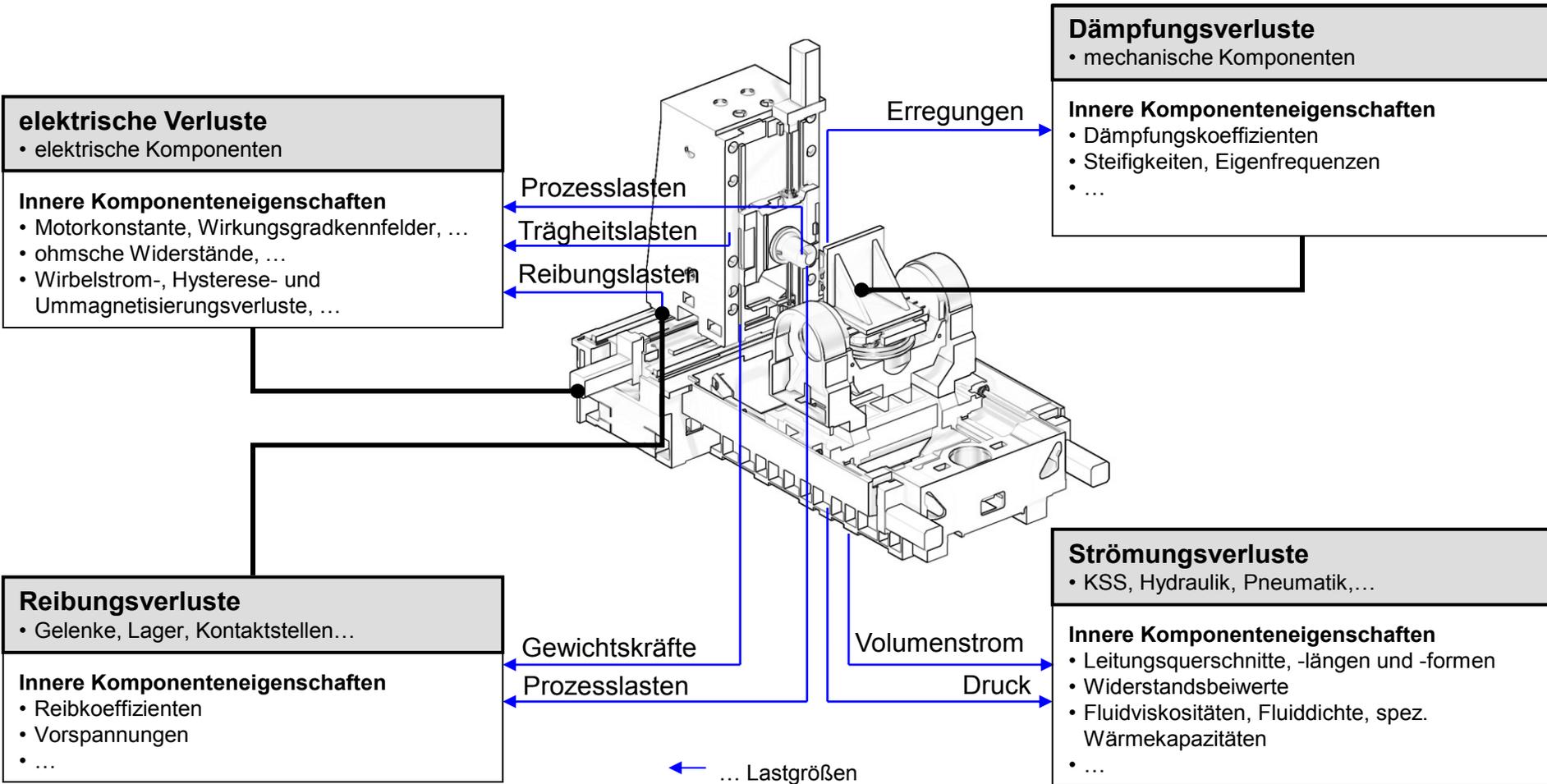
1 Energieeffizienz in der Produktionstechnik

Systemabgrenzung und Verbraucheridentifikation



2 Energieeffizienz in der Produktionstechnik

Abhängigkeiten von Verlusten



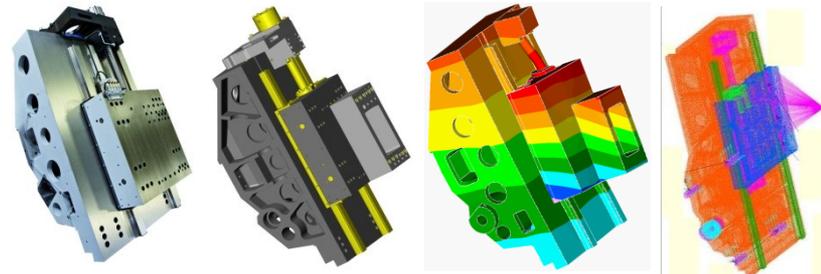
2 Energieeffizienz in der Produktionstechnik

Beispiel: Energieeffizientes Dreh-Fräs-Zentrum



Steigerung der Energieeffizienz um ca. 30 %
durch handlungsfeldübergreifende Umsetzung von eniPROD-Grundlagen

- optimale Systemkonfiguration für jede Technologie
- Befähigung zur Trockenbearbeitung
- prozessoptimierte Antriebskonfiguration
- Stand-by und energy monitoring
- Verfahrenssubstitution
- Leichtbaukonzepte Frästürme
- ...

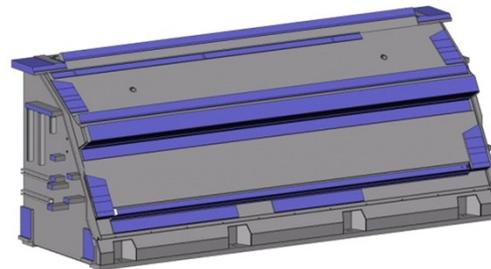


FE-Komponentenoptimierung



Ausbauvariante Kurbelwellenfräsmaschine

Direktantrieb statt
Servomotor mit
Getriebe



Maschinenbett in Verbundbauweise



Feindrehfräsen statt
Schleifen



bedarfsgerechte
Nebenaggregate

Energieoptimale Strukturen durch Leichtbau und Mechatronik

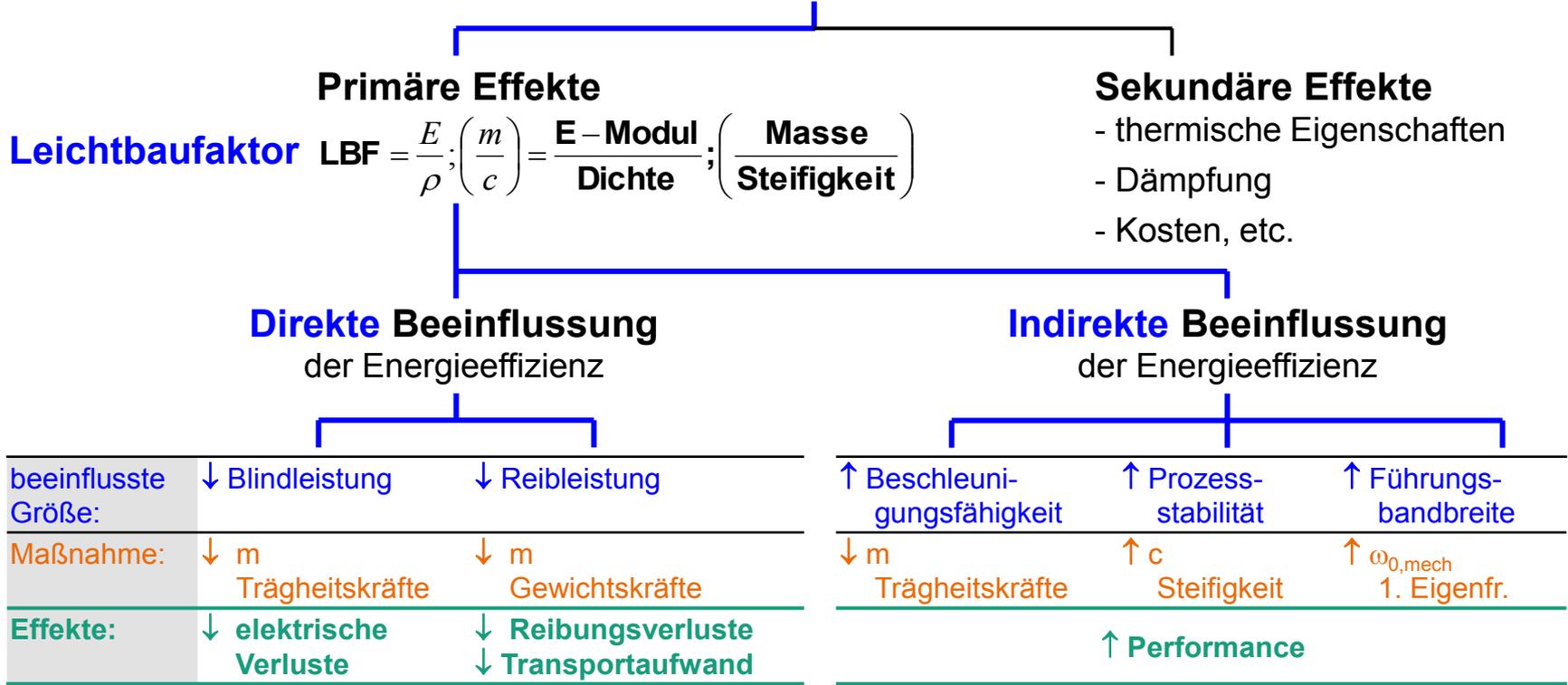
Gliederung

- 1 Einführung
- 2 Energieeffizienz in der Produktionstechnik
- 3 Energieeffizienz durch Leichtbau
- 4 Energieeffizienz durch Mechatronik

