

FüMoTeC 2015

Tagungsband

**Schriftenreihe der  
FÜGE- UND MONTAGETECHNIK CHEMNITZ  
Band 1**

**Herausgeber:  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-techn. Peter Mayr  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Maik Berger**

**FüMoTeC 2015**

**Tagungsband**



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ

**Universitätsverlag Chemnitz**

**2015**

## **Impressum**

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek

**Universitätsverlag Chemnitz**

09107 Chemnitz

<http://www.tu-chemnitz.de/ub/univerlag>

### **Herstellung und Auslieferung**

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://www.mv-verlag.de>

ISSN 2365-8096 (Druck) - ISSN 2365-810X (Online)

ISBN 978-3-944640-63-1

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-180892>

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>Energiegesteuerte Lichtbogenschweißprozesse – wo kann ich überall Fehler machen und wie wirken sie sich am Bauteil aus? .....</b>	<b>1</b>
A. Hälsig, S. Pehle, M. Kusch, P. Mayr	
<b>Einsatz moderner physikalischer Simulationsmethoden für schweißtechnische Anwendungen im Kraftwerksbau .....</b>	<b>23</b>
A. Nitsche, P. Mayr	
<b>Schweißtechnik und Robotik .....</b>	<b>35</b>
J. Müglitz	
<b>Sphärische Fasenaggregate serieller &amp; paralleler Struktur .....</b>	<b>51</b>
C. Teichgräber	
<b>Ein modulares Falt- und Spannsystem zum Fügen metallischer Halbschalen in der Automobilproduktion .....</b>	<b>65</b>
M. Gabler, M. Berger, F. Zuber	
<b>Herausforderungen in der Füge- und Montagetechnik zur Speichersystemherstellung für elektromobile Fahrzeuge .....</b>	<b>79</b>
L. Ebert, M. A. Roscher, H. Stein	
<b>Fügen artfremder Werkstoffe – klassische Methoden und innovative Ansätze zum nichtthermischen Fügen .....</b>	<b>89</b>
W. Georgi	
<b>Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen von medizintechnischen Komponenten .....</b>	<b>101</b>
H. Letsch	

<b>Entwicklung eines neuartigen Antriebs für Widerstandsschweißzangen</b> .....	121
J. Kaars, P. Mayr	
<b>Verfahren zur parameterbasierten Auslegung ebener Kurvenschrittgetriebe mit anwendungsoptimierten Eigenschaften</b> .....	129
A. Heine, M. Berger	
<b>Erweitertes Planungskonzept für Handhabungs- und Montageanlagen durch parametrisierte Elementarfunktionen und modulare Symbolbibliotheken</b> .....	157
T. Nguyen-Dang, M. Berger	

## **Energiegesteuerte Lichtbogenschweißprozesse – wo kann ich überall Fehler machen und wie wirken sie sich am Bauteil aus?**

**A. Hälsig, S. Pehle, M. Kusch, P. Mayr**

Technische Universität Chemnitz, Professur Schweißtechnik

### **Kurzfassung**

Ob im Fahrzeug-, Kran- oder im Stahlbau – in vielen Bereichen spielt die Gewichtsreduzierung bei der Entwicklung neuer Produkte eine immer größere Rolle. Hierbei ersetzen moderne, temperatursensible Hochleistungswerkstoffe in zunehmendem Maße unlegierte Baustähle. Jedoch ist bei der schweißtechnischen Verarbeitung dieser Werkstoffe das Verarbeitungsfenster deutlich kleiner, sodass der exakten Bestimmung der  $t_{8/5}$ -Zeiten eine höhere Bedeutung zuteilwird, um eine qualitätsgerechte Schweißung zu erzeugen. Da die Schweißparameter und die exakte Bestimmung von spezifischen Kenngrößen einen großen Einfluss auf die Berechnung der  $t_{8/5}$ -Zeit sowie auf die resultierenden mechanisch-technologischen Güterwerte haben, ist es erforderlich, diese Werte so exakt wie möglich zu bestimmen.

Innerhalb des Artikels werden vielfältige Schweißverfahren analysiert, verschiedene Fehlerpotentiale diskutiert und im Anschluss deren Auswirkungen verdeutlicht.

So reicht es mittlerweile nicht mehr aus Schweißprozesse zwischen nicht abschmelzender und abschmelzender Elektrode zu unterteilen. Durch moderne Rechentechnik kann zum Beispiel der MSG-Prozess zusätzlich in ereignisgeregelt bzw. energiereduzierte Verfahren gegliedert werden.

Hinzu kommt der Fakt, dass Schweißparameter, wie Drahtvorschub, Abstand, Schutzgas, usw., sowie Geometrieparameter, wie die Schweißnahtgeometrie und die Schweißposition den Wärmeeintrag in das Bauteil um mehr als 20 % verändern.

Erschwerend kommt der Fakt der undefinierten Messung und Berechnung der Schweißleistung hinzu. Allein dadurch können beispielsweise beim Impulslichtbogen Abweichungen vom Realwert von mehr als 50 % auftreten.

Die Summierung der Fehler verdeutlicht, dass die Einhaltung der mechanisch-technologischen Güterwerte, als auch die theoretische Bestimmung dieser Werte sowie die Berechnung bzw. Simulation von resultierenden Größen, wie Verzug, Gefügeausbildung oder Eigenspannungen praktisch nur unzureichend möglich ist. Die Kenntnis der Fehlerquellen sowie die Nutzung des erarbeiteten Wissens an der TU Chemnitz hat somit einen hohen Beitrag zu Verbesserung der Qualität der Schweißverbindungen.

## 1 Einleitung bzw. Stand der Technik

Moderne Hochleistungswerkstoffe besitzen auf Grund ihrer Festigkeitseigenschaften ein enormes Leichtbaupotenzial. Die speziellen Werkstoffeigenschaften werden bei der Herstellung durch spezielle Temperatur-Zeit-Regimes eingestellt, die sich bei der schweißtechnischen Verarbeitung von Halbzeugen nicht nachbilden lassen. Ein Schweißvorgang stellt somit immer eine Schädigung des Ausgangs-Eigenschaftsprofils der „hochgezüchteten“ Werkstoffe dar. In der Konsequenz lassen sich diese Werkstoffe schweißtechnisch nur in einem sehr engen Parameterfenster verarbeiten. Praktisch wird dies über die Einhaltung definierter  $t_{8/5}$ -Zeiten realisiert [1; 2]. Unterschieden wird in Abhängigkeit von der verschweißten Blechdicke in 2-dimensionale (Gleichung 1) und 3-dimensionale (Gleichung 2) Wärmeableitung [3].

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3T_0) * 10^5 * \frac{(E * \eta)^2}{d^2} * \left[ \left( \frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left( \frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] * F_2 \quad (1)$$

$$t_{8/5} = (6700 - 5T_0) * E * \eta * \left[ \frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(800 - T_0)^2} \right] * F_3 \quad (2)$$

Für die Berechnung der  $t_{8/5}$ -Zeiten werden folglich die Kenngrößen, Wirkungsgrad des Prozesses  $\eta$ , Formfaktoren bezüglich der Schweißnahtgeometrie ( $F_2$ ,  $F_3$ ) und Schweißleistung bzw. Schweißenergie  $E$  benötigt. Alle drei Faktoren haben ein hohes Fehlerpotential bei deren Verwendung, welche im Folgenden analysiert werden.

#### a) Einfluss Faktor Wirkungsgrad

Wirkungsgradangaben für Schweißverfahren werden unter anderem als Eingangsgröße bei der Berechnung der eingebrachten Streckenenergie verwendet. Hierfür wird auf die in Normen [1, 2] sowie in Fachliteratur veröffentlichten Werte zurückgegriffen. Dabei erfolgt eine fixe und durch Schweißparameter unveränderbare Zuordnung der Wirkungsgrade zum jeweiligen Schweißverfahren (Tabelle 1). Eine Untergliederung in verschiedene Leistungsbereiche bzw. Untergruppen der jeweiligen Schweißverfahren erfolgt nicht. Dabei existieren unter anderem für den MSG-Prozess annähernd 50 verschiedene Markennamen für Prozessmodifikationen. Eine Übersicht einer Prozessaufteilung erfolgt in Bild 1.

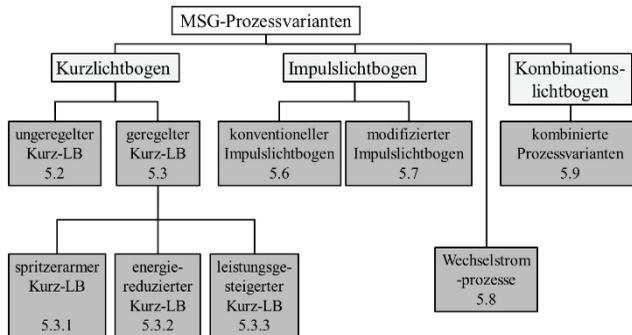


Bild 1: Einteilung der MSG-Prozessvarianten in Anlehnung an DVS 0973 [3]

Aktuelle Forschungsarbeiten haben jedoch gezeigt, dass der Wärmeeintrag in das Bauteil in Abhängigkeit von Schweißparametereinstellungen und Randbedingungen stark variiert [4]. So wurde z. B. beim WIG-Schweißen eine Spannweite in den Absolutwerten von ca. 15 % zwischen verschiedenen Einstellgrößen ermittelt.

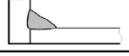
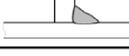
#### b) Einfluss der Formfaktoren

Die Bauteilgeometrie in Form von Blechdicke, Fugenform und teilweise auch Lagenaufbau wird über Korrekturfaktoren nach DIN EN 1011-2 [5] berücksichtigt. Genau wie bei der Berechnung der  $t_8/5$ -Zeiten wird auch bei den Korrekturfaktoren  $F_2$  und  $F_3$  nach verschweißter Blechdicke in 2- bzw. 3-dimensionale Wärmeableitung unterschieden (Tabelle 1).

Die Korrekturfaktoren für sämtliche Nahtarten werden relativ zum Schweißen von Blindnähten angegeben, für welche ein Wert von 1,0 festgelegt ist.

Vor allem beim Schweißen von Kehlnähten sind die Angaben sehr unpräzise. Eine Differenzierung nach Öffnungswinkel, Spaltweite oder anderen Geometrieparametern erfolgt bisher nicht. Ebenfalls nicht berücksichtigt wird ein möglicher Einfluss der Schweißposition auf die Wärmeeinbringung in das Bauteil.

*Tabelle 1: Korrekturfaktoren für verschiedene Nahtgeometrien [5]*

Schweißnahtform		Formfaktor	
		$F_2$ zweidimensionale Wärmeableitung	$F_3$ dreidimensionale Wärmeableitung
Schweißraupe auf Blech		1	1
Zwischenschweißraupen in Stumpfnähten		0,9	0,9
Einlagige Kehlnaht an einem Eckstoß		0,9 bis 0,67	0,67
Einlagige Kehlnaht an einem T-Stoß		0,45 bis 0,67	0,67

Eigene Untersuchungen [4, 6] zur Messung der Abstrahlungs-, Wärmeleitungs- und Konvektionsenergie des Lichtbogens haben gezeigt, dass beim Schutzgasschweißen bis zu 15 % der Schweißleistung über den Lichtbogen an die Umgebung abgegeben werden. Wird die Abstrahlungs-, Wärmeleitungs- und Konvektionsenergie des Lichtbogens durch die Schweißnahtgeometrie und bzw. oder der Schweißposition an der Fugestelle gekapselt, wird ein Teil dieser Energie vom Bauteil aufgenommen. Der Anteil und die beeinflussenden Faktoren für den zusätzlichen Wärmeeintrag in das Bauteil sind bis dato unbekannt.

### c) Einfluss der Schweißleistung

Für die Bestimmung und Berechnung der Schweißleistung stehen praktisch mehrere Methoden zur Auswahl. Es können für ein und denselben Schweißprozess unterschiedliche Schweißleistungen bestimmt werden, was ein hohes Fehlerpotential bzw. eine hohe Ungenauigkeit zur Folge hat.

Neben der physikalisch richtigen Berechnungsmethode (Methode A) wurden vier weitere Methoden untersucht und die Ergebnisse der Schweißleistungsberechnung untereinander verglichen:

Methode A:

$$P_S = \frac{1}{t_s} * \int_0^{t_s} P(t) dt \quad \text{mit} \quad P(t) = U(t) * I(t) \quad (3)$$

Methode B:

$$P_{arith} = \bar{U} * \bar{I} = \left( \frac{1}{t_s} * \int_0^{t_s} U(t) dt \right) * \left( \frac{1}{t_s} * \int_0^{t_s} I(t) dt \right) \quad (4)$$

Methode C:

$$P_{quadr} = \tilde{U} * \tilde{I} = \sqrt{\frac{1}{t_s} * \int_0^{t_s} U(t)^2 dt} * \sqrt{\frac{1}{t_s} * \int_0^{t_s} I(t)^2 dt} \quad (5)$$

Methode D:

$$P_{Stromquelle} = \bar{U}_{Hold} * \bar{I}_{Hold} \quad (6)$$

Methode E:

$$P_{Messgerät} = \bar{U}_{Messgerät} * \bar{I}_{Messgerät} \quad (7)$$

Für die Leistungsberechnungen nach Methode A bis C sind die Ausgangswerte identisch. Hierbei erfolgte die Aufnahme der Strom- und Spannungsverläufe mittels einem hochauflösendem Messsystem (Abtastrate  $f = 80$  kHz). Für Methode D wurden die Hold-Werte für Schweißstrom und -spannung an der Stromquelle genutzt. Der Hold-Wert wird, je nach Stromquellenhersteller, als arithmetischer Mittelwert über die letzten 1...5 s des Schweißprozesses gebildet. Bei der Leistungsbestimmung nach Methode E wurde ein handelsübliches Messgerät (Abtastrate  $f = 100$  Hz) benutzt. [7, 8, 9]

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Berechnung der  $t_{8/5}$ -Zeiten mit den Gleichungen 1 und 2 mit drei wesentlichen Unsicherheiten behaftet sind. Zum einen wird der Wirkungsgrad nur in Abhängigkeit vom Schweißverfahren angegeben ohne unterschiedliche Prozesszustände zu berücksichtigen. Zum anderen existieren für den Anwender undefinierte Variationsmöglichkeiten bei der Auswahl eines Korrekturfaktors für die Nahtform. Einen großen Einfluss hat zudem die Messung und Berechnung der Schweißleistung, wodurch Abweichungen von bis zu 70 % vom Realwert ermittelt wurden. Diese Fehlerquellen wirken einer möglichst exakten Vorausbestimmung des schweißbedingten Wärmeeintrags in das Bauteil entgegen. In der Folge wird in der industriellen Praxis der Wärmeeintrag zumeist experimentell durch thermoelementbasierte Messungen der realen  $t_{8/5}$ -Zeit beim Schweißen ermittelt.

## 2 Messtechnologie

### 2.1 Bestimmung des Wärmeeintrages- Kalorimetrie

Ziel war es ein Kalorimeter zu entwickeln, mit dem vergleichende Untersuchungen an verschiedenen Schweißprozessen und Prozesszuständen in definierten Schweißpositionen und unterschiedlichen Fugengeometrien der Verbindungsschweißungen durchgeführt werden können. Verwendet wird ein Differenz-Temperatur-Kalorimeter mit Wasser als Kalorimetermedium, siehe Bild 2.

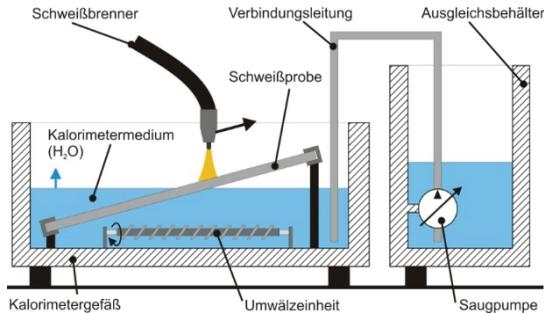


Bild 2: Grundaufbau Kalorimeter TU-Chemnitz

In einem nach oben geöffnetem, thermisch isoliertem Behälter wird die Schweißprobe schräg eingespannt. Der Schweißbrenner wird mechanisiert parallel zur Probenoberfläche bewegt und der Wasserspiegel synchron zur Schweißbrennerposition angehoben. Ausgewertet wird die durch den Schweißprozess hervorgerufene Erwärmung des Kalorimetermediums  $\Delta T$ , aus der sich die in die Probe eingebrachte Wärmemenge bestimmen lässt. Da auch die Kalorimereinbauten (1...n) Wärme aufnehmen, muss auch deren Erwärmung berücksichtigt werden (Gleichung 8).

$$Q_{Kal} = \sum_1^n (m * c * \Delta T) \quad (8)$$

$$\eta_{eff} = \frac{Q_{GW} + Q_{Kal}}{P_S * t_S} = \frac{Q_{GW} + Q_{Kal}}{t_S * \frac{1}{t_E} * \int_0^{t_E} U_S * I_S * dt} \quad (9)$$

Aus dem Verhältnis von eingebrachter Wärmemenge und dafür aufgewandter elektrischer Arbeit wird abschließend der effektive Wirkungsgrad des Schweißprozesses berechnet (Gleichung 9).

Um verschiedene Schweißpositionen untersuchen zu können, ist die Vorrichtung drehbar gelagert (Bild 3). Um die Längsachse der Schweißnaht erfolgt dabei die Drehung von Position PA bis PC. Grundsätzlich ist eine Verdrehung um  $360^\circ$  möglich, welche durch eine integrierte Skalierung auf  $2^\circ$  Genauigkeit reproduzierbar einstellbar ist. Auf Grund des Messprinzips mit kontinuierlich ansteigendem Wasserspiegel sind die Schweißpositionen PD und PE nicht realisierbar, da das Kalorimetermedium den Schweißprozess behindern würde.



*Bild 3: Kalorimeter und Spannvorrichtung zur Fixierung der Bauteile*

Zur Analyse des Einflusses verschiedener Schweißnahtgeometrien ist die Spannvorrichtung geteilt, wie es in Bild 3 zu erkennen ist.

Zielstellung war die Schaffung einer kalorimetrischen Messapparatur, in der alle zu untersuchenden Schweißnahtgeometrien und Schweißpositionen unter gleichen Randbedingungen kalorimetrisch erfassbar sind. Dieses Ziel wurde vollständig erreicht.

Zum Einmessen und Kalibrieren des Kalorimeters wurden Schweißversuche mit einem energetisch definierten WIG-Schweißprozess durchgeführt. Diese Vorversuche dienen zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit des verwendeten Mess- und Auswertprinzips sowie zur Fehleranalyse. Die Standardabweichungen einzelner Parametergruppen betragen dabei  $\pm 3\%$ . Systematische Fehlerquellen sind dabei die Strom- und Spannungsmessung über hochgenaue Wandler Systeme, die Temperaturmessung mittels Pt 100 Thermoelementen mit einer Messgenauigkeit von 1/10 DIN sowie die gravimetrische Bestimmung der Massen mit einer Genauigkeit von  $\pm 20$  g.

## 2.2 Bestimmung der Schweißleistung

Neben der Berechnungsmethode haben die Messmethoden einen großen Einfluss auf die Bestimmung des Schweißstromes und der Schweißspannung. Gerade aufgrund des Spannungsabfalles im Schlauchpaket und dem Massekabel muss die Schweißspannung möglichst nah am Lichtbogen erfasst werden, wie in Bild 4 zu sehen ist. Ebenfalls dargestellt sind die Messpunkte der alternativen Methoden D (Hold-Werte der Stromquelle) und E.

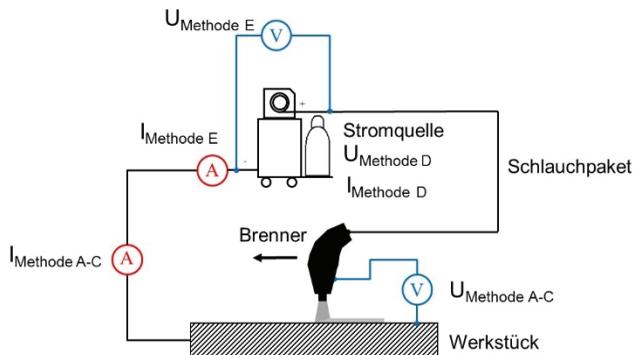


Bild 4: Messpunkte für Schweißstrom und Schweißspannung

### 3 Diskussion von Fehlerquellen

#### 3.1 Gefahren bei der Schweißleistungsbestimmung

Wie in Bild 1 dargestellt existiert eine Vielzahl an Schweißprozessvarianten. Um die Vergleichbarkeit der verschiedenen MSG-Prozessvarianten bezüglich der Schweißleistungsbestimmung zu gewährleisten, wurden folgende Parameter definiert (Tabelle 2).

*Tabelle 2: Prozessparameter Analyse der Schweißleistung*

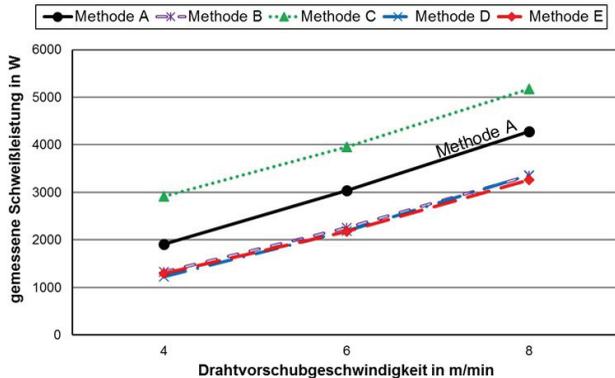
konstante Parameter	Grundwerkstoff S235 $t_{\text{Blech}} = 5 \text{ mm}$ Zusatzwerkstoff G3Si1 $d_{\text{Draht}} = 1,2 \text{ mm}$ Schutzgas 82/18 (Ar/CO <sub>2</sub> ) $V_{\text{Schutzgas}} = 15 \text{ l/min}$ Kontaktrohrabstand $s = 15 \text{ mm}$ Abtastrate $f = 80 \text{ kHz}$
variable Parameter	$V_{\text{Draht}} = 2 \dots 12 \text{ m/min}$ $v_s = 30 \dots 80 \text{ cm/min}$ Prozessvarianten (siehe Bild 1) Spannungskorrektur zur Erzeugung stabiler Prozesse

Die Methoden A-E zur Bestimmung der Schweißleistung liefern unterschiedliche Ergebnisse. Diese Unterschiede variieren wiederum sehr stark, je nachdem, welcher MSG-Prozess bzw. welche Lichtbogenart betrachtet wird.

In Bild 5 sind die Ergebnisse für einen Impulslichtbogen dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass keine „alternative“ Methode ein annähernd gleiches Ergebnis wie die fachlich richtige Methode A (arithmetischer Mittelwert der Momentanleistungen) liefert.

$$\Delta P [\%] = \frac{(P_X - P_S)}{P_S} * 100 \quad (10)$$

Um die Unterschiede der ausgewählten Methoden quantifizieren zu können, wurden für alle anderen Methoden die Abweichungen nach Gleichung 10 bestimmt ( $P_S$  wurde nach Methode A berechnet).



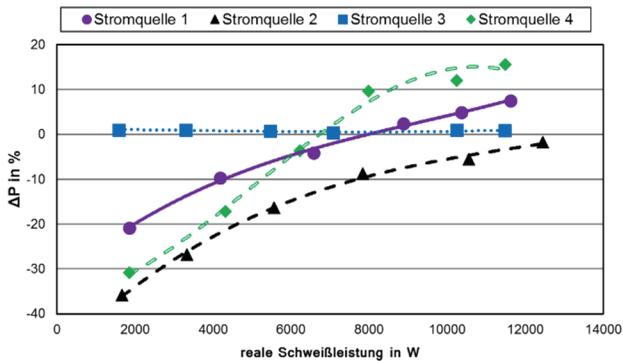
*Bild 5: Schweißleistungen für einen konventionellen Impulslichtbogen (Gruppe 5.6; Parameter siehe Tabelle 2)*

Beim betrachteten Impulslichtbogen (Bild 5) liegt die Schweißleistung, berechnet mittels quadratischem Mittelwert (Methode C), knapp 50 % über der Schweißleistung aus Methode A. Die Leistungswerte der Methoden B (arithmetischer Mittelwert), D (Hold-Werte der Stromquellen) und E (Messwerte handelsüblicher Messgeräte) liegen hingegen ca. 40 % unterhalb der realen Schweißleistung (Methode A).

Da jede Stromquelle den Schweißstrom und die Schweißspannung auf eine differenzierte Art und Weise ermittelt, ergeben sich für ein und denselben Schweißprozess unterschiedliche Abweichungen. Für einen konventionellen Impulslichtbogen ist dieser Sachverhalt in Bild 6 dargestellt.

Hierbei sind nur die Abweichungen der realen Schweißleistungen (Methode A) zu den berechneten Leistungswerten mittels angezeigter Hold-Werte an den Stromquellen (Methode D) dargestellt. Dabei variieren die Abweichungen je nach Stromquelle. Eine allgemeingültige Aussage

bezüglich des Fehlerpotentials ist somit nicht möglich. Nahezu keine Abweichungen traten bei den Messungen mit Stromquelle 3 auf. Dies liegt daran, dass bei dieser Stromquelle sowohl der Spannungsabfall als auch die richtige Schweißleistungsbestimmung nach Methode A bereits integriert sind.



*Bild 6: Abweichungen berechneter bzw. angezeigter Schweißleistungen verschiedener Stromquellen für einen konventionellen Impulslichtbogen (Parameter siehe Tabelle 2)*

Bei den Impulslichtbogenprozessen konnte nach Auswertung der Schweißversuche ein mathematischer Zusammenhang zwischen Schweißleistung und der Abweichung  $\Delta P$  festgestellt werden, wie es auch in Bild 6 zu sehen ist. Für einen unregelmäßigen Kurzlichtbogen konnte kein definierbarer Zusammenhang zwischen realer Schweißleistung und der jeweiligen Messabweichung festgestellt werden. Dieser Sachverhalt ist in Bild 7 dargestellt.

In Bild 7 sind die Abweichungen von der realen Schweißleistung (Methode A) für einen unregelmäßigen Kurzlichtbogen aufgeführt. Diese fallen zwar geringer aus als beim konventionellen Impulslichtbogen, jedoch gibt es keinen direkten Zusammenhang zwischen Schweißleistung und Abweichung.

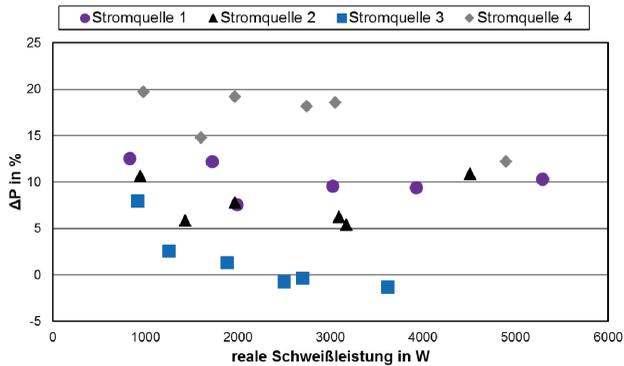


Bild 7: Abweichungen berechneter bzw. angezeigter Schweißleistungen verschiedener Stromquellen für einen unregelmäßigen Kurzlichtbogen (Parameter siehe Tabelle 2)

Zusammenfassend wird deutlich, dass abhängig von der Berechnungsmethode der Schweißleistung Abweichungen vom Realwert von bis zu 90 % auftreten. Diese sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Abweichungen der Schweißleistung in Folge verschiedener Bestimmungsmethoden

Berechnungsmethode	ΔP Kurzlichtbogen	ΔP Impulslichtbogen
Anzeigewerte Stromquelle $P_{Quelle} = I_{Quelle} * U_{Quelle}$	ΔP = -2 bis 21 %	ΔP = -42 bis 25 %
Multiplikation der arith. Mittelwerte von I und U $P_{arith} = \bar{U} * \bar{I} = \frac{\sum_{x=1}^n U_x}{n} * \frac{\sum_{x=1}^n I_x}{n}$	ΔP = -2 bis 10 %	ΔP = -32 bis 0 %
Multiplikation der Effektivwerte von I und U $P_{eff} = \bar{U} * \bar{I} = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^n U_x^2}{n}} * \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^n I_x^2}{n}}$	ΔP = 7 bis 43 %	ΔP = 5 bis 92 %
Gleichung Ersatzmodells (Dr. Jaeschke – Lorch Schweißtechnik GmbH) $P_M = \bar{U} * I + \sqrt{(\bar{U}^2 - \bar{U}^2)} * (\bar{I}^2 - I^2)$	ΔP = 8 bis 53 %	ΔP = 0 bis 10 %
Anzeigewerte handelsüblicher Messgeräte $P_{MG} = U_{MG} * I_{MG}$	ΔP = -26 bis 10 %	ΔP = -36 bis -7 %

### 3.2 Abweichungen durch variablen Wirkungsgrad

#### a) WIG-Schweißprozess

Der absolute, mittlere Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Prozesses beträgt  $\eta_{LB} = 0,75$  (Mittelwert aus allen ermittelten Lichtbogenwirkungsgraden des WIG-Prozesses bei Veränderung der beschriebenen Parameter), was eine Abweichung von knapp 25 % zu dem in DIN EN 1011-1 [1] beschriebenen Wert von  $\eta_{th} = 0,60$  darstellt.

Anhand Bild 8 werden untersuchte Haupteinflussgrößen auf den Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Schweißens in Form eines Ringdiagramms dargestellt. Die grau dargestellte Fläche beschreibt den Bereich zwischen minimalen (innen) und maximalen (außen) ermittelten Lichtbogenwirkungsgraden in Abhängigkeit zu den untersuchten Einflussparametern. Die Pfeilrichtung gibt an, ob der beschriebene Parameter erhöht oder reduziert werden muss, um den Lichtbogenwirkungsgrad zu steigern. Dabei bedeutet beispielsweise ein nach innen gerichteter Pfeil, dass der Einflussparameter zu reduzieren ist, um den Lichtbogenwirkungsgrad zu erhöhen.

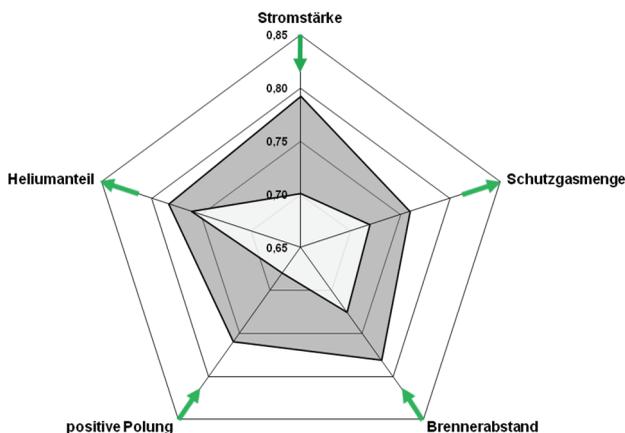


Bild 8: Darstellung der ermittelten Einflussgrößen auf den Lichtbogenwirkungsgrad des WIG-Schweißprozesses

## b) MSG-Schweißprozess

Der effektive Wirkungsgrad beim Metallschutzgasschweißen ist kein globaler Mittelwert von  $\eta_{th} = 0,80$ , wie er in DIN EN 1011-1 [DIN09] festgelegt ist. Vielmehr muss eine Einteilung nach der Lichtbogenart erfolgen:

- Kurzlichtbogen  $\eta_{eff} = 0,85$
- Impulslichtbogen  $\eta_{eff} = 0,77$
- Sprühlichtbogen  $\eta_{eff} = 0,70$

Faktoren, welche den effektiven Wirkungsgrad reduzieren:

- Erhöhung der Schweißstromstärke
- Erhöhung der Schweißspannung

Faktoren, welche den effektiven Wirkungsgrad erhöhen sind:

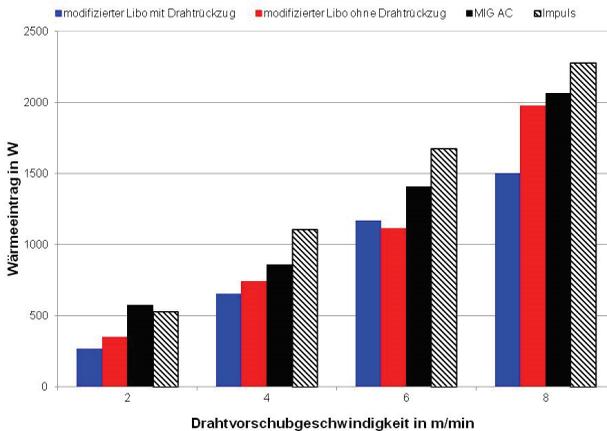
- Erhöhung der Schutzgasmenge
- Erhöhung des Helium- oder CO<sub>2</sub>-Anteils im Schutzgas
- Erhöhung des Kontaktrahabstandes

Der effektive Wirkungsgrad beim MIG-Aluminiumschweißen ist durchschnittlich um 7 % höher. Die Grund- und Zusatzwerkstoffauswahl hat zudem einen Einfluss auf die benötigte Schweißleistung und den resultierenden Schmelzwirkungsgrad.

Zudem wurde festgestellt, dass die prozessgeregelten (z.B. ColdArc) bzw. anlagengeregelten (z.B. CMT) Kurzlichtbogenprozesse (Einteilung siehe Bild 1) einen leicht höheren effektiven Wirkungsgrad als klassische MSG-Verfahren aufweisen.

Die entscheidendere Größe ist jedoch die benötigte Schweißleistung, welche bei ereignisgeregelten bzw. eneregiereduzierten Prozessen (siehe Bild 1) teilweise erheblich geringer ist und somit der absolute Wärmeeintrag in das Bauteil sinkt (siehe Bild 9).

Bei allen untersuchten wärmeminimierten Schweißprozessen fiel der effektive Wirkungsgrad mit ansteigender Schweißleistung geringfügiger ab, als beim Standard-MSG-Schweißprozess. Ursache hierfür ist die verfahrensbedingt gezielte Vermeidung von langen Kurzschlussphasen und großen Lichtbogenlängen.



*Bild 9: Wärmeeintrag von verschiedenen MSG-Prozessen im unteren Leistungsbereich (Parameter: MSG-Schweißen; 15 l/min 82 %Ar, 18 % CO<sub>2</sub>; Brennerabstand  $s = 15$  mm; Mittelwert CuSi3 und AlMg5  $d = 1,0$  mm;  $v_S = 30 \dots 60$  cm/min; GW: S235  $t = 5$  mm)*

### 3.3 Einfluss der Formfaktoren

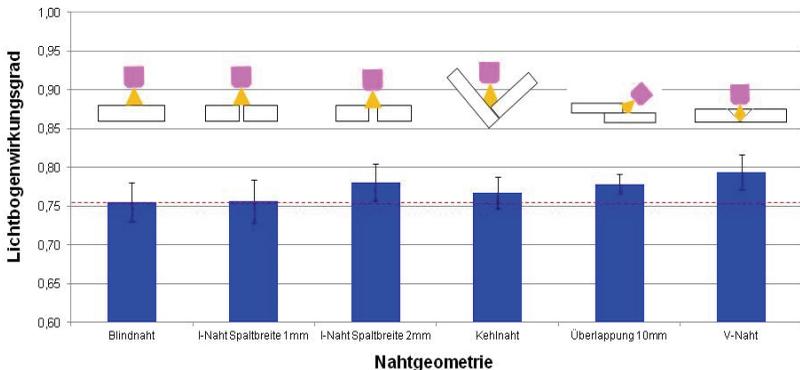
#### a) Schweißnahtgeometrie

Innerhalb der Untersuchungen wurde der Einfluss verschiedener Schweißnahtgeometrien auf den Wärmeeintrag des WIG- und MSG-Schweißprozesses untersucht.

Bild 10 zeigt deutlich, dass mit zunehmender Begrenzung des Lichtbogens durch die Nahtflanken der Wärmeeintrag in das Bauteil steigt. Im Vergleich zwischen einer I-Naht mit 1 mm Spaltmaß  $\eta_{\text{eff}} = 0,75$  und einer V-Naht

$\eta_{\text{eff}} = 0,80$  steigt der relative Anteil der eingebrachten Wärme ins Bauteil um mehr als 5 % an.

Dies zeigt, dass im konkreten Fall etwa die Hälfte der Abstrahlungs-, Wärmeleitungs- und Konvektionsenergie des WIG-Lichtbogens durch die Nahtflanken aufgenommen wird, wenn der WIG-Schweißprozess in einer V-Naht Geometrie brennt.



*Bild 10: Einfluss der Schweißnahtgeometrie auf den Lichtbogenwirkungsgrad beim WIG-Schweißen (Parameter: WIG-Schweißen,  $I = 200\text{ A}$ ;  $12\text{ l/min}$  Argon; Elektrodenabstand  $s = 4\text{ mm}$ ; Elektrode  $d = 3,2\text{ mm}$ ,  $\alpha = 25^\circ$ ; Polung: negativ;  $vS = 30\text{ cm/min}$ ;  $GW: S235\ t = 5\text{ mm}$ )*

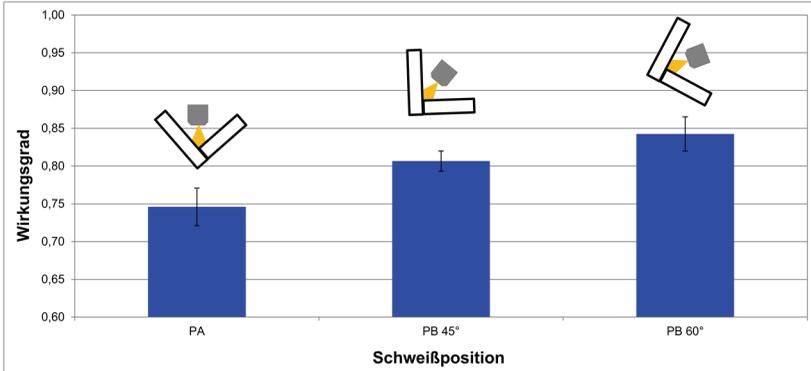
Im Vergleich zum WIG-Schweißen ist der Einfluss der Schweißnahtgeometrie beim MSG-Schweißen erheblich größer. Im Vergleich zwischen einer Blindnaht  $\eta_{\text{eff}} = 0,70$  und einem Engspalt  $\eta_{\text{eff}} = 0,85$  steigt der relative Anteil der eingebrachten Wärme in das Bauteil um mehr als 20 % an.

#### b) Schweißposition

Die Analysen des Einflusses der Schweißposition bei Kehlnahtverbindungen zeigen deutlich, dass ein Teil der an die Umgebung

abgegeben Energie des Lichtbogens über die Nahtflanken aufgenommen wird. Dieser Anteil ist umso höher, je stärker das Bauteil geneigt wird. Dadurch kann mehr Energie an die Bauteilflanken übertragen werden. Im konkreten Fall ist die relative Differenz beim WIG-Schweißen zwischen der PA- ( $\eta_{\text{eff}} = 0,76$ ) und PC- ( $\eta_{\text{eff}} = 0,79$ ) Position fast 5 %. Auch hier wird deutlich, dass hierfür circa die Hälfte der Abstrahlungs-, Wärmeleitungs- und Konvektionsenergie des WIG-Lichtbogens durch die Bauteilflanken aufgenommen wird, wenn der WIG-Schweißprozess an einem geneigten Bauteil eingesetzt wird [4].

Der Einfluss der Schweißposition ist beim MSG-Schweißen wiederum größer, als beim WIG-Schweißen (Bild 11). Bei einer Schweißung mit gleichen Parametern wird circa 12 % mehr Energie an das Bauteil übertragen, wenn anstatt in PA- in PC-Position gearbeitet wird. Dem gegenüber steht der Fakt, dass die Schweißnahtgeometrie unsymmetrischer in PC-Position ist, da auf Grund der Schwerkraft die Schmelze leicht nach unten fließt.



**Bild 11:** Einfluss der Schweißposition auf den Wirkungsgrad beim MSG-Schweißen (Parameter: MSG-Schweißen,  $v_D = 10$  m/min-Standard Libo; 15 l/min 82 %Ar, 18 % CO<sub>2</sub>, Brennerabstand  $s = 18$  mm; G3Si1  $d = 1,2$  mm;  $v_S = 70$  cm/min; GW: S235  $t = 5$  mm, Kehlnaht)

## 4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass der Energieeintrag in das Bauteil von einer Vielzahl an Parametern abhängt und mit den Angaben der gültigen Regelwerke nur unzureichend bestimmt werden kann.

Vergleichend wurden praktisch eingesetzte Bestimmungs- und Berechnungsmethoden der Schweißleistung analysiert sowie deren jeweilige Fehlerpotenziale bestimmt. Dabei wurden Abweichungen von bis zu 70 % vom Realwert ermittelt.

Abhängig von den eingestellten Parametern des Schweißprozesses können Abweichungen von bis zu 20 % entstehen. Hinzu kommt, dass die Verfahren mit nicht abschmelzender Elektrode durchschnittlich 25 % höhere Energieeinträge in das Bauteil haben, als die gültigen Regelwerke [1, 2] angeben. Schweißverfahren mit abschmelzender Elektrode sollten in Abhängigkeit der Lichtbogenart folgendermaßen unterteilt werden:

- Kurzlichtbogen  $\eta_{\text{eff}} = 0,85$
- Impulslichtbogen  $\eta_{\text{eff}} = 0,77$
- Sprühlichtbogen  $\eta_{\text{eff}} = 0,70$

Der statische Wert von  $\eta = 0,80$  [1, 2] sollte folglich angepasst werden.

Die Schweißnahtgeometrie hat einen gravierenden Einfluss auf die Energieeinbringung in das Bauteil. Beim MSG-Schweißen steigt beispielsweise im Vergleich zwischen einer Blindnaht  $\eta_{\text{eff}} = 0,70$  und einem Engspalt  $\eta_{\text{eff}} = 0,85$  der relative Anteil der eingebrachten Wärme in das Bauteil um mehr als 20 % an.

Hinzu kommt der Faktor der Schweißposition. Bei einer MSG-Schweißung mit gleichen Einstellparametern wird circa 12 % mehr Energie an das Bauteil übertragen, wenn anstatt in PA- in PC-Position gearbeitet wird.

Anhand der aufgeführten Beispielrechnung zur Kalkulation der Abkühlzeiten von dünnen Blechen (Gleichung 1) werden die Auswirkungen verschiedener Parameter verdeutlicht, siehe Tabelle 4. Es wird deutlich, dass mit der Verwendung falscher Werte eine breite Streuung bezüglich der

Abkühlzeiten entsteht. Dabei hat die richtige Bestimmung der Schweißleistung mit einer resultierenden Streuung von mehr als 350 % den größten Einfluss. Aber auch die Lichtbogenart bzw. Verfahrensauswahl hat eine große Bedeutung. Die Streuung zwischen dem MSG-Wechselstromschweißen und der Verwendung des Kurzlichtbogens beim MSG-Schweißen beträgt mehr als 200 %.

feste Parameter: MSG-Schweißen- Standardlichtbogen  $v_D = 10$  m/min

Brennerabstand 18 mm

Schweißgeschwindigkeit  $v_S = 70$  cm/min

15 l/min 82 % Argon, 18 % CO<sub>2</sub>

Zusatzwerkstoff G3Si1, d = 1,2 mm

Grundwerkstoff S 960 QL, t = 8 mm

*Tabelle 4: Darstellung der Abweichungen der t8/5-Werte beim MSG-Schweißen*

Parameter	Abweichung			t8/5-Bereich in s			Streuung in %
	negativ	real	positiv	negativ	real	positiv	
Schweißleistung	7.790 W	10.527 W	15.053 W	3,88	7,08	14,48	373
$\eta$		0,70	0,80		7,08	9,25	131
effektiver Wirkungsgrad		DIN EN 1011-1					
$\eta$		0,70	0,85		7,08	10,45	148
Schweißnahtgeometrie		Blindnaht	Engspalt				
$\eta$		0,70	0,79		7,08	9,02	127
Schweißposition		PA-Position	PC-Position				
$\eta$	0,55	0,70	0,85	4,37	7,08	10,45	239
Schweißverfahren	Wechselstrom	Sprüh Libo	Kurz Libo				
F2	0,67	1,00		4,75	7,08		149
Formfaktor	Kehlnaht	Blindnaht					

## Literatur

- [1] DIN EN 1011-1: „Schweißen – Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe – Teil 1: Allgemeine Anleitungen für das Lichtbogenschweißen“
- [2] SEW 088, Beiblatt 1:1993-10: „Schweißgeeignete Feinkornbaustähle; Richtlinien für die Verarbeitung, besonders für das Schmelzschweißen“
- [3] Jaeschke, B.: DVS-Merkblatt 0973 „Übersicht der Prozessregelvarianten des MSG-Schweißens“. Schweißen und Schneiden 66, Heft 9 (2014). DVS Media, Düsseldorf 2014.
- [4] Hälsig, A.: „Energetische Bilanzierung von Lichtbogenschweißverfahren“. In: Universitätsverlag Chemnitz, 2014, ISBN 978-3-944640-10-5
- [5] DIN EN 1011-2: „Schweißen – Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe – Teil 2: Lichtbogenschweißen von ferritischen Stählen“
- [6] Hälsig, A.; Kusch, M.; Mayr, P.: “Kalorimetrische Betrachtung des Energieeintrages ins Bauteil“. In: DVS Congress, Essen, DVS-Verlag, 2013, S. 353...361, DVS-Berichte Band 296, ISBN 978-3-87155-614-2
- [7] Cramer, H.; Baum, L.; Dudziak, M.: Prozesse nach Maß – Überblick über moderne Lichtbogenprozesse und deren Werkstoffübergänge beim Metall-Schutzgasschweißen. Der Praktiker, Heft 5 (2012). DVS Media, Düsseldorf 2012.
- [8] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: Physik für Ingenieure; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012.
- [9] Jaeschke, B.: Zusammenhänge bei der Messung, Steuerung und Regelung moderner MSG-Lichtbogenschweißprozesse und deren Verständnis. DVS-Berichte zum DVS Congress 2011, Band 275. DVS Media, Düsseldorf 2011.



