

## Simulative Untersuchung verschiedener Positionen von Kraftsensoren

# Untersuchung der Kraftverlaufskurven bei Versatz

M. Kriwall, C. Niemann, J. Eichstaedt, M. Stonis, B.-A. Behrens

**ZUSAMMENFASSUNG** Dieser Beitrag untersucht, wie Kraftsensoren positioniert sein müssen, um eine Fehlpositionierung von Halbzeugen festzustellen. Hierfür werden simulative Untersuchungen an einem Gesenk durchgeführt. Dabei sind mögliche Positionen für eine Sensorplatzierung rasterförmig aufgebracht. Die aufgezeichneten Kraftwerte der jeweiligen Sensoren werden untersucht, um diejenigen Sensoren zu identifizieren, welche besonders geeignet sind, zuverlässig eine Fehlpositionierung zu erkennen.

## STICHWÖRTER

Qualitätssicherung, Umformtechnik

## Investigation of the force curves for offset – Simulative investigation of different positions of force sensors

**ABSTRACT** This article examines how force sensors must be positioned to detect incorrect positioning of forging blanks. For this purpose, simulative investigations are carried out on a die. Positions for possible sensor placement are applied in a grid pattern. The recorded force values of the respective sensors are analyzed to identify those sensors that are particularly suitable for reliably detecting incorrect positioning.

## 1 Positionserkennung mittels Kraftsensoren

Im Zuge des Forschungsprojekts „Entwicklung einer vorausschauenden Überwachung von Schmiedeprozessen zur Erschließung qualitativer und wirtschaftlicher Potenziale“ („VorÜber“) wurden zwei Methoden untersucht, um den Verschleiß eines Schmiedegesenks zu bewerten [1]. Zum einen wurden optische Messungen des Gesenks als Basis für die Verschleißbewertung und Prognose der verbleibenden Standmenge genutzt. Zum anderen wurden Kraftmesssensoren appliziert und über die Änderung der aufgenommenen Kräfte eine Abschätzung der verbleibenden Standmenge getroffen. Bei der praktischen Versuchsdurchführung und Auswertung konnte festgestellt werden, dass die aufgezeichneten Kraftwerte bei außermittig eingelegten Halbzeugen gegenüber denen von mittig eingelegten Halbzeugen variierten.

Im Rahmen dieser Untersuchungen war die Positionierung der Sensoren darauf ausgelegt, den Verschleiß zu detektieren. Die Position der Sensoren war somit nicht ideal für die Ermittlung von Fehlpositionierungen. In den nachfolgenden Untersuchungen wird das Vorgehen zur Identifikation geeigneter Positionen von Kraftsensoren für die Detektion von Positionierfehlern dargelegt. Dafür werden verschiedene Positionen für Kraftsensoren simulativ untersucht. Anhand der bei unterschiedlicher Positionierung des Halbzeugs aufgenommenen Kraftwerte wird die Eignung der verschiedenen Sensorpositionen untersucht. Ziel ist, diejenigen Positionen von Sensoren zu identifizieren, die eine Aussage über die Fehlpositionierung des Halbzeugs zulassen.

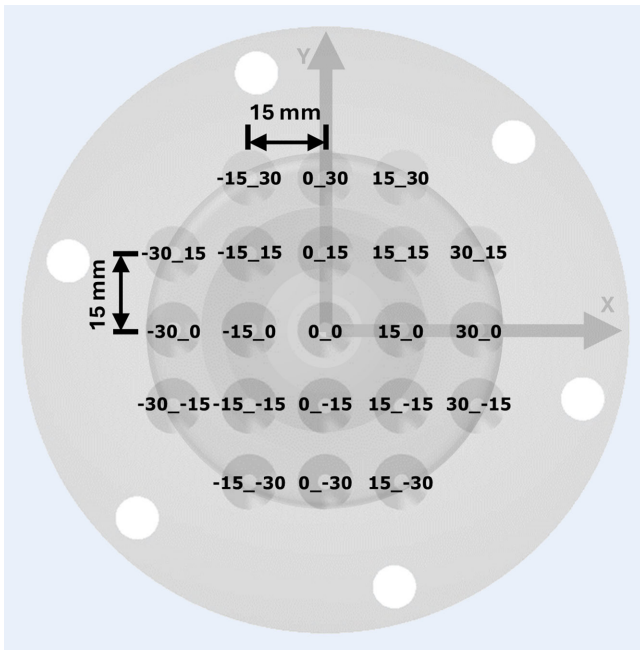
## 2 Nutzung von Kraftmesssensoren für die Prozessüberwachung

Die Möglichkeit, das Ergebnis und die Qualität von Prozessen vorherzusagen, ist im Bereich der Fertigung ein enormer Wettbewerbsvorteil. Die Warmmassivumformung ist ein besonders herausforderndes Umfeld für die Prozessüberwachung, da die Bedingungen, unter denen die Umformung stattfindet, eine genaue Überwachung erschweren. Es sind beispielsweise die hohen Temperaturen des Werkstücks zu nennen, welche Messinstrumente thermisch beeinflussen können. Zudem können Schmiermittel und Zunder die Sensoren verschmutzen. Die durch den Umformprozess verursachten Stöße, Schläge und Vibrationen, erschweren das Anbringen von Sensoren und die genaue Erfassung von Geometrien. Zorn *et al.* nutzen eine modulare Kraftmesseinheit, zur Erfassung der Kraftverteilung auf Werkzeugebene. Die Auswertung der Signale erlaubt die Darstellung der Kraftverteilung auf dem Pressentisch [2].

Ecker *et al.* untersuchten die Möglichkeiten der Prozessüberwachung beim Gesenkschmieden [3]. Sie erkannten die Möglichkeit, mithilfe von Kraftmessungen Verschleiß oder Bewegungen der Gesenke zu erkennen.

Cheng nutzte Kraftmessungen, um in einem Umformprozess zur Fertigung von Schrauben Unregelmäßigkeiten zu erkennen [4]. Die Untersuchungen konzentrierten sich nicht auf Positionierfehler, sondern auf Schäden am Gesenk (zum Beispiel Risse).

Durand *et al.* untersuchten die Vorteile verschiedener Sensoren. Auf Basis dieser Untersuchungen wurde eine Empfehlung abgeleitet, welcher Sensortyp für welche Messaufgabe geeignet ist [5]. Sie untersuchten den Einsatz von Hochgeschwindigkeitskameras,



**Bild 1.** Übersicht der untersuchten Sensorpositionen mit der verwendeten Nomenklatur auf einer skizzenhaften Darstellung der Grundplatte des Gesenks und der Gravur. Grafik: IPH

magnetischen Inkrementalgebern, Lasersensoren, Beschleunigungsmessern, Dehnungsmessstreifen und Berührungsdehnungsmessern während eines Kupferumformprozesses bei 19 °C.

Kim *et al.* untersuchten den Einsatz von bolzenförmigen Piezosensoren in einem Gesenkschmiedeprozess. Über diese Untersuchungen konnten Informationen über das Werkzeug und das Werkstück generiert werden [6], beispielsweise wurde unzureichende Formfüllung erkannt. Kim *et al.* zeigten zudem Ansätze, wie eine außermittige Platzierung des Halbzeugs oder Prozessschwankungen, etwa Temperaturänderungen, detektiert werden können. Die außermittige Platzierung konnte durch geänderte Verhältnisse der gemessenen Kraftwerte untereinander detektiert

werden. Eine Untersuchung der Eignung unterschiedlicher Sensorpositionen wurde nicht beschrieben. Durch die Erfassung der Kraft des Auswerfers konnten Risse im Gesenk erkannt werden.

