



Digitaler Zwilling-gestützte mehrstufige Fräsbearbeitung von Dünnwandstrukturen unter Einsatz austauschbarer roboter- und menschenunterstützter Automatisierung

Mariam Abed

Akademische Betreuer:

Prof Dragos Axinte

Dr Abdelkhalick Mohammad

Industrielle Betreuer :

Dr Andres Gameros Madrigal

David Askew



SOLUTION: DIGITAL-TWIN ASSISTED MULTI-STAGE MACHINING

ROUGHING HABITAT



FINISHING HABITAT



University of
Nottingham

The Rolls-Royce UTC in Manufacturing
and On-wing Technology

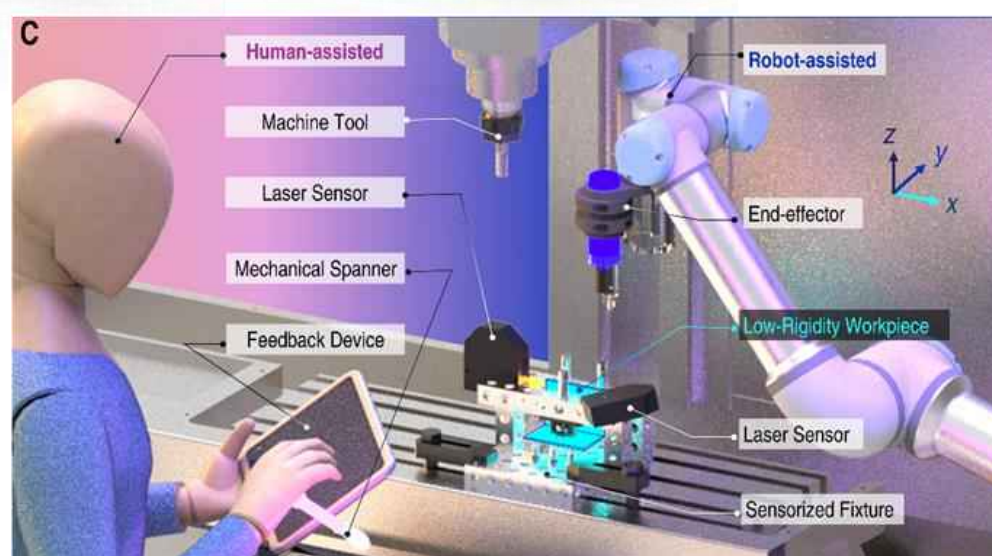
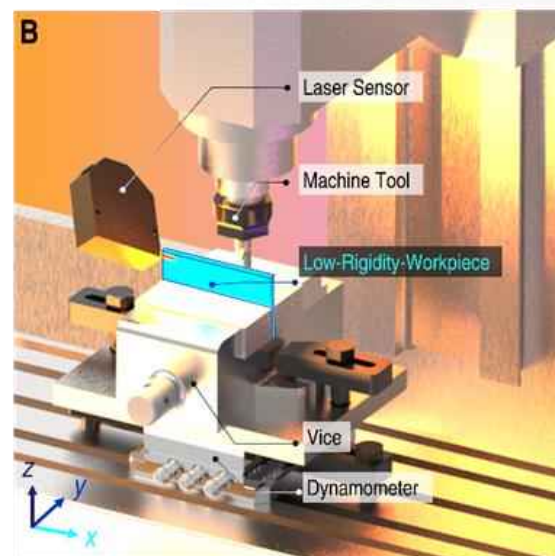
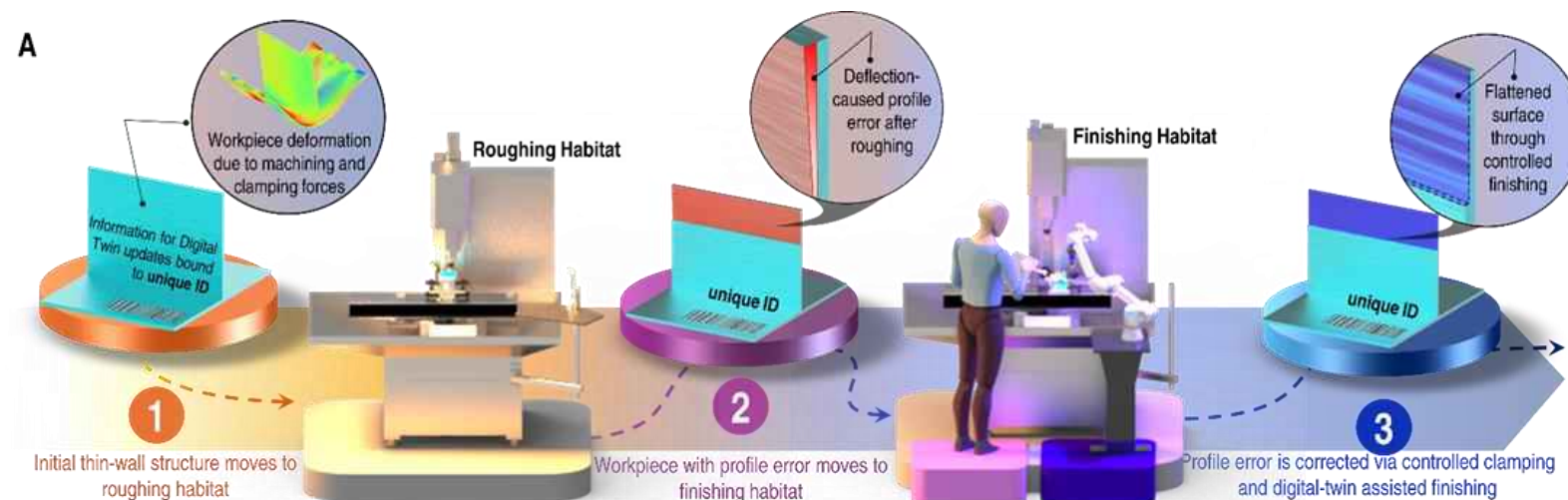
Digitaler Zwilling zur schnellen und unmittelbaren Vorhersage von Werkstückverformungen

Schnelles Masse-Feder-Gitter-Modell
Vorhersage von

Bearbeitungs-
bedingten
Ebenheitsfehler

Spannbedingtem
Werkstück-
deformationen

Mehrstufige Bearbeitungsumgebung mit mehreren Industrie 4.0 Technologien, vernetzt in der Smart Factory



Digitaler Zwilling zur schnellen und unmittelbaren Vorhersage von Werkstückverformungen

