



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN



Fakultät Maschinenwesen
Institut für Mechatronischen Maschinenbau
Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen
Prof. Dr.-Ing. S. Ihlenfeldt



Realer Nutzen aus virtuellen Modellen am Beispiel Werkzeugmaschinen – Blick in unterschiedliche Eigenschaftsbereiche

S. Ihlenfeldt

A. Hellmich



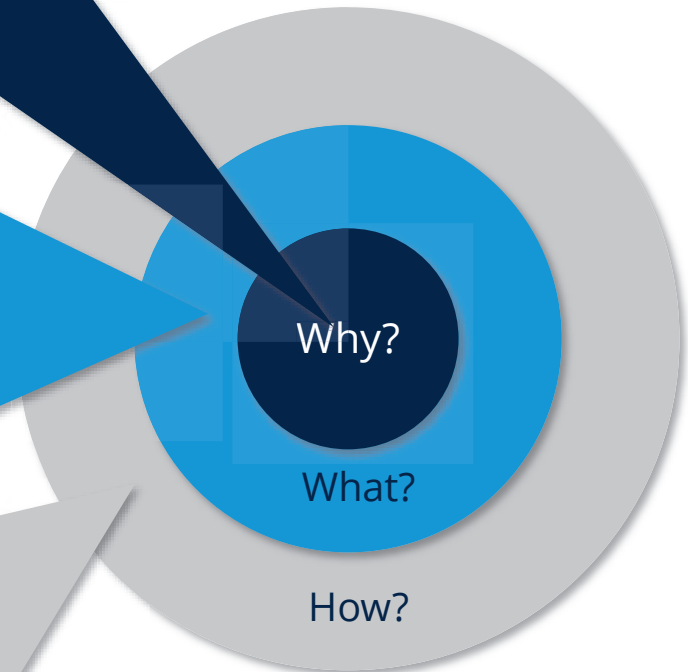
ARBEITSKREISTREFFEN »ENERGIEEFFIZIENTE PRODUKTION«

11.04.2019

Wir glauben, dass **Null-Fehler-Produktion** und **kleine Losgrößen** auch in Kombination möglich sind

Dies kann durch sich **selbst optimierende Produktionssysteme** mit intelligenten Funktionen erfolgen

Diese Systeme verbinden **digitale Modelle, intelligente Aktuatoren und Sensoren** sowie **erweiterte Steuerungsfunktionalitäten**.



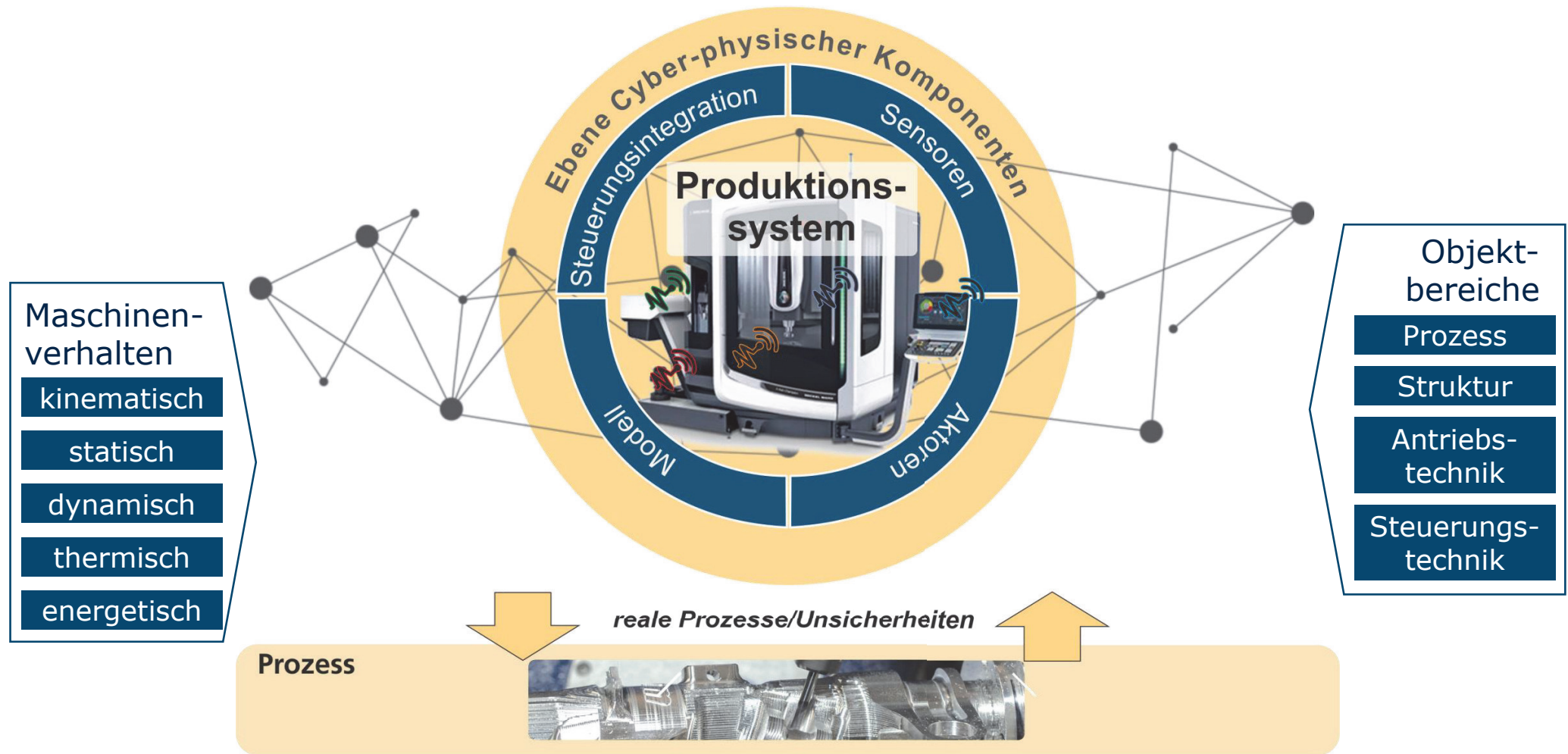
Struktur des Vortrags:

- 1. Situativ optimale Werkzeugmaschinen mit digitalen Modellen**
2. Systemsimulation für Vorschubachsen
3. Simulation der Maschine – Prozess- Interaktion
4. Modellierungsworkflow zur Optimierung der Temperierung von Maschinenbetten
5. Fazit und Ausblick

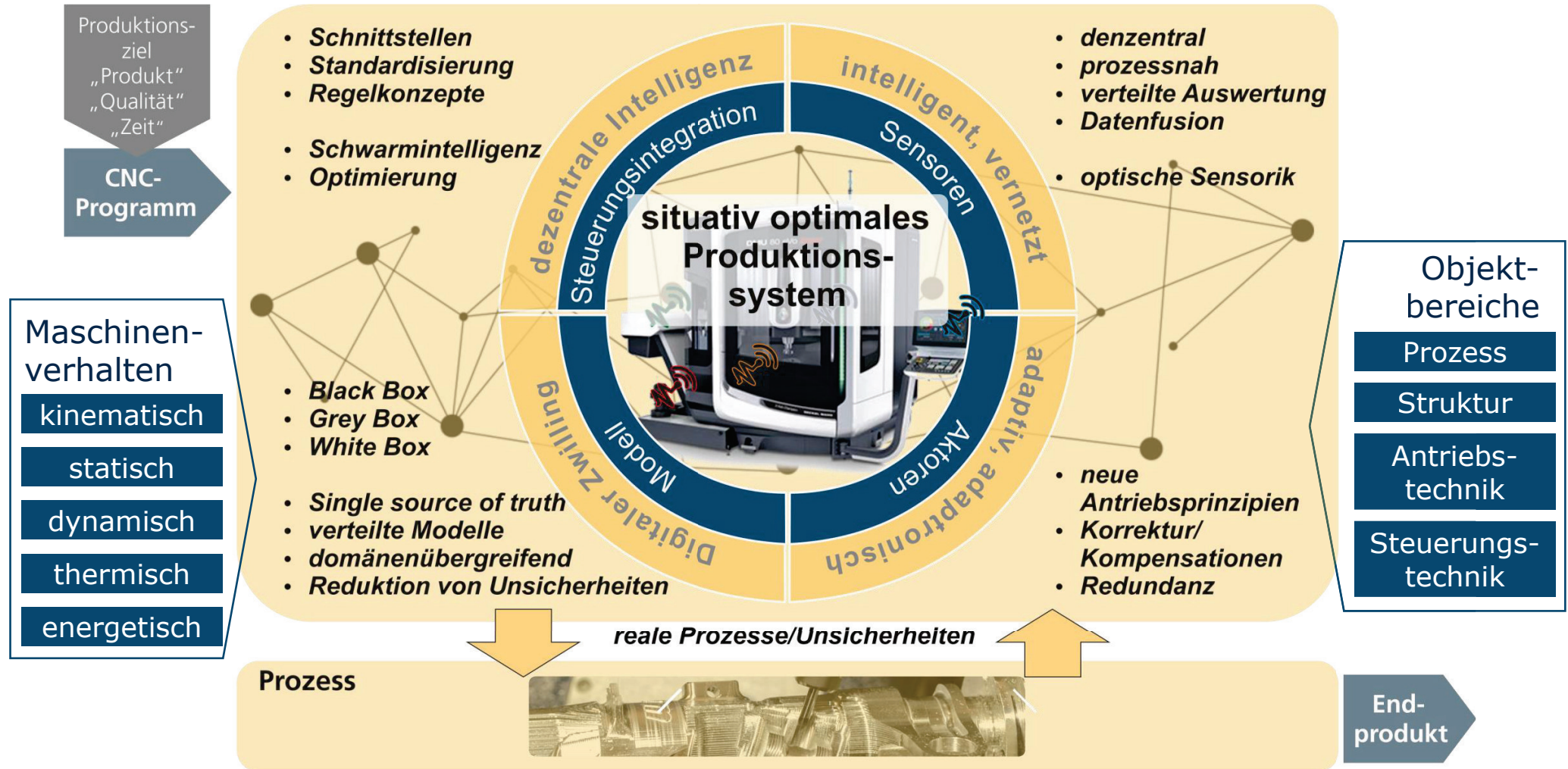


Bild: TU-Chemnitz

Betrachtungsebenen eines Produktionssystems



Betrachtungsebenen eines Produktionssystems



Situativ optimale Werkzeugmaschinen erfordern digitale Modelle

Selbstoptimierung¹

- Kombination von Vorteilen kybernetischer und deterministischer Modelle
- Entwurf von Systemen, die in der Lage sind, ihren Zustand bzw. ihre Struktur entsprechend den Veränderungen der äußeren Bedingungen zu ändern

