

Im Praxisalltag vieler Ingenieure ist heute interdisziplinäres Wissen erforderlich, um die Leistungs- und Konkurrenzfähigkeit komplexer Maschinen und Anlagen stetig zu steigern und einen Innovationsvorsprung zu garantieren. In diesem Sinne greift auch die 18. VDI-Getriebetagung „Bewegungstechnik“ branchenübergreifende Fragestellungen aus Forschung und Praxis auf und gibt nachhaltige Anregungen zur Bearbeitung eigener anspruchsvoller Aufgabenstellungen.

Wir freuen uns Sie als Teilnehmer der Tagung begrüßen zu dürfen

Im Namen des Programmausschusses



Tagungsleiter

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Maik Berger**

Institut für Füge- und Montagetechnik

Professur Montage- und Handhabungstechnik

Technische Universität Chemnitz

## Entwicklung des kinematischen Systems einer Digitaldruckmaschine zur Dekoration beliebig gekrümmter Oberflächen

Dr.-Ing. Henning Niggemann,  
Heidelberger Druckmaschinen AG, Heidelberg

### Kurzfassung

Mit der neuen Maschinenreihe *Omnifire* der Heidelberger Druckmaschinen AG sollen nahezu beliebige Objekte mit ebenen oder gekrümmten Oberflächen individuell bedruckt werden. Grundlage der Technologie ist die Kombination des UV-Inkjet-Druckverfahrens mit einer hochpräzisen, bei Heidelberg entwickelten Robotik.

Der Beitrag beschreibt die Entwicklung des Handhabungssystems für die Druckobjekte von der Struktursynthese über die Abbildung des mechatronischen Gesamtsystems in der Mehrkörpersimulation, die Optimierung der Bewegungsgenauigkeit bis zur Inbetriebnahme der Maschine.

### 1. Direktdruck auf beliebig geformte Oberflächen

Bei Gebrauchs- und Konsumgütern ist das Design ein zunehmend wichtiger Faktor für den Markterfolg. Der Wiedererkennungswert und das Image von Marken und Produkten können dabei wesentlich durch eine eigenständige, attraktive farbige Gestaltung unterstützt werden. Im industriellen Produktionsprozess stehen verschiedene Verfahren zum Bedrucken von Gegenständen zur Verfügung.

Ebene oder gekrümmte Objektoberflächen können z.B. im Tampon- oder Siebdruck farbig gestaltet werden. Da hier jeweils eine motivspezifische Druckform (Drucktampon, Sieb) erforderlich ist, eignen sich diese Verfahren vor allem zur wirtschaftlichen Herstellung mittlerer bis großer Stückzahlen. Zunehmend besteht jedoch der Wunsch vieler Hersteller, ihren Kunden mehr Möglichkeiten zur Individualisierung von Produkten anzubieten. So hat der Käufer eines PKW heute vielfach die Möglichkeit, sein Fahrzeug durch Kombination verschiedener vorgegebener Designelemente bzw. Dekors zu individualisieren (**Bild 1**). In der Produktion werden solche Dekorvarianten häufig durch Folierungen umgesetzt. Ebenso kommen Druckverfahren wie der Wassertransferdruck oder das Inmould-Labeling zum Einsatz.

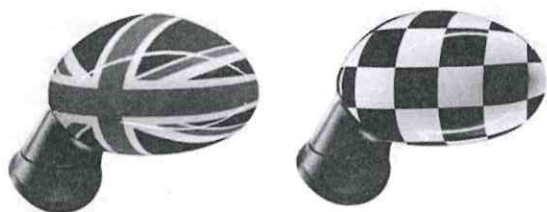


Bild 1: Zwei Gestaltungsmöglichkeiten für einen PKW-Außenspiegel nach [1].

Dem Trend zur Individualisierung folgend erforscht die Heidelberger Druckmaschinen AG Einsatzmöglichkeiten digitaler Druckverfahren zur Dekoration nahezu beliebiger Objektformen. Dabei besteht das Entwicklungsziel, auf Basis der Inkjet-Technologie mit UV-trocknenden Farben ein Drucksystem zu schaffen, mit dem sogar einzelne Objekte nach individuellem Kundenwunsch wirtschaftlich bedruckt werden können.

## 2. Komponenten des Systems zum Bedrucken von 3D-Oberflächen

Das Drucksystem zur Bebilderung beliebig geformter Oberflächen besteht aus einem Druckmodul mit den Tools zur Realisierung des Inkjet-Prozesses und aus einem Handhabungsgerät (HHG) zur Erzeugung der Druckbewegung (Bild 2).

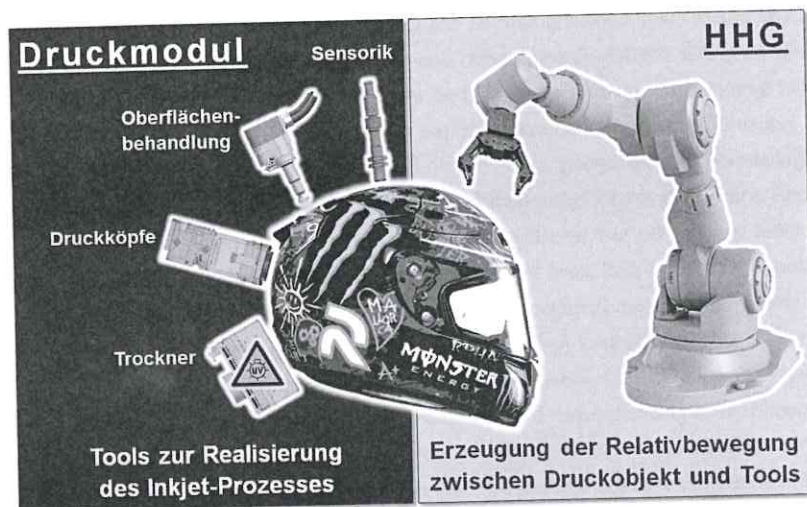


Bild 2: Komponenten eines Systems zum Direktdruck auf nahezu beliebig geformte Objekte.

Das Druckmodul enthält zunächst Sensoren zur Erfassung der Druckobjektlage in der Maschine bzw. zur Vermessung der Druckoberfläche. Um Druckobjekte aus möglichst vielen unterschiedlichen Materialien (Oberflächen aus Metall, Kunststoffen, lackierte Oberflächen) bedrucken zu können, sind darüber hinaus Vorbehandlungstools notwendig. Sie dienen zur Konditionierung der Druckoberfläche, so dass ein günstiges Farbannahmeverhalten und eine gute Haftung der Farben erreicht wird. Die Inkjet-Druckköpfe stellen die zentralen Tools des Druckmoduls dar. Sie verdrucken lackartige Farben, die ein breites Substratspektrum abdecken und unter Einwirkung von ultraviolettem Licht praktisch schlagartig aushärten. Entsprechend besitzt das Druckmodul einen UV-Trockner als weiteres Tool. Darüber hinaus können sog. Pinningtools notwendig sein. Sie dienen zur Vortrocknung des Druckbildes mit geringer UV-Leistung und können damit ein ungewolltes Verlaufen der Farben verhindern.

Zur Bebilderung eines Objektes müssen die Tools mit hoher Bahngenauigkeit und möglichst gleichmäßiger Geschwindigkeit über die Druckoberfläche geführt werden. Diese Aufgabe übernimmt das Handhabungsgerät (HHG) als zweite zentrale Komponente des Drucksystems. Sollen allgemein gekrümmte Flächen bedruckt werden, ist ein Handhabungssystem mit 6 Bewegungsachsen erforderlich.

## 3. Festlegung des Maschinenkonzeptes

Bei der Entwicklung des Maschinenkonzeptes muss zunächst festgelegt werden, ob das Handhabungsgerät der Maschine zur Führung der Tools bei stillstehendem Druckobjekt oder zur Bewegung des Objekts bei gestellfesten Tools eingesetzt werden soll. Beide Grundkonzepte werden bei Heidelberg verfolgt und je nach Anwendung gemäß der jeweiligen Vor- und Nachteile angewendet.

Das Konzept „bewegtes Druckmodul“ bzw. „bewegte Tools“ ist von Vorteil, wenn die Handhabbarkeit des Druckobjektes kritisch erscheint (z.B. bei vergleichsweise großen oder schweren Objekten) und wenn gleichzeitig ein eher einfaches Druckmodul mit wenigen Tools verwendet werden kann. Eine typische Druckaufgabe dieser Art wäre z.B. die Dekoration eines PKW bzw. eines größeren Karosserieteils mit einem einfarbigen Schriftzug.