Schnelles Masse-Feder-Gitter-Modell

Vorhersage von

**Bearbeitungs-
bedingten
Ebenheitsfehler**

**Spannbedingtem
Werkstück-
deformationen**

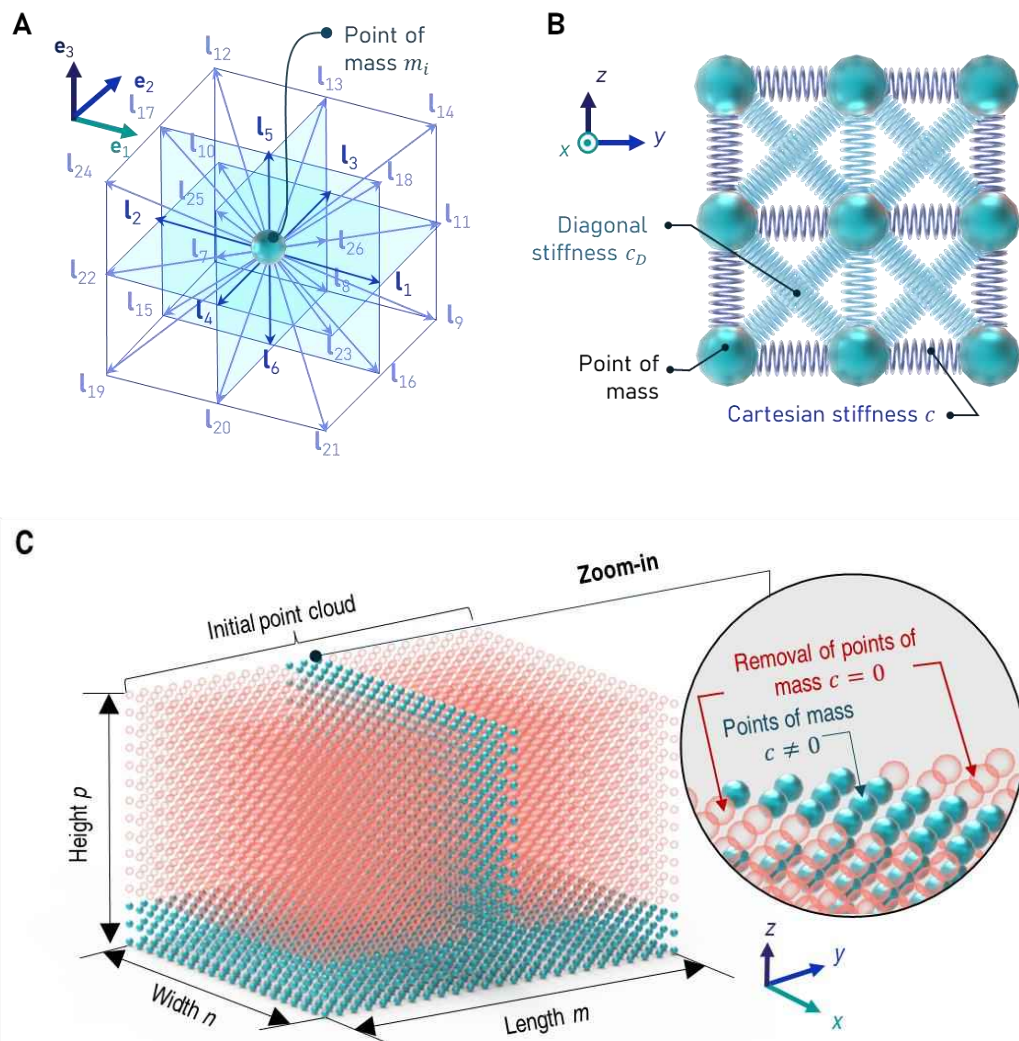
Berücksichtigung der
Filterdynamik

Berücksichtigung
elastischer
Wechselwirkungen

Ebenheitsfehler-
kompensation als
direktes Ergebnis des
Verformungs-fehlers

Verformungs- und
Kraftregelung unter
Einsatz
austauschbarer
Automatisierung

Mehrstufige Bearbeitungsumgebung mit mehreren Industrie 4.0 Technologien, vernetzt in der Smart Factory



Newtonsche Gesetze

$$m \frac{d^2 u_i}{dt^2} = m \ddot{u}_i = c_{ij} \Delta u_j + f_i$$

System Isotropie in Navier Gleichungen beachten

$$\rho \ddot{u}_i = \frac{3 c_n}{5 \Delta l} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{6 c_n}{5 \Delta l} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_i \partial x_k} + \frac{1}{\Delta l^3} f_i$$

Korrelation zwischen Materialparametern und Numerischen Parametern durch Isotropiebedingung

$$\frac{3 c_n}{5 \Delta l} = E \frac{\nu}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)} \Rightarrow \nu = \frac{1}{4} \text{ and } E = \frac{3 c_n}{2 \Delta l}$$

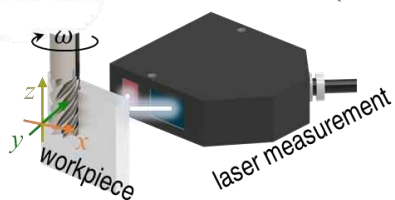
Numerische zeitabhängige Fundamentalgleichung

$$\mathbf{M}(t) \cdot \frac{d^2 \mathbf{u}(t)}{dt^2} + \mathbf{K}(t) \cdot \mathbf{u}(t) = \mathbf{f}(t)$$

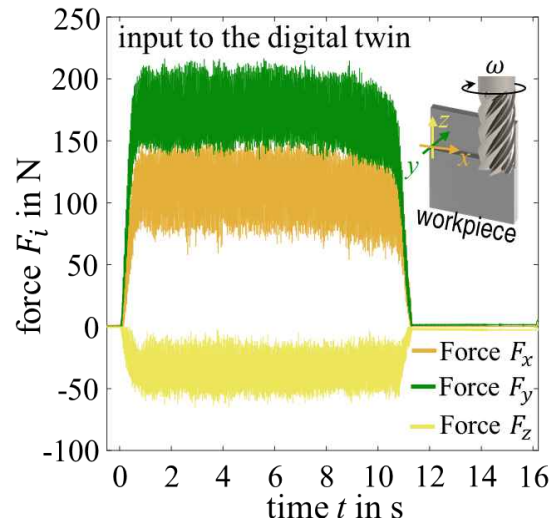
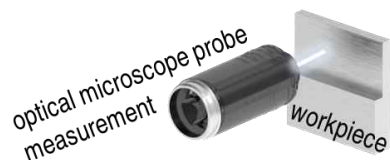
$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{f}$$