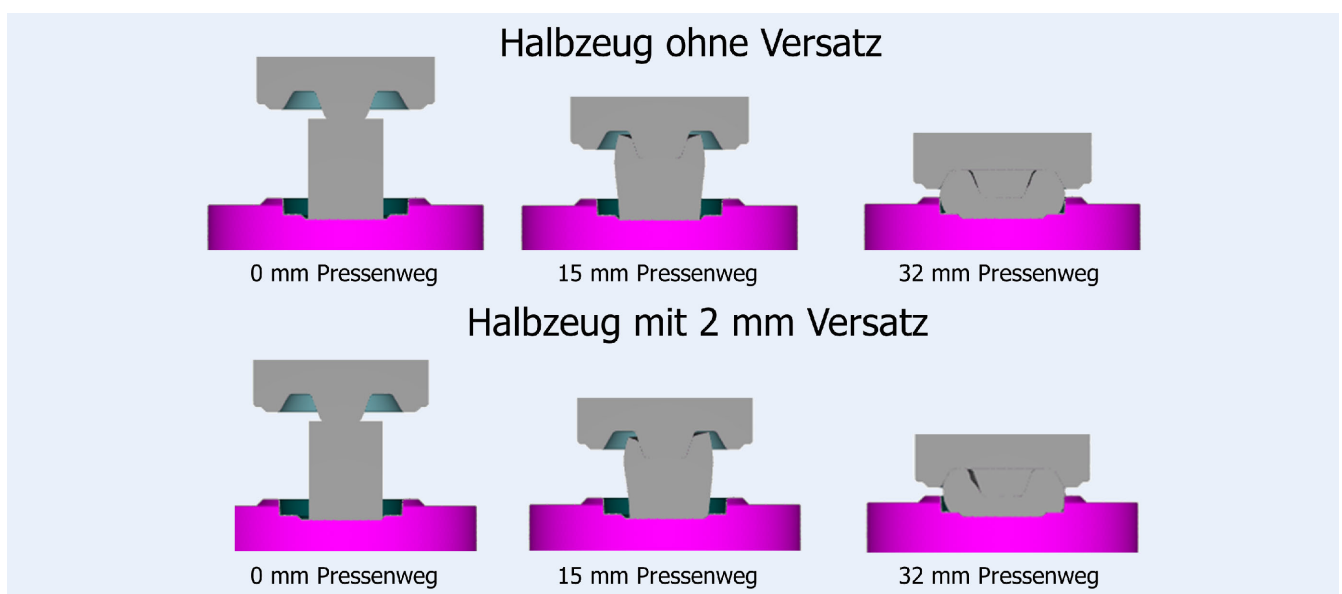
Schleinitz *et al.* untersuchten die Kraftverteilung einer Presse. Ziel war exzentrische Lastfälle zu erkennen und eine Kraftregelung zu entwickeln [7]. Der Schwerpunkt lag dabei auf Blechumformprozessen.

Keine der vorgestellten Untersuchungen beschreibt, welche Sensorpositionen für die Detektion von Versatz geeignet sind. Auch wird nicht angegeben, anhand welcher Kriterien Sensorpositionen in den vorliegenden Arbeiten ausgewählt wurden. Die Warmmassivumformung ist geprägt durch viele manuelle Tätigkeiten. Die Qualität des gefertigten Produkts hängt von der Erfahrung jener Mitarbeitenden ab, die den Schmiedeprozess durchführen und das Rohteil sowie mögliche Zwischenformen positionieren. Werden Fehlpositionierungen anhand von aufgenommenen Kraftwerten direkt während der Umformung erkannt, erlaubt dies eine frühzeitige Aussage über die Qualität des Schmiedeergebnisses. Um dies zu ermöglichen, muss untersucht werden, wie präzise eine solche Vorhersage ist. Damit die Gesenke möglichst wenig verändert werden, muss zudem untersucht werden, welche Anzahl an Sensoren ausreichend ist, um eine Fehlpositionierung zu detektieren und wo die Sensoren idealerweise positioniert werden. Im Folgenden werden verschiedene Sensorpositionen bei einem Gesenkschmiedeprozess verglichen.

### 3 Versuchsaufbau und -durchführung

Für die Versuchsdurchführung wurde, auf den Beobachtungen aus dem Forschungsprojekt „VorÜber“ aufbauend, eine rotationsymmetrische Geometrie untersucht. Dafür wurden Simulationen in der Software „Forge NxT 3.2“ durchgeführt. Das Obergesenk wurde mit 21 Sensorknoten versehen, welche die Kraftwerte an der jeweiligen Stelle in Z-Richtung aufnehmen. **Bild 1** zeigt die Positionen für die Sensorknoten in der Simulation. In dem Bild ist auch zu erkennen, wie die Sensoren bezeichnet werden.

Das zylindrische Halbzeug mit einem Durchmesser von 30 mm und einer Höhe von 40 mm wurde in einem rotations-



**Bild 2.** Darstellung verschiedener Schritte der Simulation von dem Halbzeug ohne Versatz (oben) und dem Halbzeug mit 2 mm Versatz (unten). Grafik: IPH

**Tabelle.** Übersicht der in der Simulation genutzten Parameter.

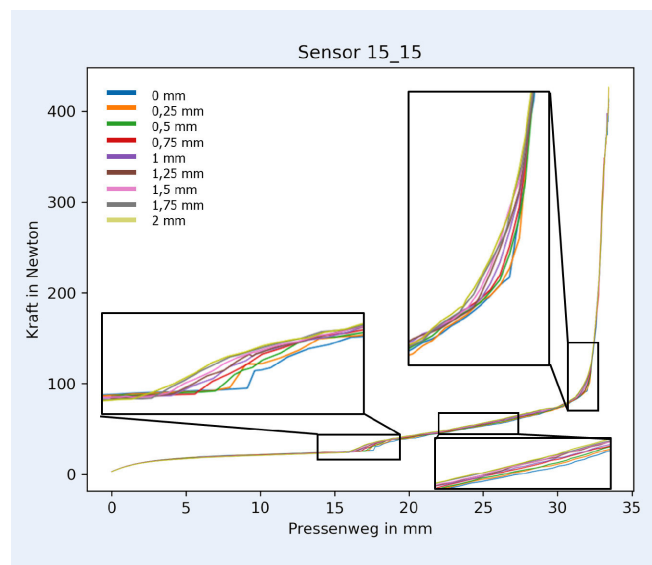
Halbzeug		Material	C45
Temperatur		1250 °C	
Wärmeübergang	mit der Umgebung	Mittlerer Wärmeübergang mit Luft	
	mit dem Werkzeug	Starker Wärmeübergang mit Stahl	
Vernetzung	Merge Tolerance Faktor	0.01	
	Patch Angle Tolerance	3	
	Size Faktor	0.7	
	Volumic Size Faktor	2	
Werkzeuge		Material	35CrMoV5-1
Temperatur		20 °C	
Wärmeübergang	mit der Umgebung	Mittlerer Wärmeübergang mit Luft	
	mit dem Werkzeug	Starker Wärmeübergang mit Stahl	
Reibung	zwischen Werkzeug und Werkstück	Niedrige Reibung mit Ölschmierung	
Vernetzung	Merge Tolerance Faktor	0.01	
	Patch Angle Tolerance	3	
	Size Faktor	0.7	
	Volumic Size Faktor	2	
Presse		Pressentyp	Hydraulische Presse
Pressengeschwindigkeit		300 mm/s	

symmetrischen Werkzeug, das in **Bild 2** im Schnitt dargestellt ist, umgeformt. Das Halbzeug wurde dafür auf dem Untergesenk platziert. Das Obergesenk war zu Beginn der Umformsimulation in Kontakt mit dem Halbzeug und wurde in der Simulation um 33,5 mm heruntergefahren. Zur Erprobung, welche Sensorpositionen für die Detektion von Fehlpositionierungen geeignet sind, wurde die Halbzeugposition in den verschiedenen Simulationen variiert.

Bild 2 zeigt einzelne Schritte der Simulation. Oben wird das Halbzeug ohne Versatz gezeigt, unten das Halbzeug mit 2 mm Versatz. Links ist der Beginn der Umformung gezeigt, mittig nach 15 mm Pressenweg und rechts nach 32 mm Pressenweg, kurz vor Ende der Umformung.