3 Energieeffizienz durch Leichtbau

Eingriffsmöglichkeiten

Energetisch relevante Leichtbaueffekte in Werkzeugmaschinen-Servoachsen



Senkung → des prozentualen Grundlastanteils je Werkstück
→ der Bearbeitungszeit

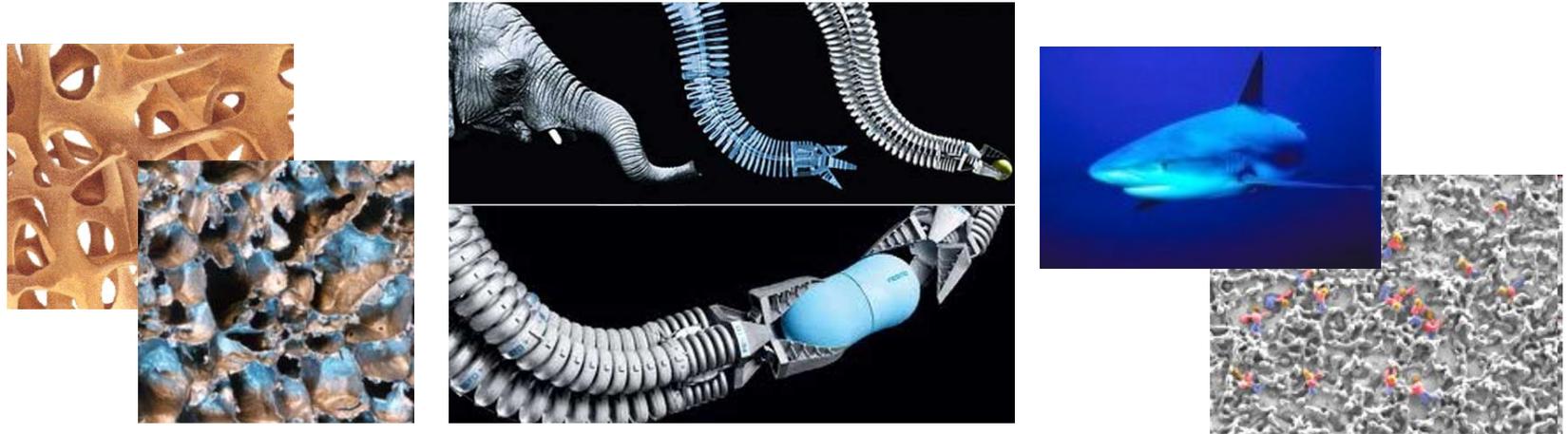
3 Energieeffizienz durch Leichtbau

Lösungsansatz Bionik

Bionische Analogien:

Die Lösungen in der Natur basieren auf **Langzeitoptimierungs**prozessen durch Evolution.

Kurzzeitoptimierungen technischer Systeme sind effizient durch Lernen von der Natur.



3 Energieeffizienz durch Leichtbau

Bionisch inspirierte Werkzeugmaschinen – Gestaltung

- **Strukturbionik**

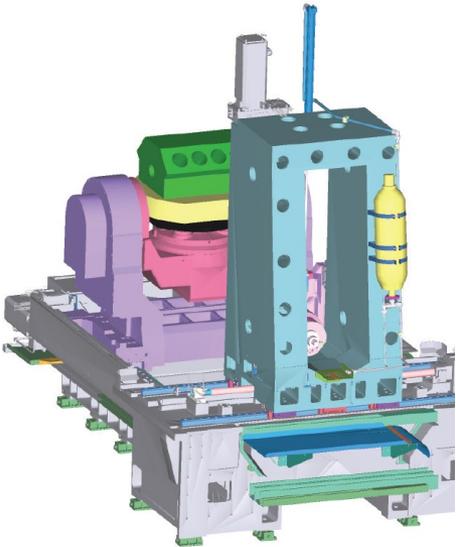
→ Leichtbau durch belastungsorientiertes Strukturdesign

- **Bewegungsbionik**

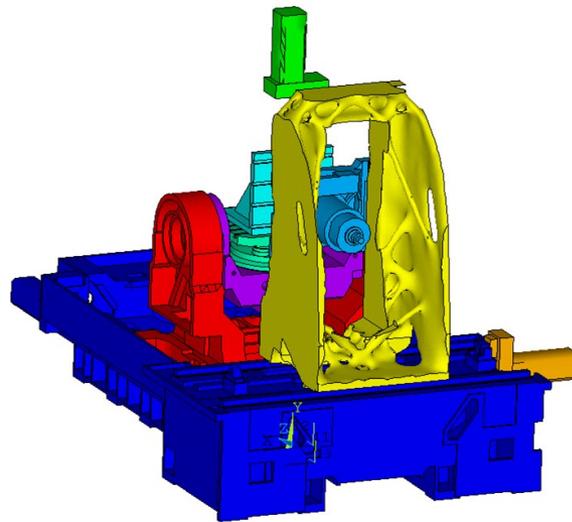
→ energetisches Optimum $f(\text{Masse, Weg})$

Bsp.: **Mobile Werkzeugmaschine**

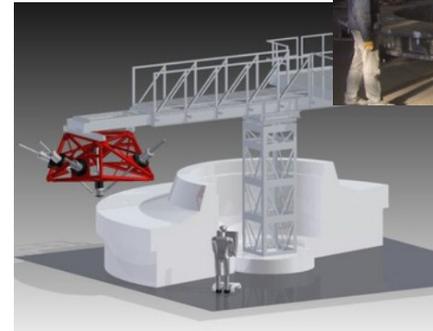
Ausgangsdesign



Strukturoptimierung



Entwurf



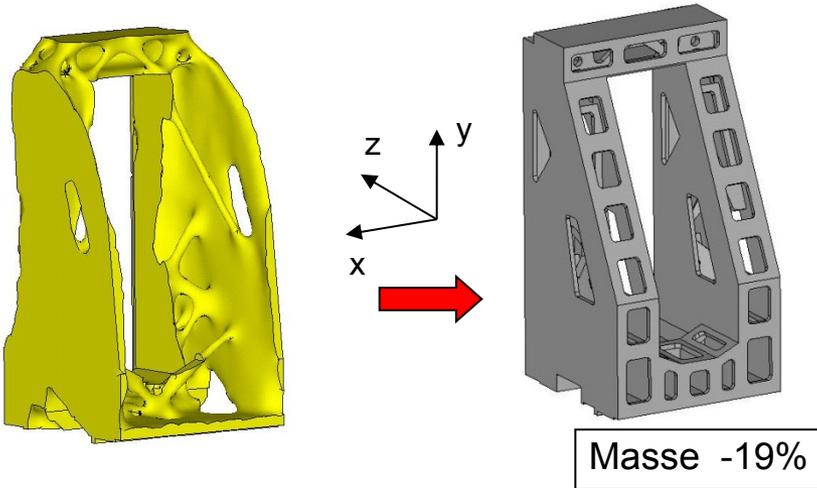
Industrielle Anwendung
(Metrom / Fh-IWU)

↑ **Werkstück vs.** ↓ **Arbeitsraum**
(z.B. Energietechnik)