Quasistatische
Fundamentalgleichung

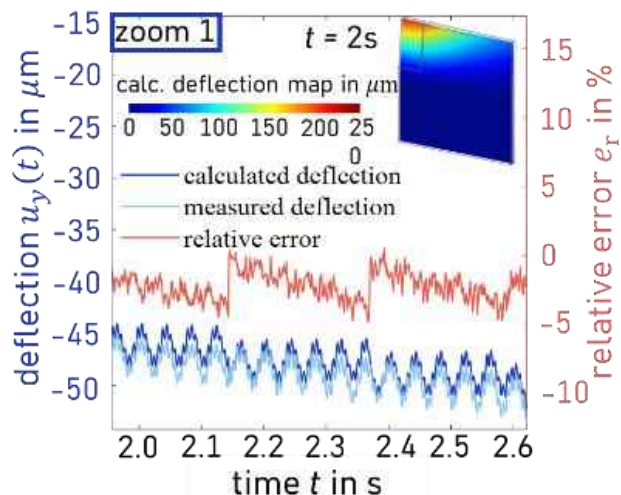
in-process deflection assessment (C – F)



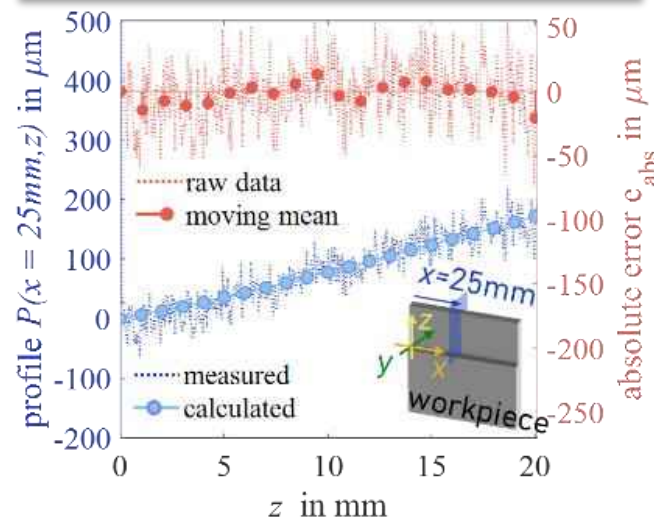
post-process surface profile assessment (G–I)



In-process deformation comparison



Post-process optical profile comparison



- **Gute Übereinstimmung** zwischen den berechneten und mit dem Lasersensor **gemessenen Verformungen** während des Bearbeitungsprozesses
- **Mikroskopie-Messung** des Ebenheitsfehlers stimmt gut mit der vorhergesagten statischen Berechnung des Verformungsfehlers überein (Abweichungen im Bereich der Welligkeit und Rauheit des Werkstücks).
- In den Kraftprofilen ist ein starker **statischer Krafteinfluss erkennbar**, mit einem dynamischen Einfluss um 0 Hz herum. Dadurch entsteht ein **Oberflächenfehler** aus dem Schrappvorgang (bei den eingestellten Bearbeitungsparametern), der überwiegend **statisch** beeinflusst ist.

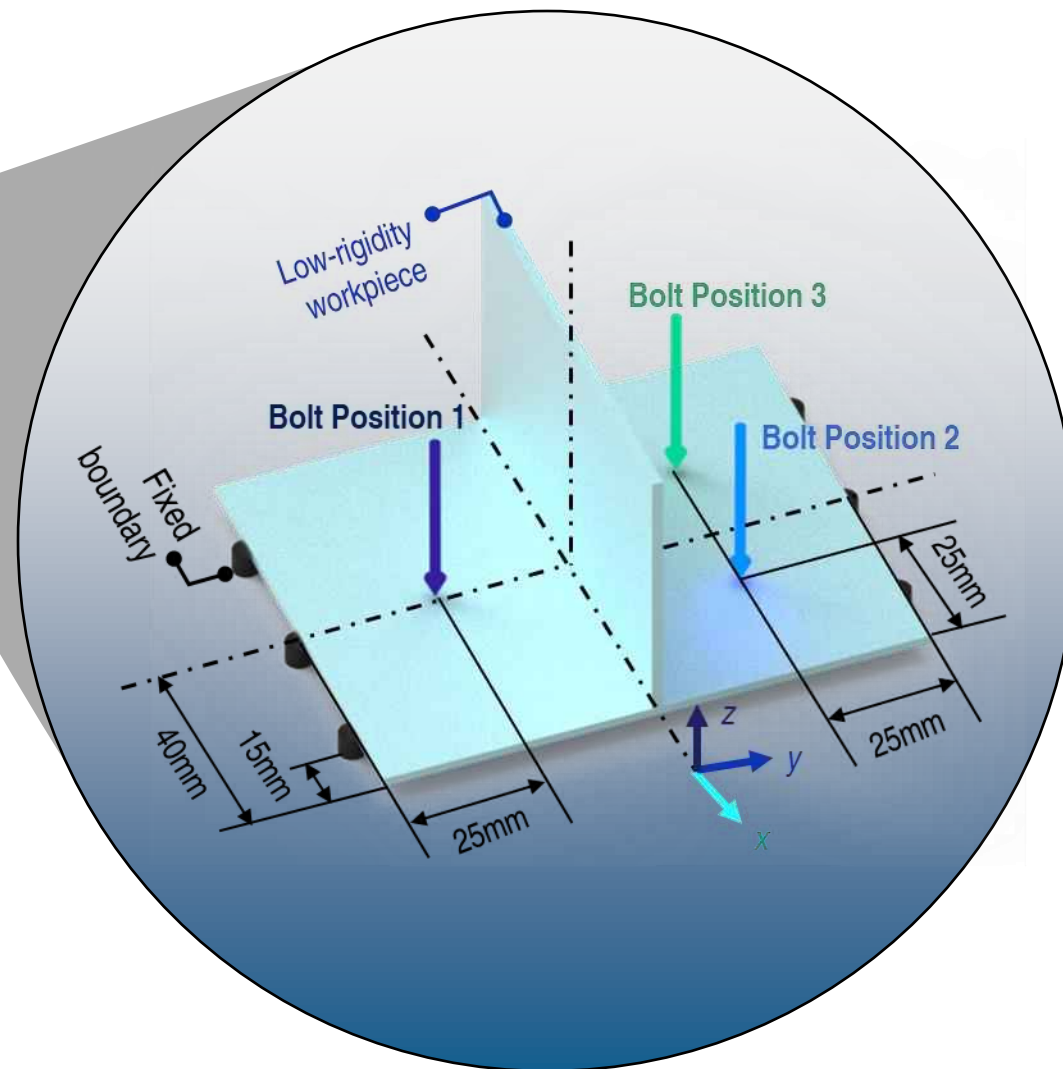
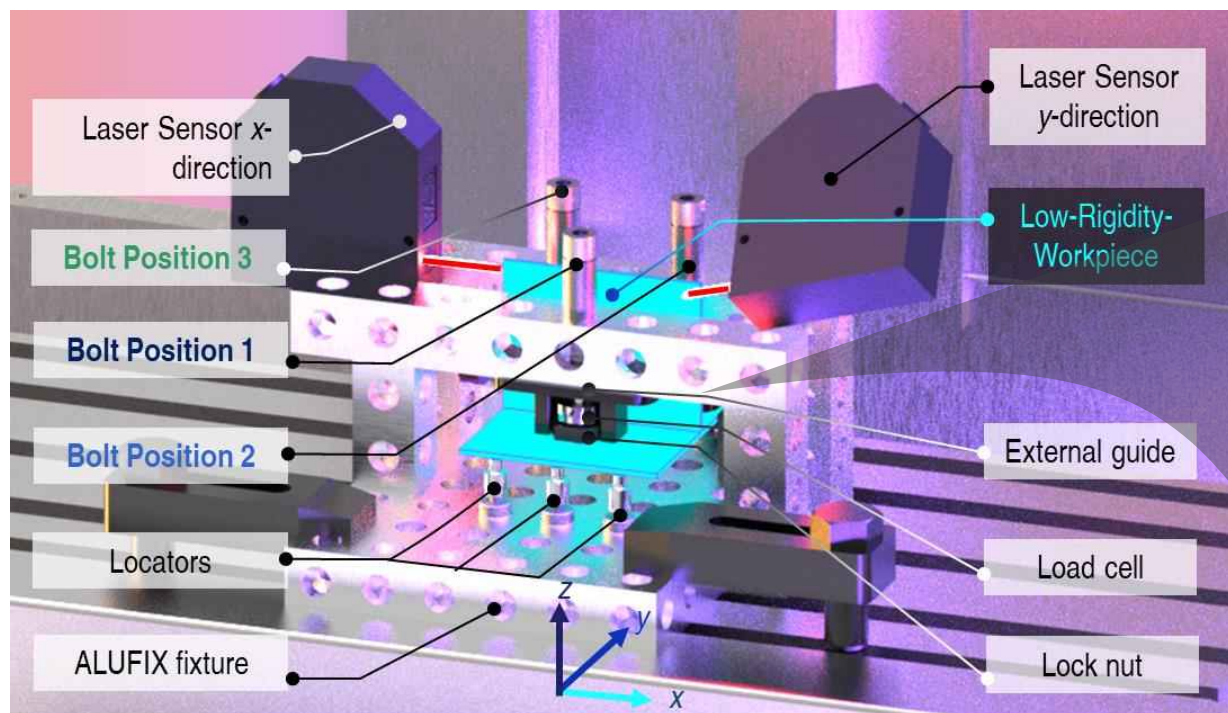