## **Einsatz moderner physikalischer Simulationenethoden für schweißtechnische Anwendungen im Kraftwerksbau**

**Nitsche, A.; Mayr, P.**

Technische Universität Chemnitz, Institut für Füge- und Montagetechnik,  
Professur Schweißtechnik

### **Kurzfassung**

Das allgegenwärtige Bestreben zur Steigerung des thermischen Wirkungsgrades durch eine Erhöhung der Betriebsparameter Dampfdruck und Dampftemperatur, welche eben-falls zu einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beiträgt, führt beim Bau von neuen Kraft-werken zum Einsatz verschiedenster Werkstoffgütern. Besonders die Klasse der 9-12 % Cr-Stähle besitzt aufgrund ihrer bemerkenswerten Zeitstandeigenschaften großes Einsatz- und Entwicklungspotenzial im Bereich zukünftiger Kraftwerke. Die Entwicklung von kriechfestigkeitsoptimierten Stählen, wie die Legierung 9Cr3W3CoVNbBN (MARBN), stellt zudem immer größere Herausforderungen an die Schweißtechnik, da eine optimierte schweißtechnische Verarbeitung dieser Werkstoffe die Lebensdauer der Schweißnähte und somit der kompletten Anlagen steigern kann. Weiterhin verschärft der erforderliche Material-Mix beim Bau hocheffizienter Kraftwerke die Problematik der Langzeitkriecheigenschaften zusätzlich, da sogenannte Mischverbindungen zum Teil gravierend abweichende Langzeiteigenschaften aufweisen können. Daher werden möglichst frühzeitige Erkenntnisse über mikrostrukturelle Vorgänge und Langzeiteigenschaften derartiger Schweißverbindungen angestrebt. Dieser Beitrag betrachtet verschiedene moderne physikalische Simulationenethoden und stellt beispielhaft Möglichkeiten für einen effektiven Einsatz dieser Verfahren bezüglich schweiß- und werkstofftechnischer Problemstellungen des modernen Kraftwerkbaus in der Forschungs- und Entwicklungsarbeit vor.

## 1 Einleitung

Der moderne Kraftwerksbau entwickelt sich zunehmend hin zu immer höheren Betriebstemperaturen und -drücken. Vordergründige Zielstellungen bilden dabei die Erhöhung der thermischen Wirkungsgrade - verbunden mit einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen - sowie die Realisierung der sogenannten 700 °C-Kraftwerkstechnologie. Die eingesetzten Werkstoffe unterliegen durch die gesteigerten Dampfparameter insbesondere einer erhöhten Kriechbelastung. Zudem wird das Material sowohl einer erhöhten Oxidation und Korrosion ausgesetzt. Die Entwicklung verbesserter hochwarmfester Werkstoffe und entsprechender Schweißgüter spielt somit eine herausragende Rolle hinsichtlich der Deckung des weltweit steigenden Energiebedarfes.

Entsprechend der jeweiligen Einsatztemperatur findet in hocheffizienten Kraftwerken eine Vielzahl unterschiedlicher Werkstoffklassen Anwendung. Im Allgemeinen können hierbei ferritische, ferritisch-bainitische, martensitische und austenitische Stähle sowie Kobalt- und Nickelbasislegierungen unterschieden werden, deren Zeitstandfestigkeit unter erhöhten Temperaturen eines der Hauptkriterien für eine wirtschaftliche und effiziente Auslegung bildet. Des Weiteren muss beachtet werden, dass die verschiedenen Werkstoffklassen teils gravierende Unterschiede hinsichtlich ihrer schweißtechnischen Verarbeitung aufweisen und zudem stark differenzierende thermophysikalische Eigenschaften besitzen. In deutschen Kraftwerken gewinnt insbesondere der thermische Ausdehnungskoeffizient immer mehr an Bedeutung, da infolge der eingeleiteten Energiewende eine Kluft zwischen der Auslegung und der Betriebsweise der Anlagen entstanden ist.

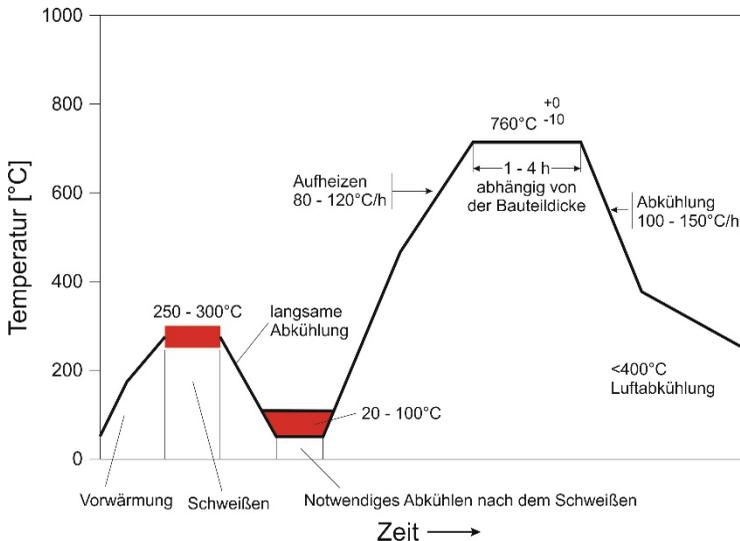
Der Einsatz der jeweiligen Werkstoffe richtet sich maßgeblich nach der Einsatztemperatur. In Bereichen geringerer Betriebstemperaturen bis ca. 550 °C werden vorwiegend die ferritisch-bainitischen Stähle 13CrMo4-5 und 10CrMo9-10 eingesetzt. Darüber hinaus kommen bis etwa 620 °C Einsatztemperatur überwiegend martensitische 9-12 % Cr-Stähle, wie der X10CrMoVNb9-1 (P91), zur Anwendung. Bereiche mit erhöhter Korrosionsbelastung und Temperaturbereiche über 630°C erlauben ausschließlich die Verwendung austenitischer Stähle sowie Nickel- bzw.

Kobaltbasislegierungen (z.B. Alloy 617 etc.). Anhand dieser verschiedenen Werkstoffgütern und dem damit entstehenden Material-Mix wird deutlich, dass qualitativ hochwertige Schweiß- und Mischverbindungen eine wichtige Rolle in Bezug auf die erreichbaren Betriebsdauern spielen. Die Kenntnis von Langzeitkriecheigenschaften der einzelnen Werkstoffgütern ist dabei nicht mehr ausreichend. Zusätzlich erschweren veränderte Betriebsweisen, welche teilweise zu einem stark verfrühten Ausfall von Kraftwerksanlagen führen, deren Auslegung und Konstruktion, da zum Teil gravierend abweichende Langzeiteigenschaften aufweisen können. Daher werden möglichst frühzeitige Erkenntnisse über mikrostrukturelle Vorgänge und Langzeiteigenschaften der Schweißverbindungen angestrebt. Angesichts aufgetretener Probleme mit bereits installierten Kraftwerkskomponenten, gefertigt aus dem bainitischen 7CrMoVTiB10-10 (T24) [1, 2], ist eine frühzeitige, tiefgreifende Untersuchung und Charakterisierung der Schweißnaht Eigenschaften äußerst notwendig und sinnvoll. Die Klasse der 9 % Cr-Stähle besitzt aufgrund ihrer bemerkenswerten Zeitstandeigenschaften großes Einsatz- und Entwicklungspotenzial im Bereich zukünftiger Kraftwerke, weshalb mögliche physikalische Simulationsmethoden nachfolgend am Beispiel dieser Werkstoffe beschrieben werden sollen.

## **2 Eigenschaften und schweißtechnische Verarbeitung der 9 % Chromstähle**

Die 9 % Cr-Stähle, wie X10CrMoVNb9-1 (P91) und X10CrWVNb9-2 (P92), zeichnen sich im Allgemeinen durch eine gute Verarbeitbarkeit, geringe thermische Ausdehnung, gute Kriechfestigkeit und gute Korrosionsbeständigkeit aus. Aufgrund ihrer angelassenen Martensit-Lattenstruktur, welche durch eine hohe Versetzungsdichte und feinst verteilte Aus-scheidungen gekennzeichnet ist, wird ein verbesserter Kriechwiderstand erzielt. Dem gegenüber erfordern diese Werkstoffe jedoch eine vergleichsweise aufwändige schweißtechnische Verarbeitung, siehe Bild 1. [3] Neben der exakten Einhaltung von Vorwärm- und Zwischenlagentemperaturen ist insbesondere die zwingend erforderliche Wärmenachbehandlung der Schweißnähte zu beachten, welche zur

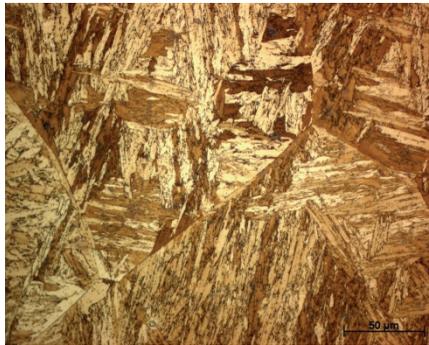
Einstellung verbesserter Langzeit- und Zähigkeitseigenschaften dient. Weiterhin erreichen die geschweißten Verbindungen im Vergleich zu dem unbeeinflussten Grundwerkstoff infolge der für diese Werkstoffgüten typischen sogenannten Typ-IV Risse eine deutlich reduzierte Lebensdauer. Steigende Betriebstemperaturen bzw. Kriechbelastung können die Zeitstandfestigkeit geschweißter Komponenten zum Teil auf 50 % der jeweiligen Grundwerkstoffe reduzieren.



*Bild 1: Schematische Darstellung der Wärmeführung beim Schweißen des 9 % Cr-Stahls X11CrMoWVNb9-1-1 (E911). [3]*

Eine der aktuellsten Entwicklungen im Bereich der 9 % Cr-Stähle ist die Legierung X9CrWCoVNbBN9-3-3, welche häufig als MARBN - martensitic boron and nitrogen strengthened 9Cr steel - bezeichnet wird. Derzeit laufende Zeitstandversuche an Schweißverbindungen dieses neuartigen Werkstoffes zeigen im Anfangsstadium einen deutlich erhöhten Kriechwiderstand im Vergleich zu dem bisher standardmäßig eingesetzten X10CrWMoVNb9-2 (T/P92). [4] Das Gefüge derartiger 9 % Cr-Stähle wird

im Herstellungsprozess durch eine aufwändige Wärmebehandlung, bestehend aus Austenitisierung und anschließendem Hochtemperatur-Anlassen, erreicht. [5] Dabei entwickelte Feinstausscheidungen verzögern Versetzungsbewegungen und stabilisieren somit das Gefüge unter hohen Temperaturen und Kriechbelastungen.  $M_{23}C_6$ -Karbide werden bevorzugt an ehemaligen Austenitkorgrenzen und Martensitlattengrenzen ausgeschieden. Durch das Zulegieren von Nb und V bilden sich zudem sogenannte MX-Karbide und -Nitride, welche homogen auch innerhalb der Martensitlatten ausgeschieden werden. Die Mechanismen der Mischkristall- und Ausscheidungsverfestigung tragen entscheidend dazu bei das Kriechverhalten dieser Stähle zu verbessern, indem Versetzungsbewegungen verhindert bzw. erschwert werden. Bild 2 zeigt die Mikrostruktur eines martensitischen 9 % Cr-Stahls.



*Bild 2: Schematische Darstellung der Wärmeführung beim Schweißen des 9 % Cr-Stahls X11CrMoWVNb9-1-1 (E911). [2]*

Beim Schweißen ist die Ausbildung der sogenannten Wärmeinflusszone (WEZ) zwischen dem Schweißgut und dem unbeeinflussten Grundwerkstoff unumgänglich. Diese ca. zwei bis drei Millimeter breite Zone umfasst mehrere Unterzonen. Dabei können entsprechend der beim Schweißen vorherrschenden Spitzentemperaturen die Schmelz- bzw. Fusionslinie, Grobkornzone, Feinkornzone, Interkritische Zone sowie eine Zone lokaler Anlasseffekte unterschieden werden. Unter

Kriechbeanspruchung entstehen insbesondere in der Feinkorn- und Interkritischen Zone bevorzugt Kriechporen, welche sich schließlich zu sogenannten Typ-IV Rissen verbinden. Die Entstehung dieser beiden Zonen resultiert aus der teilweisen Auflösung von Ausscheidungen beim Schweißen, welche im Temperaturbereich zwischen  $A_{c1}$  (Beginn der Austenitumwandlung) bis knapp über  $A_{c3}$  (Ende der Austenitumwandlung) auftritt. Während der Abkühlung behindern die verbliebenen Ausscheidungen das Wachstum der Austenitkörner, wodurch ein feinkörniges Gefüge entsteht. Im Kraftwerksbetrieb verfügen diese WEZ-Bereiche der Schweißnähte über eine deutlich reduzierte Zeitstandfestigkeit und stellen im Allgemeinen den Lebensdauer bestimmenden Faktor der gesamten Schweißverbindungen dar.

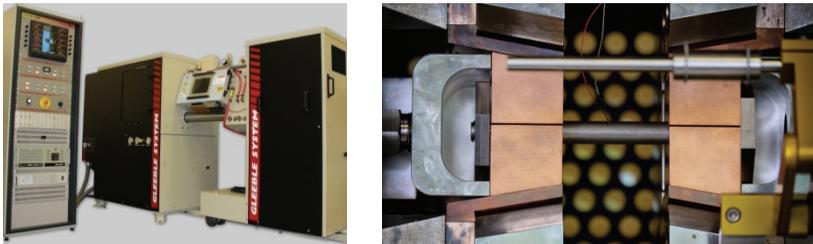
Durch gezielte Untersuchungen und Nutzung thermophysikalischer Simulationsmethoden können die Eigenschaften der einzelnen Bereiche der Schweißverbindungen detailliert ermittelt werden. Die dabei erzielten Daten und Ergebnisse leisten einen wichtigen Beitrag zur Optimierung schweißtechnischer Fertigungsprozesse und sicheren Auslegung der Komponenten. Weiterhin können kritische Bereiche der Schweißverbindungen isoliert und hinsichtlich ihrer Kriech- und Langzeiteigenschaften separat untersucht werden.

### **3 Untersuchung der Eigenschaften von Schweißverbindungen mittels thermophysikalischer Simulation**

Moderne Simulationsmethoden tragen dazu bei, das Verhalten neuer Werkstoffe beim Schweißen bzw. die zu erwartenden Eigenschaften der Schweißverbindungen zu charakterisieren. Somit kann bereits in der Entwicklungsphase gezielt auf Legierungszusammensetzungen, Herstellungsroutinen usw. Einfluss genommen werden, um beispielsweise metallurgische Mechanismen und Effekte, welche die Zeitstandfestigkeit von Schweißverbindungen her-absetzen, zu minimieren oder gänzlich auszuschließen. Weiterhin ist es möglich aufgetretene oder zu erwartende Schäden - insbesondere vor dem aktuellen Hintergrund drastisch veränderter Betriebsbedingungen - hinsichtlich ihrer Entstehung zu untersuchen.

Hervorragende Möglichkeiten zur anwendungs- und realitätsnahen Simulation von Schweißprozessen bieten Abschreck- und Umformdilatometer sowie thermomechanische Umformsimulatoren, wie die sogenannte Gleeble 3800, siehe Bild 3. Mit derartigen Anlagen ist es möglich thermische, mechanische und thermomechanische Werkstoffzustände realitätsnah abzubilden.

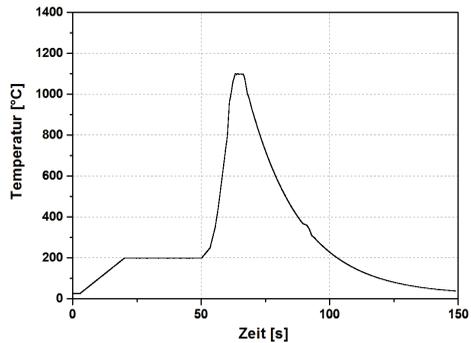
Das hochdynamische thermische System der Gleeble 3800 erlaubt durch eine Widerstandserwärmung (d.h. konduktiv) und massive wassergekühlte Kupferbacken maximale Aufheizraten von bis zu 10.000 K/s und Abkühlgeschwindigkeiten von bis zu 2.000 K/s. So können verschiedenste Temperatur-Zeit-Verläufe hochdynamischer Schweißprozesse, realitätsnah nachgebildet werden. Bild 3 (rechts) zeigt den Versuchsaufbau einer schweißtechnischen Simulation der WEZ am Beispiel eines hochwarmfesten borlegierten 9 %-Cr Stahls.



*Bild 3: Thermomechanischer Umformsimulator Gleeble 3800 (links) und Versuchsaufbau zur thermophysikalischen Simulation von Strukturen realer Schweißverbindungen.*

Mit Hilfe der „simulativen Erzeugung“ einzelner Bereiche der WEZ durch die entsprechende Spitzentemperatur kann ermittelt werden, welche Eigenschaften das nach dem Schweißen zu erwartende Gefüge aufweist und welche mikrostrukturellen Mechanismen während eines Schweißprozesses wirksam sind. Die resultierenden Gefüge und Eigenschaften bilden die Grundlage für eine Abschätzung der schweißtechnischen Weiterverarbeitung, wie zum Beispiel einer Wärmenachbehandlung. Durch die Möglichkeit der thermophysikalischen Simulation von

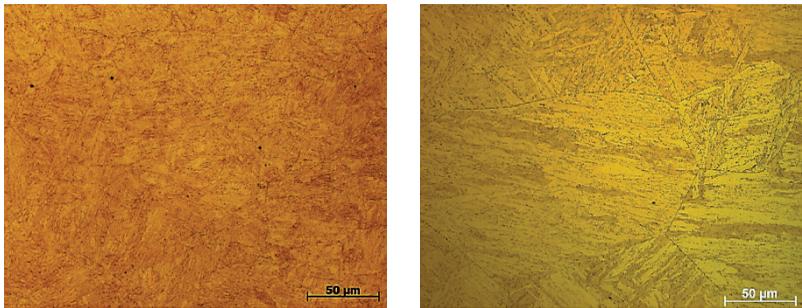
Schweißprozessen konnte beispielsweise der Einfluss der Spitzentemperaturen auf die Schweißnaht und insbesondere auf die WEZ realitätsnah abgebildet werden. Aufgrund der verhältnismäßig großen Probenvolumen, welche in der Gleeble 3800 thermophysikalisch bearbeitet werden können, eignet sich diese Maschine besonders zur Herstellung von Proben für Zeitstandversuche und die Ermittlung mechanischer Gütwerte.



*Bild 4: Thermophysikalische Simulation von WEZ-Strukturen in einem Abschreck- und Umformdilatometer (links), simulierter Temperatur-Zeit-Zyklus eines MSG-Prozesses bei einer Spitzentemperatur von 1100 °C zur Erzeugung der Feinkornzone (rechts).*

Zur Untersuchung einzelner Schweißnahtbereiche eignen sich ebenfalls sogenannte Abschreck- und Umformdilatometer. Diese besitzen insbesondere den Vorteil, dass deutlich kleinere Probengeometrien benötigt werden und somit sehr materialeffizient - auch im Hinblick auf kleine Testschmelzen und ähnliches - gearbeitet werden kann. Bild 4 zeigt exemplarisch einen Versuchsaufbau zur thermophysikalischen Simulation von WEZ-Strukturen sowie einen Temperatur-Zeit-Verlauf, der einen konventionellen MSG-Prozess mit Vorwärmung abbildet. Durch ein gezieltes Aufheizen auf eine Spitzentemperatur von 1100 °C wurde in diesem Fall der Bereich der Feinkornzone thermophysikalisch erzeugt bzw. simuliert.

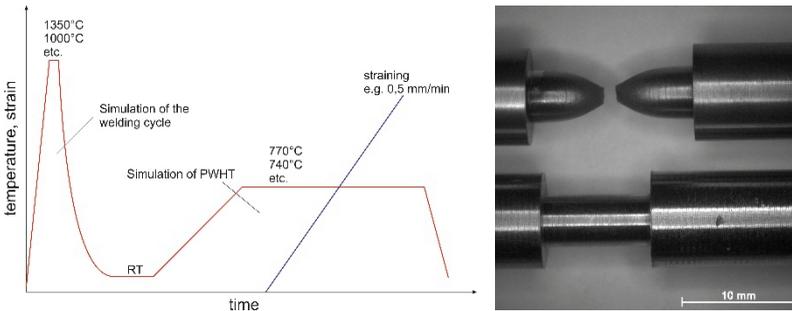
Das Gefüge des erzeugten WEZ-Bereichs ist in einer lichtmikroskopischen Aufnahme in Bild 5 dargestellt. Im Gegensatz zu konventionellen Stählen kommt es durch metallurgische Vorgänge in der hierbei verwendeten MARBN-Legierung zu einer Unterdrückung der Feinkornzone. Anstelle dieser ist das Gefüge in diesem simulierten Bereich der WEZ gekennzeichnet durch eine martensitische Struktur mit sichtbaren groben ehemaligen Austenitkorn Grenzen. Dieser Effekt trägt maßgeblich zur Steigerung der Kriechfestigkeit dieses neuartigen Legierungstyps bei. Ein Vergleich zur real erzeugten WEZ im Bereich der Feinkornzone zeigt eine gute Übereinstimmung mit der simulativ erzeugten Mikrostruktur. Auch im Hinblick der Härteeigenschaften verzeichnen beide Zustände nahezu identische Härtewerte. So liegt die Härte der simulativ erzeugten Mikrostruktur mit 388 HV im Bereich der Feinkornzone der realen Schweißverbindung mit 376 HV.



*Bild 5: Lichtmikroskopische Gefügebildungen der Feinkornzone einer MARBN-Legierung - erzeugt durch thermophysikalische Simulation (links) und innerhalb einer realen Schweißverbindung (rechts).*

Neben einstufigen Temperatur-Zeit-Zyklen, welche einer Einlagenschweißung oder dem Bereich der Decklage entsprechen, können ebenso mehrstufige Zyklen simuliert werden. Diese dienen beispielsweise dazu, den wirksamen Anlasseneffekt während einer Mehrlagenschweißung zu untersuchen. Basierend auf Temperaturmessungen während der Ausführung von Mehrlagenschweißungen können somit gezielt bestimmte Bereiche der

WEZ nachvollzogen werden, welche unter Zeitstandbelastung als kritisch zu betrachten sind. Des Weiteren können im Bereich des Schweißgutes Anlasseffekte simuliert werden, welche sich positiv auf dessen Zähigkeitseigenschaften auswirken können. Durch den erneuten Wärmeeintrag erfährt das martensitische Gefüge eine weitere Entspannung, was sich zudem in einer Härteabsenkung äußert.



*Bild 6: Thermophysikalische Simulation eines Schweißzyklus mit anschließender Wärmenachbehandlung zur Ermittlung risskritischer WEZ-Bereiche und Spannungen (links) sowie beispielhaft dargestellte Proben vor und nach der Simulation.*

Neben einfachen Aufheiz- und Abschreckversuche kann ebenfalls der Einfluss mechanischer Lasten bezüglich des Schweißprozesses untersucht werden. Abschreck- und Umformdilatometer sowie Thermomechanische Umformsimulatoren verfügen über verschiedene Module bzw. Ausrüstungen, welche das exakte Aufbringen zusätzlicher mechanischer Lasten ermöglichen. Beispielhaft zeigt Bild 6 die Durchführung eines sogenannten „slow strain rate hot tensile test“. Dieser dient dazu das sogenannte Reheat Cracking, welches häufig während der Wärmenachbehandlung von Schweißnähten auftritt, zu charakterisieren. Wie aus dem Schema ersichtlich ist, wird im Anschluss an einen simulierten Schweißzyklus eine simulierte Wärmebehandlung angeschlossen. Während dieser erfolgt eine stetige Erhöhung der Zuglast bis zum Bruch der Probe. Durch die Variation der Spitzentemperaturen des Schweißzyklus einerseits und die Variation der Wärmebehandlungstemperatur andererseits, können

rissanfällige Bereiche der WEZ und kritische Temperaturbereiche identifiziert werden. Somit ist es möglich, bereits im Vorhinein eine schweißtechnische Verarbeitung bzw. Schweißroutinen für sensible Werkstoffe zu planen und Schäden an geschweißten Komponenten zu vermeiden.

#### **4 Zusammenfassung**

Die Entwicklung neuer hochwarmfester Stahlwerkstoffe im Bereich des Kraftwerksbaus führt zu immer komplexeren Legierungen, welche einer exakten schweißtechnischen Verarbeitung bedürfen. Schäden an geschweißten Verbindungen treten während des Betriebs der Anlagen zum Teil stark zeitverzögert auf. Metallurgische Effekte, welche durch den Einfluss der Schweißprozesse entstehen, kommen somit teils erst nach Jahren zum Vorschein. Moderne Untersuchungsmethoden erlauben es, neue Werkstoffe bereits frühzeitig tiefgreifend und detailliert zu erforschen. Insbesondere deren Verhalten beim Schweißen sowie die Entwicklung entsprechender Schweißzusätze sind hinsichtlich der geforderten langen Betriebsdauern von großem Interesse.

Mit Hilfe von Abschreck- und Umformdilatometern sowie Thermomechanischen Umformsimulatoren können die Auswirkungen des Schweißens auf die Grundwerkstoffe detailliert untersucht werden. Neben der thermophysikalischen Simulation einzelner Gefüge und Bereiche der Schweißverbindungen, können deren Eigenschaften umfassend ermittelt werden. Somit kann bereits in der Entwicklungsphase gezielt auf Legierungszusammensetzungen, Herstellungsroutinen usw. Einfluss genommen werden, um beispielsweise metallurgische Mechanismen und Effekte, welche die Zeitstandfestigkeit von Schweißverbindungen herabsetzen, zu minimieren oder gänzlich auszuschließen. Weiterhin ist es möglich aufgetretene oder zu erwartende Schäden - insbesondere vor dem aktuellen Hintergrund drastisch veränderter Betriebsbedingungen - hinsichtlich ihrer Entstehung zu untersuchen.

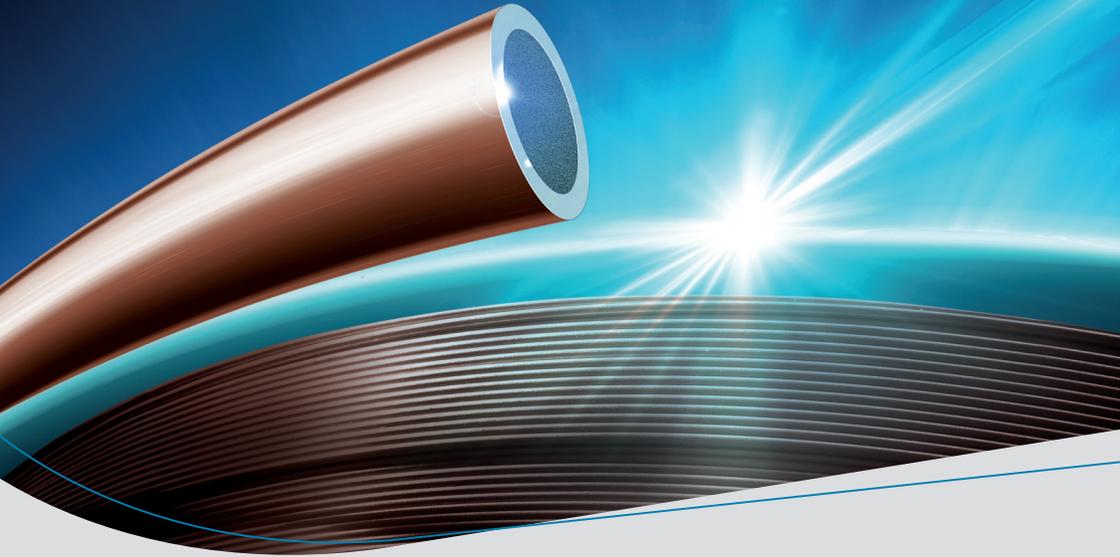
## Literatur

- [1] Ullrich, C.; Tillmann, W.; Bodmer, T.; Rademacher, H.-G.: Untersuchungen zur Spannungsrisskorrosion im Schweißnahtbereich des Werkstoffs T24. 35. Vortragsveranstaltung „Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe“, Düsseldorf, 2012.
- [2] Devrient, B.; Husemann, R.-U.; Kilian, R.; Bernds, D.: Cracking of T24 in High-Temperature Water. 39th MPA-Seminar, Stuttgart, 2013.
- [3] Groß, V.; Heuser, H.; Jochum, C.: Neuartige Schweißzusätze für bainitische und martensitische Stähle.
- [4] Schlacher, C. et al.: Study of creep damage in creep exposed martensitic high chromium steel weldments. Will be published in: 7th International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, Waikoloa, Hawaii, October 2013.
- [5] Fedorova, I.; Kipelova, A.; Belyakov, A.; Kaibyshev, R.: Microstructure Evolution in an advanced 9 pct Cr Martensitic Steel during Creep at 923 K (650°C). In: Metallurgical and Materials Transactions A Vol. 44A (2013), pp. 128-135.



# I am the Number One Seamless Cored Wire

Engineered by the Leading  
Welding Consumables Developers



I am the dependable force in cored wire welding. I weld the ships, trucks and trains that roam seas and continents. I connect the rigs, pipelines and wind turbines that supply the world's energy. I make robots weld relentlessly. I make welders proud. My impenetrable seamless mantle keeps any moisture out of my core and shields your weld from hydrogen cracking. My mantle is stiff and my surface copper-coated for smooth and stable feeding. My core is packed with decades of know-how and engineered to bring you productivity, weld quality and – above all – more profit. I am the world's number one seamless cored wire – from voestalpine Böhler Welding.

**voestalpine Böhler Welding**  
[www.voestalpine.com/welding](http://www.voestalpine.com/welding)

**voestalpine**  
ONE STEP AHEAD.



## **Schweißtechnik und Robotik**

**Dr.-Ing. Jörg Müglitz**

ZIS Industrietechnik GmbH, Meerane

### **Kurzfassung**

Fachkräftemangel und Kostendruck zwingen in der modernen, stahlverarbeitenden Industrie zur Ausschöpfung aller Innovations- und Automatisierungsmöglichkeiten.

Industrieroboter sind Universalmaschinen, robust, preisgünstig und inzwischen in allen Industriezweigen in Verwendung. Sie werden durch Werkzeuge, periphere Einrichtungen und in Software überführtes, verfahrensspezifisches Fachwissen auf eine spezielle Aufgabenstellung appliziert. Die Grenze hin zu CNC-Maschinen und zu vergleichsweise einfacher, mechanisierter Gerätetechnik ist fließend.

### **0 Einleitung**

Der Roboter beschreibt einen alten Traum- vielleicht auch einen Albtraum- der Menschen: Eine Maschine, dem Menschen ähnlich, ihm aber in Kraft, Ausdauer, Präzision überlegen. Im zwanzigsten Jahrhundert wurde dieser Traum mehr und mehr Realität, getrieben zunächst von der Elektrifizierung in der ersten Jahrhunderthälfte, der Einführung der Elektronik in der zweiten Jahrhunderthälfte, der Digitalisierung ab etwa 1970.

Der Industrieroboter ist eine typische und war entwicklungsgeschichtlich gesehen die erste mechatronische Maschine, also eine Kombination aus Mechanik, elektrischer und elektronischer Hardware und Software.

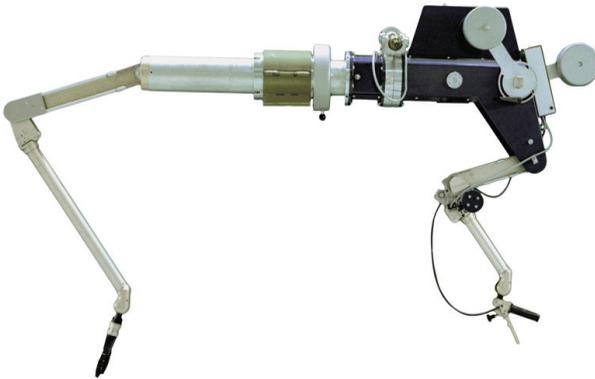
Ursprünglich lag der Fokus der technischen und wissenschaftlichen Entwicklung auf der Entwicklung der Robotermechanik. Diese ist inzwischen weitgehend abgeschlossen. Es haben sich einige wenige, vergleichsweise einfache Bauprinzipien durchgesetzt. Diese sind in ihrer Entwicklung und Perfektionierung inzwischen weit an das mit den üblichen

Werkstoffen des Maschinenbaues erreichbare hinsichtlich Steifigkeit, Leichtbau und Spielarmut herangekommen.

Auch die elektrische und elektronische Hardware tritt mehr und mehr in den Hintergrund. Die Programmierung, letztendlich die Software ist der die Leistungsfähigkeit bestimmende Faktor geworden.

## 1 Historie

Im Jahr 1954 meldete in den USA Georg Devol ein Patent auf einen programmierbaren Manipulator an und markierte damit die Geburtsstunde des Industrieroboters. Vorher schon gab es die sogenannte „Fernhandlungstechnik“, manuell betätigte Manipulatoren zur Ausführung von Handhabungsoperationen in der Kerntechnik (Bild 1).



*Bild 1: (©Wälischmiller Engineering GmbH)*

Im Jahr 1961 entstand mit dem Unimate bei der Firma UNIMATION in den USA der erste industriell verwendbare, hydraulisch angetriebene Roboter. 1978 wurde von demselben Unternehmen mit dem PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly) ein Standard geschaffen, der bis heute aus mechanischer Sicht nur marginale Weiterentwicklungen erfahren hat (Bild 2).



*Bild 2:*

In Europa sind die schwedische Gesellschaft ASEA (heute ABB), das französische Unternehmen ACMA und das deutsche Unternehmen KUKA als Roboterpioniere zu nennen. In den frühen 70er Jahren des letzten Jahrhunderts haben KUKA und ASEA mit dem Famulus und dem IRB 6 die ersten vollständig elektrisch angetriebenen Roboter entwickelt und in der Industrie zum Einsatz gebracht.

Die Schweißtechnik war eine der ersten Branchen, in der Industrieroboter zum Einsatz kamen. Zunächst das Punktschweißen, dann auch das Schutzgas-Bahnschweißen wurden auf den Roboter appliziert und sind bis heute die am meisten genutzten Prozesse.

Mitte der 70er Jahre wurde auch in der DDR begonnen, Industrieroboter zu entwickeln. Der Vorgänger der SLV Halle, das Zentralinstitut für Schweißtechnik der DDR ZIS Halle, hat an dieser Entwicklung einen messbaren Anteil. Hier wurde das Baukastensystem ZIS 995 entwickelt.

Im Gegensatz zu den Gelenkarmrobotern ZIM10 und ZIM60- mehr oder weniger Nachbauten der ASEA-Roboter- basierte ZIS995 auf einem Portalroboterkonzept, also der orthogonalen Nacheinander-Anordnung von Linearachsen, kombiniert mit Rotationsmodulen für das Werkzeug. Rechenaufwendige kinematische Transformationen konnten vermieden

werden, weswegen schon mit einfachster Steuerungstechnik (Nockenschaltwerke, fest verdrahtete Diodenmatrizen..) Funktionalität und Rationalisierung möglich wurde (Bild 3).



*Bild 3: (©ZIS Halle)*

In den späten 80er Jahren standen in der DDR dann auch entsprechende numerische Steuerungen zur Verfügung (IRS650, IRS711). Damals belächelt ist aus heutiger Sicht beachtlich, was mit der verfügbaren Hardware (8bit Mikrorechner!!) an Funktionalität erreicht wurde.

## **2 Stand der Technik**

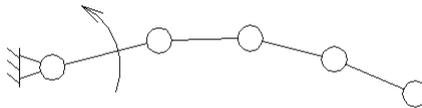
Der Industrieroboter ist von einer bestaunten Maschine in den letzten 40 Jahren zu einem ganz normalen Investitionsgut geworden. Neben Anwendungen in allen Bereichen der Industrie sind Roboter in der

Raumfahrt und in der Medizin zu finden. Pro Jahr werden weltweit etwa 100000 ([www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)) neue Industrieroboter installiert.

Neben einer Vielzahl kleiner, spezialisierter Roboterhersteller haben sich im Markt mit den Firmen KUKA (D), ABB (Schweiz), FANUC und YASKAWA/MotoMan (JP) einige große Anbieter etabliert. Diese haben jeweils eine komplette Produktpalette im Angebot, von kleinen Robotern mit einer Tragfähigkeit von 1kg bis zu Schwerlastrobotern, die 1000kg zu handhaben in der Lage sind. Allein das deutsche Unternehmen KUKA produziert nach eigenen Angaben 15000 Industrieroboter pro Jahr.

## 2.1 Mechanik

Zwei grundlegende Prinzipien von Industrierobotern existieren: Roboter mit paralleler und Roboter mit serieller Struktur.



*Bild 4: Serielles Strukturprinzip*

Roboter mit serieller Struktur sind am weitesten verbreitet und dem menschlichen Arm nachempfunden. Alle Glieder sind nacheinander angeordnet, das jeweils gestellnähere Glied trägt alle gestellferneren, einschließlich deren Antriebe, Getriebe etc.



*Bild 5: KUKA KRC 16*

Aus dem Strukturprinzip folgen spezielle Eigenschaften:

großer Arbeitsraum,

große Übersetzung,

vergleichsweise geringe Steifigkeit,

Gelenkspiele, Gelenk- und Gliedtoleranzen

**addieren** sich zu einer geringen Gesamtgenauigkeit,

Verhältnis von bewegter Masse zu Tragfähigkeit  $>10$ .

Seriell aufgebaute Roboter sind entweder Gelenkarm- oder Portalroboter. Gelenkarmroboter sind dem menschlichen Arm kinematisch und in der Dimensionierung (Verhältnis der Länge von Ober- und Unterarm) sehr ähnlich. Ihr Arbeitsraum erscheint auf den ersten Blick sehr groß, wobei

allerdings zu berücksichtigen ist, dass nur ein kleiner Teil dieses Arbeitsraumes letztendlich praktisch uneingeschränkt nutzbar ist.

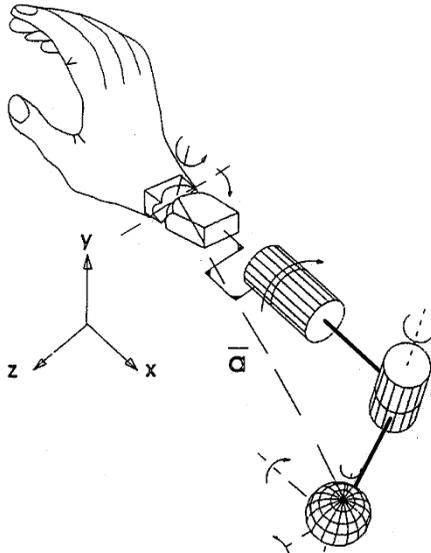
Nahe der gestreckten Lage des Roboterarmes verschlechtern sich dessen kinematische Eigenschaften. Mit größer werdender Auskrugung nimmt die Steifigkeit und Positioniergenauigkeit u.U. dramatisch ab. Der Arbeitsraum wird auch durch das am Handgelenk montierte Werkzeug verkleinert. Durch ein weit vom Handwurzelpunkt- dem Schnittpunkt der Handgelenk-Drehachsen- entfernt montiertes Werkzeug vergrößert sich die Roboterreichweite scheinbar. Jedoch wird das Arbeitsraumvolumen, in dem eine uneingeschränkte Orientierung des Werkzeugs möglich ist, stark reduziert. Darüber hinaus wird die Genauigkeit am Werkzeugmittelpunkt, dem TCP, verringert.

Der Kabel- und Medienführung zum Werkzeug ist an Gelenkarmrobotern besondere Aufmerksamkeit zu schenken und limitiert ebenfalls den möglichen Bewegungsbereich.

Portalroboter haben diese Einschränkungen nur in deutlich geringerem Maße. Ihr Arbeitsraum kann theoretisch unbegrenzt groß genommen werden, Die Kabel- und Medienführung gelingt mit Energieketten problemlos.

An großen Portalen befestigte, kleinere Industrieroboter verbinden die Vorteile beider serieller Bauprinzipien. Darüber hinaus wird so der Maschine eine Redundanz verliehen. Redundanz bedeutet, dass eine bestimmte Werkzeugposition und -orientierung durch unendlich viele verschiedene Posen des Roboters erreicht werden kann.

Normale Gelenkarmroboter haben sechs Bewegungsfreiheiten, die sich in drei Positions- und drei Orientierungsachsen aufteilen. Damit sind am Roboter genauso viele Freiheiten vorhanden, wie ein Körper im Raum Bewegungsmöglichkeiten hat.



*Bild 6:*

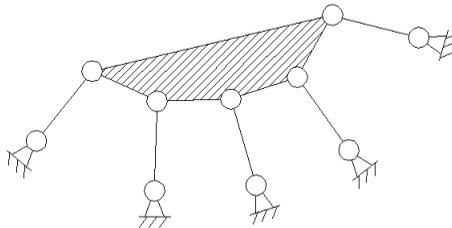
Der menschliche Arm (Bild 6) hat einen Freiheitsgrad von 7. Dieser setzt sich zusammen aus Schultergelenk (Kugelgelenk,  $f=3$ ), Ellenbogen (Drehgelenk,  $f=1$ ), Elle und Speiche (Drehgelenk,  $f=1$ ) und dem Ellipsoidgelenk ( $f=2$ ) der Hand. Damit ist die Redundanz 1, d.h., der menschliche Arm ist um die Achse  $\underline{a}$  drehbar, ohne dass Position und Orientierung der Hand sich verändert.

Normale Gelenkarmroboter (Bild 5) haben nur zwei Freiheiten im Schultergelenk. Jedoch ist z.B. von der Firma IGM (Bild 7) kürzlich ein siebenachsiger Industrieroboter präsentiert worden, der ein ziemlich getreues Abbild des menschlichen Armes darstellt.



*Bild 7: (© IGM Robotersysteme AG)*

Roboter mit paralleler Struktur (Bild 8) beseitigen einige der für serielle Roboter genannten Nachteile. Das Abtriebsglied, oft als Plattform bezeichnet, ist mit typisch fünf oder sechs Beinen mit dem Gestell verbunden. Der bekannteste Parallelroboter ist die STEWARD-Plattform.



*Bild 8: Parallele Struktur*

Durch die vielen Beine wird die Kraft verteilt, alle Beine werden nur normal (Zug und Druck) beansprucht. Gelenkspiel und Gliedtoleranzen **teilen** sich zu einer Gesamttoleranz. Die Struktur ist steif und baut sehr leicht, hat jedoch nur einen kleinen Arbeitsraum mit besonders stark limitierten Schwenkmöglichkeiten der Plattform. Berechnung und Dimensionierung sind aufwendig. Bis auf wenige Sonderanwendungen haben sich Parallelstrukturen nicht durchgesetzt. Die Vorteile beider Strukturen zu verbinden kann mit hybriden Strukturen gelingen.

## 2.2 Steuerung und Software

Die technische Entwicklung bei Industrierobotern spielt sich inzwischen weitestgehend auf dem Gebiet der Softwaretechnologie ab. Robotik ist in heutiger Sichtweise ein Spezialgebiet der Informatik. Die Steuerung wird als eine Black Box betrachtet, die zum Bediener hin als PC mit dem „look and feel“ moderner Betriebssysteme in Erscheinung tritt, per IP-Adresse im Internet erreichbar ist, per Netzwerk in die Firmen-IT eingebunden ist und mit der Hardware, d.h. den Roboterantrieben, den Sensoren, der Sicherheitstechnik, anderen Maschinen usw. per standardisierten Bussystemen (CAN, ProfiBUS, TwinCAT, SERCOS...) kommuniziert. Rechenleistung ist in ausreichender Menge in der Steuerung vorhanden und in aller Regel kein Diskussionsthema mehr.

Moderne Robotersteuerungen besitzen eigene Programmiersprachen, die ähnlich bekannter Hochsprachen sind. Eine eigene, standardisierte Programmiersprache wie für CNC-Maschinen nach DIN 66025 existiert für Roboter nicht. Bemühungen dazu gab es in der Vergangenheit und führten zu der Sprache KAREL (1985), maßgeblich von FANUC entwickelt. Andere Robotersprachen sind an diese angelehnt, ohne kompatibel zu sein.

Mit der Entwicklung der Steuerungstechnik verwischen auch die Grenzen zwischen NC-Maschine und Industrieroboter, wobei strukturell der Unterschied zwischen einer CNC-Fräsmaschine und einem Portalroboter immer vergleichsweise gering war.

Die Unterschiede manifestierten sich in der Steuerung. Eine Robotersteuerung war zunächst ausschließlich dafür ausgelegt, einen Bewegungsablauf einmalig zu programmieren und diesen dann sehr oft zu wiederholen.

Eine CNC-Steuerung hingegen musste einfach und in schnellem Wechsel zu programmieren sein und die stetige Interaktion zwischen Werker und Maschine erlauben und unterstützen. Folglich wurde an einer CNC-Steuerung viel Wert auf die Benutzerschnittstelle gelegt (großer Bildschirm, einfach zu bedienendes Tastenfeld...), jedoch waren sie ausschließlich für kartesisch aufgebaute Maschinen bestimmt, d.h. es gab keine kinematischen Transformationen.

Inzwischen ist die Verschmelzung weit fortgeschritten. Moderne CNC-Steuerungen (z.B. Beckhoff AG) sind in der Lage, auch Roboter zu steuern wie im Umkehrschluss z.B. die neue Steuerung der Firma KUKA, die KRC4, in der Lage ist, NC-Code nach DIN 66025 abzuarbeiten.