3 Energieeffizienz durch Leichtbau

Bionisch inspirierte Werkzeugmaschinen – Struktur**bionik**

Strukturleichtbau Stahlkonstruktion



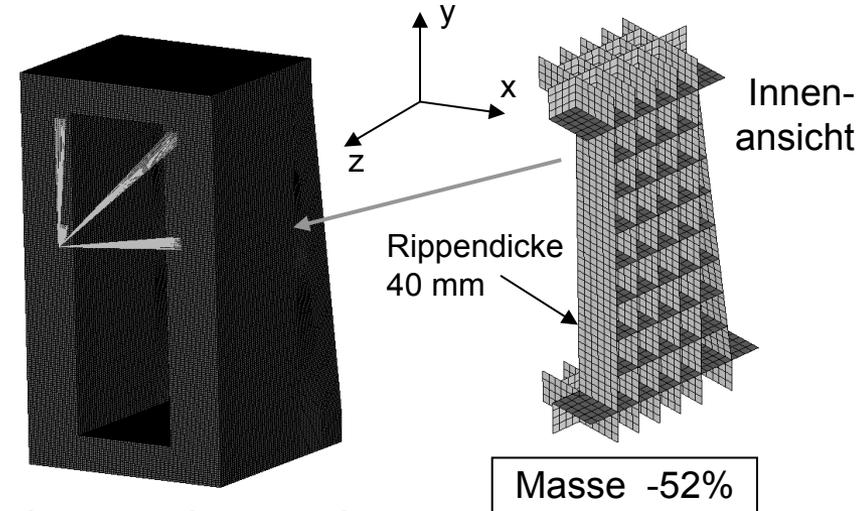
Topologie-
optimierung

konstruktive Interpretation

Schlittenmasse	-19%
Steife x	-25%
Steife y	-0,5%
Steife z	-10%

Struktur- und Stoffleichtbau Kohlefaserverstärkter Kunststoff (CFK)

Differentialbauweise



Quelle: TU Chemnitz, SLK

Schlittenmasse	-52%
Steife x	+14%
Steife y	+96%
Steife z	-19%

3 Energieeffizienz durch Leichtbau

Bionisch inspirierte Werkzeugmaschinen – Strukturbionik

5-Achs-BAZ: Effekte Stoffleichtbau – Aluminiumschaum

Aufbauprinzip:

11 Stahl-Aluschaum Sandwiches mit Massivteilen ergänzt

Effekte Al-Schaum:

- 28% leichter bei gleicher Steifigkeit

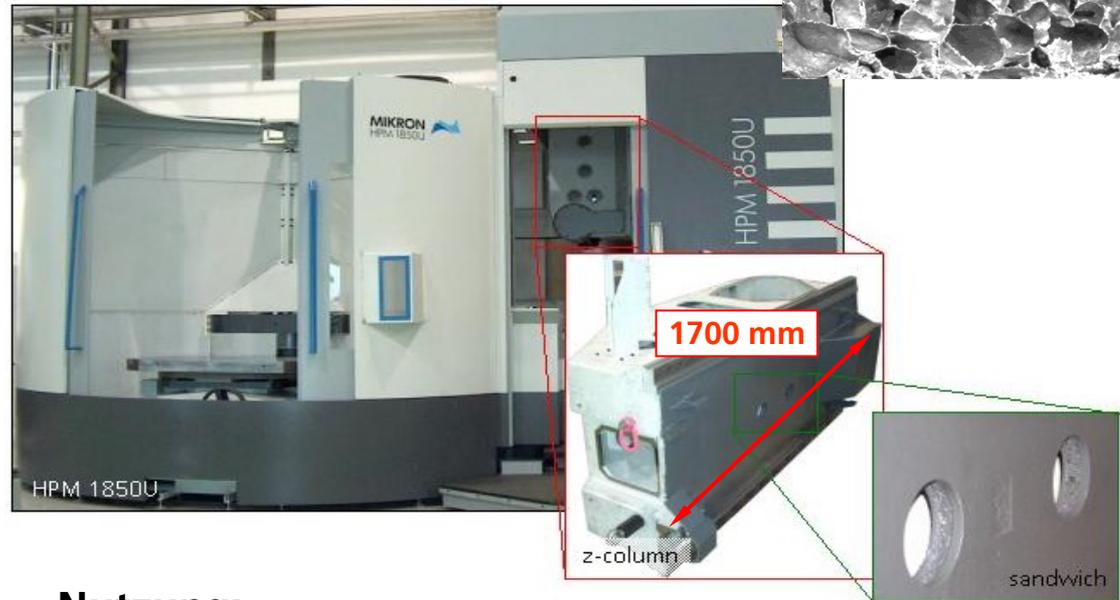
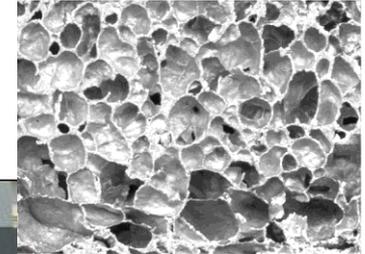
Potenzial CFK-Hybrid:

- 45% leichter bei gleicher Steifigkeit...

...aber 2,5fache Kosten!



Konzept CFK-Hybridbauweise



Nutzung:

Serienfertigung seit 2004
(ca. 15 Stück/Jahr)

Z-Schlitten

Sandwich

Quelle: Fraunhofer IWU/NILES-SIMMONS

3 Energieeffizienz durch Leichtbau

Bionisch inspirierte Werkzeugmaschinen – Strukturbionik

Hybrid-Gewindetrieb

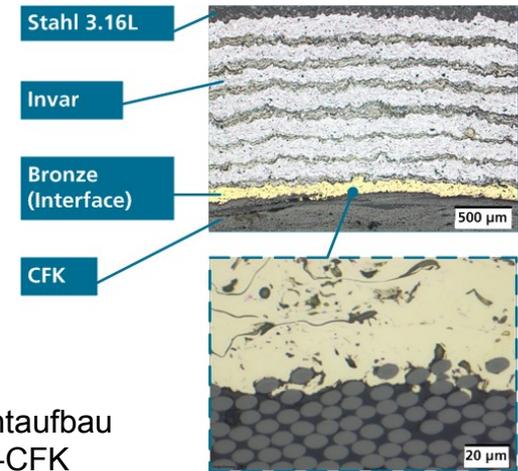


Aufbau

Kern aus CFK

- Unidirektionale, axiale UHM-Fasern für Axialsteifigkeit
- +/-45° Wickellaminat zur Einleitung der Torsionskräfte und Realisierung der Torsionssteifigkeit

Thermisch gespritzte Funktionsschicht für Kugellaufflächen und zur Krafteinleitung der KGT-Mutter



Schichtaufbau Metall-CFK



Prototyp

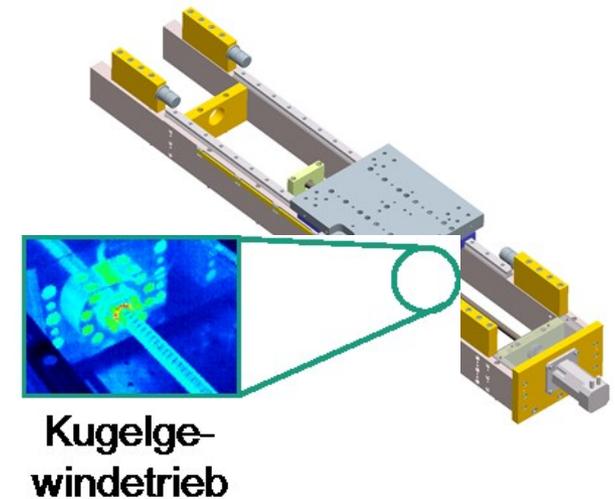
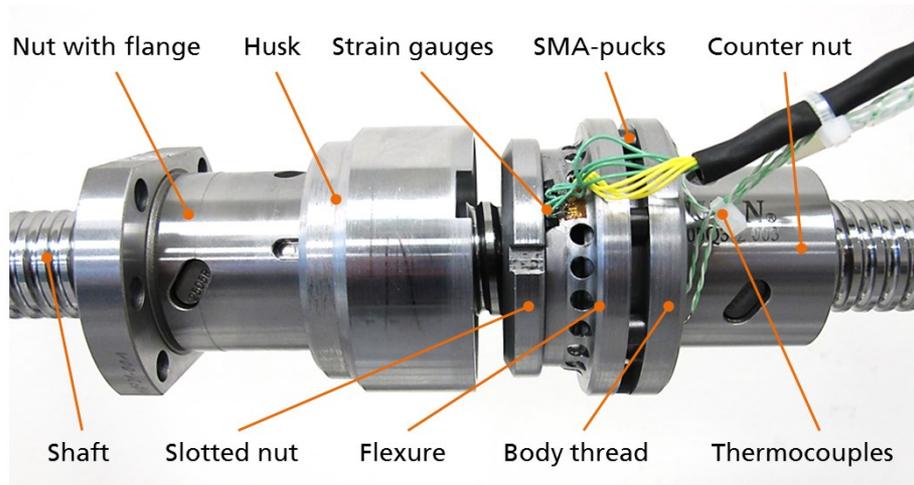
3 Energieeffizienz durch Leichtbau

Bionisch inspirierte Werkzeugmaschinen – Strukturbionik

Vorspannungsvariation in Kugelgewindetrieben

Basis thermische Formgedächtnislegierungen (NiTi)

- nutzen Prozesswärme zur Aktivierung des FG-Effektes → **energieautarkes, selbstregelndes System** → Energieflussanalyse notwendig
- Hohe Energiedichte
- Unkritisch bzgl. Quer- und Momentenbelastung