Das Drucksystem *Omnifire* als Gegenstand dieses Beitrags ist dagegen zur Bebilderung kompakter und vergleichsweise leichter Druckobjekte vorgesehen. Dabei wird ein qualitativ hochwertiger Rasterdruck mit Deckweiß, mindestens 4 Grundfarben und zusätzlicher Klarlackierung gefordert. Jede Farbe wird mit einem separaten Inkjetkopf gedruckt, so dass ein komplexes Druckmodul mit relativ großem Bauraumbedarf entsteht (Bild 3).



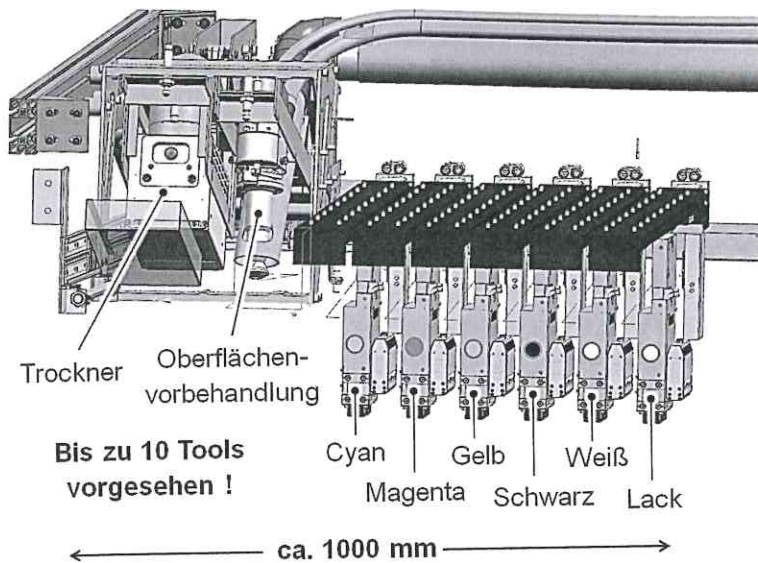


Bild 3: Druckmodul mit Oberflächenvorbehandlung, 6 Druckköpfen und UV-Trockner.

Das Maschinenkonzept "bewegte Tools" wäre bei der vorliegenden Druckmodulgröße allenfalls in Verbindung mit einem Wechselsystem umsetzbar, bei dem nur das gerade benötigte Tool aus einem Magazin entnommen und mit dem Handhabungsgerät gekoppelt wird. Neben Nachteilen für die Prozessdauer wäre dabei insbesondere ein prozesstechnisch sehr kritisches Trennen und Verbinden der Druckkopf - Farbversorgungen nötig. Ein weiterer Nachteil des Prinzips "bewegte Tools" sind die durch Beschleunigungen auftretenden Druckschwankungen in den Farbleitungen und -kanälen, die zu Störungen des Jettingverhaltens der Druckköpfe führen können.

Für das geplante Drucksystem *Omnifire* zur Dekoration kompakter Gegenstände unter Verwendung eines komplexen Druckmoduls fällt daher die Wahl auf das Maschinenkonzept "bewegtes Druckobjekt". Zusätzlich ist dabei aber auch eine bewegliche Anordnung der einzelnen Tools im Druckmodul vorgesehen. Während des Druckvorgangs können damit alle Tools, die gerade nicht aktiv sind, in eine Parkposition außerhalb des kollisionskritischen Arbeitsraums der Robotik bewegt werden.

#### 4. Entwicklung des Handhabungsgerätes zur Erzeugung der Druckbewegung

Um nahezu beliebig geformte Gegenstände bzw. Oberflächen bedrucken zu können, muss das Handhabungssystem der Maschine eine allgemein räumliche Bewegung der Druckobjekte ermöglichen. Entsprechende Handhabungsgeräte mit sechs Bewegungsmöglichkeiten (sechs „Roboterachsen“) werden prinzipiell von zahlreichen Herstellern angeboten. Für Handhabungsaufgaben, die einen großen Arbeitsraum erfordern, kommen meist Maschinen mit serieller kinematischer Struktur zum Einsatz. Parallelkinematische Maschinen besitzen häufig eine besonders hohe Steifigkeit und ein günstiges dynamisches Verhalten. Bei der Auswahl eines geeigneten Handhabungsgerätes zur Führung der Druckobjekte ist zunächst ein Abgleich zwischen den spezifischen Eigenschaften des HHG und den Anforderungen des Inkjet-Prozesses erforderlich.

Bei der vorliegenden Aufgabe müssen beispielsweise Kriterien wie die maximale Traglast, die Leistungsdichte, die Bahngeschwindigkeit (insbesondere im Hinblick auf ihre Konstanz) und die erreichbare Bewegungsgenauigkeit bewertet werden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Bewertung gängiger Handhabungsgeräte anhand ausgewählter Kriterien.

| Kriterium                        | Eigenschaft / Bewertung gängiger HHG | Bedeutung für den UV-Inkjet-Prozess |
|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Maximale Traglast                | hoch                                 | niedrig                             |
| Leistungsdichte                  | hoch                                 | niedrig                             |
| Maximale Bahngeschwindigkeit     | hoch                                 | niedrig                             |
| Konstanz der Bahngeschwindigkeit | kritisch                             | hoch                                |
| Bahngenauigkeit                  | kritisch                             | hoch                                |
| Modularität                      | i.d.R nicht gegeben                  | mittel                              |

Markttübliche Handhabungsgeräte („Industrieroboter“) besitzen hohe Leistungsdichten und ermöglichen bei hoher Traglast große Arbeitsgeschwindigkeiten. Beim geplanten Inkjet-Prozess sollen Objekte mit einer Masse von maximal 10 kg bewegt werden. Die Bahngeschwindigkeit des Druckkopfs relativ zur Druckoberfläche liegt dabei lediglich in der Größenordnung  $v = 200 \text{ mm/s}$ , so dass die genannten Stärken gängiger Handhabungsgeräte hier weniger von Nutzen sind.

Der Inkjet-Prozess stellt jedoch besonders hohe Anforderungen an die Bahngenauigkeit und die exakte Einhaltung der Geschwindigkeitsvorgabe. Industrieroboter erreichen gemessen am komplexen mechanischen Aufbau zwar eine erstaunliche Präzision, je nach

Druckaufgabe übersteigen ihre Bewegungsfehler jedoch die zulässigen Grenzen des Inkjet-Prozesses. Ein Beispiel für die Empfindlichkeit des Druckprozesses gegenüber speziellen Bewegungsfehlern ist in **Bild 4** dargestellt. Querschwingungen zwischen Druckkopf und Substrat führen hier zu massiver Streifenbildung beim Druck einer gerasterten Graufäche. Dieser für den vorliegenden Inkjet-Prozess typische Druckfehler wird bereits bei Schwingungsamplituden im niedrigen Hundertstelmillimeter-Bereich sichtbar. Bei üblichen Handhabungsgeräten reicht häufig bereits eine Anregung durch Übersetzungsschwankungen der verwendeten Getriebe aus, um Schwingungen dieser Größenordnung anzuregen und die Druckqualität deutlich zu beeinträchtigen.

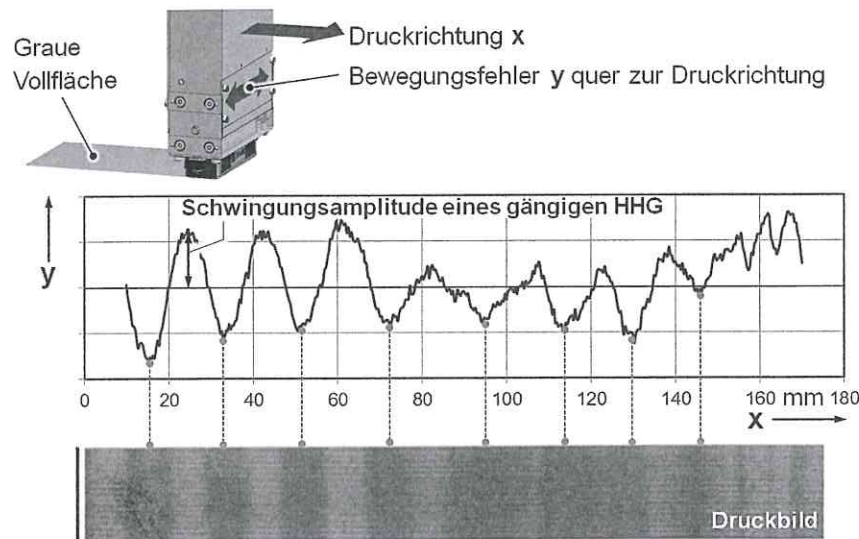


Bild 4: Beispiel für die Auswirkung von Bewegungsfehlern auf das Druckergebnis.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich das Leistungsprofil gängiger Industrieroboter und das Anforderungsprofil des Inkjet-Prozesses nicht optimal decken. Im Rahmen der Konzeption des Drucksystems *Omnifire* wurde daher entschieden, ein speziell auf die vorliegenden Anforderungen zugeschnittenes, modulares Handhabungsgerät von Grund auf neu zu entwickeln.