### 2.3 Programmierung

CNC-Steuerungen werden textuell programmiert, ein ASCII-File enthält das von der Maschine abzufahrende Programm. Ein Beispielcode:

```
N000070 G198
N000080 G00 X-00030.600 B 00000.000 A 00000.000 C 00090.000
N000090 G41
N000100 M65
N000110 G01 X-00053.800 B 00000.000 A-00045.000 C 00090.000
N000120 G01 X-00053.670 B-00001.990 A-00044.810 C 00090.000
N000130 G01 X-00053.270 B-00003.979 A-00044.230 C 00090.000
N000140 G01 X-00052.620 B-00005.969 A-00043.250 C 00090.000
N000150 G01 X-00051.710 B-00007.959 A-00041.840 C 00090.000
N000160 G01 X-00050.550 B-00009.948 A-00039.940 C 00090.000
```

Roboter werden häufig per Teach-in programmiert. An der realen Anlage werden Punkte angefahren, geteacht, d.h. in der Robotersteuerung gespeichert, die Punkte durch Verfahrbefehle miteinander verbunden, mit Geschwindigkeits- und Technologieparametern versehen und dann abgearbeitet. Für diese Art der Programmierung ist weder die Positioniergenauigkeit des Roboters noch die Genauigkeit der Roboteranlage von Bedeutung. Wichtig ist nur die Wiederholgenauigkeit des Roboters, wie gut er also in der Lage ist, unter immer den gleichen Umweltbedingungen einen Raumpunkt anzufahren. Das können Roboter sehr gut, weswegen die Wiederholgenauigkeit auch jener Parameter ist, mit dem für die Präzision eines Roboters geworben wird. Üblich sind Werte <0.1mm.

Die Positioniergenauigkeit hingegen beschreibt, wie genau der Roboter sich in einem Koordinatensystem positionieren lässt. Bezogen auf das im Roboterfuß liegende Weltkoordinatensystem ist sie in der Regel ein Mehrfaches der Wiederholgenauigkeit und nicht selten mehrere Millimeter groß.

Die Positioniergenauigkeit ist von Bedeutung, wenn der Roboter off-line programmiert wird, also über ein im Büro in wie auch immer garteter Weise erstelltes Programm.

Neben der rein textuellen Programmierung mit einem Editor werden Simulationsprogramme, oftmals als Ergänzung eines CAD-Systems, genutzt. Unter Verwendung der CAD-Modelle des Bauteiles, der Peripherie und des Roboters wird damit ein realitätsnaher digitaler Prototyp der Roboteranlage geschaffen, an dem Zugänglichkeits- und Kollisionsfragen genauso geklärt werden können wie Taktzeiten und optimale Anordnung der Komponenten. Obzwar die Werbung vermittelt, dass dies sehr einfach und schnell geschieht ist der Aufwand für das 3D-Layout nicht gering. Ist dies einmal vorhanden, kann auch das Roboterprogramm von diesen Systemen erstellt werden. Das Problem der Toleranz zwischen Realität und Computermodell bleibt bestehen.

### 3 Ein Beispiel

ZIS Industrietechnik GmbH ist ein Zuschnittbetrieb für dreidimensionale Bauteile, wie Rohre und Hohlprofile. Industrieroboter werden entsprechend Bild 9 verwendet, um waagrecht drehbare Rohre und Hohlprofile vermittlems der thermischen Trennverfahren Autogenes Brennschneiden und Plasmaschneiden zuzuschneiden.

Roboter werden **anstatt** von NC-Maschinen aufgrund ihres ganz geringen Kollisionsraumes, ihrer schlanken Bauform und erheblichen Kostenvorteilen verwendet. Die Roboter werden bei ZIS Industrietechnik aber **wie** NC-Maschinen verwendet, also mit einem textuellen Programm, off-line im Büro erzeugt, bahngesteuert.



*Bild 9: (© ZIS Industrietechnik GmbH)*

Zur Erstellung des Roboterprogrammes wird das im Unternehmen entwickelte und unter dem Namen TubeCut vertriebene Softwarepaket benutzt. Das Programm ist zugeschnitten auf Anwendungen im Apparate- und Behälterbau und die Herstellung der dort üblichen Rohrverbindungen. Die branchenübliche Vorgehensweise ist in der Programmieroberfläche nachgebildet. Die Software ist facharbeitergeeignet. Das heißt: Es braucht branchenspezifisches Wissen, aber keinerlei CAD- oder Programmierkenntnisse. Dazu ist die Software hochgradig automatisiert und so angelegt, dass im Hintergrund, ohne Sichtbarkeit für und ohne Zutun vom Nutzer ein fertiges Roboterprogramm inklusive der erforderlichen Sensoreinbindung entsteht. Das wird am Programmierarbeitsplatz simuliert, an die Maschine überspielt und abgearbeitet.

## 4 Sensoren

Noch immer gilt der alte Witz: Der beste Sensor ist kein Sensor! Das trifft besonders für die Schweißtechnik zu: Rauch, Staub, Hitze, Strahlung, elektrische und magnetische Felder verkomplizieren den Einsatz. Die in der Schweißtechnik am häufigsten verwendeten Sensoren sind taktile Sensoren zur Nahtverfolgung und Nahterstfindung, Laser-Abstandssensoren, Scanline-Kameras zur Nahtverfolgung und Kameras zur Beobachtung des Schmelzbades. Letztere dürfen u.U. schon gar nicht zu den Sensoren gezählt werden, weil sie vielfach nur zur Beobachtung, Dokumentation und Qualitätssicherung verwendet werden und nicht in den Bewegungsverlauf des Roboters eingreifen. Die Sensoren müssen den Prozess geometrisch- und damit zeitlich- vor- oder nachlaufen. Direkt im Schmelzbad, d.h. am TCP, lassen sich in der Regel keine Sensorinformationen gewinnen. Für eindimensionale Nahtverläufe (Geraden) ist das noch relativ einfach realisierbar, für zwei- oder gar dreidimensional geformte noch immer ein großes Problem. Sensorinformationen lassen sich auch aus den Prozessparametern der Stromquelle ableiten. Ein ganz simples Beispiel ist die Nutzung der Lichtbogenspannung als Abstandssignal.

Obzwar schon vor fast 30 Jahren verfasst ist in /1/ eine erschöpfende Systematik über Sensorprinzipien und deren Anwendung in der Schweißtechnik zu finden.

## 5 Ausblick

Bis heute sind Industrieroboter weitgehend blind, taub und stumm und nur im günstigsten Fall mit ein wenig Tastsinn ausgestattet. Ihre Stellung im Raum wird aus der Lage ihrer Antriebe möglichst genau errechnet, stimmt nie ganz genau und zwingt dazu, Roboter steif und schwer zu machen. Steifigkeit und Masse, kombiniert mit Schnelligkeit, machen Roboter gefährlich.

Der Mensch als Vorbild aus der Natur ist ganz anders: elastisch, geschmeidig, anpassungsfähig und ungemein flexibel. Unzählige Sensoren erschließen uns die Umwelt und Bewegungen werden intuitiv und meist unterbewußt optimiert.

Ein Industrieroboter der Zukunft, ein flexibel einsetzbarer „Arbeitsknecht“, wird nur vergleichsweise wenige dem Menschen ebenbürtige Fähigkeiten benötigen. Heute hat er diese noch nicht. Einem Roboter ein beliebiges, geheftetes Bauteil vorzusetzen und mit der Anweisung „Abschweißen!“ zum sinnvollen Arbeiten zu bewegen wird noch lange Zeit eine Vision bleiben.

### **Weiterführende Literatur**

- [1] Herden, G.: Schweißroboter. VEB Verlag Technik Berlin, 1985
- [2] Volmer, J.: Industrieroboter- Funktion und Gestaltung. VEB Verlag Technik Berlin, 1992
- [3] Hesse,S.: Industrieroboterpraxis. Vieweg-Verlag Wiesbaden, 1998
- [4] Hesse,S.: Grundlagen der Handhabungstechnik. Hanser-Verlag München, 2010
- [5] Husty,M.,Karger,A.; Sachs,H.; Steinhilper,W.: Kinematik und Robotik. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1997
- [6] Glaeser,G.: Geometrie und ihre Anwendungen in Kunst, Natur und Technik. Spektrum Akademischer Verlag, 2007
- [7] Spur,G.;Auer,B.H.;Sinning,H.: Industrieroboter. Hanser-Verlag München, 1979
- [8] Vukobratovic,M.: Introduction to Robotics. Springer-Verlag Berlin 1989
- [9] Paul,R.P.: Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control- The Computer Control of Robot Manipulators. Cambridge, Massachusetts, London: The MIT Press, 1983



## **Sphärische Fasenaggregate serieller & paralleler Struktur**

### **C. Teichgräber**

Professur Montage- und Handhabungstechnik,  
Technische Universität Chemnitz,

### **Kurzfassung**

Der Artikel behandelt die Anwendung motorisierter Fasenaggregate für thermische Trennverfahren. Für den Fall einer automatischen Winkelein-  
stellung werden mechanische Grundprinzipien vorgestellt. Für das Plasmaschneiden mit veränderlichem Fasenwinkel erfolgt der Vergleich von Lösungen mit serieller und paralleler Struktur in Form einer Fallstudie. Nach einer knappen kinematischen Analyse werden Vor- und Nachteile des jeweiligen Prinzips genannt.

### **Abstract: (englisch / optional)**

This paper is about the application of motorized bevel units for thermal cutting. For an automated orientation change of the torch, two essential principles of the mechanical structure of guiding mechanisms are introduced. At last a comparison is made between two solutions with both serial and parallel structure. Benefits and disadvantages of both principles are discussed.

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die üblicherweise eingesetzten Winkeleinheiten an industriellen Brennschneidmaschinen oder Schweißautomaten sind von Hand starr einstellbar. Sie können während des Prozesses den Fasenwinkel nicht automatisiert nachstellen und sind damit nicht für alle Anwendungsfälle geeignet. Bei der Entwicklung von Gerätetechnik für das automatisierte Ändern der Brennerneigung im Prozess – sogenannter Fasenaggregate – sind einige Besonderheiten zu beachten.

In diesem Artikel soll auf die kinematischen, nicht die technologischen, Spezifika eingegangen werden. Insbesondere wird die erreichbare Genauigkeit der Brennerführung betrachtet, die im Zusammenspiel von mechanischem Führungsgetriebe und numerischer Steuerung theoretisch entsteht.

## 1.2 Kinematik von Strahltechnologien

Unter dem Begriff 'Strahltechnologie' werden – unter dem kinematischem Gesichtspunkt – jene Prozesse zusammengefasst, deren korrektes Funktionieren die definierte Bewegung eines Punktes im Raum erfordert, während gleichzeitig die räumliche Orientierung des Endeffektors vorgegeben wird. Da die technologische Wirkrichtung vom Werkzeug strahlenartig durch den TCP verläuft, sind zu deren eindeutiger Definition genau zwei Parameter nötig, i.d.R. sind dies zwei Winkel.

Der Vektor der Länge eins, der in Strahlrichtung zum TCP zeigt, wird im Folgenden als Werkzeugvektor oder Werkzeugachse bezeichnet. Für die Technologie ist es imperativ, eine reine Orientierungsänderung bezüglich des TCP auszuführen. Somit rotiert das Werkzeug bei einer Re-Orientierung stets um eine Gerade, die durch den TCP verläuft und nicht parallel zur Brennerachse ist.

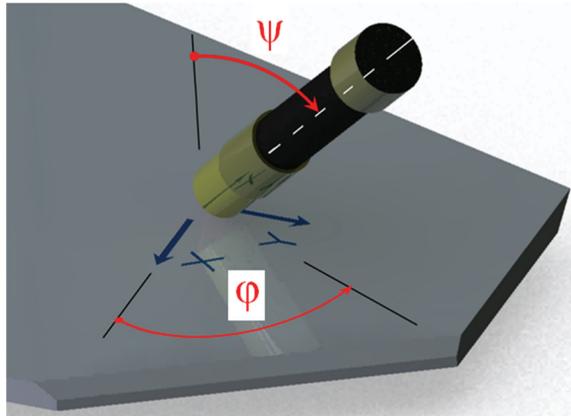


Bild 1: polare Parameter der Brennerorientierung

Bild zeigt eine übliche Parametrierung der Brennerneigung. Die sog. 'polare' Darstellung setzt sich aus einer ersten Drehung  $\psi$  um die x-Achse und einer zweiten Drehung  $\varphi$  um die z-Achse zusammen. Verwendet man die in der Robotik üblichen Rotationsmatrizen, lässt sich die dritte Spalte der positiv definiten  $3 \times 3$ -Matrix  $R_B$  als Vektor der Brennerlängsachse  $B$  interpretieren

$$R_B^{pol} = R_z(\varphi)R_x(\psi + \pi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \cos \psi \sin \varphi & -\sin \psi \sin \varphi \\ \sin \varphi & -\cos \psi \cos \varphi & \sin \psi \cos \varphi \\ 0 & -\sin \psi & -\cos \psi \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Demgegenüber erfolgt bei der sog. 'kardanischen' Parametrierung die Drehung um die beiden waagrecht liegenden Achsen

$$R_B^{kar} = R_y(\beta)R_x(\alpha + \pi) = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \alpha \sin \beta & -\cos \alpha \sin \beta \\ 0 & -\cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta & -\cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Wird ein Fasenaggregat von der polaren Darstellung ausgehend gestaltet, ergibt sich die serielle Anordnung einer vertikalen Drehachse und einer senkrechten Neigungsachse. Diese konventionelle Bauform besitzt jedoch einige Nachteile, die Müglitz in [1] darstellt. Bei einem vorwiegenden

Arbeitsbereich in Nähe der vertikalen Stellung sollten Handgelenke mit kardanischer Bewegungscharakteristik Verwendung finden, während bei überwiegend 'äquatornahen' Bewegungen ohne Durchgang der vertikalen Stellung das polare Prinzip zu bevorzugen ist.

### 1.3 TCP-feste Handgelenke

Günstig ist in jedem Fall eine TCP-feste Gestaltung von Fasenaggregaten, was anhand des Bildes II (a) erklärt wird. Wird der Schwenkwinkel des Brenners geändert, geschieht dies durch Änderung des Drehwinkels  $\theta$ . Soll bei der Re-Orientierung der TCP an seiner Position stehen bleiben, müssen die CNC-Achsen X und Z eine zirkuläre Ausgleichsbewegung um den TCP mit dem Radius L fahren, wobei mit L die 'kinematische Brennerlänge' bezeichnet wird.

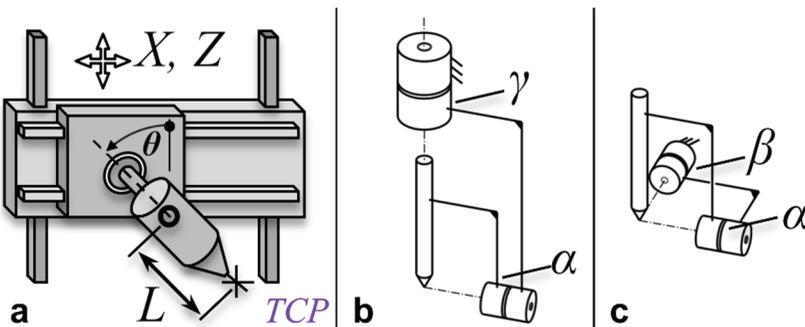


Bild II: a) Ausgleichsbewegung des XZ-Schlittens beim Schwenken  
b) polare und c) kardanische Anordnung der Schwenkachsen

Die Sensitivität, mit der die TCP-Position von der Schwenkachse abhängt, ist proportional zu L. Ein Lagefehler  $\Delta\theta$  der Schwenkachse bedingt also einen Positionsfehler am TCP von  $\Delta = |L \cdot \Delta\theta|$ . Dies trifft auf dynamische Fehler (Schleppfehler) ebenso zu wie auf statische (Getriebeispiel in Verbindung mit einem indirekten Messsystem).

Idealerweise wird die kinematische Brennerlänge zu  $L=0$ , was den Einfluss der Lageabweichungen der Schwenkachse auf die TCP-Position verschwinden lässt und beide Größen entkoppelt.

## 2 Gestaltung TCP-fester Handgelenke

Grundsätzlich ist die Drehung des Schneidbrenners um den Tool-Center-Point durch verschiedene Maßnahmen erreichbar. Wesentlich für die Synthese ist die Erkenntnis, dass serielle und parallele Führungsgetriebe verwendet werden können. Die triviale serielle Lösung besteht aus zwei nacheinander angeordneten Drehgelenken, deren Achsen einander unter dem Winkel von  $90^\circ$  direkt im TCP schneiden. Wie in den Bildern II (b) und (c) erkennbar, wird bei einer Drehung der motorisierten Achsen der TCP seine Lage nicht verändern. Bei einem Fasenaggregat für die Blechbearbeitung und den meisten anderen Anwendungen sind die in waagerechter Flucht zum TCP angeordneten Achsen ungeeignet. In den folgenden Abschnitten werden nun zwei Beispiele mit serieller und paralleler Struktur vorgestellt.

### 2.1 Serielle sphärische Handgelenke – ein Beispiel

Ausgehend von dem Führungsgetriebe in Bild II (b) werden die Gliedwinkel variiert unter der Nebenbedingung, dass die Drehachsen einander stets im TCP schneiden. Das (erste) zunächst senkrechte Drehgelenk zur Maschine wird um  $\lambda_1=30^\circ$  verkippt angeordnet, die Winkel der beiden nächsten Glieder werden auf  $\lambda_2=\lambda_3=30^\circ$  gesetzt. Vor dem Schneidbrenner ist noch ein Drehantrieb angeordnet, wiederum unter einem Winkel von  $\lambda_4=30^\circ$  trägt (siehe Bild III).

Wegen des gemeinsamen Schnittpunkts der Drehachsen wird dieser Typ in der Mechanismentechnik als sphärisches Getriebe bezeichnet. Seine Glieder führen ausschließlich Rotationen um denselben Punkt aus.

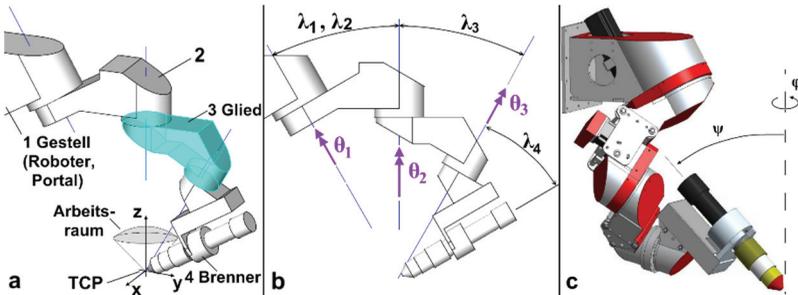


Bild III: sphärisches Roboterhandgelenk der Fa. KOIKE Europe  
 a) kinematisches Schema b) kinematische Abmessungen c) CAD-Modell

Es fällt außerdem auf, dass den drei Antriebswinkeln  $\theta_i$ , ( $i=1,2,3$ ) der Motoren nur zwei Winkelkoordinaten  $\psi$ ,  $\varphi$  des Brenners gegenüberstehen. Gegenüber einem Roboter, der ebenso viele Antriebswinkel wie Abtriebskoordinaten besitzt, ist dieses System kinematisch redundant.

Konkret gesprochen bewirkt die Redundanz, dass es  $\infty^1$  viele Möglichkeiten gibt, einen durch  $\psi$  und  $\varphi$  definierten Brennervektor – siehe 3. Spalte aus Gl. (1) – durch die Motorwinkel auszudrücken. Dieses sog. 'Inverse Kinematische Problem' wird gelöst, indem man die 3. Spalten der Rotationsmatrizen gleichsetzt, die geeignet sind, den Brenner darzustellen.

Die Variante mit den CNC-Achsen A und C entspricht Gl. (1). Werden nun ausgehend von der raumfesten z-Achse (siehe Bild III) die Motordrehungen  $\theta_i$  zur Darstellung des Brennervektors verwendet, ergibt sich folgendes Gleichungssystem

$$R_B^{pol} \cdot z = R_x(\lambda_1)R_z(\theta_1)R_x(-\lambda_2)R_z(\theta_2)R_x(-\lambda_3)R_z(\theta_3)R_x(\pi - \lambda_4) \cdot z$$

mit  $z = [0 \ 0 \ 1]^T$ . (3)

Das System besteht aus drei Gleichungen, jeweils eine für die x-, y- und z-Komponente des Brennervektors. Die Gleichung enthält die Unbekannten Motorwinkel  $\theta_i$  ( $i=1,2,3$ ), die konstanten Gliedwinkel  $\lambda_k$  ( $k=1, \dots, 4$ ) und die vorgegebenen Lagekoordinaten des Brenners  $\psi$  und  $\varphi$ . Da eine direkte

Auflösung mittels Umstellen durch die hohe Anzahl der Terme erschwert wird, empfehlen sich numerische Verfahren. Von den acht möglichen Lösungen finden diese aber i.d.R. nur die dem Startwert am nächsten liegende. Ist dies unzureichend, hilft ein geometrischer Ansatz. So lässt sich mit dem Seitenkosinussatz oder den Halbwinkelformeln der sphärischen Trigonometrie (vgl. z.B. [2] S. 45) der komplette Lösungssatz in geschlossener Form berechnen, ohne dass Gl. (3) bemüht werden muss. Die Gliedwinkel  $\lambda_k$  bilden dabei die Seiten verschiedener sphärischer Figuren, die Teile von Großkreisen sind.

Das Gleichungssystem an sich ist aus oben genannten Gründen 1-fach unterbestimmt, was bei der Bewegungssteuerung vorteilhaft ausgenutzt wird. So kann man z.B. verhindern, dass sich bei einem 360°-Umlauf das Schlauchpaket der Medien- und Energiezuführung verdrillt (zur Auflösung der Redundanz siehe [1] oder [3]) und das Aggregat endlos um die C-Achse rotieren lassen.

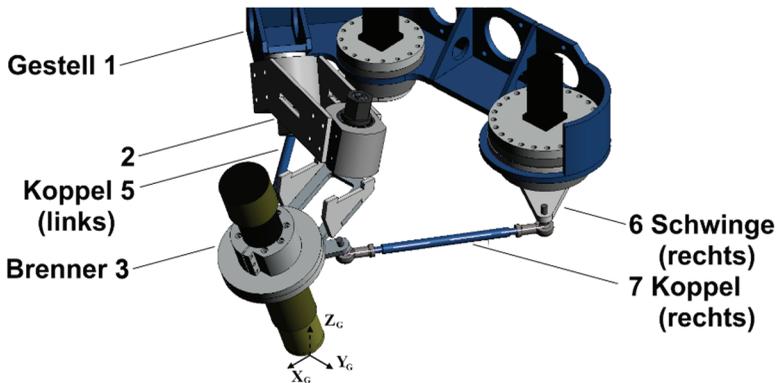
Die dynamischen Anforderungen überschreiten mitunter das, was eine serielle Kinematik leisten kann. Will man bspw. die Dynamik des Plasmaschneidens beim Laserschneiden erreichen, werden auf Grund der bis zu 4-fachen Trägheit des Schneidwerkzeugs sehr hohe Antriebsmomente benötigt. Die größeren Motoren bedingen ihrerseits höhere Trägheitswerte der sie tragenden, bewegten Glieder. Daraus resultieren größere Lagerkräfte, ein ungleich höherer Energieverbrauch und das Absenken der mechanischen Eigenfrequenzen, was Schwingungen begünstigt.

## 2.2 Ein parallelkinematisches Handgelenk

Als beispielhafte Alternative zur seriellen Bauweise wird nachfolgend ein parallelkinematisches Faseraggregat vorgestellt, das für schnelle Bewegungen mit eingeschränktem Schwenkwinkel konzipiert wurde.

Das Handgelenk besteht aus einem sphärischen, passiven Teilgetriebe (Glieder 2 und 3 in Bild IV), das dem Brenner noch zwei rotatorische Freiheiten (um den TCP) lässt. Zwei Schwingen, die im Gestell gelagert sind und servomotorisch angetrieben werden, bewegen die Brennerklemme über Koppelstangen in die gewünschte Orientierung. Es ist erkennbar, dass

die bewegten Massen gegenüber der vergleichbaren seriellen Lösung deutlich geringer sind. Hinzu kommt, dass beide Motoren gleich dimensioniert werden können – bei der seriellen Variante in Bild III (c) treibt der gestellnahe Motor das gesamte folgende Getriebe (inklusive der beiden anderen Motoren), weshalb er für eine auf die Abtriebsrichtungen gleich verteilte Dynamik am Brenner ein höheres Nennmoment besitzen muss.



*Bild IV: parallelkinematisches Handgelenk mit gestellfesten Antrieben*

### 2.3 Vergleich

In Tabelle 1 wurde basierend auf den konkreten Eigenschaften der beiden Fasenaggregate ein qualitativer Vergleich angestellt. Zudem wurden in die erste Spalte der Tabelle die Eigenschaften eines 2-achsigen, sphärischen Aggregats mit aufgenommen, der „3D-LT Bevel Unit“ von KOIKE in Bild V. Die Kenngrößen werden nachfolgend detailliert.



*Bild V: serielles, 2-achsiges Faseraggregat der Fa. KOIKE [7]*

Das **Verhältnis zwischen Arbeitsraum und Bauraum** bzw. Kollisionsraum wird ihrer paralleler Bauart schlechter bewertet, da die Schwingen und Koppeln bei der Bewegung zusätzlichen Raum überstreichen, der bei einer seriellen Bauart frei bleibt. Für die vorliegende Konfiguration ist dieser Kennwert indes nicht entscheidend, da es zwei maßgebliche Nebenbedingungen gibt, bei denen alle drei Handgelenke in etwa gleich gut abschneiden: die Entfernung des Aggregats vom Werkstück und das Freibleiben der Brenner-Oberseite, wo das Schlauchpaket angeschlossen wird. Während die seriellen Einheiten  $\psi_{\max}=50^\circ$  Neigungswinkel schaffen, wurde das parallele Handgelenk für  $\psi_{\max}=25^\circ$  optimiert.

Die zweite Zeile der Tabelle stellt die **Zusammenfassung von maximaler Winkelgeschwindigkeit und maximal möglicher Winkelbeschleunigung** des Brenners dar. Während die 2-achsige, serielle Lösung sehr schnell ist, besitzt die redundante, 3-achsige Einheit nur etwa die Hälfte der Dynamik. Das parallele Aggregat ist zu den höchsten Beschleunigungen fähig.

Die Führungsgenauigkeit des TCP hängt direkt von der **Steifigkeit des Faseraggregats** ab. Da durch die sphärische Bauform die Einflüsse von Positions- und Schleppfehlern der Schwenkachsen eliminiert wurden (siehe Abschnitt 1.3), sind nur die folgenden beiden Fehlerquellen zu erwarten:

(1) die TCP-Abweichung durch statische Deformationen (Elastizität der Glieder, Gelenknachgiebigkeit) und (2) die dynamischen Schleppfehler der Achsantriebe für x-, y- und z-Richtung des Portals sowie (3) die dynamischen elastischen Abweichungen der mechanischen Struktur (Schwingungen).

Hier schneidet das parallele Handgelenk am besten ab, weil (zu 1) durch den 'tragwerkartige' Aufbau eine gute Lastverteilung auf die drei Teilgetriebe erfolgt. Zudem sind (zu 3) die bewegten Massen geringer, die mechanischen Eigenfrequenzen liegen höher. Die seriellen Handgelenke besitzen demgegenüber größere auskragende Massen und jedes Gelenk muss alle vorgeschalteten Reaktionskräfte aufnehmen.

*Tabelle 1: qualitativer Vergleich der beiden Fasenaggregate*

	seriell 2-achsig konv.	seriell 3-achsig Kap. 2.1	parallel 2-achsig Kap. 2.2
Arbeitsraum/Bauraum	++	++	-
Dynamik	+	-	++
Steifigkeit	+	-	++
Schlauchverdrillung	--	+	++
Entwicklungsaufwand	++	+	--
Fertigungs-, Montageaufwand	+	-	+
Programmieraufwand für nichtlineare Transformation	+	-	-
Leistungsbedarf	+	-	++
Bedienung, Nutzerakzeptanz	++	+	-

Das **Verdrillen des Schlauchpakets** zur Energie- und Medienzuführung ist dann ein Problem, wenn Fasenbauteile, gefaste Innenschnitte oder auch nur Bohrungen mit Fase nacheinander geschnitten werden. Dann muss nach dem 360°-Umlauf der Brenner um diesen Betrag zurückgedreht werden, um die Schlauchverdrillung aufzuheben. Beim Laserschneiden heißt das z.B. erschwerend, dass die Faser eine maximale Verdrillung von 23°/m zulässt. Es ist also eine erhebliche zusätzliche Schlauchlänge erforderlich, die ausschließlich zur Verdrillungskompensation vorgehalten wird. Das konventionelle Aggregat schneidet mit dem 'polaren' Wirkprinzip dementsprechend schlecht ab. Die in den Kapiteln 2.1 und 2.2 vorgestellten Lösungen besitzen mit dem 'kardanischen' Wirkprinzip nur die geringen Verdrillungen von 90° bzw. 60° während eines kompletten Umlaufs des Brenners.

Der **Entwicklungsaufwand** bei den seriellen Aggregaten beschränkt sich auf Komponentendimensionierung, Lager- und Motorauswahl sowie ggfs. den Einbezug eines Justageelements, um die Drehachsen im TCP zum Schnitt zu bringen. Bei der parallelen Struktur muss nicht nur das Erreichen des geforderten Arbeitsraums geprüft werden, sondern auch das Funktionieren des Mechanismus selbst – in allen möglichen Lagen des Arbeitsbereichs. Wichtig ist, ein Klemmen oder Durchschlagen des Führungsgetriebes zu verhindern. Methoden hierzu werden bspw. im umfassenden Buch von Merlet [4], in dem sich auch zahlreiche weitere Verweise finden, oder z.B. in eigenen Arbeiten [5] und [6] vorgeschlagen.

Der **Fertigungsaufwand** für die seriellen Getriebe ist im Allgemeinen höher als für parallele, weil hier Spezialteile zur Anwendung kommen. Da das parallele Aggregat hier aber einen ebensolchen sphärischen Zweischlag besitzt, der aufwändig gefertigt oder im Nachgang justiert werden muss, wurde es gleich bewertet wie das 2-achsige serielle Aggregat.

Für das konventionelle Handgelenk stehen in den meisten modernen CNC-Kernen fertige 5-Achs-Funktionen zur Verfügung. Für die Ansteuerung der beiden anderen Lösungen mussten die **Transformationsroutinen** [3] erst selbst entwickelt und implementiert werden.

Während bei seriellen Strukturen die **Motorleistungen** mit den geforderten Beschleunigungen stark progressiv wachsen, ist dieser Zusammenhang bei parallelen Strukturen als annähernd linear einzuschätzen.

Zuletzt stellt sich, insbesondere in der konservativen und robusten Stahlbaubranche, die Frage nach der Komplexität der Maschine vor dem Hintergrund der **Nutzerakzeptanz**. Dieser Aspekt kann bei parallelkinematischen Führungsgetrieben ein Problem darstellen, da die Bewegungsweise dieser mehrschleifigen Raumgetriebe nicht intuitiv vorhersehbar ist. Auch kann man die Endlagenbegrenzung nicht mehr nur durch rein mechanische Schalter realisieren, da die Antriebe je nach Arbeitsraumposition einen anderen zulässigen Bewegungsbereich besitzen. Eine Fehleranalyse wird dadurch ebenso erschwert.

### 3 Fazit

Bei der Gestaltung von Fasenaggregaten sollte die kinematische Brennerlänge (vgl. Abschn. 1.3) nach geforderter Genauigkeit ausgewählt werden – der zu erwartende Schleppfehler der Orientierungsachsen dient dabei als Richtwert. Bei TCP-festen Handgelenken mit der kinematischen Brennerlänge von Null sind Orientierung und Positionierung voneinander entkoppelt. Die Entscheidung für eine serielle oder parallele Struktur sollte getroffen werden mit Rücksicht auf die geforderte Dynamik, die Trägheitsdaten des Schneidwerkzeugs, die vorhandenen Entwicklungskapazitäten und – sofern vorhanden – die Charakteristik des Leitungspakets. Ein exemplarischer Vergleich wurde ohne Anspruch auf Vollständigkeit in diesem Beitrag ausgeführt.

Festzuhalten bleibt, dass parallelkinematische Fasenaggregate bei geeigneter Dimensionierung das Potential besitzen, konventionelle Technik in ausgewählten Eigenschaften – zumeist für Nischen- und Spezialanwendungen – zu übertreffen. Der Vergleich am Ende des Artikels zeigt aber auch, dass die Entscheidung zu Gunsten einer solchen Struktur wohlüberlegt getroffen sein will. Ansonsten besteht die Gefahr, den tatsächlichen Entwicklungsaufwand zu unterschätzen.

## Literatur

- [1] Müglitz, J.; Berger, M.; Wegert, E.: Roboterhandgelenke zum thermischen Schneiden. 9. Kolloquium Getriebetechnik, Chemnitz 2011 ISBN 978-3-941003-40-8
- [2] Göhler, W.: Formelsammlung – Höhere Mathematik, 15. Auflage. Frankfurt a.M.: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch, 2004
- [3] Chen, L.; Teichgräber, C.; Berger, M.: A case study about spherical robot wrists with serial and parallel structure. Trc-IFTToMM Symposium on Theory of Machines and Mechanisms 2015 p. 581-589), Izmir (Turkey), 14.-17.06.2015 ISBN 978-605-84220-0-1
- [4] Merlet, J. P.: Parallel robots, 2. Auflage. Springer, 2006 ISBN 978-1-4020-4132-7
- [5] Teichgräber, C.; Berger, M.; Müglitz, J.: Antriebsauslegung parallelkinematischer Maschinen durch Nutzung praxisrelevanter Konstruktions- und Berechnungswerkzeuge. 16. VDI Getriebetagung Bewegungstechnik 2012, VDI Berichte 2175 ISBN 978-3-18-092175-4
- [6] Teichgräber, C.; Berger, M.: Grafische Verfahren zur Maßsynthese parallelkinematischer Führungsgetriebe ebener Struktur. 17. VDI Getriebetagung Bewegungstechnik 2014, VDI Berichte 2237 ISBN 978-3-18-092237-9
- [7] [www.koike.com/bevel-heads-cutting-machine](http://www.koike.com/bevel-heads-cutting-machine)  
KOIKE Aronson, Inc. Ransom. abgerufen am 30.09.2015
- [8] Wolski, U.; Pinkernelle, A.; Krink, V.; Müglitz, J.: Plasmaschneiden nichtrostender Stähle – Möglichkeiten und Grenzen zur Optimierung der Schnittqualität. Vortragsmanuskript: Große Schweißtechnische Tagung 2015, Nürnberg (in Druck)



## **Ein modulares falt- und spannsystem zum fügen metallischer halbschalen in der automobilproduktion**

**Mathias Gabler\*, Maik Berger\*, Felix Zuber\*\***

\* TU Chemnitz, Professur Montage- und Handhabungstechnik

\*\* Heggemann AG

### **Kurzfassung**

Der Beitrag ist durch Arbeiten im Umfeld der Produktion von KFZ-Tanks aus metallischen Halbschalen motiviert. Neben einem Überblick über die vielfältigen Bauformen und Einbauten in einem Tank werden die Vorteile hinsichtlich maximaler Raumausnutzung und Leichtbau benannt, sowie die technische Relevanz bei Hybridfahrzeugen aufgezeigt. Hierbei wird ebenfalls auf die Probleme beim Schweißen mit I-Stoß derart großer Halbschalen eingegangen. Aus den Nachteilen dieser Bauart wird die gegebene Problemstellung abgeleitet und nach nutzbaren Lösungen gesucht.

Im weiteren Verlauf des Beitrags wird auf die Lösungsfindung für das falt- und spannsystem eingegangen. Es wird gezeigt aus welchen Teilsystemen das Gesamtsystem besteht und welche technisch realisierbaren Varianten die hohen Anforderungen gewährleisten. Die aktuellen Entwürfe für die einzelnen Teilsysteme werden dargestellt.

Abschließend wird auf die Entwicklung eines Baukastens eingegangen. Der Artikel möchte vermitteln, welche Vor- und Nachteile ein modulares System in der Betriebsmittelkonstruktion birgt und an welchen Stellen Wunsch und technische Möglichkeit miteinander kollidieren. Der Beitrag endet mit einem Ausblick auf das weitere Vorgehen im Projekt.

## 1 Motivation für ein modulares falt- und spannsystem

In der modernen Automobilindustrie wird mittlerweile ein Entwicklungsfokus auf eine energie- und ressourcensparende Antriebstechnik gelegt. Hierbei haben sich Hybridfahrzeuge ein bisher kleines, aber stetig wachsendes Marktsegment, geschaffen. Bei den neu zugelassenen Fahrzeugen im Jahr 2014 in Deutschland haben Hybridfahrzeuge mit 25,9% die zweitgrößte Steigerungsrate [01]. Die Verwendung von Elektromotoren und Verbrennungsmotoren in einem Fahrzeug stellt die Automobilproduzenten vor neue technische Herausforderungen. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit fertigungstechnischen Aspekten beim Bau von metallischen Drucktanks in Hybridfahrzeugen.

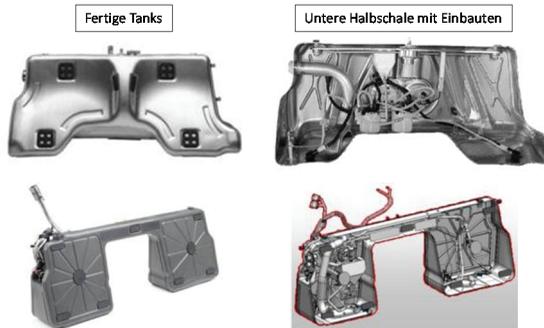
Durch den weiterhin verbauten Verbrennungsmotor findet auch ein Kraftstofftank seinen Platz im Fahrzeug. Bei Hybriden liegt allerdings eine erhöhte Druckwechselbeanspruchung im Tank vor [02]. Da der Verbrennungsmotor nicht stetig im Betrieb ist, wird der dazugehörige Tank während dieser Phasen nicht be- bzw. entlüftet. Durch die Verbindung von Tank und Verbrennungsmotor ist das Tanklüftungssystem, welches die Reinigung des Aktivkohlefilters verantwortet, deaktiviert. Der Aktivkohlefilter säubert die mit Kraftstoff verunreinigte Luft vor deren Austritt in die Atmosphäre [03]. Dadurch entsteht ein erhöhter Druck im Tankinneren. Gleichzeitig kann durch äußere Einflüsse wie erhöhte Umgebungstemperatur, Sonneneinstrahlung oder schlechte Entlüftung ein Unterdruck entstehen. Diese Druckwechsel müssen von einem Hybridfahrzeugtank ausgehalten werden.

Eine externe Luftversorgung lässt sich aufgrund der hohen gesetzlichen Anforderungen an Kraftstofftanks technisch derzeit nicht umsetzen. Daher wird auf die vollständige Sperrung der Entlüftung beim Elektromotorbetrieb zurückgegriffen.

Die Festigkeitsanforderungen lassen sich mit Blasformtanks aus Kunststoff nur mit stark erhöhten Wanddicken realisieren. Dies führt zu erhöhtem Gewicht und verringertem Fassungsvermögen. Aus technischer Sicht bieten

Tanks aus Aluminium oder Edelstahl das weitaus größere Leichtbaupotential bei gleichzeitig maximaler Raumausnutzung.

Tanks aus metallischen Schalen besitzen eine sehr komplexe Geometrie (vgl. Bild 1), da sie das in dem gegebenen Bauraum maximal mögliche Volumen fassen sollen. Außerdem finden sich in allen Tank vielfältige Einbauten, wie Pumpen, Sensoren oder Schwallbleche.



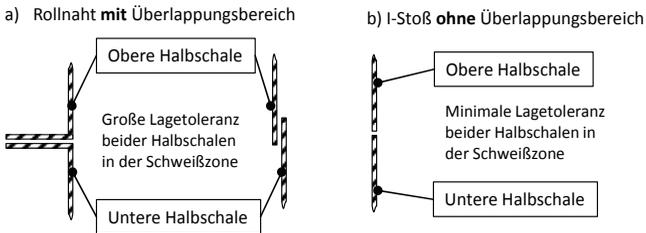
*Bild 1: Beispiele für Kraftstofftanks aus metallischen Halbschalen [04]*

## **2 Probleme beim Schweißen von metallischen Halbschalen**

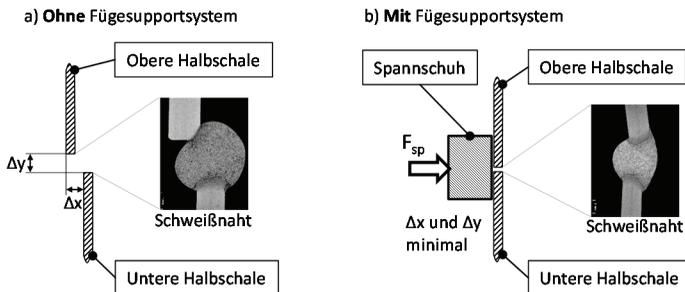
Kraftstofftanks aus Aluminium oder Edelstahl bestehen idealerweise aus zwei Schalensegmenten, welche zu einem gas- und flüssigkeitsdichten Behälter gefügt werden. Die erhöhte Druckwechselbeständigkeit lässt sich am besten durch einen sauber geschweißten I-Stoß beider Segmente gewährleisten.

Das meistverbreitete Rollnahtschweißverfahren [03] ist durch den vorhandenen Überlappungsbereich zwar fertigungstechnisch einfacher, bringt aber zwei entscheidende Nachteile mit sich. Zum einen sind mit diesem Verfahren geschweißte Behälter weniger beständig gegen Druckwechselbeanspruchungen. Zum anderen verfügen sie durch den überstehenden Falz über ein geringeres Fassungsvermögen bei gleichzeitig höherer Masse. Der Überlappungsbereich hat allerdings den Vorteil, dass

größere Lagetoleranzen beider Halbschalen zueinander vertretbar sind, als es beim I-Stoß der Fall ist. Ein Vergleich der beiden Schalenanordnungen ist im nachfolgenden Bild 2 zu sehen.



*Bild 2: Vergleich der Schalenanordnung zweier Schweißverfahren*



*Bild 3: Auswirkung eines Fügesupportsystems*

Die großen, umformend hergestellten, Halbschalen passen an annähernd keiner Stelle so übereinander, wie es das Schweißverfahren fordert. Würde man die Halbschalen so miteinander verschweißen, wäre die Gas- und Flüssigkeitsdichtigkeit nicht zu gewährleisten.

Um die beiden Schalensegmente beim Schweißen mit I-Stoß korrekt zueinander auszurichten, ist eine Abstützungsvorrichtung mit integrierter Schweißbadsicherung im Inneren des Tanks notwendig. Diese Vorrichtung, als Fügesupportsystem oder FSS betitelt, spannt die Tankinnenseiten zu einander, sodass die beiden Schalenkanten nur noch einen minimalen und

im Toleranzbereich liegenden Versatz aufweisen. Dieser Grundgedanke des FSS ist in Bild 3 anschaulich erklärt.

Durch einen Spannschuh (vgl. Bild 3) werden die Halbschalen im Inneren verformt. Die benötigte Kraft  $F_{sp}$  hängt von Einflussgrößen wie dem Material, der Wandstärke und vor allem von der örtlichen Geometrie und Steifigkeit des Behälters ab. Durch die komplexe Bauform können die Spannkraften sehr unterschiedlich sein. Erzeugt werden die Kräfte durch den Spannschuh selbst und durch eine Mechanik im Inneren. Diese hat gleichzeitig die Funktion die auftretenden Kräfte abzustützen.

Da das Spannen an der Tankinnenseite stattfindet, muss das Fügesupportsystem nach Verschließen des Tanks entnommen werden. Hierfür ist eine Montageöffnung, durch die später die Einbauten im Tank montiert werden, vorgesehen. Im Verhältnis zu den möglichen Dimensionen des Tanks ist die Öffnung sehr klein. Dargestellt wird dieser Sachverhalt in Bild 4.

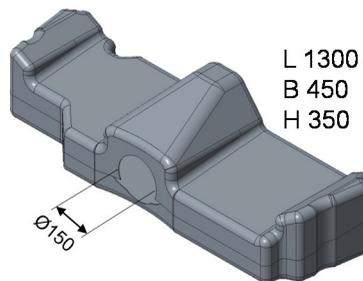


Bild 4: CAD-Modell eines Tanks

Um eine wirtschaftliche Fertigung zu ermöglichen, müssen die über die Nahtlänge verteilten Spannschuhe und die Mechanik möglichst schnell aus dem Tank geholt werden. Gleichzeitig sollte die manuelle Entnahme auf ein Minimum reduziert werden, da jeder händische Eingriff ein Verletzungsrisiko für die handelnde Person birgt. Um die erheblichen Größenunterschiede zu überbrücken, muss das FSS als Faltsystem ausgeprägt sein.

Man kann nun die eigentliche Aufgabenstellung ableiten. Das Entwicklungsziel ist ein Innenspannvorrichtungskonzept mit folgenden Eigenschaften.

- Spannen der Naht zur Ausrichtung der Fügepartner
- maximale Nahtabdeckung
- Verkleinerung des Systems zur Entnahme aus dem Kraftstoffbehälter
- möglichst schnelle Entnahme aus einer Öffnung mit mindestens  $\varnothing$  150 mm
- modularer Aufbau
- Spannkraft bis max. 1000 N

In der Modularität und dem Faltsystem liegt die eigentliche Herausforderung der Entwicklung. Durch die komplexe Tankgeometrie sind Abstände und Längen stets unterschiedlich. Dadurch wird die faltbare Mechanik wahrscheinlich immer eine abweichende Gestalt annehmen. Dies widerspricht sich allerdings mit der Forderung nach einem modularen System. Außerdem sollte das System nicht nur für einen Modelltank funktionieren, sondern ebenfalls in zukünftigen Druckbehältern seinen Einsatz finden und die aktuell lange Betriebsmittelkonstruktion verkürzen.