Digitales Modell (Digitaler Zwilling)

- repräsentiert das Verhalten der Werkzeugmaschine
- direkte Verknüpfung mit den Betriebsdaten
- Simulation des aktuellen Zustands der WZM
- gibt Auskunft über:
 - Optimierungsbedarf und
 - beste Optimierungsmaßnahmen

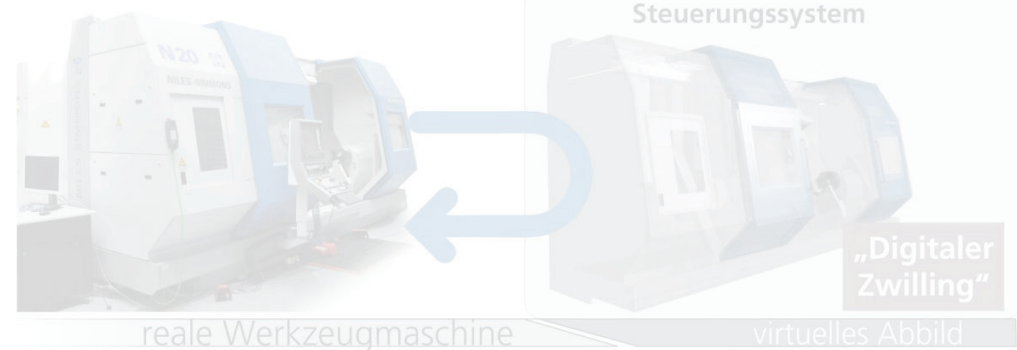
Modelldomänen

statisch

thermisch

dynamisch

energetisch



Anforderungen

- geringer Rechenaufwand/hohe Rechengeschwindigkeit
- hohe Genauigkeit, Adaptivität
- Steuerungsintegration

¹ Schmitt R, Brecher C, Corves B, Gries T, Jeschke S, et al.: Selbstoptimierende Produktionssysteme 2012

Struktur des Vortrags:

1. Situativ optimale Werkzeugmaschinen mit digitalen Modellen
- 2. Systemsimulation für Vorschubachsen**
3. Simulation der Maschine – Prozess- Interaktion
4. Modellierungsworkflow zur Optimierung der Temperierung von Maschinenbetten
5. Fazit und Ausblick

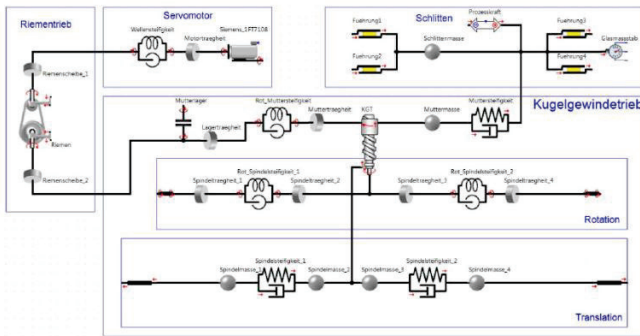


Bild: TU-Chemnitz

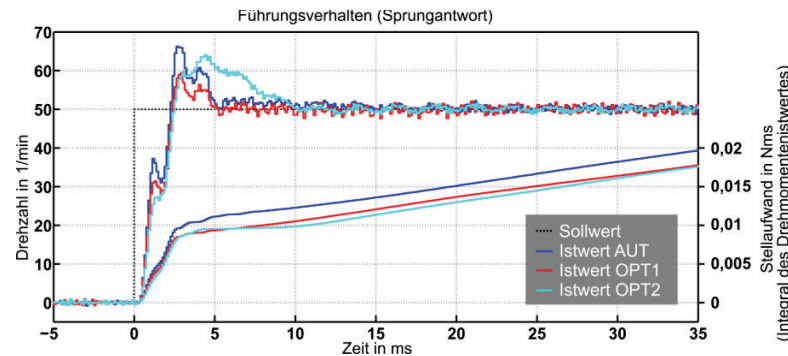
Systemsimulation im Lebenszyklus von WZM

Betrachtungsebene – Strukturvarianz - Parametergenauigkeit

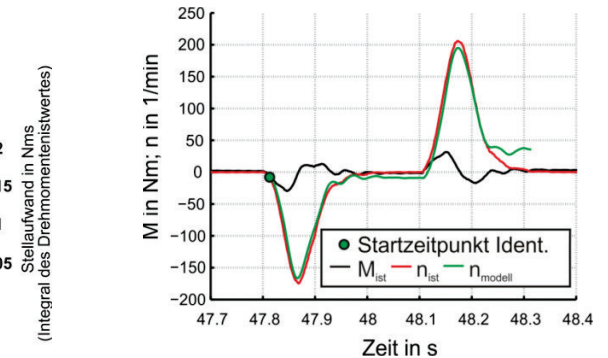
Gestaltung & Konstruktion



Inbetriebnahme



Betrieb



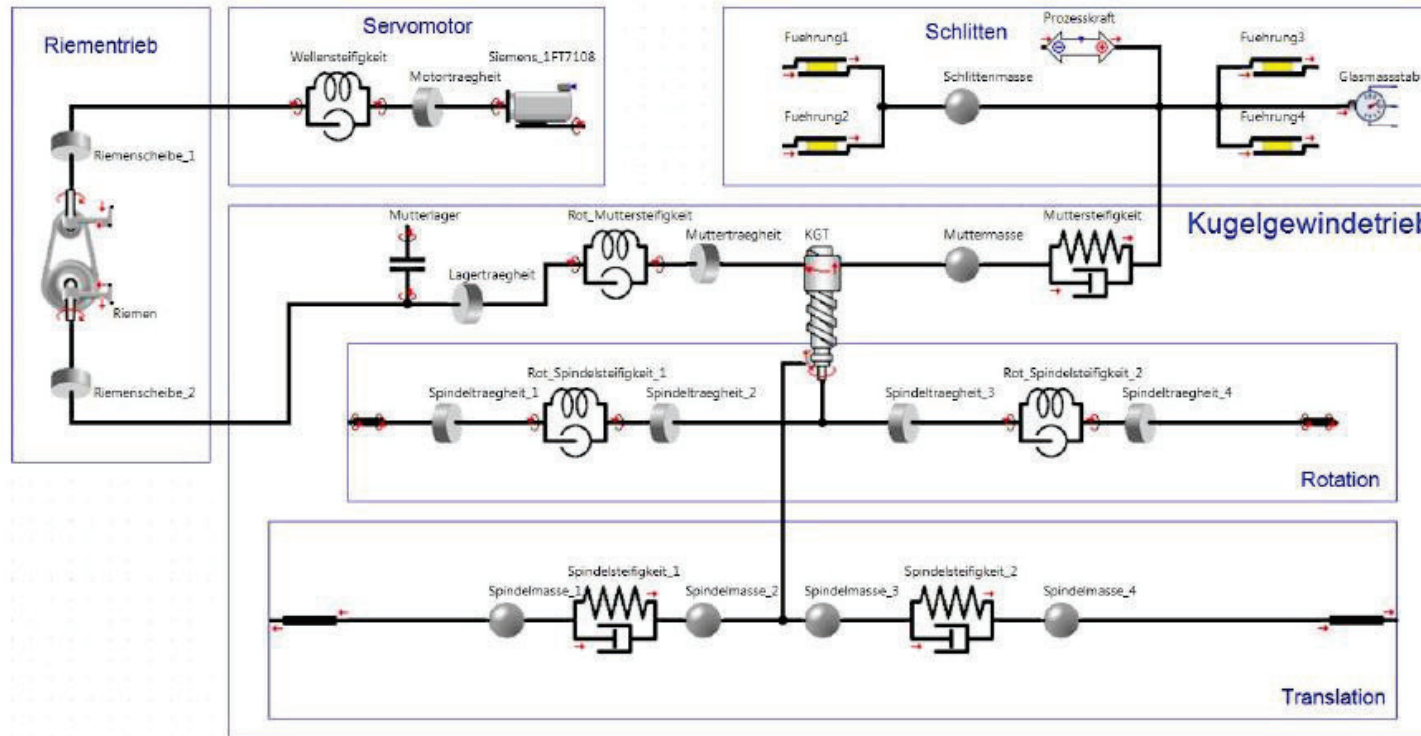
- Qualitativer Variantenvergleich
- Parameterabweichung zulässig → Abschätzung der Größenordnung
- Effiziente Auslegungsgestützung
- **Bewertung und Reduktion des Lösungsraumes**