Das primäre Entwicklungsziel ist eine möglichst hohe Bewegungsgenauigkeit des Handhabungssystems für die Druckobjekte. Neben dem Einsatz hochgenauer Antriebe für

die einzelnen Achsen des HHG ist die Wahl einer geeigneten kinematischen Struktur entscheidend für die Erreichbarkeit der Genauigkeitsvorgaben. Die Struktur wurde so gewählt, dass sich für möglichst viele Druckaufgaben eine minimale Anzahl gleichzeitig bewegter Roboterachsen ergibt [2]. Bewegungsfehler des geführten Druckobjekts durch eine Akkumulation der einzelnen Roboterachsenfehler werden damit gering gehalten. Das Handhabungssystem ist zudem modular aufgebaut und kann leicht an spezielle Druckaufgaben angepasst werden.

Alle kinematischen Varianten der Maschine basieren auf einem servoelektrisch angetriebenen x, y, z-Linearsystem (**Bild 5**), bestehend aus dem Grundgestell 1, der Gantryeinheit 2 sowie den Schlitten 3 und 4. Mit dieser Anordnung kann der Mittelpunkt A des Flanschs 4a auf einer nahezu beliebigen räumlichen Bahn  $k_A$  bewegt werden.

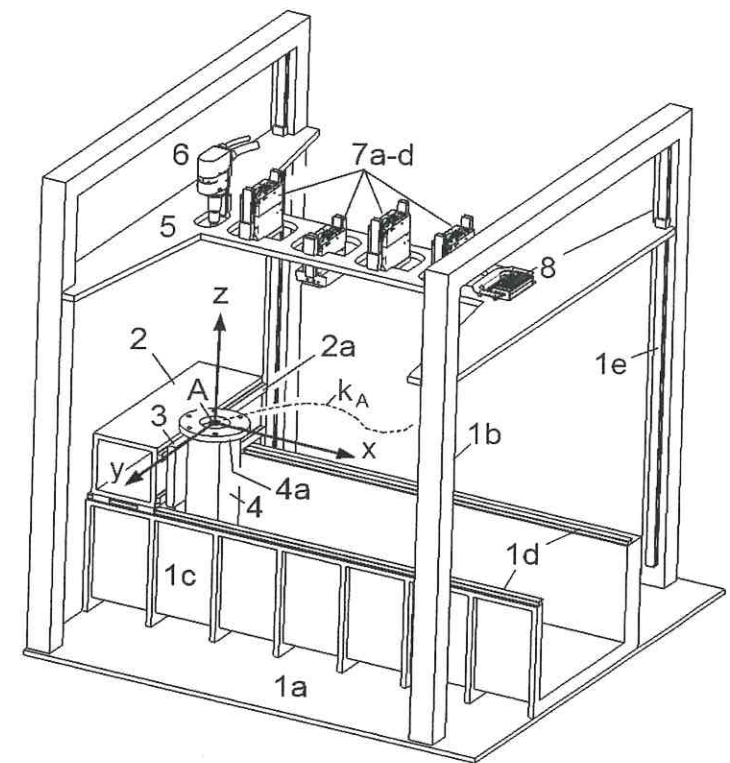


Bild 5: Lineareinheit als Grundbaustein des Handhabungsgerätes [3].



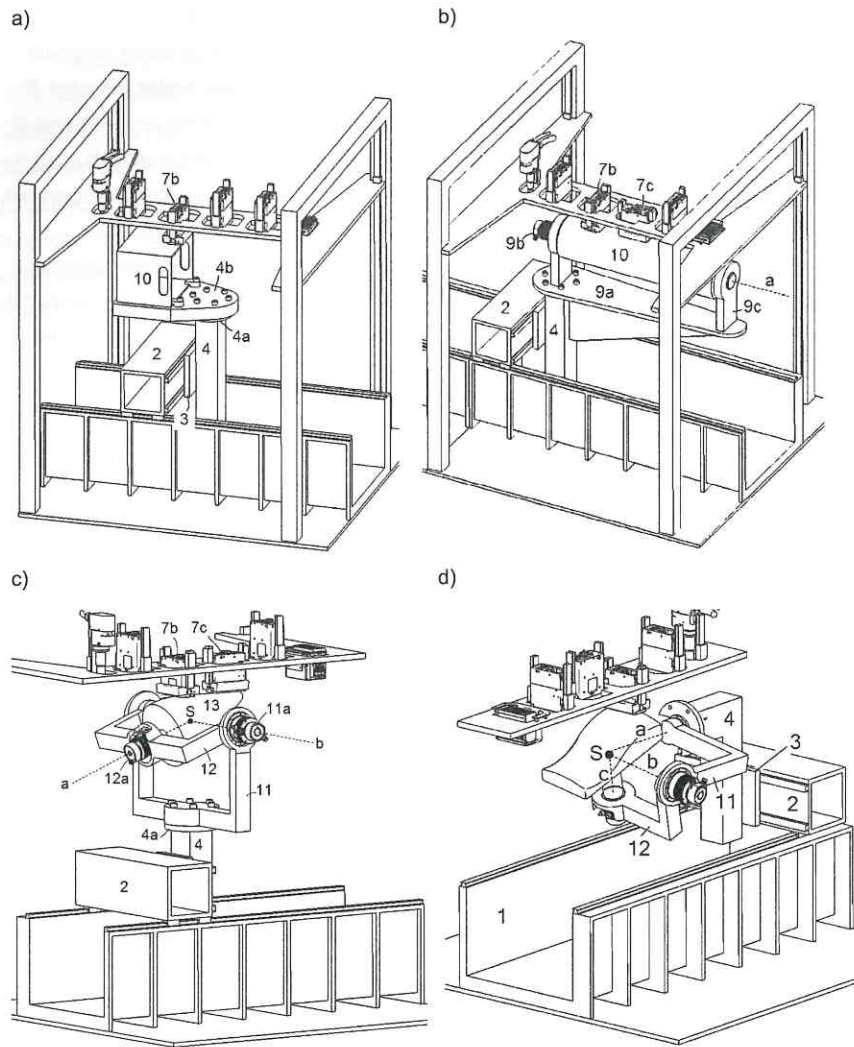


Bild 6: Varianten des Handhabungsgerätes mit 3 Linearachsen und  
b) einer Drehachse  
c) zwei Drehachsen  
d) drei Drehachsen.

Mit dem x, y, z-Linearsystem können bereits ebene Oberflächen bedruckt werden (**Bild 6a**). Sollen mehrere nicht parallele Flächenelemente dekoriert werden, muss das Druckobjekt jedoch umgespannt werden. Durch die Kombination des 3-Achsen-Linearsystems mit Erweiterungsmodulen zur Orientierung des Druckobjektes kann die Maschine an komplexere Druckaufgaben angepasst werden. Die 4-Achsen-Variante (**Bild 6b**) mit drei Linear- und einer Drehachse erweitert das Einsatzspektrum auf rotationssymmetrische Druckobjekte mit gerader Mantellinie. Sollen zusätzlich auch allgemeine Rotationskörper bedruckt werden, ist die 5-Achsen-Variante (**Bild 6c**) zu wählen. Mit der 6-Achsen-Maschine (**Bild 6d**) können schließlich auch allgemein gekrümmte Oberflächen dekoriert werden.

Als Besonderheit zeichnen sich die Maschinen gemäß Bild 6a und 6b dadurch aus, dass der Drehachsenschnittpunkt S frei zugänglich im Einspannbereich des Druckobjektes liegt. Damit können Druckobjekte mit geometrischen Symmetrien so eingespannt werden, dass Symmetrieachsen durch den Punkt S verlaufen oder Symmetriepunkte mit S zusammenfallen. Diese Eigenschaft trägt wesentlich zur angestrebten Minimierung der Anzahl gleichzeitig bewegter Roboterachsen bei.