Digitaler-Zwilling-Assistierte Vorhersage von Bearbeitungsbedingten Deformationsfehlern

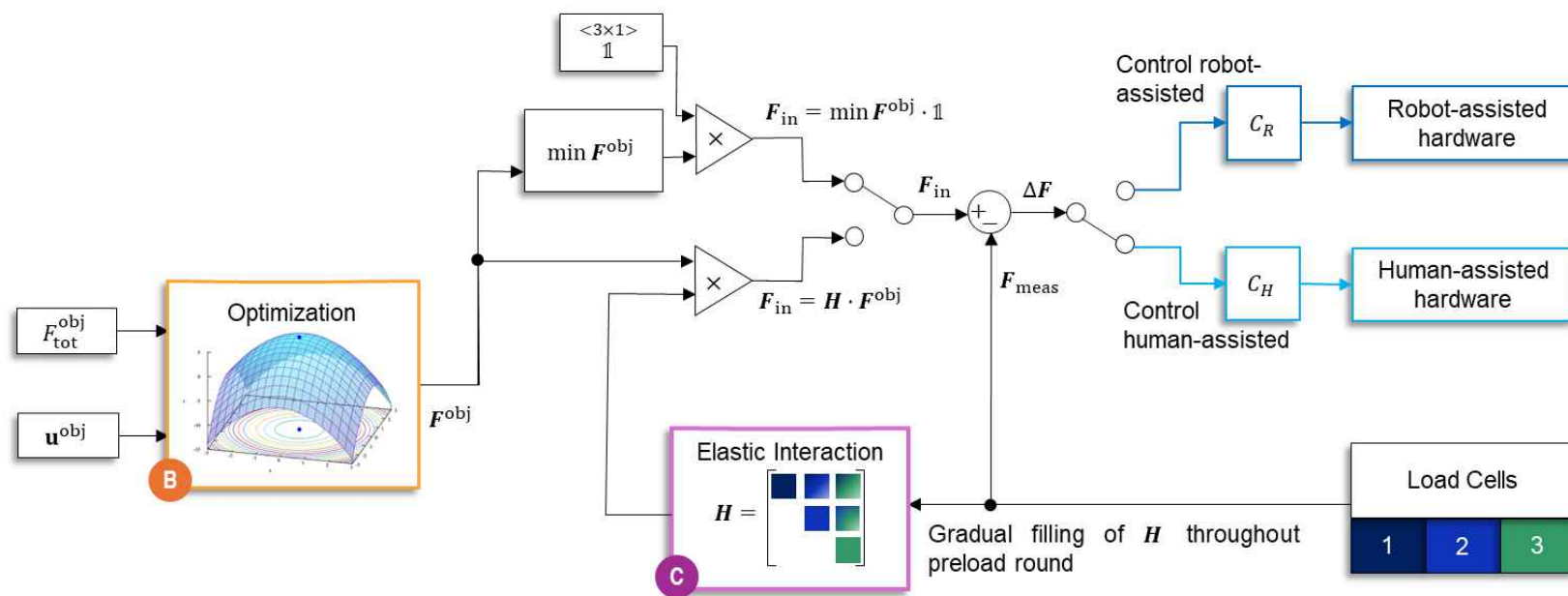


University of
Nottingham

The Rolls-Royce UTC in Manufacturing
and On-wing Technology



- Intelligente Spannvorrichtung für das Vorspannen komplexer Dünnwandstrukturen
- Kraftmessung über Kraftzellen unter jeder Spannschraube wird für rückgekoppelten Regelungsalgorithmus genutzt zur Regelung der Gesamtvorspannkraft sowie Minimierung der Deformation