### **3 Entwicklung eines kinematischen Baukastens**

Die Größe der Halbschalen, deren Steifigkeit und geometrische Komplexität, machten eine Modularisierung der Produktionsmittel bisher nicht möglich. Durch die zu erwartenden steigenden Produktionszahlen kann allerdings die individuelle Betriebsmittelkonstruktion für jeden Tank nicht mehr statthaft sein. Die Wiederverwendbarkeit der Module und die damit einhergehende Zeit- und Kostenersparnis machen eine Baukastenentwicklung interessant.

### 3.1 Definition der Module/ Bausteine

Um ein hochgradig individualisiertes Fertigungssystem zu modularisieren bedarf es zunächst einer Begutachtung des Fertigungsablaufes. Dabei steht die Suche nach ähnlichen oder gegengleichen Arbeitsschritten im Vordergrund. Diese lassen sich gut in Modulen zusammenfassen. Am eigentlichen Arbeitsablauf ändert eine Modularisierung nichts. Außerdem sind nicht alle Arbeitsschritte relevant. Der eigentliche Schweißprozess bleibt unverändert bestehen und die Entnahme wird weiterhin größtenteils händisch geschehen. Auf Bild 5 ist der zu modularisierende Arbeitsablauf zu sehen. Dort sind besonders die Schritte *Entspannen und Spannen*, sowie *Ausbreiten und Zusammenfahren* in ihrer Charakteristik jeweils gegengleich und eignen sich deshalb besonders gut für spätere Module.

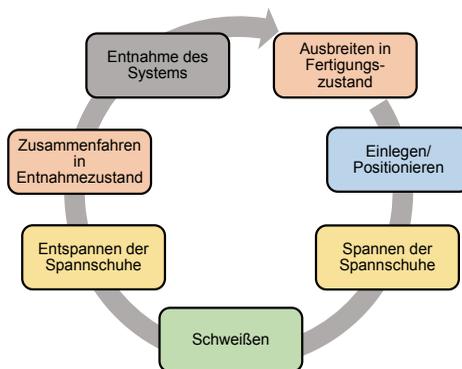


Bild 5: Arbeitsablauf

Bei der Entwicklung eines Baukastens muss eine Definition der Funktionsbausteine erfolgen. Dabei wird in der Literatur von Grundbausteinen, Hilfsbausteinen und, in diesem Fall besonders relevant, Anpassbausteinen gesprochen [05]. Die nachstehende Tabelle zeigt die Einteilung der drei Module und gibt eine kurze Beschreibung ihrer Funktion wieder.

*Tabelle 1: Funktionsbausteine des Baukastens*

	Funktion	Name
Grundbaustein	Spannen der Naht	Spannschuh
Hilfsbaustein	Verbinden und Trennen der Module	Schnittstelle
Anpassbaustein	Gewährleistung der Stützwirkung und der Entnahmemäße	Mechanik

### 3.2 Die Mechanik als Anpassbaustein

Die bereits erwähnte Wiederverwendbarkeit dient zum einen der Produktion des gegenwärtigen Tanks und zum anderen dem Einsatz der gleichen Module für die Fertigung neuer Kraftstoffbehälter mit gänzlich anderer Geometrie. Beim Spannschuh und der Schnittstelle ist der Einsatz unproblematisch. Anders verhält es sich bei der Mechanik. Hier muss bei der Baukastenentwicklung die nur teilweise vorhersehbare Geometrie zukünftiger Behälter beachtet werden und der Anpassbaustein so gestaltet werden, dass eine schnelle Betriebsmittelkonstruktion weiterhin gewährleistet ist.

Das Problem ist also, dass mit einer kinematischen Struktur eine große Bandbreite von unterschiedlichen Abständen zwischen ausgebreitetem und zusammengefaltetem Zustand abgedeckt werden muss. Dafür gibt es zwei mögliche Lösungsansätze, die Verwendung einer seriellen kinematischen Struktur oder die spezifische Anpassung einer bestimmten Struktur an die neuen Gegebenheiten.

Ein Beispiel für eine serielle Struktur ist die Scherenkinematik, welche in vielen bekannten Faltstrukturen ihren Einsatz findet. Dabei kann ausgehend von einer Grundstruktur durch Erweiterung mit zusätzlichen Scherenkreuzen der maximal überbrückbare Abstand einfach vergrößert werden. Auf Bild 6 ist diese Struktur abgebildet. Die linke Seite zeigt den Grundaufbau und die rechte Seite die Erweiterung durch ein weiteres Scherenkreuz.

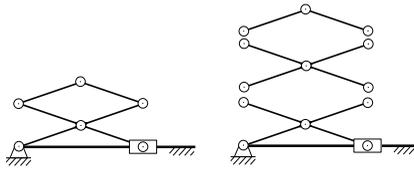


Bild 6: serieller Aufbau eines kinematischen Baukastens

Als Vorteil kann der einfache Aufbau und die stets schnelle Neukonstruktion angesehen werden. Überdies können mit der gleichen Antriebsbewegung unterschiedliche Abstände zur Naht kompensiert werden. Nachteilig ist allerdings die geringere Steifigkeit des Gesamtsystems. Außerdem kann eine Scherenkinematik schlechter Spannkraften erzeugen als andere Mechanismen.

Bei der spezifischen Anpassung muss zunächst eine passende kinematische Struktur gefunden werden. Für die gegebene Problematik wurde auf das Prinzip des Kniehebels zurückgegriffen. Es beruht darauf, aus einer kleinen Kraft am Antrieb eine große Kraft am Abtrieb zu generieren. Diese Wirkung wird meist in der Strecklage eines Koppelgetriebes erzielt [06]. Der Vorteil liegt darin, dass die Grundspannkraft aus der Mechanik kommt und der Spannschuh lediglich an bestimmten Stellen eine zusätzlich benötigte Kraft erzeugen muss. Auf Bild 7 ist die entwickelte kinematische Struktur zu sehen.

Um den Mechanismus an eine neue Tankgeometrie anzupassen muss dieser immer neu synthetisiert werden. Das Bild 7 zeigt neben der Kinematik einen Ausschnitt aus einem entwickelten Synthesewerkzeug. Der Mechanismus wird ausgehend vom Spannzustand berechnet. Das rechte Getriebe zeigt den zusammengefalteten Entnahmestand. Daran lässt sich schnell eine mögliche Verwendung in einem FSS erkennen.

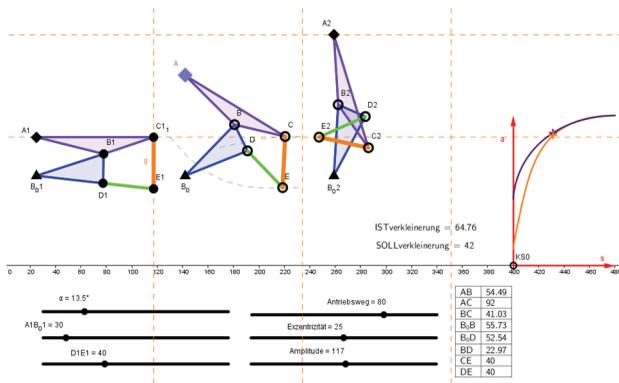


Bild 7: GeoGebra-Screenshot eines Synthesewerkzeugs

Im Werkzeug ist es möglich mit Schieberegler das Getriebe zu ändern und z.B. an eine kleinere oder größere Amplitude anzupassen. Gleichzeitig werden die neuen kinematischen Abmessungen tabellarisch ausgegeben. Das Werkzeug basiert auf der Software GeoGebra und arbeitet lediglich mit stilisierten Strichzeichnung als Ersatz für komplexe CAD-Modelle. Diese einfache Arbeitsweise ermöglicht eine schnelle Synthese. Mit einer ebenfalls vorbereiteten Mehrkörpersimulation kann mit den neu errechneten Abmessungen eine Analyse hinsichtlich der Steifigkeit und dem Entnahmepotential gemacht werden. Eine Erweiterung um die Berechnung der Gelenkkräfte ist ebenfalls möglich. Eine tiefere Erläuterung der Möglichkeiten dieses Synthesewerkzeugs wird im Vortrag aufgezeigt.

Beide Lösungswege können allerdings nicht alle geometrischen Probleme abdecken. Bei der Konstruktion neuer Behälter muss für die Verwendung des Baukastens Mindest- und Maximalabstände der Nahtgeometrien eingehalten werden. Ansonsten ist die Verwendung des Systems nicht immer möglich.

### 3.3 Grund- und Hilfsbausteine

#### Grundbaustein Spannschuh

Der Grundbaustein ist der Spannschuh. Mit diesem wird die Nahtgeometrie von innen gespannt und die Halbschalen lokal zueinander ausgerichtet. Dabei kann die Oberschale und Unterschale separat voneinander belastet werden. Beide Spannreihen beruhen auf einem unterschiedlichen Konstruktionsprinzip. Die Oberschale wird mit pneumatisch angetriebenen Stößeln gespannt. Bei der Unterschale kommt eine Seilzugkonstruktion zum Einsatz. Die Diversifizierung des Spannprinzips hat den entscheidenden Vorteil, dass auf die lokalen Unterschiede beider Nahtpartner gezielt eingegangen werden kann. Die Ober- bzw. Unterschale wird je nach Situation unterschiedlich belastet. Auf Bild 8 ist der Spannschuh dargestellt. In der gleichen Abbildung sind außerdem die minimal abbildbaren Innen- und Außenrundungen illustriert. Diese Grenzen dürfen bei der Tankkonstruktion nicht unterschritten werden, da sonst der Spannschuh an diesen Stellen keine Wirkung zeigen kann.

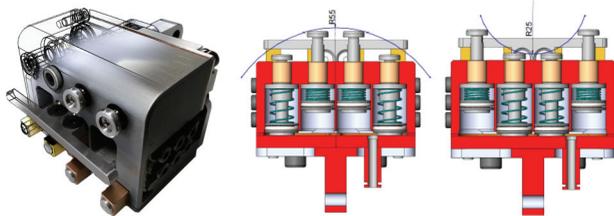


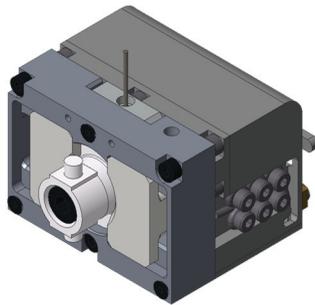
Bild 8: Der Spannschuh

#### Hilfsbaustein Schnittstelle

Als Hilfsbaustein ist die Schnittstelle definiert. Diese ist an den Spannschuh montiert und dient als mechanische Verbindung zur Mechanik. Durch die Vorgabe, dass die Spannschuhe getrennt vom weiteren System aus dem Behälter entnommen werden sollen und die Entnahme weiterhin zeitlich schnell ablaufen muss, war ein Hauptaspekt bei der Entwicklung die Möglichkeit einer fernbetätigten, einfachen, mechanischen Trennung von

Spannschuh und Mechanik. Gleichzeitig schränken die geometrischen Anforderungen die gestalterische und funktionale Freiheit ein. Die Schnittstelle soll als Rücken des Spannschuhs nicht dessen Außenmaße überschreiten und möglichst minimal in die Tiefe ragen. Weiterhin sollen Spannschuh und Mechanik möglichst schnell wieder miteinander verbunden werden.

Um all diese Anforderungen zu verwirklichen wurde ein System entwickelt, welches die Trennung über einen Bowdenzug initiiert. Dieser betätigt einen einfachen Mechanismus, welcher die beiden Sperrelemente nach außen führt und die Mechanik freigibt. Eine Darstellung dieser Baugruppe ist in Bild 9 zu sehen.



*Bild 9: Die Schnittstelle am Spannschuh*

Die Mechanik wird über eine Kupplung, welche gleichzeitig ein Getriebeglied ist, in die Schnittstelle eingeführt. Diese ist so konzipiert, dass spätere Änderungen an der Mechanik keine Umgestaltungen der Schnittstelle oder des Spannschuhs hervorrufen.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag hat gezeigt, welche ungeahnten Problemstellungen die Entwicklung moderner Automobilkonzepte in sich bergen kann. Der eigentlich beherrschbare Druckbehälterbau sieht sich beim Fügen mit I-Stoß neuen Herausforderungen gegenüber – hauptsächlich hervorgerufen durch die erhöhte Druckwechselbeanspruchung bei Abschaltung des Verbrennungsmotors in Hybridfahrzeugen mit Elektromotor. Diese zu meistern, bedarf viel ingenieurtechnischen Wissens.

Der Beitrag zeigt außerdem Möglichkeiten zur Entwicklung eines kinematischen Baukastens und die damit verbundenen Probleme. Die einfache Synthese einer mechanischen Grundstruktur zeigt weiterhin, wie mit geometrischen und softwaretechnischen Hilfsmitteln die Betriebsmittelkonstruktion drastisch verkürzt werden kann. Hierbei muss lediglich eine Anzahl von Regeln für die Grundstruktur der Mechanik eingehalten werden. Weiterhin zeigt sich anhand der dargestellten Module – wie dem Spannschuh und der mechanischen Schnittstelle – die technische Komplexität einer solchen Modularisierung vor dem Hintergrund eines Baukastens. Eine Analyse des Produktionsablaufes und der verschiedenen unabhängigen Funktionen ist für die Modularisierung eines Fertigungssystems unerlässlich.

Gleichzeitig geht aus dem Beitrag hervor, dass eine vollständige Modularisierung der Fertigungsmittel für ein solch komplexes und nur schwer vorhersehbares Industriegut an Grenzen stößt. An bestimmten Stellen müssen Kompromisse für einen funktionsfähigen Baukasten eingegangen werden, sei es eine Begrenzung des maximal überbrückbaren Abstandes beim Faltmodul oder die nicht vollständige Abdeckung der Schweißnaht durch den modularen Spannschuh.

### Danksagung

Das Projekt „MODUPORT - *Modulares Fügesupportsystem zum automatisierten Fügen von geometrisch komplex umgeformten Halbschalen*“ wurde über die AiF im Rahmen des zentralen Innovationsprogramms Mittelstand vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.

## Literatur

- [01] Kraftfahrt-Bundesamt; 09.09.2015:  
[http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2014\\_b\\_umwelt\\_dusl\\_prozent.html?nn=663524](http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2014_b_umwelt_dusl_prozent.html?nn=663524);
- [02] Uhle, T.: *Untersuchung von thermisch gespritzten metallischen Verstärkungen auf Aluminiumblechstrukturen*; Masterarbeit; Universität Paderborn; Paderborn; 2014
- [03] Braess, H., Seiffert, U. (hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*; 7. Auflage, Wiesbaden; Springer Vieweg Verlag; 2013
- [04] Heggemann AG; 15.09.2015:  
<http://www.heggemann.com/leistungen-produkte/automotive/>
- [05] Pahl, G., Beitz, W. (hrsg.), u.a.: *Konstruktionslehre*; 7. Auflage; Berlin, Heidelberg; Springer Verlag; 2007
- [06] Volmer, J. (hrsg.), u. a.: *Getriebetechnik – Grundlagen*; 1. Auflage; Berlin; VEB Verlag Technik; 1992

## **Herausforderungen in der Füge- und Montagetechnik zur Speichersystemherstellung für elektromobile Fahrzeuge**

**Lars Ebert, Michael A. Roscher, Hans Stein**

Hohenstein-Ernstthal

### **Kurzfassung**

Die aktuelle Entwicklung, Serienfahrzeuge mehr und mehr mit elektrischen und semielektrischen Antrieben auszustatten, führt sowohl zu Veränderungen im Hinblick auf die grundlegenden Fahrzeugkonzepte als auch im Hinblick auf die notwendigen Fertigungstechnologien zur Herstellung der einzelnen Baugruppen. Eine der wesentlichsten Komponenten jedes (semi-)elektrischen Fahrzeuges ist das Speichersystem, das derzeit meist auf Li-Ionen-Technologie basiert. Die Herstellung eines Speichersystems umfasst eine Vielzahl einzelner, teils komplexer, Prozessschritte sowohl in der eigentlichen Zellfertigung als auch in der Modul- und Batteriepackmontage.

Der vorliegende Betrag gibt einen Einblick in die komplexe Herstellungskette eines Speichersystems für ein Elektrofahrzeug mit dem Fokus auf die Füge- und Montagetechnik. Im Schwerpunkt wird aufgezeigt, welche fügetechnischen und auch werkstoffspezifischen Herausforderungen bestehen und wie diese durch den intelligenten Einsatz von Schweiß-, Prüf- und Spanntechnologie bewältigt werden können.

## 1 Einleitung

Die Weiterentwicklung der Fahrzeuge im Hinblick auf alternative Antriebskonzepte ist in den letzten Jahren sichtbar vorangeschritten. Die damit verbundenen technologischen Herausforderungen sind dabei jedoch nicht nur auf den Antriebsstrang begrenzt, sondern umfassen die gesamte Fahrzeugarchitektur. Nichtsdestotrotz ergeben sich insbesondere im Kernsystem eines elektrisch angetriebenen Automobils - der Batterie - vielfältige neue produktionsrelevante Fragestellungen. Die Füge- und Montagetechnik nimmt dabei eine Schlüsselrolle ein, um Speichersysteme wirtschaftlich herzustellen.

## 2 Herstellungskette eines Speichersystems

Der Herstellungsprozess eines Li-Ionen-Speichers für automobiler Anwendungen, setzt sich aus vielfältigen teils komplexen Fertigungsschritten zusammen [1], siehe Abb. 1. In den ersten Fertigungsabschnitten werden die pulverförmig vorliegenden Aktivmaterialien zu einem Slurry verarbeitet und in einem Beschichtungsprozess auf metallische Elektrodenfolien aufgebracht. Über eine nachfolgende Kalandrierbehandlung wird die Schichtdicke und die Porosität justiert. Anschließend werden die Elektroden in einem Wickel- oder Stapelprozess mehrlagig, jeweils getrennt durch einen Separator, übereinander geschichtet. Die entstehenden Elektrodenstapel müssen, um die gleichmäßige Stromableitung zu garantieren, anschließend sicher miteinander und mit zur Kontaktierung notwendigen Stromlaufschienen verbunden werden. Die hierzu eingesetzten elektrisch und thermisch leitenden Werkstoffe Aluminium und Kupfer in niedrigsten Blech- bzw. Folienstärken erfordern exakt angepasste Schweißprozesse und präzise Vorrichtungen. Der entstandene Elektrodenwickel/-stack wird anschließend in ein Metallgehäuse bzw. in eine Hülle aus Aluminium-Polymer-Verbundfolie eingebracht, welche nachfolgend dicht verschlossen werden müssen. Geringe Wandstärken und zum Teil große Bauteiltoleranzen erschweren hierbei eine qualitätsgerechte Verschweißung. Die im ersten Produktionsabschnitt hergestellten Zellen werden anschließend zu einem Modul verschaltet, Module werden wiederum zu einem Batteriepack

zusammenmontiert. Auch hier werden jeweils vielfältige Fügeoperationen benötigt. Insbesondere beim Verschalten der Zellen ist die richtige Wahl des Equipments und des Parametersetups entscheidend für eine qualitätsgerechte Schweißung.

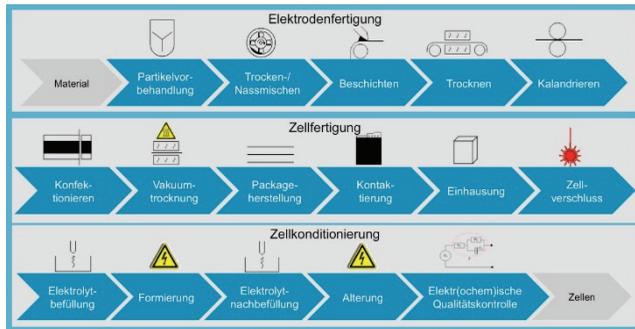


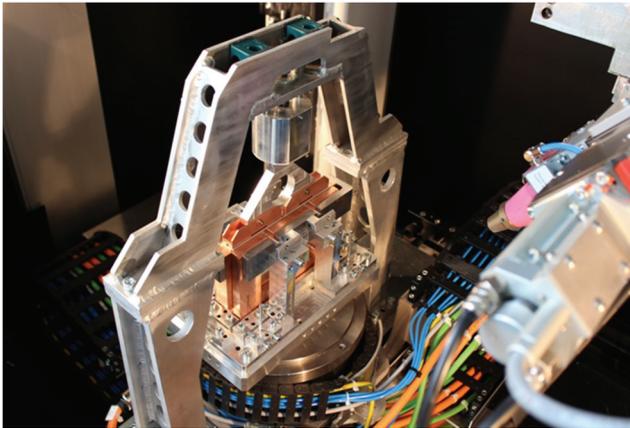
Abbildung 1: Herstellungsprozess einer Li-Ionen Zelle [2]

### 3 Fügetechnik in der Batteriemontage

In der Speichersystemherstellung und -montage für Elektroantriebe ist fügetechnisches Know-How gefragt, das im Fahrzeugbau bisher keine Rolle gespielt hat. Die Herstellung von Speicherzellen ist ein komplexer Prozess aus vielen Einzelschritten und diffizilen Fügeoperationen [3,4].

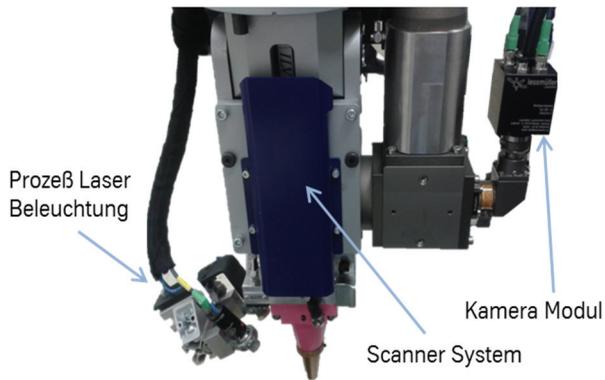
Im Bereich der Zellfertigung werden in einer ersten Fügeoperation die Elektrodenfolien an entsprechende Ableiterschienen gefügt. Das Schweißen dieser Folienverbindungen aus Al und Cu wird aktuell fast ausschließlich mittels Ultraschallschweißen realisiert. Diese Verfahren wird aufgrund wiederholt aufgetretener Probleme im Betrieb jedoch zunehmend in Frage gestellt. Ein Fügen mittels Laser, der eine homogene Verbindung erzeugen kann, ist möglich, birgt jedoch ebenfalls vielfältige Herausforderungen im Hinblick auf die Prozessstabilität und Vorrichtungskonzeption. Im weiteren Produktionsprozess wird die gewickelte/gestapelte Zelle in ein Gehäuse, meist aus Aluminium, oder in eine flexible Umhüllung aus Kunststoff-Aluminium-Verbundfolie eingebracht. Beim Verschließen von sogenannten

„Hardcase-Cans“ stellen die dünnen Wandstärken, die mitunter großen Toleranzen und die Empfindlichkeit der aktiven Zellmaterialien, im Hinblick auf die thermische Degradation bei zu hohen Temperaturen, die Fügetechnik vor große Herausforderungen. Entsprechend muss die Vorrichtung präzise auf die Gehäuse-Geometrie angepasst sein, so dass eine gleichmäßige Wärmeabfuhr und die Vermeidung von Zellschäden im Inneren sichergestellt werden, siehe Abbildung 2.

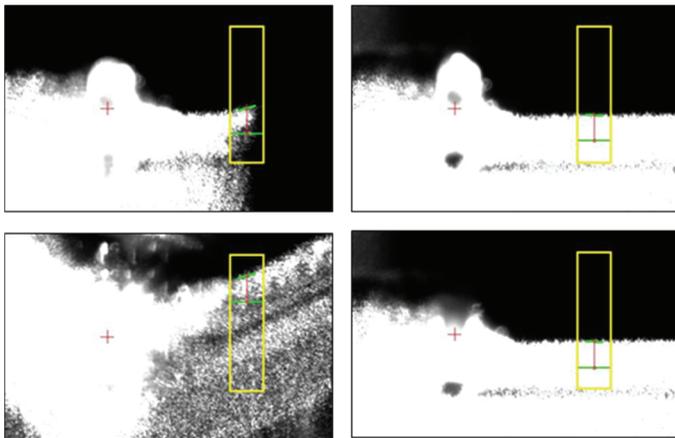


*Abbildung 2: ThyssenKrupp System Engineering Schweißvorrichtung zum Verschließen von „Hardcase“-Gehäusen mit angepassten Wärmeleitschienen*

Zum Prüfen der Toleranzabweichung und Nahtkorrektur im Prozess können optische Systeme, wie in [5] beschrieben, eingesetzt werden. Dabei wird vorlaufend eine Kantendetektion vorgenommen. Ein Laserstrahl, mit vom Schweißlaser abweichender Wellenlänge, beleuchtet die Kante und über eine im Strahlengang positionierte Kamera mit Filter, wird die Ist- und Sollposition erfasst und ausgewertet, siehe Abbildung 3 und Abbildung 4.



*Abbildung 3: ThyssenKrupp System Engineering LSK05 Schweißkopf mit integriertem Nahtverfolgungs- und -analysesystem Lessmüller „Weld-Eye“*



*Abbildung 4: Detektionsfenster mit Kantenerkennung an unterschiedlichen Schweißnahtpositionen*

Die Korrektur wird mit Hilfe der im ThyssenKrupp System Engineering Schweißkopf LSK-05 implementierten Wobbelfunktion mit minimaler Latenz durchgeführt, so dass flexibel auf Toleranzänderungen reagiert werden kann. Parallel dazu kann eine Beobachtung und Auswertung des eigentlichen Schweißprozesses erfolgen, die eine Beurteilung des Prozesses im Hinblick auf die Stabilität und Qualität erlaubt.

Die einzelnen Zellen werden im Anschluss zu Modulen, meist in Reihe, vornehmlich mittels Laserschweißen verschaltet. Je nach Zell- und Modulaufbau ergeben sich meist Fügeverbindungen aus Al-Al, Cu-Cu, Cu-Al und Al-Cu, selten sind auch Fe-Al und Fe-Ni Verbindungen zu finden. Die statischen und dynamischen Festigkeiten hängen jeweils stark vom gewählten Equipment, der Parametrisierung und den Randbedingungen (z.B. Einspannung) ab. Ziel ist es, die Vermischung der Werkstoffe zu minimieren bzw. diese möglichst definiert einzustellen.

Bei der Modulmontage sind, je nach Aufbau, häufig noch diverse weitere Montage- und Fügeoperationen zu finden. So kommen mannigfaltige Klebprozesse zum Einsatz, um z.B. Zellen im Modul zu fixieren und thermodynamisch an Wärmeleitbleche anzubinden oder den Wärmeausgleich zwischen den Zellen zu ermöglichen. Auch das Fügen von Abdeckungen aus Kunststoffen, sei es durch Reib- oder Laserschweißen, muss produktionstechnisch in der Modulmontage realisiert werden.

#### **4 Qualitätssicherung von Fügeverbindungen**

Der Qualitätssicherung von Fügeverbindungen kommt schon heute aber insbesondere in der zukünftigen Fertigung von Automobilen eine große Bedeutung zu. Das ist zum einen zurückzuführen auf die steigenden Produkthaftungsanforderungen, zum anderen ist die Qualitätsprüfung ein wesentlicher Baustein zur Datenerfassung im Sinne einer Produktionsüberwachung in zukünftiger immer stärker vernetzten und gekoppelten Produktionssystemen. Die Kontrolle von Fügeverbindungen in der Prozesskette zur Fertigung von Li-Ionen-Batterien ist, aufgrund der hohen thermischen und elektrischen Leitfähigkeiten der verwendeten Materialien Al und Cu, eine Herausforderung. Bisher kommt hier fast

ausschließlich die Widerstandsmessung zum Einsatz. Da die Genauigkeit und Auflösung der Vierleitermessung aufgrund der hohen elektrischen Leitfähigkeit der Werkstoffe verhältnismäßig gering sind und das Prüfergebn nicht rückwirkungsfrei, d.h. ohne einen Einfluss der Messvorrichtung auf das Ergebnis, funktioniert, gibt es nachvollziehbare Bestrebungen verstärkt bildgebende Verfahren einzusetzen.

Mit Hilfe aktiver Thermografie, entweder in Form von Puls-Phasen- oder Lock-In-Thermografie lassen sich Schweißnaht- und Anbindungsfehler detektieren und quantifizieren. Bei der Lock-In-Thermografie wird die Probe sinusförmig mit einer Anregungsenergie beaufschlagt, während bei der Puls-Phasen-Thermografie (PPT) ein einziger kurzer Wärmeimpuls zur Anregung genutzt wird. Bei beiden Verfahren erfolgt die Auswertung der Daten jedoch im Frequenzbereich. Eine schematische Darstellung der Puls-Phasen-Thermografie erfolgt in Abbildung 5.

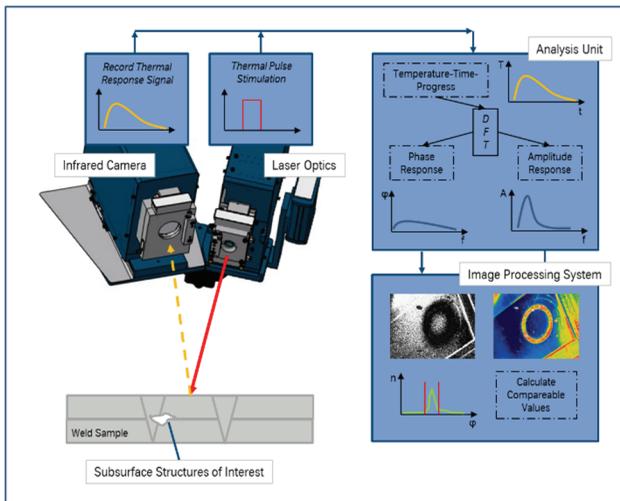


Abbildung 5: Puls-Phasen-Thermografie in der Prinzipdarstellung

Die Fehlerdetektion mittels aktiver Thermografie basiert auf der Visualisierung von Unterschieden in den Stoffeigenschaften (Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) zwischen qualitätsgerechten und defekten Werkstoffbereichen. Temperaturänderungen verlaufen, je nach Grad der Inhomogenität, schneller oder langsamer im Vergleich zum umgebenden Grundmaterial, siehe Abbildung 6. Da die Auswertung auf Basis des Zeitsignals und nicht der absoluten Temperaturintensität erfolgt, können Oberflächeneffekte aufgrund von Emissionsgradunterschieden weitgehend unterdrückt werden. Der physikalische Zusammenhang zwischen der Tiefe eines Fehlers und der Frequenz des maximalen Phasenkontrastes zwischen einem Defekt und dem ihn umgebenden nicht defekten Bereichen erlaubt darüber hinaus eine Bestimmung der Fehlertiefe.

Aufgrund der hohen thermischen Leitfähigkeit, sowohl von Aluminium als auch von Kupfer, hat sich die hochenergetische Anregung mittels Laser als vorteilhaft nutzbar erwiesen. Mittels des Lasers wird die zu prüfende Schweißnaht kurz (ca. 100 ms) thermisch angeregt. Die Anregungsgeometrie muss dabei gezielt auf den vorhandenen Anwendungsfall abgestimmt sein, um ungewünschte Wärmeflüsse zu vermeiden.

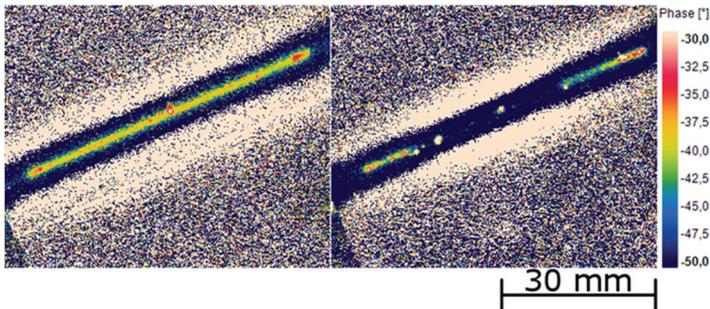


Abbildung 6: Puls-Phasen-Thermografische-Aufnahme einer Schweißnaht an einer Al-Cu Verbindung zwischen zwei Li-Zellen, links: vollständige Anbindung, rechts: unvollständige Anbindung

## 5 Zusammenfassung

Die fortschreitende Weiterentwicklung von Antriebssträngen hin zu elektrischen bzw. semi-elektrischen Systemen, stellt die Produktionstechnik und insbesondere die Fügetechnik vor neue Herausforderungen. Diesen kann nur durch produktflexible und maßgeschneiderte anlagentechnische Lösungen und weiterentwickelte Prozesse angemessen entsprochen werden, um auch zunehmend komplexere Speichersysteme in großen Stückzahlen wirtschaftlich herstellen zu können.

## 6 Literatur

- [1] Kurfer, J.; et al., Production of large-area lithium-ion cells – Preconditioning, cell stacking and quality assurance. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 61 (2014)
- [2] TUB - Technische Universität Braunschweig, Institut für Partikeltechnik iPAT, <http://www.ipat.tu-bs.de>, 06/2015
- [3] Lee, S.; et al., Joining Technologies for Automotive Lithium-Ion Battery Manufacturing: A Review. In: ASME Conference Proceedings 49460 (2010)
- [4] Shannon, G.: Battery Welding Solutions Using Laser and Resistance Technologies. In: Battery Power Products & Technology, Volume 13 (2009), Nr. 6
- [5] Truckenbrodt, C.: Mit dem Auge zurück an die Schweißnaht. In: Laser Technik Journal 10 (2013), Nr. 4



## **Fügen artfremder Werkstoffe – klassische Methoden und innovative Ansätze zum nichtthermischen Fügen**

**Dr.-Ing. IWE Wolf Georgi**

Technische Universität Chemnitz, Institut für Füge- und Montagetechnik,  
Professur Schweißtechnik

### **Kurzfassung**

Aktuelle Entwicklungen, vor allem im Bereich des Automobilbaus, zeigen deutlich, dass Leichtbau eine Schlüsseltechnologie für die Herstellung ressourcenschonender Produkte ist. Der Werkstoffleichtbau ist dabei eine Methode, bei der Schwermetalle durch dünnere hochfeste Stähle, durch Leichtmetalle oder durch Kunststoffe substituiert werden. Als Zeichen dieser Entwicklung dienen neu auf dem Markt befindliche Kraftfahrzeuge wie BMW i3 oder Tesla Model S, die unter Nutzung alternativer Werkstoffe Leichtbaukarosserien besitzen. Nach dem Motto „der richtige Werkstoff am richtigen Ort“ werden verschiedene Materialien in einem Produkt so miteinander kombiniert, dass die jeweiligen Eigenschaften zu einer verbesserten Gesamtkonstruktion führen. Das Verbinden dieser artfremden Werkstoffe stellt dabei neue Herausforderungen an die Fügetechnik. Bisherige Lösungen sind oftmals unwirtschaftlich, energieintensiv, führen zu geringen Verbindungsfestigkeiten oder schädigen einzelne Werkstoffe. In diesem Artikel werden neben den klassischen Fügeverfahren neue Methoden zur vorteilhafteren Nutzung dieser Verfahren sowie neuentwickelte Fügeverfahren vorgestellt.

### **Abstract**

Recent developments, especially in the field of automotive engineering, clearly show that lightweight materials are a key technology for the production of resource-saving products. Lightweight construction is a method that substitutes thinner high-strength steels, light metals or plastics for use instead of traditionally used materials. Examples of this new development on the market are found in vehicles like the BMW i3 or Tesla

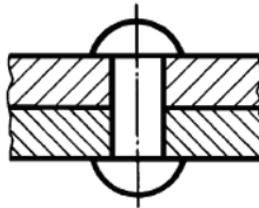
Model S, which have lightweight bodies utilizing alternative materials. According to the motto "the right material in the right place" different materials are combined in one product such that their respective properties lead to an improved overall design. The joining of these dissimilar materials presents new demands on joining technologies. Previous solutions are often not economical or are energy-intensive, and lead to low bond strengths or can damage individual materials. In this article the advantages of both traditional and new joining methods are presented.

## **1 Klassische Methoden**

### **1.1 Nieten**

Nieten bezeichnet eine der ältesten Verbindungsarten von Blechen und Profilen, die mit einfachen Mitteln herstellbar ist [5]. Nach DIN 8593 wird das Nieten den Fügeverfahren durch Umformen zugeordnet [1]. Nietverbindungen lassen sich nur durch Zerstörung des Nietes lösen, deshalb werden sie als unlösbare Verbindung bezeichnet. Lediglich durch Abschlagen des Nietkopfes oder durch Ausbohren der Niete kann eine Trennung erfolgen. Betrachtet man das klassische Nieten, handelt es sich beim Niet um ein eigenständiges Fügeelement. Dieser wird in ein vorbestimmtes Loch eingesetzt und durch Ausbildung eines Schließkopfes fest mit den Bauteilen verbunden (Bild 1) [4]. Die Verbindung entsteht durch verschiedene Methoden wie das Stauchen eines bolzenförmigen Hilfsfügeteils, das Umlegen überstehender Teile eines Hohnnietes oder durch Einspreizen wie beim Stanznieten.

Der große Vorteil von Nietverbindungen ist, dass Fügepartner unterschiedlicher Stärke und unterschiedlicher Art verbunden werden können. Weiterhin erfolgt beim Kaltnieten, welches für dünnere Bauteile Verwendung findet, keine Wärmeeinbringung in die Werkstücke und somit kann auch kein Verzug durch diese auftreten. Auch eine ungünstige Beeinflussung des Werkstoffgefüges wird damit vermieden. Ein weiterer Vorteil ist, dass es bei Nietverbindungen aufgrund von Setzvorgängen nicht zum schlagartigen Versagen bei Überlastung kommt.



*Bild 1: Vollnietverbindung*

Nachteilig ist, dass, neben einer beidseitigen Zugänglichkeit, die notwendigen Bohrungen zum Ausbilden der Verbindung die Bauteile schwächen. Auch ist die Zunahme des Bauteilgewichtes aufgrund der Verbindungselemente und der benötigten Überlappungen sowohl der angestrebten Ressourcenschonung als auch dem Leichtbaugedanken abträglich. Die Überlappverbindung führt außerdem zu einer ungünstigen Umlenkung des Kraftflusses und verhindert zusammen mit der Erhebung der Nietköpfe eine ebene Fügestelle, was einen optischen Mangel darstellen kann.

Die Entwicklung der Schweißtechnik verdrängte die Anwendung des Nietens im Stahlbau seit 1920 weitestgehend [6]. In jüngerer Zeit erlebt das Nieten allerdings eine Renaissance. Gerade für den Mix verschiedenartigster Werkstoffe in einer Konstruktion, um dem Leichtbau gerecht zu werden, sind klassische Schweißverfahren ungeeignet beziehungsweise nicht möglich. Der Bedarf an Nietverbindungen ist dadurch wieder gegeben. In der Forschung und Entwicklung ist daher das Nieten wieder Gegenstand von Untersuchungen. Hierbei werden für die Verbinder verschiedene neue Werkstoffe (Metalle und auch Kunststoffe), verschiedene Oberflächenbeschichtungen, neue Verbindertypen oder auch neue Setzvorgänge auf ihre Eignung hin untersucht.

## 1.2 Blindnieten

Im Gegensatz zu allen anderen Nietarten ist beim Blindnieten nur eine einseitige Zugänglichkeit der Fügestelle erforderlich [8]. Bei diesem Verfahren (Bild 2) wird, nachdem der Blindniet in die dafür vorgesehene Bohrung gesteckt wurde, der Nietdorn mit Hilfe eines Werkzeuges axial herausgezogen. Dadurch spreizt eine Niethülse auf und der Schließkopf wird ausgebildet. Erst nachdem der Nietdorn an der dafür vorgesehenen Sollbruchstelle abreißt, ist die Verbindung vollständig ausgebildet. Die Verarbeitung kann durch eine Nietzange, Druckschere oder durch pneumatisch beziehungsweise hydraulisch angetriebene Geräte erfolgen. Diese Nietart ist sowohl manuell als auch automatisiert sehr leicht anwendbar.

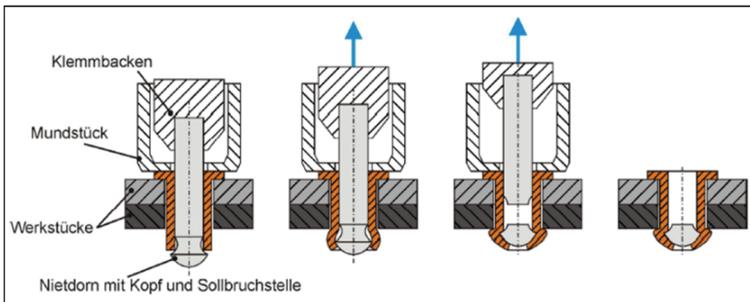


Bild 2: Ablauf des Blindnietens

Als Nachteil, den diese Verbindungsart hat, wäre die Schwächung und Schädigung des Materiales durch die Einbringung einer Bohrung zu nennen sowie der optische Mangel und der erhöhte Materialbedarf durch die Überlappverbindung.

Die Ausführungsformen von Blindnieten sind sehr vielfältig. Sie sind auf die jeweilige Verbindung und deren Anforderung exakt abgestimmt. Gerade für Metall-Kunststoff-Verbindungen ist diese Verbindungsart hervorragend geeignet.

### 1.3 Kleben

Das Kleben gehört innerhalb der Fertigungsverfahren zur Hauptgruppe Fügen und bildet neben weiteren Verfahrensgruppen zum Fügen eine eigene Untergruppe. Als Klebverbindung wird eine Verbindung bezeichnet, bei der artgleiche oder nicht artgleiche Werkstoffe mit Hilfe von organischen oder anorganischen Klebstoffen ggf. unter Druck bei Raumtemperatur oder unter mäßiger Erwärmung gefügt werden. Der Zusammenhalt beim anlösenden Kleben beruht auf der Stoffverbindung infolge von örtlich begrenztem Anlösen der Fügepartner durch Lösungsmittel oder Lösungsmittelgemische, wobei die ursprüngliche Trennfuge zwischen den Fügeteilen beseitigt wird. Im Falle des Metallklebens erfolgt kein Anlösen. Hier beruht der Zusammenhalt einerseits auf Grenzflächenbindungen (Adhäsionskräften) zwischen Klebstoff und Fügepartioberfläche und andererseits auf Haupt- und Nebenvalenzkräften (Kohäsionskräften) zwischen den Teilchen des Klebstoffes [7]. Unter Metallkleben wird dabei die Herstellung einer festen Verbindung mit mindestens einem Metallbauteil verstanden, wobei die Verbindung meist durch einen durch chemische Reaktion verfestigenden Klebstoff hergestellt wird [3, 2]. Die Klebstoffe selbst sind dabei nichtmetallische Werkstoffe, welche die Fügepartner durch Oberflächenhaftung und eigene innere Festigkeit (Adhäsions- und Kohäsionskräfte) miteinander verbinden können, ohne dabei das Gefüge und die Eigenschaften der Fügeteile wesentlich zu beeinflussen (Bild 3).

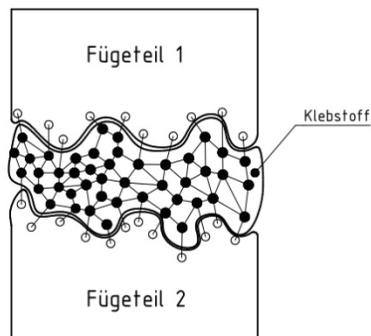


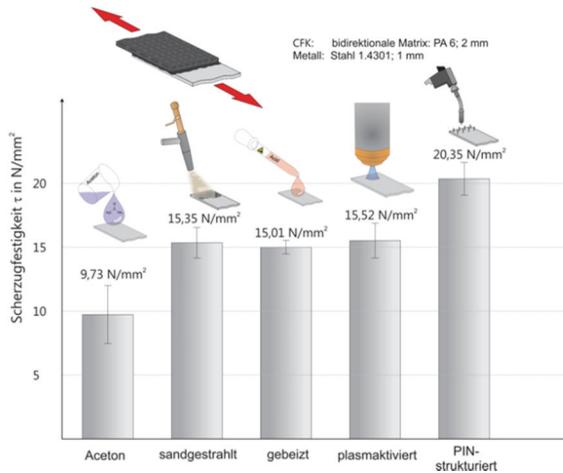
Bild 3: Klebverbindung, nach [7]

## 2 Innovative Ansätze

### 2.1 Wärmeleitungsfügen

Das Wärmeleitungsfügen ist ein Fügeverfahren welches dem Fügen eines Metalls mit einem Kunststoff beziehungsweise faserverstärktem Kunststoff dient, wobei der Kunststoff beziehungsweise die Matrix thermoplastisch sein muss. Es handelt sich um eine Überlappverbindung mit beidseitigem Zugang. Die Fügepartner werden in einer Fügevorrichtung übereinander gelegt und verspannt. Der Kunststofffügepartner wird direkt oder indirekt an der Fügestelle örtlich erwärmt. An der Grenzfläche schmilzt er auf und es kommt zu einem Stoffschluss durch eine Schmelzklebung. Bei geeigneter Modifikation der Grenzflächen, zum Beispiel durch das Beizen des Metallpartners, durch Bürsten, Sandstrahlen oder vorheriger Benetzung mit einem Haftvermittler, lassen sich die übertragbaren Fügekräfte auf ein Vielfaches steigern (Bild 4). Weiterhin kann durch das Aufbringen sogenannter Pins mit dem CMT-Verfahren (Cold Metal Transfer) eine direkte Anbindung der Fasern an den Metallpartner erreicht werden. Dabei spielt die Anzahl und die Anordnung der Pins eine große Rolle. Die Pins dringen in den Kunststoff ein und Verdrängen die Fasern. Somit kommt es zu einem Umschlingen dieser Fasern um die jeweiligen Pins. Man kann von einer direkten Kraftankopplung der beiden Fügepartner sprechen.

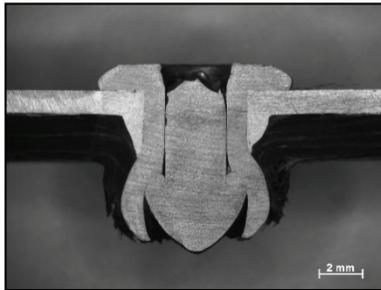
Die Professur Schweißtechnik hat dieses Verfahren durch eine optimale Abstimmung der Prozessparameter und durch die gezielte Modifikation der zu fügenden Oberflächen weiter entwickelt und beanspruchungsgerecht auf diese Werkstoffe abgestimmt. Dazu wurden die Anzahl und die Anordnung der Pins variiert und festgestellt, dass durch eine dreieckige Anordnung der Pins ein Optimum erreicht wird. Diese Anordnung leitet dem Kraftfluss optimal vom Metallfügepartner in den Kunststofffügepartner, wobei insgesamt aber weniger Pins benötigt werden.