Ausgehend von diesem modularen Konzept wurden die Maschinenkomponenten gestaltet. Zur Gewährleistung einer möglichst hohen Steifigkeit der Robotik wurde die Konstruktion durch Finite Elemente Berechnungen und erste Mehrkörpersimulationen begleitet. **Bild 7** zeigt die Ausführung der 6-Achsen-Variante, die im Folgenden näher betrachtet werden soll.

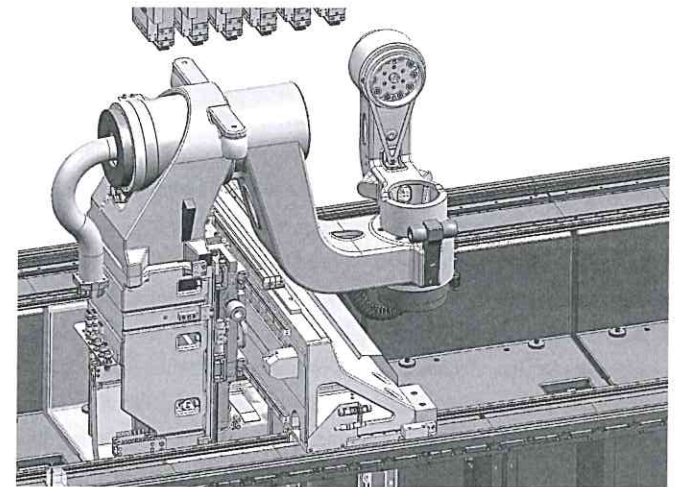


Bild 7: Konstruktive Ausführung der 6-Achsen-Maschine.

### 5. Untersuchung des mechatronischen Systems in der Mehrkörpersimulation

Zur Vorhersage des kinematischen und dynamischen Verhaltens wird die Konstruktion gemäß Bild 7 zunächst in der Mehrkörpersimulation untersucht. Das Mehrkörpermodell umfasst neben dem mechanischen System auch die Regelung der sechs servoelektrischen Antriebe (Bild 8).

#### Mechanisches System : MKS

- Flexible Körper, elast. Lager und Führungen
- Heidelberg-Ansatz zur Modellierung der Linearführungen zwischen modal reduzierten Flexbodies
- Reibung / Dämpfung
- Detaillierte Abbildung der Motoren

#### Regelung: Blockmodellierer

- Digitale Regelung
- Kaskadenregler
- PI-Positionsregler
- PI-Geschwindigkeitsregler
- Reibungs-, Momentenvorsteuerung

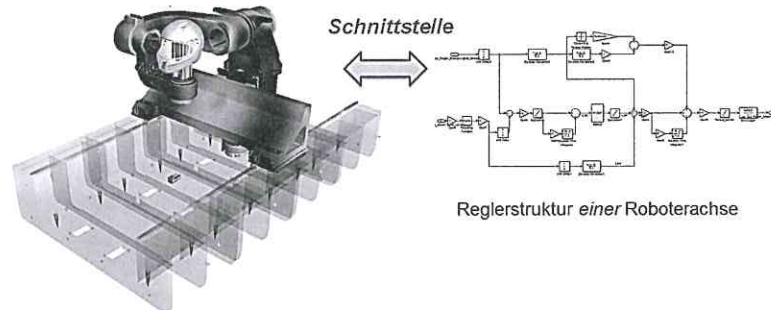


Bild 8: Modelltiefe des mechatronischen Gesamtsystems.

Bei der Modellierung des x, y, z-Linearsystems der Maschine erwies sich die hochgenaue Abbildung der Schlittenführungen als Herausforderung. Da die Bordmittel des verwendeten MKS-Programms keine zufriedenstellende Modellierung der schiebenden Lagerung zwischen modal reduzierten Flexbodies erlaubten, wurde ein alternativer Modellansatz mit hoher numerischer Stabilität, gegenüber Standard-MKS-Funktionen deutlich reduzierter Rechenzeit und hoher Ergebnisqualität entwickelt. Die entsprechende Funktionalität wurde in Form eines Makros in das verwendete MKS-Programm integriert.

Zur Gewinnung eines ersten Eindrucks vom dynamischen Verhalten der Mechanik wird im Folgenden der Druck auf ein kappenförmiges Objekt simuliert. Bild 9 verdeutlicht die gewünschte Relativbewegung zwischen Objekt und Tools anhand einer Lagenschar der Nozzleplatte des Druckkopfs. Als Sollbahn  $k_N$  der mittleren Druckdüse (Punkt N) relativ zum Objekt wird ein ebener Schnitt durch die Druckoberfläche vorgegeben. Zwischen dem

Startpunkt der Bewegung und dem Druckbeginn wird ein Bahnsegment zur Beschleunigung des Systems steigungs- und krümmungsstetig angeschlossen. Analog besitzt die Bahn am Ende ein Segment zum Abbremsen des Druckkopfs. Zur eindeutigen Definition der Toolbewegung muss neben der Druckbahn  $k_N$  auch die Orientierung des toolfesten  $x_{Tool}$ ,  $y_{Tool}$ ,  $z_{Tool}$  Koordinatensystems festgelegt werden. Das Tool muss im Druckprozess so geführt werden, dass die  $x_{Tool}$ -Achse der Druckbahntangente und die Achse  $z_{Tool}$  der Druckflächennormale entspricht.

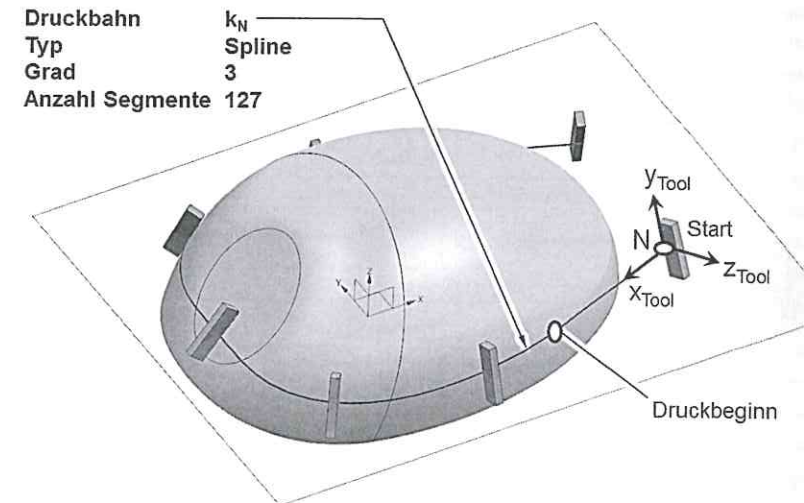


Bild 9: Kappenförmiges Druckobjekt mit beispielhafter Toolbewegung.

Wird die Druckbahn  $k_N$  zwischen Druckbeginn und Druckende aus dem exakten ebenen Schnitt durch die Druckoberfläche erzeugt, ergeben sich zunächst vergleichsweise hohe Krümmungsänderungen, die im Hinblick auf Schwingungsanregungen der Maschine kritisch erscheinen. Daher wird die Druckbahn durch einen krümmungsstetigen kubischen Spline angenähert. Dabei wird eine relativ geringe Anzahl an Stützpunkten gewählt, um ein gutes Krümmungsverhalten zu erreichen. Aus den entsprechenden Bahndaten und den Daten der Druckoberfläche können nun die Bewegungsfunktionen der einzelnen Robotersensoren berechnet und im MKS-Modell vorgegeben werden.



Zur Bewertung der simulierten Druckbewegung werden die Lagefehler des Punktes N (Bild 9) in Druckrichtung ( $x_{\text{Tool}}$  - Richtung), quer zur Druckrichtung ( $y_{\text{Tool}}$  - Richtung) sowie normal zur Druckoberfläche ( $z_{\text{Tool}}$  - Richtung) ausgewertet.

Obwohl die Druckbahn  $k_N$  als vergleichsweise „weiche“ krümmungsstetige Kurve vorgegeben wurde, zeigt die Mehrkörpersimulation zunächst eine extreme Schwingungsanregung der Maschine mit Wegfehleramplituden im Millimeterbereich (Bild 10). Die Druckbahn weicht entsprechend stark von der Vorgabe ab (Bild 11).