Es wurde eine Simulation mit mittig positioniertem Halbzeug durchgeführt. Anschließend erfolgten weitere Simulationen, in denen das Halbzeug mit Versatz zur idealen, mittigen Position platziert wurde. Dazu wurde das Halbzeug mit 0,25 mm, 0,5 mm, 0,75 mm, 1 mm, 1,25 mm, 1,5 mm, 1,75 mm und 2 mm Versatz in X-Richtung platziert. Die Untersuchungen erfolgten zunächst nur mit Versatz in X-Richtung. Weitere Untersuchungen mit Versatz in Y-Richtung sowie mit kombiniertem Versatz in X- und Y-Richtung sollen folgen. Für die Simulation wurden die in der **Tabelle** genannten Parameter verwendet.

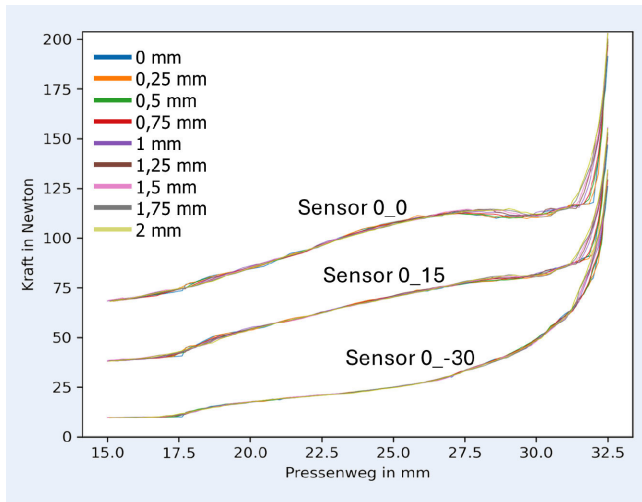
In den durchgeführten Simulationen wurden für jede Sensorposition die dort auftretenden Kräfte aufgenommen. Diese wurden als Kraftverläufe über den Pressenweg aufgezeichnet. **Bild 3** zeigt exemplarisch die in Z-Richtung aufgenommenen Kraftverläufe für die unterschiedlich in X-Richtung positionierten Halbzeuge über den gesamten Pressenweg für Sensor 15\_15.



**Bild 3.** Darstellung des Kraftverlaufs während der Umformung für unterschiedliche Halbzeugpositionen für Sensor 15\_15. Grafik: IPH

läufe für die unterschiedlich in X-Richtung positionierten Halbzeuge über den gesamten Pressenweg für Sensor 15\_15.

Bild 3 zeigt die Kurvenverläufe der verschieden positionierten Halbzeuge in unterschiedlichen Farben. Es ist zu erkennen, dass zu Beginn der Umformung, bei einem Pressenweg von 0 mm bis 16 mm, alle Kurven sehr eng beieinander verlaufen. In der Dar-



**Bild 4.** Vergleich der Kurvenverläufe von Sensor 0\_0, Sensor 0\_15 und Sensor 0\_-30. Grafik: IPH

stellung sind die verschiedenen Kurven in diesem Kurvenabschnitt nicht zu unterscheiden. Die abhängig vom Versatz aufgezeichneten Kräfte weisen keine großen Unterschiede auf. In diesem Abschnitt der Umformung hat nur der Dorn, der mittig im Gesenk platziert ist, Kontakt mit dem Halbzeug (Bild 2 links). Unabhängig vom Versatz macht die gesamte Fläche des Dorns Kontakt mit dem Halbzeug. Die abhängig vom Versatz übertragenen Kräfte unterscheiden sich nicht. Ab 16 mm Pressenweg sind leichte Unterschiede der Kurven der unterschiedlich positionierten Halbzeuge zu erkennen. Es ist zunächst der Bereich zwischen 15 mm und 20 mm Pressenweg zu nennen. Dieser Bereich ist in Bild 3 vergrößert hervorgehoben. Hier beginnen die aufgenommenen Kräfte anzusteigen, wobei die Kurven der Halbzeuge mit stärkerem Versatz früher zu steigen beginnen als die Kurven der Halbzeuge mit weniger Versatz. In diesem Abschnitt der Umformung beginnt das Material in die Gravur zu fließen. Abhängig vom Versatz des Halbzeugs entstehen Unterschiede. In jener Richtung, in die das Halbzeug verschoben ist, ist mehr Material vorhanden. Deshalb fließt dort mehr Material in die Gravur beziehungsweise das Material fließt zu einem etwas früheren Zeitpunkt in diesen Bereich (Bild 2, Mitte).

In Bild 2 ist zu erkennen, dass bei dem Halbzeug mit 2 mm Versatz im mittleren Bild das Material auf der rechten Seite der Gravur etwas höher steigt als zum gleichen Zeitpunkt bei dem Halbzeug ohne Versatz. Sensor 15\_15 ist auf der rechten Gesenkhälfte platziert. Deshalb zeigt Sensor 15\_15 ein früheres Ansteigen der Kurven mit stärkerem Versatz. Im weiteren Verlauf der Umformung, im Bereich zwischen 20 mm und 30 mm Pressenweg, verlaufen die Kurven dicht beieinander, wobei die Kurven der Halbzeuge mit stärkerem Versatz oberhalb der Kurven der Halbzeuge mit niedrigerem Versatz verlaufen. Dies ist im vergrößerten Kurvenabschnitt zwischen 25 mm und 30 mm Pressenweg zu erkennen. Auch hier fließt in die Richtung, in die das Halbzeug verschoben ist, mehr Material. Deshalb werden hier geringfügig höhere Kräfte übertragen.

Im letzten Kurvenabschnitt, ab 30 mm Pressenweg bis zum Ende der Umformung, beginnen die Kräfte stark anzusteigen. Zunächst sind noch Unterschiede zwischen den Kurven erkennbar (vergrößerter Bereich zwischen 30 mm Pressenweg und 32 mm Pressenweg). Der Anstieg der Kräfte erfolgt, da in diesem

Abschnitt der Umformung Formfüllung erreicht wird. Bei Halbzeugen, die mit Versatz positioniert sind, wird etwas früher lokale Formfüllung in einem Bereich des Gesenks erreicht (Bild 2 rechts). Deshalb steigen die Kräfte der mit Versatz eingelegten Halbzeuge etwas früher an als bei dem ohne Versatz positionierten Halbzeug, jedoch nicht so steil. Die Kurve des Halbzeugs ohne Versatz beginnt später, dann aber deutlich steiler zu steigen, da bei dem ohne Versatz positionierten Halbzeug die Formfüllung des Gesenks in allen Bereichen zeitgleich erfolgt. Zwischen 32 mm Pressenweg und 33,5 mm Pressenweg verlaufen die Kurven sehr eng beieinander. Es sind keine Unterschiede zu erkennen. Es wird unabhängig von der Halbzeugposition Formfüllung erreicht. Der Kurvenabschnitt zwischen 15 mm Pressenweg und 32,5 mm Pressenweg ist der Bereich, in dem Unterschiede abhängig von der Halbzeugposition erkennbar sind. Die Kraftverläufe, die hier an den verschiedenen Sensorpositionen abhängig vom Versatz des Halbzeugs aufgezeichnet werden, werden im Folgenden genauer untersucht.

## 4 Versuchsergebnisse

Über die Auswertung der Kraftverläufe im genannten Bereich, sollen Sensorpositionen identifiziert werden, die geeignet sind, einen Versatz des Halbzeugs zu detektieren. Die Kurvenverläufe werden exemplarisch am Beispiel der Daten einzelner Sensoren beschrieben. Um die Übersichtlichkeit zu erhöhen, sind in den Grafiken nicht alle Sensoren dargestellt.