*Bild 4: Festigkeiten verschieden modifizierter Oberflächen beim Wärmeleitungsfügen*

## 2.2 Spin-Blind Riveting

Ein weiteres hochinnovatives Verfahren zum Verbinden von Metallen mit thermoplastischen Kunststoffen mit und ohne Faserverstärkung ist das Spin-Blind Riveting (SBR). Hierbei handelt es sich um ein modifiziertes Blindnietverfahren, was kein vorheriges Lochen der Fügepartner benötigt. Das Nietelement wird mittels Rotation durch die beiden Fügepartner getrieben. Durch eine spezielle Kopfgeometrie wird dabei das verdrängte Metall zu einer Hülse (Bild 5) umgeformt, welche eine weitere Steigerung der ertragbaren Lasten solch einer Verbindung ermöglicht.



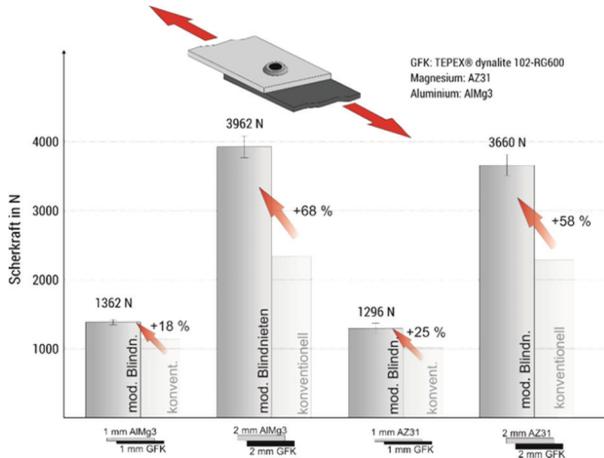
*Bild 5: Querschliff einer SBR Verbindung*

Das Verfahren ist spahnfrei und eine Verbindung ist innerhalb von ca. 2 Sekunden hergestellt. Die ertragbaren Lasten liegen um ca. 60 % höher als bei herkömmlichen Blindnietverbindungen (Bild 6). Auch hier wird durch das Formen, nicht durch Bohren oder Stanzen, faserschonend ein Loch in den Kunststofffügepartner eingebracht. Dadurch werden weniger Fasern durchtrennt. Ähnlich wie bei dem oben vorgestellten Verfahren des Wärmeleitungsfügen mittels Pins werden die Fasern verdrängt und umschlingen das Nitelement.

In einer ersten Forschungsphase wurde dazu eine Versuchseinrichtung konzipiert und gebaut, bei welcher das Werkzeug, eine klassische pneumatische Blindnietpistole, steht und die Versuchskörper rotiert werden. Dieser Schritt war notwendig, um erste Prozessparameter zu erforschen ohne dazu ein kompliziertes Fügewerkzeug zu entwickeln. Im Ergebnis dieser ersten Phase wurden umfangreiche Versuche mit verschiedenen Materialien durchgeführt. Als Metalle wurden dabei Aluminium, Magnesium und auch Stahl in den Stärken 1, 2 und 3mm verwendet. Als Kunststofffügepartner wurde GFK, CFK mit Kurz- und Langfasern in den Stärken 1, 2, 3, und 4 mm verwendet.

Dieses Verfahren ist patentiert und es werden derzeit in Kooperation mit der Firma Gesipa Blindniettechnik GmbH ein Werkzeug entwickelt, um die Marktreife zu erreichen. Die Konstruktionsphase dazu ist abgeschlossen und das Werkzeug befindet sich derzeit im Aufbau. Es handelt sich um ein vollständig neuartiges System bei welchem nur noch der Blindniet rotiert

wird. Es kann an einem Roboter montiert oder in ein Portal integriert werden. Die Vorstellung des neuen Werkzeuges ist für verschiedene Messen der Blechverarbeitenden Industrie im Jahre 2016 vorgesehen.

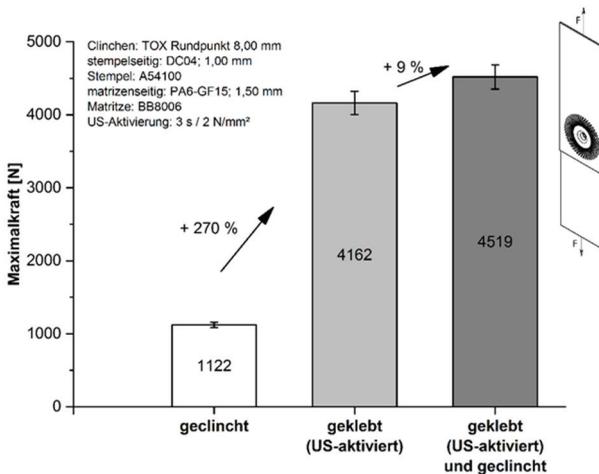


*Bild 6: Vergleich der ertragbaren Lasten zwischen SBR und herkömmlichen Blindnietverbindungen*

### 2.3 Schmelzkleb-Clinchen

Als ein letztes Beispiel für die Verbindung von Metallen mit thermoplastischen Kunststoffen mit und ohne Faserverstärkung soll hier ein Hybridverfahren vorgestellt werden, welches durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird. In diesem Verfahren werden mittels der Kombination eines adhäsiven und eines mechanischen Fügeverfahrens Metall-Kunststoff-Verbindungen hergestellt, welche wiederum höhere Festigkeiten aufnehmen können als die beiden elementaren Verfahren (Bild 7). Auch hierbei handelt es sich um eine Überlappverbindung mit beidseitigem Zugang. In einem ersten Schritt werden die beiden Fügepartner übereinander gelegt und durch eine Sonotrode zusammengepresst. Durch diese wird für eine sehr kurze Zeit ein torsionaler Ultraschall eingekoppelt, welcher den Kunststoff an der

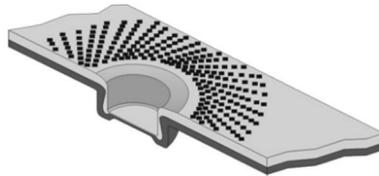
Grenzfläche zwischen Metall und Kunststoff örtlich aufschmilzt und eine Schmelzklebverbindung herstellt. Nach kurzer Schalleinwirkzeit kühlen die Fügepartner unter definiertem Druck ab. Auch hier spielt die Oberflächenmodifikation eine große Rolle. Es wurden Untersuchungen zu oxidierten, gebeizten und zu gebürsteten Oberflächen durchgeführt. Als anwenderfreundlichste Lösung ist dabei die gebürstete Variante am umfangreichsten untersucht worden.



*Bild 7: Festigkeiten der elementaren Verfahren im Vergleich mit dem hybriden Verfahren*

Nach dem Abkühlen wird die Fügeverbindung in einem zweiten Schritt mechanisch gefügt. Hierzu wird das Verfahren Clinchen mittels Rundpunkt genutzt. Charakterisiert wird eine solche Clinchverbindung durch ihren Hinterschnitt, welcher eine Mindestgröße aufweisen muss, damit sich die Verbindung nicht wieder von selbst löst. Da Kunststoffe nach dem mechanischen Umformen zum Relaxieren neigen, ist dieser Bereich von besonderem Interesse. Hierzu muss der Kunststoff in einem speziell konditionierten Zustand gefügt werden.

In einer solch hergestellten Schmelzkleb-Clinch-Verbindung (Bild 8) sind ein großer Teil der Fasern ebenfalls örtlich verdrängt und nicht zerrissen worden, womit sich die Steigerung der ertragbaren Lasten erklären lassen. Zukünftig soll ein Werkzeug entwickelt werden, welches adaptiv beim Anwender vor Ort in vorhandene Clinchtechnologie eingesetzt werden kann, so dass dieser damit auch Metall-Kunststoff-Verbindungen herstellen kann.



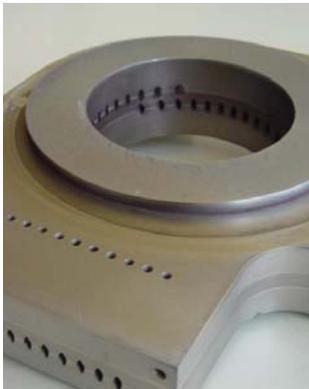
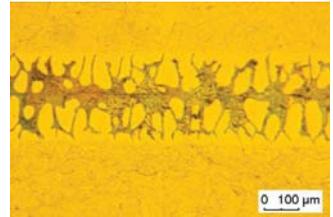
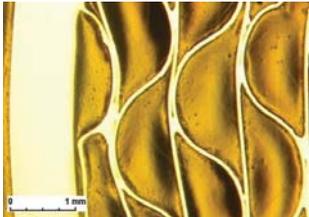
*Bild 8: Querschnitt einer Schmelzkleb-Clinch-Verbindung*

## Literatur

- [1] DIN 8593 Teil 0: Fertigungsverfahren Fügen – Teil 0: Allgemeines – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. September 2003.
- [2] Ehrenstein, G.-W.: Handbuch Kunststoff – Verbindungstechnik, München: Hanser Verlag, 2004. ISBN 3-446-22668-0
- [3] Habe nicht, G.: Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1997. ISBN 3-540-62445-7
- [4] Kennel, E.: Das Nieten im Stahl- und Leichtmetallbau. 1. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 1951.
- [5] Niemann, G.; Winter, H.; Höhn, B.-R.: Maschinenelemente: Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2005. ISBN 3-540-25125-1
- [6] Pasternak, H.; Hoch, H.-U.; Füg, D.: Stahltragwerke im Industriebau. 1. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2010. ISBN 978-3-433-01849-1
- [7] Riedel, F.; Lang, H.; Müller, J.-U.; Meyer, F.; Thurner, S.; Todtermuschke, M.: Fügetechnik: Überblick – Löten – Kleben – Fügen durch Umformen. München, Wien: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2003. ISBN 3-446-22133-6
- [8] Steinhilper, W.; Sauer, B.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-3-540-76646-9

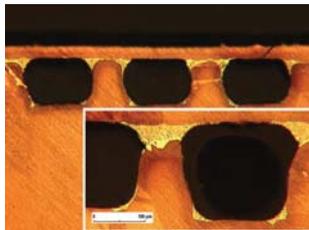


Technologieentwicklung ■ Industrieforschung ■ Beratung ■ Gutachten ■ Fertigung ■ Werkstoffuntersuchung



**SAXOBRAZE GmbH**

**Lösungen für  
die Löttechnik**

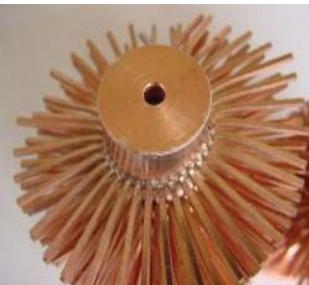


**SAXOBRAZE GmbH**

**Hohe  
Technologiekompetenz**

**SAXOBRAZE GmbH**

**Forschung und  
Entwicklung**



Die SAXOBRAZE GmbH mit Sitz in Chemnitz wurde 2001 als Startup aus dem Institut für Fertigungstechnik und Schweißtechnik der Technischen Universität Chemnitz ausgegründet. Das Portfolio des Unternehmens umfasst das Weich-, Hart- und Hochtemperaturlöten.

**Zur Verfügung stehende Lötverfahren:**

- Vakuum- und Schutzgasofenlöten (auch gekoppelt mit anschließender Wärmehandbehandlung)
- Flammlöten
- MF- und HF-Induktionslöten
- Laserlöten

**Es werden folgende Dienstleistungen realisiert:**

- Produktorientierte Technologieentwicklung und Industrieforschung
- Löttechnische Entwicklung, Prototypen- sowie Kleinserienfertigung und industrielle Fertigung von Baugruppen aller Branchen
- Information und Beratung
- Erstellung von Lötkonzepten und Gutachten
- Produktorientierte Betreuung des Lötprozesses
- Entwicklung von Lötprozessen nach betriebswirtschaftlichen und ökologischen Kriterien
- Werkstoffprüfung und -untersuchung

Basierend auf unseren umfangreichen Fachkenntnissen und Erfahrungen sowie zahlreichen Kontakten zu löttechnischen Institutionen und Industriefirmen können wir eine individuelle und fachlich kompetente Information, Beratung und Planung sowie termingerechte Realisierung in höchster Qualität garantieren.

Die SAXOBRAZE GmbH ist Mitglied des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. (DVS), der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V., des Fachausschusses Löten, der Fachgesellschaft Löten sowie des Ausschusses für Technik (AFT) des DVS AG V6.1 „Hart- und Hochtemperaturlöten“.

Über diese Mitgliedschaften in allen deutschen löttechnischen Gremien haben wir ständigen Zugriff auf neueste Ergebnisse der Forschung und Entwicklung, die wir direkt umsetzen und an unsere Kunden weiter vermitteln.

**Kontakt:**

SAXOBRAZE GmbH  
 Dipl.-Ing. Jörg-Uwe Müller  
 OT Mittelsaida  
 Parkstr. 4  
 09618 Großhartmannsdorf

Tel.: +49 371 53 47 360  
 Mobil: +49 160 842 4830  
 Fax: +49 37329 71 733  
 E-Mail: info@saxobraze.de  
 www.saxobraze.de



**Welche Themen sind für Sie interessant?**

Rückantwort bitte per Fax an: **+49 37329 71 733**

- Vakuum- und Schutzgasofenlöten
- Flammlöten
- MF- und HF-Induktionslöten
- Laserlöten
- Technologieentwicklung
- Löttechnische Entwicklung
- Lötkonzepte und Gutachten
- Entwicklung von Lötprozessen
- Werkstoffprüfung und -untersuchung

Firma: .....	
Name: .....	
Position: .....	
Telefon: .....	
E-Mail: .....	
.....	.....
Ort/Datum	Unterschrift

Vielen Dank, wir melden uns bei Ihnen.

## **Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen von medizintechnischen Komponenten**

**Holger Letsch**

Steinbeis-Innovationszentrum Fügetechnik, Chemnitz

### **Kurzfassung**

Der Laser hat sich als Werkzeug zum Fügen vor dem Hintergrund stetig kleiner werdender Bauteile und Verbindungsgeometrien mit hohen Anforderungen an die Verbindungsqualität und Reproduzierbarkeit in vielen Bereichen der Präzisions- und Feinwerktechnik fest etabliert. Aus der zunehmenden Verarbeitung neuer, hinsichtlich ihrer fügetechnischen Verarbeitung anspruchsvoller, Werkstoffe und Werkstoffkombinationen in komplexen Geometrien resultieren sowohl metallurgische als auch verfahrenstechnische Herausforderungen, um Verbindungen mit minimalem Platzbedarf und genau definiertem Energieeintrag zu erzeugen. Dies trifft in besonderem Maße auf fügetechnische Aufgabenstellungen im Bereich medizintechnischer Komponenten zu.

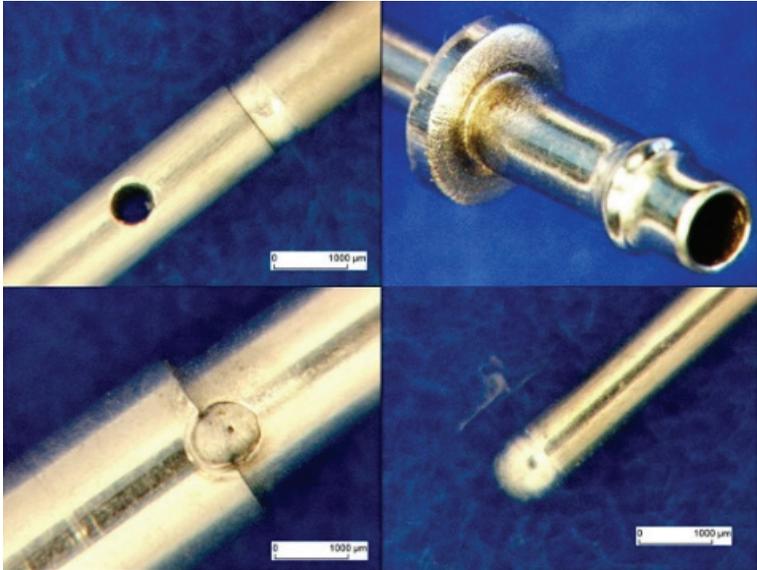
Die Entwicklung laserbasierter Fügetechnologien bietet ideale Voraussetzungen um diesen Anforderungen in verschiedenen Applikationen gerecht zu werden. Dabei wird insbesondere das Laserstrahlfein- bzw. Laserstrahlmikroschweißen in verschiedenen Applikationen bereits erfolgreich eingesetzt. Aktuelle Strahlquellenkonzepte im Bereich der Festkörperlaser wie Scheibenlaser oder Faserlaser mit ihren hervorragenden Strahleigenschaften bieten für Anwendungen des Laserstrahlschweißens im Bereich medizintechnischer Komponenten erhebliche Vorteile. In Verbindung mit wesentlichen Weiterentwicklungen im technologischen Bereich ergeben sich neue Möglichkeiten zur Gestaltung und Anordnung von Fügstellen und damit größere Freiheitsgrade beim Entwurf neuer Produkte. Damit erschließt sich für Anwendungen laserstrahlbasierter Fügeprozesse ein zunehmend breiter werdendes Anwendungsgebiet.

## 1 Einleitung

Der Fertigungsprozess medizintechnischer Bauteile wird durch höchste Anforderungen an Fertigungsqualität, Sicherheit und Hygiene geprägt. Die Herstellung anforderungsgerechter Fügeverbindungen setzt voraus, dass physikalische, chemische und insbesondere die geometrischen Eigenschaften der Halbzeuge und Bauelemente sowie Hilfsmittel und Zusatzwerkstoffe innerhalb bestimmter Grenzwerte liegen, die durch das Fügeverfahren vorgeschrieben werden. Beispiele hierfür sind geometrische Abmessungen, Rauheit und Ebenheit von Oberflächen. Andererseits bestimmen die Bauteileigenschaften die anwendbaren Fügeverfahren, wie z.B. thermische Belastbarkeit, mechanische Verformbarkeit oder Differenz verschiedener Wärmeausdehnungskoeffizienten.

Aufgrund zahlreicher Faktoren können Lasersysteme zum Mikroschweißen medizinischer Instrumente besonders vorteilhaft eingesetzt werden. Das Laserstrahl-Mikroschweißen ermöglicht das berührungslose und kräftefreie Fügen von Bauteilen der Medizintechnik aus unterschiedlichen metallischen Werkstoffen mit reduziertem Energieeintrag, minimiertem Raumbedarf der Fügegeometrie und kurzen Prozesszeiten. Die Laser-Schweißverbindungen erfüllen dabei Forderungen hinsichtlich mechanischer Festigkeit, Temperaturbeständigkeit, Mediendichtheit in hoher Qualität und gewährleisten somit maßgeblich die Funktion des Bauteils. Dabei zeichnet sich das Laserstrahlschweißen neben hohen Prozessgeschwindigkeiten vor allem durch seine enorme Flexibilität auch bei kleinen Losgrößen aus. Durch entsprechende Wahl der Prozessparameter können fehlerfreie, glatte, schmale und präzise Nähte erzeugt werden, die leicht zu reinigen und zu sterilisieren sind, wobei sie eine hohe Korrosionsbeständigkeit aufweisen. Durch die berührungslose Arbeitsweise beim Laserstrahlschweißen ist die Voraussetzung gegeben, eine Kontaminierung der Bauteile während des Schweißprozesses wirkungsvoll zu unterbinden. Der Einsatz des Laserschweißens als Fügewerkzeug ermöglicht dem Konstrukteur große technologische Freiheitsgrade bei der Gestaltung der Fügestellen im Rahmen des Produktdesigns und kann damit dazu beitragen, die im Bereich medizintechnischer Komponenten geforderte Eigenschaft der Redundanz von Verbindungen in einfacher Weise zu realisieren.

Einige Beispiele laserstrahlgeschweißter Verbindungen an medizintechnischen Komponenten zeigt Bild 1.



*Bild 1: Anwendungen des Laserstrahlschweißens für Fügeverbindungen an medizintechnischen Komponenten*

## **2 Schweißtechnologie beim Laserstrahlmikroschweißen**

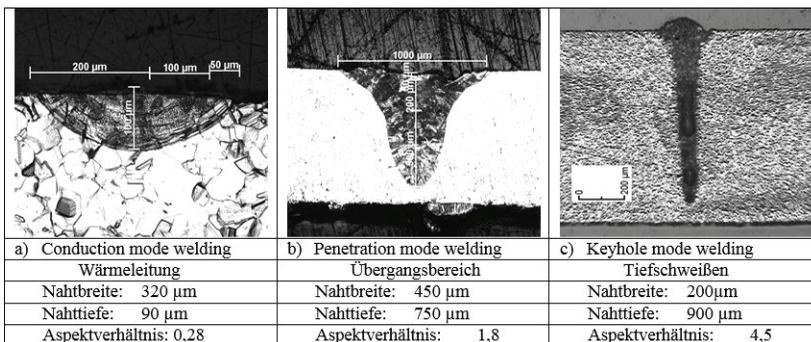
Art und Verlauf des Laserstrahlschweißprozesses werden bei gegebener Wellenlänge der Laserstrahlung und den Werkstoffeigenschaften (Absorption, Wärmeleitung) weitgehend durch die Intensität der Laserstrahlung am Bearbeitungsort und die Streckenenergie (pro Wegstrecke und Zeiteinheit zugeführte Laserleistung) bestimmt. Die Wahl von Strahlleistung, Brennweite, Art der Fokussieroptik, Schweißgeschwindigkeit und Bearbeitungsstrategie sind wichtige Parameter für die Einstellung eines reproduzierbaren Prozesses und die Optimierung des für das Schweißen notwendigen Energieeintrages in das Bauteil. Die

Einschweißtiefe beim Laserstrahlschweißen wird durch die Eindringtiefe der Schmelzfront in das zu schweißende Material bestimmt. Dabei beeinflussen eine Reihe von Faktoren wie Geometrie der Fügeteile, die thermischen Eigenschaften der zu verbindenden Metalle und die Laserparameter Tiefe und Form der Schweißnaht.

Betrachtet man die Wechselwirkung Laserstrahl – Werkstoff können prinzipiell auch für das Schweißen im Bereich der Präzisions- und Mikrotechnik drei typische Formen des Laserstrahlschweißens unterschieden werden (siehe Bild 2):

Conduction mode welding	Wärmeleitungsschweißen	(Bild 2a)
Penetration mode welding	Übergangsbereich	(Bild 2b)
Keyhole mode welding	Tiefschweißen	(Bild 2c)

An der entstandenen Schweißverbindung kann anhand des Aspektverhältnisses der Naht (Nahttiefe / Nahtbreite) das vorherrschende Schweißregime identifiziert werden.



*Bild 2: Schweiß-Regime beim Laserstrahl-Mikroschweißen*

Fokussiert man die Strahlung eines Lasers auf eine Metalloberfläche, so wird ein Teil der Strahlung absorbiert. Das feste Metall wird geschmolzen und das flüssige Schmelzbad dehnt sich mit zunehmender Wärmeeinleitung in erster Näherung in einer hemisphärischen Geometrie um den Auftreffpunkt der Laserstrahlung aus [1].

### **Conduction mode welding (Wärmeleitungsschweißen)**

Bei niedrigen Leistungsdichten kommt es nicht zu einer Einsenkung im Zentrum der Schmelzbadoberfläche. Im Ergebnis bildet sich ein sehr glattes, flaches Schmelzbad aus, welches sich mit Zunahme der eingestrahlten Energie vergrößert, bis eingestrahlte Energie und Wärmeableitung ins umgebende Material einen Gleichgewichtszustand erreichen. Der Querschliff der resultierenden Naht weist ein Aspektverhältnis unter 0,5:1 auf.

### **Penetration mode welding (Übergangsbereich)**

Werden Laser mit niedriger Ausgangsleistung und relativ großem Fokusdurchmesser zum Schweißen eingesetzt, sind diese nicht in der Lage eine stabile Kapillare auszubilden. Die Energiedichte im Fokusbereich reicht nicht aus, um die Metall-Verdampfungsrate und damit den notwendigen Druck zur Aufrechterhaltung der Dampfkapillare zu erzeugen. Das Schweißregime liegt zwischen Wärmeleitungs- und Tiefschweißen und wird als penetration-mode-welding bezeichnet. Typische Strahlquellen für dieses Schweißregime sind gepulste blitzlampengepumpte Nd:YAG-Laser, deren hohe Pulsleistungen und Strahldurchmesser ein relativ großes Schmelzbad, jedoch keine stabile Kapillare erzeugen. Das Aspektverhältnis der entstehenden Schweißnähte liegt im Bereich von 3:1. Gegenüber dem keyhole-mode-welding ist das penetration-mode-welding weniger effektiv, aufgrund der im Pulsregime arbeitenden Laser ist die thermische Belastung des Bauteils jedoch geringer.

### **Keyhole mode welding (Tiefschweißen)**

Bei ausreichender Leistungsdichte deformiert sich die Oberfläche des Schmelzbades infolge der Gradienten von Oberflächenspannung und Dampfdruck oberhalb des Schmelzbades. Damit wird die Laserenergie im Zentrum des verformten Schmelzbades konzentriert (Selbstfokussierung) und die Tiefe der Einsenkung im Zentrum des Schmelzbades nimmt zu. Für Intensitäten größer  $10^6 \text{ W/cm}^2$  (im Makrobereich) resultiert daraus eine Kapillare mit heißem, ionisiertem Metaldampf, die von flüssigem Metall umgeben ist. Der Dampfdruck hält die Kapillare geöffnet und verdrängt das flüssige Metall radial. Das Keyhole-Mode-Schweißen oder Tiefschweißen

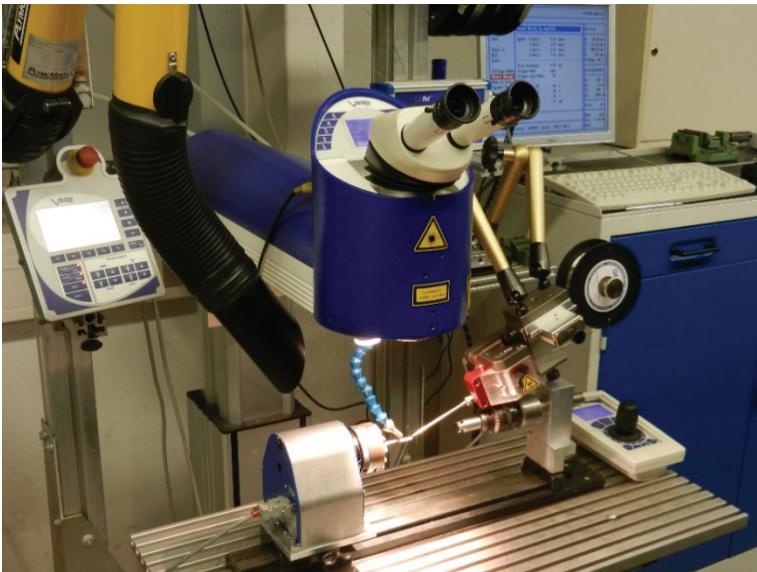
ist an kleine Fokusburchmesser und ausreichend hohe Intensitäten der eingestrahnten Laserleistung gekoppelt. Dabei wird die Tiefe der Kapillare und damit die Einschweißtiefe durch das sich einstellende Gleichgewicht aus eingestrahelter Leistung und Verlustleistung (z.B. reflektierte und transmittierte Strahlung, Verdampfung, Wärmeableitung) bestimmt und kann Aspektverhältnisse von bis zu 10:1 (Nahttiefe im Verhältnis zur Nahtbreite) erreichen. Bei Nahtschweißungen ist mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit eine Abnahme der Einschweißtiefe zu beobachten, die typische Form des Nahtquerschnittes bleibt jedoch erhalten. Niedrigere Schweißgeschwindigkeiten führen anfänglich zu einer Steigerung der Eindringtiefe bis zu einem relativen Maximum. Eine weitere Absenkung der Schweißgeschwindigkeit führt zu einer überproportionalen Zunahme der Schweißnahtbreite durch die von der Schmelzfront der Kapillare abgeleitete Wärme. Dieser Effekt ist durch eine deutliche Abnahme des Aspektverhältnisses Nahttiefe zu Nahtbreite auf Werte von etwa 3:1 gekennzeichnet.

### 3 Geräte- und Anlagentechnik

Im Bereich der Präzisionstechnik, Elektrotechnik und Medizintechnik ist das Mikroschweißen mit Laserstrahlung eine eingeführte Technologie. Bisher kommen in Laserstrahlschweißanlagen sowohl für das Punkt- als auch das Nahtschweißen oft gepulste Nd:YAG-Festkörperlaser mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  zum Einsatz. Häufig sind diese Systeme fasergekoppelt und wassergekühlt. Der damit erreichbare Fokusburchmesser liegt zwischen  $150 \mu\text{m}$  und  $2 \text{ mm}$ . Werden mit vergleichbaren Laserschweißanlagen dichte Liniennähte mit einer Überlappung der Einzelpulse größer 50% erzeugt, liegen die erreichbaren Schweißgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Spotdurchmesser und Pulsfrequenz im Bereich von 100 bis 500 mm/min. Charakteristisch für lampengepumpte gepulste Nd:YAG-Festkörperlaser ist die Möglichkeit bei relativ geringen mittleren Laserleistungen mit hohen Pulsspitzenleistungen zu arbeiten. Beim Pulsen wird die Laserleistung nur kurzzeitig für die Dauer von einigen ms zur Verfügung gestellt, unterbrochen durch eine Pulspause. Durch ein Überlappen der Einzelpulse wird die Schweißnaht

erzeugt. Die Intensität entspricht der beim cw-Betrieb, jedoch wird die mittlere Leistung herabgesetzt. Somit ergibt sich die Möglichkeit einer gezielten Steuerung des Energieeintrags in das Werkstück und eine geringere Streckenenergie.

Ein typisches Anlagenkonzept basierend auf einem im Pulsbetrieb arbeitenden lampengepumpten Nd:YAG-Festkörperlaser, der mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  und einer mittleren Ausgangsleistung von 120 W betrieben wird, zeigt Bild 3.



*Bild 3: Laserstrahlschweißanlage mit gepulstem Festkörperlaser und integriertem Drahtvorschubsystem LAFet®*

Das System verfügt über translatorische und rotatorische Achsen zur Bewegung des Laserkopfes bzw. des Werkstückes und einen Mikroskopeinblick. Der Schweißprozess kann damit sowohl über das Mikroskop als auch über eine integrierte Kamera auf einem externen

Monitor beobachtet werden. Für das Laserstrahlschweißen mit drahtförmigem Zusatzwerkstoff wurde das Standardschweißsystem der Firma Vision-Lasertechnik um ein automatisiertes System zur Förderung eines drahtförmigen Schweißzusatzwerkstoffes erweitert. Um einen artgleichen Zusatzwerkstoff automatisiert dem Laserstrahlschweißprozess zuführen zu können, wird das Drahtvorschubsystem LAFet®, der Firma Lasertechnik & Applikationen GmbH eingesetzt, das mit dem technologischen Ablauf des Schweißprozesses der verwendeten Laseranlage über eine angepasste Systemschnittstelle synchronisiert wird. Der drahtförmige Zusatzwerkstoff im Durchmesserbereich zwischen 250 µm und 500 µm wird von Kleinspulen des Typs MA 125 motorisch zur Schweißstelle gefördert. Dabei wird eine weitgehende Schlupffreiheit des Antriebs durch einen Formschluss der schrägverzahnten Antriebsrollen mit dem verwendeten Schweißdraht erreicht. Zur exakten Positionierung und Zuführung des drahtförmigen Zusatzwerkstoffes werden unterschiedlich dimensionierte und an den Drahtdurchmesser angepasste Kapillarrohre und Düsen eingesetzt. Für eine optimale Integration der Zusatzwerkstoffzuführung in den technologischen Ablauf des Laserstrahlschweißens verfügt das programmierbare Drahtvorschubsystem über einen Stellbereich für die Drahtvorschubgeschwindigkeit zwischen 0,1 und 150 mm/s, wobei für die Programmierung der Start- und Stoppsequenzen jeweils eine angepasste Schnellvorschub- bzw. rückzuggeschwindigkeit programmiert wird. Der technologische Ablauf des Laserstrahlschweißens mit Zusatzwerkstoff folgt damit einem an die jeweilige Schweißaufgabe angepassten Prozessdiagramm.

Die Weiterentwicklung im Bereich der Strahlquellen stellt dem Anwender heute Faser- und Scheibenlaser mit hervorragender Strahlqualität und skalierbarer Ausgangsleistung zur Verfügung, die für Applikationen des Mikronahtschweißens neue Ansätze im Hinblick auf gesteigerte Reproduzierbarkeit, höhere Prozessgeschwindigkeiten und verbesserte Qualität der lasergeschweißten Verbindungen ermöglichen. Diese modernen Strahlquellen verfügen über ideale Voraussetzungen für eine Integration in unterschiedliche Bearbeitungsanlagen, was sich deutlich in einer zunehmenden Marktakzeptanz äußert. Prinzipielle Vorteile der Faserlasertechnologie bestehen unter anderem in der hervorragenden und

stabilen Strahlqualität über den gesamten Leistungsbereich, einem wartungsarmen Betrieb, einer sehr hohen Verfügbarkeit, niedrigen Betriebskosten und einer höheren Produktivität der Anlagen. Damit finden diese verstärkt Zugang zu neuen Anwendungen.

Ausgehend von der hervorragenden Strahlqualität eines Faserlasers im Leistungsbereich bis 100 W können aufgrund seiner exzellenten Fokussierbarkeit auf Spotdurchmesser von einigen 10 µm bereits mit relativ geringer Strahlleistung Intensitäten auf der Werkstückoberfläche erzeugt werden, die ein Aufschmelzen und Verdampfen metallischer Werkstoffe ermöglichen. Somit lassen sich die qualitativen Vorteile von kontinuierlichen Schweißungen gegenüber gepulsten Schweißungen auch für das Mikronahtschweißen an medizintechnischen Komponenten nutzen und gleichzeitig die Energie und damit die thermische Belastung der zu schweißenden Bauteile reduzieren.

Für das Erreichen sehr hoher Bearbeitungsgeschwindigkeiten bieten sich ideale Voraussetzungen durch die Kombination des Faserlasers mit einer Scanneroptik. Der Vorteil des Einsatzes einer Scanneroptik liegt in der wesentlich höheren Positioniergeschwindigkeit des Laserstrahls auf dem Werkstück und der Möglichkeit auf mechanisch bewegte Achsen zur Erzeugung der Vorschubbewegung zu verzichten. Nebenzeiten für das Positionieren an Bauteilen mit mehreren Fügestellen lassen sich damit nahezu vermeiden. Die erreichbare Schweißgeschwindigkeit wird dabei weitestgehend durch die Laserparameter, die Werkstückabmessungen und den Werkstoff bestimmt und liegt je nach Applikation mindestens um eine Größenordnung über der mit gepulsten Systemen erreichbaren Geschwindigkeit.

Eine flexible Anlage zum Mikronahtschweißen mit Laserstrahlung zeigt Bild 4 mit dem von der Firma 3D-Micromac AG entwickelten laserbasierten Schweiß- und Schneidsystem microWELD, das gemeinsam mit der Professur Schweißtechnik der TU Chemnitz für Prozessentwicklungen im Bereich der Mikroverbindungstechnik genutzt wird. Das System mit aktiver Lasersicherheitszelle ist mit einer Faserlaserquelle YLS-1000-SM des Herstellers IPG Photonics mit 1000 W Ausgangsleistung ausgestattet und kann je nach Applikation mit einer

Festoptik oder einem Scannersystem zur Strahlfokussierung ausgerüstet werden. Zur Werkstückpositionierung verfügt die Maschine über ein hochdynamisches XY-Positioniersystem, das mit Z-Achsen zur Einstellung der Fokusslage der Optiken inkl. Scanner und einer auf der Arbeitsplattform frei positionierbaren Drehachse zur Bearbeitung rotationssymmetrischer Bauteile ergänzt wird. Für die Prozessbeobachtung sowie die Positionierung des Werkstücks im Laserfokus ist in der Maschine ein Kamerasystem mit entsprechenden Objektiven und LED-Beleuchtung integriert [2].



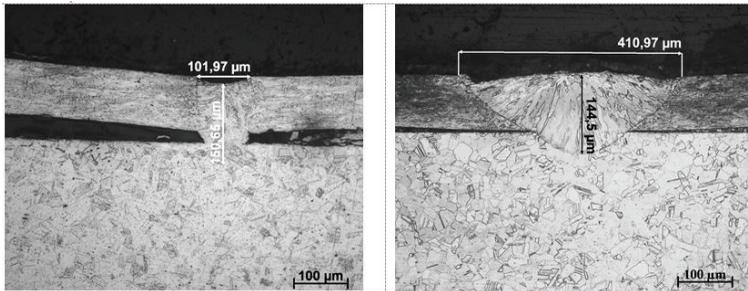
Bild 4: Laserbasiertes Schweiß- und Schneidsystem microWELD [2]

#### **4 Experimentelle Untersuchungen zum Laserstrahlmikroschweißen medizintechnischer Komponenten**

Mikroschweißungen von Stumpfstößen als I-Naht oder Stirnflachnaht erfordern beim Einsatz von Faserlasern aufgrund der sehr guten Fokussierbarkeit die Einhaltung kleinster Bauteiltoleranzen im Bereich der Bauteilfertigung. So bedingen die mit den untersuchten Faserlasern erreichten Nahtbreiten im Bereich von 40 bis 100  $\mu\text{m}$  die Einhaltung von Spaltmaßen deutlich kleiner als 10  $\mu\text{m}$  und ziehen somit einen hohen Aufwand bei der Herstellung, Handhabung und Montage der Einzelteile der zu schweißenden Baugruppen nach sich. Zahlreiche Prozesse der Fertigungstechnik arbeiten dabei bereits in Genauigkeitsbereichen, die einen erhöhten Aufwand erfordern bzw. können in einer Serienfertigung mit den zur Verfügung stehenden Halbzeugen nicht wirtschaftlich eingesetzt werden.

Ein optimales Einsatzfeld für das Mikronahtschweißen mit einem Single-Mode-Faserlaser stellen unter den genannten Bedingungen Schweißungen am Überlappstoß bzw. am verdeckten T-Stoß dar. Hier können die Vorteile der außerordentlich guten Strahlqualität der verwendeten Strahlquelle optimal genutzt werden. Die Fokussierung der Strahlung auf Spotdurchmesser im Bereich von 25  $\mu\text{m}$  bis 100  $\mu\text{m}$  ermöglicht in Abhängigkeit von der eingesetzten Brennweite des F-Theta-Objektivs bereits mit niedrigen Laserstrahlleistungen die Realisierung von Leistungsdichten auf der Bauteiloberfläche, die einen stabilen Tiefschweißprozess beim Laserstrahlmikroschweißen ermöglichen. In den durchgeführten Schweißversuchen wurden Aspektverhältnisse (Nahtbreite / Nahttiefe) von bis zu 1: 4 sicher erreicht. Allerdings haben die Versuche auch gezeigt, dass insbesondere die Verarbeitung sehr dünner Folien im Bereich von 10 bis 25  $\mu\text{m}$  für eine prozesssichere, fehlerfreie Verarbeitung ein ausgereiftes und speziell an die jeweilige zu schweißende Geometrie optimal angepasste Spanntechnik erfordert, um Fehlstellen beim Schweißen sicher auszuschließen.

Die in Bild 5 wiedergegebenen Querschliffe zeigen eine im Überlappstoß geschweißte Verbindung zwischen den Foliendicken 100  $\mu\text{m}$  (oben) und 500  $\mu\text{m}$  (unten), die mittels Faserlaser und Scanneroptik (linkes Bild) und im Vergleich dazu mit einem gepulsten Festkörperlaser und Direktoptik (rechtes Bild) hergestellt wurden.



**Bild 5:** *Querschliff Versuchsschweißungen I-Naht am Überlappstoß links: geschweißt mit Faserlaser und Scanneroptik ( $f = 160 \text{ mm}$ ;  $P_L = 84 \text{ W}$ ;  $v_S = 0,15 \text{ m/s}$ ) rechts: geschweißt mit gepulstem Festkörperlaser und Direktoptik*

Mit Blick auf die zu realisierenden Anwendungen werden die Vorteile einer Kombination aus Faserlaser und Scanneroptik deutlich. Insbesondere die Möglichkeit, der Vorschubbewegung beim Mikroschweißen eine Oszillationsbewegung quer zur Schweißrichtung zu überlagern, ermöglicht einen wirtschaftlichen Einsatz des Mikroschweißens mit einem hochfokussierten Faserlaser auch für Anwendungen mit größeren Fügeiteiltoleranzen. Die Darstellung der Nahtoberflächen in Bild 6 zeigt die Ausbildung der Nahtberraupe beim Schweißen mit einem Faserlasersystem mit überlagerter Oszillationsbewegung (Bild 6b) und einer kontinuierlichen Schweißung ohne Oszillation (Bild 6c) gegenüber der Schweißung mit einem gepulsten Festkörperlaser (Bild 6a).

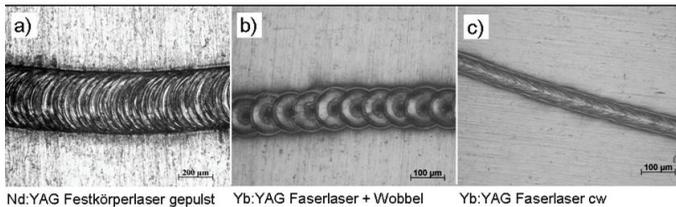


Bild 6: Ausbildung der Nahtberraupe beim Laserstrahlmikroschweißen

Durch die eingesetzte Scanneroptik ist eine Vielzahl von Oszillationsfiguren mit sehr hoher Dynamik realisierbar. Exemplarisch ist in Bild 6b eine kreisförmige Figur gezeigt. Der entsprechende Bewegungsablauf wird auch als Wobbeln bezeichnet. Im Ergebnis der durchgeführten Versuche zum Laserstrahlschweißen mit überlagerter Oszillationsbewegung ist es gelungen, die Prozesssicherheit beim Mikrolaserstrahlschweißen mit einem Faserlaser wesentlich zu verbessern und einen thermisch optimierten Fügeprozess einzustellen. Wichtige Prozesskenngrößen der einzelnen Technologievarianten des Laserstrahlmikroschweißens die maßgeblich das Schweißergebnis beeinflussen, veranschaulicht die schematische Gegenüberstellung in Bild 7.

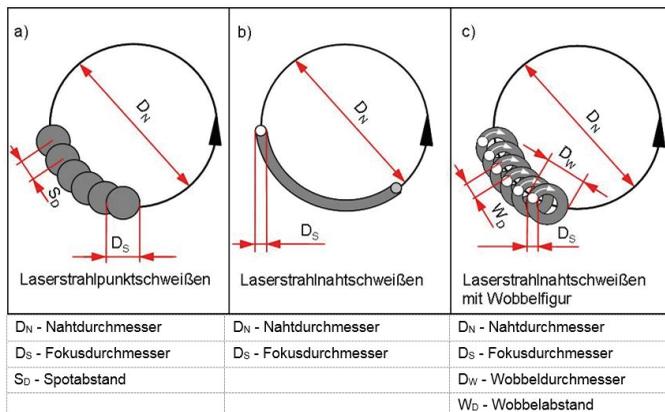


Bild 7: Technologievarianten Laserstrahlmikroschweißen schematisch

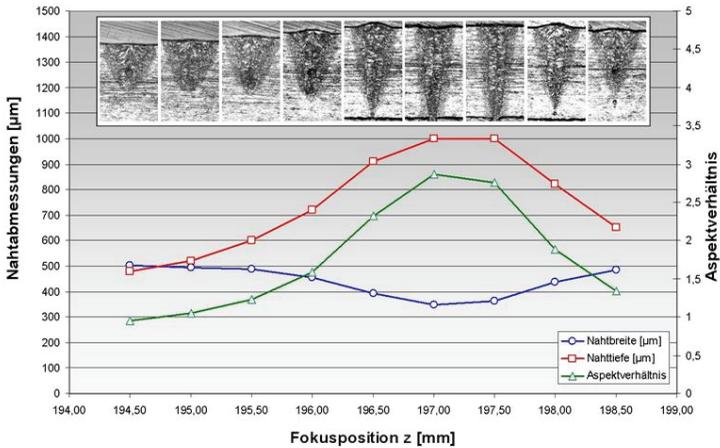


Bild 8: Schweißversuche mit Variation der Fokusslage Faserlaser IPG YLR-1000-SM / Fokussierung  $f = 200 \text{ mm}$  /  $P_L = 300 \text{ W}$  /  $v_S = 6 \text{ m/min}$

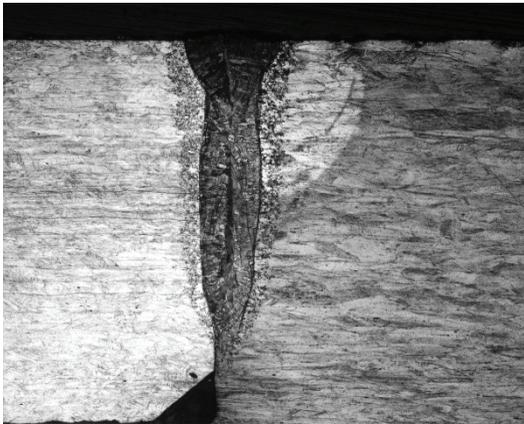


Bild 9: Querschliff einer Einsteckverbindung an einem Präzisionsrohr geschweißt mit Faserlaser IPG YLR-1000-SM Fokussierung  $f = 90 \text{ mm}$  /  $P_L = 200 \text{ W}$  /  $v_S = 6 \text{ m/min}$

Die Ergebnisse von Einschweißversuchen (siehe Bild 8) und I-Nähten am Parallelstoß für Präzisionsrohre aus austenitischem CrNi-Stahl im Durchmesserbereich bis 4 mm und Wandstärken bis 1000  $\mu\text{m}$  (siehe Bild 9) verdeutlichen die technologischen Möglichkeiten für das Laserstrahlmikroschweißen mit einem Faserlaser.