- Simulationsbasierte Optimierung von Achsreglern
- Berücksichtigung von Nichtlinearitäten im Modell
- Verschiedene Optimierungskriterien möglich
- **Optimierung bei bleibender Dynamik und minimalem Energieverbrauch**

- Identifikation gezielter, funktionsbestimmender Parameter
- Punktuelle Modellierung mit physikalisch basierter Struktur
- **Erkenntnisgewinn im Betrieb**

Auslegungsphase: Systemsimulation von Vorschubachsen

Simulation regelungstechnischer Einflüsse verschiedener Achskonfigurationen



Bildschirmansicht einer modellierten Vorschubachse

Ergebnis

- Hohe Bandbreite des Aufwandes – bereits mit „einfachen“ Modellen erste Aussagen generierbar
- Möglichkeit von Parameterstudien und Variantenbetrachtungen ohne Hardwareaufwand - Initialaufwand zur Modellierung → Modellbibliothek

- Vergleich unterschiedlicher Konfigurationen von Vorschubachsen (qualitativ)
- Sensitivitäts- und Schwachstellenanalyse
- Parameterabgleich – quantitative Aussagen teils aufwändig
- Fokus: Abschätzung von Eigenfrequenzen - Rückschlüsse auf Reglerbandbreite

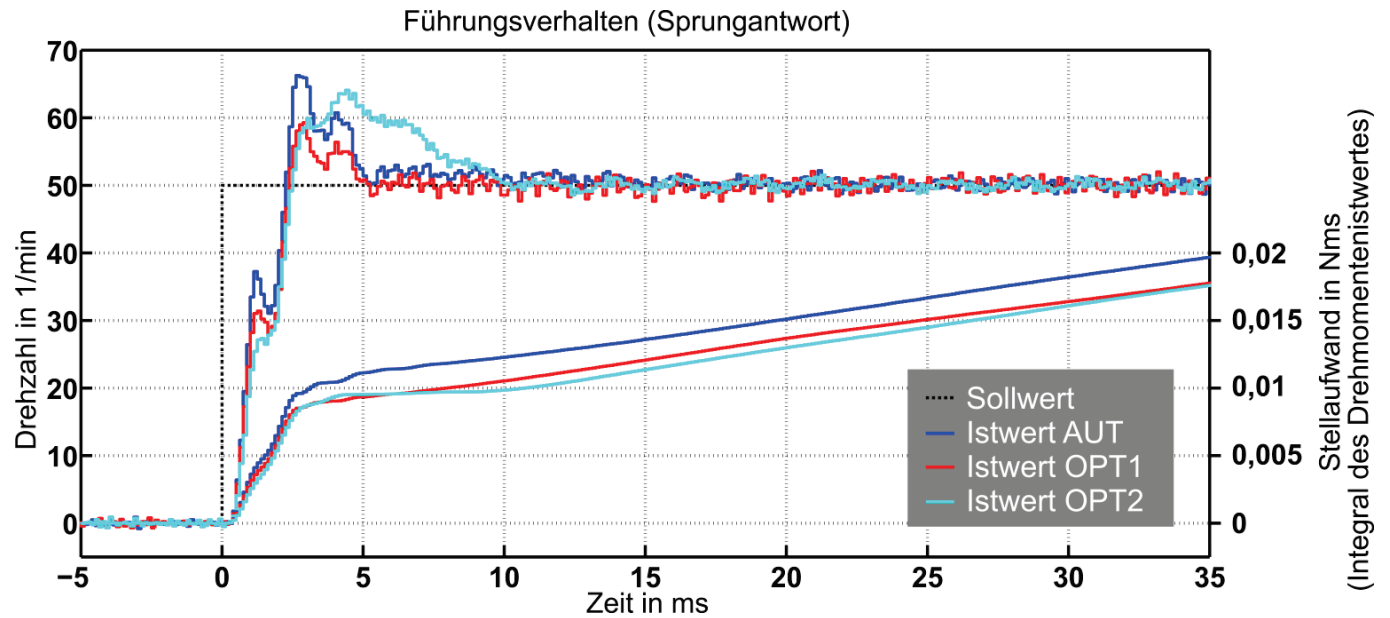
In Kooperation mit:



Inbetriebnahme: Simulationsbasierte Optimierung mit Fokus Energieeffizienz

Interaktion von Simulationsmodell und Optimierungsansätzen

- 1 – Automatische IBN
- 2 Optimierung mit gleichbleibender Dynamik und reduziertem Stellaufwand
- 3 - Optimierung 2 mit zusätzlichem Kriterium der Minimierung Optimierung der Störfläche → größere Robustheit



Lageabweichungen	Wert	Änderung
Einstellung nach Optimierung	[Nms]	[%]
1 – Automatische IBN	0,02	Referenz
2 – Optimierung 1	0,018	~ - 10%
3 – Optimierung 2	0,018	~ - 10%

Ergebnis

- Ermöglicht eine gezielte Optimierung hinsichtlich bestimmter Zielgrößen wie Energieeffizienz bei gleichzeitiger Beibehaltung von Dynamik und Überschwingweite

Betrieb: Parameteridentifikation zur Sicherung der Modellqualität

Identifikation und Modellbildung im laufenden Betrieb (nichtinvasiv)

Ausgangslage

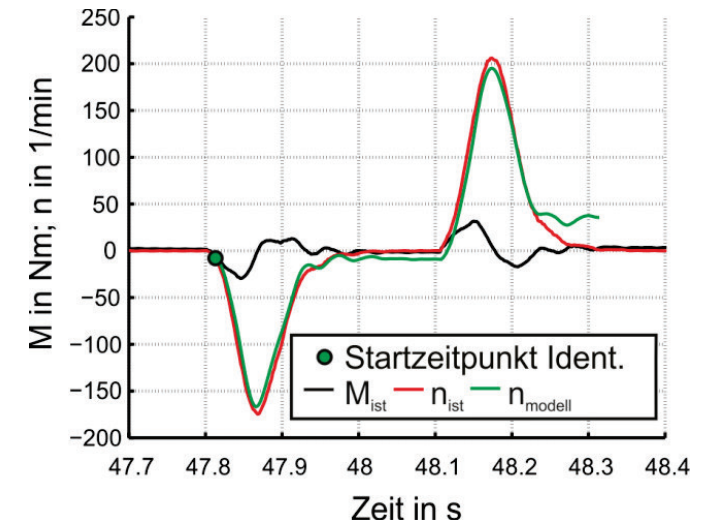
- Regelstreckenidentifikation meist unter Anwendung deterministischer Testsignale
- Identifikation von Parameteränderungen (Gesamtmassenträgheitsmoment, Reibmoment) erfordert Unterbrechung der Produktion

Lösungsansatz

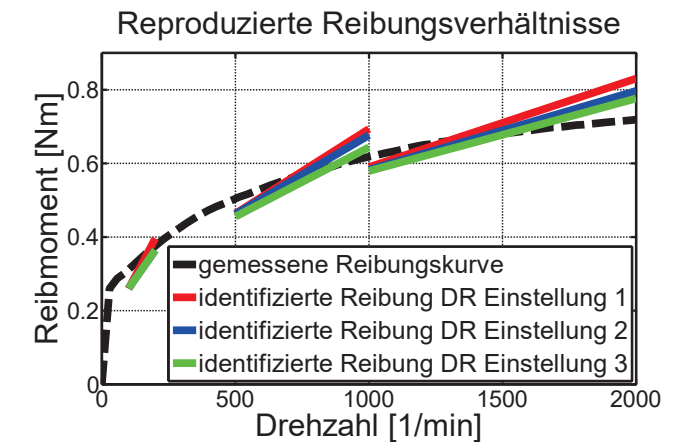
- Parameteridentifikation im laufenden Betrieb
 - rekursiver Schätzalgorithmus
 - Erweiterung um Module (Anregungsdetektion, Sollwertvorverarbeitung, Fehlerbewertung)

Ergebnis

- zyklische Identifikation ordnungsreduzierter Modelle im regulären Maschinenbetrieb möglich
- natürlicher Prozessanregung = Verzicht auf künstliche Testsignale
- Detektion von Parameteränderungen (Reibmoment, Massenträgheitsmoment) ohne zusätzliche Sensorik



Vergleich von Modell und Realität (Drehzahl)



Bestimmung der Reibung im laufenden Betrieb

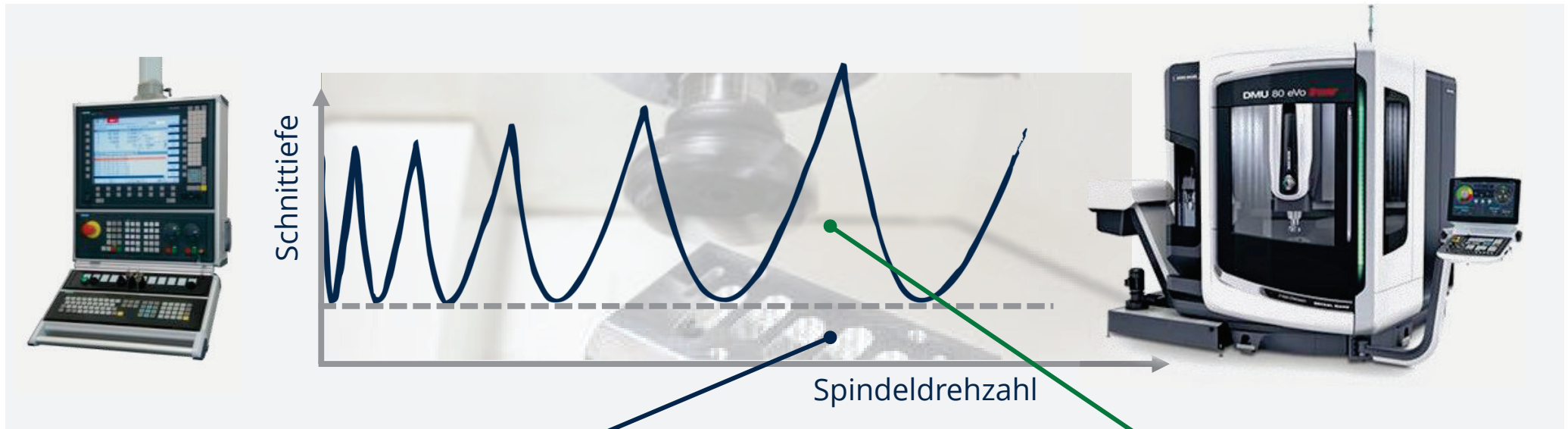
Struktur des Vortrags:

1. Situativ optimale Werkzeugmaschinen mit digitalen Modellen
2. Systemsimulation für Vorschubachsen
- 3. Simulation der Maschine – Prozess- Interaktion**
4. Modellierungsworkflow zur Optimierung der Temperierung von Maschinenbetten
5. Fazit und Ausblick



Bild: TU-Chemnitz

Effizienzsteigerung durch Betrachtung der Maschine-Prozess Interaktion



Klassisches Vorgehen:

- Zerspanung in sicher stabilen Bereichen über gesamtes Drehzahlband
- Sichere Zustände, keine tiefgreifende Maschinen-Prozess-Kenntnis erforderlich
- Keine Ratterneigung zu erwarten
- Stabil, aber ineffizient

Modellbasiertes Vorgehen:

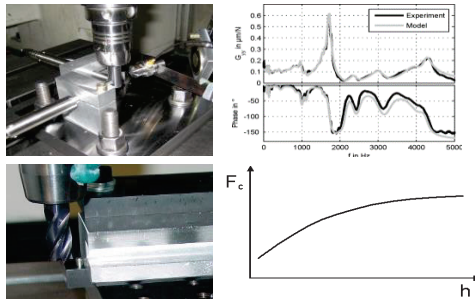
- Optimierung des Zeitspanvolumens durch Bearbeitung in stabilen Bereichen hoher Schnitttiefe
- Modell/Messung der „Ratterkarte“ notwendig
- **Deutliche Effizienzsteigerung durch Verringerung der Bearbeitungszeit** (Grundlast der Maschine)
- Beschreibung unsicherheitsbehaftet → Forschungsthemen

Modellbasierte Berechnung zur Vermeidung von selbsterregten Schwingungen

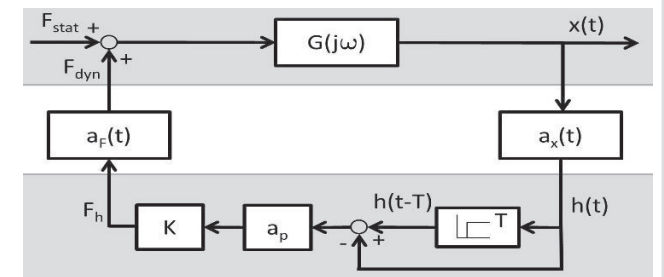
Vorgehen:

- Modellbasierte Berechnung von Ratterkarten für jeweiligen Anwendungsfall
- Umgang mit Unsicherheiten?
- Begrenzte Rechenzeit – Onlinefähigkeit?

Modell mit Maschine-
Prozess-Interaktion
Möglichkeit der
Vorhersage
selbsterregter
Schwingungen



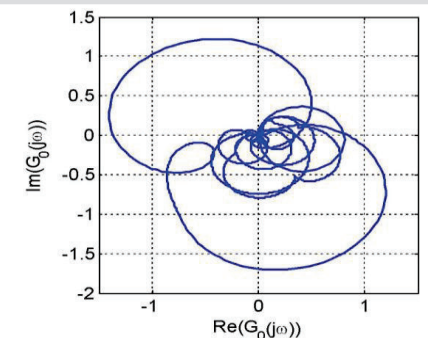
Übertragung des
Wirkungskreises
des regenerativen
Ratterns in
Frequenz-bereich



Approximation der Richtungsfaktoren mit Fourier-
Reihe „zero order approximation (ZOA)“

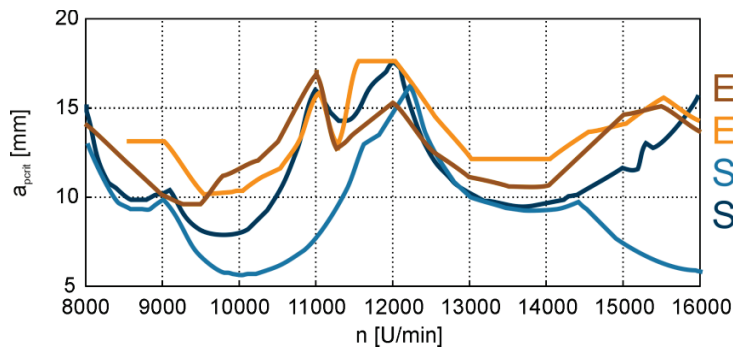
$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 \\ \mathbf{F}_0 \\ \mathbf{F}_1 \end{bmatrix}_{\text{Aus}} = \mathbf{a}_p \cdot (1 - e^{-j\omega T}) \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{A}_0 & \mathbf{A}_1 & 0 \\ \mathbf{A}_{-1} & \mathbf{A}_0 & \mathbf{A}_1 \\ 0 & \mathbf{A}_{-1} & \mathbf{A}_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{x,-1} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{G}_{x,0} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{G}_{x,1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 \\ \mathbf{F}_0 \\ \mathbf{F}_1 \end{bmatrix}_{\text{Ein}}$$

Anwendung des
Nyquistverfahrens aus der
Regelungstechnik
- Aussage über Stabilität der
Kopplung von Maschine und
Prozess möglich



Modellbasierte Berechnung zur Vermeidung von selbsterregten Schwingungen

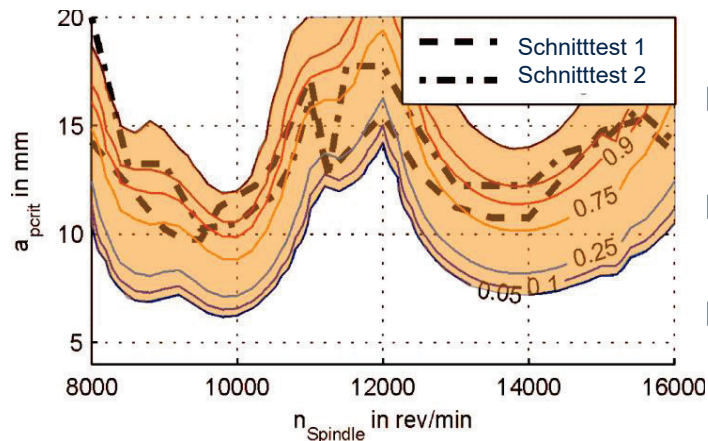
- Modellbasierte Berechnung von unsicherheitsbehafteten Ratterkarten
→ Möglichkeit der sukzessiven Anpassung von Prozessparametern



Experiment 1
Experiment 2
Simulation 1
Simulation 2

- Abweichungen in den Ratterkarten bereits bei identischen Rand- und Messbedingungen zu beobachten
- Weitere Unsicherheiten aufgrund von Modellordnungsreduktion, Mess- und Identifikationsfehlern

Einführung von Unsicherheitsbereichen in Ratterkarten
– Modellbasierte Berechnung anschließend an Design of Experiments (DoE)



- Berechnung der Ratterkarten/Stability lobe diagrams (SLD) im Frequenzbereich
- Einführung von Unsicherheitsbereichen in Ratterkarten basierend auf der Vielzahl von unsicheren Parametern
- Reduktion der Rechenzeiten auf akzeptable Bereiche (1/3) durch zero order approximation (ZOA)

Struktur des Vortrags:

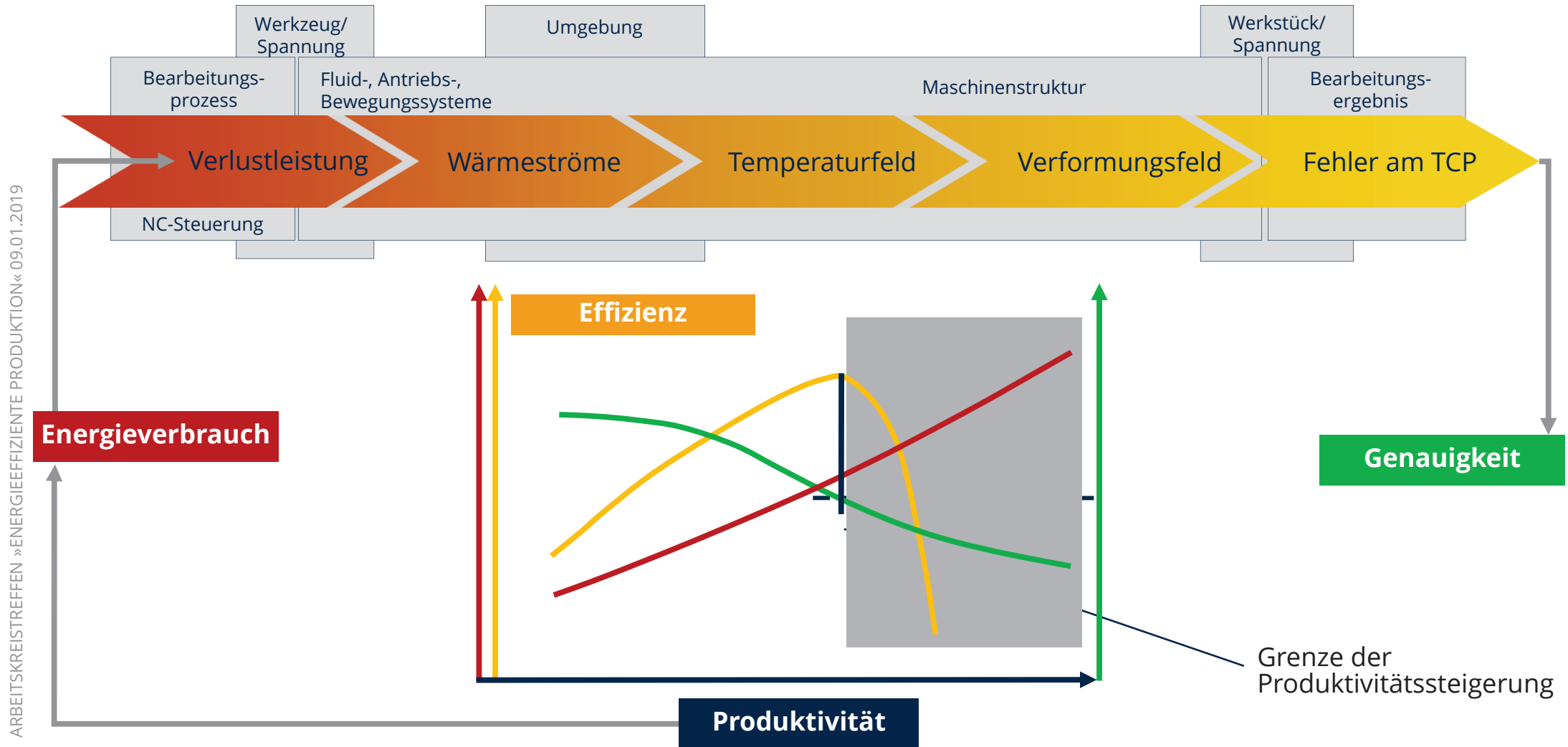
1. Situativ optimale Werkzeugmaschinen mit digitalen Modellen
2. Systemsimulation für Vorschubachsen
3. Simulation der Maschine – Prozess- Interaktion
- 4. Modellierungsworkflow zur Optimierung der Temperierung von Maschinenbetten**
5. Fazit und Ausblick



Bild: TU-Chemnitz

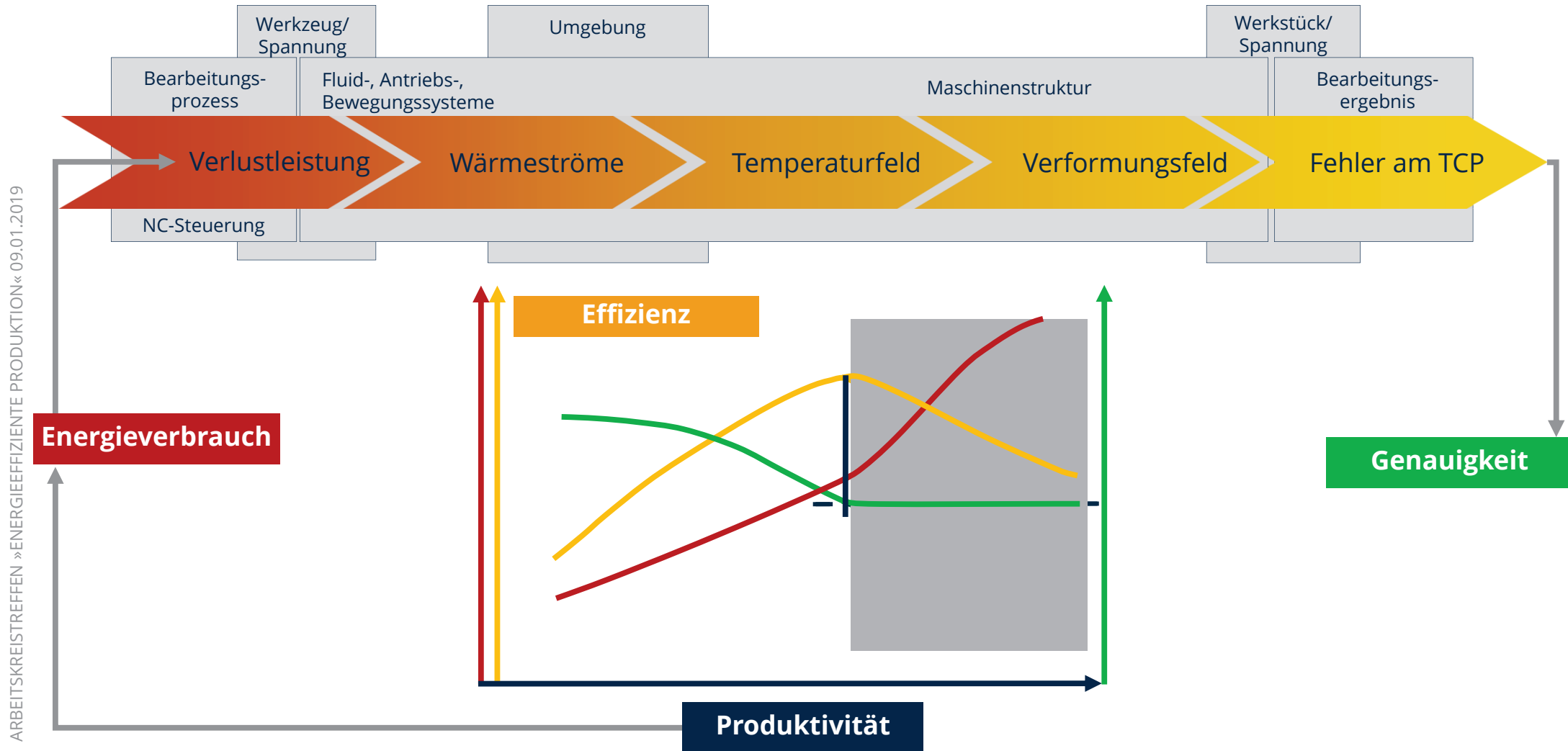
Modellbasierte thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Motivation des Sonderforschungsbereiches SFB TR96



Modellbasierte thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

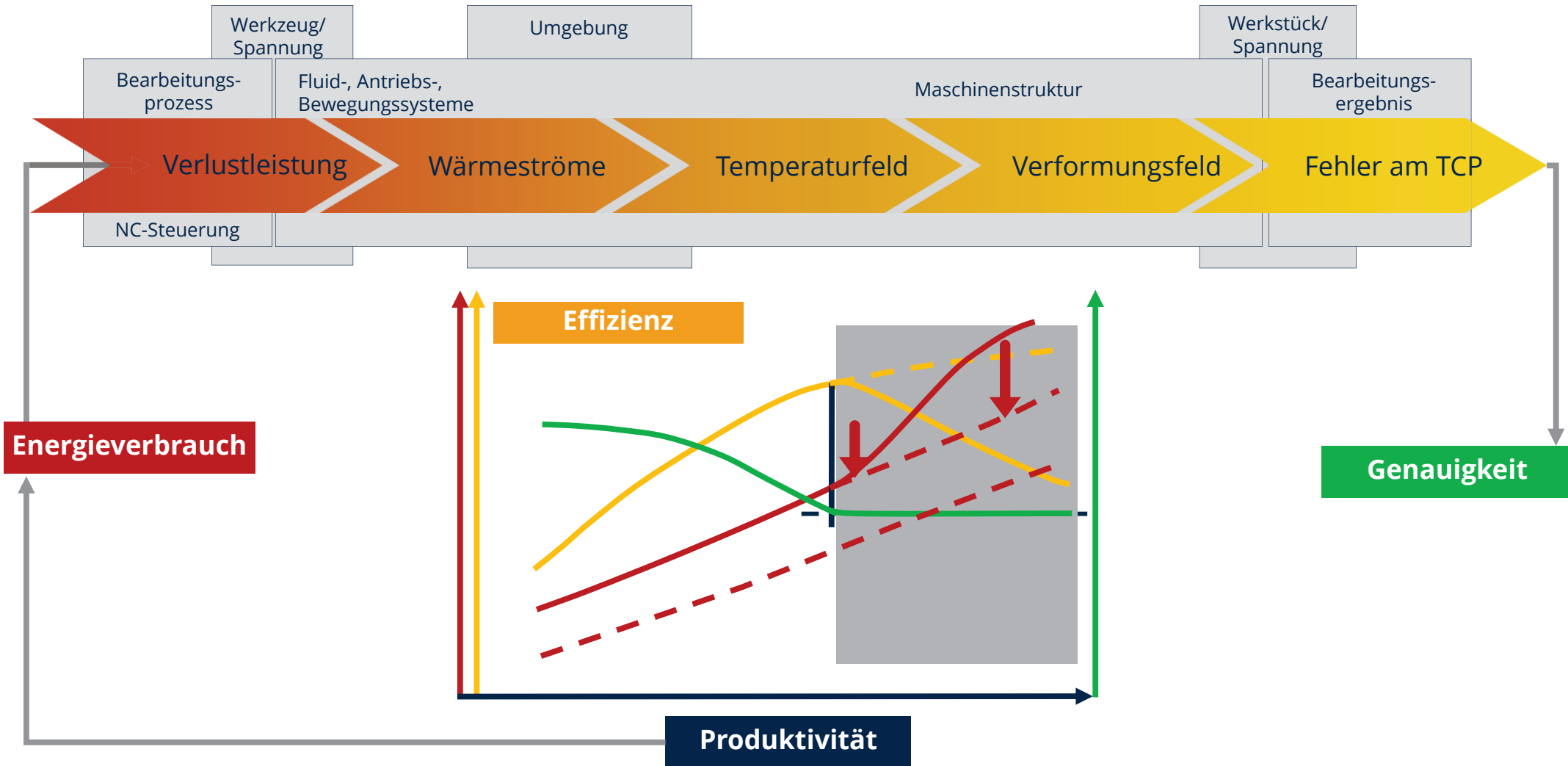
Motivation des Sonderforschungsbereiches SFB TR96