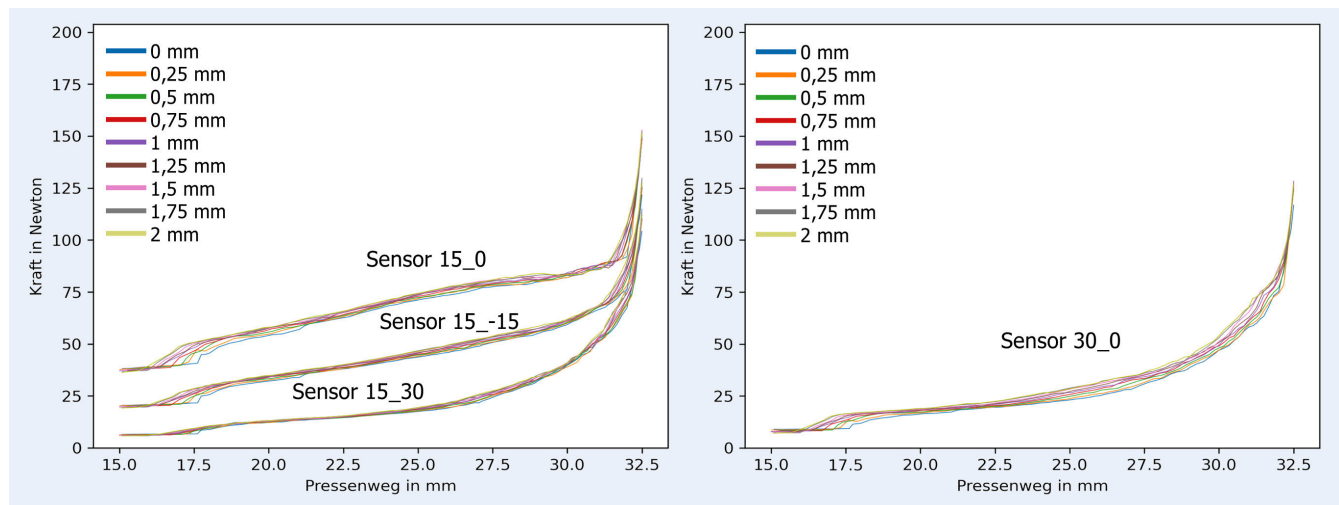
**Bild 4** zeigt die Kurven der Sensoren 0\_0, 0\_15 und 0\_-30. Diese Sensoren sind in X-Richtung mittig im Gesenk angeordnet (siehe Bild 1). An den Kurven ist zu erkennen, dass die von Sensor 0\_0 aufgenommenen Kräfte höher sind als die der anderen Sensoren.

Es ist zu erkennen, dass Sensor 0\_-30 die niedrigsten Werte dieser drei Sensoren aufnimmt. Mittig im Gesenk wird mehr Kraft übertragen als am Rand des Gesenks. Die Kraftverlaufskurven der drei Sensoren zeigen, dass im Bereich 15 mm Pressenweg bis 27,5 mm Pressenweg der Versatz des Halbzeugs nur wenig Auswirkung auf die aufgenommenen Kräfte hat. Die Unterschiede zwischen den Kurven weisen bei dem jeweiligen Sensor nur geringfügige Unterschiede auf. Die Kurven liegen dicht beieinander.

Bei Sensor 0\_0 ist zu erkennen, dass vor dem Anstieg der Kraft zum Ende der Umformung, zwischen 27,5 mm Pressenweg und 30 mm Pressenweg, der Kraftanstieg stagniert oder sogar leicht sinkende Kräfte aufgezeichnet werden. In diesem Kurvenabschnitt sind bei Sensor 0\_0 leichte Unterschiede der Kurven abhängig von der Halbzeugposition erkennbar. Die Kurven der Halbzeuge mit weniger Versatz liegen in diesem Kurvenabschnitt tendenziell unterhalb der Kurven der Halbzeuge mit größerem Versatz. Bei den Kurven in Bild 4 erfolgt, wie zuvor für Sensor 15\_15 beschrieben, ein steiler Anstieg der Kraft zum Ende der Umformung. Bei Sensor 0\_-30 erfolgt der Kraftanstieg allmählich, wogegen dieser bei Sensor 0\_0 und auch bei Sensor 0\_15 abrupter erfolgt. Um die Grafik übersichtlich zu halten, wurden nicht die Kraftverläufe aller Sensoren abgebildet. Die Kurven des Sensors 0\_-15 ähneln denen des Sensors 0\_15. Die Kurven des Sensors 0\_30 ähneln denen des Sensors 0\_-30.

In **Bild 5** sind Kraftverläufe von Sensoren abgebildet, die auf der rechten Seite des Gesenks positioniert sind (siehe Bild 1). Bei diesen Kurven ist zu erkennen, dass die von Sensor 15\_0 aufge-





**Bild 5.** Vergleich der Kurvenverläufe von Sensor 15\_0, Sensor 15\_-15 und Sensor 15\_30 (links) und Sensor 30\_0 (rechts). Grafik: IPH

nommenen Kraftwerte insgesamt höher liegen als die der anderen Sensoren.

Bei Sensor 15\_0 ist zu erkennen, dass im Kurvenabschnitt 16 mm Pressenweg bis 19 mm Pressenweg die Kurven abhängig vom Versatz Unterschiede aufweisen. Die von Sensor 15\_0 aufgenommene Kraft steigt, wie am Beispiel von Sensor 15\_15 in Bild 3 beschrieben, bei stärkerem Versatz früher an. Bei geringem Versatz steigt die Kurve später an. Im weiteren Kurvenverlauf sind die Unterschiede, die abhängig vom Versatz auftreten, weniger deutlich zu erkennen. In diesem Kurvenabschnitt (19 mm Pressenweg bis 28 mm Pressenweg) bleibt die Steigung der Kurven fast konstant. Die Kurven der Halbzeuge mit stärkerem Versatz liegen insgesamt oberhalb der Kurven der Halbzeuge mit geringerem Versatz. Die Änderung der Steigung im Kurvenabschnitt zwischen 16 mm Pressenweg und 19 mm Pressenweg ist bei Sensor 15\_30 nicht so deutlich ausgeprägt wie bei Sensor 15\_0. Insgesamt liegen die Kurven dichter beieinander.

Zum Ende der Umformung steigen die Kräfte bei allen Sensoren stark an. Bei Sensor 15\_0 erfolgt bei 31 mm Pressenweg eine deutliche Änderung der Steigung der Kurven. Bei den aufgezeichneten Kraftverläufen des Sensors 15\_30 nimmt die Kraft beständig zu. Die Änderung der Steigung erfolgt nicht abrupt. Die Kurven des Sensors 15\_-15 liegen zwischen den Kurven von Sensor 15\_0 und Sensor 15\_30. Die Unterschiede der Kurven, abhängig vom Versatz, sind bei Sensor 15\_-15 etwas schwächer ausgeprägt als bei Sensor 15\_0, sind aber deutlich zu erkennen. Die Änderung der Steigung im Kurvenbereich zwischen 28 mm Pressenweg und 31 mm Pressenweg ist weniger stark ausgeprägt als bei Sensor 15\_0.