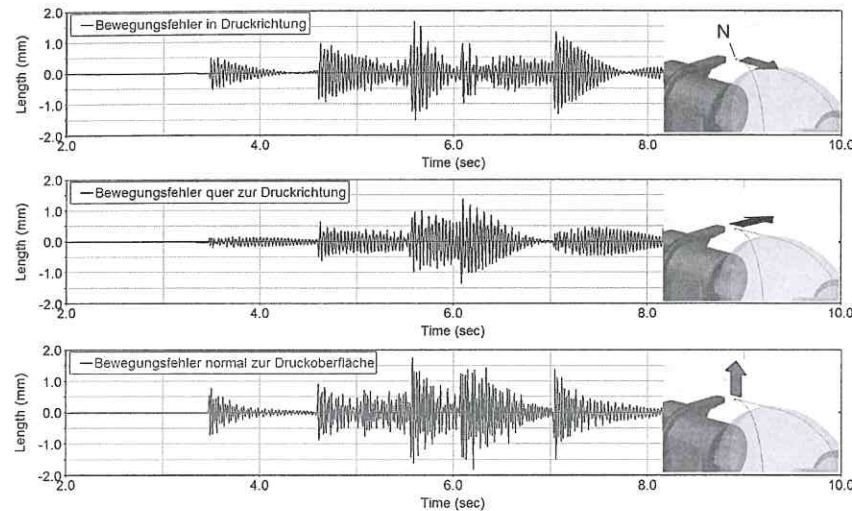


Bild 10: Bewegungsfehler des Druckpunktes N

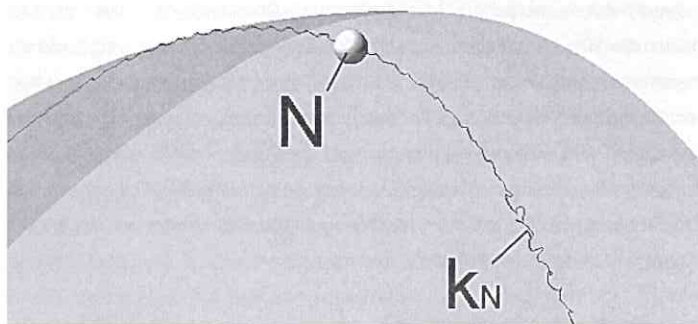


Bild 11: Druckbahn  $k_N$  des elastischen Systems.

## 6. Optimierung des dynamischen Verhaltens durch geeignete Bahnplanung

Die ersten Simulationsergebnisse mit starker Schwingungsanregung der Maschine verdeutlichen die besonders hohe Bedeutung dynamisch günstiger Bewegungsvorgaben (Bewegungsdesign). Zur Minimierung störender Schwingungen wurde daher eine Methode und eine entsprechende Software zur Generierung dynamisch optimaler Druckbahnen  $k_N$  entwickelt. Ausgangspunkt ist eine exakt auf der Druckoberfläche liegende Druckbahn, die gegebenenfalls sogar Sprünge im Krümmungsverlauf aufweisen darf. Diese Bahn wird durch einen bei Heidelberg entwickelten Algorithmus geglättet. Die Form der entstehenden neuen Bahn wird dabei durch zwei Parameter gesteuert (Bild 12).

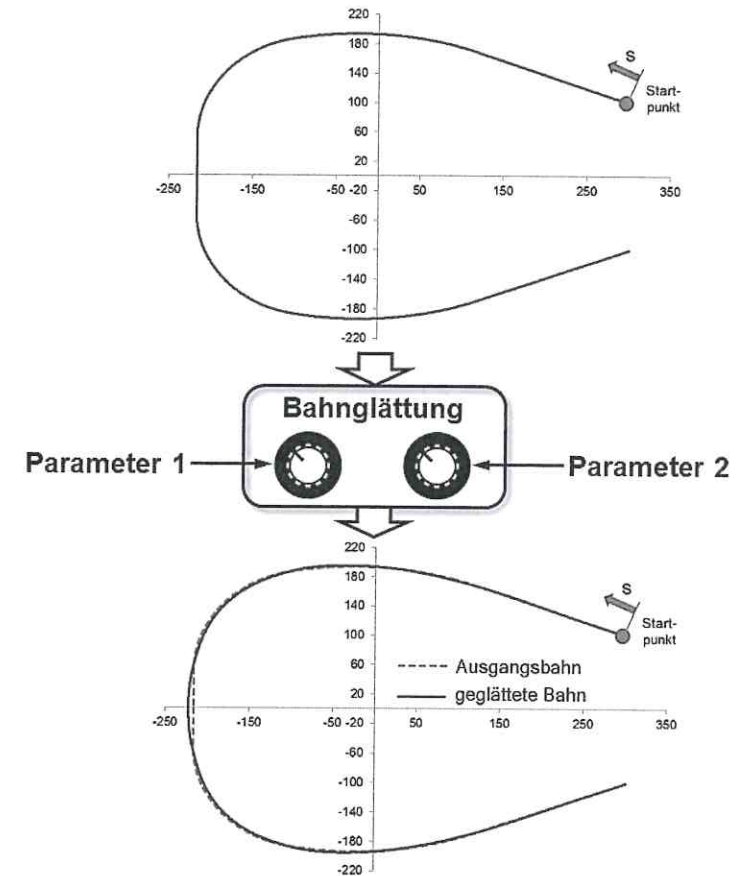


Bild 12: Bahnglättung mit Steuerung durch zwei Glättungsparameter.

Je stärker die Ausgangsbahn geglättet wird, desto geringer ist die Schwingungsanregung durch plötzliche Krümmungsänderungen und desto geringer sind demzufolge die dynamischen Bewegungsfehler der Maschine. Andererseits steigen mit zunehmender Glättung die rein geometrischen Abweichungen von der eigentlich gewünschten Ausgangsbahn.

Das Ziel besteht nun darin, die beiden Glättungsparameter (Bild 12) so zu ermitteln, dass sich der minimale Gesamtbewegungsfehler, also die minimaler Summe aus dem glättungsbedingten geometrischen Bahnfehler und Bewegungsfehlern durch Maschinenschwingungen ergibt. **Bild 13** zeigt für das vorliegende Beispiel den Verlauf des maximalen Gesamtbewegungsfehlers (Summe aus geometrischer Bahnabweichung durch Bahnglättung und Bewegungsfehler durch Schwingungen) in Abhängigkeit der beiden Bahnglättungsparameter. Das Minimum der Funktion kennzeichnet die optimale Parametrierung des Bahnglättungsalgorithmus.

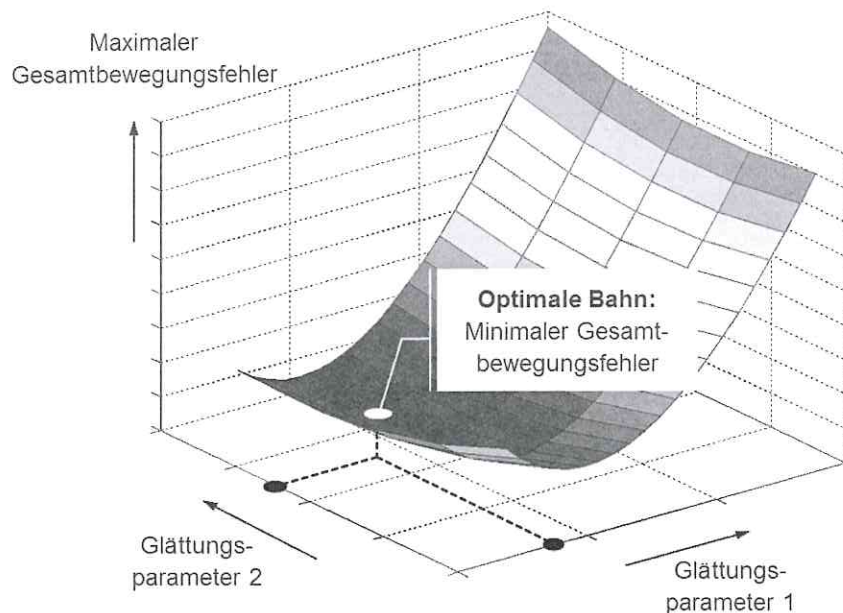


Bild 13: Ermittlung der optimalen Bahnglättungsparameter.

Mit den optimalen Glättungsparametern ergibt sich zunächst ein erstaunlich geringer geometrischer Bahnfehler. Der Abstand  $\varepsilon$  zwischen einem Punkt der Ausgangsbahn  $k_N$  und dem entsprechenden transformierten Punkt auf der geglätteten Bahn ist in **Bild 14** über der Bogenlänge  $s_{kN}$  aufgetragen. Der Maximalabstand beträgt lediglich ca. 0.04 mm. Insgesamt ist diese durch Glättung entstehende Abweichung von der Sollbahn für den Druckprozess unkritisch, da sie als reiner Druckabstandsfehler erscheint. Druckbildfehler entstehen dagegen in erster Linie durch Fehler in Bewegungsrichtung oder quer zur Druckrichtung.