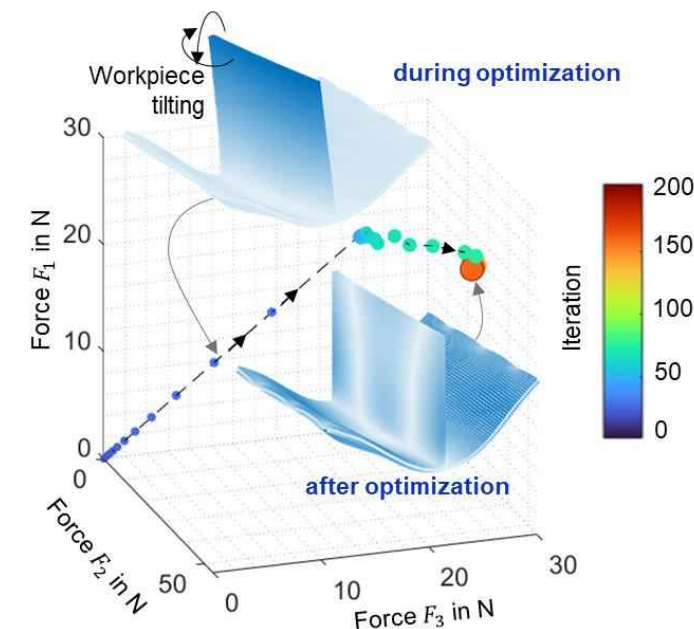
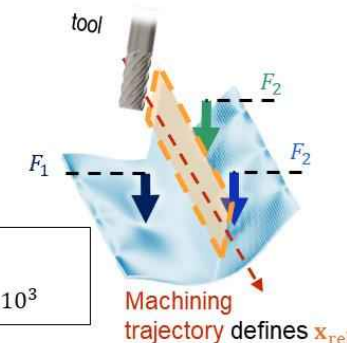
- Der Regelungsalgorithmus funktioniert über die Regelung- Minimierung der Deformation durch Steuerung der Vorspannkräfte
- Die Kraftregelung beachtet die elastische Wechselwirkung zwischen den Schrauben und kann über unterschiedliche Automatisierungskonzepte ausgeführt werden

Objectives:

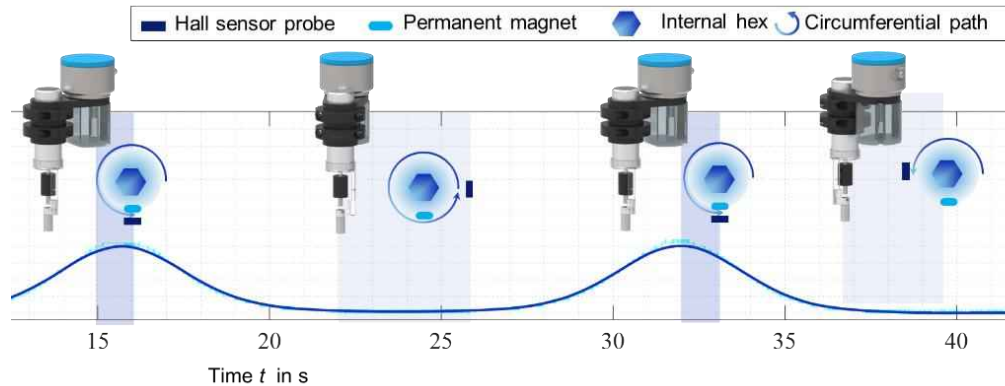
1 $F_{tot}^{obj} \stackrel{!}{=} \sum_i F_i$

2 $\min u(x_{rel})$

$\min G(F_1^{obj}, F_2^{obj}, F_3^{obj})$
 $F_{tot}^{obj} = 100 \text{ N}, g_1 = 1, g_2 = 10^3$

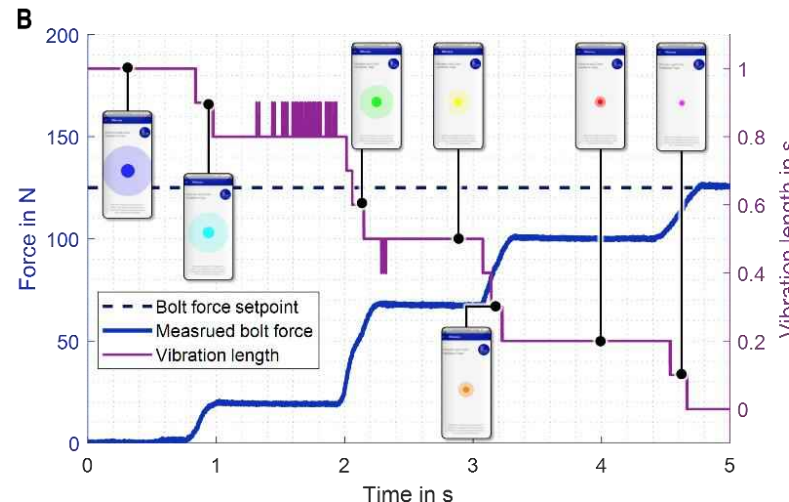
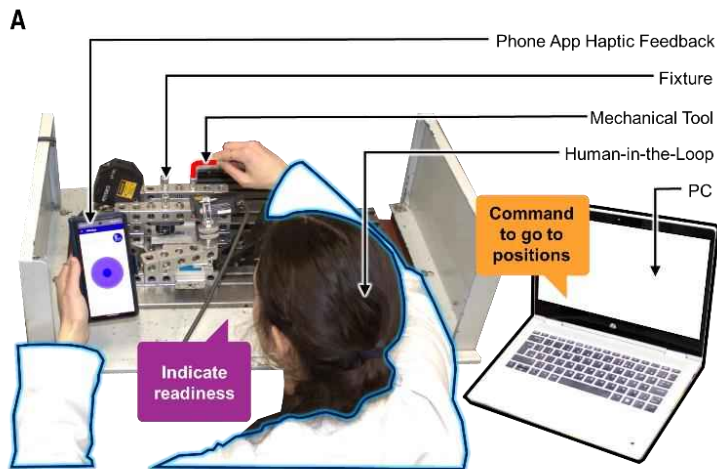