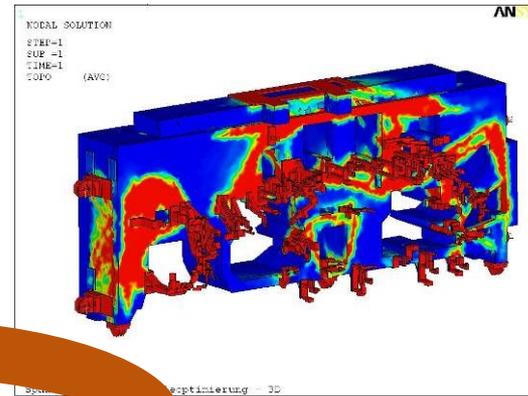
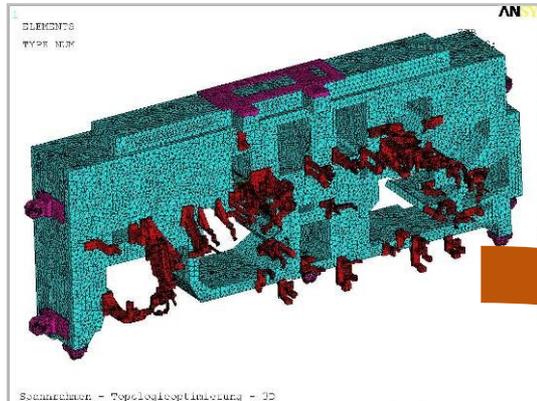


3 Energieeffizienz durch Leichtbau

Bionisch inspirierte Werkzeugmaschinen – Strukturbionik

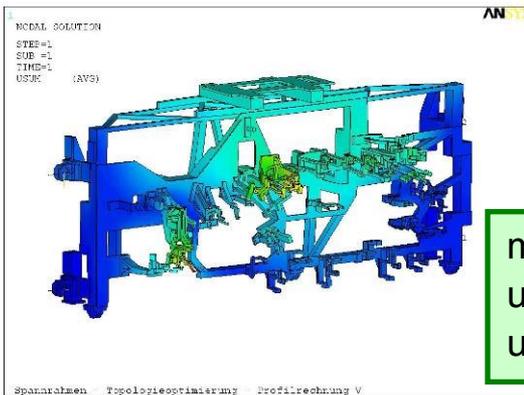
Topologieoptimierte Schweißkonstruktion für Spannrahmen im Karosseriebau

Designraum für Topologieoptimierung



Materialwichtung als Ergebnis der Topologieoptimierung

Berechnung mechanischer Eigenschaften der Schweißkonstruktion



$m_{\text{Rahmen}}: -37,8 \%$
 $U_{\text{Rahmen}}: -37,9 \%$
 $U_{\text{ges}}: +4,7 \%$



Ableitung der Schweißkonstruktion

3 Energieeffizienz durch Leichtbau

Bionisch inspirierte Werkzeugmaschinen – Strukturbionik

Topologieoptimierte Gusskonstruktion für Spannrahmen im Karosseriebau



Stahlschweiß-
konstruktion



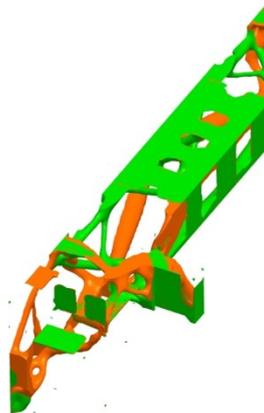
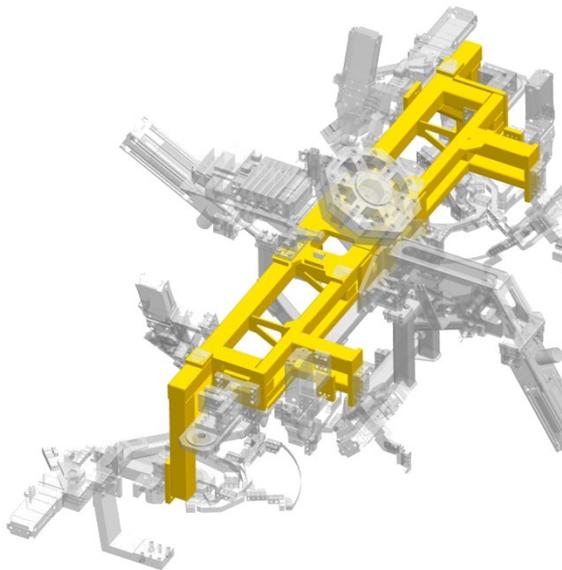
Topologie-
optimierung



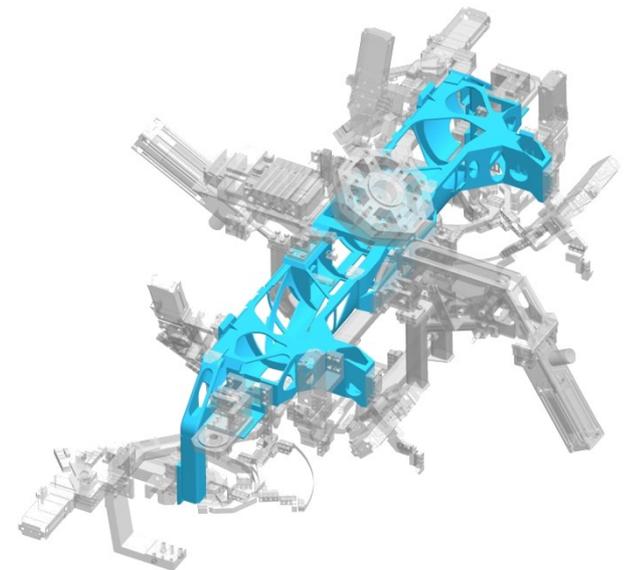
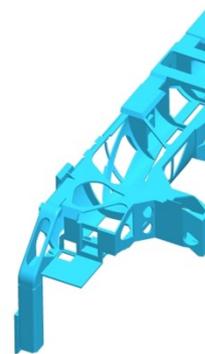
Abgeleitetes
Gussmodell



Gusskonstruktion
in Gesamtbaugruppe



Betriebs- +
Hebelastfall



25% Massereduktion der optimierten Baugruppe bei gleicher Steifigkeit

3 Energieeffizienz durch Leichtbau

Bionisch inspirierte Werkzeugmaschinen – Bewegungsbionik

Beispiel: Mobile Werkzeugmaschinen

Bearbeitung großer Werkstücke mit kleinen Maschinen



mobile **Fräseinheit** für Kraftwerks-Instandsetzung (METROM / IWU)



Specht



mobile **Schleifeinheit** für Walzeninstandsetzung in der Papierherstellung (Voith Paper Services / IWU)

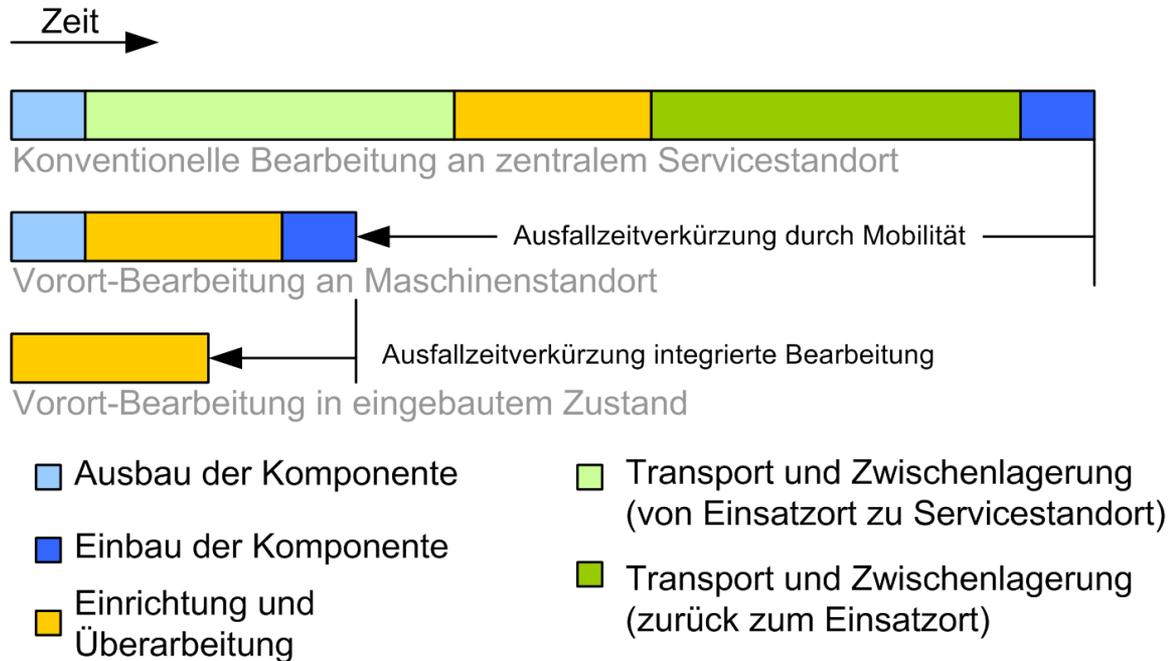
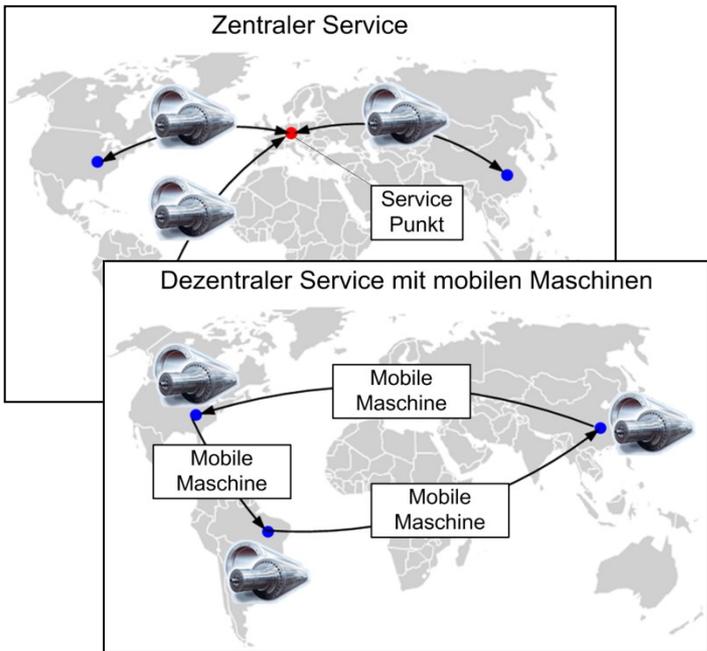
Wissenschaftliche Herausforderungen:

- **Orientierung** am Koordinatensystems des Werkstücks
- Werkstück ist Teil der **Maschinenstruktur**
- **hochdynamische, energieeffiziente** Technologien mit **niedrigen Bearbeitungskräften**

3 Energieeffizienz durch Leichtbau

Bionisch inspirierte Werkzeugmaschinen – Bewegungsbionik

Mobile Bearbeitung: Potentiale zur Energie-, Kosten- und Zeiteinsparung



Energieaufwand Transport

0,08 kWh / (kg 100km) (Straße); 2,7 kWh / (kg 100km) (Luft)

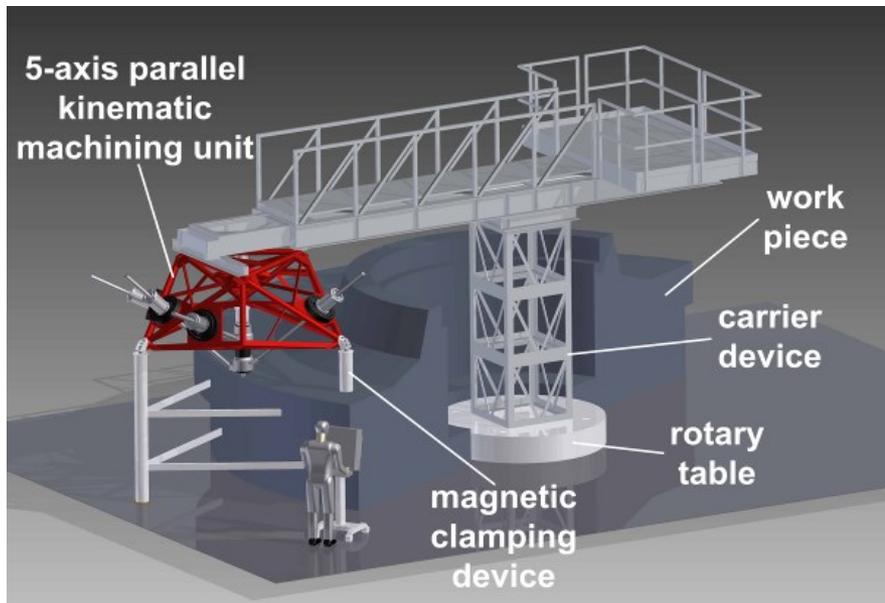
0,01 kWh / (kg 100km) (Wasser); 0,02 kWh / (kg 100km) (Schiene)

3 Energieeffizienz durch Leichtbau

Bionisch inspirierte Werkzeugmaschinen – Bewegungsbionik

Beispiel: Mobile Bearbeitung von Wasserturbinengehäusen

- 5-Achs-Parallelkinematik als Bearbeitungseinheit
- Nutzung eines Zusatzgestells + Rundtisch zur globalen Positionierung
- Lagezuordnung durch taktile Messung von Referenzgeometrien
- Schnittstelle Maschine/Werkstück durch Magnetklemmung und Zusatzgestell



Gesamtkonzept Bearbeitungssatellit



Bearbeitung eines Testwerkstückes

3 Energieeffizienz durch Leichtbau

Bionisch inspirierte Werkzeugmaschinen – Bewegungsbionik



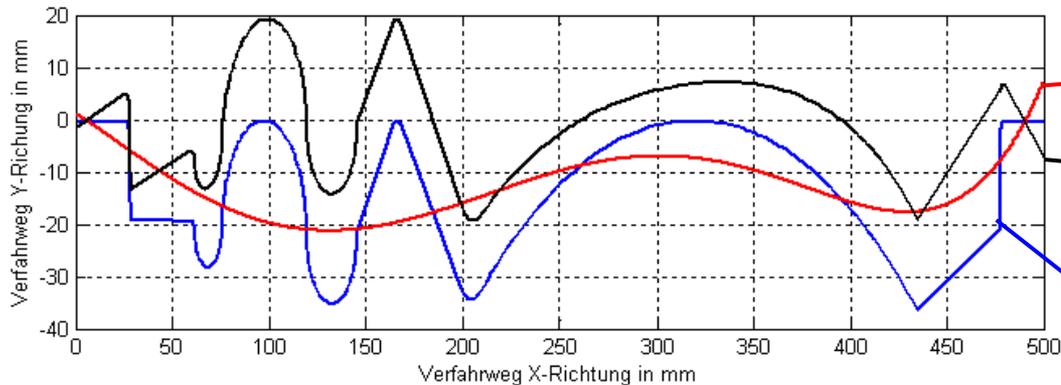
3 Energieeffizienz durch Leichtbau

Bionisch inspirierte Werkzeugmaschinen – Bewegungsbionik

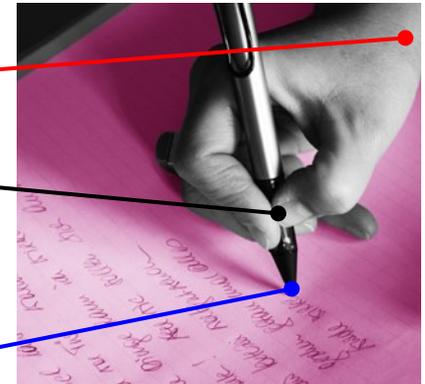
Prinzip: Bewegungsüberlagerung (Redundanz)

➔ energieeffizientes Bewegungsprinzip

Beispiele in Natur: Frosch (Zunge), Elefant (Rüssel), Mensch (Hand)



Referenzweg



Analogie: Schreiben

Global – niedrig-dynamisch (Arm / seriell)

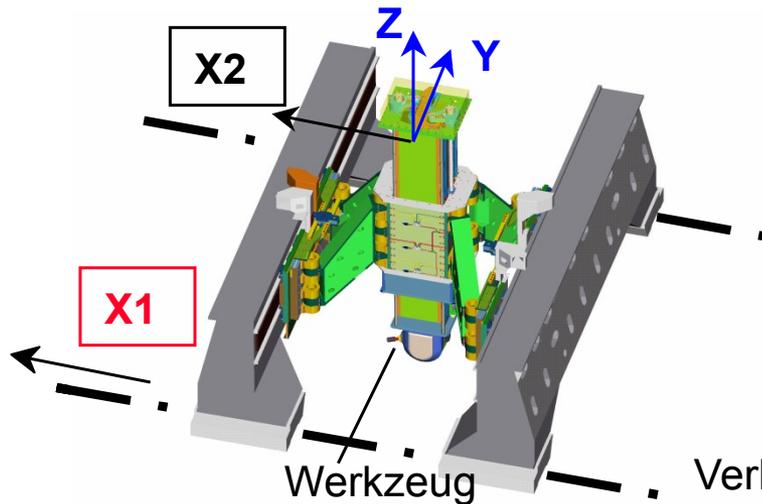
Lokal – hoch-dynamisch (Hand / parallel)

3 Energieeffizienz durch Leichtbau

Bionisch inspirierte Werkzeugmaschinen – Bewegungsbionik

Redundanz realisiert in Scherenkinematik

- geeignet für **HPC + HSC**
- große Massen → **Bewegungs**-Redundanz
- hohe **Steifigkeit** → **Aktuator**-Redundanz
- hohe **Genauigkeit** → **Sensor**-Redundanz