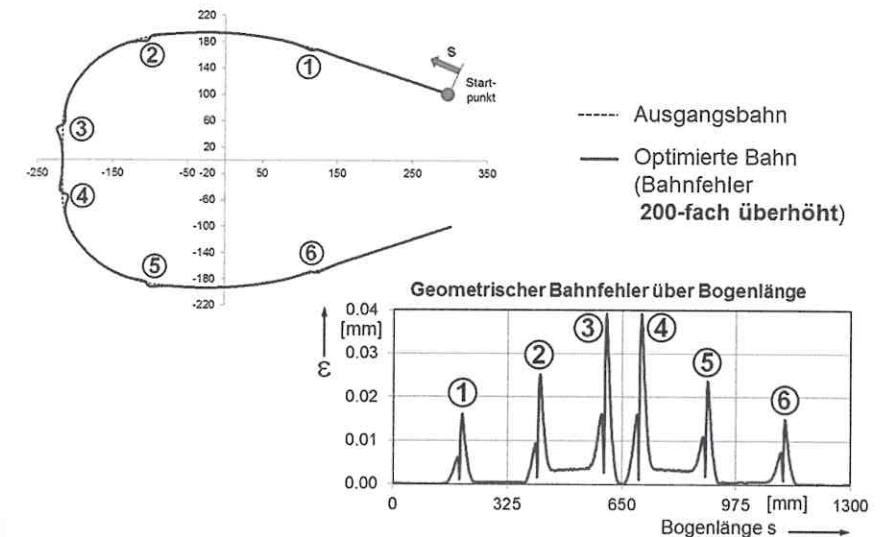


Bild 14: Geometrische Abweichung der optimierten Bahn gegenüber der Ausgangsbahn.

Die erneute Mehrkörpersimulation mit der optimierten Bahnvorgabe zeigt schließlich die enorme Verbesserung des dynamischen Verhaltens. In den Verläufen der Bewegungsfehler des Druckpunktes N (Bild 9) zeigen sich praktisch keine Maschinenschwingungen mehr (**Bild 15**). Beim Vergleich mit dem Ausgangszustand gemäß Bild 10 sind die unterschiedlichen Skalierungen der Diagrammordinaten zu beachten.

Mit der dynamisch optimierten Bahn können die Maschinenschwingungen fast vollständig eliminiert werden, dennoch zeigen die Bahnfehlerverläufe neben konstanten Offsets noch deutliche Schwankungen an diskreten Stellen der Bewegung. Diese Fehler übersteigen die zulässigen Grenzen des Inkjet-Prozesses noch deutlich, so dass eine weitere Verbesserung der Bewegungsgenauigkeit erforderlich ist.



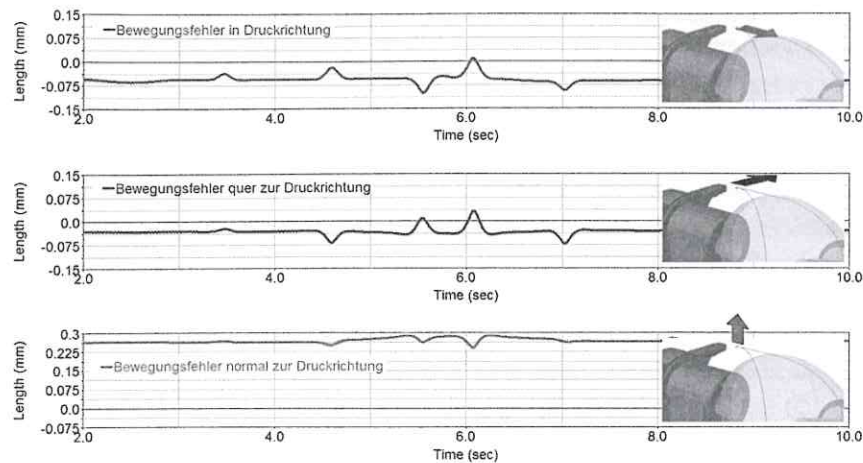


Bild 15: Deutlich reduzierte Bewegungsfehler nach Optimierung der Druckbahn.

## 7. Kompensation kinetostatischer Bewegungsfehler

Die nähere Untersuchung der Fehlerverläufe gemäß Bild 15 zeigt, dass ihre qualitative Gestalt im Wesentlichen den Beschleunigungsverläufen der Roboterachsen folgt. Insgesamt setzen sich die Restfehler aus rein statischen Abbiegungen der Maschine im Erdschwerefeld und aus kinetostatischen Maschinenverformungen durch die Beschleunigungsverläufe der sechs Roboterachsen zusammen.

Die gewählte kinematische Struktur des Handhabungsgerätes mit dem x, y, z-Linearsystem erlaubt prinzipiell eine sehr einfache Kompensation des Positionsfehlervektors. Eine Kompensation kann nämlich erreicht werden, indem die Verläufe der drei Positionsfehlerkomponenten von den zeitlichen Wegverläufen der entsprechenden Roboterachsen subtrahiert werden. Der Bewegungsfehler in Druckrichtung wird dabei im Bewegungsverlauf der Roboterachse x (Schlitten 2, Bild 5) der Bewegungsfehler quer zur Druckrichtung im Bewegungsverlauf der Achse y (Schlitten 3) und der Bewegungsfehler normal zur Druckoberfläche in der z-Bewegung (Schlitten 4) berücksichtigt bzw. vorgehalten.

Voraussetzung für die Kompensation ist eine möglichst genaue Vorhersage der kinetostatischen Bewegungsfehler, zum Beispiel durch die detaillierte Mehrkörpersimulation. In der Praxis erscheint es jedoch nicht zielführend, den hohen Simulationsaufwand mit einem komplexem Mehrkörpermodell für jede Druckaufgabe vorzusehen. Vielmehr besteht der

Wunsch nach einer schnellen Fehlervorhersage mit analytischen Gleichungen, die ggf. direkt in der Bahnplanungssoftware zur Fehlerkompensation verwendet werden können.

Ein sehr geeignetes Mittel zur Berechnung dieser Gleichungen sind Funktionen moderner MKS-Programme zur Regressionsanalyse zwischen frei definierbaren Einfluss- und Zielgrößen.

Die Komponenten des Bahnfehlers hängen zunächst von der momentanen Roboterpose (Positionen der 6 Roboterachsen), dem momentanen Beschleunigungszustand (Beschleunigungen der 6 Roboterachsen) und von der Druckobjektmasse ab. Insgesamt ergeben sich also 13 Einflussgrößen (Faktoren), auf die das System mit den gesuchten Positionsfehlerkomponenten antwortet. Im MKS-Programm ist es nun zunächst möglich, Ansätze für analytische Regressionsfunktionen zwischen den Einfluss- und den Zielgrößen vorzugeben. Im vorliegenden Fall wurde für die drei Bahnfehlerkomponenten jeweils eine kubische Ansatzfunktion mit noch unbekannten konstanten Koeffizienten gewählt (Bild 16). Die Struktur der einzelnen Terme in den Ansatzfunktionen orientiert sich dabei an den Biegeliniengleichungen aus der Festigkeitslehre.

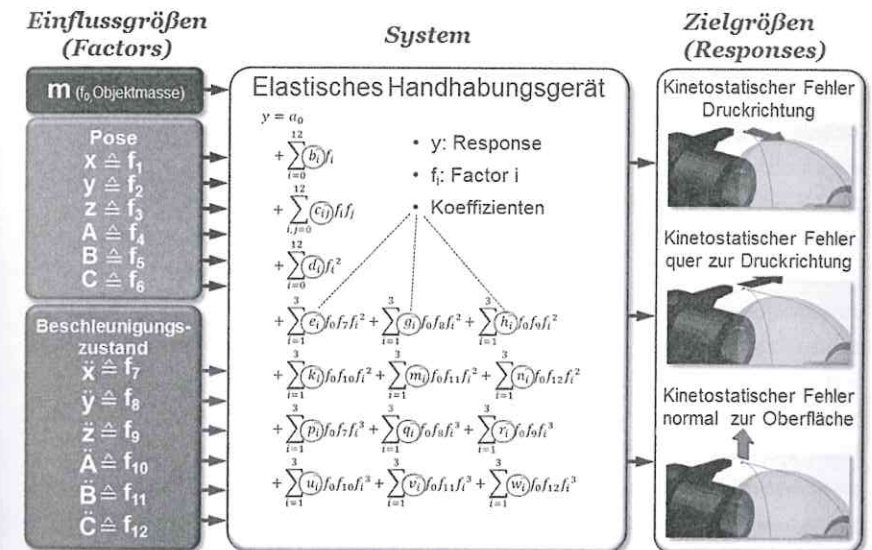


Bild 16: Ansatz für die Regressionsfunktionen zur Vorhersage der Bahnfehlerkomponenten.