Roboter-Assistiert



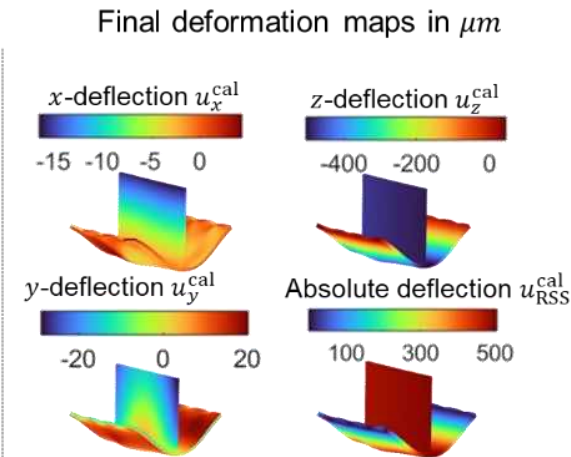
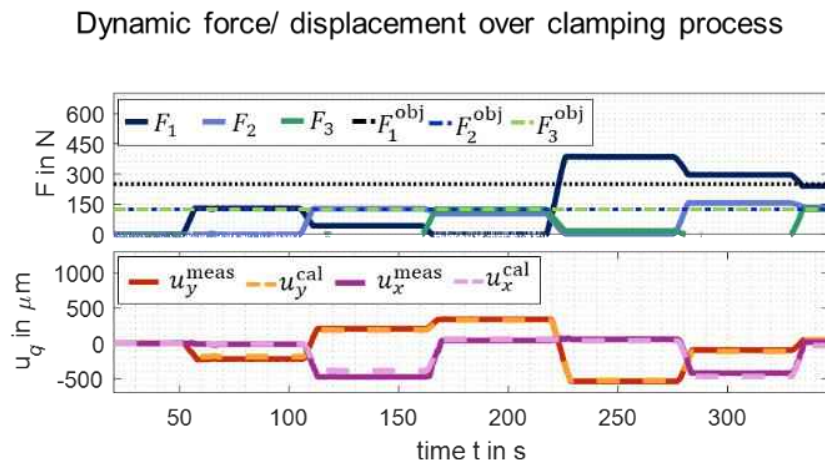
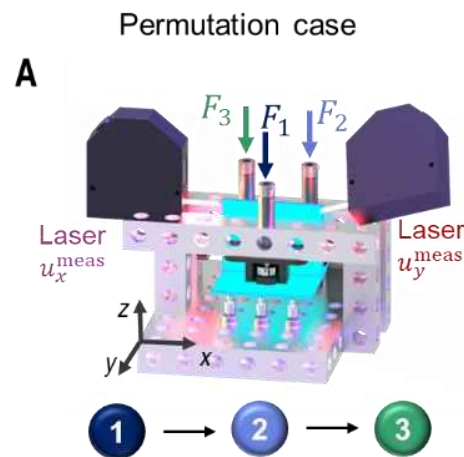
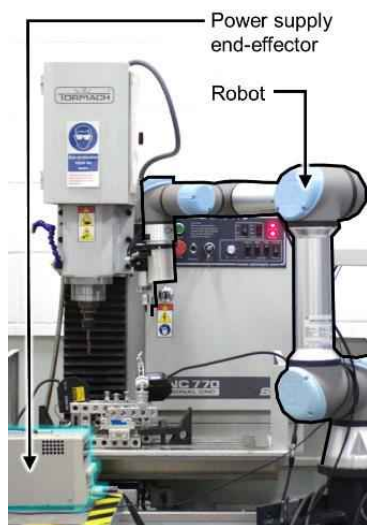
- Robotisches Vorspannen wird durch einen Hochdrehmomenten DC-Motor umgesetzt und interner PI-Positionseglung
- Durch Hall-Sensoren kann der Schraubenschlüssel robust, wiederholbar und kollisionsfrei in allen Spannschrauben eingeführt werden

Human-Cyber-Physical System

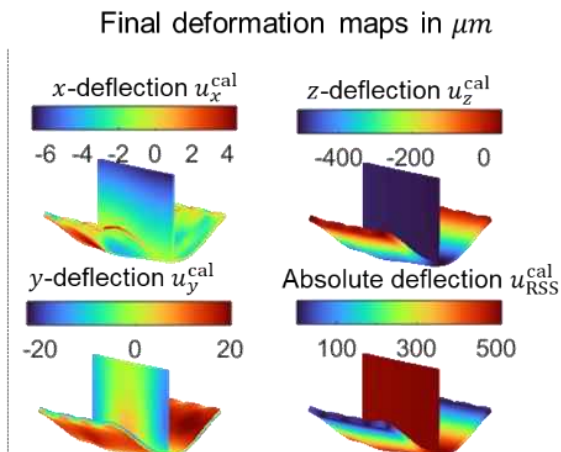
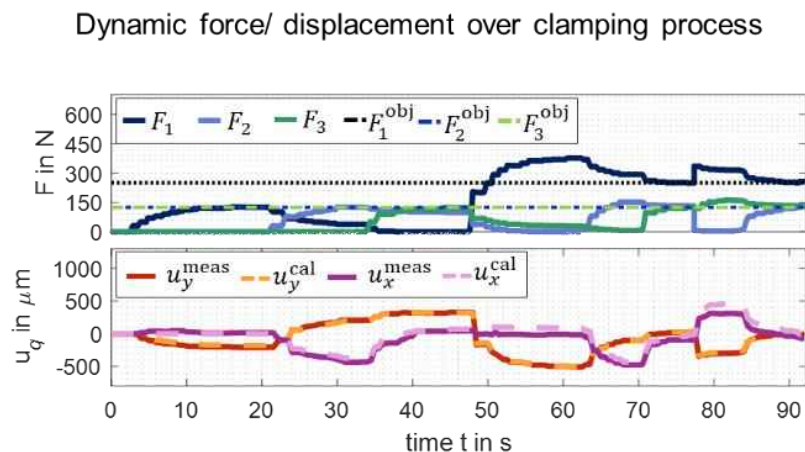
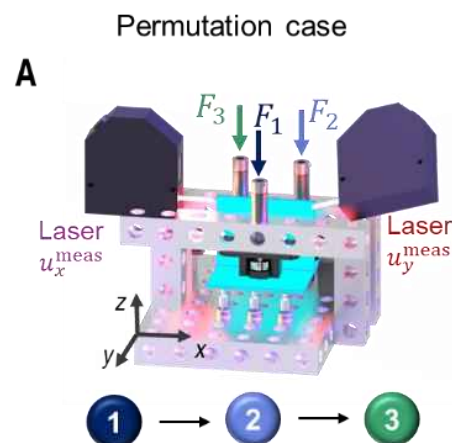
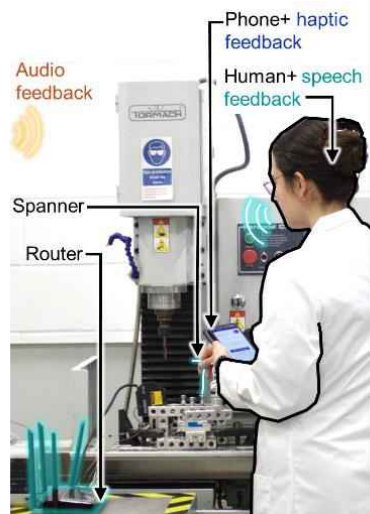


- Das human-cyber-physical system nutzt eine speziell implementierte RR Smart Factory App welche haptisch (über Vibrationspulse und Farbindikationen) technischen Werkstattarbeitern geschlossen geregeltes Feedback ermöglicht