*Bild 10: Laserstrahlmikroschweißung einer I-Naht am Parallelstoß an einer Rohreinsteckverbindung mit einem gepulsten Festkörperlaser*

Im Vergleich zu den Schweißversuchen mit einer Faserlaserstrahlquelle zeigt Bild 10 die Ergebnisse von Schweißversuchen einer Einsteckverbindung zweier Präzisionsrohre mit einem Außendurchmesser von 1,5 mm (Innenrohr) und 2,5 mm (Hülse), die als I-Naht am Parallelstoß mit dem vorgestellten gepulsten Festkörperlaser geschweißt wurden. Durch die Variation des Fokusbereichs können sowohl die Energiedichte als auch die Ausdehnung der Fügezone in einem relativ großen Bereich variiert werden, um eine optimale Anpassung an vorhandene Bauteiltoleranzen zu erreichen. Im vorliegenden Fall ist es erforderlich, ein Spiel der Einsteckverbindung von etwa 80  $\mu\text{m}$  zu überbrücken. Außerdem ist darauf zu achten, dass der Querschnitt des Innenrohres durch den Schweißprozess nicht beeinträchtigt wird und die Kante nicht verrundet. Dies kann mit dem gepulsten Festkörpersystem erreicht werden. Allerdings wurde deutlich, dass der minimal mögliche Fokusbereich von 250  $\mu\text{m}$  für die gezeigte Anwendung die obere Grenze darstellt, bei der nutzbare Prozessparameter ermittelt werden konnten. Auffällig ist die, für Schweißungen mit gepulsten lampengepumpten Systemen typische relativ grobe Schuppung der Nahtberräumen.

## 5 Bearbeitungsstrategien beim Laserstrahlmikroschweißen

Gegenüber Laserstrahlschweißsystemen mit gepulsten Festkörperlasern und einer Direktoptik ermöglichen Faserlaser in Kombination mit einer Scanneroptik neben der gesteigerten Flexibilität auch wesentlich höhere Schweiß- und Prozessgeschwindigkeiten. Die Gegenüberstellung der Prozesszeiten für das Schweißen typischer Verbindungen an Kanülen aus dem Bereich der Medizintechnik unter Einsatz der beiden Anlagensysteme belegt dies deutlich. Neben den wesentlich höheren Schweißgeschwindigkeiten konnten vor allem die Nebenzeiten für das Einlegen der Einzelteile, das Positionieren in Schweißposition und die Entnahme der Baugruppen deutlich reduziert werden. Dies wird möglich, da mit dem Einsatz der Scanneroptik in Verbindung mit einer cw-Faserlaser-Strahlquelle die Bearbeitung von bis zu 100 vormagazinierten und vormontierten Baugruppen im Bearbeitungsfeld der Scanneroptik ohne zusätzliche Positionier- oder Arbeitsbewegungen mechanischer Achsen mit hoher Präzision und ohne dynamische Einschränkungen prozesssicher realisiert werden kann. Die beiden technologischen Abläufe sind schematisch in Bild 11 gegenübergestellt.

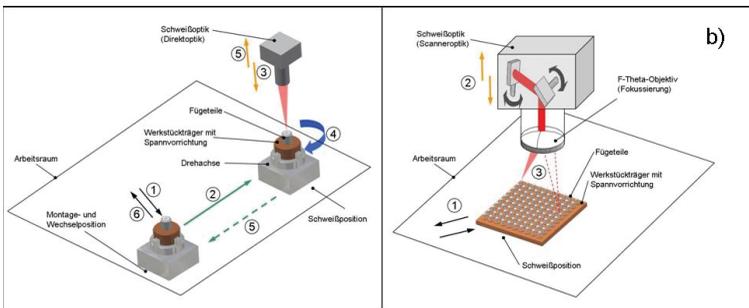


Bild 11: Technologische Abläufe beim Laserstrahlmikroschweißen von Baugruppen der Medizintechnik / a) konventionell mit gepulstem Festkörperlaser und Direktoptik; b) mit Faserlaser und Scanneroptik

Konventionell läuft der Schweißprozess entsprechend der Darstellung in Bild 11a wie folgt ab. Die beiden mit dem Laser zu verschweißenden Teile I und II sind geordnet, und vormontiert in einer Werkstückaufnahme zu Paketen von jeweils 100 Stück richtungsgebunden abgelegt. In Schritt 1 wird jeweils eine vormontierte Baugruppe aus der Werkstückaufnahme entnommen und in die auf einer verfahrbaren Drehachse angeordnete Spannvorrichtung eingelegt und gespannt. Die Drehachse mit Spannvorrichtung befindet sich dabei in Montage- und Wechselform. Mit Schritt 2 verfährt diese mittels Linearachsen in Schweißposition. Schritt 3 positioniert die Schweißoptik im entsprechenden Abstand zur Werkstückoberfläche. Im Verlauf von Schritt 4 erfolgt die eigentliche Laserstrahlschweißung zwischen Teil I und Teil II durch Drehen des gespannten Werkstücks unter der fest positionierten Direktoptik. Durch Verfahren der Linearachsen werden in Schritt 5 sowohl die Laseroptik in Parkposition als auch die Drehachse mit geschweißter Baugruppe in Wechselform verfahren. In Schritt 6 wird die geschweißte Baugruppe aus der Spannvorrichtung entnommen und nach Sichtprüfung geordnet abgelegt. Die Abfolge der einzelnen Tätigkeitsschritte und deren Zeitbedarf sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Durch die veränderte Bearbeitungsstrategie mit Faserlaser und Scanneroptik ergeben sich für die zu realisierende Schweißvorrichtung ebenfalls geänderte Voraussetzungen. Die erforderliche Präzision der Aufnahmebohrungen in der Grundplatte des Bauteilmagazins kann mit etablierten Fertigungstechnologien ohne Probleme sichergestellt werden. Die Indexierung der Magazinplatten mit Kegelstiften und entsprechenden Bohrungen im Arbeitsbereich der Anlage gewährleistet den einfachen und präzisen Austausch der Werkstückträger in kurzer Zeit. Da mit Einsatz des Scannersystems die Notwendigkeit entfällt, die zu schweißende Baugruppe zur Realisierung der Schweißbewegung mittels einer schnellen Rotationsachse unter der Schweißoptik zu bewegen, können die Vorrichtungskosten gesenkt werden, was insbesondere im Hinblick auf das wechselnde Teilespektrum von Vorteil ist. Der technologische Ablauf gestaltet sich entsprechend Bild 11b wie folgt.

*Tabelle 1: Arbeitsschritte/ Zeitbedarf Schweißtechnologie konventionell*

Nr.	Arbeitsschritt	Zeit / Teil	Zeit / Los	Kommentar
1	Speichern (ungeordnet Teil 1 und 2)	0,2 s	20 s	Manuell
2a	Ordnen Teil 1	2 s	200 s	Manuell
2b	Eingangskontrolle			während Ordnen
2c	Platzieren in Drehachse	2 s	200 s	Manuell
3a	Ordnen Teil 2	2 s	200 s	Manuell
3b	Eingangskontrolle			während Ordnen
3c	Montage mit Teil 1 auf Drehachse	3 s	300 s	Manuell
4	Positionieren in Schweißposition	4 s	400 s	Automatisch
5	Fügen (Laserstrahlschweißen)	5 s	500 s	Automatisch
6	Positionieren in Entnahmeposition	4 s	400 s	Automatisch
7	Entnehmen Baugruppe	1 s	100 s	Manuell
8	Ausgangskontrolle (Sichtprüfung)	2 s	200 s	Manuell
9	Ablegen und Verpacken (geordnet)	0,6 s	60 s	Manuell
<b>Ges.</b>		<b>25,8 s</b>	<b>2580 s</b>	<b>43 min</b>

In Schritt 1 wird das mit 100 Stück vormontierten Baugruppen aus Teil I und Teil II bestückte Werkstückträgermagazin in den Arbeitsraum des Laserstrahlschweißsystems eingebracht. Anschließend wird in Schritt 2 die Scanneroptik mit Objektiv in Arbeitsposition verfahren. Es schließt sich in Schritt 3 das Laserstrahlschweißen der 100 Baugruppen (ohne Verfahren mechanisch bewegter Achsen) an. Anschließend wird die Scanneroptik mit Objektiv zurück in Parkposition verfahren, das Werkstückträgermagazin mit den geschweißten Baugruppen aus dem Arbeitsraum entnommen und gegen ein vollständiges, mit ungeschweißten Baugruppen bestücktes, neues Magazin ausgetauscht. Die Abfolge der einzelnen Tätigkeitsschritte und deren Zeitbedarf sind in Tabelle 2 aufgelistet.

*Tabelle 2: Arbeitsschritte / Zeitbedarf Schweißtechnologie Faserlaser + Scanneroptik*

Nr.	Arbeitsschritt	Zeit / Teil	Zeit / Los	Kommentar
1	Speichern (ungeordnet Teil 1 und 2)	0,2 s	20 s	Manuell
2a	Ordnen Teil 1	2 s	200 s	Manuell
2b	Eingangskontrolle			während Ordnen
2c	Platzieren in Magazin	2s	200 s	
3a	Ordnen Teil 2	2 s	200 s	Manuell
3b	Eingangskontrolle			während Ordnen
3c	Montage mit Teil 1 in Magazin	3 s	300 s	Manuell
4	Positionieren in Schweißposition	0,6 s	60 s	Manuell
5	Fügen (Laserstrahlschweißen)	0,063 s	6,3 s	Automatisch
6	Entnahme Magazin aus <u>Schweißpos.</u>	0,6 s	60 s	Manuell
7	Ausgangskontrolle (Sichtprüfung)	0,6 s	60 s	Manuell
8	Entnehmen Baugruppe aus Magazin	1 s	100 s	Manuell
9	Ablegen und Verpacken (geordnet)	0,6 s	60 s	Manuell
<b>Ges.</b>		<b>12,663 s</b>	<b>1266,3s</b>	<b>20,05 min</b>
<b>Ges.</b>	<b>wenn 1 – 3 u. 7 – 9 hauptzeitparallel</b>	<b>1,263 s</b>	<b>126,3 s</b>	<b>2,2 min</b>

Der Vergleich der beiden Technologievarianten macht deutlich, dass die größten Potenziale für eine Optimierung der Schweißtechnologie in der Reduzierung der Nebenzeiten liegen. Hier gelingt durch den Einsatz einer Scanneroptik gegenüber der Direktoptik in Kombination mit einem Werkstückträgersystem zur Magazinierung von jeweils 100 Teilen (1 Los) die Reduzierung der Bearbeitungszeit je Los auf etwa 50 % des Zeitbedarfs. Werden bei entsprechenden Fertigungsstückzahlen die Arbeitsschritte 1 bis 3 sowie 7 bis 9 hauptzeitparallel durchgeführt, kann die Auslastung der Laserbearbeitungsstation weiter verbessert werden. Die Maschinenbelegung sinkt von 20 min je Los auf etwa 2 min je Los.

Der gleichzeitige Einsatz eines Faserlasers in Kombination mit der Scanneroptik ermöglicht theoretisch eine Steigerung der Schweißgeschwindigkeit von 1 mm/s auf 1000 mm/s, also um den Faktor 1000 beim Schweißen im cw - Betrieb mit einer Nahtbreite zwischen 50 und 100 µm. Die Toleranzsituation der Baugruppe erfordert jedoch zur

qualitätsgerechten und reproduzierbaren Laserschweißung der Baugruppe den Einsatz der Wobbel – Technologie mit Nahtbreiten zwischen 100 und 250  $\mu\text{m}$ . Damit ergeben sich reale Schweißgeschwindigkeiten von 500 mm/s.

Wie der Vergleich der technologischen Varianten zeigt, wirkt sich die Steigerung der Schweißgeschwindigkeit in der vorliegenden Applikation aufgrund des hohen Nebenzeitenanteils nicht so gravierend auf die Fertigungszeit je Los aus. Aus dem Einsatz des Faserlasers ergeben sich allerdings gegenüber dem gepulsten Festkörperlasersystem Vorteile hinsichtlich der Flexibilität, der Nahtqualität und der erreichbaren Festigkeitswerte, durch eine verbesserte Auslastung des zur Verfügung stehenden Bauteilvolumens für die Realisierung der Verbindung.

## **Literatur**

- [1] Ready, J. (Hrsg.): LIA Handbook of Laser Materials Processing, USA 2001, ISBN 0-912035-15-3
- [2] 3D-Micromac: Betriebsanleitung microWELD – Laserbasiertes Schweiß- und Schneidsystem. S.-Nr.: 00346/ Version 10/2014, Chemnitz

**CEWUS Chemnitzer Werkstoff-  
und Oberflächentechnik GmbH**

**Neefestraße 80a**

**09119 Chemnitz**

**Internet: [www.cevus.de](http://www.cevus.de)**

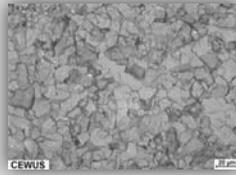
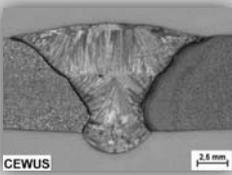
**E-Mail: [info@cevus.de](mailto:info@cevus.de)**

# Akkreditiertes Werkstoffprüflabor

- **Mechanisch-technologische Prüfungen**  
Zug – Druck – Härte – Kerbschlag ...
- **Metallographische Untersuchungen**
- **Schweißnahtprüfungen**  
Verfahrensprüfungen – Arbeitsproben ...
- **Zerstörungsfreie Prüfungen**  
UT – RT/DR – MT – PT – VT – ET ...
- **Röntgenfeinstrukturuntersuchungen**
- **Spektrometeranalysen**
- **Schadensanalysen**
- **Verschleißuntersuchungen**
- **Bauteilprüfungen**
- **Beratung, Schulung**



RT (DR) an Gussteil



Röntgenanlage mit digitalem Livebild

Laborleiter: Dr.-Ing. Matthias Hockauf  
Telefon: +49 (0)371 651180-151  
Fax: +49 (0)371 651180-150  
E-Mail: [laborleiter@cevus.de](mailto:laborleiter@cevus.de)

Geschäftsführer: Dr.-Ing. Peter Kaiser  
Telefon: +49 (0)371 651180-102  
Fax: +49 (0)371 651180-100  
E-Mail: [peter.kaiser@cevus.de](mailto:peter.kaiser@cevus.de)



## **Entwicklung eines neuartigen Antriebs für Widerstandsschweißzangen**

**Jonny Kaars, M.Eng., Prof. Dr. Peter Mayr**

Technische Universität Chemnitz, Professur Schweißtechnik

### **Kurzfassung**

Die Bereitstellung von Schweißkräften über 5 kN war für Widerstandspunktschweißzangen mit Pneumatikantrieb seit jeher ein Problem. Es wird eine einfache Möglichkeit der Kraftverstärkung eines Schweißzangenantriebes mittels Kurvengetriebe vorgestellt, welche Schweißkräfte bis zu 8 kN bereitstellen kann und dabei mit einer konventionellen Luftversorgung von 6 bar auskommt. Im Betrieb verhält sich der vorgestellte Mechanismus wie ein einfacher Pneumatikzylinder, ein zusätzlicher Eingriff oder eine Regelung ist nicht erforderlich. Das vorteilhaft weiche und schnelle Nachsetzverhalten pneumatischer Schweißzangenantriebe wird durch den Kraftverstärkungsmechanismus nicht beeinträchtigt. Darüber hinaus kann das Antriebssystem eine kompaktere Gestaltung der Schweißzange unterstützen, da Antriebszylinder mit kleinerem Durchmesser verwendet werden können. Der Aufbau und die Wirkungsweise eines solchen Antriebes im Zusammenspiel mit der gesamten Schweißzangenkonstruktion werden am Beispiel eines realisierten Prototyps einer XC-Zange dargestellt.

## 1 Einführung

Das Thema Energieeinsparung in Herstellung und Betrieb von Fahrzeugen ist zu einer zentralen Aufgabe unserer Zeit geworden. Um eine weitere Verringerung des Kraftstoffverbrauches der Fahrzeuge zu erreichen, ist die Massenreduktion der Fahrzeugkarosserie eine wichtige Maßnahme. Andererseits wächst das Bedürfnis nach Insassenschutz beim Unfall stetig, wodurch höhere Festigkeiten der Karosserie erforderlich werden. Intensiver Stahlmischbau unter Verwendung hoch- und höchstfester Stahlsorten ist der derzeit dominierende Ansatz zur Bewältigung dieses Zielkonfliktes. Die besonderen Eigenschaften hochfester Stahlsorten führen zu besonderen Anforderungen an die Schweißausrüstung. Diesen Anforderungen wird mit dem nachfolgend vorgestellten Prototyp Rechnung getragen.

Beim Widerstandspunktschweißen, dem in der automobilen Massenfertigung dominierenden Fügeverfahren, wächst die benötigte Elektrodenkraft etwa proportional zur Zugfestigkeit der verschweißten Bleche. Da die mit vergrößerter Elektrodenkraft gleichsam vergrößerte Flächenpressung an den Kontaktstellen der Schweißstelle zu einer Abminderung der Übergangswiderstände im Prozess führt, kann ein höherer Strombedarf für eine erfolgreiche Schweißung die Folge sein. Insbesondere an verzinkten Blechen kann dieser Effekt beobachtet werden [1]. Featuraluminierungen und organische Beschichtungen vergrößern die Übergangswiderstände und deren Streuung [1]. Metallurgische Effekte wie Aufhärtung des Schweißgutes und Erweichungen durch Anlasseneffekte in der Wärmeeinflusszone machen eine präzise Prozessführung erforderlich [2]. Zusammengefasst führen die werkstofflichen Besonderheiten hochfester Stahlgüten zu einer deutlichen Schmälerung des Schweißbereiches. Demzufolge müssen negative Einflüsse von der Maschinenseite auf den Schweißprozess kritischer als bei normalfesten Stahlgüten bewertet werden.

Insbesondere an die mechanische Konstruktion der Schweißzange werden daher erhöhte Anforderungen gestellt, da diese zunächst in der Lage sein muss, die erhöhte Elektrodenkraft bereitzustellen, dabei jedoch keinen vergrößerten relativen Kappenversatz aufweisen darf.

## 2 Neuartiger Schweißzangenantrieb

### 2.1 Lösungsansatz

Charakteristisch für Antriebe der Füge-technik und so auch für Antriebe von Widerstandspunktschweißzangen ist, dass die Kraft in der Regel nur über einen kurzen Hub benötigt wird. Wird mehr Kraft benötigt, so setzt man einen Zylinder mit größerem Kolbendurchmesser ein.

Tabelle 1 stellt Pneumatikzylinder gleicher Hubarbeit gegenüber. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Preis und die Masse des Zylinders überproportional zu Kraft wachsen, während der benötigte Hub entsprechend abnimmt.

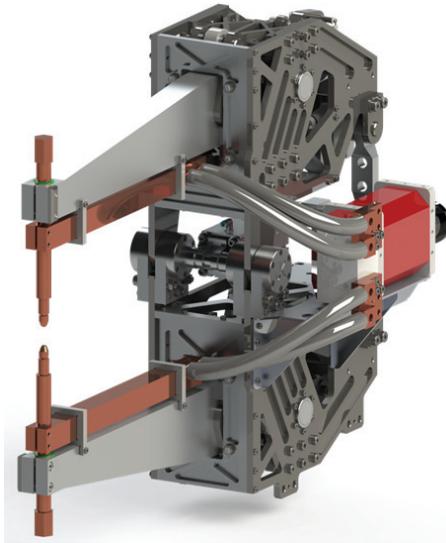
*Tabelle 1: Vergleich von Pneumatikzylindern gleicher Hubarbeit*

<b>Kolben-Ø [mm]</b>	<b>Kraft [kN]</b>	<b>Hub [mm]</b>	<b>Masse [kg]</b>	<b>relativer Preis</b>
63	1,87	80	2,2	40%
125	7,36	20	7,6	100%
250	29,45	5	31,7	350%

Demnach ergibt sich die Möglichkeit, die geringe Kraft eines kleinen langhubigen Zylinders zu verstärken, um so eine große Kraft über einen kurzen Hub bereitstellen zu können. Zur konstruktiven Umsetzung dieses Ansatzes wurde ein Kurvengetriebe gewählt. So ergibt sich der Vorteil, dass die Übertragungsfunktion des Getriebes völlig frei ausgelegt werden kann. Des Weiteren erlauben Kurvengetriebe eine recht freie konstruktive Ausgestaltung ihrer Komponenten und weisen eine hohe Funktionsintegration auf. Dies kommt einer leichten Ausführung der Schweißzange, einer einfachen Herstellung der Einzelteile und einer kompakten Bauweise sehr entgegen.

## 2.2 Realisierter Prototyp

Auf Basis der vorstehenden Überlegungen wurde ein Prototyp einer Schweißzange mit Kurvengetriebeantrieb mit nachstehenden Kennwerten konstruiert und gefertigt, Abbildung 1.



<i>Elektrodenkraft</i>	8 kN
<i>Luftbedarf</i>	6 bar
<i>Ausladung</i>	500 mm
<i>Öffnungsweite</i>	265 mm
<i>Krafthub</i>	30 mm
<i>Schweißstrom (DC)</i>	20 kA
<i>Stromquelle</i>	Inverter, 10 kHz
<i>Masse (ohne Sek.-Stromkreis)</i>	145 kg

Abbildung 1: Prototyp der XC-Schweißzange und dessen Kennwerte

Es ist zu beachten, dass unter dem Begriff „Krafthub“ der Hub des Kurvengetriebes verstanden wird. Dieser ist im Prototyp vollständig wälzgelagert, um die Reibung zu minimieren und eine langlebige Konstruktion sicherzustellen. Dem Grundkonzept nach handelt es sich bei der Schweißzange um eine XC-Zange wie in [3] dargestellt. Bei diesem Maschinenkonzept sind die Anfahrbewegung der Elektroden zum Blech und die Bewegung zum Kraftaufbau voneinander getrennt. Der Kraftaufbau erfolgt rein translatorisch.

### 3 Ausgewählte Erprobungsergebnisse

Der Schweißzangenprototyp wurde zahlreichen Tests unterzogen, dabei stand zunächst die Ermittlung des Getriebeverhaltens im Vordergrund. Bereits bei einem Zylinderdruck von 5,5 bar lieferte die Schweißzange die projektierte Elektrodenkraft von 8 kN. Somit verstärkte das Kurvengetriebe die nominelle Zylinderkraft mit 1,5 kN Elektrodenkraft je bar Zylinderdruck. Der Kraft-Zylinderdruck-Zusammenhang war linear. Das berechnete Übertragungsverhalten des Kurvengetriebes wurde bestätigt.

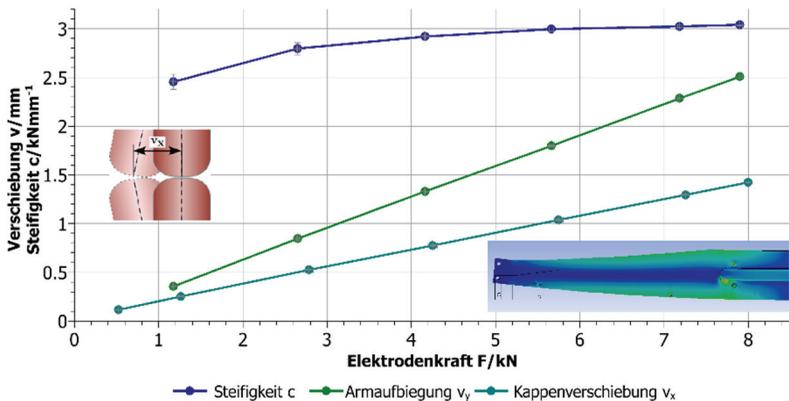


Abbildung 2: statische Kennwerte des Prototyps der XC-Zange

Von weiterem Interesse war ferner die Aufbiegung der Zangenarme unter der Betriebslast, d.h. der Betrag der Maschinensteifigkeit, Abbildung 2.

Für übliche Betriebskräfte oberhalb von 4 kN wurde eine Zangensteifigkeit von etwa 3 kN/mm an der Elektrodenkappe gemessen. Dieser Wert ist durchaus als vergleichsweise hoch einzuschätzen. Die fallende Steifigkeitskennlinie für sinkende Elektrodenkräfte wird auf das nichtlineare Kontaktierungsverhalten der eingesetzten Wälzlagerungen zurückgeführt.

Zur Bewertung der dynamischen Eigenschaften des Prototyps der Schweißzange wurden instrumentierte Schweißungen unter anderem am höherfesten Dualphasenstahl HCT780X+Z in 1,5 mm Blechdicke durchgeführt. Aufgezeichnet wurden Elektrodenkraft und -weg, Schweißstrom, Schweißspannung sowie der Widerstand der Schweißstelle.

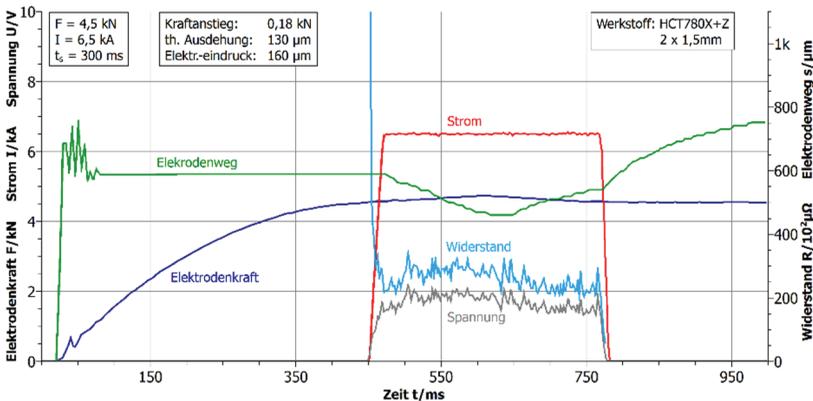


Abbildung 3: aufgezeichnete Prozessgrößen während einer Schweißung mit der XC-Zange

Der Zahlenwert des Elektrodenweges ist als invertierter Abstand der Schweißelektroden zu verstehen; zunehmende Werte bedeuten Einsinken. Mit den verwendeten Schweißparametern wurde ein Linsendurchmesser von 5,7 mm erzielt. Die Verbindung versagte im Scherzug durch Ausknöpfen. In der Abbildung 3 ist eine Ausdehnung der Fügepartner ab Aufschaltung des Schweißstromes zu erkennen, welche bei  $t = 650$  ms mit  $130 \mu\text{m}$  ihr Maximum erreicht. Aufgrund der erweichenden Fügestelle beginnen die Elektroden daraufhin in das Blech einzusinken. Es verbleibt am Ende der Schweißung ein (summierter) Elektrodeneindruck von  $160 \mu\text{m}$ . Die Elektrodenkraft wurde praktisch prellfrei ohne Überschwingen aufgebaut und erreicht nach 425 ms den Nennwert. Aufgrund der Ausdehnung der Fügepartner wurde ein Anstieg der Elektrodenkraft um  $0,18$  kN respektive 4 % des Nennwertes festgestellt. Ein Kräfteinbruch

während des Einsinkens der Elektroden wurde nicht beobachtet. Dieses Verhalten ist als sehr positiv zu bewerten.

#### 4 Zusammenfassung

Es wurde ein Prototyp einer Widerstandspunktschweißzange nach dem XC-Konzept entwickelt und seine Eigenschaften in statischer sowie dynamischer Hinsicht ermittelt. Die Untersuchung kam zu folgendem Ergebnis:

- Mittels eines Kurvengetriebes können pneumatisch angetriebene Schweißzangen große Schweißkräfte schon bei geringem Versorgungsdruck bereitstellen.
- XC-Schweißzangen mit hoher Steifigkeit sind in praktisch relevanten Abmessungen und Leistungsdaten herstellbar. Die Maschinenmasse vergrößert sich nur wenig.
- Das dynamische Verhalten der Schweißzange während der Schweißung wird durch das gewählte Antriebssystem verbessert.

#### Literatur

- [1] WESLING, VOLKER; KEITEL, STEFFEN: *Untersuchungen zum Widerstandspunktschweißen von Feinblechen aus neuentwickelten höher- und höchstfesten Stahlwerkstoffen* (Forschungsbericht Nr. AiF-12.618N). Clausthal / Duisburg : TU Clausthal / SLV Duisburg, 2003
- [2] LARSSON, JOHNNY K.: Product and Process Aspects When Welding Press-Hardened Automotive Components. In: *Advances in Welding Science and Technology*. Antalya, 2011
- [3] KAARS, JONNY; MAYR, PETER: Resistance Spot Welding Gun with Force Amplification. In: *International Symposium on Advances in Resistance Welding*. Atlanta, GA, USA, 2013



# **Verfahren zur parameterbasierten Auslegung ebener Kurvenschrittgetriebe mit anwendungsoptimierten Eigenschaften**

**Andreas Heine, Maik Berger**

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau,  
Professur Montage- und Handhabungstechnik

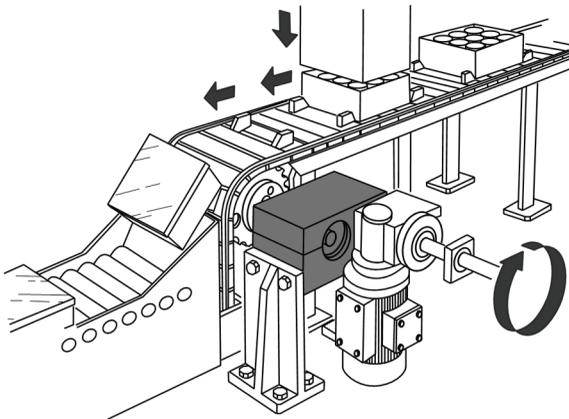
## **1 Einleitung**

Zur Erzeugung periodisch ungleichförmiger Bewegungen, beispielsweise von Schritt- und Pendelbewegungen, werden heute trotz hoher Investitionskosten so genannte Motion Control Systeme (MCS) bevorzugt eingesetzt. Steht die Anlagenflexibilität infolge ganz unterschiedlicher Bewegungsanforderungen im Focus, so ist dem nichts entgegenzusetzen. Andernfalls führt die Frage nach der Verbindung von Leistung und Wirtschaftlichkeit nicht zwangweise zum Einsatz rein elektronischer Antriebslösungen. Die Erzeugung von intermittierenden Bewegungen für periodische Bewegungsfolgen mit geringen Zykluszeiten und hohen Genauigkeitsanforderungen gelingt durch den Einsatz von Kurven- und Kurvenschrittgetrieben mechanisch einfach, anlagentechnisch zuverlässig und investitionsseitig kostenoptimal.

Dabei ist die Intelligenz dieser Antriebssysteme in den Bewegungsgesetzen der genutzten Kurvenscheiben gespeichert. Optimale mathematische Übertragungsfunktionen mit bestmöglichen kinematischen Kennwerten sind dabei ein entscheidendes Kriterium dieser Antriebsglieder, um z. B. für schnell ablaufende Verarbeitungs- und Verpackungsabläufe oder Fertigungs-, Montage- und Transportprozesse zwangläufige, exakte und schwingungsarme Bewegungen am Abtrieb, z. B. bei getakteten Bewegungsfolgen, zu erzeugen (Bild 1). Die Anforderungen an die erforderliche Steuerungs- und Regelungstechnik sind, sofern keine flexible Bewegungsmodifikation gefordert ist, i. A. nicht kostenrelevant.

Infolge ihres augenscheinlich einfachen Aufbaus und der kompakten Bauweise werden z. B. Schrittgetriebe seit langem von namhaften

Herstellern in Baureihen für unterschiedliche Schrittzahlen und Leistungsklassen kommerziell erfolgreich angeboten, jedoch nur partiell öffentlich weiterentwickelt. Käufer dieser Getriebe bewegen sich anbieterbezogen damit auf einem ähnlichen Niveau. Die erreichbaren Schrittbewegungen und Taktzeiten, oftmals die wettbewerbsentscheidenden Parameter einer Maschine oder Anlage, werden dadurch vordefiniert. Bestehen Forderungen bzgl. Leistungsparametern oder Bauraumrestriktionen, die durch gängige Baureihen der Herstellerkataloge nicht abgedeckt werden, ist das für viele Anwender problematisch. Die gezielte Auslegung solcher Sonderbauformen gestaltet sich immer noch sehr aufwendig, da kein effizientes Verfahren zum schnellen Festlegen optimaler Hauptabmessungen bekannt ist. Der aktuell beschrittene Weg der schrittweisen Optimierung, auch bekannt als „Synthese durch iterative Analyse“, ist bzgl. eines Zielkriteriums und der damit verbundenen Parametervariationen überschaubar, jedoch für den Fall mehrerer konträrer Zielkriterien zeitaufwändig und nur durch getriebetechnisches Fachwissen lösbar.



*Bild 1: Beispiel eines Schrittgetriebes zum intermittierenden Betrieb eines Transportbandes einer Verpackungsanlage*

Ausgehend von der beschriebenen Ausgangssituation widmet sich der vorliegende Beitrag nun einer neuen Betrachtungsweise der für den Entwurfsprozess entscheidenden Parameter unter Verwendung von bekannten und neuen normierten Kenngrößen. Unabhängig von der Bewegungsform wird ein Lösungsansatz zur Ermittlung dieser Bezugsgrößen vorgestellt, der die Zusammenhänge zwischen den Hauptabmessungen, der Dimensionierung der Eingriffsorgane und den Getriebeeigenschaften umfassend berücksichtigt.

Durch den Einsatz normierter Kenngrößen-Diagramme erhält der Anwender zukünftig einen schnellen Überblick zu günstigen kinematischen Parameterkombinationen, im Beispiel beschrieben für ebene Kurvenschrittgetriebe. Dadurch ist es möglich, schnell zu einer anwendungsspezifisch optimalen Lösung zu gelangen.

## 2 Verwendung normierter Hauptabmessungen

Die Verwendung normierter Größen ermöglicht eine dimensionslose Beschreibung ebener Kurvenschrittgetriebe nach Bild 2 und nachfolgend eine einfache, vergleichende Bewertung verschiedener Kombinationen von Hauptabmessungen. Die bekannten, beschreibenden Größen dieser Bauform sind:

- der Achsabstand  $a = \overline{A_0B_0}$ ,
- der Radius des Rollensterns  $l = \overline{B_0B}$ ,
- der Grundwinkel  $\psi_G$  und
- der Rollenradius  $r_r$ .

Für diese sowie weitere kinematische und kinetostatische Analysekenngößen des Getriebes erfolgt eine Normierung bzgl. des Achsabstandes  $a$ , vgl. Bild 2. Als neue bezeichnende Größen ergeben sich somit

- das Abmessungsverhältnis  $v_a = l/a$  und
- das Rollenverhältnis  $v_r = r_r/a$ .

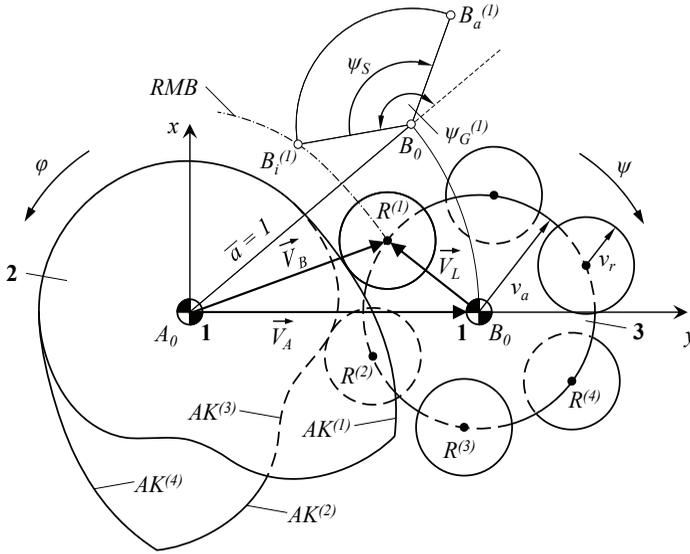


Bild 2: Schematische Darstellung eines ebenen Schrittgetriebes

Da im Gegensatz zu Kurvengetrieben mit rückkehrender Übertragungsfunktion bei ebenen Kurvenschrittgetrieben mindestens vier Kurvenrollen – entsprechend der Anzahl der Arbeitskurven – an der Bewegungsübertragung beteiligt sind, ist jedem Eingriffsorgan auch ein entsprechender Grundwinkel zuzuordnen. Diese Zuordnung wird nachfolgend durch den hochgestellten Index ( $k$ ) kenntlich gemacht

Bei ebenen Kurvenschrittgetrieben mit außenliegender Kurvenscheibe besteht zwischen der Gesamtanzahl der Rollen am Rollenstern  $n_r$ , dem Schrittwinkel  $\psi_S$ , der Gängigkeit  $G$  und der Anzahl der Ebenen  $E$  die Beziehung:

$$n_r \cdot \psi_S = E \cdot G \cdot 2\pi \quad (1)$$

Geht man von einer Gleichverteilung der Rollen am Umfang und auf den Ebenen aus, so berechnet sich für jede der  $k$  Arbeitskurven der jeweilige Grundwinkel  $\psi_G^{(k)}$  wie folgt:

$$\psi_G^{(k)} = \pi + (2k + E - 1) \cdot \frac{\psi_S}{2EG} \quad \text{mit } k = 1, 2, \dots, E(1 + G) \quad (2)$$

Die Gleichung (2) liefert für jeweils zwei Ebenen spiegelbildlich kongruente Kurvenkörper bei einer geraden Anzahl an Ebenen.

Aufbauend auf diesen Größen erfolgt die vereinfachte analytische, vektorielle Beschreibung der Kurvengometrie nach dem Prinzip der *kinematischen Umkehr*. Aus der Vektorsumme

$$\vec{V}_B = \vec{V}_A + \vec{V}_L \quad (3)$$

ergeben sich mit dem Schalt/Perioden-Verhältnis  $v_S = \varphi_S / \varphi_P$ , dem normierten Bewegungsparameter  $z = [0, 1]$  und der Verwendung der Abkürzungen

$$\varphi(z) = v_S \cdot \varphi_P \cdot z \quad (4)$$

$$\chi^{(k)}(z) = \psi_G^{(k)} - \varphi(z) - (\psi_S - \psi(z)) \quad (5)$$

die normierten kartesischen Koordinaten der  $k$  Rollenmittelpunktbahnen (RMB) der Kurvenkörper aus:

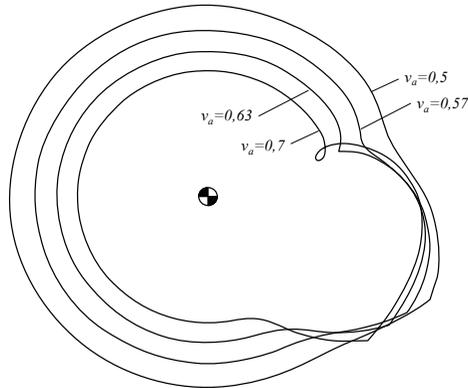
$$\begin{pmatrix} \overline{x}_B^{(k)}(z) \\ \overline{y}_B^{(k)}(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-\varphi(z)) \\ \sin(-\varphi(z)) \end{pmatrix} + v_a \begin{pmatrix} \cos(\chi^{(k)}(z)) \\ \sin(\chi^{(k)}(z)) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Die Koordinaten der  $k$  Arbeitskurven werden unter Verwendung des Rollenverhältnisses  $v_r$  und den Normalenrichtungen der Rollenmittelpunktbahnen  $\gamma$  bestimmt aus:

$$\begin{pmatrix} \overline{x}_A^{(k)}(z) \\ \overline{y}_A^{(k)}(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{x}_B^{(k)}(z) \\ \overline{y}_B^{(k)}(z) \end{pmatrix} \pm v_r \begin{pmatrix} \cos(\gamma^{(k)}(z)) \\ \sin(\gamma^{(k)}(z)) \end{pmatrix} \quad (7)$$

### 3 Bestimmung des Grenz-Abmessungsverhältnisses

Die Festlegung eines ungünstigen Verhältnisses der Hauptabmessungen  $v_a$  führt in Abhängigkeit vom gewählten Bewegungsgesetz  $f(z)$  und dem Schalt-Perioden-Verhältnis  $v_s$  bei ebenen Schrittgetrieben zu Hinterschneidungen (Schleifen) an den konkaven Bereichen der Rollenmittelpunktbahn (vgl. Bild 3). Die analytische Berechnung einer geschlossenen Kurvenscheibe ist unter diesen Bedingungen zwar noch möglich, jedoch nur indem theoretisch tragende Bereiche der Arbeitskurve entfernt werden, wodurch die geforderte Übertragungsfunktion nicht mehr erfüllt wird.



*Bild 3: RMB einer Kurvenscheibe bei Variation des Abmessungsverhältnisses  $v_a$*

Zur Lösung des aufgezeigten Problems wird eine neue Kenngröße  $K$  eingeführt. Sie erlaubt bereits im Vorfeld Aussagen darüber, ob an definierten Punkten der Kurvenscheiben die beschriebenen Hinterschneidungen der RMB auftreten. Den Ausgangspunkt dazu bildet die Ermittlung des normierten Antriebsparameters  $z_0$  als Nullstelle der Funktion

$$g(z) = f(z) - (2k - 3)/2G \text{ mit } 0 \leq z \leq 1, k = 2 \dots 2G + 1 \quad (8)$$

wobei  $f(z)$  die normierte Übertragungsfunktion der Schrittphase darstellt. Die analytische Betrachtung der Normalenvektoren am Antriebsglied liefert schließlich die Kenngröße  $K$  der Form:

$$K = \frac{\bar{x}_B'(z_0) \sin(-\varphi(z_0)) - \bar{y}_B'(z_0) \cos(-\varphi(z_0))}{\sqrt{(\bar{x}_B'(z_0))^2 + (\bar{y}_B'(z_0))^2}} = \begin{cases} 1 \\ -1 \end{cases} \quad (9)$$

Ergibt die Lösung von Gleichung (9) einen Wert von  $K = -1$ , so entsteht eine Hinterschneidung an der entsprechenden Rollenmittelpunktsbahn. Sofern bei der verwendeten Übertragungsfunktion  $f(z)$  und dem Abmessungsverhältnis  $v_a$  die Kenngröße  $K$  für jede der  $k$  Arbeitskurven den Wert 1 annimmt, entstehen gültige Kurvenkörper.

Anhand dieser Kenngröße wird – ausgehend von einem ausgewählten Bewegungsgesetz und einer festgelegten Gängigkeit – für ganzzahlige Werte der Stationen und ein beliebiges Schalt/Perioden-Verhältnis  $v_s$  ein maximal zulässiges Abmessungsverhältnis  $v_{a \max}$  ermittelt.

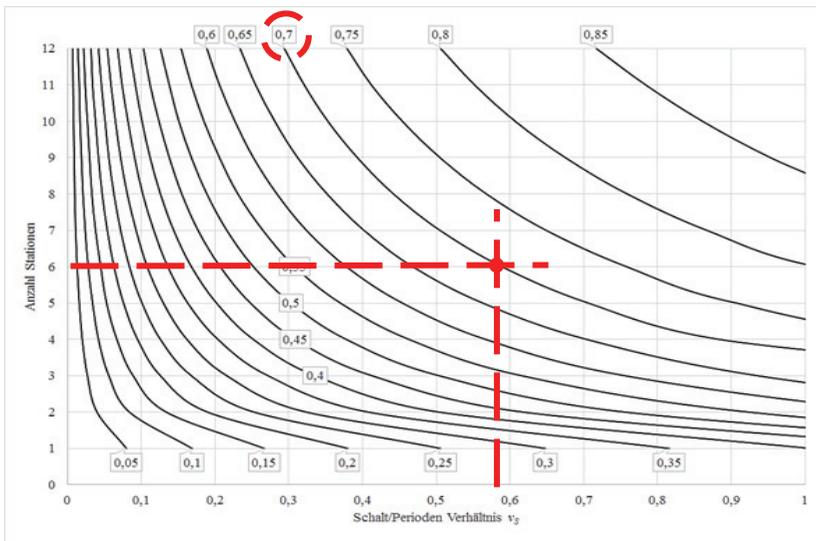


Bild 4: Kurventafel für den maximalen Grenzwert  $v_{a \max}$  eines ebenen Kurvenschrittgetriebes mit  $G = 1$  und dem Bewegungsgesetz „Modifizierte Sinuslinie“ (MS00)

Die neu definierte Kenngröße erlaubt somit auch für ausgewählte Bewegungsgesetze  $f(z)$  die Generierung von entsprechenden Kurventafeln, aus welchen durch einfaches Ablesen ein Grenzabmessungsverhältnis  $\nu_{a\max}$  bestimmt werden kann. So lässt sich beispielsweise für ein Getriebe mit 6 Stationen und einem Schalt-Perioden-Verhältnis von  $\nu_S = \varphi_S/\varphi_P = 210^\circ/2\pi = 0,58$  aus Bild 4 ein maximales Abmessungsverhältnis von ca. 0,7 ablesen (vgl. Bild 4). Ist nun aus konstruktiven Gründen für das gesuchte Getriebe ein Achsabstand von 150 mm vorgegeben, so darf der Rollensternradius einen Wert von 105 mm nicht überschreiten.

Es ist jedoch zu beachten, dass die dargestellte Kurventafel nur für ganzzahlige Stationen gültig ist. Abweichende Schrittwinkel wie beispielsweise  $\psi_S = 240^\circ$  erfordern eine erhöhte Gängigkeit und sind getrennt zu ermitteln.