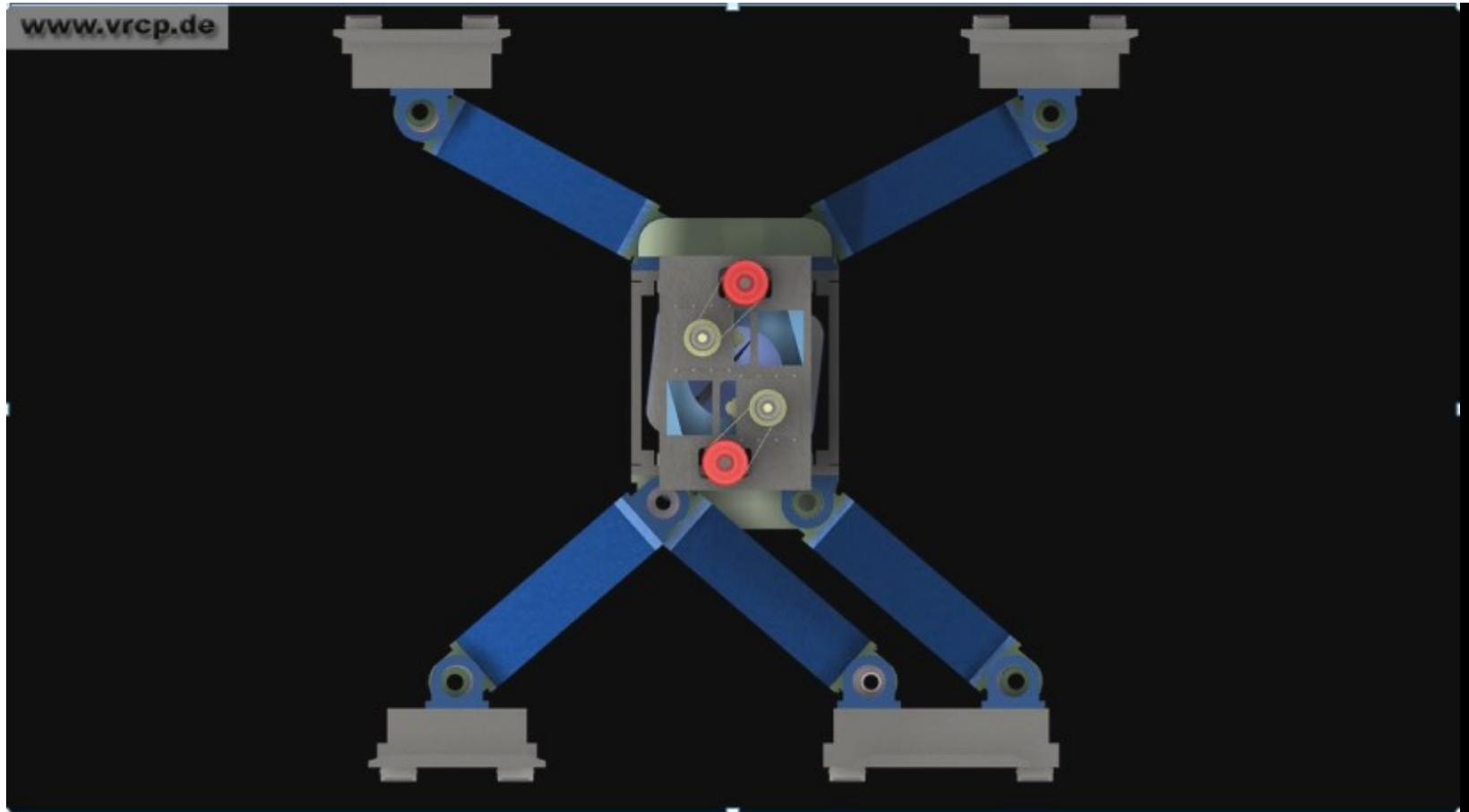


Verbundprojekt
Fraunhofer IWU, Volkswagen AG,
Niles-Simmons Industrieanlagen GmbH



3 Energieeffizienz durch Leichtbau

Bionisch inspirierte Werkzeugmaschinen – Bewegungsbionik



Energieoptimale Strukturen durch Leichtbau und Mechatronik

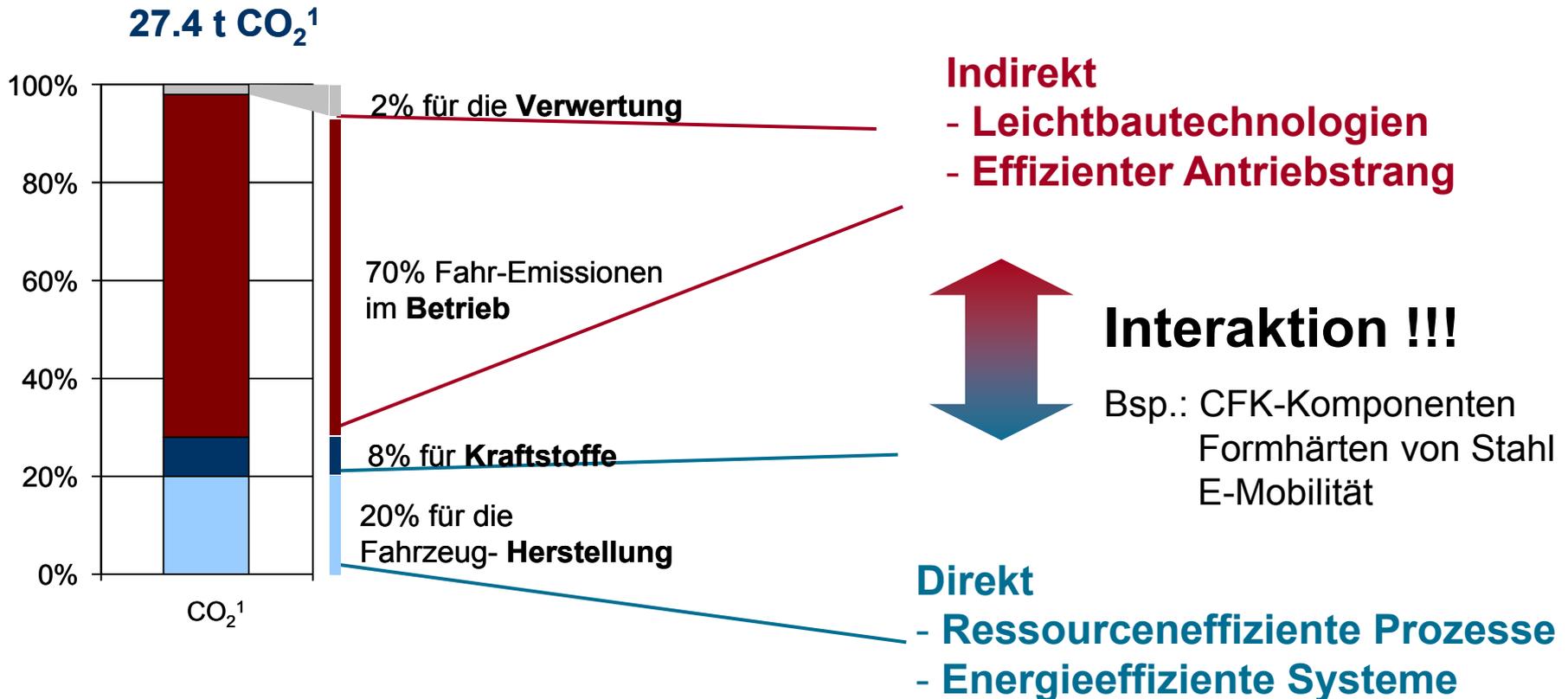
Gliederung

- 1 Einführung
- 2 Energieeffizienz in der Produktionstechnik
- 3 Energieeffizienz durch Leichtbau
- 4 Energieeffizienz durch Mechatronik

4 Energieeffizienz durch Mechatronik

Finale Bauteileigenschaften

Beispiel : Verbrauch von CO₂-Äquivalenten (Golf VI)



Quelle: Heizmann; Volkswagen AG, Nachhaltige Produktion in der Automobilindustrie, Vortrag ICMC 2010

4 Energieeffizienz durch Mechatronik

Finale Bauteileigenschaften

Adaptive Spindelhalterung

Motivation

Fertigung energieeffizienter
Maschinenelemente



Aktive Kontrolle der
Schneidkante



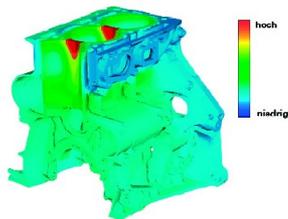
Höchstpräzise Subkinematik
mit Piezokeramischen Aktoren