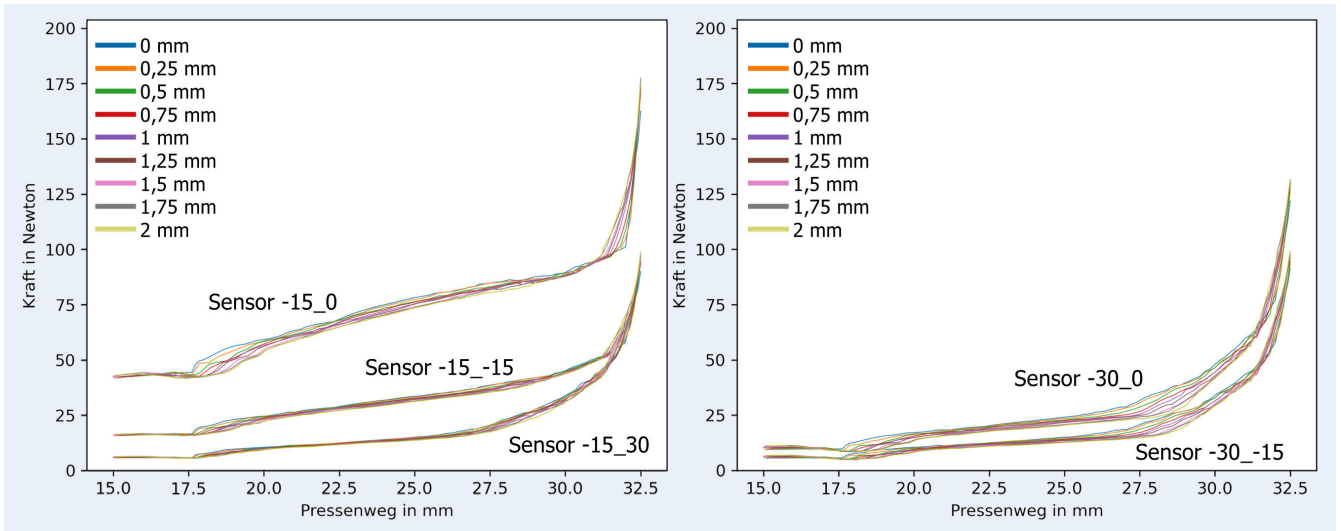
Um die Grafik übersichtlich zu halten, wurden nicht die Kraftverläufe aller Sensoren abgebildet. Die Kurven des Sensors 15\_15 ähneln denen von Sensor 15\_-15 und sind auch in Bild 3 zu sehen. Die Kurven des Sensors 15\_30 ähneln dem Kurvenverlauf des Sensors 15\_30. Die von Sensor 30\_0 aufgenommenen Kräfte liegen unterhalb der von den Sensoren 15\_15 und 15\_-15 aufgenommenen Kräfte. Im Bereich 16 mm Pressenweg bis 19 mm Pressenweg ist bei Sensor 30\_0 ein Unterschied zwischen den Kurven der verschiedenen positionierten Halbzeuge zu erkennen. Im weiteren Kurvenverlauf liegen die Kurven der Halbzeuge mit stärkerem Versatz oberhalb der Halbzeuge mit geringerem Versatz. Die von den Sensoren 30\_15 und 30\_-15 aufgenommenen

Kurven verlaufen ähnlich wie die von Sensor 30\_0 und sind zur besseren Übersichtlichkeit nicht in Bild 5 abgebildet. In Bild 6 sind die aufgenommenen Kräfte von Sensoren, die auf der linken Gesenkhälfte positioniert sind, abgebildet.

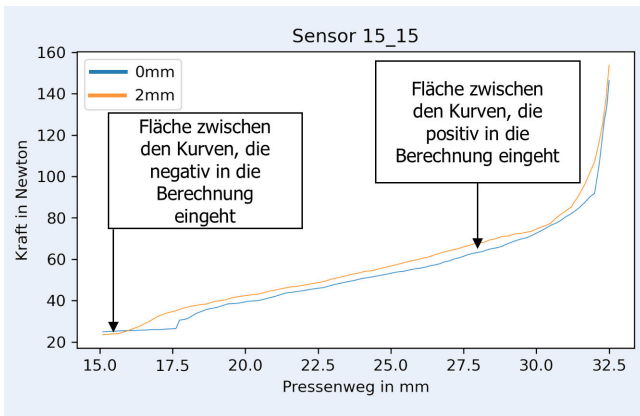
Es ist zu erkennen, dass die aufgenommenen Kräfte von Sensor -15\_0 insgesamt höher sind als die der anderen Sensoren. Alle Sensoren zeigen ein Ansteigen der Kräfte bei 17,5 mm Pressenweg. Insbesondere bei Sensor -15\_0 ist zu erkennen, dass die Kurve des Halbzeugs ohne Versatz (blaue Kurve) zuerst zu steigen beginnt. Mit zunehmendem Versatz beginnen die Kurven später zu steigen. Bei den anderen Sensoren erfolgt dies auch, ist aber weniger stark ausgeprägt. Wie zuvor beschrieben und in Bild 2 dargestellt, steigt das Material bei zunehmendem Versatz etwas früher auf der rechten Gesenkhälfte, da durch die Positionierung in diese Richtung, dort mehr Material vorliegt. Auf der linken Gesenkhälfte ist bei Positionierung des Halbzeugs in Richtung der rechten Gesenkhälfte weniger Material vorhanden. Je größer der Versatz ist, desto später steigt das Material auf der linken Gesenkhälfte und desto später werden dort die Kräfte übertragen. Dies führt dazu, dass zunächst die Kurve des Halbzeugs ohne Versatz ansteigt und die Kurven mit zunehmendem Versatz später zu steigen beginnen.

Im weiteren Verlauf liegen die Kurven der Halbzeuge mit weniger Versatz oberhalb derer mit stärkerem Versatz. Dies ist von Sensor zu Sensor unterschiedlich stark ausgeprägt. Ab 31 mm Pressenweg ändert sich die Steigung der Kurven von Sensor -15\_0 stark. Die Kurven der Halbzeuge mit stärkerem Versatz beginnen hier zu einem früheren Zeitpunkt zu steigen als die der Halbzeuge mit weniger Versatz. Dieses Verhalten wurde bereits am Beispiel von Bild 3 beschrieben. Die Kurven der anderen Sensoren beginnen früher zu steigen, die Steigung ändert sich bei diesen Sensoren nicht so stark. Für eine übersichtliche Grafik wurden nicht die Kraftverläufe aller Sensoren abgebildet. Die Kurven von Sensor -15\_15 ähneln denen von Sensor -15\_-15, Die Kurven von Sensor -15\_30 jenen von Sensor -15\_30. Die Kurven von Sensor -30\_15 ähneln denen von Sensor -30\_-15.

Um aus den oben gezeigten Kurvenverläufen Trends ableiten und die Unterschiede der Kurvenverläufe abhängig vom Versatz des Halbzeugs quantifizieren zu können, wurden die Flächen zwischen dem Kurvenverlauf des ohne Versatz positionierten Halbzeugs und den Kurven der mit Versatz positionierten Halb-



**Bild 6.** Vergleich der Kurvenverläufe von Sensor -15\_0, Sensor -15\_-15 und Sensor -15\_30 (links) und Sensor -30\_0 und Sensor -30\_-15 (rechts). Grafik: IPH



**Bild 7.** Darstellung zweier mit Sensor 15\_15 aufgenommenen Messkurven zur Verdeutlichung der Flächenberechnung. Grafik: IPH

zeuge berechnet. **Bild 7** zeigt für Sensor 15\_15 die Kurve des Halbzeugs ohne Versatz (blau) und die Kurve des Halbzeugs mit 2 mm Versatz (orange) im Bereich 15 mm bis 32,5 mm Pressenweg.

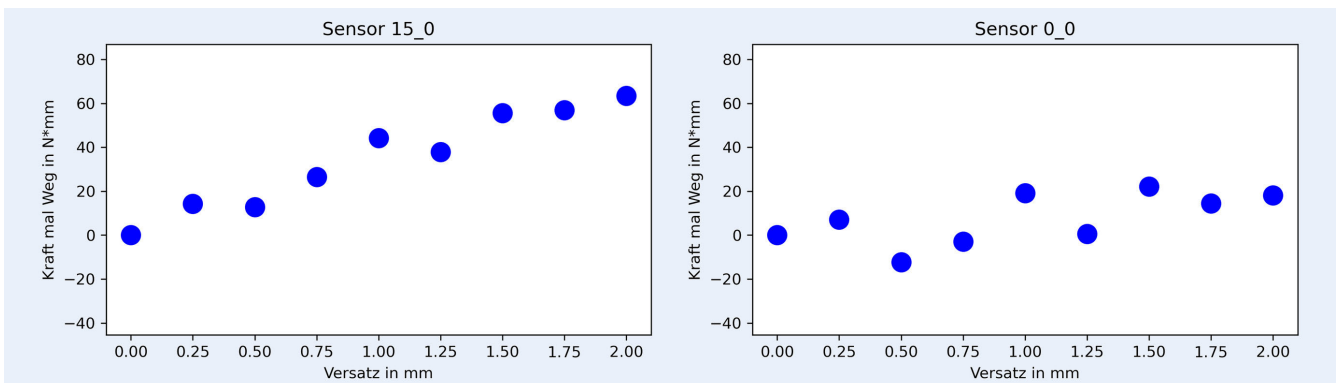
Liegt die Kurve des Halbzeugs ohne Versatz oberhalb der Kurve des Halbzeugs mit Versatz, geht diese Fläche negativ in die Berechnung der Fläche zwischen den Kurven ein. Verläuft die Kurve

des Halbzeugs ohne Versatz unterhalb der Kurve des Halbzeugs mit Versatz, geht diese Fläche positiv in die Berechnung ein. Die errechneten Werte wurden abhängig vom zugehörigen Versatz in Diagrammen dargestellt. In den Diagrammen ist auf der Abszisse die Ausprägung des Versatzes in X-Richtung aufgetragen und auf der Ordinate die für den jeweiligen Versatz berechnete Fläche zwischen der zugehörigen Kurve und der Kurve des Halbzeugs ohne Versatz. Die Diagramme für Sensor 0\_0 und Sensor 15\_0 sind in **Bild 8** gegenübergestellt.