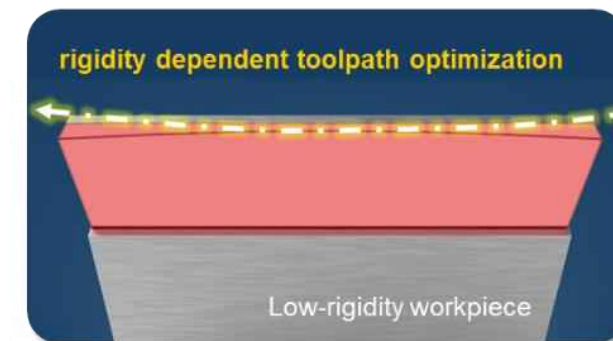
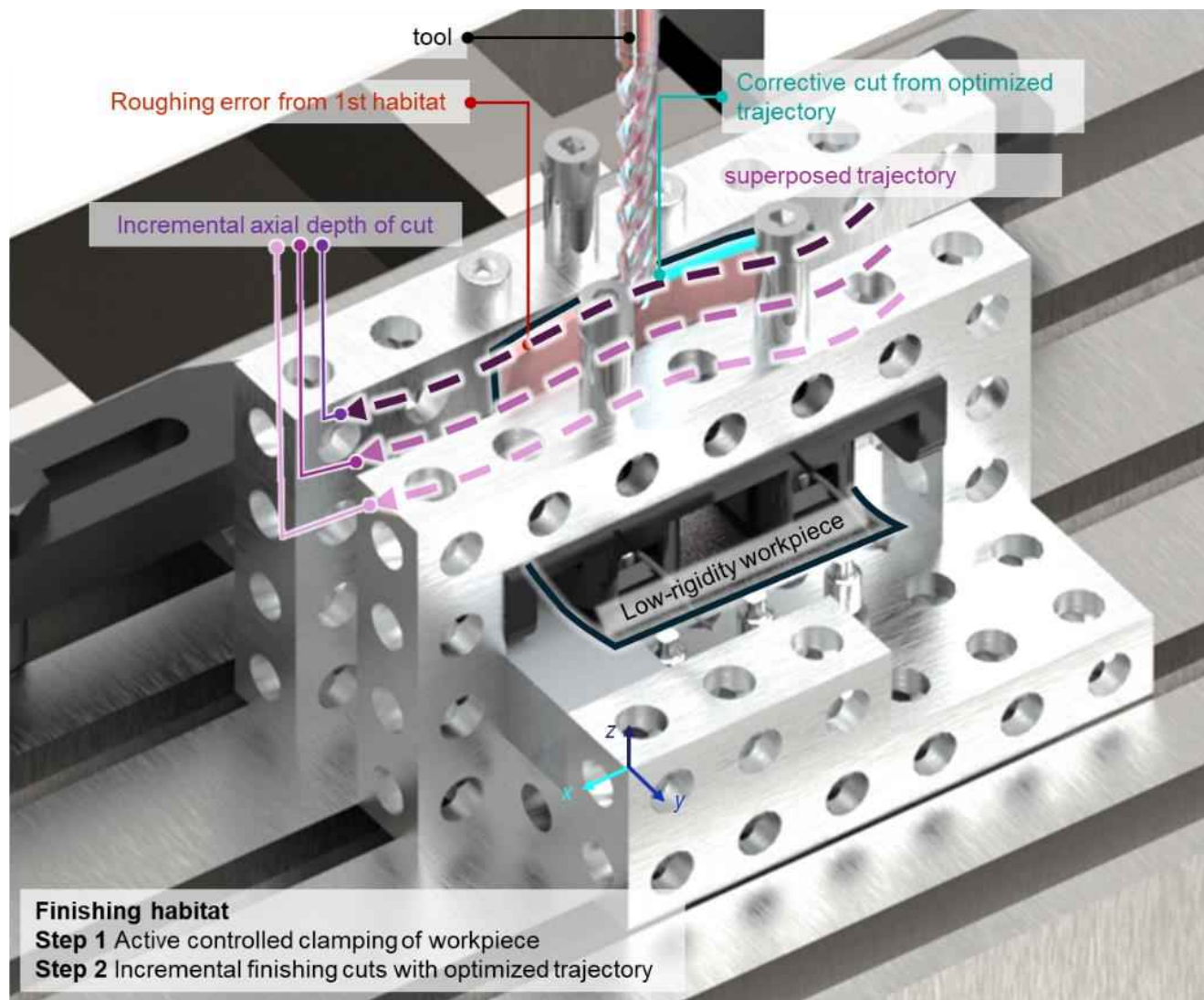
Vollautomatisiertes System



Human-Cyber-Physical System



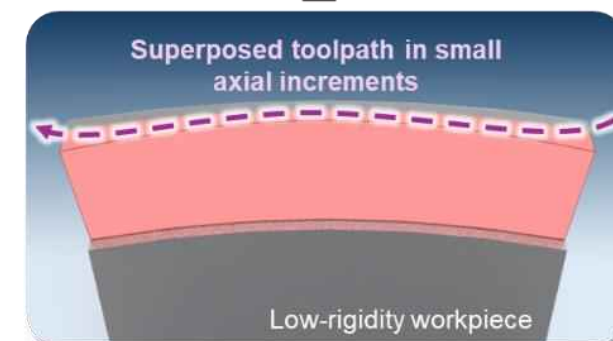
Digitaler-Zwilling-Assistierte Vorhersage und Regelung von Spannbedingten Deformationen und Vorspannkräften