Modellbasierte thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen

Motivation des Sonderforschungsbereiches SFB TR96

ARBEITSKREISTREFFEN »ENERGIEEFFIZIENTE PRODUKTION« 09.01.2019



Modellgrundlage – Thermo-elastische Wirkungskette

Zeitebene und Schwerpunkte der Maßnahmen

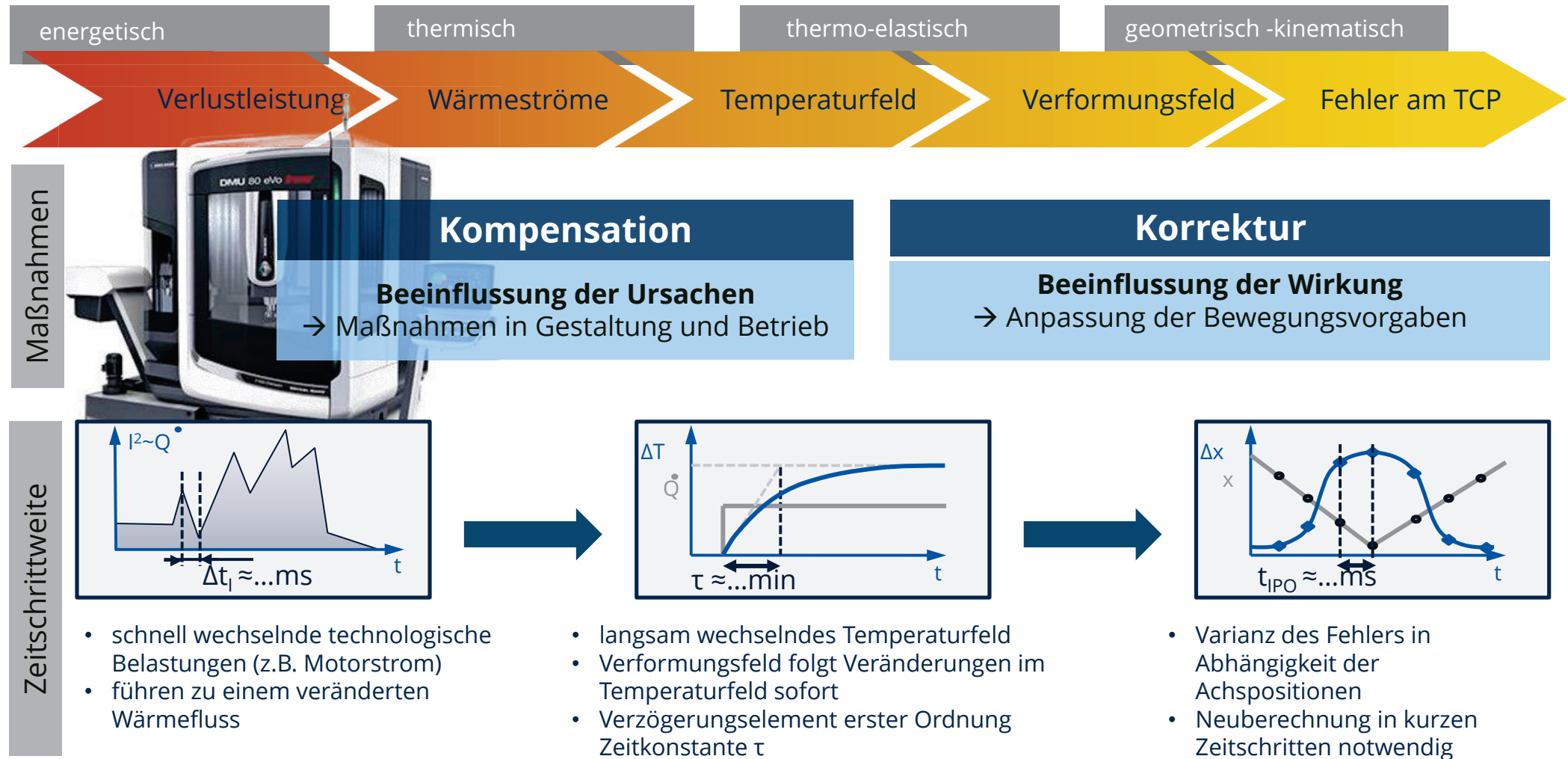
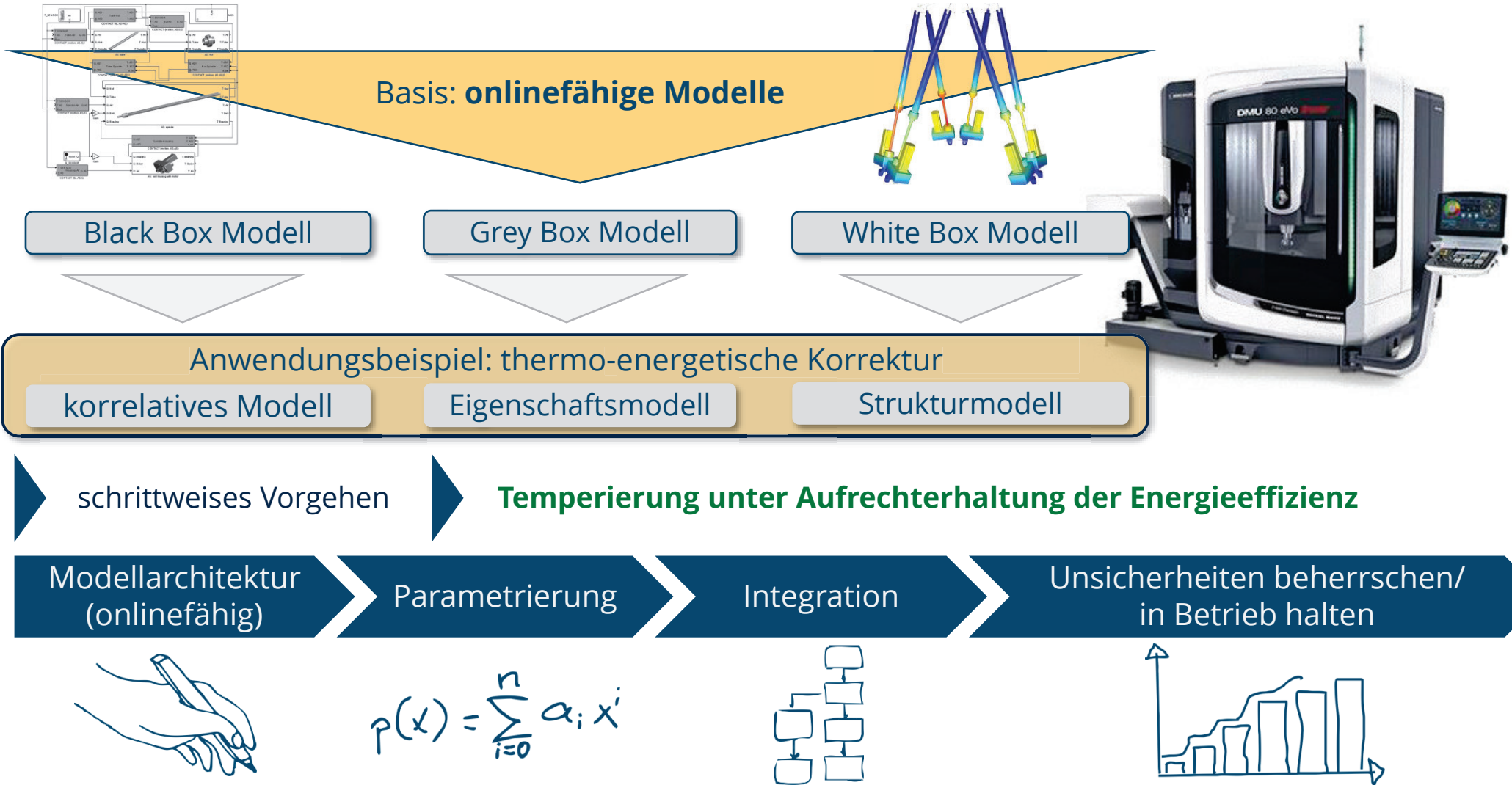