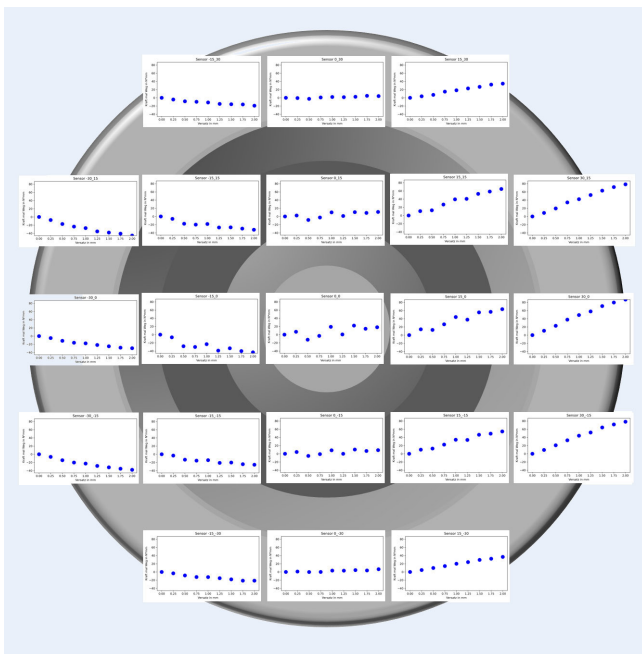
Beim Vergleich der beiden Grafiken ist zu erkennen, dass die Werte von Sensor 0\_0 streuen und kein klarer Trend zu erkennen ist. Sensor 15\_0 zeigt einen deutlichen positiven Trend an. Die Werte von Sensor 0\_0 sind insgesamt niedriger als die von Sensor 15\_0. Das liegt daran, dass die Unterschiede zwischen den Kurven der Halbzeuge mit Versatz und der Kurve des Halbzeugs ohne Versatz bei Sensor 0\_0 deutlich geringer ausfallen als bei Sensor 15\_0 (siehe Bild 5).

Die Berechnungen der Flächen zwischen den Kurven der Halbzeuge mit Versatz und der Kurve des ohne Versatz eingelegten Halbzeugs wurden für alle Sensoren durchgeführt. Eine Übersicht der Ergebnisse gibt **Bild 9**.

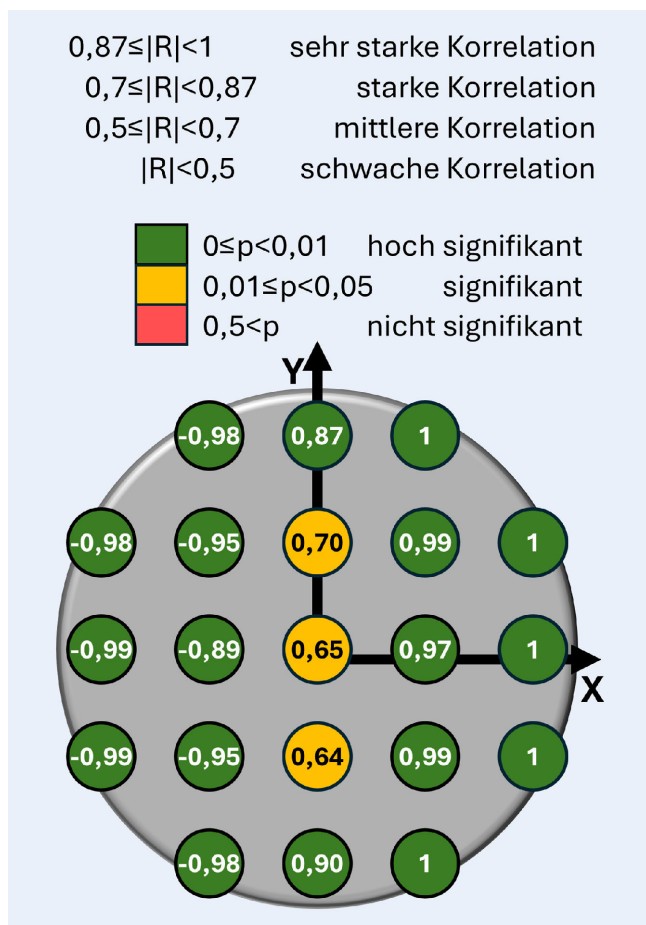
In Bild 9 ist zu erkennen, dass die Sensoren, die auf der rechten Seite des Gesenks positioniert sind, einen klaren positiven Trend zeigen. Mit zunehmendem Versatz steigt die Fläche



**Bild 8.** Vergleich der Ergebnisse der Berechnung der Flächen zwischen den Kurven der Sensoren 0\_0 und 15\_0 im Bereich von 15 bis 32,5 mm Pressenweg. Grafik: IPH



**Bild 9.** Übersicht der Ergebnisse der Berechnung der Fläche zwischen den jeweiligen Kurven für den Pressenweg von 15 bis 32,5 mm, aufgetragen über den Versatz an den jeweiligen Sensorpositionen in einer skizzenhaften Darstellung der Gravur. Grafik: IPH



**Bild 10.** Übersicht der Ergebnisse der Korrelations- und Signifikanzanalyse für die jeweiligen Sensoren Grafik: IPH

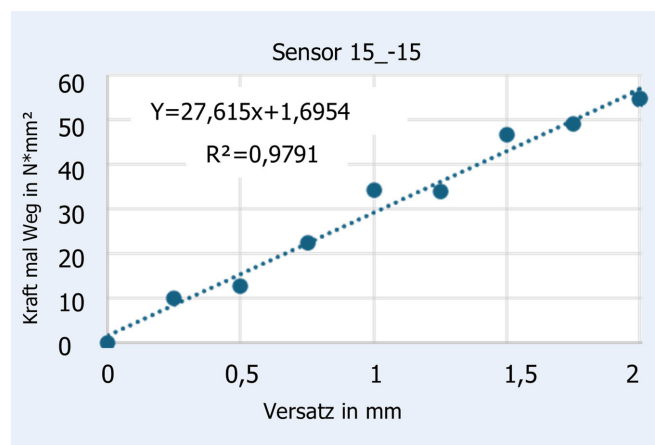
zwischen den Kurven an. Die Sensoren, die mittig in X-Richtung positioniert sind, zeigen keinen eindeutigen Trend. Die Sensoren, die in negativer X-Richtung platziert sind, zeigen einen leicht negativen Trend. Die Werte sind betragsmäßig kleiner als die der Sensoren, die in positiver X-Richtung positioniert sind. Um zu prüfen, welche Sensoren signifikante Korrelationen zeigen, wurde eine Pearson-Korrelationsanalyse für alle Sensoren durchgeführt.