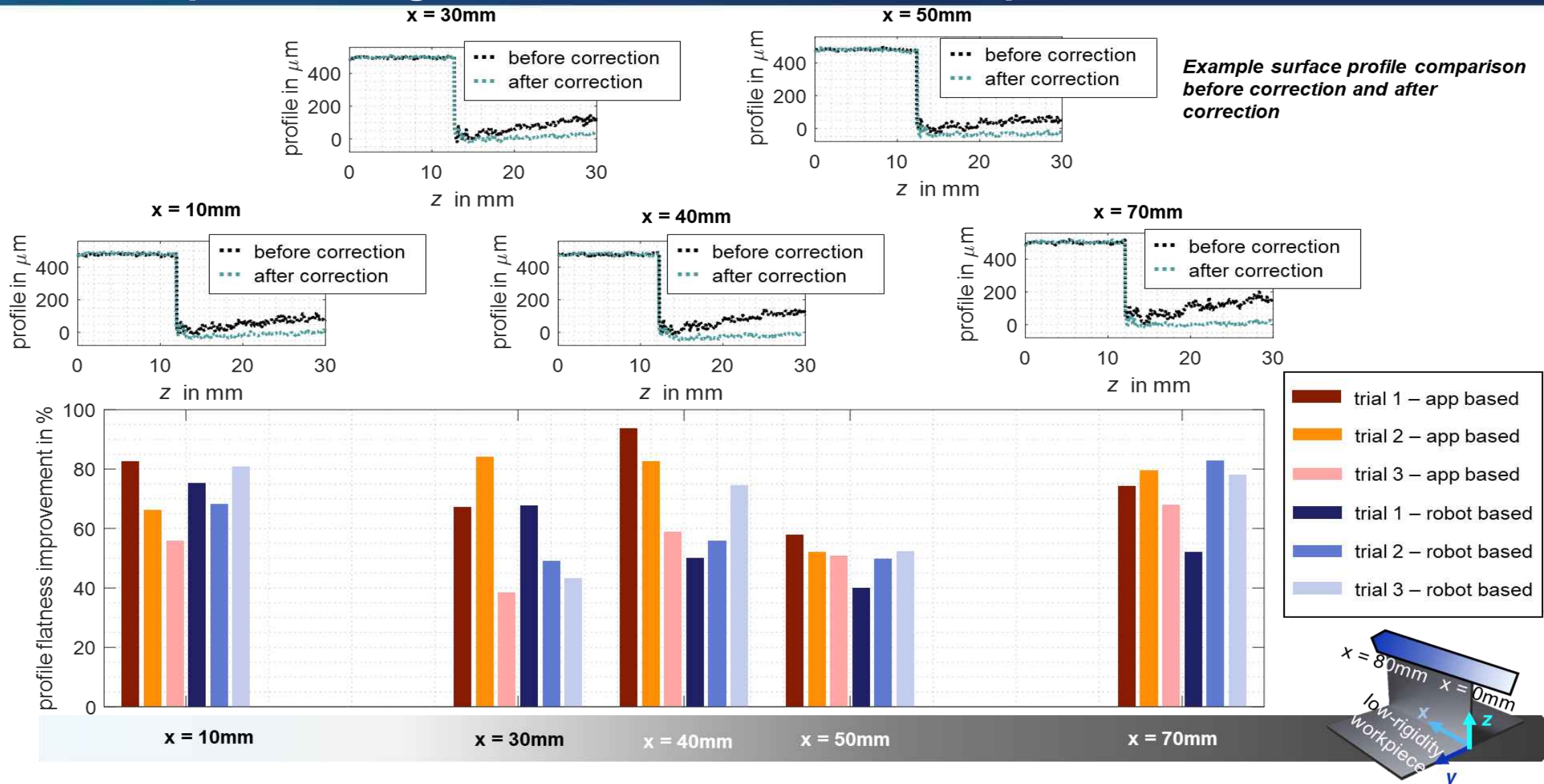
+



=

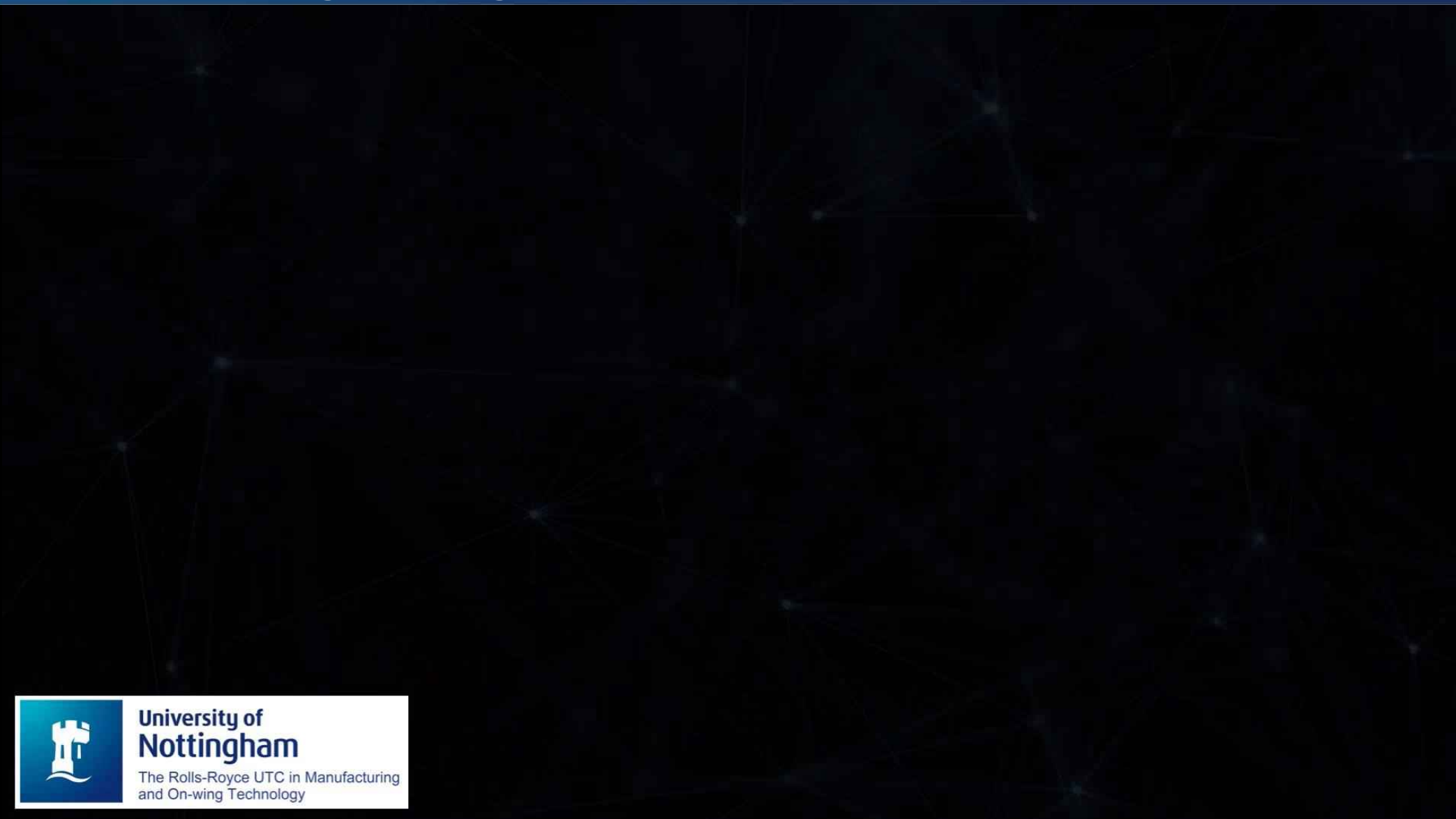


Digitaler-Zwilling-Assistierte Vorhersage und Regelung von Spannbedingten Deformationen und Vorspannkräften





Digitaler-Zwilling-Assistierte Vorhersage von Bearbeitungsbedingten Deformationsfehlern





**University of
Nottingham**
The Rolls-Royce UTC in Manufacturing
and On-wing Technology



**University of
Nottingham**

UK | CHINA | MALAYSIA

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

[1] Mariam Abed, Andres Gameros, Abdelkhalick Mohammad, Dragos Axinte, Swift feedback and immediate error control using a lightweight simulation approach – A case study of the digital-twin-in-the-loop for machining thin-wall structures. In Journal of Manufacturing Systems, Volume 71, 2023, Pages 309–322, ISSN 0278-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.09.016>.

[2] Mariam Abed, Abdelkhalick Mohammad, Dragos Axinte, Andres Gameros, David Askew, Digital-twin-assisted multi-stage machining of thin-wall structures using interchangeable robotic and human-assisted automation. In Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 97, 2026, 103077, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2025.103077>.