Bild: DMG MORI

Workflow zum Aufbau eines modellbasierten Korrekturalgorithmus

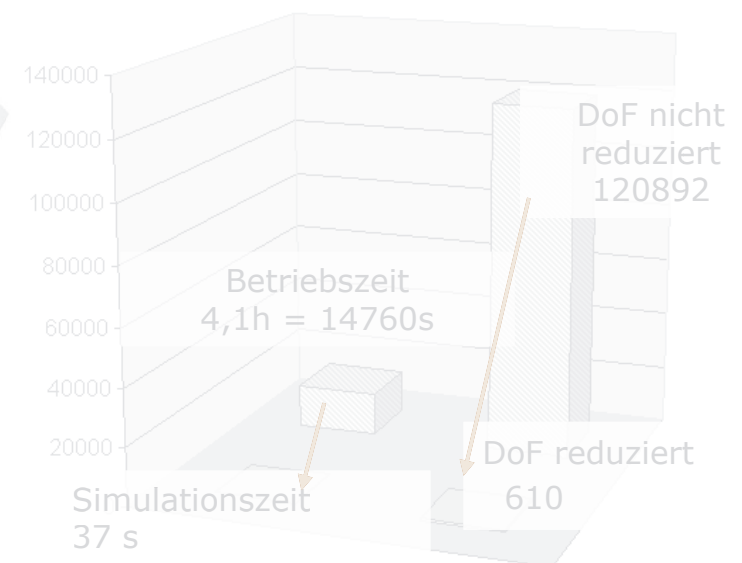
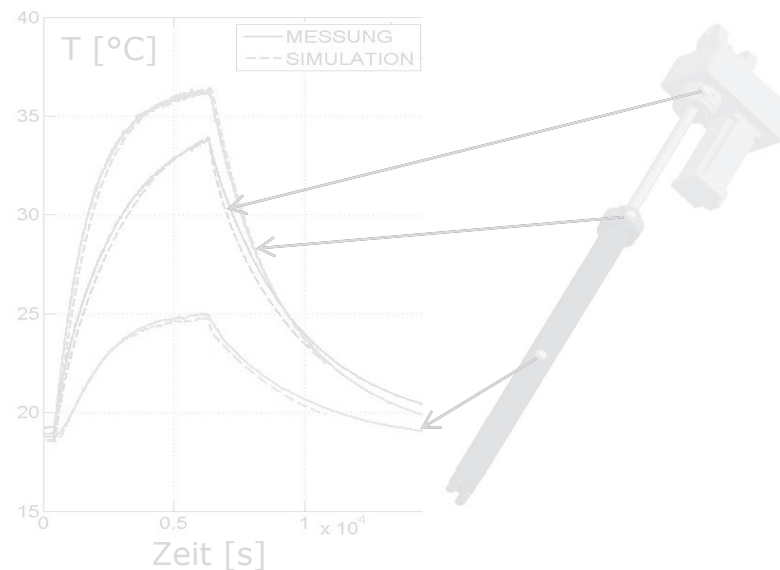


Schritt 1: Aufbau des Digitalen Zwillings und Modellordnungsreduktion

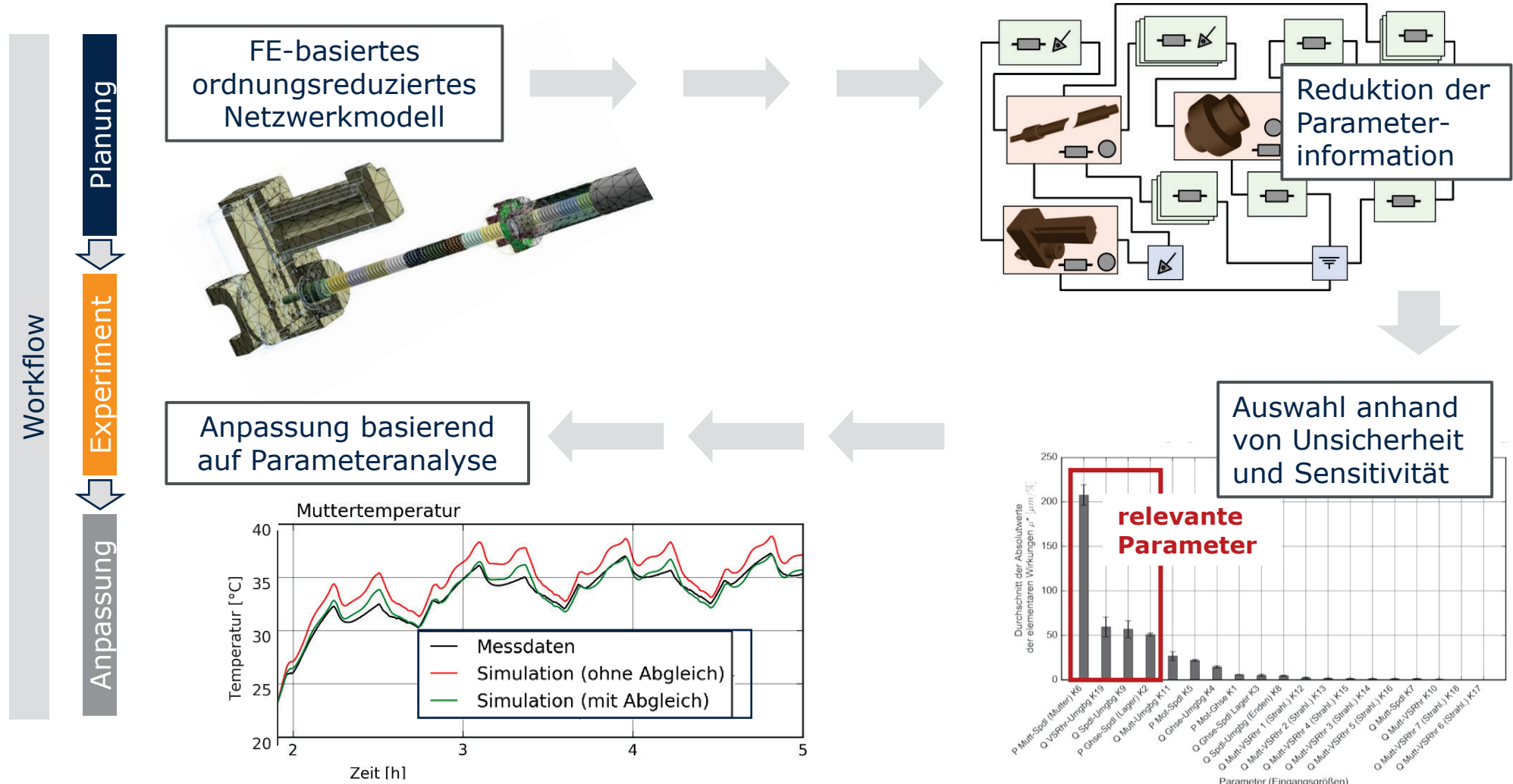
- Ziel: Erhöhung der Effizienz der Modellierung und Berechnung des thermischen Verhaltens von Maschinen und Komponenten
- Anwendung der Krylov-Modellordnungsreduktionsmethode
- Ergebnis: in (thermischer) Echtzeit berechenbare thermo-elastische Netzwerkmodelle
- Automatisierung der Datenkette vom CAD über Strukturmodelle bis hin zu steuerungsinternen Korrekturmodellen