## 5 Korrelations- und Signifikanzanalyse

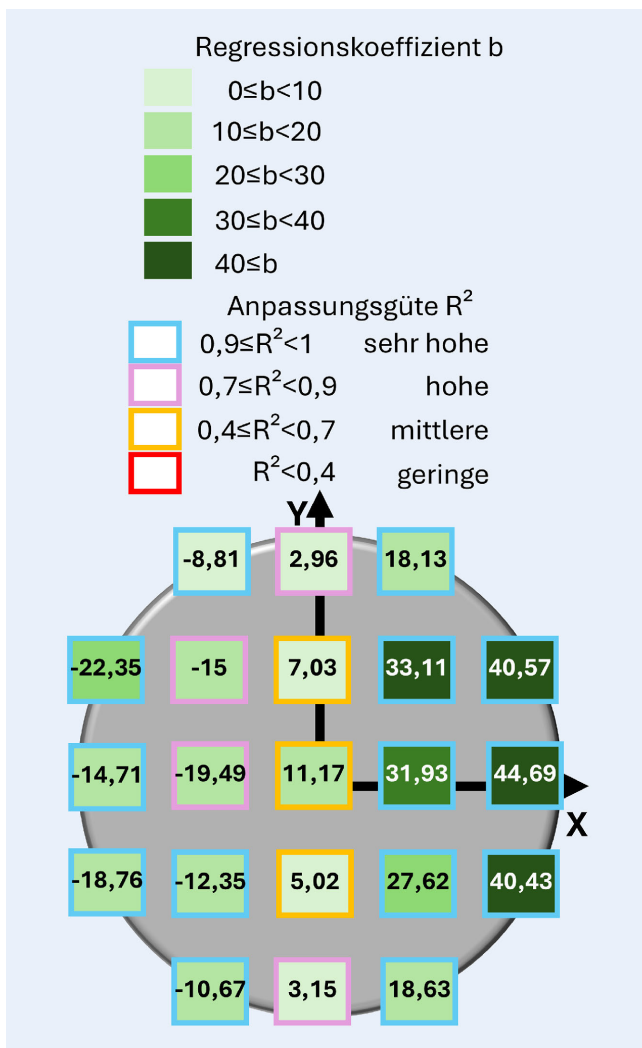
Im Folgenden werden die Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Pearson sowie der Signifikanzanalyse mittels einseitig gerichteten t-Test gezeigt. Für jede Datenreihe, die je einem Sensor zugeordnet ist, wird der Korrelationskoeffizient R, die Anpassungsgüte  $R^2$  und der Signifikanzkennwert p bestimmt. Für die Pearson-Korrelationsanalyse gibt der Korrelationskoeffizient R die Stärke des linearen Zusammenhangs zwischen dem Versatz und den dazu gehörigen berechneten Werten für die Fläche zwischen den Kurven an. Der Korrelationskoeffizient R kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Sowohl die Werte  $R = 1$  und  $R = -1$  stehen dabei für perfekte Korrelationen, wobei  $R = 1$  eine negative Korrelation darstellt. Mithilfe der Anpassungsgüte  $R^2$  wird die Güte der linearen Regression untersucht. Dieser Wert ergibt sich aus der Streuung der Datenpunkte. Über den p-Wert wird die Signifikanz beurteilt. Dieser Wert gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der die Hypothese, dass es sich um keine oder um eine gegenläufige Korrelation handelt, zutrifft [8].

Die Ergebnisse der Korrelations- und Signifikanzanalyse sind in **Bild 10** zusammengefasst. Die Zahlen an den jeweiligen Sensorpositionen zeigen die Stärke der Korrelation an. Die Farbe der Sensorpositionen ermöglicht eine schnelle Beurteilung des Signifikanzniveaus.

Das Bild zeigt, dass alle Sensoren, die auf der rechten Seite des Gesenks platziert sind, eine hoch signifikante, sehr starke positive Korrelation aufweisen. Die Sensoren, die in negativer X-Richtung platziert sind, haben alle eine hoch signifikante, sehr starke negative Korrelation. Die Sensoren, die ohne Versatz in X-Richtung platziert sind, zeigen zum Teil nur eine mittlere Korrelation. Nur zwei dieser Sensoren haben eine hohe Signifikanz. Für die Daten, die in **Bild 9** dargestellt sind, wird eine lineare Regression gebildet. Am Beispiel von Sensor 15\_-15 ist dies in **Bild 11** dargestellt. Die gestrichelte Linie in **Bild 11** ist die Regressionsgerade.



**Bild 11.** Darstellung der linearen Regression der Daten mit Darstellung der Regressionsgleichung und der Anpassungsgüte. Grafik: IPH



**Bild 12.** Vergleich der Regressionskoeffizienten und der Anpassungsgüte der Gleichungen der verschiedenen Sensoren. Grafik: IPH

Oben links in Bild 9 sind die Regressionsgleichung mit dem Regressionskoeffizienten, sowie die Anpassungsgüte angegeben.

Die Regressionskoeffizienten der Regressionsgleichungen unterscheiden sich von Sensor zu Sensor. **Bild 12** zeigt die Regressionskoeffizienten der Regressionsgleichungen der jeweiligen Sensoren. Die betragsmäßig niedrigeren Regressionskoeffizienten sind mit hellerer Farbe markiert, die höheren mit dunklerer Farbe. Zudem ist über die Umrandung der Felder, die den Regressionskoeffizienten zeigen, eine Einordnung der Anpassungsgüte der Regressionsgleichung möglich.

Die Regressionsgleichungen der Sensoren, die in Richtung des Versatzes des Halbzeugs positioniert sind, weisen größere Regressionskoeffizienten auf als die der Sensoren, die in entgegengesetzter Richtung platziert sind. Die Regressionsgleichungen der Sensoren, die ohne Versatz in X-Richtung im Gesenk platziert sind, weisen mittlere bis hohe Anpassungsgüten auf. Die Sensoren, die auf der linken Seite des Gesenks positioniert sind, zeigen hohe bis sehr hohe Anpassungsgüten. Die Sensoren, die auf der rechten Gesenkhälfte positioniert sind, zeigen alle eine sehr hohe Anpassungsgüte.

## 6 Fazit

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Versatz des Halbzeugs Auswirkungen auf den Verlauf der Kraftkurven hat. Diese Unterschiede sind in den Kraftverlaufskurven erkennbar. Die Untersuchungen haben auch gezeigt, dass diese Unterschiede je nach Sensorposition unterschiedlich stark ausfallen. Die Auswertung der Korrelations- und Signifikanzanalyse zeigte, dass ein Großteil der Sensoren starke bis sehr starke Korrelationen bei hoher Signifikanz aufweisen. Die Sensoren, die entgegengesetzt der Versatzrichtung platziert sind (linke Gesenkhälfte) zeigten negative Korrelationen, die in der Versatzrichtung positionierten Sensoren (rechte Gesenkhälfte) zeigten positive Korrelationen.

Ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl der Sensoren ist neben der Stärke der Korrelation und dem Signifikanzniveau auch die Steigung der Regressionsgleichung. Die Sensoren mit einem großen Regressionskoeffizienten weisen deutlichere Unterschiede der aufgenommenen Kräfte bei gleicher Änderung des Versatzes auf. Wenn durch Aufzeichnen des Kraftverlaufs auf die Position des Halbzeugs geschlossen werden soll, haben Messungenauigkeiten und Rauschen bei diesen Sensoren einen geringeren Einfluss auf die Aussage, ob Versatz vorliegt und wie stark dieser ist. Die Aussagen die Anhand von Sensoren mit hohem Regressionskoeffizienten getroffen werden sind robuster.

Auf Basis dieser Ergebnisse sind die Sensoren 30\_0, 30\_15, 30\_-15 und -30\_15 besonders geeignet, Versatz in X-Richtung zu detektieren. Diese Sensoren haben eine sehr starke Korrelation mit hoher Signifikanz. Zudem verfügen diese Sensoren über hohe Regressionskoeffizienten bei sehr hoher Anpassungsgüte.