Konzept

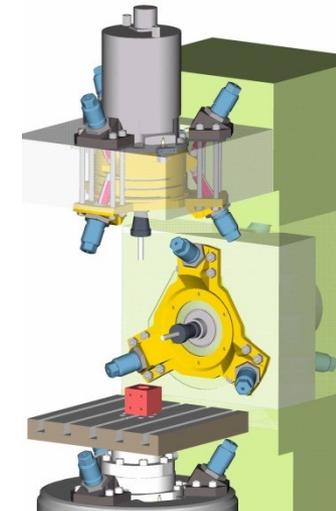
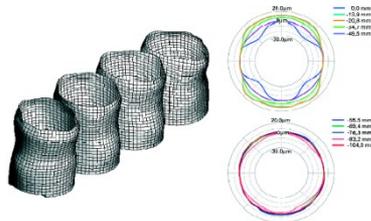
Beispiel: Optimaler Zylinder-Kolben-Kontakt für Niedrig-Verbrauchs-Motoren

1. Pre-Kompensation des
thermisch bedingten
Verzuges durch
inverse Konturierung

2. Optimales Reibungsverhalten
durch Mikrostrukturierung



Quelle: Grunow et.al.
Das Zylinderkurbelgehäuse
der neuen R4-TFSI
Motorengeneration
von Audi MTZ 05/2007
Jahrgang 68



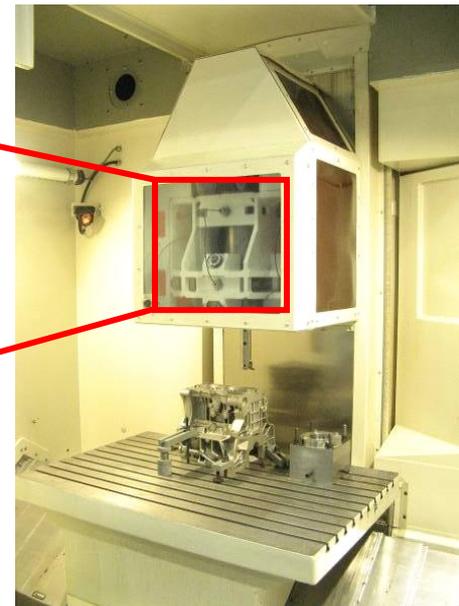
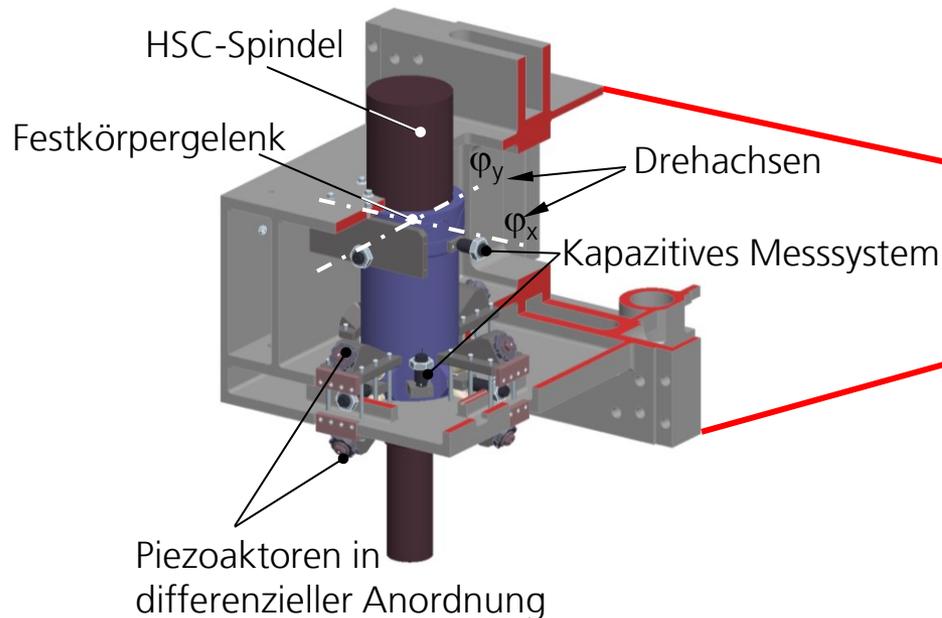
Integrationsvarianten
einer Subkinematik
In Werkzeugmaschinen

4 Energieeffizienz durch Mechatronik

Finale Bauteileigenschaften

Adaptive Spindelhalterung

- Lagerung der Spindel in einem Festkörpergelenk zur Realisierung von 3 Freiheitsgraden (φ_x , φ_y , z)
- 8 Hochvolt Piezoaktoren in differentieller Anordnung
- Ansteuerung der Kinematik mittels Rapid-Prototyping-System dSPACE



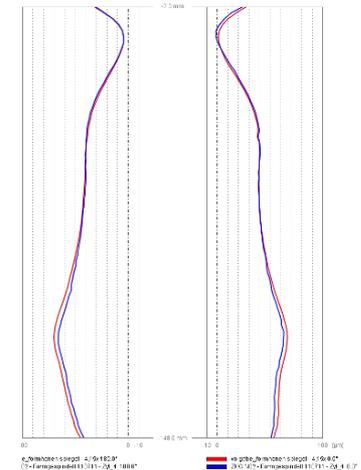
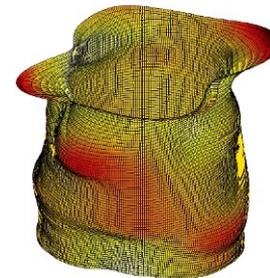
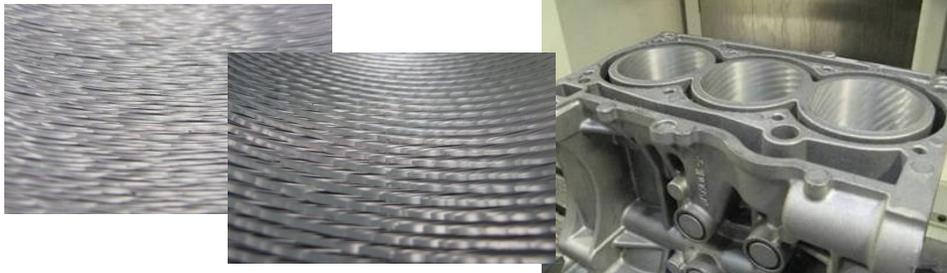
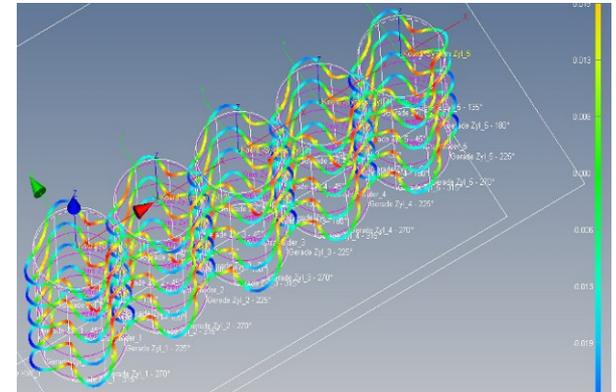
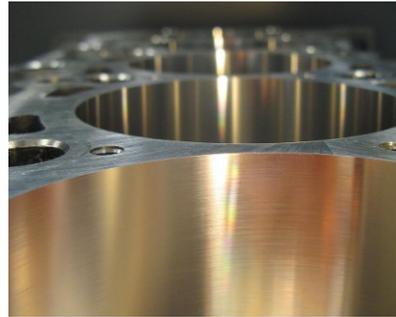
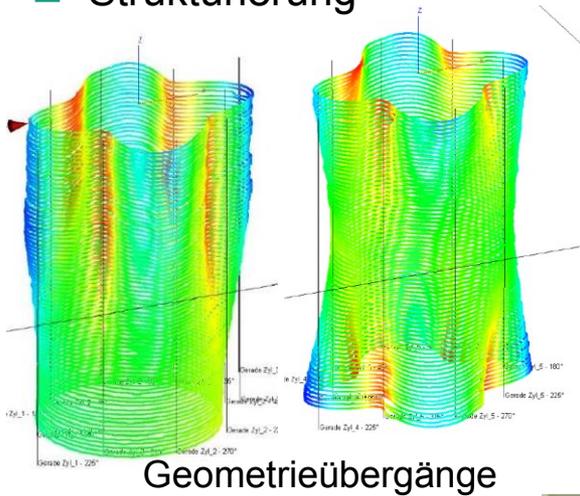
4 Energieeffizienz durch Mechatronik

Finale Bauteileigenschaften



Adaptive Spindelhalterung

- Unrundbearbeitung bis 6000 U/min untersucht bei $\pm 60 \mu\text{m}$
- Abweichung zur vorgegeben Kontur $< 5 \mu\text{m}$
- Oberflächenrauheit $R_z < 2 \mu\text{m}$
- Strukturierung