## 4 Ermittlung von Kennwertkurven zur Eigenschaftsbewertung

Die entscheidende Einflussgröße auf die Eigenschaften ebener Kurvenschrittgetriebe ist das Abmessungsverhältnis  $\nu_a$ . Wie der vorangestellte Abschnitt zeigt, sind diese kinematischen Hauptabmessungen zur Erfüllung der Bewegungsaufgabe jedoch nur in gewissen Grenzen frei wählbar. Ziel der Auslegung von Schrittgetrieben ist es nun, die – bezüglich eines oder mehrerer Kriterien – optimale Kombination von Abmessungen zu finden. Zur Bewertung der Getriebe nach bestimmten Kriterien werden s. g. Kenngrößen herangezogen. Diese Größen dienen der zielgerichteten Auslegung bzw. Optimierung der Getriebe.

### 4.1 Normiertes Rollenverhältnis

Der Einfluss des Rollenradius  $r_r$  bzw. des normierten Rollenverhältnisses  $\nu_r$  auf die kinematischen und kinetostatischen Eigenschaften ebener Kurvenschrittgetriebe ist nur für gewisse Getriebeeigenschaften, wie z. B. den Bauraum oder die Wälzpressung, direkt zu erkennen. Auch der eindeutige Zusammenhang zwischen dem Durchmesser der Kurvenrollen

und den statischen sowie dynamischen Tragzahlen, also den ertragbaren Kräften der Eingriffsglieder, ist bekannt und insofern nachzuvollziehen, dass mit Erhöhung des Rollendurchmessers bei fast allen Baureihen von Kurven- oder Stützrollen auch die Tragzahlen ansteigen. Es wird also angestrebt, möglichst große Kurvenrollen einzusetzen um eine maximale Leistungsfähigkeit des Getriebes zu erzielen.

Bei genaueren Untersuchungen zum Einfluss des Rollenradius wird außerdem deutlich, dass sich mit dessen Änderung auch die Schnittpunkte der Arbeitskurven verschieben und somit die Länge der Arbeitskurven beeinflusst wird. Dies wiederum hat Einfluss auf andere Getriebeeigenschaften, beispielsweise auf den wirksamen Übertragungswinkel und folglich auch auf die Kräfte im Kurvengelenk.

Zur Bestimmung des maximal zulässigen Rollenverhältnisses werden nun zwei verschiedene Kriterien herangezogen. Zum einen wird durch das bekannte Kriterium nach [2] zur Vermeidung von Unterschnitt (Hubverlust infolge veränderter Kurvenbahnen) und Spitzenbildung an der Kurvenscheibe eine Empfehlung für die Wahl des Rollenradius in der Art gegeben, dass der dieser mit maximal 70 % des minimalen Krümmungsradius der konvex gekrümmten RMB gewählt werden sollte. Im Vergleich zu einem Rollenradius, welcher beispielsweise bei 90 % des minimalen Krümmungsradius liegt, können unter Beachtung dieser Empfehlung die Werte der *Stribeckschen* Pressung auf unter 43 % gesenkt werden. Zum anderen wird der maximale Rollenradius auch bauraumbedingt eingeschränkt. In Abhängigkeit von der Rollenanzahl pro Ebene steht nur ein begrenzter Radius für die Rollen zur Verfügung. Unter der Voraussetzung eines Mindestabstandes von 10 % des Rollenradius zwischen den Rollen ergibt sich nach den genannten Randbedingungen ein maximales Rollenverhältnis von:

$$v_{r \max} = \min \left( 0,7 \cdot \min \bar{\rho}_B \mid 0,95 \cdot \frac{v_a}{2} \sqrt{2 \left( 1 - \cos \left( \frac{\psi_s}{G} \right) \right)} \right) \quad (10)$$

Mit Hilfe von Gleichung (10) gelingt nun mit wenig numerischen Aufwand die, für eine gezielte Aufgabenstellung notwendige Kennwert-Kurve des maximal zulässigen Rollenverhältnisses zu ermitteln (vgl. Bild 5). Der lineare Anstieg der Kurve resultiert dabei aus der Bauraumbedingung. Ab einem gewissen Abmessungsverhältnis  $v_a$  kommt das Krümmungskriterium zum Tragen und das Rollenverhältnis sinkt mit steigendem Abmessungsverhältnis gegen den Wert Null.

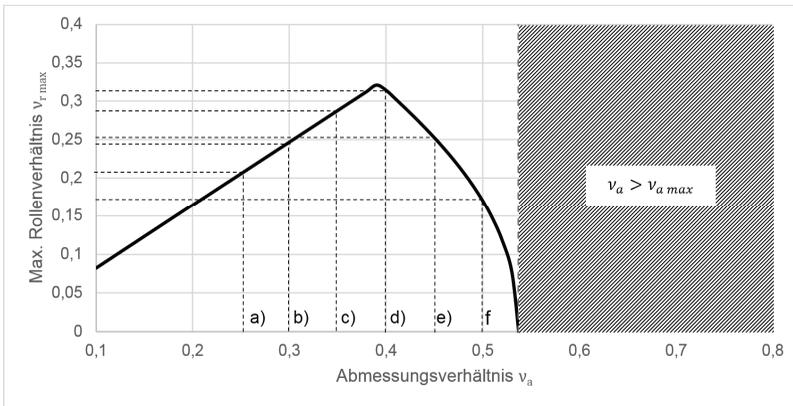
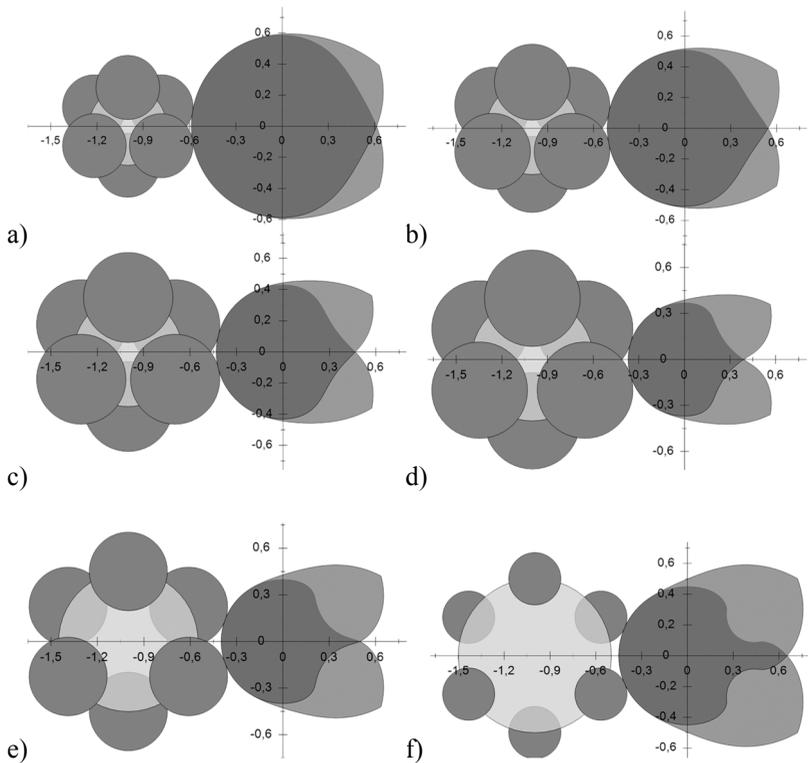


Bild 5: Rollenverhältnis  $v_{r,max}$  für einen Schaltwinkel von  $\varphi_S = 210^\circ$  (Bewegungsgesetz MS00;  $\psi_S = 120^\circ$ )

Für alle Punkte auf der in Bild 5 gezeigten Kurve und für alle darunter eingeschlossenen Punkte werden die nach Gleichung (10) aufgestellten Randbedingungen erfüllt. Somit könnten diese Parameterkombinationen lauffähige Getriebe entwickelt werden

In Bild 6 ist eine Auswahl an Getrieben (für 3 Stationen und einen Schaltwinkel von  $210^\circ$ ) mit verschiedenen Abmessungsverhältnissen in Kombination mit den zugehörigen maximalen Rollenverhältnissen in normierter Form dargestellt. Es sind deutliche Unterschiede in Baugröße, Kurvenformen und Größe der Kurvenrollen zu erkennen. Jedoch ist es an dieser Stelle schwer zu beurteilen, welches der Getriebe beispielsweise die geringsten Gelenkkräfte oder die längste Lebensdauer besitzt.



*Bild 6: Varianten ebener Kurvenschrittgetriebe mit unterschiedlichen Abmessungs- und Rollen-verhältnissen ( $\psi_S = 120^\circ$ ,  $\varphi_S = 210^\circ$ )*

a)  $v_a = 0,25$ ,  $v_r = 0,206$

b)  $v_a = 0,3$ ,  $v_r = 0,247$

c)  $v_a = 0,35$ ,  $v_r = 0,288$

d)  $v_a = 0,4$ ,  $v_r = 0,314$

e)  $v_a = 0,45$ ,  $v_r = 0,252$

f)  $v_a = 0,5$ ,  $v_r = 0,170$

## 4.2 Normierte Gelenkkraft

Die Einführung der normierten Gelenkkraft als Kenngröße für ebene Kurvenschrittgetriebe nach [3] dient der Ermittlung der maximalen Normalkraft  $G_{32n}$  auf die Kurvenflanke bei reiner Trägheitskraftbelastung. Sie wurde festgelegt zu:

$$\overline{G_{32n}} = \frac{G_{32n} \cdot l}{J_{31} \cdot \omega_{21}^2} = \frac{G_{32n} \cdot v_a \cdot a}{J_{31} \cdot \omega_{21}^2} = \frac{\psi''}{\sin(\mu)} \quad (11)$$

Betrachtet man den Verlauf der normierten, maximalen Normalkraft in Abhängigkeit vom Abmessungsverhältnis für einen definierten Schaltwinkel  $\varphi_S$  so weist die Kurve in einem beschränkten Bereich einen annähernd linearen Verlauf auf, welcher für größere  $v_a$  durch das Grenzabmessungsverhältnis  $v_{a\max}$  begrenzt wird, vgl. Bild 7. Für kleine Werte des Abmessungsverhältnisses  $v_a$  ist ein sehr starker Anstieg zu erkennen. Dieser resultiert aus großen Unstetigkeiten im Kraftverlauf, welche wiederum aus großen Sprüngen im Verlauf des Übertragungswinkels hervorgehen. Bild 8 zeigt dazu vergleichend die betragsmäßigen, normierten Gelenkkraftverläufe für unterschiedliche Abmessungsverhältnisse bei einem Schaltwinkel von  $\varphi_S = 210^\circ$ .

Die Auswahl geeigneter Getriebeabmessungen für ein ebenes Schrittgetriebe mit 3 Stationen ( $\psi_S = 120^\circ$ ) könnte nun bereits anhand von Bild 7 erfolgen. Es ist jedoch darauf zu achten, immer die maximal zulässigen Rollenverhältnisse parallel zu überprüfen, da hier Änderungen des Abmessungsverhältnisses sehr großen Einfluss haben. Nicht zwangsweise führen die Getriebeabmessungen mit den geringsten Gelenkkraften zur besten Lösung, da die Rollenradien für den Wert für  $\overline{G_{32\max}}(v_{a\max})$  keine technologisch sinnvollen Werte annehmen.

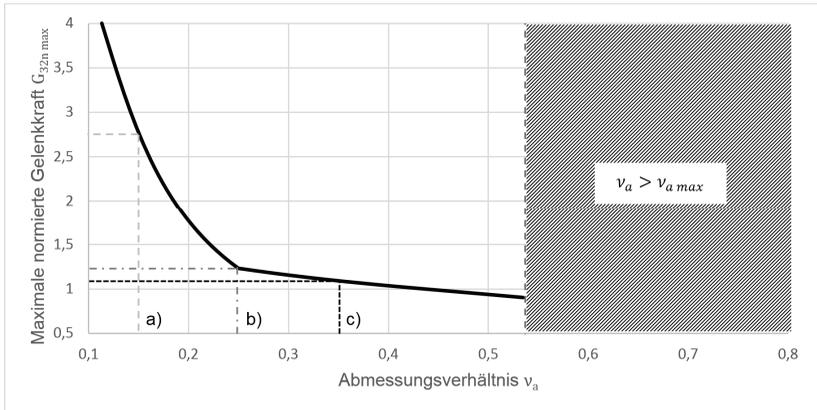


Bild 7: Maximale normierte Gelenkkraft  $\overline{G_{32n, max}}$  für einen Schaltwinkel  $\varphi_S = 210^\circ$  (Bewegungsgesetz MS00;  $\psi_S = 120^\circ$ )

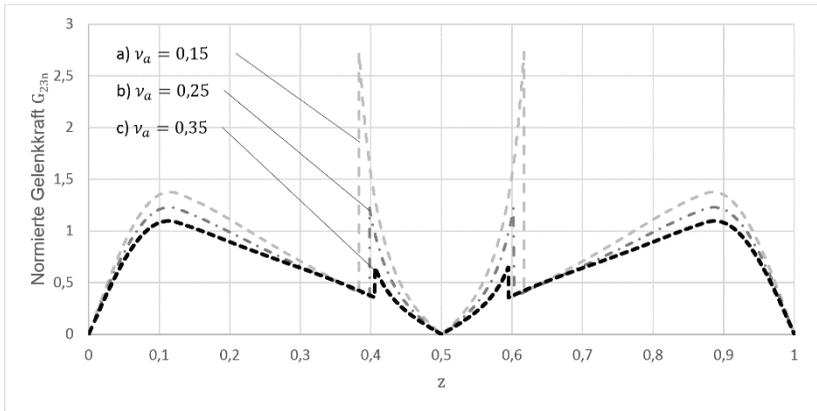


Bild 8: Normierte Gelenkkraft im Schrittbereich für ausgewählte Abmessungsverhältnisse (vgl. Bild 7)

Die Umrechnung der normierten maximalen Belastung der Kurvenrolle in die reale Belastung im Kurvengelenk erfolgt unter Vorgabe des am Abtrieb wirkenden reduzierten Massenträgheitsmoments  $J_{31}$  und der Antriebsdrehzahl  $\omega_{21}$  nach:

$$G_{32n} = \frac{\overline{G_{32n}} \cdot J_{31} \cdot \omega_{21}^2}{v_a \cdot a} \quad (12)$$

und ist somit abhängig vom tatsächlich gewählten Achsabstand  $a$ . Substituiert man nun

$$a = \frac{r_r}{v_r} \quad (13)$$

so kann eine Ungleichung für ein Ersatz-Rollenmoment der Art aufgestellt werden, dass gelten muss:

$$G_{32n} \cdot r_r \geq \overline{G_{32n}} \cdot J_{31} \cdot \omega_{21}^2 \cdot \frac{v_r}{v_a} \quad (14)$$

Mit Hilfe der Gleichung (14) muss nun in entsprechenden Herstellerkatalogen nach Kurvenrollen oder Stützrollen gesucht werden, welche das genannte Kriterium erfüllen. Dabei ist zu beachten, dass die Berechnung der Gelenkkräfte keinerlei zusätzliche Belastungen durch äußere Momente, Lager- oder Rollreibung beinhaltet. Auch der Einfluss von Vorspannung im System aufgrund von Fertigung der Kurven mit Aufmaß wird nicht berücksichtigt. Es muss hier also ein entsprechender Sicherheitsfaktor berücksichtigt werden, um die geforderte Lebensdauer zu gewährleisten. Weiterhin geben Hersteller eine Mindestbelastung für ihre Kurvenrollen an, welche speziell im theoretisch lastfreien Rastbereich zu prüfen ist.

### 4.3 Weitere Kennwert-Kurven zur Eigenschaftsanalyse

Analog zu den normierten Kenngrößen aus Abschnitt 4.1 und 4.2 werden zur Eigenschaftsbewertung die nachfolgend aufgeführten Analysegrößen in normierter Form als Kennwert-Kurven bestimmt.

#### Normierte Stribecksche Wälzpressung

Diese Art der Flächenpressung (gültig bei Linienkontakt) ist bei Kurvengetrieben ein Maß für den Verschleiß und die Lebensdauer der Kurvenscheibe. Auf Grundlage der normierten Abmessungen und der normierten Gelenkkraft wird eine normierte Pressung nach folgender Gleichung eingeführt:

$$\bar{p}_S = \frac{|\overline{G}_{32n}|}{2 \cdot v_r \cdot \left(1 - \frac{v_r}{\rho_B}\right)} \quad (15)$$

Ein bereits nach anderen Kenngrößen festgelegtes Abmessungsverhältnis liefert dank der entsprechenden Kennkurve (Bild 9) die normierte Pressung durch simples Ablesen aus dem Diagramm. Die Rückrechnung auf die realen Pressungswerte gelingt nach folgender Gleichung:

$$p_S = \bar{p}_S \frac{J_{31} \cdot \omega_{21}^2}{v_a \cdot a^2 \cdot b_K} \quad (16)$$

#### Maximale Rollengeschwindigkeit

Die maximal mögliche Drehzahl für Kurvenrollen wird im Wesentlichen durch die zulässige Betriebstemperatur der Wälzlager bestimmt. Sie ist abhängig von der Art des Lagers, der Belastung, den Schmierungsbedingungen und den Kühlverhältnissen. [4] Die Auswahl geeigneter Kurvenrollen erfordert somit, neben den Belastungskenngrößen und anderen Randbedingungen, auch die Beachtung der Rollendrehzahl für Dauerbetrieb und der maximal zulässigen Drehzahl.

Die Winkelgeschwindigkeit der Kurvenrollen ist unabhängig von der realen Größe des Getriebes. Lediglich das Verhältnis des vektoriellen Betrages der ersten Ableitung der Rollenmittelpunktsbahn zu dem Rollenradius hat als geometrische Größe Einfluss. Erfolgt nun eine Normierung bezüglich der Antriebswinkelgeschwindigkeit  $\omega_{21}$ , so ergibt sich die normierte Rollendrehzahl nach Gleichung (17)(17).

$$\overline{\omega}_{43} = \frac{\overrightarrow{\omega}_{43}}{\overrightarrow{\omega}_{21}} = \left( -\frac{\sqrt{(\overline{x}_B')^2 + (\overline{y}_B')^2}}{v_r} + 1 + \psi' \right) \quad (17)$$

Die Ermittlung der realen Rollendrehzahl erfolgt nach:

$$n_{43} = \overline{\omega}_{43} \cdot n_{21} \quad (18)$$

Gleichung (17) ermöglicht die einfache Ermittlung der maximalen Drehzahl aller an der Bewegungsübertragung beteiligter Rollen und die Darstellung als eine, vom Abmessungsverhältnis abhängige Kennwert-Kurve (Bild 9). Mit Hilfe dieser Angaben muss nun für einen gewählten Parametersatz bei gegebener Antriebsdrehzahl die maximale Drehzahl nach Gleichung (18) ermittelt und anschließend mit den Herstellerangaben abgeglichen werden.

### Normiertes Flächenmaß und normierter Wellenradius

Eine wesentliche Bedeutung bei der Entwicklung ebener Schrittgetriebe hat der erforderliche Bauraum der Mechanismen bezogen auf die Leistungsklassen, da man auch mit diesen Getrieben entweder im High-Speed- oder High-Load-Bereich eine möglichst optimale Bauraumausnutzung erreichen will.

In Anlehnung an [5], welche eine abtriebsbezogene Baugröße empfiehlt, wird ein maximales Flächenmaß  $A_{max}$  für ebene Kurvenschrittgetriebe eingeführt. Diese Kenngröße beschreibt den Bauraumbedarf des Getriebes als einhüllende Fläche in rechteckiger Form und kann wie die anderen geometrischen Größen auf den Achsabstand  $a$  normiert werden. Es ergibt sich ein normiertes Flächenmaß nach der Formel

$$\begin{aligned} & \overline{A_{max}} \\ & = \begin{cases} (1 + v_a + v_r + \overline{r_{Kmax}}) \cdot 2 \cdot (v_a + v_r) & | (v_a + v_r) > \overline{r_{Kmax}} \\ (1 + v_a + v_r + \overline{r_{Kmax}}) \cdot 2 \cdot (\overline{r_{Kmax}}) & | (v_a + v_r) < \overline{r_{Kmax}} \end{cases} \quad (19) \end{aligned}$$

wobei  $\overline{r_{Kmax}}$  den maximalen normierten Radius der Kurvenscheibe beschreibt. Dieser tritt immer im Schnittpunkt zweier Arbeitskurven auf.

Die Rückrechnung des Kennwertes für die Bauraumausnutzung erfolgt analog zu den anderen geometrischen Größen unter Einbeziehung des realen, gewählten Achsabstandes  $a$ .

$$A_{max} = \overline{A_{max}} \cdot a^2 \quad (20)$$

Die Kenngröße eines maximalen Radius für die Abtriebswelle des Rollensterns ist besonders für die Dimensionierung der Welle interessant, hat aber auch Einfluss auf die konstruktive Gestaltung der Wellenlagerung. Die Verwendung normierter Getriebeparameter führt zu einem Kennwert der Form

$$\overline{r_W} = \frac{(1 - \overline{r_{Kmax}})}{v_a} \quad (21)$$

und beschreibt den prozentualen Grenzradius einer Abtriebswelle bezüglich des Abmessungsverhältnisses  $v_a$ , also dem normierten Rollensternradius. Da das Rollenverhältnis  $v_r$  großen Einfluss auf den maximalen Radius der Kurvenscheibe besitzt, zeichnet sich dieser auch in der Kenngröße des normierten Wellenradius ab.

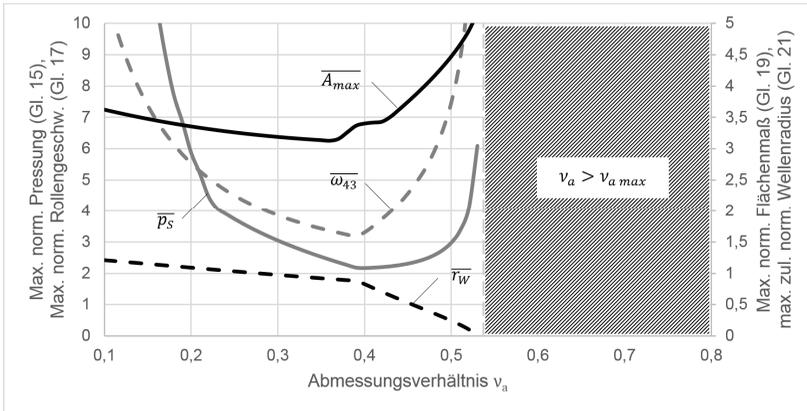


Bild 9: Darstellung verschiedener Kennwertkurven für ein ebenes Kurvenschrittgetriebe (Schaltwinkel  $\varphi_s = 210^\circ$ , Bewegungsgesetz MS00,  $\psi_s = 120^\circ$ ) Anwendung von Kennwert-Kurven bei der Auslegung

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Kurven- und Kurvenschrittgetrieben besteht in der Ermittlung günstiger bzw. optimaler Hauptabmessungen. Speziell bei ebenen Kurvengetrieben sind verschiedene Verfahren, wie z. B.

- das Näherungsverfahren nach Flocke [6],
- das Hodographenverfahren [7],
- das Polbahnverfahren nach Hain (Zeichnungsfolge-Rechenmethode) [8]
- und das Grenzkurvenverfahren nach Lederer

bekannt. Die Übertragung der genannten Verfahren auf ebene Schrittgetriebe gelingt jedoch nicht, da sich diese durchweg – direkt oder indirekt – auf einen vorgegebenen minimal zulässigen Übertragungswinkel im Zusammenspiel mit der Übertragungsfunktion 1. Ordnung beziehen und einen Gleich- und Gegenlaufbereich der Bewegung fordern. Das Kriterium der Lauffähigkeit eines Getriebes steht bei der Auslegung nach diesen

Methoden somit stets im Vordergrund. Der minimale Übertragungswinkel tritt bei ebenen Schrittgetrieben meist im Rastbereich auf, da Bereiche mit schlechtem Übertragungswinkel bewusst nicht zur Bewegungsübertragung genutzt werden. Die Zusammenhänge während der Bewegungsphase sind jedoch entscheidend für Eigenschaften des Getriebes und von besonderem Interesse für die Auslegung. Die Eigenschaftsbewertung auf Grundlage von normierten Kennwert-Kurven stellt nun eine neue Herangehensweise bei der Synthese ebener Kurvenschrittgetriebe dar.

Der nachfolgend vorgestellte Ansatz zur Bestimmung der Hauptabmessungen ebener Kurvenschrittgetriebe basiert auf dem Einsatz größtmöglicher Kurvenrollen. Diese Herangehensweise widerspricht gängigen Auslegungsstrategien für Mechanismen, da nur Getriebeglieder und Gelenke für die kinematische Funktion bestimmend sind und Getriebeorgane, wie Kurvenrollen, maximal Nebenfunktionen erfüllen.

Aufgrund der Bestimmung der Hauptabmessungen und der Eigenschaftsanalyse in normierter Form sind für die Erstellung von Kennwert-Kurven nur wenige Eingangsparameter ausschlaggebend. Lediglich

- die Stationszahl  $n_{St}$  bzw. der Schrittwinkel  $\psi_S$ ,
- der Schaltwinkel  $\varphi_S$  bzw. das Schalt-Perioden-Verhältnis  $\nu_S$ ,
- die Gängigkeit  $G$  und die Anzahl der Ebenen  $E$
- sowie ein ausgewähltes Bewegungsgesetz (BG)

sind hier von Bedeutung. Antriebsdrehzahlen, Taktzeiten und Belastungsklassen, wie sie bei der Auswahl aus Herstellerkatalogen anzugeben sind, werden nicht benötigt. Diese Dimensionierungsparameter kommen erst nach der Auswahl, der für den Anwendungsfall optimalen Größenverhältnisse zum Tragen und legen die realen Abmessungen des Getriebes fest.

Die kennwertorientierte Vorgehensweise gestaltet sich nun folgendermaßen:

1. Berechnung der, für die Auslegung interessanten Kennwert-Kurven nach o.g. Vorgaben ( $n_{st}$ ,  $\varphi_S$ ,  $G$ ,  $BG$ )
2. Auswahl eines Abmessungsverhältnis anhand eines oder mehrerer Kriterien, beispielsweise dem minimalen Bauraum (Ablesen aus Kennwert-Kurve, Bild 9)
3. Ermittlung des zugehörigen normierten Rollenverhältnisses aus der entsprechenden Kennwert-Kurve, Bild 5
4. Ermittlung der maximalen normierten Gelenkkraft aus der entsprechenden Kennwert-Kurve, Bild 7
5. Auswahl einer nach Gleichung (14) gültigen Kurvenrolle aus den Herstellerkatalogen
6. Berechnung der Achsabstandes anhand der gewählten Rolle und dem bereits bestimmten Rollenverhältnis
7. Berechnung der aller weiteren kinematischen Größen
8. Überprüfung der realen Kennwerte

Im Gegensatz zur bisherigen Auslegung ebener Kurvenschrittgetriebe, welche maßgeblich von der Erfahrung des Ingenieurs abhing und durch iterative Parametervariation geprägt war, liefert die dargestellte Vorgehensweise nun einen klar strukturierten, einfachen Weg um letztendlich zu den optimalen Hauptabmessungen ebener Schrittgetriebe zu gelangen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit auch den Einfluss von verschiedenen Bewegungsgesetzen oder Gängigkeiten auf die genannten Kennwerte zu untersuchen oder aber die Auswirkungen von minimal verlängerten Schaltwinkeln („Hubzeitverlängerung“).

## 5 Beispiel

Die Aufgabenstellung umfasst die Auslegung eines bauraumoptimalen, ebenen Kurvenschrittgetriebes mit folgenden Anforderungen:

- Taktzeit  $T = 0,8 \text{ s}$
- Rastzeit  $t_R = 0,4 \text{ s}$
- Schrittwinkel  $\psi_S = 240^\circ$  (entspricht einer Stationszahl  $n_{St} = 1,5$ )
- Massenträgheit  $J_{31} = 0,12 \text{ kg m}^2$

Weder die Produktkataloge von namenhaften Herstellern bieten Schrittgetriebe mit einem entsprechenden Schrittwinkel an, noch steht für die Auslegung dieser untypischen Bauform eine Berechnungssoftware zur Verfügung. Nachfolgend wird nun gezeigt werden, wie schnell und effektiv man mit Hilfe der Kennwert-Kurven speziell bei Sonderbauformen zu einer ersten überschlägigen Lösung gelangt.

Anhand der wenigen Vorgaben erfolgt zu Beginn die Berechnung der kinematischen Größen.

### Antriebsdrehzahl und Antriebswinkelgeschwindigkeit

$$n_{21} = 1/T = 75 \text{ U/min} \quad (22)$$

$$\omega_{21} = 2\pi n_{21} = 7,85 \text{ s}^{-1} \quad (23)$$

### Schaltwinkel und Schalt-Perioden-Verhältnis

$$\varphi_S = (T - t_R) 2\pi/T = 180^\circ \quad (24)$$

$$v_S = \frac{\varphi_S}{2\pi} = 0,5 \quad (25)$$

Für die Festlegung der Gängigkeit ist die Anzahl der Kurvenrollen pro Ebene ausschlaggebend, da diese ganzzahlig sein muss. Um die Gelenkkräfte so gering wie möglich zu halten, wird die Gängigkeit mit dem hier kleinstmöglichen Wert von  $G = 2$  festgelegt.

Somit ergibt sich die Anzahl der Kurvenrollen pro Ebene zu

$$n_r = \frac{G \cdot 2\pi}{\psi_s} = \frac{2 \cdot 2\pi}{240^\circ} = 3. \quad (26)$$

Als Bewegungsgesetz dient die *Modifizierte Sinuslinie* mit einem 30%igem Bereich konstanter Geschwindigkeit, wie es bei Schrittgetrieben mit größerem Schrittwinkel typisch ist. Anhand der genannten Vorgaben und durch Verwendung der in Abschnitt 2 bis 4 genannten Gleichungen erfolgt die Berechnung des maximal möglichen Abmessungsverhältnisses von  $v_{a \max} = 0,345$  und der ersten Kennwert-Kurven (Bild 10).

Da eine minimale Baugröße des Getriebes im Vordergrund steht, wird zunächst die Kennwert-Kurve für das Flächenmaß  $A_{\max}$  betrachtet. Hier zeichnet sich über einen weiten Bereich von  $v_a$  ein relativ konstanter Wert ab. Somit wird zusätzlich das normierte Rollenverhältnis  $v_r$  in Betracht gezogen. Davon ausgehend, dass man so viel wie möglich Leistung übertragen möchte, wird ein maximaler Radius für die Kurvenrollen angestrebt. Dieses Maximum ist in Bild 10 bei einem Abmessungsverhältnis  $v_a = 0,3$  abzulesen mit

$$v_{r \max} = 0,245.$$

Der zugehörige Wert für das Flächenmaß wird ebenso abgelesen werden und ergibt

$$\overline{A_{\max}} = 3,55.$$

Die zugehörige maximale Gelenkkraft für ein Getriebe mit den gewählten Abmessungsverhältnissen beträgt nach Bild 10

$$\overline{G_{32n \max}} = 3,45.$$

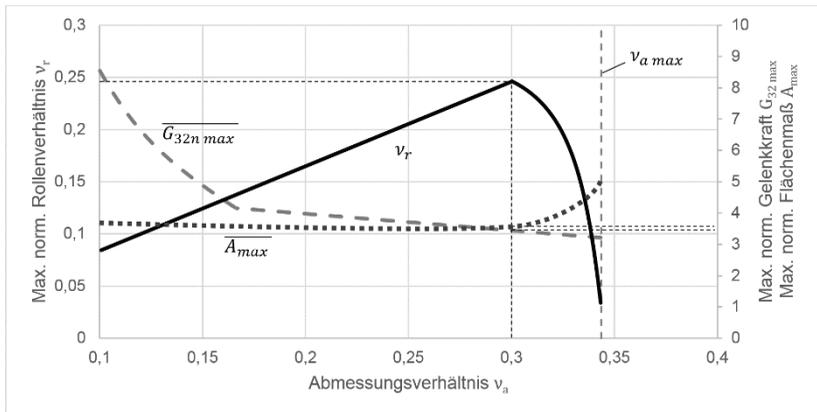


Bild 10: Darstellung verschiedener Kennwertkurven für ein ebenes Kurvenschrittgetriebe (Schaltwinkel  $\varphi_S = 180^\circ$ , Bewegungsgesetz M30,  $\psi_S = 240^\circ$ , Gängigkeit  $G = 3$ )

Diese bisher ermittelten Kennwerte sind ausreichend, um eine passende Kurvenrolle aus Herstellerkatalogen auszuwählen. Dabei muss das Kriterium aus Gleichung (14) beachtet und ein Ersatz-Rollenmoment bestimmt werden. So sind neben den normierten Kennwerten auch das geforderte Massenträgheitsmoment und die Antriebswinkelgeschwindigkeit zu beachten.

$$\begin{aligned} & \overline{G_{32n\ max}} \cdot J_{31} \cdot \omega_{21}^2 \cdot \frac{v_r}{v_a} \\ &= 3,45 \cdot 0,12 \text{ kg m}^2 \cdot (7,85 \text{ s}^{-1})^2 \cdot \frac{0,245}{0,3} \\ &= 17,4 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (27)$$

Ein Großteil der Hersteller von Kurvenrollen bietet online Tabellen an, die für verschiedene Bauformen (Laufrollen, Stützrollen, Kurvenrollen) und unterschiedlich Ausführungen die zugehörigen Kenndaten enthalten. Für dieses Beispiel wurde eine Stützrolle der Firma SKF mit der Bezeichnung *NATR 5 PPA* gewählt. Sie besitzt einen Außendurchmesser  $D_r$  von 16 mm

und eine maximale radiale, dynamische Belastung von  $F_r = 2,9 \text{ kN}$ . Dies entspricht einem Ersatz-Rollenmoment von:

$$\frac{D_r}{2} F_r = \frac{16 \text{ mm}}{2} 2,9 \text{ kN} = 23,2 \text{ Nm} \quad (28)$$

Damit ist das Kriterium nach Gleichung (14) erfüllt und die Rolle kann nach Prüfung der maximalen Rollengeschwindigkeit verwendet werden.

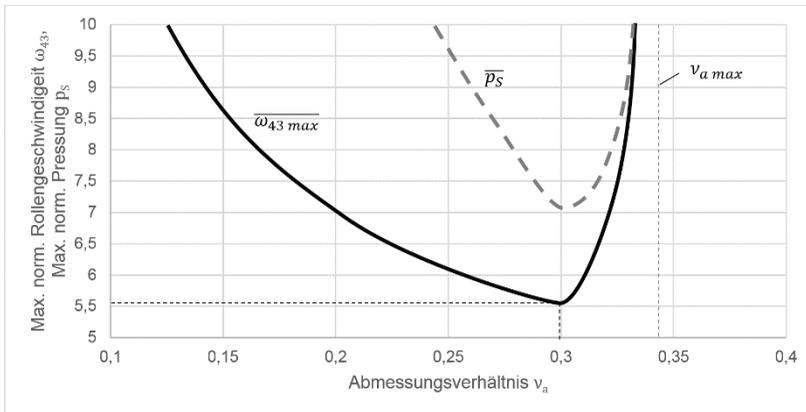


Bild 11: Darstellung verschiedener Kennwertkurven für ein ebenes Kurvenschrittgetriebe (Schaltwinkel  $\varphi_S = 180^\circ$ , Bewegungsgesetz MS30,  $\psi_S = 240^\circ$ , Gängigkeit  $G = 3$ )

Laut Hersteller besitzt die ausgewählte Stützrolle eine Grenzdrehzahl  $n_{43 \max}$  von  $6000 \text{ U/min}$ . Nach Ermittlung der normierten Rollengeschwindigkeit aus dem Kennwert-Diagramm (Bild 11)

$$\overline{\omega}_{43} = 5,6$$

ergibt sich die tatsächlich auftretende maximale Drehzahl der Rolle aus:

$$n_{43} = \overline{\omega}_{43} \cdot n_{21} = 5,6 \cdot 75 \text{ min}^{-1} = 420 \text{ min}^{-1}$$

Damit kann die Rolle eingesetzt werden und es ergeben sich anschließend folgende Hauptabmessungen für das Schrittgetriebe:

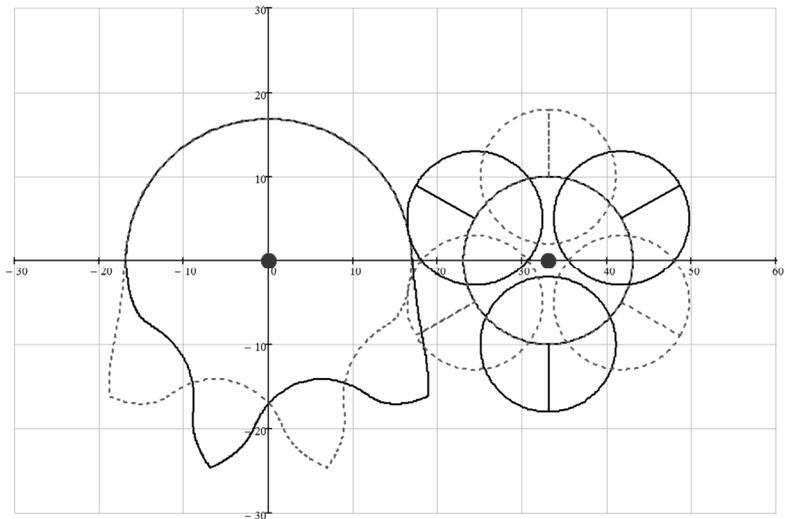
Achsabstand

$$a = \frac{D_r}{2 v_{r \max}} = \frac{16 \text{ mm}}{2 \cdot 0,245} \approx 33 \text{ mm}$$

Hebellänge (Rollensternradius)

$$l = v_a \cdot a = 0,3 \cdot 33 \text{ mm} \approx 10 \text{ mm}$$

Die Ermittlung der Rollenmittelpunktbahnen und der Arbeitskurven erfolgt nach den angegebenen Gleichungen in Abschnitt 2. Es ergibt sich ein Getriebe nach Bild 12.



*Bild 12: Berechnete Geometrie des ebenen Schrittgetriebes nach gegebenen Anforderungen*

## 6 Zusammenfassung

Die Erzeugung von Taktbewegungen mit geringen Zykluszeiten und hohen Anforderungen an die Genauigkeit gelingt durch den Einsatz von ebenen Kurvenschrittgetrieben auf eine mechanisch einfache und zuverlässige Weise. Während die Berechnung der Kurvenscheiben und der kinematischen sowie kinetostatischen Eigenschaften bei gegebenen Hauptabmessungen und vorgegebener Übertragungsfunktion in der Literatur umfassend beschrieben ist, erweist sich die Ermittlung günstiger Hauptabmessungen speziell für Sonderbauformen als schwierig. Nach dem Prinzip der „Synthese durch iterative Analyse“ wird versucht allen Anforderungen und Randbedingungen gerecht zu werden.

Der vorliegende Beitrag zeigt einen neuen, einfachen und übersichtlichen Entwurfsprozess für ebene Kurvenschrittgetriebe unter Verwendung von bekannten und neuen normierten Kennwerten. Der vorgestellte Lösungsansatz zur Ermittlung dieser Bezugsgrößen berücksichtigt die Zusammenhänge zwischen den Hauptabmessungen, der Dimensionierung der Eingriffsorgane und den Getriebeeigenschaften. Die Einführung einer neuen Kenngröße zur Beschreibung eines Grenzabmessungsverhältnisses schränkt das Lösungsspektrum im Vergleich zu bisherigen Betrachtungen deutlich ein. Durch den Einsatz normierter Kenngrößen-Diagramme erhält der Anwender zukünftig einen schnellen Überblick zu günstigen kinematischen Parameterkombinationen, wie am Beispiel demonstriert. Dadurch ist es möglich, schnell zu einer anwendungsspezifisch optimalen Lösung zu gelangen.

## Literatur

- [1] Expert-Tünkers GmbH: Kurvenscheibengetriebe – *EP Baureihe*. online verfügbar unter: <http://bit.ly/UmqcGU> (Zugriff 08.06.2014)
- [2] Volmer, J. (Hrsg.): *Getriebetechnik – Kurvengetriebe*. 2. stark bearbeitete Auflage, Berlin: Verlag Technik (1989) ISBN 3-341-00474-2
- [3] Gentzen, G.; Brock, R.: *Auslegung von ebenen Kurvenschrittgetrieben*. In: Vortragssammelband zum IFTOMM-Symposium Kurvengetriebe (S. 125-134). Karl-Marx-Stadt (1984)
- [4] Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG: *Laufrollen – Stützrollen, Kurvenrollen, Laufrollen* [PDF-Dokument online] erstellt am 19.01.2006, Verfügbar unter: <http://www.fag-ina.at/explorer/download/waelzlager/25-Lauf-Stuetz-Kurvenrollen.pdf> (Zugriff 22.06.2014)
- [5] VDI Richtlinie 2727 Blatt 2: *Konstruktionskataloge. Lösung von Bewegungsaufgaben mit Getrieben – Erzeugung hin- und hergehender Schubbewegungen, Antrieb gleichsinnig drehend*. Stand 01/01
- [6] Flocke, A.: *Zur Konstruktion von Kurvenscheiben bei Verarbeitungsmaschinen*. VDI-Forschungsheft 345, Beilage zu „Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens“ Ausgabe B Band 2 06/1931. Berlin: VDI-Verlag (1931)
- [7] Huhn, E.: *Kinematisch exakte zeichnerische Synthese von Kurvengetrieben mit Hilfe des Übertragungswinkels*. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Maschinenbau Karl-Marx-Stadt Nr. 3 (S. 59-81) (1961)
- [8] Hain, K.: *Bestimmung der Hauptabmessungen in dreigliedrigen Kurvengetrieben*. Lehrgangsbeitrag Nr. BW 2616 des VDI-Bildungswerks, Düsseldorf (1974)



## **Erweitertes Planungskonzept für Handhabungs- und Montageanlagen durch parametrisierte Elementarfunktionen und modulare Symbolbibliotheken**

**Tan Nguyen-Dang, Maik Berger**

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau,  
Professur Montage- und Handhabungstechnik

### **Kurzfassung**

Das Planungskonzept für Handhabungs- und Montageanlagen in der Praxis und Forschung soll alle Formen der Montageabläufe erklären und analysieren. Wichtige Funktionen der Handhabung und Montage von Bauteile werden in Varianten angeboten. Sie öffnen den Blick für Lösungsmöglichkeiten im Montageprozess. Handhabungstechnische Abläufe können aus Funktionsfolgen zur Beschreibung gemäß der VDI Richtlinie 2860 aufgebaut werden. Die genutzte grafische Darstellung von Funktionen gemäß diese Richtlinie erlaubt es dem Anwender, einen schnellen Überblick als Symbolfolge zu formulieren. Diese Darstellungen sind jedoch lösungsneutral und nicht durch Parametersätze und Schnittstellendefinitionen untersetzt. Die neu entwickelten Elementarfunktion und modularen Symbole erweitern das Planungskonzept entscheidend. Der Vortrag zeigt eine neue und parameterorientierte Methodik unter Anwendung symbolischer Algorithmen zur Beschreibung, Planung und Analyse von Handhabungs- und Montageprozessen. Die neuen Handhabungssymbole erlauben es, Symbolelementen nun parameteruntersetzt zu definieren, Funktionsfolgen über Schnittstelleneigenschaften gezielt aufzubauen und damit deren praktische Anwendung zur Planung und Auslegung von Handhabungs- und Montageeinrichtungen zu optimieren. Die Zielstellungen zur Entwicklung diese Methode waren:

- Einsatz zur Planung, der Ausgestaltung und dem Vergleich von Baugruppen, Maschinen bis hin zu kompletten Handhabungs- und Montageanlagen,

- Parameteridentifikation und Optimierung bzgl. physikalisch-technischer Kennwerte, den Taktzeiten, Schnittstellen und Kosten bereits während der Konzeptphasen und
- Zulieferidentifikation und Eigenleistungsanteil durch eine klare Spezifikation technischer Parameter und Schnittstellen-erfordernissen für die Angebotserstellung.

Der Einsatz der Handhabungssymbole wird durch Anwendungsbeispiele gezeigt. Darüber hinaus werden erste Eindrücke zur softwareseitigen Umsetzung der Methode angerissen.

## 1 Einleitung

Ein Handhabungsplan ist eine graphische Darstellung der logischen Aufeinanderfolge von Handhabungsoperationen mit Hilfe von Symbolen für die erforderlichen handhabungstechnischen Funktionen.

Betrachtet man aber Handhabungseinrichtungen als technische Einrichtungen wird im Planungsprozess schnell deutlich, dass eine frühzeitige Zuordnung der Symbolik zu konkreten Funktionsträgern und Geräten erfolgen muss. Hier hilft aktuell die VDI 2860 nicht weiter, da wie die nachfolgende symbolische Abbildung einer Fertigungslinie zur Beschichtung von Werkstücken zeigt, keine planungsrelevanten Aussagen im Symbolplan vorliegen und ebenso Randbedingungen und Schnittstellen nicht beschrieben werden.

Das Bild 1 zeigt den Aufbau einer Fertigungslinie zur Beschichtung von Werkstücken, Bild 2 den zugeordneten Funktionsplan nach VDI 2860 gemäß Tabelle 1.