Für die Ermittlung der Versatzrichtung ist die Kraftverlaufskurve des Halbzeugs, das ohne Versatz eingelegt wurde als Referenz notwendig. Ist diese Kurve bekannt, kann über die Fläche zwischen den Kurven eine Aussage über die Richtung des Versatzes in X-Richtung getroffen werden.

Wird ein Halbzeug mit Versatz in positiver X-Richtung umgeformt, wird bei Berechnung der Fläche zwischen den Kurven für Sensor 30\_0 ein positiver Wert herauskommen. Je nach dem wie hoch dieser Wert ist, kann auf die Größe des Versatzes in X-Richtung geschlossen werden. Sensor -30\_15 wird gleichzeitig ein negatives Ergebnis zeigen. Wird ein Halbzeug mit Versatz in negativer X-Richtung umgeformt, wird Sensor -30\_15 ein positives Ergebnis zeigen. An der Größe des Wertes kann auf den Versatz in negativer X-Richtung geschlossen werden. Sensor 30\_0 wird in diesem Fall ein negatives Ergebnis haben.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden Simulationen durchgeführt, um die Möglichkeit zu untersuchen anhand der Kraftverläufe eine Aussage über die Positionierung des Halbzeugs zu treffen. Dafür wurden 21 Sensorknoten rasterförmig auf ein Gesenk aufgebracht. Die Kraftverläufe über den Pressenweg wurden aufgenommen. Es wurde ein Bereich für die weiteren Untersuchungen gewählt, in welchem Unterschiede der Kurven abhängig vom Versatz des Halbzeugs erkennbar sind. Es wurde die Flächen zwischen den Kraftverlaufskurven von Halbzeugen, die mit Versatz positioniert sind, und der Kraftverlaufskurve des ohne Versatz positionierten Halbzeugs berechnet. Die berechneten Werte wurden über den Versatz aufgetragen. Anhand dieser Daten wurde eine Pearson-



Korrelations- und Signifikanzanalyse durchgeführt. Diese zeigte, dass bei einem Großteil der Sensoren hoch signifikante, starke bis sehr starke Korrelationen auftreten. Für die Auswahl geeigneter Sensoren wurden zudem die Regressionskoeffizienten und die Anpassungsgüten herangezogen. Es wurden solche Sensoren als geeignet betrachtet, deren Regressionskoeffizienten einen größeren Betrag aufweisen, da diese weniger anfällig für Störgrößen sind. Zudem sollten die Anpassungsgüten sehr hoch sein. Es wurden Sensoren benannt, die geeignet sind, um Versatz in X-Richtung zu detektieren.

Im weiteren Verlauf ist zu prüfen, welche Kombination von Sensoren eine zuverlässige Aussage bezüglich des vorliegenden Versatzes ermöglicht. Weiterhin ist zu prüfen, ob ein Sensor allein ausreichend gute Ergebnisse liefert, um eine Aussage bezüglich des Versatzes in X-Richtung zu treffen. Dafür sollten auch die Sensoren einbezogen werden, die 15 mm in positiver und negativer Richtung im Gesenk positioniert sind. Diese weisen zwar etwas schlechtere Werte bezüglich Korrelation und Signifikanz auf als die Sensoren, die 30 mm in der jeweiligen Richtung platziert sind, jedoch sind die an diesen Positionen aufgenommenen Kräfte insgesamt höher. Die insgesamt höheren Kräfte können bei einer praktischen Erprobung des Messkonzepts von Vorteil sein, da in diesem Fall etwaige Störgrößen das Ergebnis weniger stark verfälschen als bei insgesamt niedrigeren Kräften.

Da in dieser Untersuchung nur der Versatz in X-Richtung betrachtet wurde, werden weitere Simulationen durchgeführt und ausgewertet, um diese Aussagen auch in Bezug auf einen Versatz in Y-Richtung treffen zu können. Zudem soll untersucht werden, ob die gewählten Sensoren auch eine Aussage bei einem kombinierten Versatz in X- und Y-Richtung zulassen.

Ziel der Untersuchungen ist, mit einer möglichst geringen Anzahl an Sensoren sowohl Versatz in positiver und negativer X-Richtung, in positiver und negativer Y-Richtung, sowie Versatz in kombinierter X- und Y-Richtung zu detektieren. Welche Anzahl von Sensoren eine ausreichend hohe Vorhersagegüte erreicht, muss durch weitere Untersuchungen geprüft werden. Dazu müssen Simulationen mit definiertem Versatz in verschiedene Richtungen durchgeführt werden. Ein Vergleich verschiedener Sensorkombinationen kann zeigen, welche Kombination die beste Vorhersagegüte erreicht. Sind die Sensorpositionen bestimmt, sollen die Ergebnisse in praktischen Versuchen verifiziert werden.

## FÖRDERHINWEIS

Das Forschungsprojekt „Entwicklung einer vorausschauenden Überwachung von Schmiedeprozessen zur Erschließung qualitativer und wirtschaftlicher Potenziale“ („VorÜber“) wurde über die Industrielle Gemeinschaftsforschung mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert.

## Literatur

- [1] Kriwall, M.; Schellenberg, D.; Niemann, C. et al.: Optical measurements and force measurements as a basis for predicting the tool life of forging dies. *Production Engineering Research & Development*, 2024, doi.org/10.1007/s11740-024-01282-2
- [2] Zorn, W.; Müller, P.; Drossel, W.-G.: Modulares Kraftmesssystem. *wt Werkstattstechnik online* 105 (2015) 10, pp. 680–686. Internet: [www.werkstattstechnik.de](http://www.werkstattstechnik.de). Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, doi.org/10.37544/1436-4980-2015-10
- [3] Ecker, W.; Doege, E.; Terzyk, T.: Möglichkeiten der Prozessüberwachung beim Gesenkschmieden mit Grat. *Umformtechnik* 27 (1993) 6, S. 405–410
- [4] Cheng, Y. M.: System for Real-time Measurement and Monitoring of Forging Force of Screw-forming Machine. *Sensors and Materials* 33 (2021) 11 pp. 3957–3969, doi.org/10.18494/SAM.2021.3722
- [5] Durand, C.; Freund, L.; Baudouin, C. et al.: Comparison of different sensor technologies to monitor a forging process. *ESAFORM 2021, 24th International Conference on Material Forming, Liège/BEL, 2021*, dx.doi.org/10.25518/esaform21.1475
- [6] Kim, S.-Y.; Ebina, A.; Sano, A. et al.: Monitoring of process and tool status in forging process by using bolt type piezo-sensor. *Procedia Manufacturing* (2018) 15, pp. 542–549, doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.275
- [7] Schleinitz, A.; Sewohl, A.; Schlegel, H. et al.: Detection of the Force Distribution Close to the Effective Site in Forming Machines for a Force Control. *7th International Conference on Control, Mechatronics and Automation, ICCMA 2019, Delft/NED, 2019*, pp. 216–220, doi.org/10.1109/ICCMA46720.2019.8988609
- [8] DATAtab Team: Pearson Korrelation. *Korrelationsanalyse*. Stand: 2024. Internet: [datatab.de/tutorial/pearson-korrelation](https://datatab.de/tutorial/pearson-korrelation). Zugriff am 24.09.2024




**Dipl.-Ing. Mareile Kriwall**  
 kriwall@iph-hannover.de  
 Tel. +49 511 / 27976-330  
 Foto: IPH

**Christoph Niemann, B.Sc.**

**Jörn Eichstaedt, B.Eng.**

**Dr.-Ing. Malte Stonis** 

**Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens** 

IPH – Institut für Integrierte Produktion  
 Hannover gemeinnützige GmbH  
 Hollerithallee 6, 30419 Hannover  
[www.iph-hannover.de](http://www.iph-hannover.de)

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Leibniz Universität Hannover, Institut für  
 Umformtechnik und Umformmaschinen IFUM  
 An der Universität 2, 30823 Garbsen  
[lfum.uni-hannover.de](mailto:lfum.uni-hannover.de)  
[info@ifum.uni-hannover.de](mailto:info@ifum.uni-hannover.de)

## LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons  
 Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)