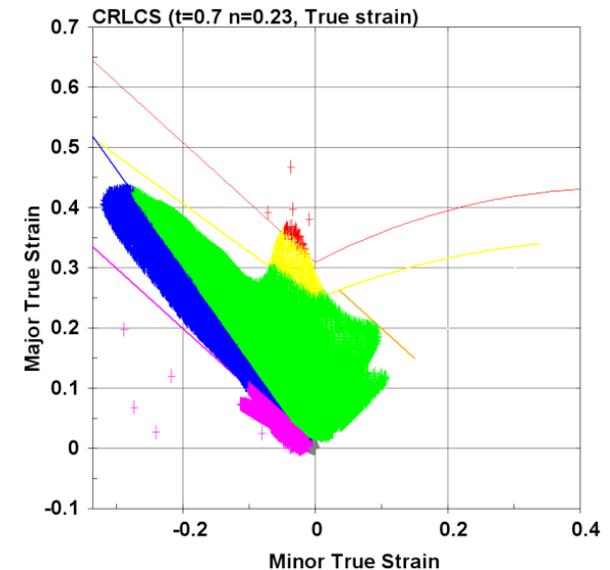
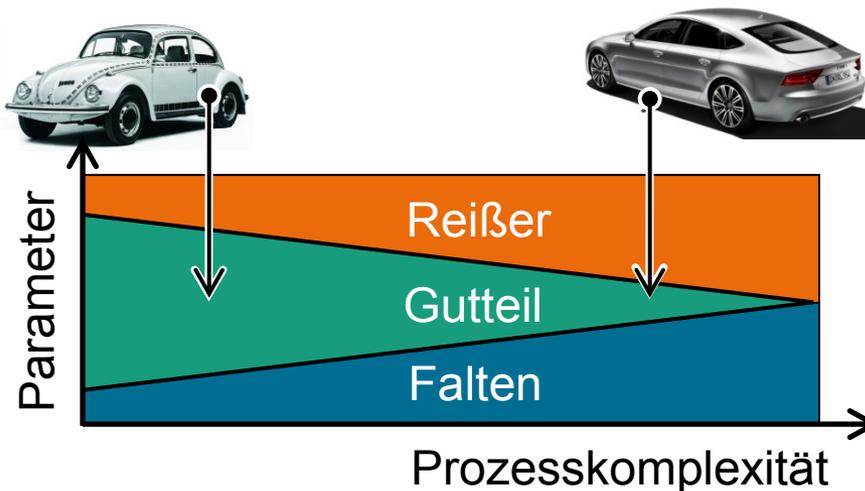
4 Energieeffizienz durch Mechatronik

Finale Bauteileigenschaften



Aktive Tiefziehmatrize

- Steuerung der Werkstoffflusses beim Tiefziehen
- Anspruchsvolle Bauteilgeometrien und
- schwer umformbare Werkstoffe führen zu...
 - Nicht gegebener Machbarkeit oder
 - Bei gegebener Machbarkeit zu erhöhten Einarbeitungsaufwänden



Grenzformänderungskurve

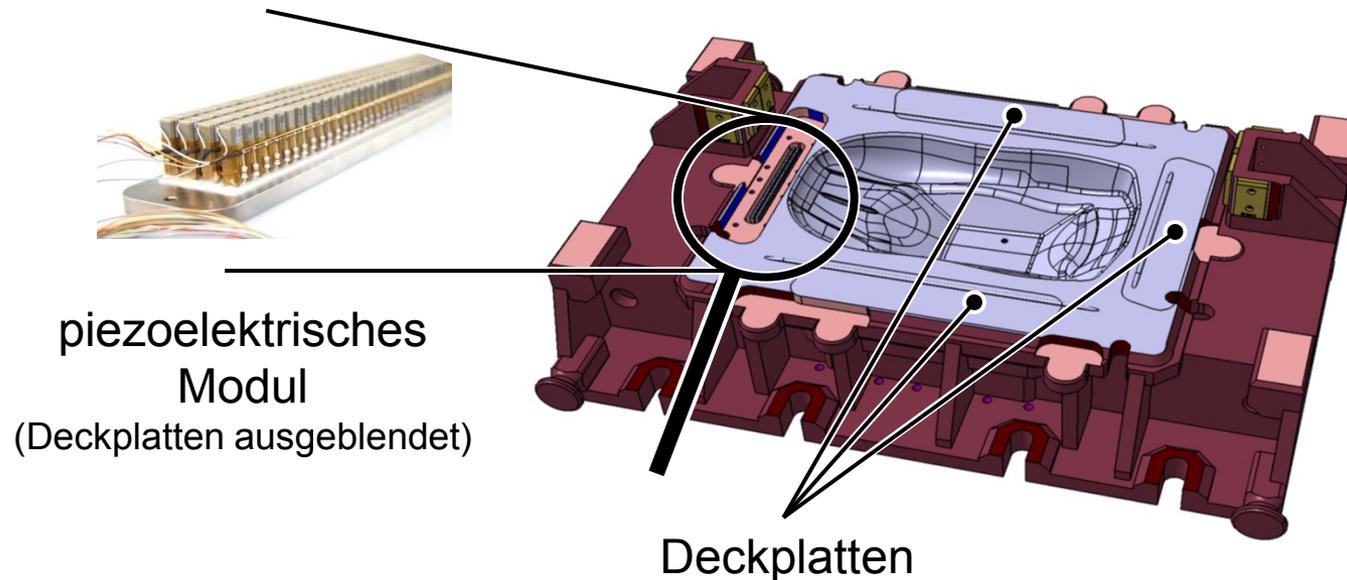
4 Energieeffizienz durch Mechatronik

Finale Bauteileigenschaften



Aktive Tiefziehmatrize

- Einsatz von vier piezoelektrischen Modulen in der Matrize
 - Realisierung von piezoelektrisch einstellbaren Druckbildern im Flanschbereich



Quelle: Mainda, P. ; Kerschner, M. ; Hein, C. ; Drossel, W.-G.: Integrated piezoelectric actuators in deep drawing tools to reduce the try-out. In: Hirt, G.: 10th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2011. Proceedings : 25-30 September 2011, Aachen Weinheim: Wiley-VCH, 2011, S.352-355

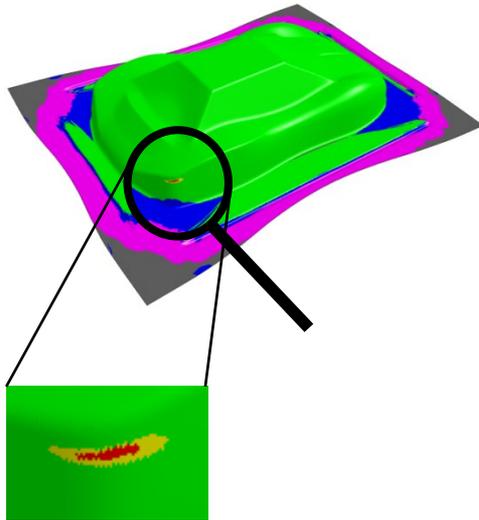
4 Energieeffizienz durch Mechatronik

Finale Bauteileigenschaften

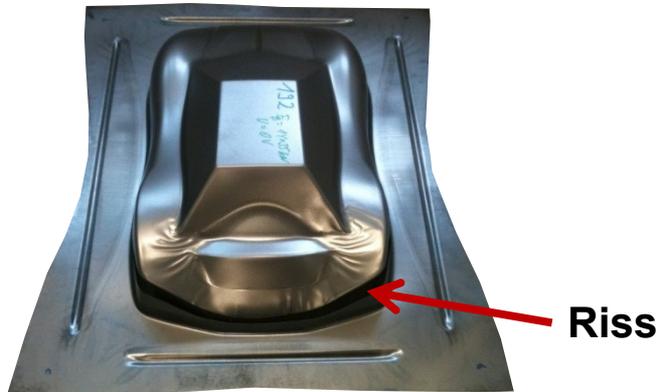
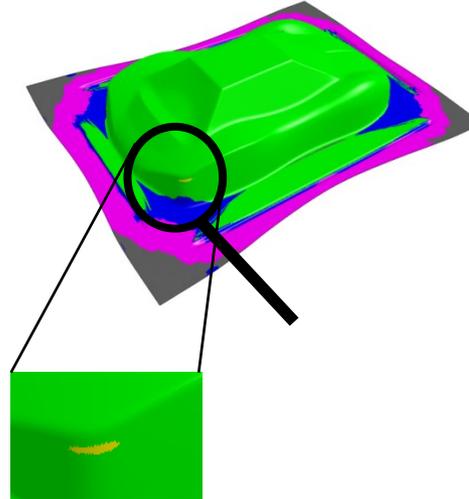


Aktive Tiefziehmatrize

Aktoren **AUS**



Aktoren **EIN**



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dieses Projekt wird gefördert von der Europäischen Union aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) sowie aus Landesmitteln des Freistaats Sachsen.



STAATSMINISTERIUM
FÜR WISSENSCHAFT
UND KUNST



Freistaat
SACHSEN