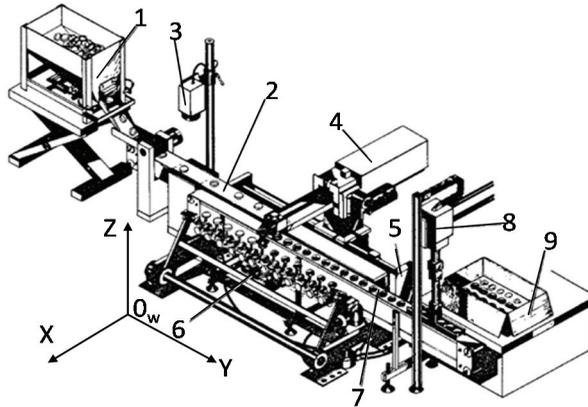


Bild 1: Prinzip einer Fertigungslinie [1]

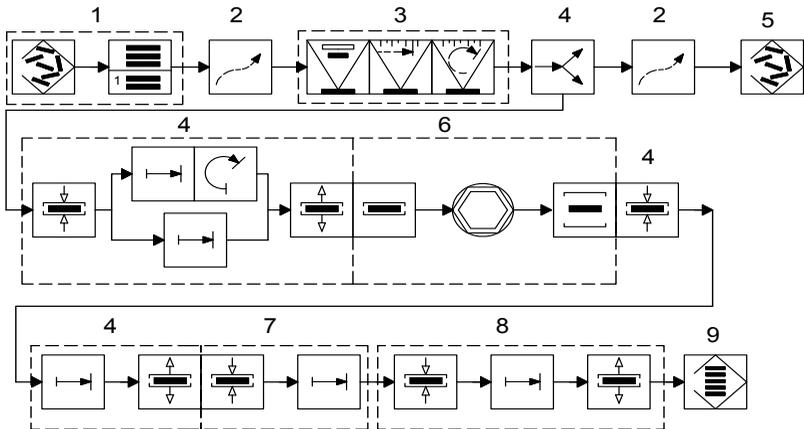
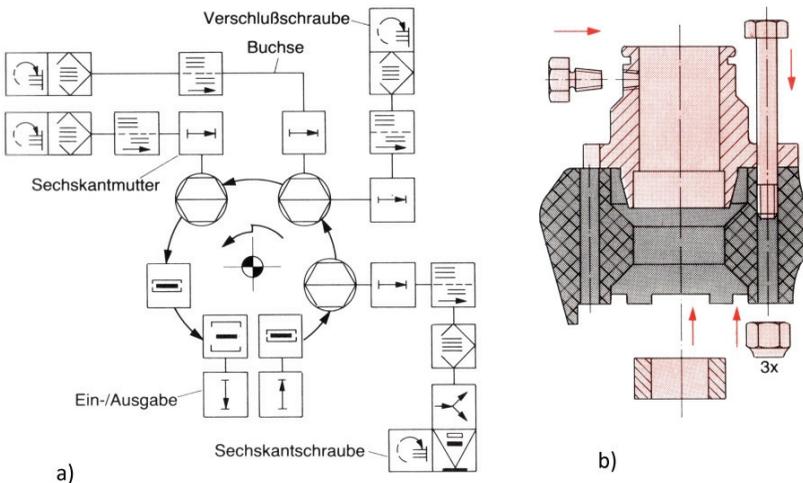


Bild 2: Symbolischer Funktionsplan

1. Bunker mit Vereinzelungseinrichtung;
2. Förderband;
3. Lichtsensor;
4. Industrieroboter;
5. Bunker für Falschteile;
6. Werkstückaufnahmen für Beschichtungseinrichtung;
7. Adhäsionsband;
8. Industrieroboter;
9. Magazin (Versandkarton mit Paletten)

Die Werkstücke befinden sich im Bunker 1 und werden vereinzelt auf ein Förderband 2 übergeben. Während der Bewegung auf dem Förderband werden die Werkstücke durch einen optischen Sensor 3 gemessen und geprüft. Identifizierte Falschteile laufen einfach auf dem Band bis zum Bunker 5 weiter. Der Industrieroboter 4 erfasst die Gutteile und verschiebt diese bei korrekter Orientierung direkt zur Werkstückaufnahme 6. Ansonsten erfolgt eine Neuorientierung bei gleichzeitiger Verschiebung. Nach dem Beschichten wird das Werkstück durch den Roboter 4 auf dem Adhäsionsband 7 abgelegt. Der Industrieroboter 8 übergibt anschließend das fertige Werkstück in das Magazin 9. [1]

Die Ausarbeitung einer technischen Gesamtlösung für eine automatisierte Montagemaschine oder eine komplexe Montageanlage sollte mit einer konzeptionellen Funktionsbeschreibung. Darüber hinaus sind die konkret erforderlichen Handhabungs- und Ortswechseloperation ebenso wichtig. Hesse gibt u. a. in seinem Buch „Montagemaschine“ [2] Hinweise zur Anwendung der Handhabungssymbole gemäß VDI 2860.



**Bild 3:** Funktionsbild einer Montagemaschine  
a) Funktionsplan b) Baugruppe der Kupplung

Bild 3 zeigt den funktionellen Inhalt einer Montagemaschine zum Fügen von Kupplungen. Basisteil und Hülse werden in diesem Fall noch von Hand eingelegt und entnommen. Die Einzelteile Sechskantmutter, Verschlusschraube, Buchse und Sechskantschraube, bei welcher noch ein zusätzlicher Prüf- und Verteilvorgang genutzt wird, liegen nach einem vorgelagerten Ordnungsprozess geordnet gespeichert vor, z. B. in einem Magazin, und werden nachfolgend durch Zuteilen und Verschieben an die Fügestation übergeben. [2]

## **2 Stand der Technik**

Der Handhabungsplan ist eine graphische Darstellung der logischen Aufeinanderfolge von Handhabungsoperationen mit Hilfe von Symbolen für zu absolvierende Funktionen. Er begleitet den Vorgang der fertigungstechnischen Automatisierung. Eine Zuordnung zu konkreten Funktionsträgern und Geräten erfolgt damit jedoch noch nicht. [3]

### **2.1 VDI Richtlinie Montage- und Handhabungstechnik 2860**

Die VDI 2860 umfasst die eindeutige Einordnung, Abgrenzung und Definition des Handhabens und seiner Teilfunktionen. Die unterschiedlichen Funktionsfolgen und Handhabungsaufgaben werden durch die Handhabungssymbole dargestellt. Die VDI 2860 unterteilt das Handhaben in 5 Gruppen: Speichern, Mengen verändern, Bewegen, Sichern und Kontrollieren. Die entsprechenden Funktionssinnbilder sind in Tabelle 1 zusammengestellt. [1]

Tabelle 1: Funktionssymbole nach VDI 2860

Speichern							
Funktion	Sym bol	Funktion	Sym bol	Funktion	Sym bol	Funktion	Sym bol
Geordnetes Speichern		Teilgeordnetes Speichern		Ungeordnetes Speichern			
Mengen verändern							
Teilen		Vereinigen		Abteilen		Zuteilen	
Verzweigen		Zusammenführen		Sortieren			
Bewegen							
Drehen		Verschieben		Schwenken		Orientieren	
Positionieren		Ordnen		Führen		Weitergeben	
Fördern							
Sichern							
Halten		Lösen		Spannen		Entspannen	
Kontrollieren							
Anwesenheit prüfen		Identität prüfen		Form prüfen		Größe prüfen	
Farbe prüfen		Gewicht prüfen		Position prüfen		Orientierung prüfen	
Messen		Zählen		Position messen		Orientierung messen	

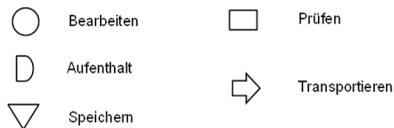
## 2.2 Prozesschart für den Materialfluss

Unter dem Begriff „Materialfluss“ werden alle Vorgänge und deren Verkettung beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie bei der Verteilung von stofflichen Gütern innerhalb bestimmter, festgelegter Produktionsbereiche verstanden. Der Materialfluss ist damit ein notwendiges Element in der Fertigung und dem Verteilungssystem. Es wird geschätzt, dass 30-60% des Endpreises eines Produktes mit den hier entstehenden Kosten verbunden sind. Unter diesem Gesichtspunkt besteht aus wirtschaftlicher Sicht die zwingende Forderung, Materialflüsse so zu gestalten, dass dem Material kontinuierlich auch Wert zugefügt wird und so

genannte Sekundärprozesse, gegenüber den wertschöpfenden Primärprozessen eben die z. B. handhabungstechnisch erforderlichen Nebenleistungen ohne Wertschöpfung, möglichst zu vermeiden. Somit ist es zwingend erforderlich, Materialflusssysteme so effizient wie möglich zu entwerfen und hierzu auch belegbare Parameter und Kennwerte zu nutzen. Die folgenden grundlegenden Stufen werden genutzt, um Produktsysteme zu analysieren und zu entwerfen:

- Erkennen und definieren den Probleme
- Sammeln wichtiger und erforderlicher Daten
- Entwurf und Planung
- Ausarbeitung und Bewertung der Lösung

Die Sammlung der wichtigen Daten kann durch ein systematisches Diagramm und eine Darstellung eines Materialflusses in der Fabrik erlangt werden. Heutzutage werden verschiedene graphische Techniken, z. B. Montagechart, Prozesschart oder Diagrammflussdarstellungen verwendet, um die Informationen zu erfassen und zu analysieren und die Stufen eines Prozesses im Materialfluss tabellarisch darzustellen. Diese Normsymbole, siehe Bild 4, wurden u. a. auch von der Amerikanischen Gesellschaft des Maschinenbaus angenommen und werden in dem so genannten Durchflussprozessdiagramm verwendet. Tabelle 2 zeigt hierzu ein Anwendungsbeispiel der Normsymbole zur Beschreibung der Materialhandhabung. Neben Einzelheiten zur Verfahrensweise werden auch zusätzliche Information, wie z. B. zum Transport, den Mengen oder Zeitkennwerte, dargestellt. [4]



*Bild 4: Symbole des Materialflusses*

*Tabelle 2: Prozesschart der Materialhandhabung*

Einzelheiten des Verfahrens	Bearbeiten	Transport	Prüfen	Aufenthalt	Speichern	Weg (m)	Menge (St)	Zeit (h)
1. Empfangen Rohmaterial durch Gabelstapler	○	⇄	□	D	▽	500	1000	1
2. Prüfen die Oberflächen und Farbe	○	⇄	▣	D	▽		1000	0,5
3. Transportieren durch Gabelstapler	○	⇄	□	D	▽	40	400	0,2
4. Speichern	○	⇄	□	D	▽		300	0,1
5. Transportieren durch Gabelstapler	○	⇄	□	D	▽	45	100	0,2

### 2.3 Vorranggraph in der Montagetechnik

Der Planungsschritt der Grobplanung beinhaltet den Entwurf und die Festlegung der gesamten Montagestruktur. Die Untergliederung des Schrittes ergibt Teilverrichtungen und komplexere Verrichtungen. Eine Teilverrichtung ist eine Tätigkeit, die sinnvoll nicht weiter unterteilbar ist. Eine komplexere Verrichtung besteht aus mehreren Baugruppen und einer größeren Zahl von Einzelteilen.

Die Abhängigkeiten und Reihenfolgebedingungen aller Teilverrichtungen werden in einem so genannten Vorranggraph dargestellt. Der Vorranggraph bildet die Grundlage für eine Aufteilung des gesamten Montageprozesses in einzelne Montageabschnitte, z. B. Abschnitt für die Vormontage von Baugruppen, Endmontage und Prüfung, manuelle Montageschnitte und automatisierbare Abschnitte. Der Vorranggraph ist ein geeignetes Hilfsmittel zur übersichtlichen, graphischen Darstellung der Struktur einer Montageaufgabe mit allen Arbeitsgängen sowie deren Abhängigkeiten, Zeiten und anderen Merkmalen (siehe Bild 5).

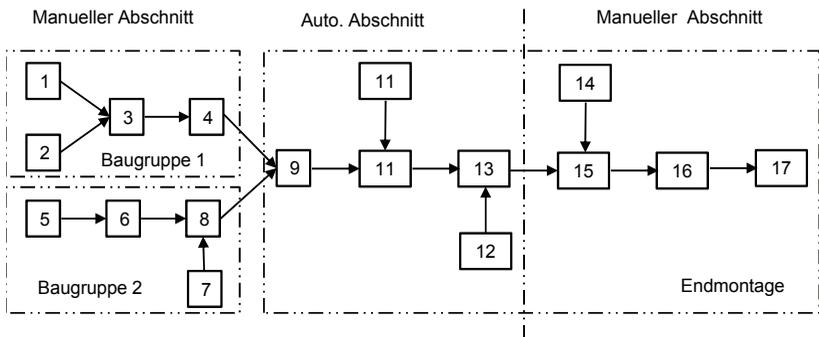


Bild 5: Vorranggraph der Montageablauf

Die Arbeitsinhalte eine Teileverrichtung oder auch für eine Baugruppe werden in Teilvorgänge zergliedert, die als selbständige Einheiten betrachtet und ausgeführt werden können. Der Vorranggraph zeigt nun die Gesamtstruktur des Montagesystems sehr übersichtlich und bildet nach Überprüfung und Diskussion die Grundlage für eine mögliche Gliederung in manuelle und automatische Abschnitte (siehe Bild 6). [5]

Laufend Nummer	Arbeitsinhalt und Taktzeit (Sek)	Montagemethode
15	5,5	M
Gehäuse aufsetzen		

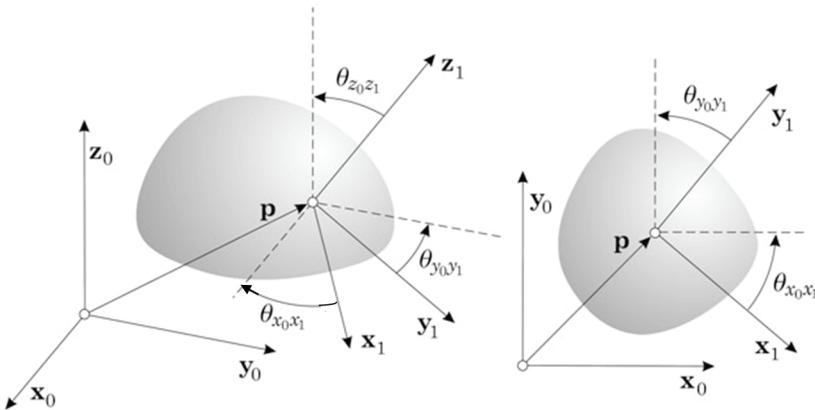
Montageabschnitte

Bild 6: Kennzeichnung eines Teilvorgangs

### 3 Analyse der wichtigsten Parameter

#### 3.1 Definitionen der Koordinatensysteme

Die räumliche Anordnung eines Körpers kann als eine geometrische Beziehung zwischen einem lokalen Koordinatensystem und einem Referenzkoordinatensystem dargestellt werden (siehe **Bild 7**). Die räumliche Anordnung eines Körpers ist durch dessen Position und Orientierung, ausgedrückt im lokalen Koordinatensystem  $X_1, Y_1, Z_1$ , gegenüber dem Referenzkoordinatensystem  $X_0, Y_0, Z_0$ , gegeben.



*Bild 7: Position und Orientierung eines Körpers in Raum und Ebene*

Die räumliche Position eines Körpers wird durch den kartesischen Vektor  $p$  bzgl. des Ursprungs definiert. Die Orientierung eines Körpers im Raum ist durch drei Winkel bzgl. der Achsen des lokalen Koordinatensystems und des Referenzkoordinatensystems definiert. Grundsätzlich ist vom Anwender eine Darstellungsmöglichkeit zur Beschreibung der Objektlage, gekennzeichnet durch dessen Position und Orientierung, zu wählen. Ist eine ebene Betrachtungsweise ausreichend, so reicht unter Beachtung  $\theta_{x_0x_1} = \theta_{y_0y_1}$  und  $\theta_{z_0z_1} = 0$  zur Orientierung eines Körper in der Ebene ein Winkel aus. [6]

In der Produktion werden für jeden Fertigungs- und Montageprozess Halbzeuge, Materialien, Bauteile oder Baugruppen für eine weitere Verarbeitung benötigt. Viele Produkte werden aus mehreren Komponenten sequentiell zusammengesetzt. Diese müssen für den jeweiligen Prozess bereitgestellt werden und sollen in einer definierten Lage an den geplanten Arbeitsstellen vorliegen. In diesem Beitrag werden drei entsprechende Koordinatensysteme eingeführt: ein körpereigenes Koordinatensystem  $X_K, Y_K, Z_K$  (KKS), ein Bezugskordinatensystem  $X_B, Y_B, Z_B$  (BKS) und ein Weltkoordinatensystem  $X_W, Y_W, Z_W$  (WKS). Das BKS wird am Anfang der Funktionsfolge bestimmt. Das KKS beschreibt den zu handhabenden Körper und wird mit diesem mitbewegt (siehe Bild 8). [7]

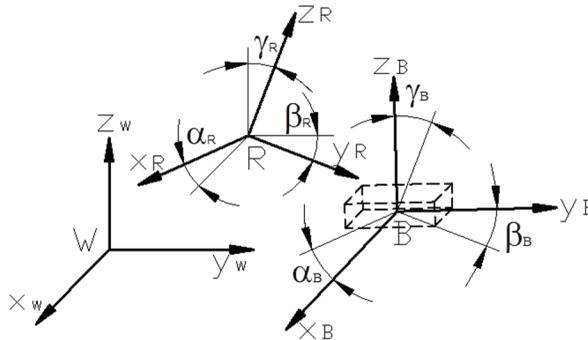


Bild 8: Koordinatensystem bei Handhaben

Für KKS, BKS, WKS gelten folgende Festlegungen [1]:

- Das KKS beschreibt den zu handhabenden Körper und wird mit diesem mitbewegt. Koordinatenursprung und Richtung der Achsen sind innerhalb der Körperhüllflächen entsprechend der Körpergeometrie und Aufgabenstellung wählbar und können sich z. B. aus dem Schwerpunkt, den Symmetrieachsen oder bestimmten ausgezeichneten Körperpunkten, -kanten oder -flächen ergeben. Ein KKS kann nur für geometrisch bestimmte Körper definiert werden.
- Das BKS beschreibt das den Körper umgebende System. Koordinatenursprung und Richtung der Achsen sind entsprechend

Aufgabenstellung wählbar und können z. B. durch Fertigungs- oder Handhabungseinrichtung, ggf. Gebäude, vorgegeben werden.

- Das WKS bezeichnet das Ursprungskoordinatensystem, mit dem die damit verknüpften relativen Koordinatensysteme referenziert sind.

### 3.2 Zeit

Die Zeit ist der maßgebliche Faktor für den Materialfluss. Jede Funktion des Handhabens wird durch den Faktor Zeit kontrolliert und ist im Zeitplan fest definiert. Mit Hilfe dieses Parameters lassen sich alle Handhabungsprozesse eindeutig beschreiben. Jedes Handhabungssymbol des Handhabungsobjekts soll zukünftig durch eine Startzeit  $t_{\text{start}}$  und eine Endzeit  $t_{\text{End}}$  (in Sekunden) ergänzt werden. Die Parameter „Start“ und „End“ können Zeit, Kontrollsignale oder Steuerungsbefehl in der Funktionsfolge beschreiben.

### 3.3 Position und Orientierung des Handhabungsobjekts

Ebenso ist Bewegen eine Hauptfunktion des Handhabens. Änderungen des Bewegungszustandes werden durch genaue Orientierungs- und Positionsangaben definiert. Diese Parameter sowie tolerierbare Abweichungen werden ebenfalls die Symbolik zukünftig erweitern. Unter Beachtung des gültigen KKS werden beschreibende Koordinaten für die Translation ( $X, \Delta X; Y, \Delta Y; Z, \Delta Z$  in mm) und Rotation ( $\alpha, \Delta\alpha; \beta, \Delta\beta; \gamma, \Delta\gamma$  in Grad) eingeführt.

### 3.4 Definition für jede Handhabungsfunktion

Die definierten Funktionen und Symbole dienen gleichermaßen der Beschreibung von Abläufen in Handhabungseinrichtungen. Zur Verbesserung der Beschreibung des Handhabungssymbols wurde jedes Funktionssymbol analysiert und nachfolgend um wesentliche Parameter erweitert. Aus diesem Grund gibt zukünftig einige neue Funktionssymbole.

### 3.5 Anwendung der Funktionen

Fertigungsfolgen mit mehreren Fertigungs-, Handhabungs- und Prüfschritten werden durch Verbindungslinien zwischen den Symbolen der einzelnen Teilfunktionen dargestellt. Die ablaufbedingte Folge der Teilfunktionen wird durch Pfeile an den Verbindungslinien gekennzeichnet. Die Übergangsbedingungen sind vollständig durch die Eingangsvariablen und Pfeile beschrieben. Zusätzlich können im Funktionssymbol „Kontrollieren“ die Ergebnisse des Prüfens oder Messens angegeben werden. Diese Ergebnisse sind dann Bedingungen und werden in den nachfolgenden Funktionsfolgen genutzt.

Mit dieser Art Funktionsfolgen sind nur lineare Darstellungen und keine Verzweigungen darstellbar. Bei einem Funktionsplan mit linearer Ablaufstruktur gibt es in jedem Zustand nur eine weiterführende Bedingung. Sind Ablaufpläne mit Verzweigungen oder mehreren möglichen bzw. gleichzeitig zu durchlaufenden Folgeschritten erforderlich, werden die Verzweigungssymbole benötigt. Es existiert eine ODER- und eine UND-Verzweigung. Aus diesem Grund werden die Funktionssymbole „UND“, „ODER“ als „Hilfsfunktionen“ der Handhabungssymbole verwendet. [8]

### 3.6 Zustands- oder Automatengraph der Ablaufsteuerungen

Eine Funktionsfolge mit den Handhabungsmodulen dient gleichermaßen der Beschreibung von Abläufen der Handhabungs- und Montageanlagen. Die Arbeitsschritte werden durch zeitlich nacheinander oder gleichzeitige auszuführende Schrittsymbole beschrieben. Die Struktur der Schrittkette entspricht dem schrittweisen Ablauf, jedes Schrittsymbol beschreibt einen Zustand der Funktion.

In einem Zustands- bzw. Automatengraphen werden die inneren Zustände durch Knoten (Kreise mit Kennzeichnungen) und die Übergangsmöglichkeiten als Transitionen bezeichnet. Diese Transitionen werden zwischen den Zuständen durch gerichtete Pfeilen dargestellt (siehe Bild 9).

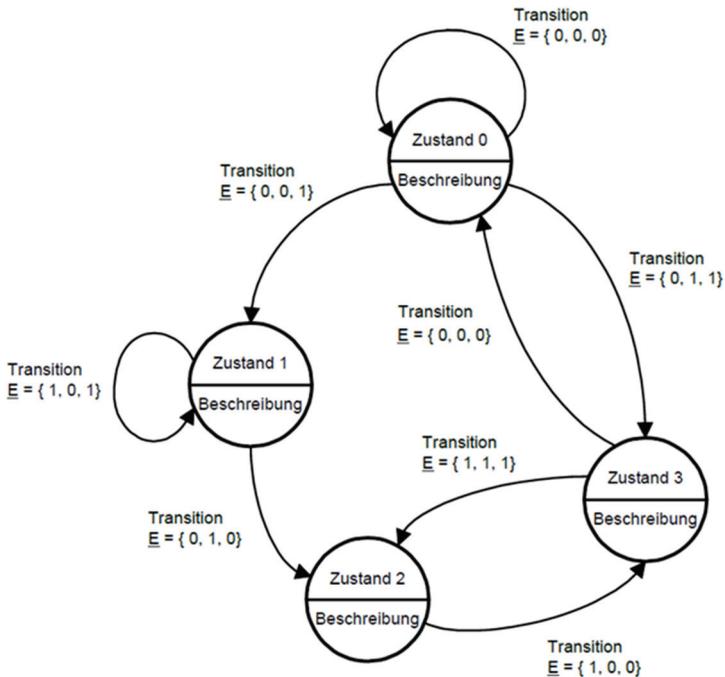


Bild 9: Automatengraph als allgemeines Beispiel

Die Bedingungen für einen Zustandswechsel werden an den gerichteten Pfeilen notiert. Die Knoten repräsentieren die Zustände und die Ausgangsfunktion. Die Pfeile verbinden die Knoten und stellen die Überföhrungsfunktionen dar. Zu jedem Pfeil gehört eine bestimmte Belegung der Eingangsvariablen der Steuerung. Föhrt der Pfeil zu einem anderen Zustand, findet ein Übergang durch diese Eingangskombination statt. Der Pfeil kann auch zu demselben Zustand zuröckföhren. Dies bedeutet dass der alte Zustand erhalten bleibt. Die Übergangsbedingungen sind in dieser Darstellung vollständig durch die Eingangsvariable Vektor  $\underline{E}$  angegeben. Oftmals werden nur die einzelnen Variablenbelegungen an dieser Stelle angegeben, welche die Transitionen auslösen. Die Anwendung des Automatengraphen zur Beschreibung einer Funktionsfolge in

Kombination mit den Handhabungsmodulen zeigt später **Bild 12**. Durch den Namen des Funktionssymbols wird der Zustand oder eine Aktion beschrieben, wie z. B. Einschalten, Ausschalten, Einfahren, Ausfahren oder Spannen und Entspannen. Der Eingangsvariablenvektor  $E$  steht in der Funktion für „Start“ und „End“. Diese Parameter können für eine Zeit oder ein Signal vergeben werden. [8]

### 3.7 Funktionsträger

Für jede Funktion sind anforderungsgerechte Funktionsträger zu suchen. Für eine allgemeine Funktion kann es viele technische Ausführungsvarianten geben. Auch für jede Elementarfunktion sind verschiedene Möglichkeiten der konstruktiven oder antriebstechnischen Umsetzung ableitbar. Um hier Geeignetes oder besser Optimales zu wählen, müssen die technischen Detailanforderungen und Randbedingungen für die Auswahl herangezogen werden. Hierzu zählen u.a. Kenngrößen wie Zykluszeit, Energieart, Beschleunigungsverhalten, Tragkraft, Umstellbarkeit, Preis und Nutzungsdauer.

Die Zykluszeit steht in jedem Funktionssymbol. Energieart findet sich in der Antriebsbeschreibung wieder. Andere technische Anforderungen, wie Tragkraft, Preis oder Nutzungsdauer, sind darüber hinaus als kennzeichnende Parameter im jeweiligen Funktionssymbole gelistet. [9], [10]

## 4 Ergebnisse

Die neuen geschaffenen Handhabungssymbole bestehen aus drei Hauptgruppen:

- 2D und 3D-Formen,
- Handhabungsobjekte und
- Handhabungsmodule.

Sie wurden auf der Grundlagen der VDI 2860 entwickelt und durch die neue Gruppe „Hilfsfunktion“ ergänzt.

## 4.1 Strukturmerkmale der neuen Handhabungssymbole

### 4.1.1 Grobentwurf eines Handhabungsplans (Konzeptphase)

Die geforderten oder möglichen räumlichen Anordnungen der Handhabungsobjekte sind sehr wichtig und daher nun im Handhabungsplan dargestellt. Während einer Montage- und Handhabungsoperation werden die Position und Orientierung der Objekte in der Gruppe „Speichern“, „Mengen verändern“, „Bewegen“ verändert. Für andere Funktionssymbole gemäß Tabelle 1 ist die Lage nicht wichtig, diese bleiben somit unverändert.

In einem umfassenden Handhabungsplan werden zukünftig nicht nur 2D Funktionssymbole sondern nun auch 3D Funktionssymbole benutzt (siehe Bilder 10 und Bild 11). Zusätzlich werden die bereits benannten Koordinatensysteme (KKS, BKS, WKS) sowie ein Soll-Koordinatensystem (SKS) verwendet, um die Position und Orientierung der Handhabungsobjekte exakt zu definieren.

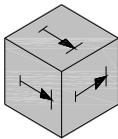


Bild 10: 3D – Funktionssymbol  
Beispiel „Verschieben“



Bild 11: 2D – Funktionssymbol  
Beispiel „Spannen“

### 4.1.2 Feinentwurf eines Handhabungsplans (Konsolidierungsphase)

Die neu definierten Funktionssymbole umfassen zwei Darstellungsebenen: eine Objektebene und eine Modulebene.

Zum **Handhabungsobjekt** zählen Werkstücke, Werkzeuge, Prüfmittel oder Vorrichtungen, usw.. Die Handhabungsobjekte lassen sich mit Angaben zur

Größe, Masse, Form, den Eigenschaften, dem Oberflächenzustand und zur Handhabungseignung beschreiben. [3]

Die abgeleiteten Funktionssymbole der Handhabungsobjekte enthalten die wesentlichen Parameter des Handhabungsobjektes, siehe Bild 12.

Verschieben	
 tdauer(s):	0
tstart(s):	0
tend(s):	0
x(mm):	0
$\Delta x$ (mm):	0
y(mm):	0
$\Delta y$ (mm):	0
z(mm):	0
$\Delta z$ (mm):	0

Verschieben	
Aktionen:	Einfahren
Start:	0
End:	0
Hub(mm):	0
T.kraft (N):	0
Antriebtyp:	Linearmotor
Bezeichnung:	0
Kosten €:	0
N.d (h):	0
Anmerkung	

Bild 11: Handhabungssymbol des Handhabungsobjekts

Bild 12: Handhabungssymbol der Handhabungsmodule

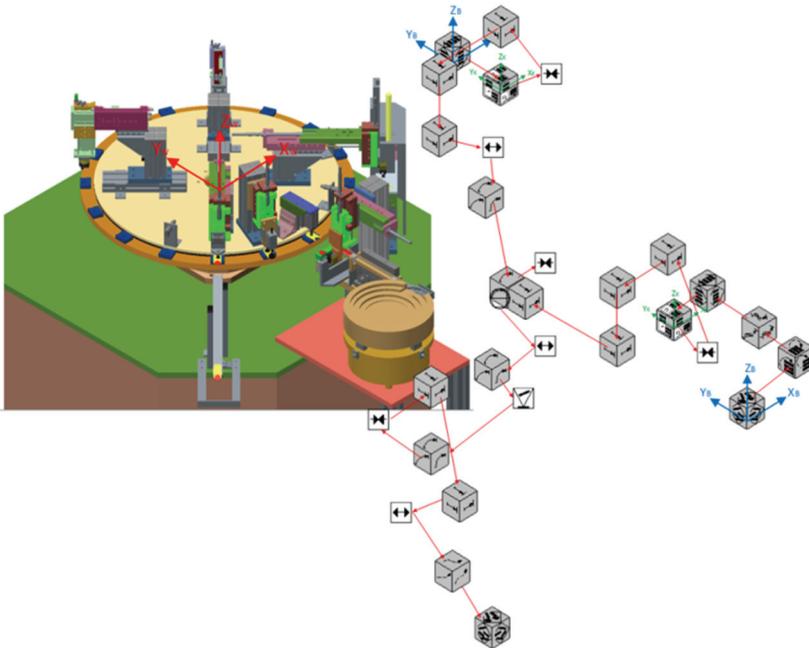
Unter einem **Handhabungsmodul** wird dem gegenüber eine Bewegungseinheit, die z. B. als Serienprodukt hergestellt oder angeboten wird oder sich im Sinne des Baukastenprinzips zu anwendungsspezifischen Aufbauten, z. B. mehrachsigen Portalen etc., einsetzen lassen, verstanden. Sie gliedern sich in Linear-, Rotations- und Schwenkeinheiten sowie Greifer und Prüfkomponenten. [3] Die zu definierenden Kennwerte der Handhabungsmodule beziehen sich somit auf derartige Handhabungseinrichtungen als technische Einrichtungen zur Handhabung des Objekts, siehe Bild 12.

## 4.2 Anwendungsbeispiele

Um die Unterschiede und Anwendungsbereiche der neuen Handhabungssymbole aufzuzeigen, wird als Beispiel eine Rundtaktmaschine zum Fügen von Einkaufswagenchips in einen Chiphalter herangezogen.

## 4.2.1 Grobe Funktionsfolge

Der gesamte Montageprozess ist eine Aneinanderreihung der einzelnen bisher geschilderten Prozesse und ist im Bild 13 dargestellt.



*Bild 13: Struktur und Plan der Funktionsfolge der Rundtaktmaschine*

Einerseits wird eine Chiphalterung aus einem Magazinspeicher entnommen und an einen zentrisch angeordneten Halter übergeben. Gleichzeitig ordnet ein Vibrationswendelförderer die Chips und führt diese nachfolgend vereinzelt über eine Vibrationsschiene der Montagestelle zu. Im Montageablauf wird der Halter gespannt und ein Chip in den Chiphalter, welcher getaktet an der Montagestelle positioniert wird, eingelegt. Nach Überprüfung der korrekten Montage wird die Baugruppe entnommen und mittels Chipauswurf aus dem Rundtaktautomaten entfernt. Den getakteten

Transport des jeweils zu montierenden Objektes von Station zu Station übernimmt der Rundschalttisch. Es ist zu beachten, dass dieser Gesamtprozess aus Sicht eines einzelnen Chips, der durch den Rundtaktautomaten bewegt wird, gesehen werden muss. Absolut gesehen bearbeiten jedoch die Montagestationen parallel gleichzeitig jeweils einen anderen Chip. Der Handhabungsablauf wird durch Funktionssymbole dargestellt. Die räumliche Anordnung des Chips und Chiphalter werden durch 3D-Formen definiert. Die Koordinatensystemen KKS, BKS und WKS bestimmen die Position und Orientierung des Chips und Chiphalter. Aus diesem Grobplan werden die Werte zur Position und Orientierung von Chip und Chiphalter in der Funktionsfolge bestimmt.

#### 4.2.2 Exakte Funktionsfolge

In diesem Beispiel wird ein Teil der Funktionsfolge im Bild 13 gefasst, ein Chiphalter wird aus dem Magazin entnommen, siehe Bild 14.

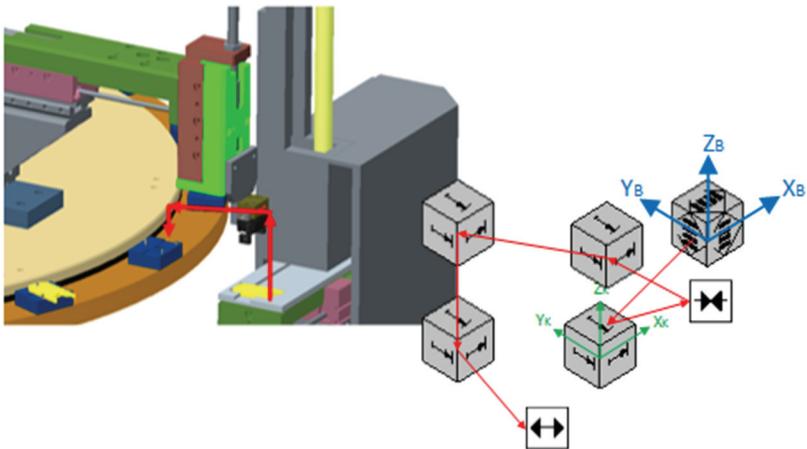


Bild 14: Entnahme eines Chiphalters



**Magazin:** Der Chiphalter ist geordnet und im Magazin gespeichert. Die Menge der Chiphalter beträgt 80 Stück. Das BKS wird in der Mitte des Magazins definiert, das WKS in der Mitte des Drehtischs. Die Beziehungen zwischen dem BKS und WKS werden durch das Funktionssymbol „BKS-WKS“ dargestellt.

**Zeit:** Startzeit ( $t_{\text{start}}$ ), Endzeit ( $t_{\text{end}}$ ), Wartezeit ( $t_w$ ): Handhaben des Chiphalters durch die Montage- und Handhabungsanlagen. Die Zeitabschnitte müssen sehr exakt vorausgerechnet werden, damit die Anlagen gut und ohne Kollision zusammenarbeiten können.

**Zuteilen:** Ein unterer Chiphalter wird aus dem Magazin entlang  $Y_K$ -Richtung 96,5 mm zugeteilt. Die neue Position und Orientierung werden durch KKS und BKS bestimmt.

**Greifen:** Chiphalter wird seitlich ( $B=29$  mm) mit einer Greifkraft 20 N gefasst.

**Verschieben:** Chiphalter wird zum Drehtisch verschoben. Die Kombination aus vertikaler und horizontaler Bewegung wird definiert. Die Bewegungswege werden durch ein Funktionssymbol dargestellt.

**Loslassen:** Nach dem Aufstellen des Chiphalters öffnet sich der Greifer.

#### 4.2.2.2 Funktionsfolge der Handhabungsmodule

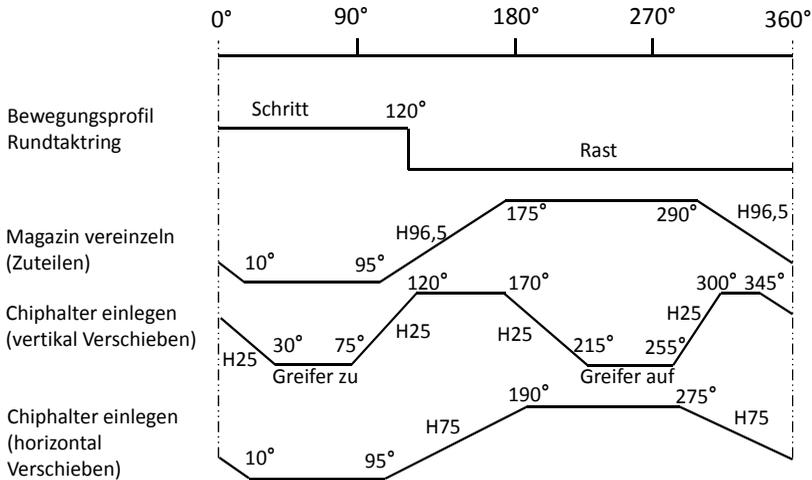
Steuerungssignale der Rundtaktmaschine

Auf dem Schalttisch befinden sich 16 Montagehalterungen. Somit vollführt der Tisch 16 Schritte in einer Umdrehung mit einer Schrittweite von jeweils  $22,5^\circ$ . Die Bewegung dafür wird durch ein Kurvenschrittgetriebe erzeugt. [11]

- Der Rundtaktring mit den Montagehalterungen dreht sich bei einer Bewegung von  $\varphi = 0^\circ$  bis  $\varphi = 120^\circ$  des Referenzsystems um  $\psi = 22,5^\circ$  (siehe Bild 16) und transportiert damit die Montagevorrichtungen von Station zu Station.
- Die Chiphalterungen sind in einem Stapelmagazin aufbewahrt. Aus diesem geordneten Speicher wird jeden Takt eine Halterung entnommen. Diese einzelne Halterung gelangt in eine Vorrichtung auf

dem Linearschlitten, der sich nach dem Bewegungsprofil aus **Bild 16** mit einem Verfahrensweg von 96,5 mm in Richtung Station 2 bewegt.

- Diese Station bildet den Anschluss an die Chiphalterzuführung. Ein pneumatischer Greifer übernimmt die Chiphalterung aus der Vorrichtung und legt sie in die Montagehalterung ein. Der Greifer befindet sich an einem Horizontalschlitten mit einem Hub von 75 mm und einem Vertikalschlitten mit einem Hub von 25 mm, welche nach den im **Bild 16** dargestellten Bewegungsprofilen bewegt werden.



*Bild 16: Bewegungsprofil*

**Funktionsfolge:**

Die Bewegungen von Rundtakttrieb, das Zuteilen, Verschieben, und Greifen hängen von dem Kurvenschrittgetriebe ab. Der Drehwinkel  $\varphi$  ist ein Signal, der die Anfangsbewegung und Endbewegung jeder Funktion zeigt. Aus diesem Grund werden die Bewegungen des Zuteilens, horizontales und vertikales Verschiebens, Greifens unabhängig voneinander beschrieben.

**Zuteilen (Bild 17):** Werkstücke werden im Magazin gespeichert. Um die Anzahl der Werkstücke im Magazin zu überwachen, werden Sensoren installiert. In dem Beispiel wird ein Füllstandssensor verwendet. Wenn z. B.  $geS.L = 1$  ist, ist das Magazin leer und der Zuteiler kann nicht arbeiten. Andere Parameter des Magazins stehen im Funktionssymbol.

Die Bewegungen der Zuteiler können kontinuierlich intermittierend (zeitweilig aussetzend) und alternierend (zwischen den Positionen pendelnd) ablaufen. Die aktiven Elemente können dabei translatorische oder rotatorische Bewegungen ausführen.

**Verschieben (Bild 18):** Die Verschiebewegung ist analog zum Zuteilen, ohne Teilentnahme. Die horizontale Hubbewegung beträgt 75 mm.

**Verschieben, Greifen, Loslassen (Bild 19):** Die Hubbewegung in vertikaler Richtung beträgt 25 mm.



Bild 17: Zuteilen

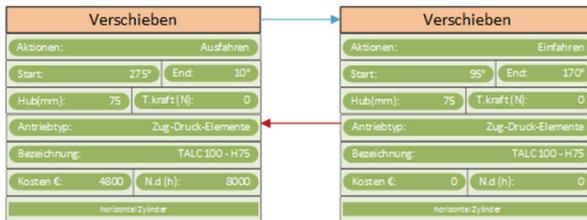


Bild 18: Vertikales Verschieben

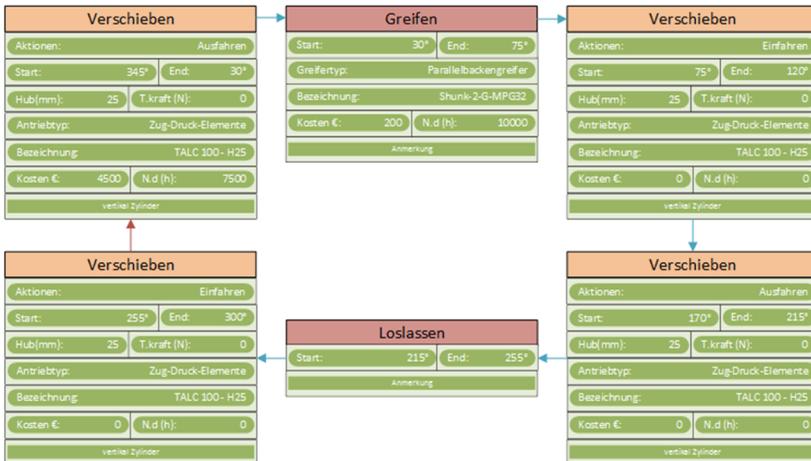


Bild 19: Vertikales Verschieben, Greifen und Loslassen

### 4.2.2.3 Berechnungen der Gesamtkosten und der Taktzeit

#### Zeit

In einem Funktionssymbol bestehen die Startzeit ( $t_{\text{Start}}$ ), Endzeit ( $t_{\text{End}}$ ) und Dauer ( $t_{\text{Dauer}}$ ). Wenn das Werkstück von einer Anlage zur anderen Anlage übergeben wird, muss es u. U. eine Wartezeit ( $t_{\text{Warten}}$ ) einhalten, z. B. um Kollision zu vermeiden. In einer Funktion wird die Endzeit berechnet:

$$t_{\text{End}(i)} = t_{\text{Start}(i)} + t_{\text{Dauer}(i)}$$

$$t_{\text{Start}(i)} = t_{\text{Start}(i-1)} + t_{\text{Warten}(i-1)}$$

#### Gesamtkosten

Jedes Handhabungsmodul umfasst Technikdaten und Kosten. Es ist ein Faktor um eine Einrichtung zu wählen. Die kalkulierten Kosten der Handhabungsmodule hängen von den Anschaffungserfordernissen oder Eigenaufwendungen ab und werden in der Funktion „Kosten“ spezifiziert.

**Gesamtkosten und Taktzeit** werden berechnet und dargestellt (siehe Bild 20).

Gesamtpreis €:	14700
Gesamtzeit (s):	2,96

*Bild 20: Berechnung der Gesamtzeit und Gesamtpreises*

## 5 Diskussion und Ausblick

Der Beitrag zeigt neue Funktionssinnbilder in Erweiterung der VDI 2860. Zudem ist eine neue Gruppe der Hilfsfunktionen entstanden. Die Funktionssymbole schaffen eine logische Verbindung der Funktionselemente, um Handhabungsabfolgen eindeutiger zu beschreiben. Dies ermöglicht zukünftig eine Überführung in ein Anwendungsprogramm mit Parameterbezug, wobei die wichtigsten Anforderungen wie folgt benannt werden:

- 2D- und 3D-Formen werden genutzt,
- Koordinatensystemen KKS, BKS, WKS werden erstellt, um die relativen räumlichen Anordnung des Werkstücks zu bestimmen,
- Funktionsfolgen werden zeit- und anwendungsbezogen dargestellt,
- Grundlagenmodule zur Erstellung einer Bibliothek (Software) wobei Handhabungssymbole z. B. als „Shapes Schablonen“ dargestellt werden können und
- Optimierungsaufgaben bzgl. der Taktzeit und des Gesamtpreises zukünftig für den Anwender einfacher und offensichtlicher werden.

## 6 Quellen

- [1] VDI-Richtlinie Montage- und Handhabungstechnik 2860,; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole, Mai.1990
- [2] Hesse, S.; Montagemaschinen. Würzburg: Vogel Verlag, 1993
- [3] Hesse, S.; Handhabungstechnik von A bis Z. Darmstadt: Hoppenstedt Technik Tabellen Verlag, 2008
- [4] Biles, W, E.; Usher, J, S.; Zohdi, M, E.: Mechanical Engineerings' Handbook: Manufacturing and Management, Volume 3, Third Edition. John Wiley & Sons, 2006
- [5] Konold, P.; Reger, H.: Praxis der Montagetechnik. Wiesbaden: Fried. Vieweg & Sohn Verlags/GVWV Fachverlage GmbH, 2003

- 
- [6] Lenarcic, J.; Bajd, T.; Stanisic, M, M.: Robot Mechanisms. Springer Dordrecht Heidenberg New York London, 2013
  - [7] Nguyen-Dang, T.; Berger, M.: Research and application of functional elements and newly defined function symbols for mechanical handling systems. Proceedings of The 7th AUN/SEED-Net Regional Conference in Mechanical and Manufacturing Engineering, 2014, ISBN 978-604-911-942-2
  - [8] Trötster, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure. München, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2011
  - [9] Hesse, S.: Grundlage der Handhabungstechnik. München: Carl Hanser Verlag München, 2013
  - [10] Hesse, S.: Atlas der moderner Handhabungstechnik. Darmstadt: Hoppenstedt Technik Tabellen Verlag, 1991
  - [11] Legler, C.: Vorbereitung der Inbetriebnahme eines Rundtaktautomaten für das studentische Praktikum. Chemnitz, TU Chemnitz, Professur Montage- und Handhabungstechnik. Studienarbeit. 2014 – Überprüfungsdatum 13.01.2015