Die Ermittlung der Koeffizienten in den Ansatzfunktionen erfolgt nun durch eine automatisierte Simulation mit verschiedenen Wertekombinationen der 13 Einflussfaktoren und anschließende Regressionsanalyse auf Basis der berechneten Bahnfehlerkomponenten.

Die Qualität der Regression hängt dabei wesentlich von der Strategie zur Variation der Einflussgrößen ab. Insbesondere bei einer hohen Anzahl an Einflussgrößen, komplexen Ansätzen für die Regressionsfunktion und vergleichsweise hoher Rechenzeit des Simulationsmodells ist die Aufgabe überhaupt nur durch eine sehr effiziente Planung der Parametervariation lösbar. Eine Betrachtung der Parameterraumgröße verdeutlicht dieses Problem. Der gewählte Regressionsansatz mit dem Grad  $n = 3$  (kubisches Regressionsmodell) legt zunächst fest, dass jede der 13 Einflussgrößen (Bild 16) im jeweiligen Parameterintervall in mindestens  $q = n + 1 = 4$  verschiedenen Wertstufen variiert werden muss, um die Modellkoeffizienten überhaupt schätzen zu können. Um den Versuchsraum möglichst vollständig und gleichmäßig abzudecken könnte man nach Festlegung der einzelnen Parameterwerte (z.B. durch äquidistante Teilung der  $p = 13$  Parameterintervalle in jeweils  $q = 4$  Stufen) versuchen, alle möglichen Parameterkombinationen zu bilden (vollfaktorielle Parametervariation). Dabei ergäbe sich ein Versuchsplan mit der Variantenanzahl  $q^p = 4^{13}$  ( $> 67$  Millionen), die selbst bei sehr schneller Zielgrößenberechnung natürlich unbeherrschbar wäre. Prinzipiell möglich erscheint dagegen die Anwendung zufallsgesteuerter Variantenrechnungen (Monte Carlo- oder Latin Hypercube Simulationen). Um den Parameterraum jedoch sinnvoll und gleichmäßig mit Varianten abzudecken, ergibt sich beim vorliegenden Problem auch bei diesen Strategien eine zu hohe Variantenzahl mit praxisferner Gesamtrechnenzeit.

Das bei Heidelberg eingesetzte MKS-Programm stellt jedoch ein Werkzeug für automatisierte Parametervariationen zur Verfügung, mit dem Variationsstrategien der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments) angewendet werden können. Neben vollfaktoriellen Untersuchungen sowie Monte Carlo und Latin Hypercube Strategien unterstützt es insbesondere die D-optimalen Versuchspläne. D-optimale Parameterstudien maximieren die Robustheit der Regressionsanalyse (Schätzung der Koeffizienten des Regressionsmodells mit minimalem Vertrauensintervall) bei gleichzeitiger Minimierung der Anzahl an Parametervarianten. Die Anzahl der Parametervarianten übersteigt die Anzahl der Koeffizienten im Regressionsmodell nur wenig, so dass sich D-optimale Parameterstudien besonders für Regressionsanalysen in großen Parameterräumen bei komplexen Ansatzfunktionen eignen.

Zur Berechnung der kubischen Regressionsfunktionen für die Bahnfehlerkomponenten schlägt das verwendete MKS-Programm einen D-optimalen Versuchsplan mit 455 Parametervarianten vor, der in 5 „Paketen“ mit je 91 Versuchen abgearbeitet wurde.

Im Anschluss an die Simulation der einzelnen Parametervarianten liefert das MKS-Programm schließlich die Koeffizienten der Regressionsfunktionen für die Bahnfehlerkomponenten des Handhabungsgerätes.

Die Güte der Regressionsanalyse kann anhand der hier betrachteten Testbewegung (Bild 9) gezeigt werden. Zuerst erfolgt die Vorhersage der Bahnfehlerkomponenten mit Hilfe der ermittelten Regressionsgleichungen völlig unabhängig von der Mehrkörpersimulation. Die in den Regressionsgleichungen vorkommenden unabhängigen Variablen für die 6 Achspositionen des Handhabungsgerätes und für die entsprechenden Beschleunigungen können bei gegebener Druckgeschwindigkeit dabei durch eine einfache kinematische Rückwärtsrechnung ermittelt werden. Die Berechnung erfolgt mit einer vorgegebenen Schrittweite für jeden Zeitpunkt der Bewegung, so dass die Bahnfehler über der Zeit aufgetragen werden können.

Bild 17 zeigt am Beispiel des Bahnfehlerverlaufs in Druckrichtung, dass die Vorhersage des Regressionsmodells sehr gut mit dem Fehlerverlauf aus der Mehrkörpersimulation übereinstimmt.

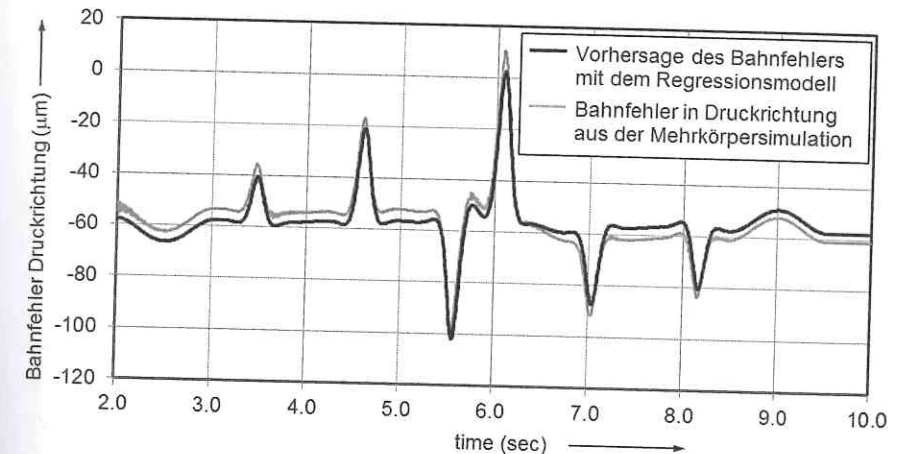


Bild 17: Vergleich des analytisch berechneten Bahnfehlers in Druckrichtung mit dem Ergebnis der MKS.



Nach der Parameterstudie stehen also nun analytische Gleichungen zur Verfügung, mit denen die kinetostatischen Verformungen der Maschine ohne aufwendige Mehrkörpersimulation für beliebige Druckbahnen sehr schnell und genau berechnet werden können. In den Bewegungsvorgaben für die Roboterachsen können die kinetostatischen Bahnfehler damit berücksichtigt und vorgehalten werden. **Bild 18** zeigt schließlich die simulierten Bahnfehlerverläufe nach Vorgabe entsprechend fehlerkompensierter Antriebsbewegungen.

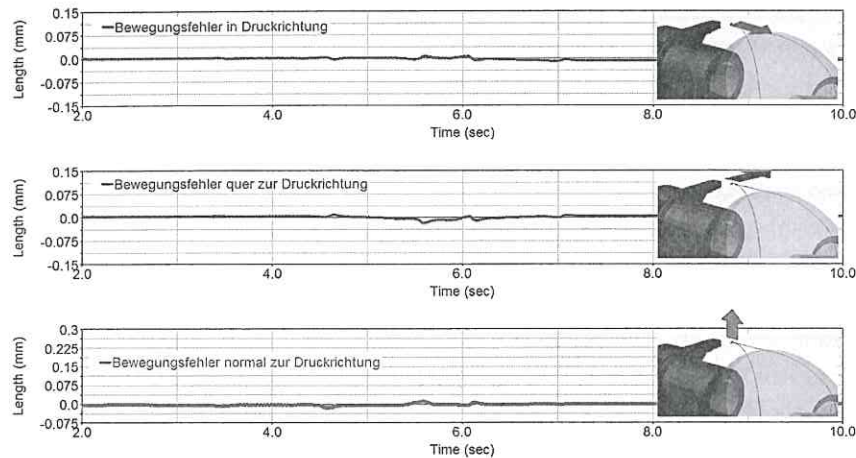


Bild 18: Bahnfehler nach Vorgabe von Antriebsbewegungen mit kinetostatischer Fehlerkompensation.