Anwendungsfall

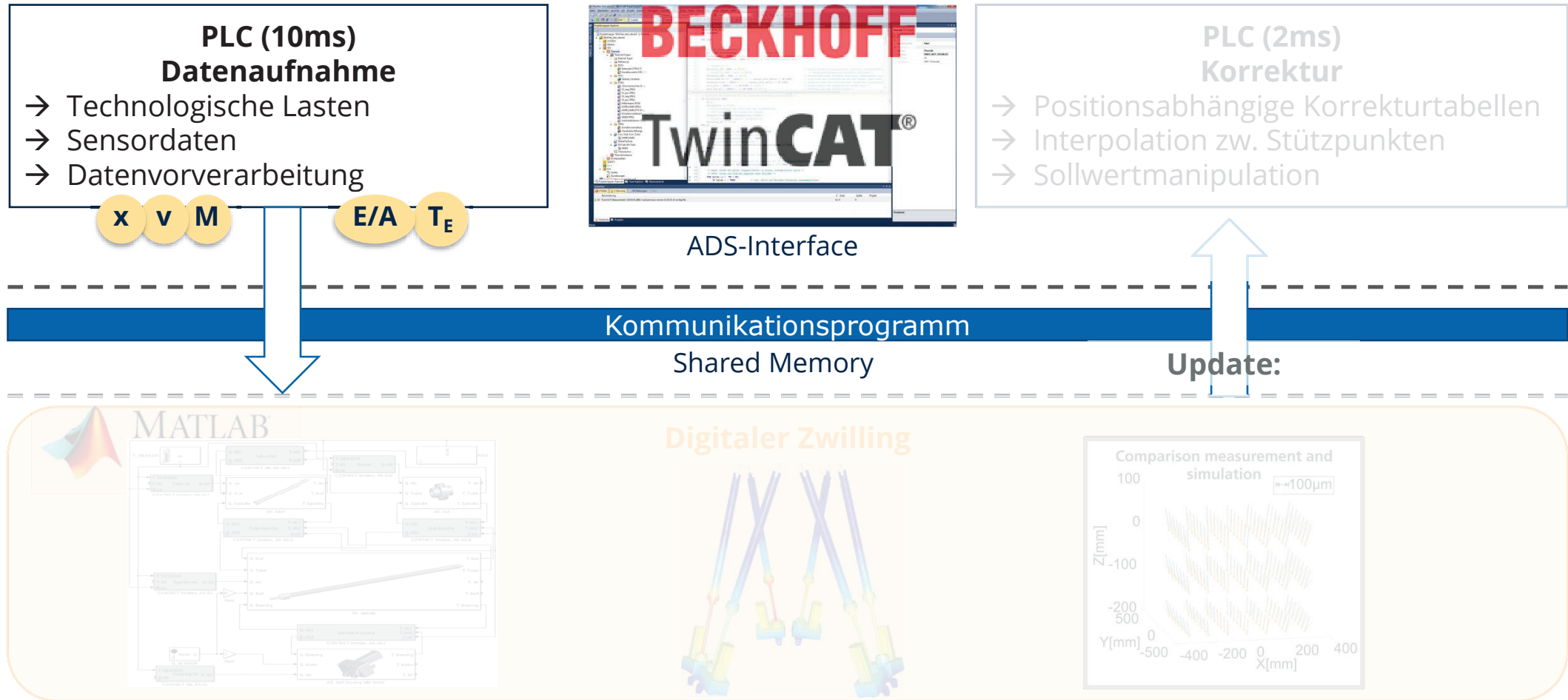
Experimentelle Ergebnisse



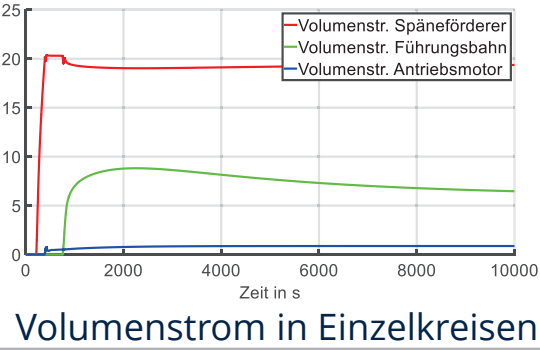
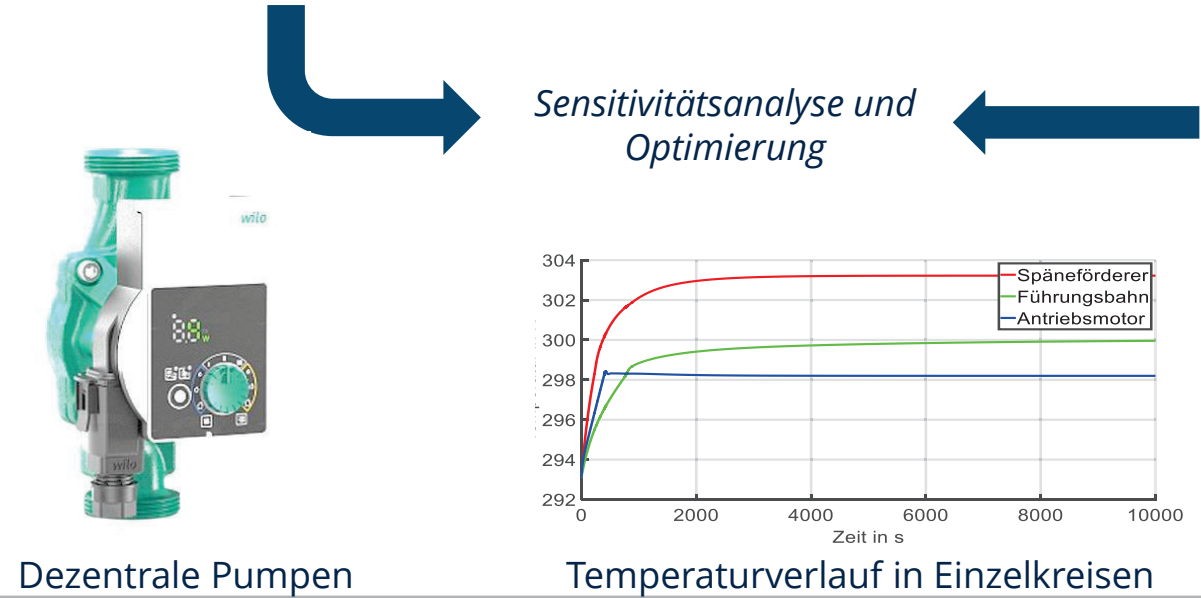
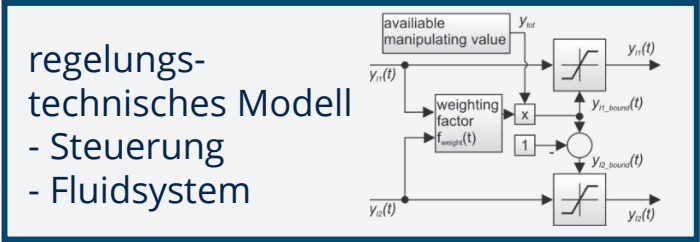
Schritt 2: Zyklisches Anpassen des Strukturmodells



Schritt 3: Integration des Modells in industrielle Steuerungstechnik



Projektbeispiel – Temperierung von Werkzeugmaschinen-Betten



Dezentrale Pumpen

Temperaturverlauf in Einzelkreisen

Volumenstrom in Einzelkreisen

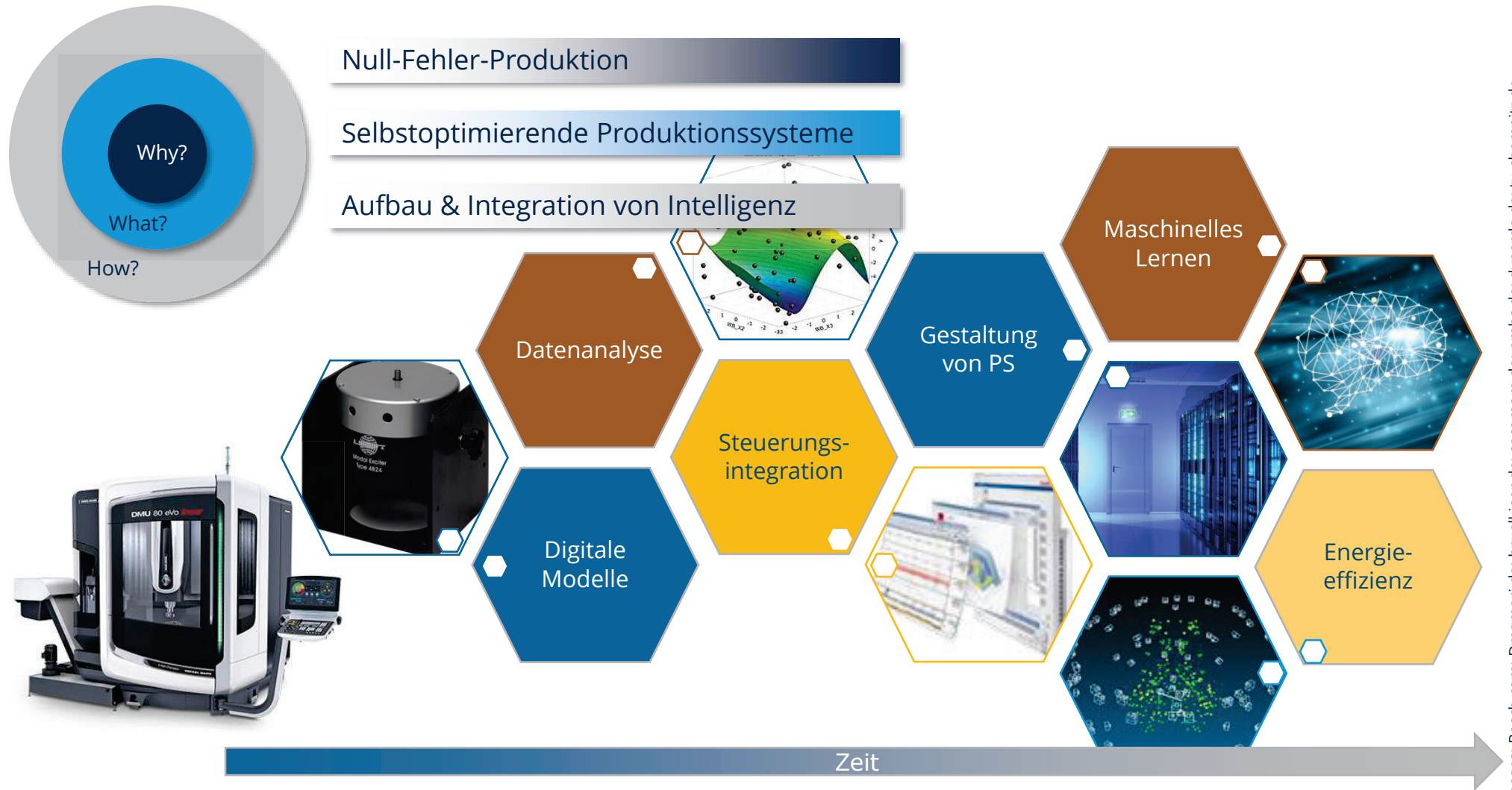
Struktur des Vortrags:

1. Situativ optimale Werkzeugmaschinen mit digitalen Modellen
2. Systemsimulation für Vorschubachsen
3. Simulation der Maschine – Prozess- Interaktion
4. Modellierungsworkflow zur Optimierung der Temperierung von Maschinenbetten
- 5. Fazit und Ausblick**



Bild: TU-Chemnitz

Ausblick



Danksagung

Die vorgestellten Forschungsaktivitäten sind Teil des SFB/TR 96 Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und allen Projektpartnern einschließlich der HYDAC Cooling GmbH, FRAMAG Industrieanlagenbau GmbH und METROM Mechatronische Werkzeugmaschinen GmbH für die (finanzielle) Unterstützung.



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit



Fakultät Maschinenwesen
Institut für Mechatronischen Maschinenbau
Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen
Prof. Dr.-Ing. S. Ihlenfeldt

☎ +49 (0) 351 463-34358
✉ steffen.ihlenfeldt@tu-dresden.de