Die Positionsfehler des mittleren Druckpunktes N (Bild 9) können durch das beschriebene Kompensationsverfahren nochmals deutlich reduziert werden. Ganz analog werden mit der beschriebenen Vorgehensweise auch die kinetostatischen Fehler der Druckkopforientierung (Gier-, Nick- und Rollwinkel des Kopfs relativ zum Druckobjekt) reduziert.

Mit der dynamischen Bahnoptimierung und der kinetostatischen Fehlerkompensation erreicht die Maschine in der Simulation nun hohe Bewegungsgenauigkeiten, die für den Inkjetprozess ausreichend erscheinen. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde der Aufbau des ersten Funktionsmusters freigegeben.

## 8. Aufbau und Erprobung der Maschine

Das erste Funktionsmuster besitzt mit der 6-Achsen-Variante des Handhabungsgerätes (Bild 6d) die maximale Flexibilität im Hinblick auf die bedruckbaren Objektformen. Das Druckmodul enthält als Tools einen Druckobjektscanner, eine Vorbehandlungseinheit, ein Pinningmodul, 6 Druckköpfe (Deckweiß + CMYK + Klarlack) sowie den UV-Trockner.

In ersten Druckversuchen zeigte sich ein guter Passer zwischen den Farbauszügen der einzelnen Druckköpfe, ebenfalls konnten bereits größere, aus mehreren Bildstreifen zusammengesetzte Motive erfolgreich gedruckt werden. Die Druckqualität erlaubte eine Präsentation erster Drucktests auf der Druckbranchen Leitmesse DRUPA 2016 (**Bild 20**).

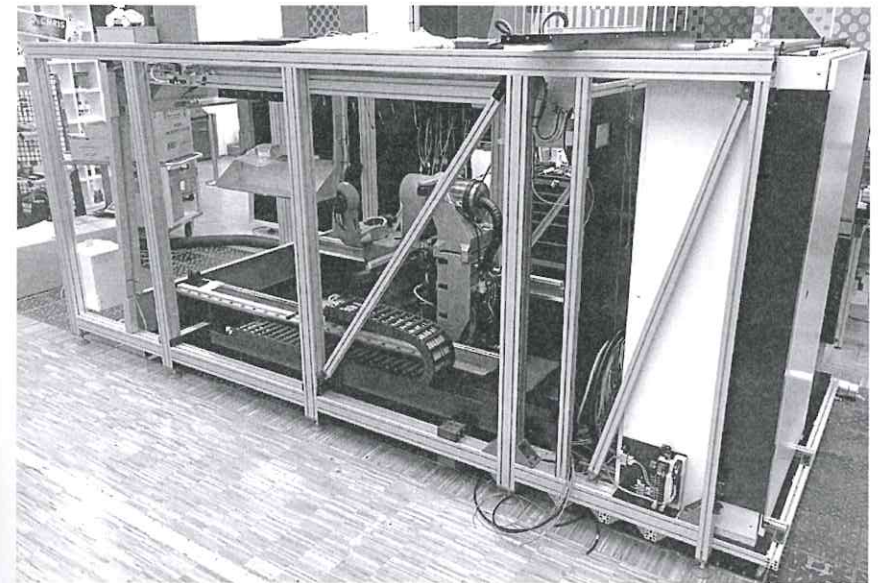


Bild 19: Montagezustand nach „Hochzeit“ zwischen Robotik und Grundgestell.

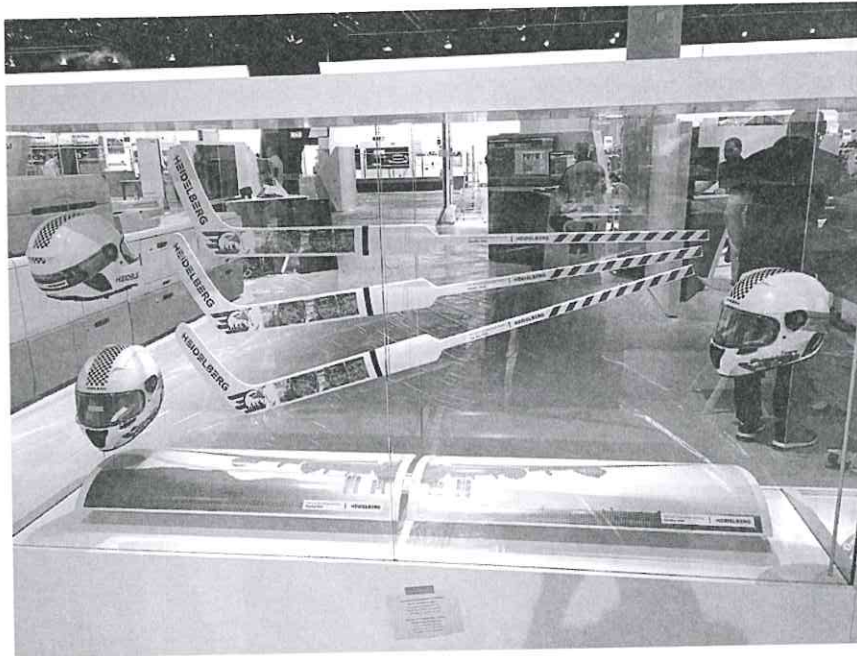


Bild 20: Präsentation erster Druckproben auf der DRUPA 2016.

#### Literaturnachweis

- [1] Internetseite [www.leebsmann24.de](http://www.leebsmann24.de)
- [2] Speicher, T.: Kinematische Konzepte für ein modulares System zum Bedrucken von 3D-Oberflächen. Masterthesis. Heidelberg, 2014.
- [3] EU-P 000002853402A1

## Prozessorientierte Synthese der neuartigen Rotorflechtmaschine "D-3F" zur konturadaptiven Fadenablage

Dr.-Ing. D. Denninger, Dr.-Ing. M. Graf, Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Berger,  
Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. B. Awiszus, TU Chemnitz, Chemnitz

### Kurzfassung

Der Beitrag zeigt einen Ansatz zur Fertigung schlauchförmiger triaxialer Halbzeuge bzw. Preforms mit gewebeartiger Bindungsstruktur. Als innovativer Kern der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist das neuartige und zum Patent angemeldete Verlegeprinzip mit zugehörigem Vorrichtungskonzept hervorzuheben. Für die Gestaltung der optimalen Verlegung unter direkter Berücksichtigung der Antriebstechnik wurde eine prozessorientierte Synthesemethodik, auf Basis einer Technologiesynthese, erarbeitet. Die numerische Modellbildung der Verlegetechnik erlaubt unter anderem die frühzeitige Integration von Materialparametern als Vorstufe einer Prozesssimulation. Ziel dabei war die Ermittlung des Prozessfensters für Fadenspannungen unter Berücksichtigung der Abzugsbewegung. Im Ergebnis wird ein Ansatz zur virtuellen Verifikation der Fadenablage im Zusammenspiel mit der kinematischen Optimierung der Verlegebewegungen vorgestellt. Für das virtuelle Prototyping war es allerdings notwendig, sowohl die materialspezifischen Kennwerte und die Reibungszustände des Flechtmaterials als auch die Prozesskinematik in die FE-Software zu implementieren.

### 1. Einleitung

FaserKunststoffVerbunde (FKV) gewinnen aufgrund ihrer hervorragenden werkstoffmechanischen Eigenschaften zunehmend an Bedeutung für innovative Leichtbaulösungen. Die kraftflussorientierte Ausrichtung der inhärenten Faserarchitektur ermöglicht eine belastungsgerechte Auslegung von FKV-Bauteilen bei gleichzeitig enormer Gestaltungsfreiheit. Für Spezialanwendungen insbesondere in der Luft- und Raumfahrt sowie im Automobil- und Sportgerätebau sind derartige Leichtbaulösungen bereits erfolgreich etabliert. Existenzieller Bestandteil im Innovationsprozess zur weiträumigen Erschließung des gegebenen hohen Leichtbaupotentials sind produktive und reproduzierbare Fertigungsverfahren. [1, 2, 3]

In diesem Innovationsfeld nimmt die textile Prozesskette zur geometrisch-flexiblen Gestaltung von Halbzeugen und Preforms eine Schlüsselfunktion ein. Die technologische Herausforderung bei der produktiven Fertigung dieser textilen Verstärkungsstrukturen liegt in der